



CHARLES UNIVERSITY
Faculty of Science

Přírodovědecká fakulta UK



Ústav výzkumu globální
změny AV ČR



Ústav pro hydrodynamiku
AV ČR

Project TAČR SS05010124

**Hodnocení vlivu změn krajinného pokryvu na lokální hydrologii
a klima v Krkonošském národním parku s využitím dálkového průzkumu
Země a hydrologického modelování**

Dokument prokazující dosažení výsledku

Číslo výsledku dle ISTA: SS05010124-V30

Název výsledku: Geodatabáze vývoje klimatických a hydrologických proměnných

Druh výstupu/výsledku: vedlejší výsledek

Termín dosažení výsledku: 12/2023

Autoři výsledku (jméno/organizace): Milada Matoušková, Miroslav Jonáš, Vojtěch Vlach,
Adam Bartůšek, Zuzana Hýrková, Václav Kavalír

Cíl/účel vytváření výsledku

Cílem je příprava databáze hydrologických a klimatických proměnných, klimatická a hydrologická charakteristika zájmového území. Databáze je vstupem pro navazující analýzy vývoje klimatických a hydrologických proměnných a detekci trendů srážko-odtokového režimu. Databáze slouží jako podklad pro tvorbu specializované mapy s odborným obsahem vývoje klimatických a hydrologických poměrů zájmového území. Základním zdrojem vstupních dat jsou homogenizované řady vybraných klimatických a hydrologických proměnných ČHMÚ.

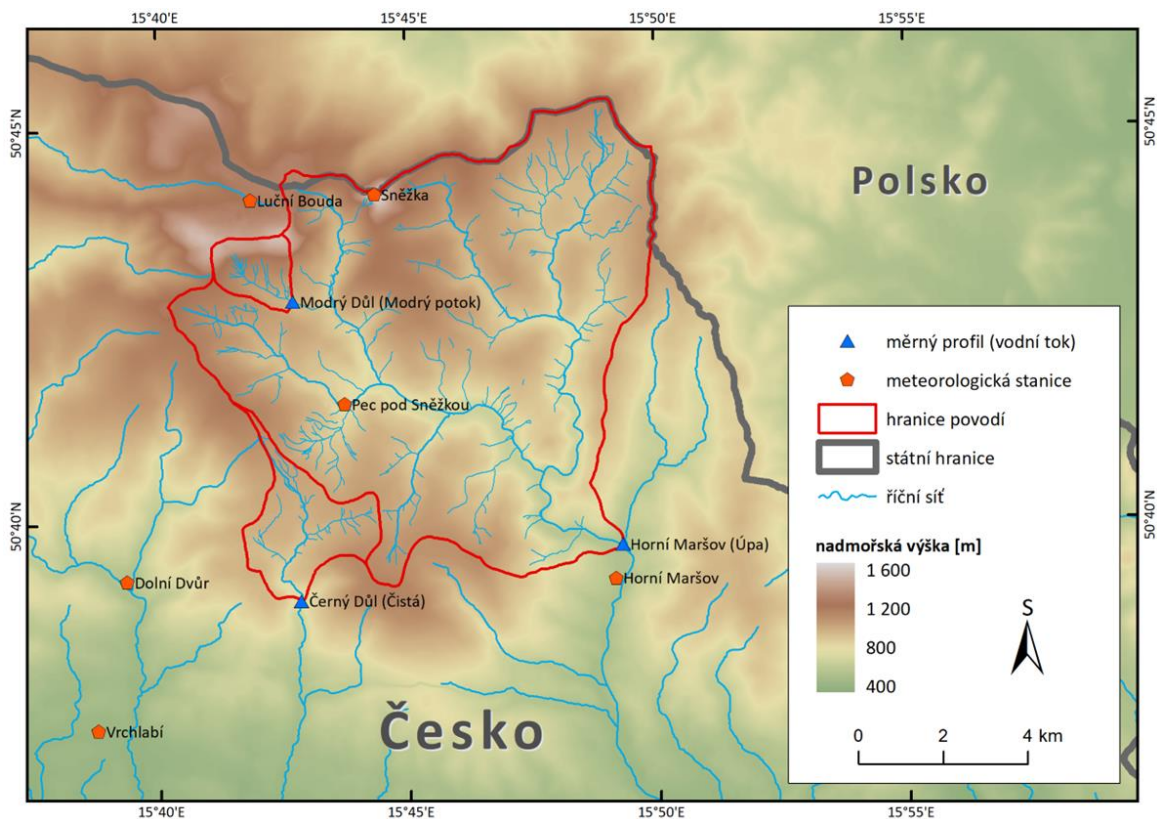
Stručný popis postupu tvorby výsledku (vstupní data, použité metody)

Vlastní práce navazují na výstupy projektu z roku 2022 viz DPDV V30.

Pozornost je věnována komplexnímu hodnocení vývoje teplot vzduchu, úhrnů srážek a změn odtokového režimu. Aplikovány byly statistické testy pro hodnocení trendů vývoje vybraných charakteristik.

Prezentace výsledku (popis, obrázky, grafy apod.)

Zájmovým územím jsou povodí horní Úpy, včetně Modrého potoka a povodí horní Čisté v Krkonoších. Plocha povodí horní Úpy po závěrový profil Horní Maršov činí 81,989 km². Plocha povodí Čisté po závěrový profil Černý Důl je 6,53 km² (Mapa 1).



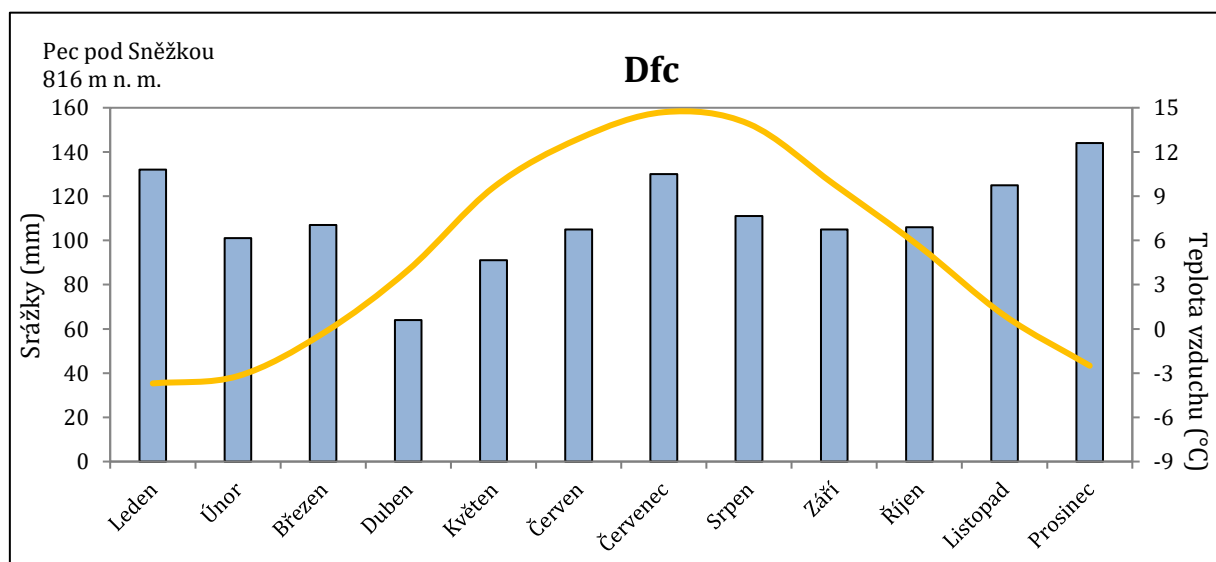
Mapa 1 Zájmové území – povodí horní Úpy a horní Čisté v Krkonoších

1. Analýza klimatických datových řad

Teplota vzduchu

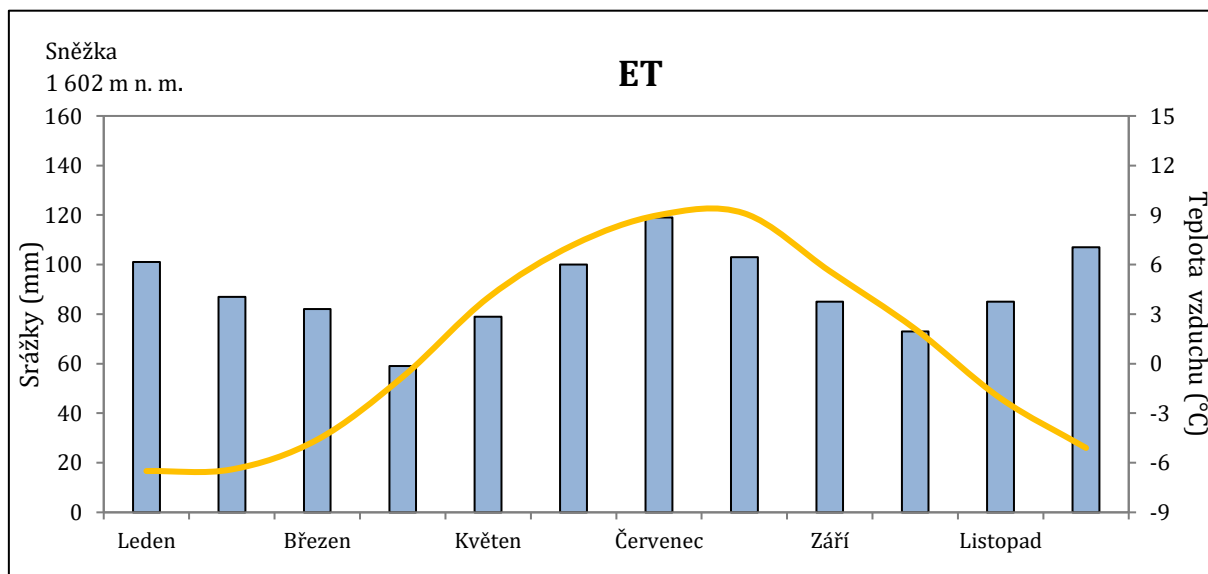
Pro analýzu teplotní poměrů vzduchu byla použita hlavně data ze stanice Pec pod Sněžkou (816 m n.m.). Jedná se o jedinou stanici měřící teplotu vzduchu na úpatí vrcholových partií v povodí horní Úpy a blízko rozvodnice povodí horní Čistý. Další stanice měřící teplotu vzduchu v povodích nalezneme na polské straně vrcholu Sněžky (1 603 m n.m.) a těsně za hranicí povodí u Luční boudy (1 413 m n.m.).

