



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**

**Dílčí metodika hodnocení změn srážko-odtokového režimu,  
trendů vybraných hydroklimatických proměnných a  
hydrologických extrémů  
(V28)**

**Číslo výsledku dle ISTA: SS05010124-V28**

**Název výsledku:** Dílčí metodika hodnocení změn srážko-odtokového režimu, trendů vybraných hydroklimatických proměnných a hydrologických extrémů

**Druh výstupu/výsledku:** dílčí metodika

**Termín dosažení výsledku:** 12/2024

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

## Obsah

Úvod .....	3
Cíle metodiky .....	3
Zájmové území .....	3
Zdroje dat .....	4
Metodický postup.....	5
Grafické metody pro analýzu změn srážko-odtokového režimu.....	5
Statistické metody pro detekci trendů v hydroklimatických datových řadách .....	7
Ukázka aplikace MK-testu na hydroklimatické datové řady .....	9
Srážkové úhrny .....	9
Teplota vzduchu .....	10
Hydrologická data.....	13
Hodnocení hydrologických a klimatických extrémů.....	15
Závěr .....	20
Literatura .....	21

# Úvod

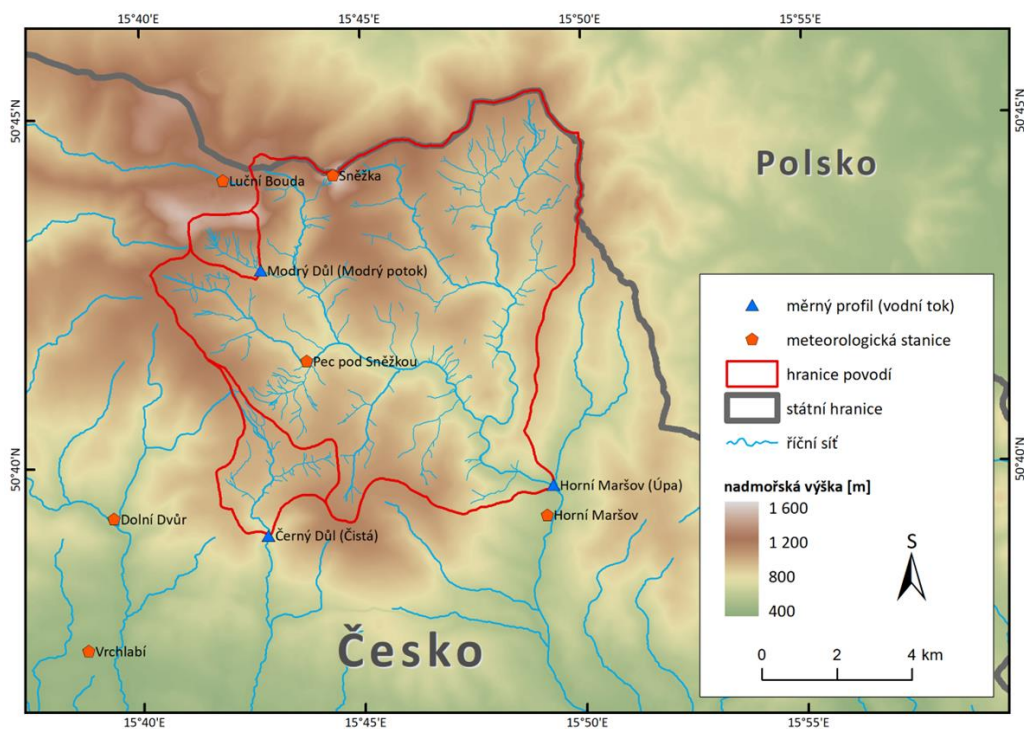
Pro naplnění cílů projektu TAČR SS05010124 vznikla potřeba vytvořit dílčí metodiku hodnocení změn srážko-odtokového režimu. Dílčí metodika specifikuje doporučené metody a postupy pro hodnocení změn srážko-odtokového režimu, trendů vybraných hydroklimatických proměnných a hydrologických extrémů. Postavena je na zpracování a vyhodnocení volně dostupných dat monitorovaných ČHMÚ.

## Cíle metodiky

Hlavním cílem metodiky je pomocí grafických a statistických metod detekovat změny srážko-odtokového režimu a identifikovat dlouhodobé trendy základních hydroklimatických proměnných: teploty vzduchu, srážek a průtoků. Dále se metodika zaměřuje na analýzu hydrologických extrémů, konkrétně metod pro vyhodnocení hydrologického sucha.

## Zájmové území

Zájmovým územím jsou povodí horní Úpy, včetně Modrého potoka a povodí horní Čistě v Krkonoších. Plocha povodí horní Úpy po závěrový profil Horní Maršov činí 81,99 km<sup>2</sup>. Plocha povodí Čistě po závěrový profil Černý Důl je 6,53 km<sup>2</sup> (Obrázek 1).



Obrázek 1 Zájmové území – povodí horní Úpy a horní Čistě v Krkonoších s lokalizací monitorujících stanic ČHMÚ.

## Zdroje dat

Pro veškeré aplikované analýzy lze využít volně dostupná klimatická a hydrologická data ČHMÚ.

Pro zájmová povodí horní Úpy a horní Čistá byly využity následující limnigrafické a meteorologické stanice (Obrázek 1, Tabulka 1).

- limnigrafická stanice Úpa - Horní Maršov (013000): 1981-2021, datová řada Qd, Qm  
Poloha 64,000 ř.km, nadmořská výška 570,450 m n.m., plocha povodí: 81,99 km<sup>2</sup>
- limnigrafická stanice Čistá - Černý Důl (003100): 1981-2021, datová řada Qd, Qm  
Poloha: 15,700 ř.km, nadmořská výška 717,461 m n.m., plocha povodí: 6,53 km<sup>2</sup>
- limnigrafická stanice Úpa- Obří Důl (009000), 1987-2021, výpadek 05/2003-11/2003  
Poloha 74,800 ř. km, nadmořská výška: 888,104 m n.m., plocha povodí: 8,89 km<sup>2</sup>
- limnigrafická stanice: Modrý potok – Modrý Důl (009000), 1980-2021, výpadek 10/1983-11/1984  
Poloha 1,000 ř. km, nadmořská výška 1 009,467 m n.m., plocha povodí 2,61 km<sup>2</sup>

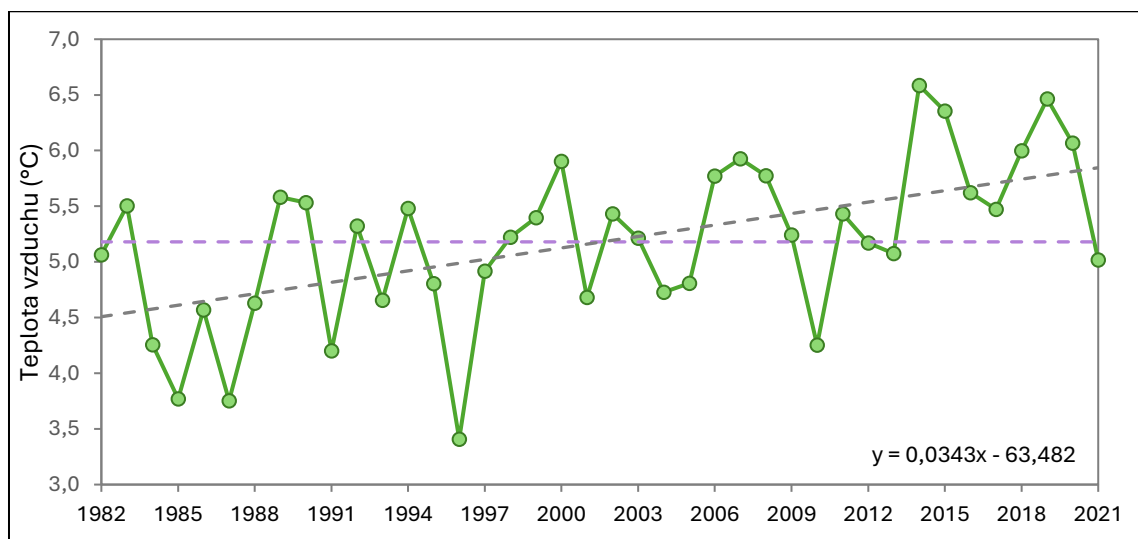
**Tabulka 1 Přehled hodnocených parametrů pro limnigrafické a meteorologické stanice v období monitoringu**

Parametr	Stanice	denní data	denní data	chybějící měření
		od	do	
Qd [m <sup>3</sup> /s]	Horní Maršov (Úpa)	01.11.1981	31.12.2021	
Qd [m <sup>3</sup> /s]	Černý důl (Čistá)	01.11.1930	31.12.2021	<b>1941-1948</b>
Qd [m <sup>3</sup> /s]	Obří důl (Úpa)	01.11.1987	31.12.2021	<b>05/2003-11/2003</b>
Qd [m <sup>3</sup> /s]	Modrý důl (Modrý potok)	01.11.1980	31.12.2021	<b>10/1983-11/1984</b>
Tavg [°C]	Sněžka	01.01.1961	31.12.2021	<b>01/1965-12/1965</b>
Tavg [°C]	Pec pod Sněžkou	01.01.1961	31.12.2021	<b>1972-1988</b>
Tavg [°C]	Labská Bouda	01.01.1979	31.12.2021	<b>1999-2002</b>
Tavg [°C]	Luční Bouda	01.11.1964	31.12.2021	<b>1970-2009</b>
SRA [mm]	Sněžka	01.01.1961	31.12.2021	<b>01/1962-12/1962, 01/1965-12/1965</b>
SRA [mm]	Dolní Dvůr	01.04.1963	31.12.2021	<b>1972-1973</b>
SRA [mm]	Horní Maršov	01.01.1961	31.12.2021	<b>1987-1988</b>
SRA [mm]	Labská Bouda	01.01.1979	31.12.2021	<b>1999-2002</b>
SRA [mm]	Luční Bouda	01.11.1964	31.12.2021	<b>1970-2009</b>
SRA [mm]	Pec pod Sněžkou	01.01.1961	31.12.2021	<b>1972-1988</b>
SRA [mm]	Horní Malá Úpa	01.05.1997	31.12.2021	
SCE [cm]	Sněžka	01.01.1961	31.12.2021	<b>01/1962-12/1962, 01/1965-12/1965, 01/2020-09/2020, 01/2021-09/2021</b>
SCE [cm]	Dolní Dvůr	01.04.1963	31.12.2021	
SCE [cm]	Horní Maršov	01.01.1961	31.12.2021	<b>1987-1988</b>
SCE [cm]	Labská Bouda	01.01.1979	31.12.2021	<b>1999-2002</b>
SCE [cm]	Luční Bouda	01.11.1964	31.12.2021	<b>1970-2009</b>