Na vrcholu Sněžky je průměrná roční teplota vzduchu pro sledované období, (1982-2021), 1,00°C s patrným nárůstem, zejména v posledních letech, kdy mezi roky 2014-2021 pouze tři roky (2016, 2017, 2021) nebyla zaznamenána nižší průměrná roční teplota než 2°C, v roce 2021 se po dlouhé době dostala pod hodnotu průměru za celé období. V Peci pod Sněžkou je pro stejné období průměrná roční teplota 5,18°C. Roční chody teploty vzduchu pro stanici Pec pod Sněžkou (Obr. 1) a pro stanici Sněžka (Obr. 2) byly zpracovány formou klimagramů. Je vidět, že nejchladnějším měsícem je ve stanici Pec pod Sněžkou leden, ale pro stanici Sněžka je toto minimum posunuté do února a podobně tomu je v případě nejteplejšího měsíce, kdy na Sněžce jím není červenec jako v Peci pod Sněžkou, ale měsíc srpen. I v této oblasti je patrný nárůst teploty vzduchu za poslední roky. Za sledované 40leté období se průměrná roční teplota ve stanici Pec pod Sněžkou zvýšila téměř o 1,5°C, teplotně nadprůměrné jsou

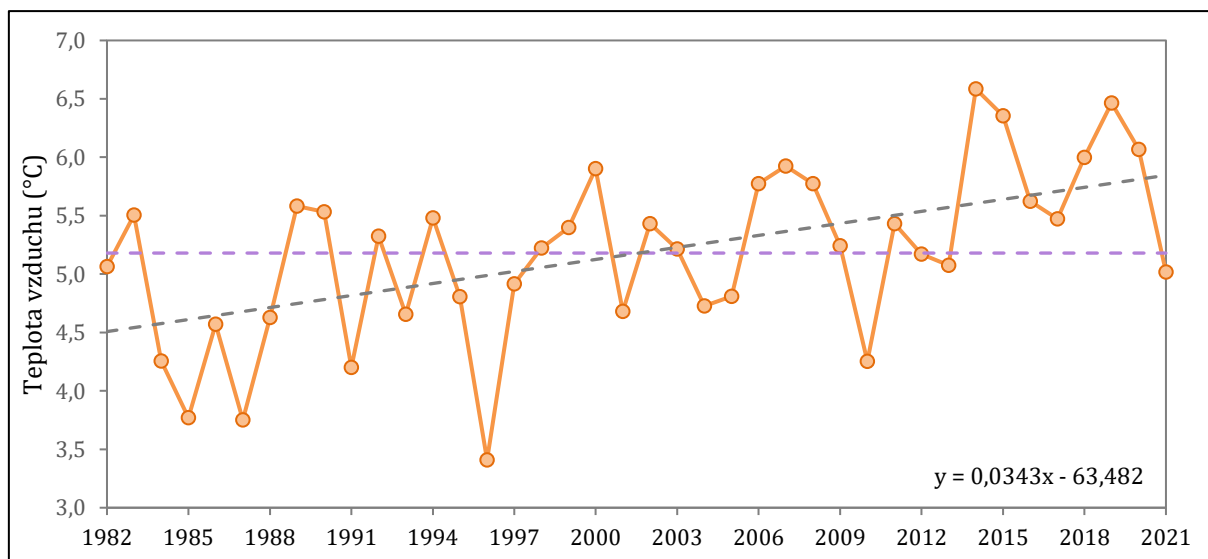


především roky od roku 2013 (Obr. 3).

Obr. 1 – Klimagram za období 1982-2021, stanice Pec pod Sněžkou



Obr. 2 – Klimagram za období 1982-2021, stanice Sněžka



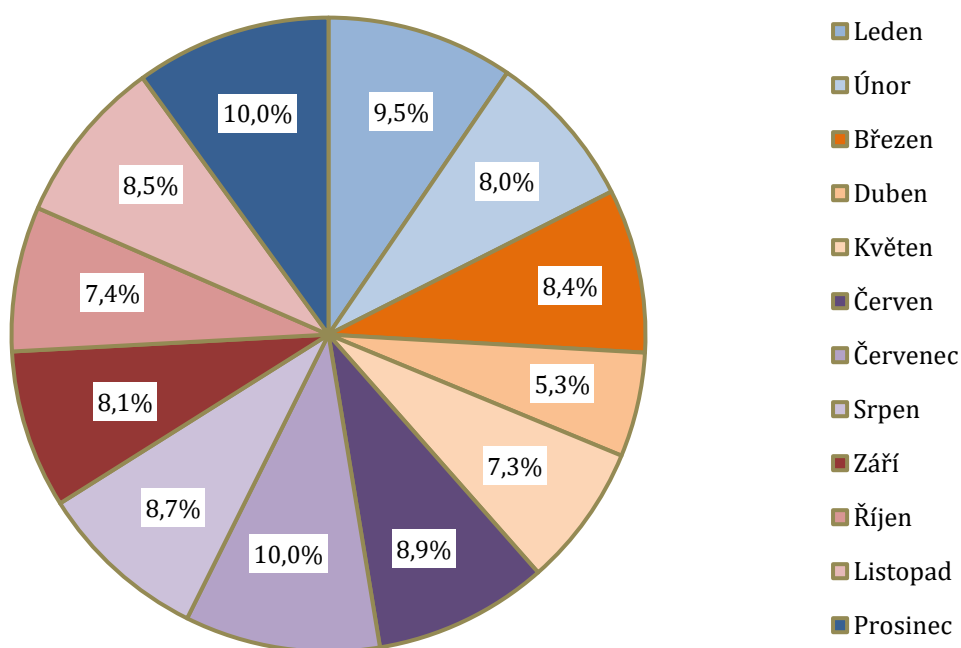
Obr. 3 – Vývoj průměrných ročních teplot na stanici Pec pod Sněžkou (1982 – 2021). Fialová linie: průměr za sledované období, šedá linie: lineární trend.

Srážky

Množství srážek v zájmovém území velmi rychle narůstá v S-SZ směru do nitra pohoří. Průměrné roční úhrny se v zájmovém území pohybují od hodnot okolo 1 000 mm v JV části povodí až po 1 400 mm v horských údolích a vrcholových částech pohoří v SZ části oblasti. Pro srovnání, v Peci pod Sněžkou, je průměrný roční úhrn za sledované období 1982-2021 1 323 mm, kdežto na vrcholu Sněžky okolo 1 080 mm. Bez doplňujících informací o monitoringu na polské straně Sněžky je složité tento rozdíl objektivně vysvětlit. Směrem

k závěrovému profilu srážkové úhrny již jasně klesají, v Horním Maršově je za toto období průměrný roční úhrn 1 020 mm.

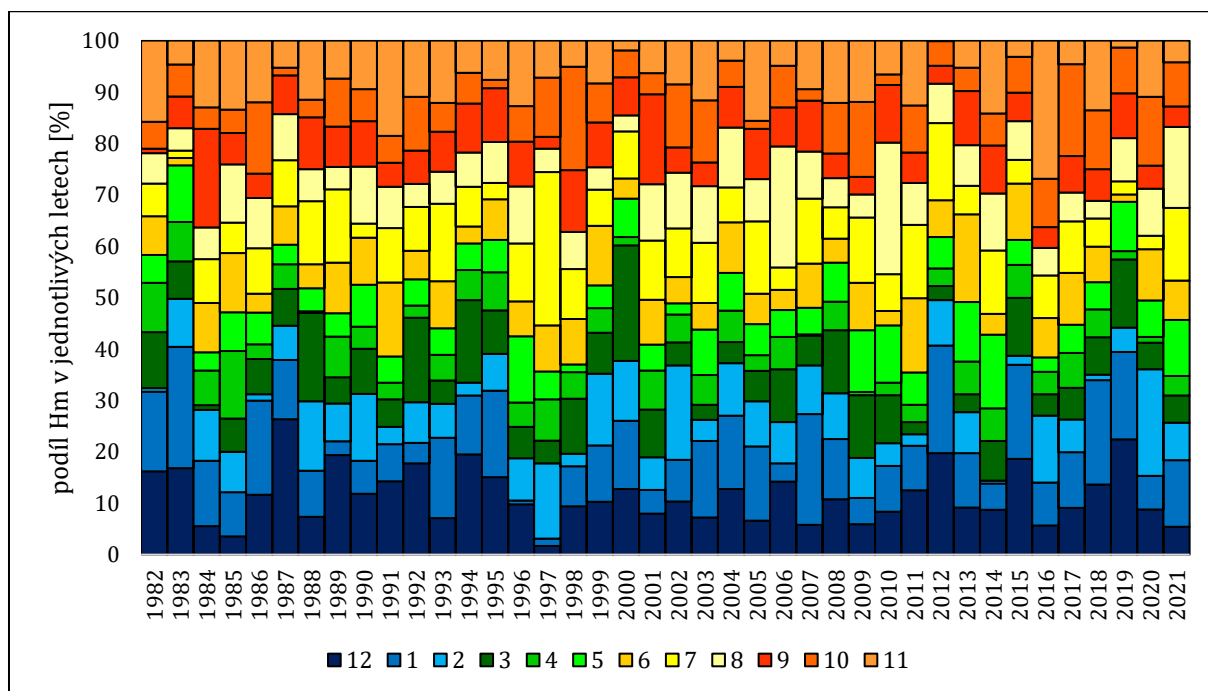
Obecně lze konstatovat, že rozložení srážkových úhrnů do jednotlivých měsíců je celkem rovnoměrné (Obr. 4). Průměrně nejnižší srážkové úhrny jsou zaznamenány v dubnu, konkrétně 5,33 % celkového ročního úhrnu. Všechny ostatní měsíce se pohybují v rozmezí 7-10 %. Duben, společně s úněm, je měsícem, kdy jsou nejčastěji zaznamenána srážková měsíční minima v průběhu roku. Naopak srážkově nejbohatší měsíce jsou poměrně rovnoměrně rozloženy do celého roku, nejvíce jich připadá na zimní měsíce – prosinec a leden.



Obr. 4 – Měsíční rozložení srážkových úhrnů pro sledované období (1982-2021), stanice Horní Maršov

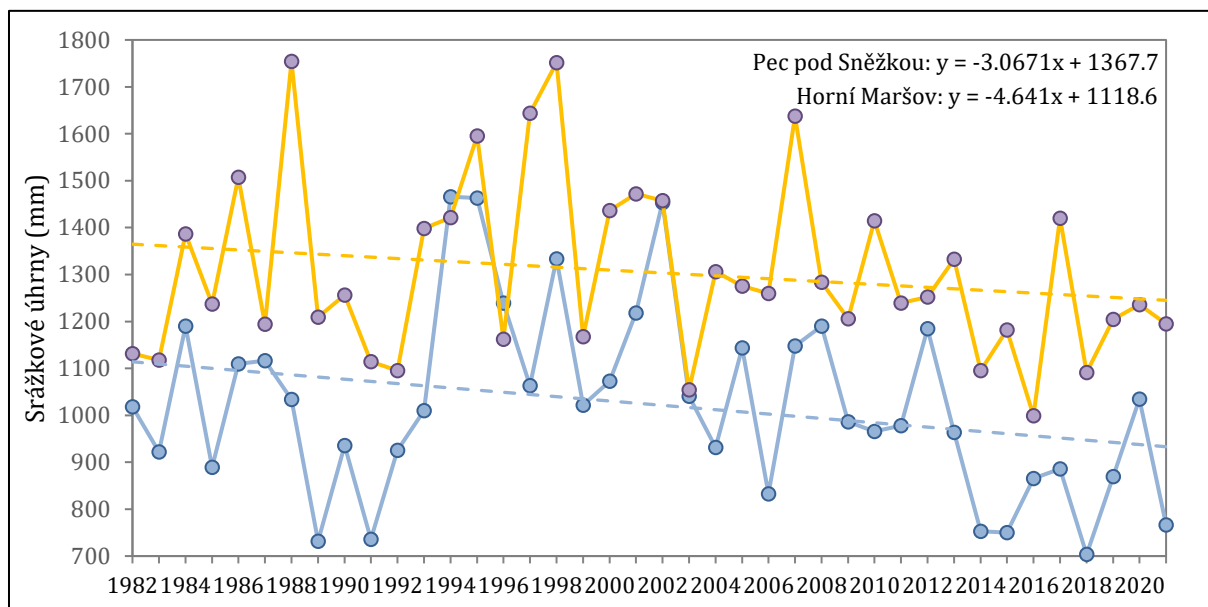
Pro analýzu rozložení měsíčních srážkových úhrnů pro povodí Čisté byla využita data ze stanice Dolní Dvůr. Nejvyšší úhrny srážek byly zaznamenávány od 2. poloviny 90. let do začátku 21. století. Po roce 2007 se úhrny začínají opět pomalu snižovat, což je patrně důsledkem přirozené dynamiky srážek v rámci jejich interanuální variability. Podíváme-li se na podíl měsíčních srážkových průměrů v jednotlivých ročních obdobích, (Obr. 5), tak jsou patrné maximální podíly srážek v letních měsících, kdy se často vyskytují konvektivní srážky. Při porovnání s hydrologickými daty průtoků se však nezdá, že by měly zásadní vliv na letní vodnosti. Vysoké srážkové úhrny byly naměřeny také v zimě, kdy se po většinou jedná o srážky

sněhové. Nejnižší úhrny srážek byly zaznamenány na jaře, kdy se na odtoku zásadně podílí tání sněhu a Čistá má tak největší vodnost za hydrologický rok.



Obr. 5 – Rozložení chodu měsíčních srážek, stanice Dolní Dvůr (1982-2021)

Podíváme-li se na srážkové úhrny z posledních let v rámci stanic v povodí Úpy, tak lze pozorovat trend poklesu v období posledních 40 let pro stanici Horní Maršov i Pec pod Sněžkou (Obr. 6) a to o více než 150 mm pro obě stanice.