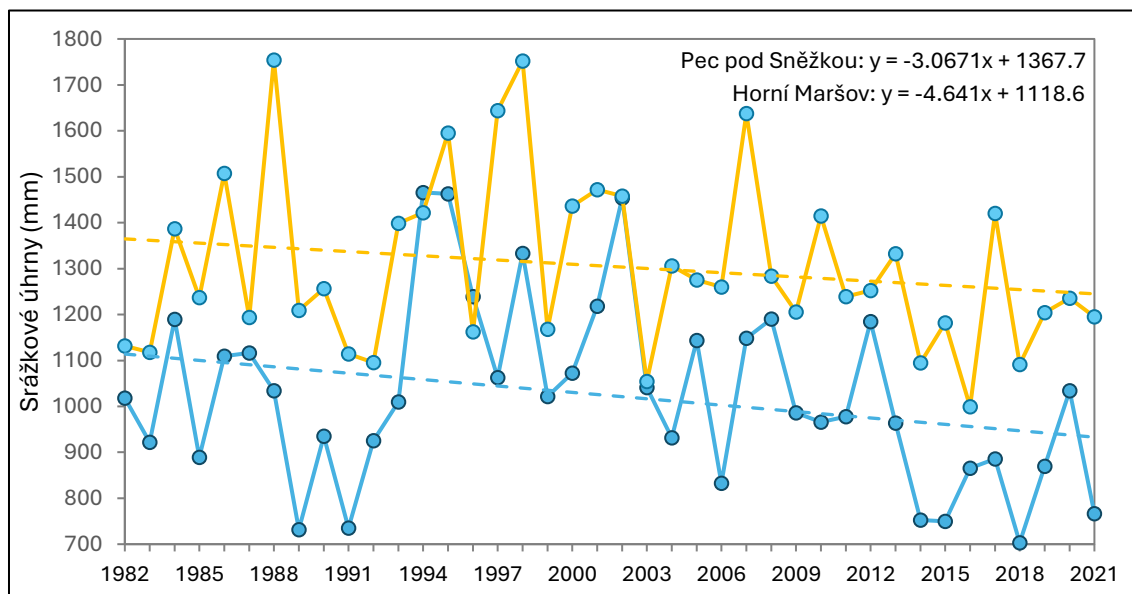
# Metodický postup

## Grafické metody pro analýzu změn srážko-odtokového režimu

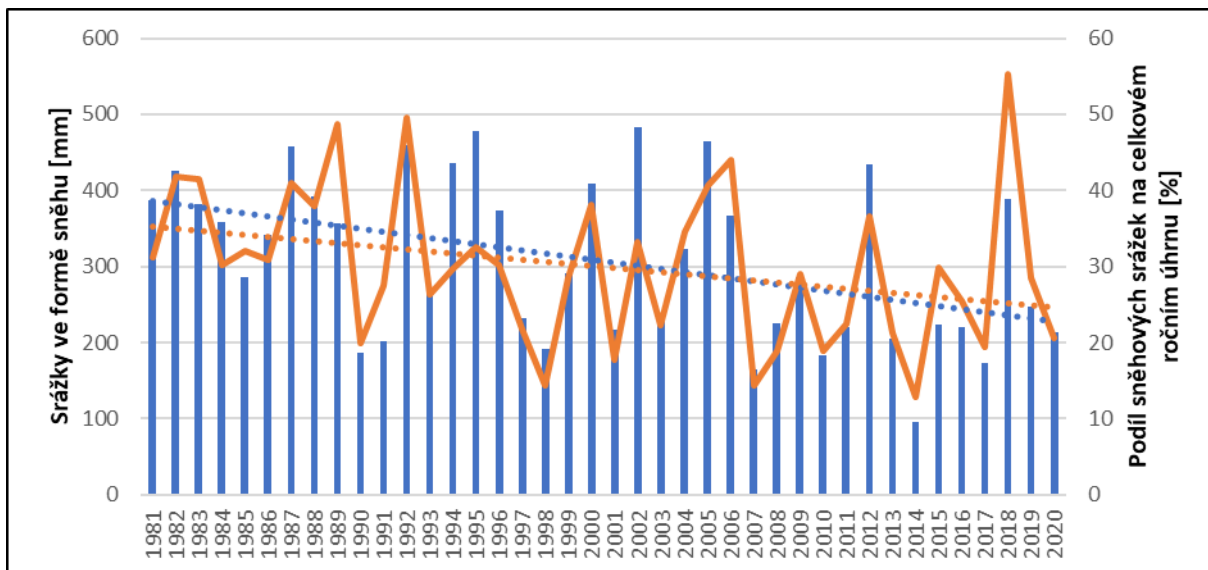
Základní metodou pro analýzu klimatických a hydrologických datových řad jsou grafy dlouhodobého vývoje jednotlivých proměnných, které je možné proložit dlouhodobým průměrem nebo směrnicí lineárního trendu. Vstupními daty jsou průměrné roční teploty vzduchu (Obrázek 2), roční srážkové úhrny (Obrázek 3) a průměrná roční výška sněhové pokrývky (Obrázek 4).



Obrázek 2 Vývoj průměrné roční teploty vzduchu na stanici Pec pod Sněžkou (1982–2021). Fialová linie: průměr za sledované období, šedá linie: lineární trend. Zdroj dat: ČHMÚ.

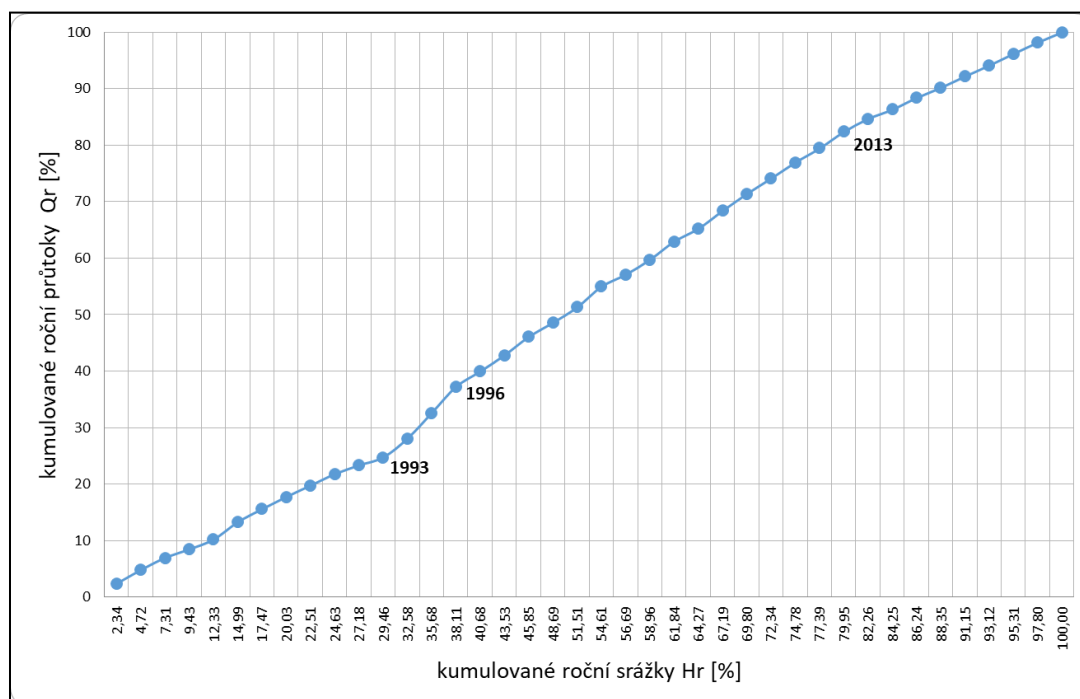


Obrázek 3 Roční úhrny srážek, stanice Pec pod Sněžkou (oranžově) a Horní Maršov (modře) s vyznačením lineárního trendu za sledované období 1982–2021. Zdroj dat: ČHMÚ.



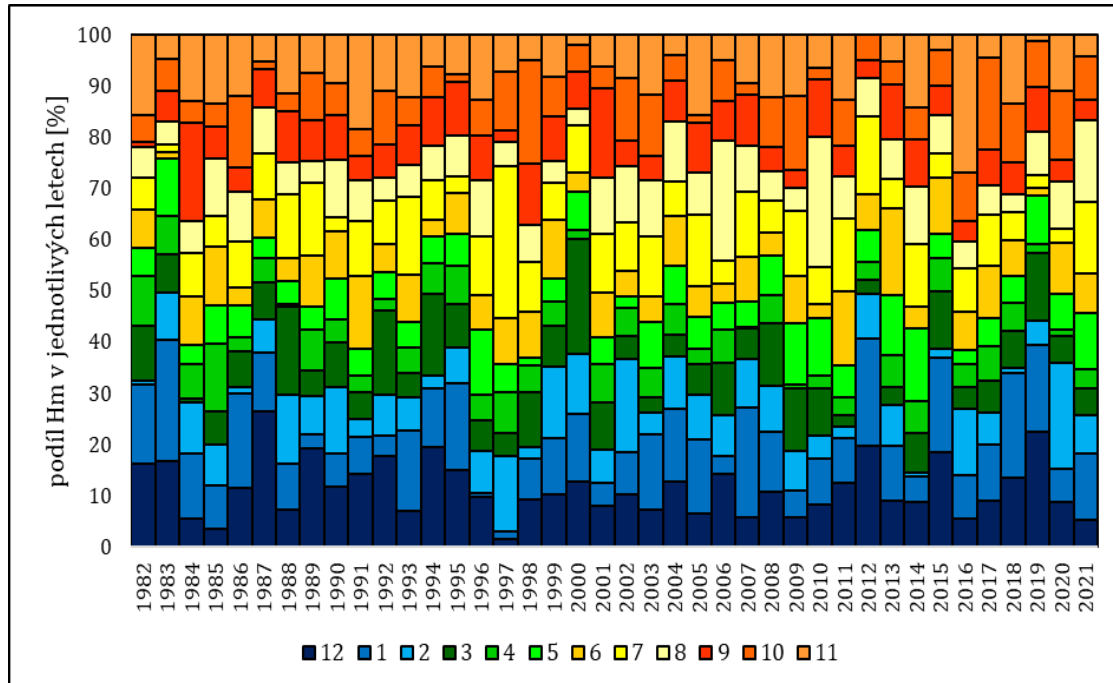
Obrázek 4 Vývoj množství srážek ve formě sněhu (modře) a podílu těchto srážek na celkovém ročním úhrnu srážek (oranžově), stanice Pec pod Sněžkou, s vyznačením lineárního trendu (1981-2020). Zdroj dat: ČHMÚ, Kavalír (2024).

Standardní metodou pro hodnocení změn ve vývoji hydroklimatických parametrů jsou jednoduché a podvojně součtové čáry, tzn. kumulativní čáry denních/měsíčních/ročních srážkových úhrnů a průměrných denních/měsíčních/ročních průtoků za sledované období (Obrázek 5). Součtové čáry jsou konstruovány za účelem zjištění, zda a případně kdy došlo v časové řadě ke změně trendu. Zjištěné body zlomu se následně mohou stát kritériem pro rozdělení datových řad do dvou či více období.



Obrázek 5 Podvojná součtová čára ročních úhrnů srážek Hr a průměrných ročních průtoků Qr za období 1982-2021 v profilu Čistá Dolní Dvůr. Zdroj dat: ČHMÚ.