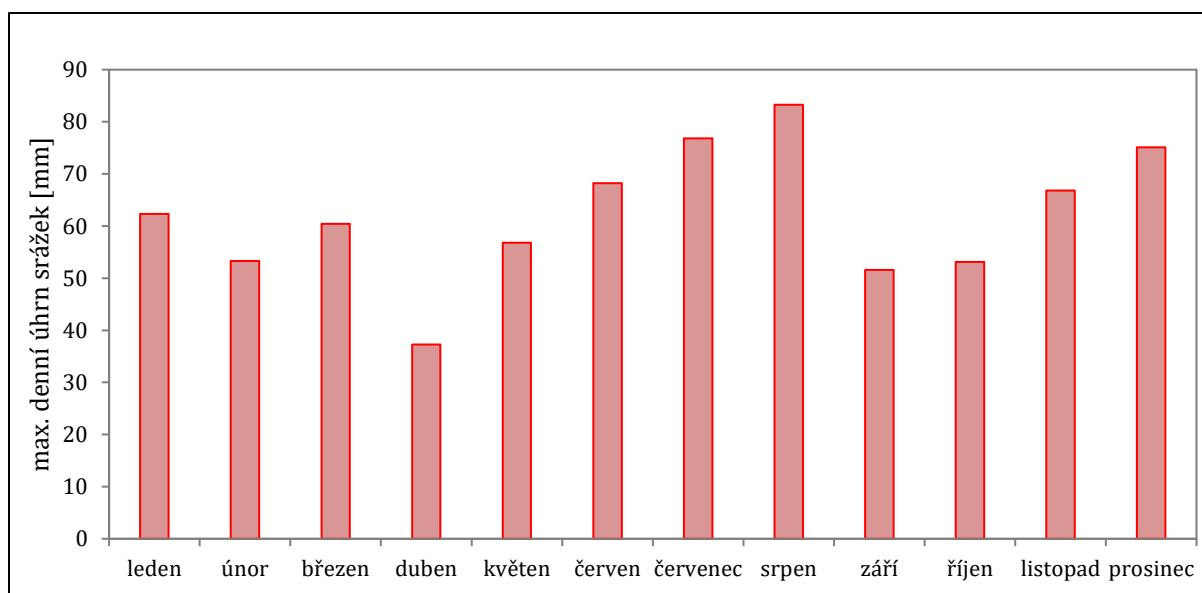
Obr. 6 – Roční úhrny srážek, stanice Pec pod Sněžkou (žlutě) a Horní Maršov (modře) za sledované období 1982-2021

Od roku 2014 pouze rok 2017 dosahoval nadprůměrných srážkových hodnot ve stanici Pec pod Sněžkou. Ve stanici Horní Maršov těchto hodnot dosáhl rok 2020. Rok 2016 (s pouhými

999 mm) a 2018 patřily k nejsušším v historii měření ve stanici Pec pod Sněžkou. Ve stanici Horní Maršov byl nejsušší rok 2018 se 703 mm. Oproti stanici v Peci pod Sněžkou jsou zde výraznější minima i v letech 1989 a 1991. Naopak nejvyšší zaznamenané úhrny byly zaznamenány v letech 1994, 1995 a 2002 v Horní Maršově s hodnotami nad 1 450 mm. V Peci pod Sněžkou jsou srážkově nejbohatší roky 1997 a 1988 s úhrny nad 1 750 mm. Z toho je patrné, že i přes svoji geografickou blízkost hraje orografie svou roli v distribuci srážek dané oblasti. Nejintenzivnější srážkové úhrny jsou povětšinou spjaty s bouřkovou činností. Pro stanice Horní Maršov, Pec pod Sněžkou i Sněžku jsou 3 nejvyšší srážkové úhrny zaznamenány v červnu, červenci či srpnu (Tab. 1). Obdobná analýza maximálních dosažených úhrnů byla provedena i pro níže položenou stanici – Dolní Dvůr, kde byly zaznamenány tyto denní maxima pro jednotlivé měsíce za celé pozorované období (Obr. 7). Nejnižší maximální úhrny vykazují jarní a podzimní měsíce (duben, září a říjen), naopak nejvyšší maximální úhrny byly detekovány pro letní měsíce (červenec a srpen).

Tab. 1 – Nejvyšší zaznamenané srážkové úhrny v povodí Úpy a Čisté za období 1982-2021

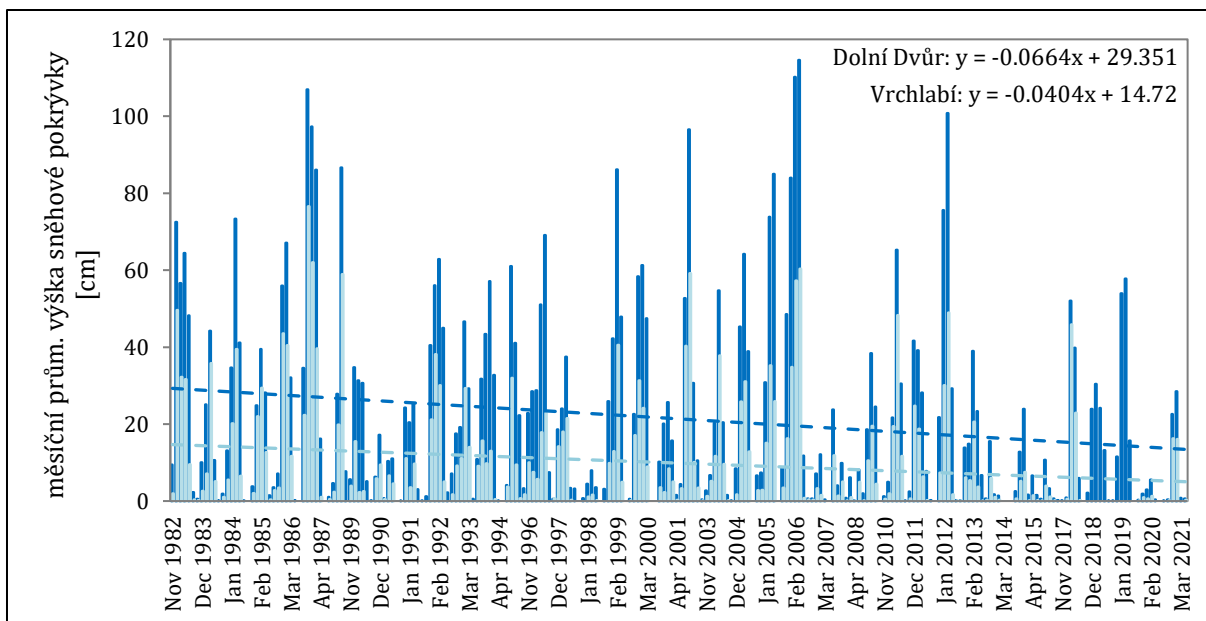
Stanice	Datum zaznamenání úhrnu	Srážkový úhrn (mm)
Horní Maršov	1.6.2013	130,3
	6.7.1997	85,0
	12.6.1996	83,5
Pec pod Sněžkou	6.7.1997	133,3
	7.8.2006	125,6
	19.7.1997	117,3
Sněžka	31.8.2002	118,3
	18.7.1997	107,7
	23.8.2021	104,4
Dolní Dvůr	18.8.2003	83,3
	6.7.1997	76,8
	29.12.1986	75,1



Obr. 7 – Maximální zaznamenané denní úhrny pro jednotlivé měsíce, stanice Dolní Dvůr (1982-2021)

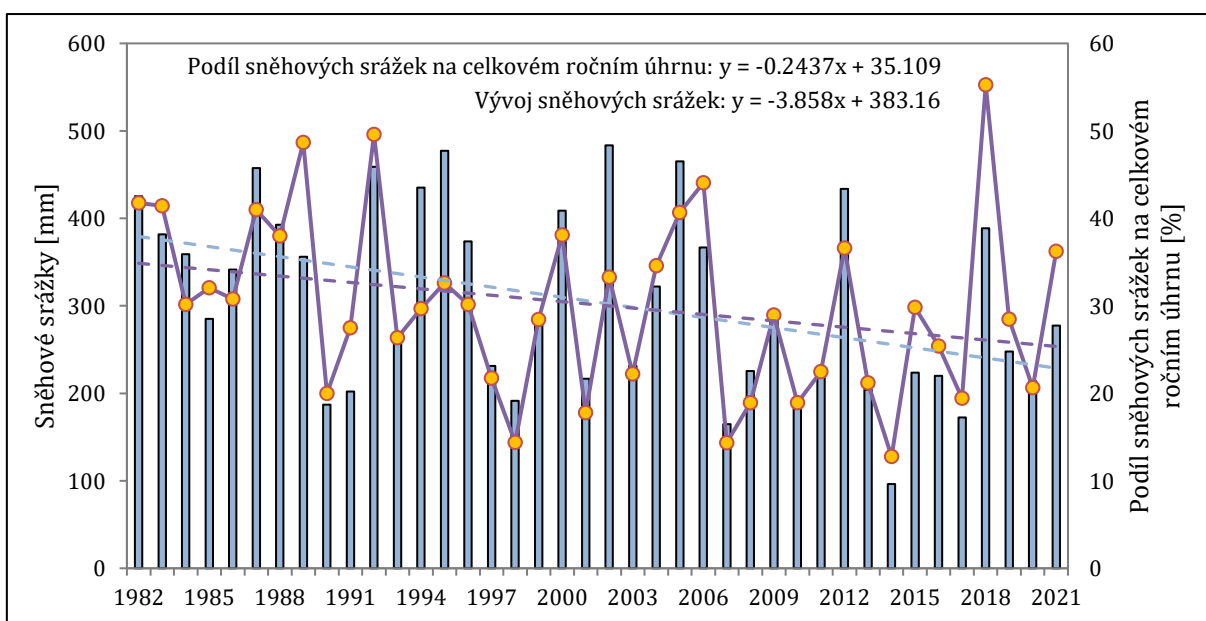
Sněhová pokrývka

Při charakterizování trvání sněhové pokrývky a jeho výšce byla využita data ze stanice Horní Maršov a Dolní Dvůr. Významnou roli jak na odtoku, tak na formě srážek v oblasti hraje právě sněhová pokrývka. Zpravidla je zde souvislá sněhová pokrývka od listopadu do dubna, ale doba jejího trvání se v posledních letech snižuje. Za posledních 40 let délka trvání sněhové pokrývky v Horním Maršově klesla o více než 35 dní. Na této stanici je minimem zima v roce 2007, kdy zde sníh ležel pouze 38 dní, naopak maximem je zima 1996 se 165 dny. Od zimy roku 2007 přesáhla doba trvání sněhové pokrývky 100 dní pouze v období zim 2010-2013 a v zimě roku 2018. V případě vývoje výšky sněhové pokrývky v Dolním Dvoře, (Obr. 8), můžeme za sledovaném období pozorovat její rapidní pokles. Nejvýraznější pokles je patrný od roku 2007, nicméně ještě do roku 2012 dosahovala maximální průměrná měsíční výška sněhové pokrývky i od 60 po více jak 100 cm, zatímco poté už v žádném měsíci průměr 60 cm nebyl dosažen. Ve většině případů byly maximální hodnoty zjištěny v únoru. Naopak minimální hodnoty výšky sněhové pokrývky byly zaznamenány v listopadu a dubnu, kdy v průměru činily řádově jen pár jednotek cm a výjimečně překročily 10 cm. Nejvyšší výška sněhové pokrývky byla v roce 1987 a 2006, nejnižší pak v letech 1998, 2007, 2016 a 2020, kdy byly v zimních měsících zaznamenány oproti jiným rokům vyšší teploty a vzhledem k nižší nadmořské výšce stanice Dolní Dvůr docházelo k tranzici sněhových srážek na dešťové. Při porovnání vývoje sněhových srážek s ještě níže položenou stanicí – Vrchlabí (Obr. 8) pak můžeme vidět, že míra variability u stanic položených v podhůří Krkonoš se liší jen marginálně.