Dále je vhodné konstruovat grafy měsíčního rozložení teploty vzduchu  $T_m$ , srážek  $H_m$  a průtoků  $Q_m$  ve sledovaném období (Obrázek 6), ze kterých lze vyčíst procentuální podíly jednotlivých měsíců na celkovém ročním úhrnu srážek, či ročním odtoku a zároveň zhodnotit sezonalitu dle ročních období (jaro, léto, podzim, zima).



Obrázek 6 Rozložení chodu měsíčních srážek, stanice Dolní Dvůr (1982-2021). Zdroj dat: ČHMÚ.

## Statistické metody pro detekci trendů v hydroklimatických datových řadách

Mann-Kendallův neparametrický test (Mann 1945; Kendall, 1938, Kendall 1975) je vhodný k detekci trendů v dlouhodobých datových řadách, a to jak k detekci ročních, sezónních i měsíčních trendů. Test má dva základní parametry. Prvním je p-hodnota, též míra signifikance, která udává sílu testu. Druhým je MK-S statistika, určující velikost a směr trendu, který může být klesající či rostoucí. V případě, že je hodnota MK statistiky kladná je trend rostoucí, u záporné hodnoty je trend klesající. Velkou výhodou Mann-Kendalova testu je, že není ovlivněn chybějícími daty. Test nepracuje s absolutními hodnotami v datovém souboru, ale s jejich relativními rozdíly. Z dostupných dat je nejprve nutné vypočítat statistiku S:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i); \text{ kde } \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 \text{ pokud } x_j - x_i > 0 \\ 0 \text{ pokud } x_j - x_i = 0 \\ -1 \text{ pokud } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

Kde počet pozorování je označen  $n$  a  $\text{sgn}(X_j - X_i)$  nabývá třech možných hodnot:  $(-1)$ ,  $0$  a  $1$  v závislosti na tom, jaký je rozdíl  $j$ -té a  $i$ -té hodnoty. Všechny hodnoty v datovém souboru jsou porovnány se všemi ostatními hodnotami, je jim přiřazena jedna ze tří hodnot a tyto hodnoty jsou následně sečteny a výsledkem je statistika  $S$ . Při vyšším počtu dat (zpravidla nad 40 pozorování) a při výskytu duplicit se dále spočítává variance  $S$  a testová statistika  $Z_s$  podle rovnic (Gilbert 1987 in Kavalír 2024):

$$\text{var}(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5) \right]$$

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{pokud } S > 0 \\ 0 & \text{pokud } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{pokud } S < 0 \end{cases}$$

Kde  $n$  je opět celkový počet pozorování,  $m$  je počet duplicitních hodnot a  $t_i$  jsou jednotlivé duplicitní hodnoty. Mann-Kendallův neparametrický test je využíván pro analýzu dat v hydrologii pro trendy průtoků a v klimatologii pro změnu a hodnocení vývoje klimatických proměnných jako je teplota vzduchu či srážkové úhrny. Doporučujeme pracovat s průměrnými měsíčními a ročními vstupními proměnnými. Výsledky aplikace M-K testu pro průměrné, minimální a maximální průtoky uvádí Tabulka 2.

**Tabulka 2 Výsledky MK testu pro profil Horní Maršov za období 1981-2020**

	Průměrné průtoky		Minimální průtoky		Maximální průtoky	
	MK statistika	p-hodnota	MK statistika	p-hodnota	MK statistika	p-hodnota
Leden	-1,15	0,25	-1,32	0,19	-0,49	0,62
Únor	0,73	0,46	0,92	0,36	0,96	0,34
Březen	0,64	0,52	1,91	0,06	0,66	0,51
Duben	-0,62	0,54	0,10	0,92	-1,47	0,14
Květen	<b>-2,88*</b>	<b><math>4 \times 10^{-3}</math></b>	<b>-2,07</b>	<b>0,04</b>	<b>-2,19</b>	<b>0,03</b>
Červen	<b>-2,32</b>	<b>0,02</b>	-1,93	0,05	-0,98	0,33
Červenec	-1,04	0,30	-0,63	0,53	-0,63	0,53
Srpen	-1,88	0,06	-0,80	0,42	<b>-2,32</b>	<b>0,02</b>
Září	-1,43	0,15	-1,10	0,27	-0,56	0,58
Říjen	0,27	0,79	-0,20	0,84	1,21	0,23
Listopad	-0,94	0,34	-0,20	0,84	<b>-2,21</b>	<b>0,03</b>
Prosinec	-0,90	0,37	0,19	0,85	-1,33	0,18
Rok	<b>-2,09</b>	<b>0,04</b>	0,75	0,46	-1,64	0,10

Vysvětlivky: tučně jsou zvýrazněny statisticky významné na hladině spolehlivosti  $\alpha=0,05$ ; \* jsou označeny hodnoty významné na hladině spolehlivosti  $\alpha=0,01$ , zdroj dat: ČHMÚ, (Kavalír, 2024).



Pokud je v datových řadách přítomna autokorelace, což může ovlivnit výsledky standardního neparametrického Mann-Kendalova testu je možno pro detekci trendů použít modifikovaný MK-test Hamed, Rao (1998).

## Ukázka aplikace MK-testu na hydroklimatické datové řady

### Srážkové úhrny

V případě časových řad úhrnů srážek (30 let +) jsou trendy pomocí MK- testu detekovány zřídka, což je i případ analyzovaných srážkoměrných stanic v zájmovém území. Přehled trendového testování pro jednotlivé měsíce znázorňuje Tabulka 3. 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 zájmových stanicích. Žádné jiné významné trendy v rámci měsíčních průměrů úhrnů srážek na níže položených stanicích detekovány nebyly a případné změny ve srážkoodtokových režimech v zájmových povodích jsou z meteorologického hlediska řízeny více nárůstem teplot vzduchu než změnou úhrnů srážek.

**Tabulka 3 – Výsledky trendového testování měsíčních dat srážek (1962-2021), interval spolehlivosti = 95 %**

Dolní Dvůr*			H. Maršov		Labská b.		Luční b.		Pec p/Sněž*		Sněžka	
M	Zs	p	Zs	p	Zs	p	Zs	p	Zs	p	Zs	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	-0.22	0.82	-0.43	0.67	0.83	0.40	0.59	0.55	0.57	0.57	0.22	0.82
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
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
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
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
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
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
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
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
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
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

Vysvětlivky: P-hodnoty <0.00 = <0.001, pokud je p-hodnota M = měsíc, Zs = S-statistika, p = p-value, červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. Hodnoty 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. Zdroj dat: ČHMÚ.

Pro jednotlivé stanice je možno dále testovat trendy ročních průměrů. V našem případě 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) u srážek detekovány žádné trendy a ani interanuální variabilita nevykazovala 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 byl detekován statisticky signifikantní kladný rostoucí trend srážkových úhrnů. Zcela opačná situace panuje na stanici Sněžka. Data z její polské strany pro období 1962-2021 ukazují zřetelný pokles ročních úhrnů srážek, který je patrný především od druhé poloviny 90. let, kdy roční průměry jen zřídka překračují hranici 1300 mm. Podrobnou analýzu trendů v jednotlivých časových obdobích a dekadách prezentuje Tabulka 4.

**Tabulka 4 Výsledky trendové analýzy ročních průměrů srážek pro jednotlivá časová období, interval spolehlivosti = 95 %**

Dolní Dvůr				Horní Maršov			Pec pod Sněžkou			Labská bouda		
Období	Zs	$\tau$	p	Zs	$\tau$	p	Zs	$\tau$	P	Zs	$\tau$	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								
Období	Zs	$\tau$	p	Zs	$\tau$	p						
1962-2021	2.81	0.18	0.01	-2.66	-0.24	0.01						
1962-1981	0.81	0.14	0.42	0.00	0.00	1.00						
1982-2001	2.11	0.35	0.04	1.33	0.22	0.18						
2002-2021	-0.29	-0.05	0.77	-0.55	-0.10	0.58						

Zs = S-statistika, p = p-value,  $\tau$  = Kendallovo  $\tau$ . Červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <0.00 = <0.001. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Zdroj dat: ČHMÚ.

## Teplota vzduchu

V rámci testování dalšího parametru: teploty vzduchu lze očekávat signifikantní detekci pozitivních trendů. Stoupající teplota vzduchu, na rozdíl od srážek, je potvrzený fakt, který významně ovlivňuje evapotranspirační bilanci a celkovou dynamiku srážkoodtokového režimu. Dle předpokladů, pozitivní trendy je možno detekovat na všech stanicích v zájmovém území, s dominantním výskytem v jarních a letních měsících. Můžeme však pozorovat rozdíly mezi jednotlivými stanicemi v rámci jejich nadmořské výšky. U níže položené stanice (Pec pod Sněžkou) je patrný nástup oteplení již v zimních měsících, naopak u vysokohorských stanic tomu tak není a signifikantní oteplení zde začíná až v dubnu.

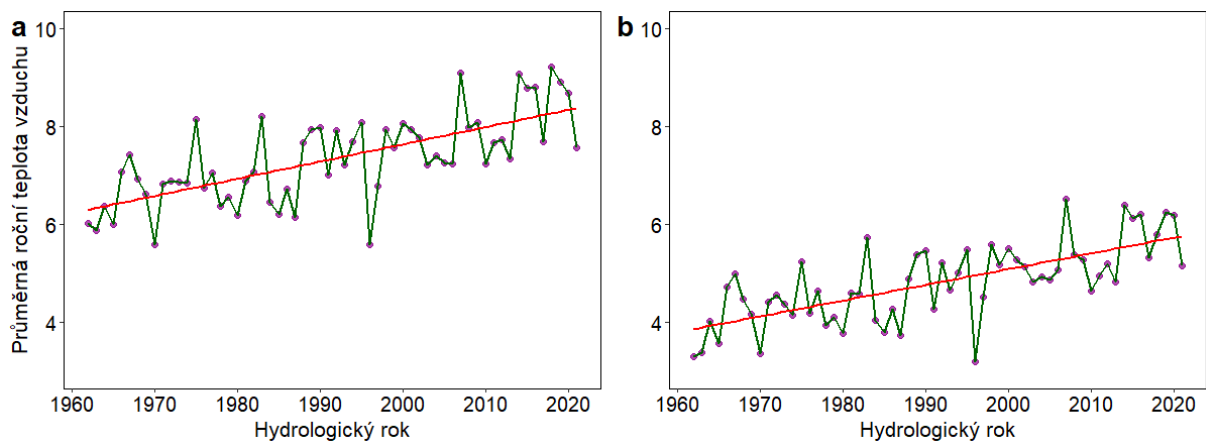
Tabulka 5 uvádí výsledky trendové analýzy dle modifikovaného MK-testu a ve vysvětlivkách pod tabulkou jsou uvedeny i výsledky dle standardního MK-testu. Jako nejstabilnější měsíce se jeví září a říjen, naopak nejvíce výrazné oteplení je patrné v letních měsících (červen-srpen), a to na všech zájmových 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.