Obr. 8 – Dlouhodobý vývoj výšky sněhové pokrývky, stanice Dolní Dvůr (tmavě modrá) a Vrchlabí (světle modrá), (1982-2021)

S poklesem trvání sněhové pokrývky klesá i celkový počet sněhových srážek a průměrná výška sněhu, která maxima dosahuje zpravidla v únoru či březnu. Celkové množství sněhových srážek v oblasti klesá s ohledem na nárůst teploty a srážky ze sněhových přechází do kapalných, a to i již ve vyšších nadmořských výškách. Za sledované období 1982-2021 ve stanici Pec pod Sněžkou kleslo množství srážek ve formě sněhu o více než 150 mm a patrný je i pokles podílu sněhových srážek na celkovém ročním úhrnu o přibližně 10 % (Obr. 9).



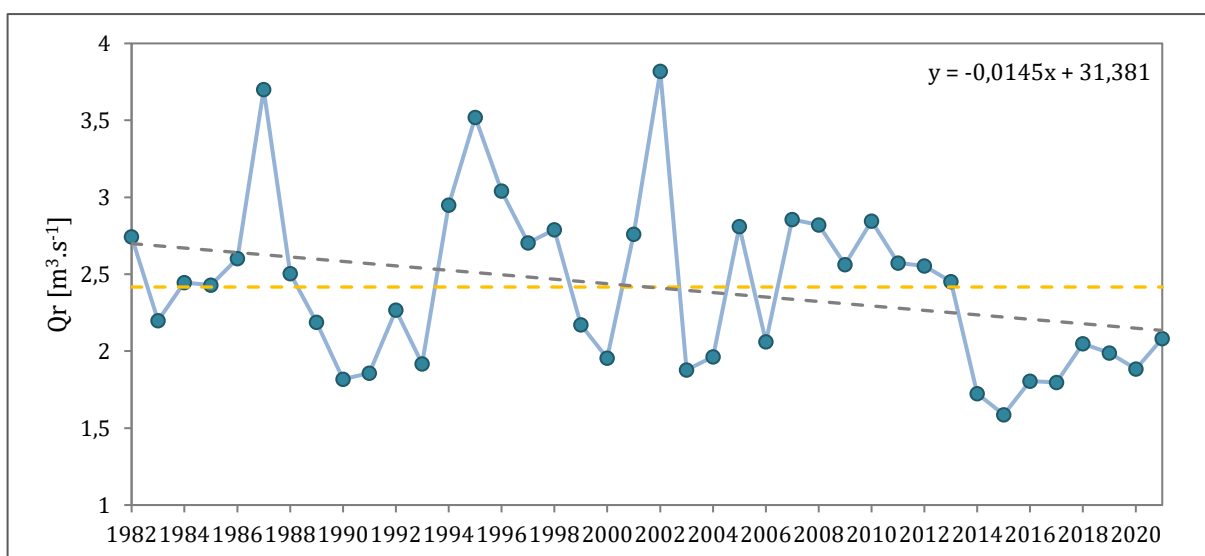
Obr. 9 – Vývoj sněhových srážek (modře) a jejich podílu na celkovém ročním úhrnu (oranžově), stanice Pec pod Sněžkou (1982-2021)

2. Analýza hydrologických datových řad

2.1. Povodí horní Úpy

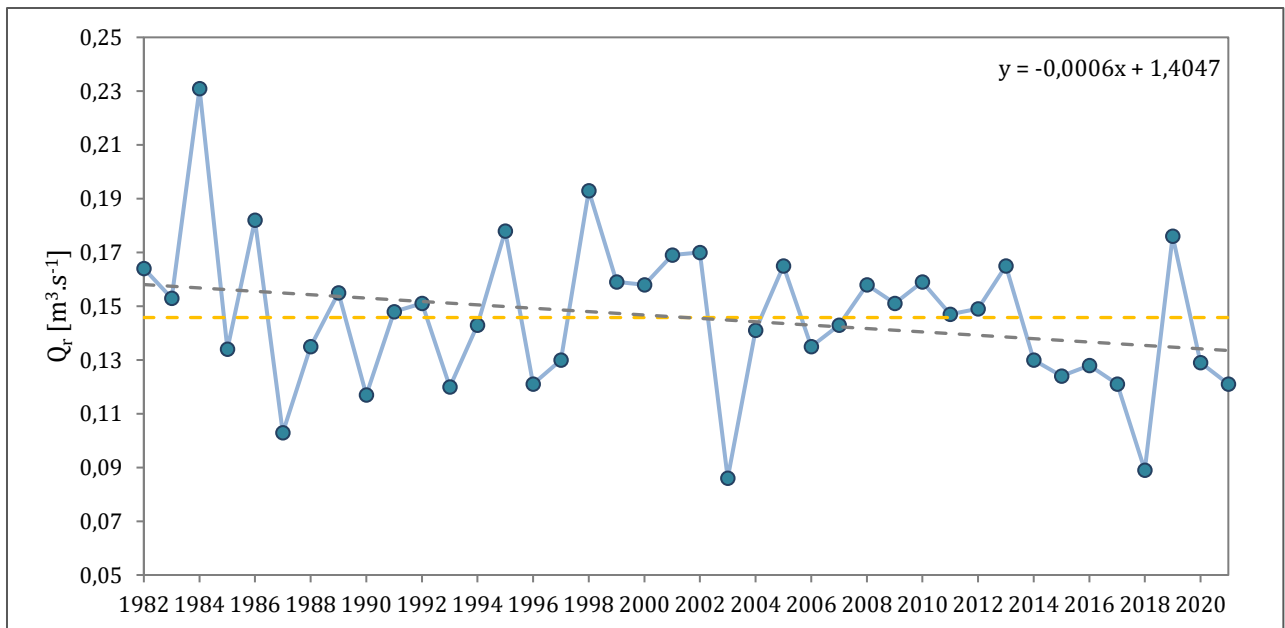
Pro analýzu hydrologických poměrů byla využita data ze stanice Úpa – Horní Maršov a Modrý potok, a to pro období hydrologických let 1982-2021. Výše položený závěrový profil na Úpě (Obří Důl) nebyl pro analýzu, vzhledem ke zkrácené dostupné datové řadě, použit.

Na stanici Horní Maršov mezi lety 1982-2021 průměrný roční průtok činil $2,42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Nejvyšší průměrné roční průtoky byly zaznamenány v letech 2002 ($3,82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a 1987 ($3,70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), nejnižší pak v letech 2015 a 2014 ($1,59 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, resp. $1,72 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), přičemž další dvě nejnižší hodnoty byly zaznamenány hned ve dvou následujících letech. Celkově bylo období mezi lety 2014 a 2021 sušší epizodou, kdy ani jeden rok nedosáhl průměrné hodnoty za celé sledované období. To způsobuje lineární tendenci poklesu průměrného ročního průtoků o cca $0,65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ za 40 let, což činí více než 25 % (Obr. 10).



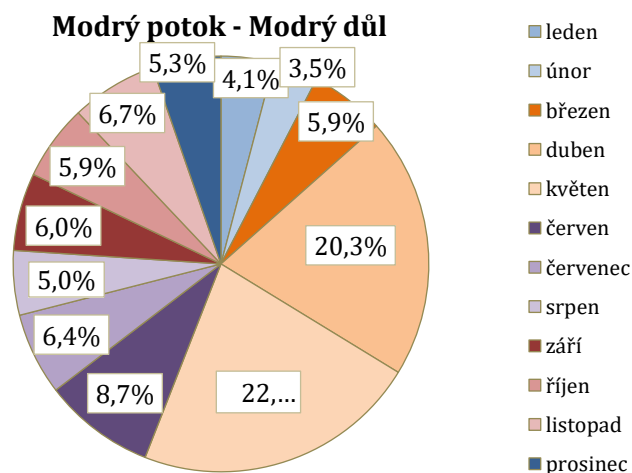
Obr. 10 – Vývoj průměrných ročních průtoků mezi lety 1982-2021, stanice Horní Maršov. Oranžová linie: dlouhodobý průměr

Na Modrém potoce dosáhl průměr ročních průtoků hodnoty $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, přičemž nejvíce vodné roky byly na rozdíl od Horního Maršova 1984 ($0,23 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a 1998 ($0,19 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Nejsuššími roky byly 2003 a 2018 se shodnými $0,08 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Sušší epizoda posledních 8 let je v případě Modrého potoka přerušena nadprůměrně vodným rokem 2019, na čemž se podílí především dubnové a květnové odtoky z tajícího sněhu. Lineární tendence poklesu průměrného ročního průtoků je zde cca $0,025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ za 40 let, což činí asi 16 % (Obr. 11).

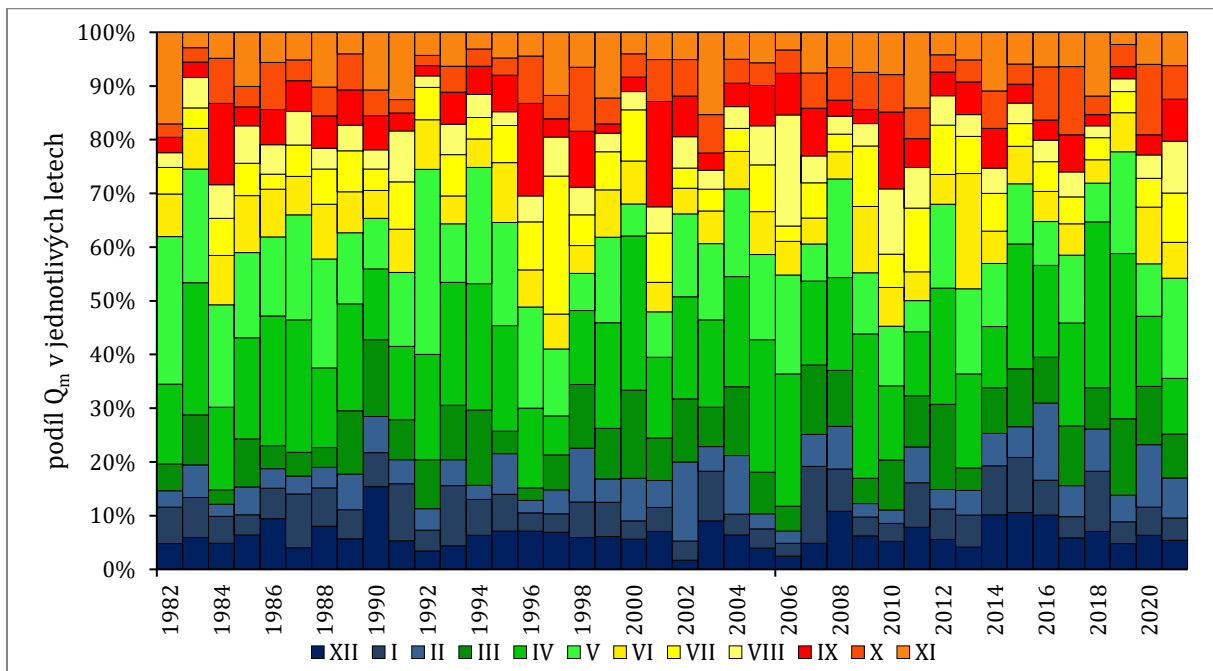


Obr. 11 – Vývoj průměrných ročních průtoků mezi lety 1982-2021, stanice Modrý potok. Oranžová linie: dlouhodobý průměr

Rozložení odtoku v průběhu roku je mírně nevyrovnané. Zatímco v případě Horního Maršova se jarní měsíce podílí na odtoku 43 %, na Modrém potoce je to dokonce 48 %. Na obou profilech je nejméně vodná zima, na Modrém potoce – 13 % oproti 19 % na profilu Horní Maršov (Obr. 12). Zbylá roční období jsou na obou profilech z hlediska vodnosti srovnatelná. Povodně se vzhledem ke sněhovo-dešťovému odtokovému režimu vyskytují nejčastěji v dubnu a květnu, doplněné jsou přívalovými povodněmi z letních intenzivních srážkových událostí. Graf rozložení ročního chodu Q_m (Obr. 13) pak ukazuje, že procentuální rozložení odtoku během roku se v průběhu sledovaného období příliš nemění. Jedinou výjimkou je měsíc květen (nejsvětější zelená barva), ve kterém se podíl odtoku významně snižuje.