Tabulka 5 Výsledky trendového testování měsíčních dat teploty vzduchu (1962-2021), interval spolehlivosti = 95%

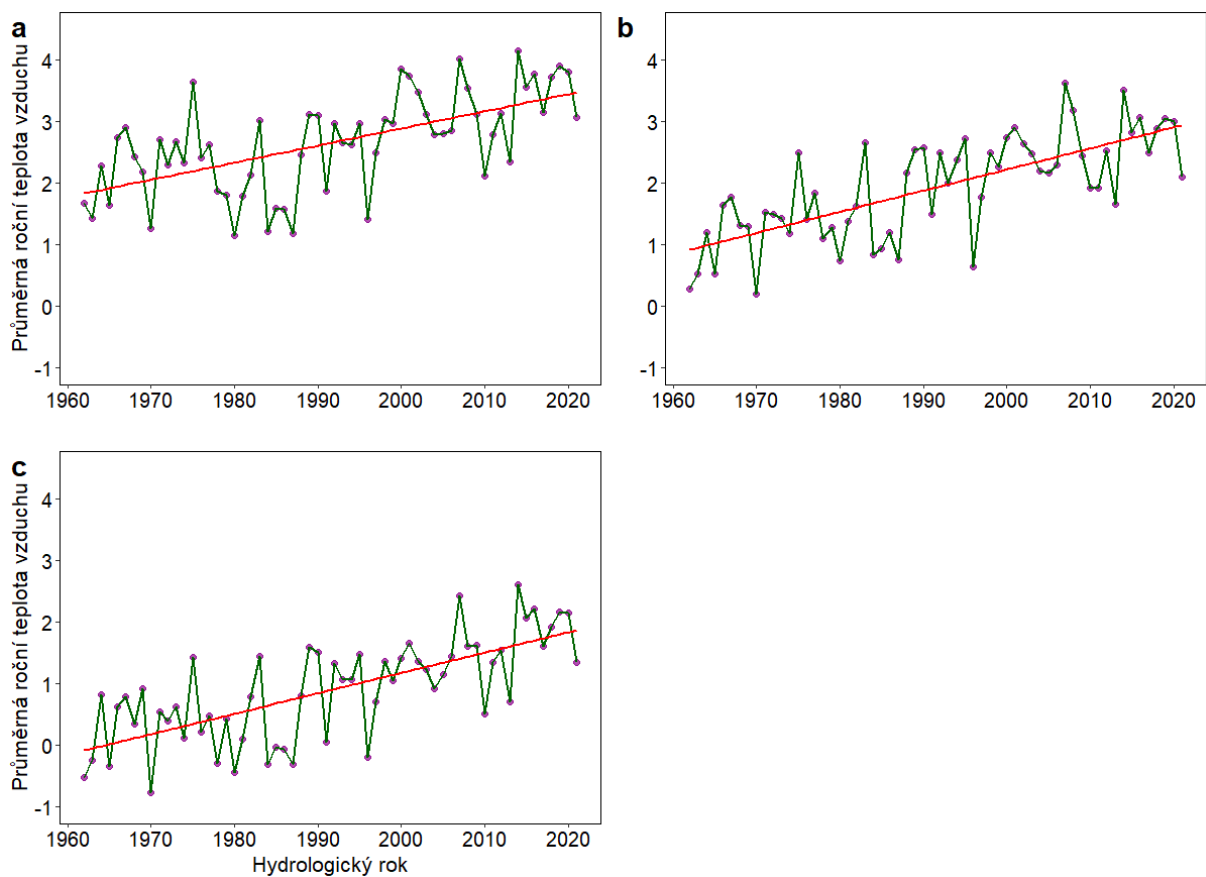
Labská bouda*			Luční bouda*		Pec p/Sněžkou		Sněžka	
M	S	p	S	p	S	p	S	p
1	0.87	0.38	1.70	0.09	2.20	0.03	1.16	0.25
2	3.52	<0.00	4.39	<0.00	2.09	0.04	3.01	0.00
3	1.92	0.06	2.05	0.04	2.19	0.03	1.65	0.10
4	3.04	0.00	3.20	0.00	4.03	<0.00	2.57	0.01
5	1.59	0.11	2.33	0.02	1.98	0.05	1.78	0.08
6	3.04	0.00	3.22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

Vysvětlivky: M = měsíc, S = S-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. Zdroj dat: ČHMÚ.

Vývoj průměrných ročních teplot vzduchu lze vyhodnotit rovněž graficky viz. Obrázek 7 a Obrázek 8. Nejteplejším obdobím v historii pozorování je poslední dekáda (2012-2021), jejíž průměr výrazně převyšuje “dlouhodobý normál”, a to na všech zájmových stanicích. Příkladem může být stanice 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. Pokud se zaměříme detailněji na sklon trendu u níže a výše položených stanicích, pak se hodnoty liší jen nepatrně. Nejmenší sklon nárůstu teplot vzduchu má datová řada Labské boudy, kde lze tedy predikovat, že oteplení probíhá o něco pomaleji v porovnání s okolními stanicemi. Jiným ukazatelem, jak vyjádřit míru oteplení pomocí sklonu datové řady je vyjádření jeho změny za určitý časový úsek, zpravidla za dekádu, a to pomocí lineární regrese. Z těchto dat uvádíme následující výsledky: 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.



**Obrázek 7** Vývoj ročních průměrů teploty vzduchu (1962-2021) na níže položených stanicích Vrchlabí (a) a Pec Pod Sněžkou (b). Zdroj dat: ČHMÚ.



**Obrázek 8** Vývoj ročních průměrů teploty vzduchu (1962-2021) na výše položených stanicích Labská bouda (a), Luční bouda (b) a Sněžka (c). Zdroj dat: ČHMÚ.