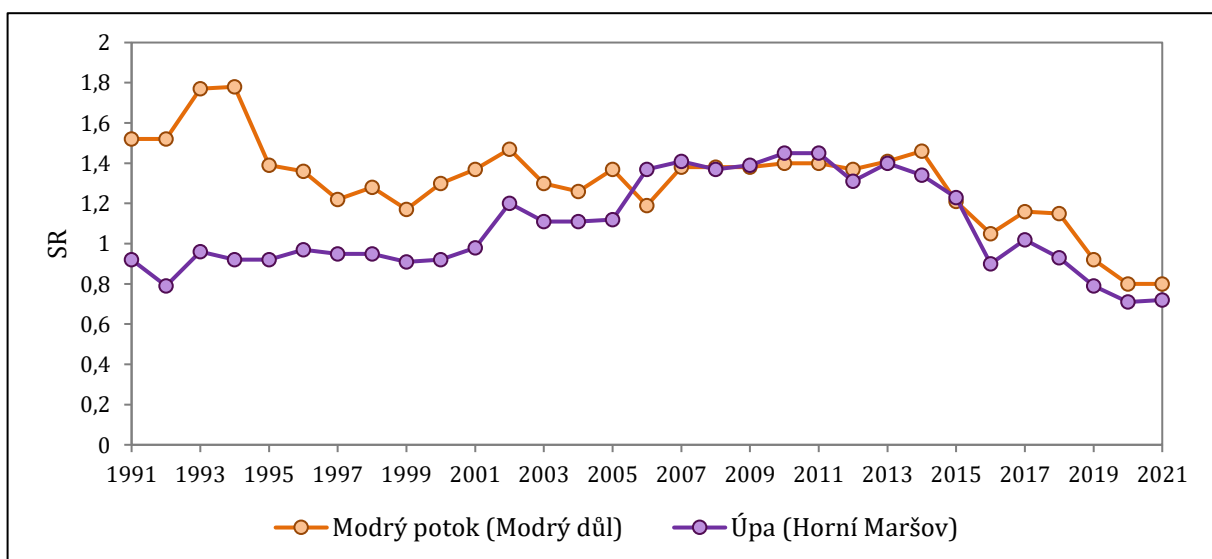
Obr. 12 – Podíl jednotlivých měsíců na celkovém ročním odtoku, průměr za období 1982-2020



Obr. 13 – Podíl měsíčních průtoků na celkovém odtoku v jednotlivých letech, Horní Maršov (1982-2021)

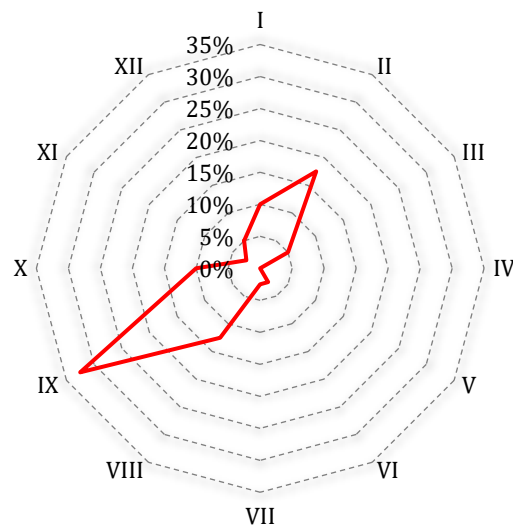
Nízké průtoky se v případě Horního Maršova na počátku sledovaného období vyskytovaly zhruba se stejnou četností v teplé i chladné polovině roku, zatímco Modrý potok byl postihován především nízkými zimními průtoky (hodnoty blíží se 2), patrně kvůli nadmořské výšce.

V průběhu času ale oba profily shodně vykazují příklon k nízkým letním průtokům, charakterizovaný hodnotami menšími než 1 (Obr. 14).



Obr. 14 – Desetileté seasonality ratio (SR), Horní Maršov, Modrý potok.

Znázornění sezonality $Q_{m_{min}}$, tedy procentuální zastoupení jednotlivých měsíců s nejnižším průměrným průtokem za každý rok ve sledovaném období, je k vidění na Obr. 15. Nejčastěji byl $Q_{m_{min}}$ v Horním Maršově pozorován v září (32,5 %) a v únoru (17,5 %), což odpovídá obecným hydroklimatickým charakteristikám střední Evropy, kde bývá hydrologicky nejsušší právě přelom léta a podzimu (z důvodu ročního chodu srážek a teplot) a zima kvůli velkému objemu vody v pevném skupenství. Na třetím místě se nacházel srpen s 12,5 %, následovaný říjnem a lednem se shodnými 10 %. Ani jednou se $Q_{m_{min}}$ nevyskytl v dubnu a květnu.

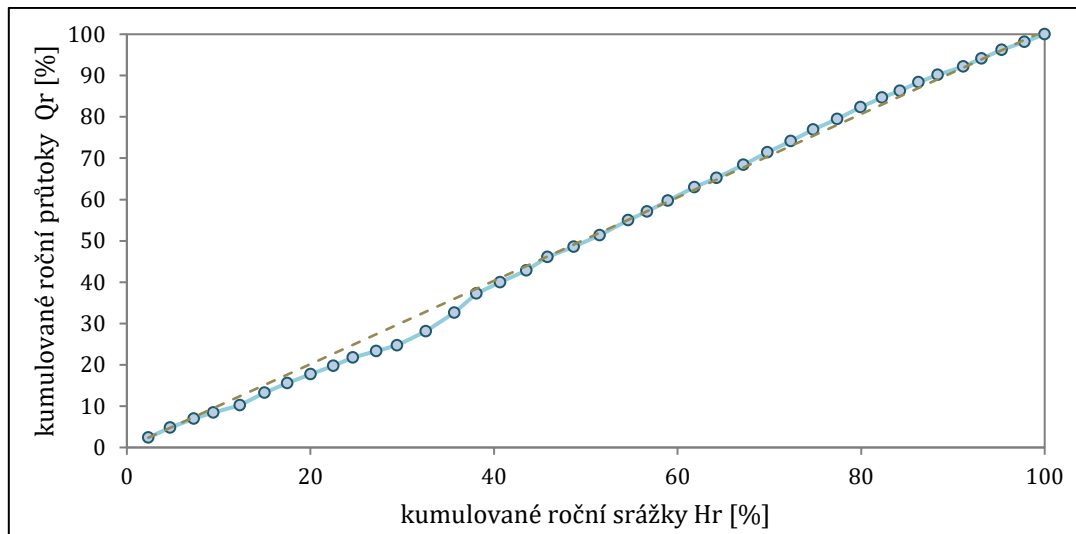


Obr. 15 – Sezonalita $Q_{m_{min}}$, Horní Maršov (1982-2021)

2.2. Povodí Čistě

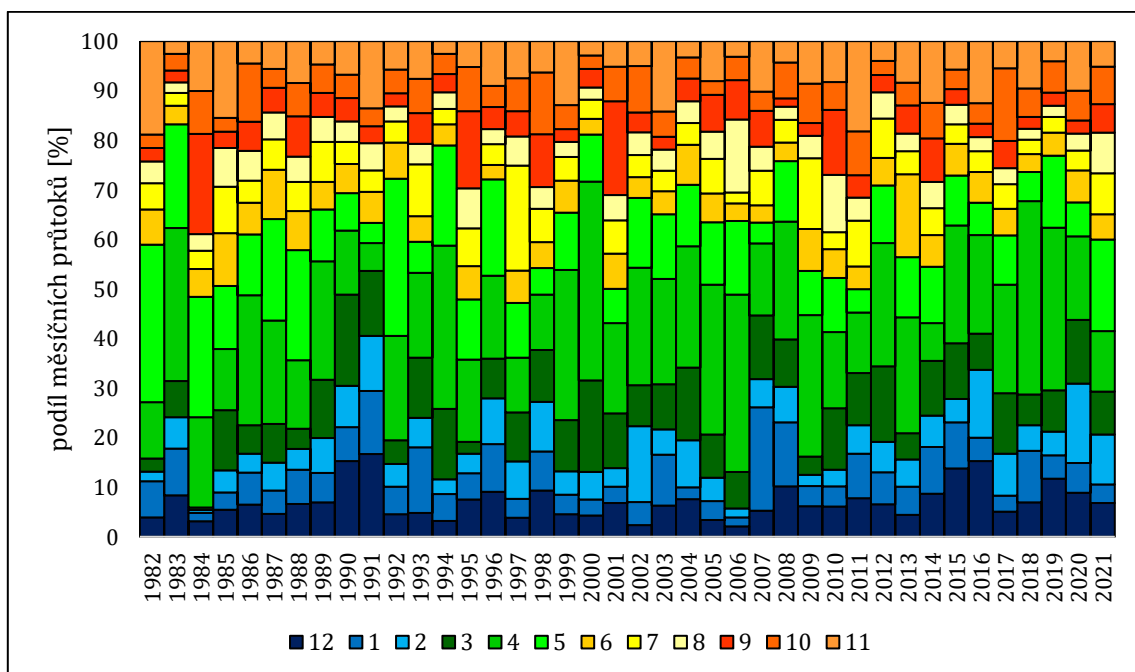
Podvojnou součtovou čáru ročních průtoků Q_r a ročních srážek H_r v období 1982–2021, znázorňuje Obr. 16. Osa x představuje kumulované roční srážky H_r [%] a osa y kumulované roční průtoky Q_r [%]. Podle bodů pod úhlopříčkou je patrné, že v období 1985–1998 převažovaly kumulované roční srážky nad kumulovanými průtoky. Naopak v období 2007–2016, kdy jsou body nad úhlopříčkou, převažovaly kumulované roční průtoky nad srážkami. Co se týče rozložení chodu měsíčních průtoků během sledovaného období, tak nejvyšší průtoky byly zaznamenány v jarních měsících, zejména v dubnu, kdy se na odtoku výrazně podílí tání sněhu (pramen Čistě se nachází 1126 m n.m.). Naopak letní a podzimní průtoky se na celkovém ročním odtoku podílí nejméně (Obr. 17). To potvrzuje také znázornění sezonality (Obr. 18), kde nejméně vodnými měsíci byly srpen a září. Za nejméně vodné měsíce byly označeny ve 20–25 % případech z celého sledovaného období 1982–2021. Mezi druhé období nejnižších průtoků

se pak řadí zimní měsíce leden a únor, což vzhledem k průměrné nadmořské výšce povodí není nic překvapivého.

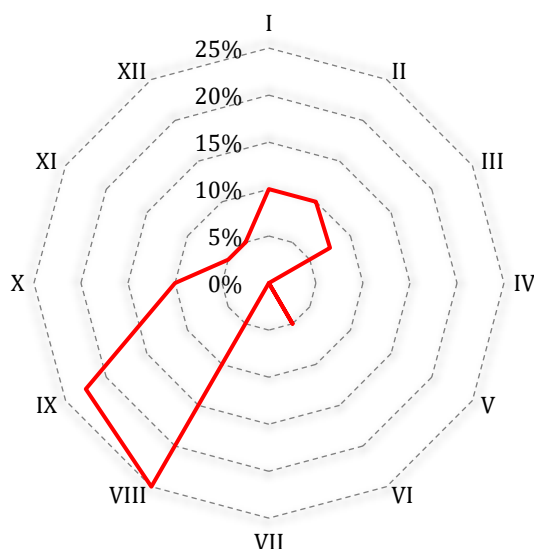


Obr. 16 – Podvojná součtová čára, Čistá (1982-2021), data srážek ze stanice Dolní Dvůr (1982-2021)

Dlouhodobý vývoj průměrných měsíčních průtoků zaznamenaných v Černém Dole v období 1982–2021 nevykazuje žádný signifikantní trend. Pouze přibližně od roku 1994 do roku 2006 je patrná větší rozkolísanost, což může být způsobeno vydatnějšími úhrny srážek, které byly v tomto období zaznamenány. Odtokový režim Čisté lze označit za niválně-pluviální (sněhovo-dešťový). Jsou pro něj typické maximální průtoky na jaře způsobené táním sněhu a vysoké letní úhrny srážek související s hojným výskytem konvektivních bouří.



Obr. 17 – Podíl měsíčních průtoků na celkovém odtoku v jednotlivých letech, Černý Důl (1982-2021)



Obr. 18 – Sezonalita $Q_{m_{min}}$, Čistá – Černý Důl (1982-2021)

3. Trendy vybraných proměnných a zhodnocení změn srážkoodtokového režimu v zájmových povodích

Vzhledem k rozdílné délce datových řad srážek a průtoků, bylo vyhodnocení dynamiky interanuální variability a dlouhodobých trendů rozděleno na dvě časová období. Data srážkových událostí byla analyzována na všech stanicích v rozmezí 1962–2021. Jmenovitě se jedná o následující stanice: Dolní Dvůr, Horní Maršov, Pec pod Sněžkou, Labská bouda, Luční bouda, Sněžka a Vrchlabí. Kromě srážek byla ve stejném časovém období analyzována také data teploty vzduchu, a to pro všechny výše uvedené stanice, kromě stanic Dolní Dvůr a Horní Maršov.

Hydrologická data průtoků byla analyzována v časovém rozmezí 01.11.1981 – 31.10.2021 (hydrologický rok 1982-2021), a to pro stanice: Čistá – profil Černý Důl, Čistá – profil Hostinné, Modrý potok a Úpa – profil Horní Maršov. Kromě výše uvedených stanic byl také analyzován profil Obří Důl na Úpě, a to od 01.11.1987 – 31.10.2021 (hydrologický rok 1988-2021).

Všechna data byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ), a to ve formě tzv. homogenizovaných technických řad. Dále byla ověřena přítomnost autokorelace. Autokorelace je typickým jevem právě hydrometeorologických časových řad a významně může ovlivnit výsledky klasického standardního neparametrického Mann-Kendall testu (MK-test, Mann, 1945, Kendall, 1975). Pro testování na přítomnost autokorelace byly zvoleny převážně metody grafické, a to autokorelační korelogramy (ACF). Tam, kde výsledky odhalily

signifikantní míry autokorelací byl pro testování přítomnosti trendů v datových řadách použit upravený MK-test, dle Hamed, Rao (1998).

3.1. Meteorologická data

3.1.1 Srážky

Při použití delších časových řad srážkových úhrnů (30 let +) jsou trendy detekovány jen zřídka, což je i případ analyzovaných srážkoměrných stanic v zájmových územích. Přehled trendového testování pro jednotlivé měsíce odkrývá Tab. 2. Z výsledků je patrné, že níže položené stanice (Dolní Dvůr či Horní Maršov) vykazují za poslední desetiletí v dlouhodobém průměru téměř neměnné srážkové úhrny. Výjimkou je měsíc duben, kde byly poklesové trendy detekovány téměř na všech stanicích. Vysvětlení tohoto chování je složité a bez výsledků dalších analýz nejasné. Možná příčina může být v tranzici sněhových a dešťových srážek. Pokud porovnáme jednotlivé stanice mezi sebou, tak patrný pokles srážek od dubna do června je na vrcholové stanici Sněžka (polská strana). Naopak pozitivní nárůst srážek na přelomu letních a podzimních měsíců byl zjištěn na vrcholových stanicích v rámci české strany hor, a to na Labské a Luční boudě. Obecně však lze říci, že žádné významné srážkové trendy v rámci měsíčních průměrů detekovány nebyly a případné změny ve srážkoodtokových režimech jsou z meteorologického hlediska řízeny více nárůstem teplot vzduchu než změnou dynamiky srážek.

Tab. 2 – Výsledky trendového testování měsíčních dat srážek (1962-2021). Interval spolehlivosti = 95%.

Dolní Dvůr*			H. Maršov		Labská b.		Luční b.		Pec p/Sněž*		Sněžka		Vrchlabí	
M	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p
1	1.56	0.12	0.31	0.76	1.95	0.05	1.58	0.12	1.15	0.25	1.89	0.06	2.46	0.01
2	-0.22	0.82	-0.43	0.67	0.83	0.40	0.59	0.55	0.57	0.57	0.22	0.82	0.65	0.52
3	-0.48	0.63	-0.18	0.86	1.91	0.06	0.17	0.86	0.92	0.36	-0.12	0.90	1.74	0.08
4	-2.84	0.01	-4.83	<0.00	-0.88	0.38	-2.19	0.03	-2.45	0.01	-3.58	<0.00	-2.00	0.05
5	-0.31	0.76	-1.58	0.12	0.49	0.63	-0.50	0.61	-0.82	0.41	-2.85	0.00	-0.31	0.76
6	-0.84	0.40	-1.11	0.27	0.30	0.76	-0.29	0.77	-5.32	<0.00	-2.48	0.01	-0.37	0.71
7	0.01	1.00	0.79	0.43	2.04	0.04	1.88	0.07	0.07	0.94	-1.01	0.31	1.27	0.20
8	0.61	0.55	-0.27	0.79	1.16	0.25	0.98	0.33	-0.73	0.47	-1.61	0.11	0.52	0.61
9	0.76	0.45	0.53	0.59	1.27	0.21	2.05	0.04	0.62	0.54	0.38	0.71	0.27	0.79
10	1.40	0.16	0.43	0.67	1.82	0.07	1.96	0.05	0.48	0.63	0.59	0.56	1.52	0.13
11	-0.99	0.35	-3.67	<0.00	0.57	0.57	0.14	0.89	-1.95	0.05	-1.09	0.28	-0.79	0.43
12	-0.58	0.56	-0.68	0.50	1.88	0.06	-1.31	0.19	-0.89	0.38	0.52	0.60	0.03	0.98

M = měsíc, Z = Z-statistika, p = p-value, červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa. P-hodnoty <0.00 = <0.001, pokud je p-hodnota zaokrouhlena na 0.05 a trend není v tabulce vyznačen, značí to, že výsledná hodnota před zaokrouhlením převyšuje hranici 0.05. *Pozn.: Listopad (Dolní Dvůr): detekován poklesový trend při použití MK-testu citlivého pro autokorelaci v datech. Drobná autokorelace byla sice dle ACF korelogramů detekována, ale vzhledem ke grafickému průběhu srážek byl nakonec upřednostněn standardní MK-test, jehož výsledky jsou zveřejněny v tabulce. Červen (Pec p/Sněžkou): trend detekován pouze za předpokladu použití modifikovaného MK-testu pro zohlednění autokorelací v datové řadě.

Teoreticky lze očekávat zvýšenou interanuální variabilitu, a to převážně ve výše položených stanicích. Pro každou stanicí byly testovány trendy ročních průměrů, a to pro 4 časová období: 1962-2021, 1962-1981, 1982-2001, 2002-2021. V rámci níže položených stanic nebyly pro celou délku časové řady (1962-2021) detekovány žádné srážkové trendy a ani interanuální variabilita nevykazuje výraznou dynamiku. Zcela jiné chování je však na stanicích ve vyšších nadmořských výškách – Labská a Luční bouda a také na samotné Sněžce. Jak na Labské, tak i na Luční boudě byly detekovány statisticky signifikantní kladné trendy srážek. Zcela opačná situace panuje na Sněžce. Data z její polské strany totiž ukazují zřetelný pokles, který je patrný především od druhé poloviny 90. let, kdy roční průměry jen zřídka překračují hranici 1300 mm. I zde je velmi obtížné detekovat příčiny bez dalších analýz a bez doplňujících informací o monitoringu, např. umístění stanice. Podrobná analýza trendů v dalších časových obdobích je k vidění v Tab. 3.

Tab. 3 – Výsledky trendové analýzy ročních průměrů srážek pro jednotlivá časová období. Interval spolehlivosti = 95%.

Dolní Dvůr				Horní Maršov			Pec pod Sněžkou			Labská bouda		
Období	Z	τ	p	Z	τ	p	Z	τ	P	Z	τ	p
1962-2021	-0.59	-0.05	0.55	-1.49	-0.13	0.14	-1.01	-0.09	0.31	4.92	0.33	<0.00
1962-1981	0.55	0.10	0.58	0.75	0.13	0.46	-0.10	-0.02	0.92	1.59	0.26	0.11
1982-2001	1.11	0.19	0.26	1.53	0.25	0.13	1.33	0.22	0.18	2.17	0.36	0.03
2002-2021	-1.78	-0.30	0.07	-2.56	-0.42	0.01	-1.40	-0.23	0.16	0.29	0.05	0.77
Luční bouda				Sněžka			Vrchlabí					
Období	Z	τ	p	Z	τ	p	Z	τ	P			
1962-2021	2.81	0.18	0.01	-2.66	-0.24	0.01	1.49	0.13	0.14			
1962-1981	0.81	0.14	0.42	0.00	0.00	1.00	0.23	0.04	0.82			
1982-2001	2.11	0.35	0.04	1.33	0.22	0.18	0.16	0.03	0.87			
2002-2021	-0.29	-0.05	0.77	-0.55	-0.10	0.58	-1.33	-0.22	0.18			

Z = Z-statistika, p = p-value, τ = Kendallovo τ . Červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <0.00 = <0.001. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa.

3.1.2 Teplota vzduchu

V rámci testování teplot vzduchu byla očekávána signifikantní detekce pozitivních trendů, a to v rámci většiny měsíců všech stanic. Stoupající teplota vzduchu, na rozdíl od srážek, je potvrzený fakt, který významně ovlivňuje evapotranspirační bilanci a celkovou dynamiku srážkoodtokového režimu. Dle předpokladů, pozitivní trendy byly detekovány na všech stanicích, s dominantním výskytem v jarních a letních měsících. Můžeme však pozorovat rozdíly mezi jednotlivými stanicemi v rámci jejich nadmořské výšky. U níže položených stanic (Vrchlabí, Pec pod Sněžkou) je patrný nástup oteplení již v zimních měsících, naopak vysokohorské stanice převážně prozatím odolávají a signifikantní oteplení zde začíná až v dubnu. Výjimkou je Luční bouda, kde došlo k velkému výpadku dat mezi lety 1970-2009. Technická řada použitá k výpočtům tedy může být zatížena možnou nepřesností, která vznikla extrapolací dat z okolních stanic. Další výjimkou je poté měsíc únor, který je složitý na vyhodnocení, a to vzhledem k přítomnosti autokorelace. Z tohoto důvodu jsou v poznámkách pod Tab. 4 uvedeny také vypočtené hodnoty dle standardního MK-testu.

Jako nejstabilnější měsíce se jeví září a říjen, naopak nejvíce výrazné oteplení je patrné v letních měsících (červen-srpen), a to na všech stanicích. Tato razantní oteplení v letních měsících významně ovlivňují dynamiku průměrných ročních teplot, kde absolutní maxima za celou dobu pozorování byla detekována v posledních letech datové řady. Do budoucna lze

pouze předpokládat ještě výraznější oteplení a větší výskyt teplotních extrémů, které by mohly mít silný negativní dopad především na horské lesní ekosystémy, rašeliniště a mokřady.

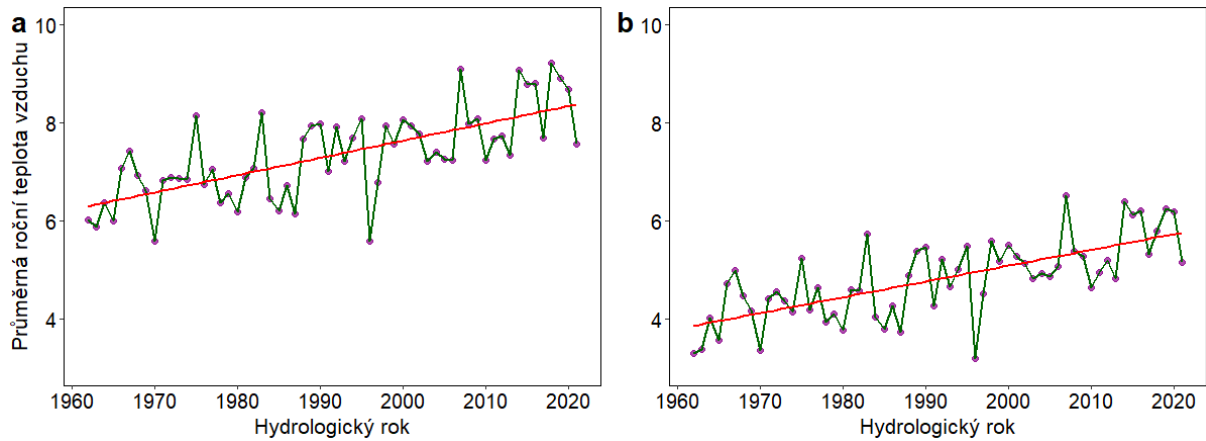
Tab. 4 – Výsledky trendového testování měsíčních dat teploty vzduchu (1962-2021). Interval spolehlivosti = 95%.

Labská bouda*			Luční bouda*		Pec p/Sněžkou		Sněžka		Vrchlabí	
M	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p
1	0.87	0.38	1.70	0.09	2.20	0.03	1.16	0.25	2.21	0.03
2	3.52	<0.00	4.39	<0.00	2.09	0.04	3.01	0.00	4.53	<0.00
3	1.92	0.06	2.05	0.04	2.19	0.03	1.65	0.10	2.34	0.02
4	3.04	0.00	3.20	0.00	4.03	<0.00	2.57	0.01	2.85	0.00
5	1.59	0.11	2.33	0.02	1.98	0.05	1.78	0.08	2.49	0.01
6	3.04	0.00	3.22	0.00	3.38	<0.00	3.32	<0.00	3.46	<0.00
7	2.21	0.03	2.39	0.02	2.48	0.01	3.27	0.00	3.33	<0.00
8	3.46	<0.00	4.25	<0.00	3.32	<0.00	4.19	<0.00	5.50	<0.00
9	0.91	0.36	1.38	0.17	0.70	0.48	1.96	0.05	1.55	0.12
10	0.78	0.44	1.27	0.21	1.44	0.15	0.72	0.47	1.44	0.15
11	2.03	0.04	2.10	0.04	2.53	0.01	2.51	0.01	2.51	0.01
12	1.84	0.07	2.85	0.00	2.80	0.01	2.12	0.03	2.49	0.01

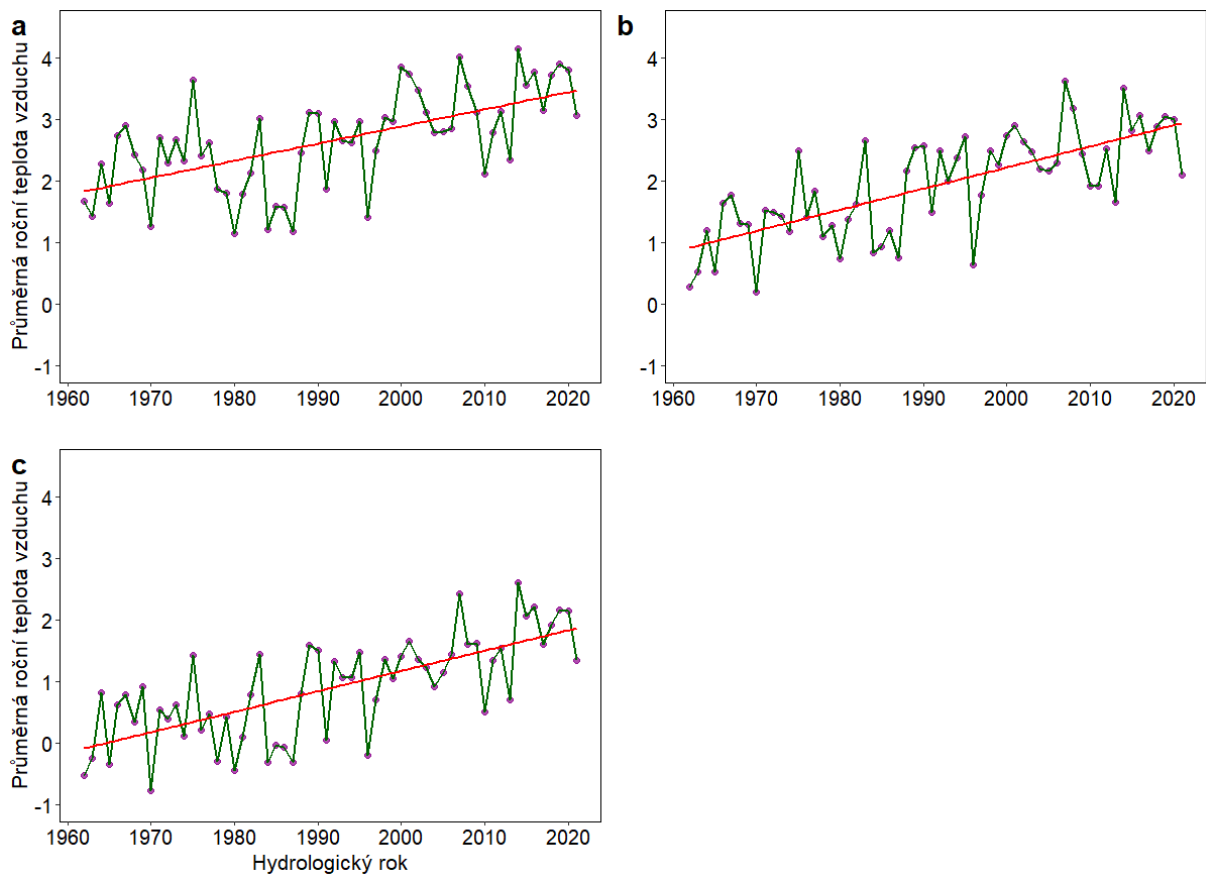
M = měsíc, Z = Z-statistika, p = p-value. Červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <0.00 = <0.001. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa. *Pozn.: Únor (Labská bouda): trend detekován pouze při zohlednění lehké autokorelace, která byla v datové řadě nalezena. Při použití standardního MK-testu vychází Z-statistika: 1.646 a p-value: 0.100 a trend není signifikantní. Únor (Luční bouda): trend detekován pouze při zohlednění lehké autokorelace, která byla v datové řadě nalezena. Při použití standardního MK-testu vychází Z-statistika: 2.054 a p-value: 0.070 a trend není signifikantní.

Konkrétněji je z přiložených grafických materiálů (Obr. 19 a 20) patrné, že nejteplejším obdobím v historii pozorování je poslední dekáda (2012-2021), jejíž průměr výrazně převyšuje “dlouhodobý normál”, a to v rámci každé stanice. Příkladem může být Sněžka, kdy v tomto období poprvé v historii průměrná roční teplota překročila 2.5°C. Obdobně i na Labské či Luční boudě, kde byly překročeny hodnoty 4, resp. 3.5°C. Nedá se však jasně říci, že rychlost oteplení je rychlejší či pomalejší ve vysokohorských stanicích. Pokud se zaměříme detailněji na sklon trendu, pak se hodnoty liší jen nepatrně. Nicméně nejmenší sklon má datová řada Labské boudy, kde lze tedy predikovat, že oteplení probíhá o něco pomaleji v porovnání s okolními stanicemi. Naopak nejstrmější sklon datové řady byl zjištěn pro stanici Vrchlabí. Jiným ukazatelem, jak vyjádřit míru oteplení pomocí sklonu datové řady je vyjádření jeho změny za určitý časový úsek, zpravidla za dekádu, a to pomocí jednoduché lineární regrese. Z těchto dat si dovoluujeme prezentovat následující výsledky: Vrchlabí – +0.35°C/10 let, Pec pod Sněžkou –

+0.32°C/10 let, Labská bouda – +0.28°C/10 let, Luční bouda – +0.34°C/10 let a Sněžka – +0.33°C/10 let. I z těchto dat je tedy patrné, že rychlost oteplení je nejmírnější na Labské boudě a nejrychlejší ve Vrchlabí.



Obr. 19 – Vývoj ročních průměrů teploty vzduchu (1962-2021) na níže položených stanicích Vrchlabí (a) a Pec Pod Sněžkou (b)



Obr. 20 – Vývoj ročních průměrů teploty vzduchu (1962-2021) na výše položených stanicích Labská bouda (a), Luční bouda (b) a Sněžka (c)

Obdobně jako i v rámci datové řady srážek, tak i zde byla analýza trendů vývoje ročních průměrů rozdělena na 4 časová období: 1962-2021, 1962-1981, 1982-2001 a 2002-2021. Výsledky této analýzy poskytuje Tab. 5.

Tab. 5 – Výsledky trendové analýzy ročních průměrů teploty vzduchu pro jednotlivá časová období. Interval spolehlivosti = 95%

Labská bouda			Luční bouda			Pec p/Sněžkou			Sněžka			Vrchlabí			
Obd.	Z	τ	p	Z	τ	p	Z	τ	p	Z	τ	p	Z	τ	p
62-21	4.27	0.44	<.0	5.56	0.49	<.0	5.52	0.49	<.0	5.40	0.50	<.0	6.72	0.48	<.0
62-81	-0.23	-0.04	0.82	0.75	0.13	0.46	0.88	0.15	0.38	-0.36	-0.06	0.72	0.62	0.11	0.54
82-01	2.04	0.34	0.04	1.91	0.31	0.06	1.53	0.25	0.13	1.72	0.28	0.09	1.27	0.21	0.21
02-21	1.46	0.24	0.14	0.49	0.08	0.63	1.98	0.33	0.05	1.78	0.30	0.07	1.91	0.32	0.06

Z = Z-statistika, p = p-value, τ = Kendallovo τ , Obd. = Období, 62-21 => 1962-2021, 62-81 => 1962-1981, 82-01 => 1982-2001, 02-21 => 2002-2021. Červené zvýraznění = pokles, Zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <.0 = <0.001. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa.

3.2 Hydrologická data

Všechna hydrologická data byla vyhodnocena pro hydrologický roku, tj. od listopadu do října roku následujícího. Trendy byly šetřeny individuálně pro každý měsíc v rámci každého profilu, ale i v rámci ročních průměrů. Míra autokorelace v rámci měsíčních hydrologických dat byla zanedbatelná, a tedy standardní neparametrický MK-test mohl být použit pro výpočty. Tabulka 6 ukazuje výsledky trendové analýzy pro jednotlivé měsíce hydrologického roku. Z výsledků jsou patrné signifikantní poklesy vodností v jarních měsících (duben, květen), a to v obou povodích a na všech závěrových profilech. Tyto výsledky kolidují také se zjištěnými trendy v rámci srážek – detekovaný pokles v dubnu a květnu, a teplot – detekovaný nárůst ve výše zmíněných měsících. Nízké jarní vodnosti jsou problematickým tématem, které je spojeno mimo jiné s dynamikou doplňování podzemních zvodní.

Dále byly detekovány poklesy vodností také v letních měsících. Na níže položených závěrových profilech (Hostinné, Horní Maršov) poukazují na problematický výsledek stále stoupajících teplot a konstantních srážek, kterým je výpar.

Co se týče povodí Modrého potoka, zde byly poklesy ve vodnostech detekovány také výhradně v letních měsících (červenec, srpen). Relativně stálé vodnosti v jarních měsících jsou zřejmě dány vysokou nadmořskou výškou, relativně stabilní a mocnou sněhovou pokrývkou a posunem doby jejího tání oproti níže položeným povodím.

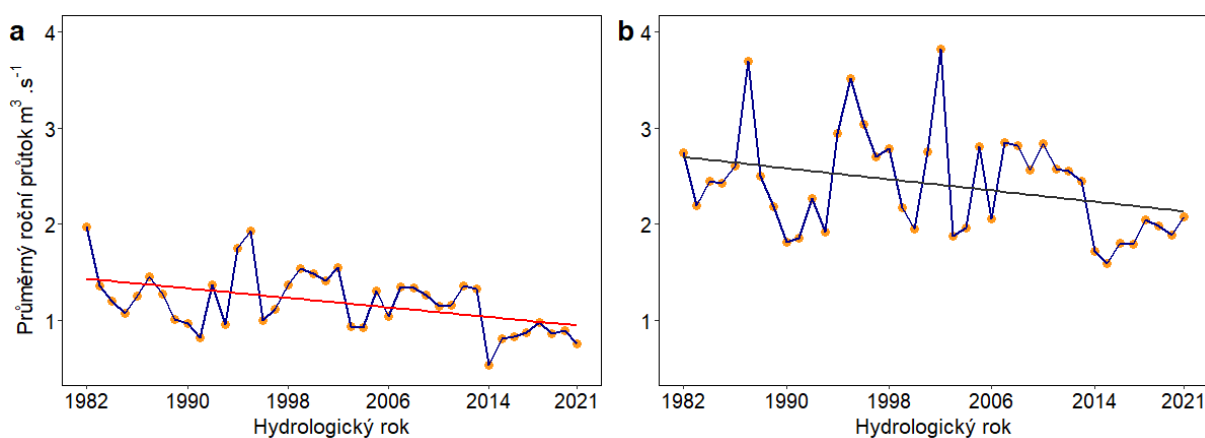
Analýza ročních průtoků byla provedena v následujících časových obdobích: 1982-2021, 1982-2001 a 2002-2021. Pro profil Obří Důl: 1988-2021 a 2002-2021. Výsledky odkrývá Tab. 7.

Tab. 6 – Výsledky trendového šetření dynamiky průtoků pro jednotlivé měsíce v rámci analyzovaných povodí. Interval spolehlivosti = 95%

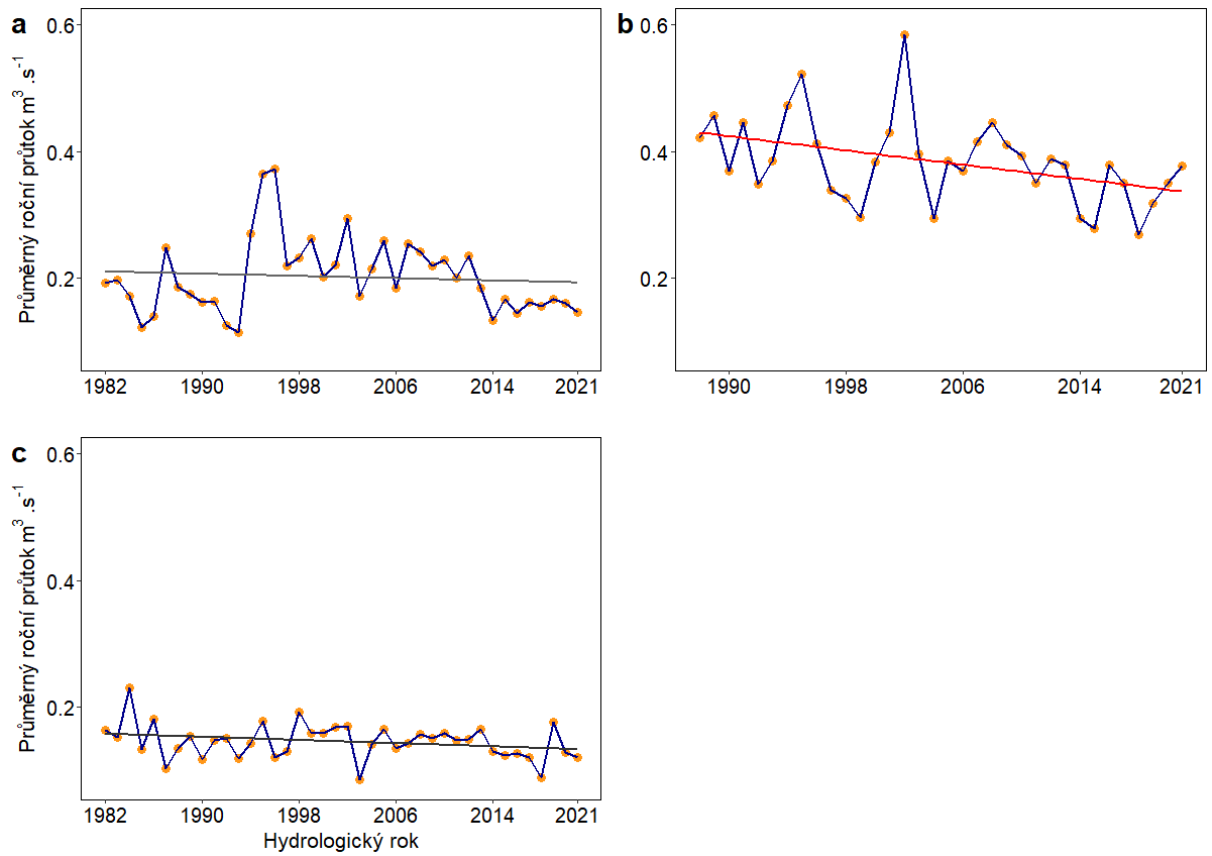
Čistá – Černý Důl			Čistá – Hostinné		Modrý potok		Úpa – H. Maršov		Úpa – Obří Důl	
M	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p	Z	p
11	-0.32	0.75	-1.34	0.18	-0.20	0.84	-0.83	0.41	-0.47	0.64
12	1.18	0.24	-1.15	0.25	-1.01	0.31	-0.92	0.36	0.15	0.88
1	-0.52	0.60	-0.87	0.38	-0.50	0.62	-1.41	0.16	-0.92	0.36
2	1.48	0.14	0.72	0.47	-0.29	0.77	1.13	0.26	-0.12	0.91
3	0.73	0.46	-1.25	0.21	0.00	1.00	1.07	0.29	-0.86	0.39
4	0.43	0.67	-3.06	0.00	1.39	0.17	-1.18	0.24	0.24	0.81
5	-2.39	0.02	-2.99	0.00	-1.78	0.08	-2.90	0.00	-2.19	0.03
6	-1.18	0.24	-1.92	0.06	-1.95	0.05	-2.90	0.00	-1.87	0.06
7	-0.41	0.68	-1.06	0.29	-2.13	0.03	-0.36	0.72	-1.84	0.07
8	-0.62	0.54	-2.25	0.03	-2.59	0.01	-1.13	0.26	-1.69	0.09
9	-0.92	0.36	-2.13	0.03	-1.63	0.10	-1.04	0.30	-1.90	0.06
10	0.85	0.40	-1.13	0.29	0.87	0.38	0.76	0.45	0.95	0.34

M = měsíc, Z = Z-statistika, p = p-value. Červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <0.00 = <0.001, pokud je p-hodnota zaokrouhlena na 0.05 a trend není v tabulce vyznačen, značí to, že výsledná hodnota před zaokrouhlením převyšuje hranici 0.05. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Kromě profilu Obří Důl (1988-2021) jsou všechny analýzy vedeny v časovém období hydrologických let 1982-2021.

Grafická vyjádření dynamiky ročních průtoků pro celé pozorované období (1982-2021) shrnují Obr. 21 a 22. Patrné změny za tyto 4 dekády byly zaznamenány ve všech zkoumaných povodích a profilech, avšak statisticky signifikantní trendy byly detekovány pouze na dvou profilech: Čistá – profil Hostinné a na Úpě – profil Obří Důl. Vzhledem ke zkrácené datové řadě na profilu Obří Důl je však třeba k těmto trendům přistupovat obezřetně, neboť mohou být snadno zaměnitelné s přirozenou hydrologickou dynamikou v rámci interanuální variability. Na všech stanicích, kromě snad Modrého potoka, jsou patrné výrazné změny vodností v poslední dekádě (2012-2021). Při pokračování aktuálních trendů lze v budoucnu očekávat poklesové trendy i na ostatních stanicích, a to především v důsledku zvýšeného výparu v letních měsících.



Obr. 21 – Vývoj dynamiky ročních průměrných průtoků v rámci dvou níže položených závěrových profilů: Čistá – Hostinné (a), Úpa – Horní Maršov (b)



Obr. 22 – Vývoj dynamiky ročních průměrných průtoků výše položených závěrových profilů: Čistá – Černý Důl (a), Úpa – Obří Důl (b) a Modrý potok (c)

Tab. 7 – Výsledky trendové analýzy ročních průměrů průtoků pro jednotlivá časová období. Interval spolehlivosti = 95%.

Čistá – Černý Důl			Čistá - Hostinné			Modrý potok			Úpa – H. Maršov			Úpa – Ob. Důl			
Obd.	Z	τ	p	Z	τ	p	Z	τ	p	Z	τ	p	Z	τ	p
82-21	-0.70	-0.11	0.49	-3.72	-0.32	<.0	-1.43	-0.16	0.15	-1.41	-0.20	0.16	/	/	/
88-21	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-5.67	-0.33	<.0
82-01	1.53	0.25	0.13	0.42	0.07	0.67	0.29	0.05	0.77	0.13	0.02	0.90	/	/	/
02-21	-3.41	-0.59	<.0	-2.30	-0.38	0.02	-1.59	-0.26	0.11	-2.04	-0.34	0.04	-2.63	-0.43	0.01

Z = Z-statistika, p = p-value, τ = Kendallovo τ , Obd. = Období, 82-21 => 1982-2021, 88-21 => 1988-2021, 82-01 => 1982-2001, 02-21 => 2002-2021. Červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <.0 = <0.001. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa.

Vyhodnocení výsledku (základní zjištění, přínos, případně využití)

Výsledky analýz hydrometeorologických dat pro zájmové území umožňují vyslovit následující závěry. Změny srážkových úhrnů za poslední dekádu byly marginální téměř v rámci všech stanic a všech měsíců, a to až na drobné výjimky. Detekované změny ve srážkoodtokových režimech v rámci jednotlivých povodíh tedy nejsou přímo zapříčiněny změnami srážkových úhrnů, ale spíše změnami poměru sněhových a dešťových srážek. Tato tranzice je výrazně ovlivněna stoupajícími teplotními trendy, které byly detekovány na všech stanicích. Zdá se, že stanice v nižších nadmořských výškách se oteplují mírně rychleji než stanice ve vyšších nadmořských výškách. Rostoucí teploty v zimních a jarních měsících negativně ovlivňují výšku, trvání a hydrologické charakteristiky sněhové pokrývky. Tyto pak zapříčiňují změnu dynamiky tání a pokles vodností v pozdně jarních měsících. Dalším odrazem stále stoupajících teplot jsou letní velmi nízké vodnosti. Při pokračování aktuálních teplotních trendů, poklesu výšky a trvání sněhové pokrývky lze v budoucnu očekávat pokles jarních vodností, významné snížení každoročního doplňování podzemních zvodní a déle trvající období letních nízkých vodností.

Databáze a dílčí výsledky byly využity pro tvorbu specializované mapy DPDV V27.

Doložení výsledku

Název mapy: Geodatabáze vývoje klimatických a hydrologických proměnných

Popis novosti

Inovativním prvem je testování autokorelace zkoumaných klimatických a hydrologických proměnných. V případě signifikantní míry autokorelace využití modifikované verze Mann-Kendalova testu dle Hamed, Rao (1998).

Informace o rozsahu využití

Výsledek bude využit organizacemi zapojenými do řešení projektu jako vstup pro tvorbu dalších uvedených výsledků, např. metodika, článek v časopise s IF. Další možné využití je správou KRMAP.

Informace o přínosech pro uživatele

Vývoj analyzovaných klimatických a hydrologických proměnných jednoznačně dokládá nárůst teploty vzduchu ve zkoumaném období, změnu sezonality a variability srážek a následný pokles odtoku, který se projevil výrazným hydrologickým suchem v období 2014-2021.

Seznam odborných podkladů

ČHMÚ (2023): Databáze vybraných klimatických a hydrologických proměnných 1982-2021.

ČHMÚ (2023): Hlásná a předpovědní povodňová služba, evidenční list hlásného profilu č. 9, <https://hydro.chmi.cz/hppsevlist/download?seq=307044>, (cit. 26. 12. 2023).

HAMED, K. H., & R. RAO, A. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1), 182–196.

KENDALL, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*. 4th Edition, Charles Griffin, London.

MANN, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.

Výsledek je volně dostupný zde*:

<https://www.lucc4hydro.cz/2023-2/>

Jedná se o důkaz provedení analýz a interpretace dat, která budou dále hodnocena v širším kontextu a budou předmětem odborné publikace, jsou podkladem pro sestavení tematických map. V této fázi nebude výsledek volně zpřístupněn.

*** V případě, že je možné výsledek volně zpřístupnit.**

Pokud nelze originální výsledek volně zpřístupnit, prokazuje jeho dosažení pouze tento dokument.