Obdobně jako i v rámci datové řady srážek, tak i zde byla analýza trendů pomocí MK-testu vývoje ročních průměrů rozdělena na 4 časová období: 1962-2021, 1962-1981, 1982-2001 a 2002-2021. Výsledky této analýzy uvádí Tabulka 6.

**Tabulka 6 Výsledky trendové analýzy ročních průměrů teploty vzduchu pro jednotlivá časová období, interval spolehlivosti = 95%**

Labská bouda			Luční bouda			Pec p/Sněžkou			Sněžka			
Obd.	S	$\tau$	p	S	$\tau$	p	S	$\tau$	p	S	$\tau$	p
62-21	4.27	0.44	<.0	5.56	0.49	<.0	5.52	0.49	<.0	5.40	0.50	<.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
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
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

S = S-statistika, p = p-value,  $\tau$  = Kendallovo  $\tau$ , 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. Zdroj dat: ČHMÚ.

## Hydrologická data

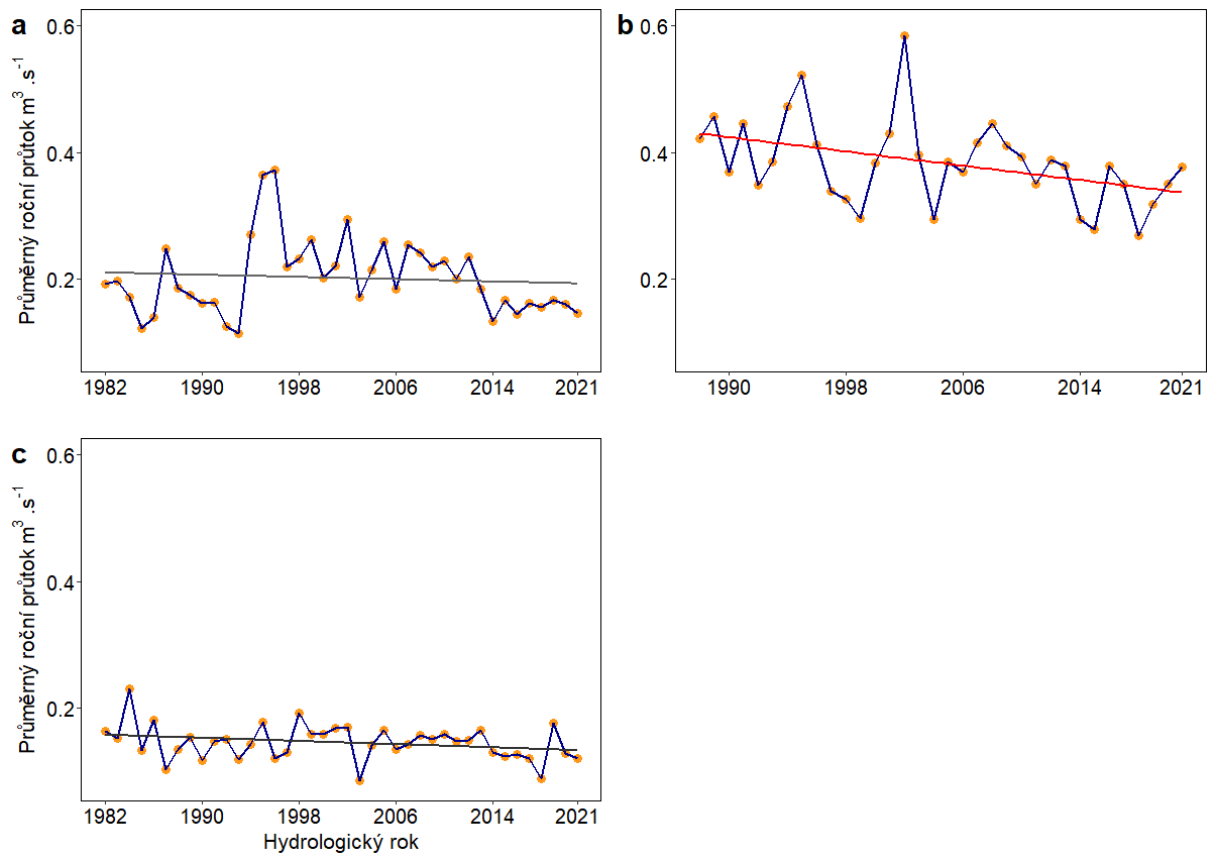
Hydrologická data se v ČR standardně vyhodnocují pro hydrologický rok, tj. od listopadu do října roku následujícího. Míra autokorelace v rámci měsíčních hydrologických dat byla zanedbatelná, byl tedy aplikován standardní neparametrický MK-test.

Tabulka 7 ukazuje výsledky trendové analýzy pro jednotlivé měsíce hydrologického roku. Z výsledků jsou patrné signifikantní poklesy vodností v jarních měsících (duben, květen) a to na všech závěrových profilech. Tyto výsledky korespondují také se zjištěnými trendy v rámci srážek – detekovaný pokles v dubnu a květnu, a teplot – detekovaný nárůst ve výše zmíněných měsících. Dále byly detekovány poklesy vodnosti v letních měsících především na níže položených závěrových profilech (Hostinné, Horní Maršov). Co se týče povodí Modrého potoka, zde byly poklesy průtoků detekovány také výhradně v letních měsících (červenec, srpen). Relativně stálé vodnosti u tohoto povodí v jarních měsících jsou dány vysokou nadmořskou výškou, dlouhodobější sněhovou pokrývkou a posunem doby jejího tání oproti níže položeným povodím.

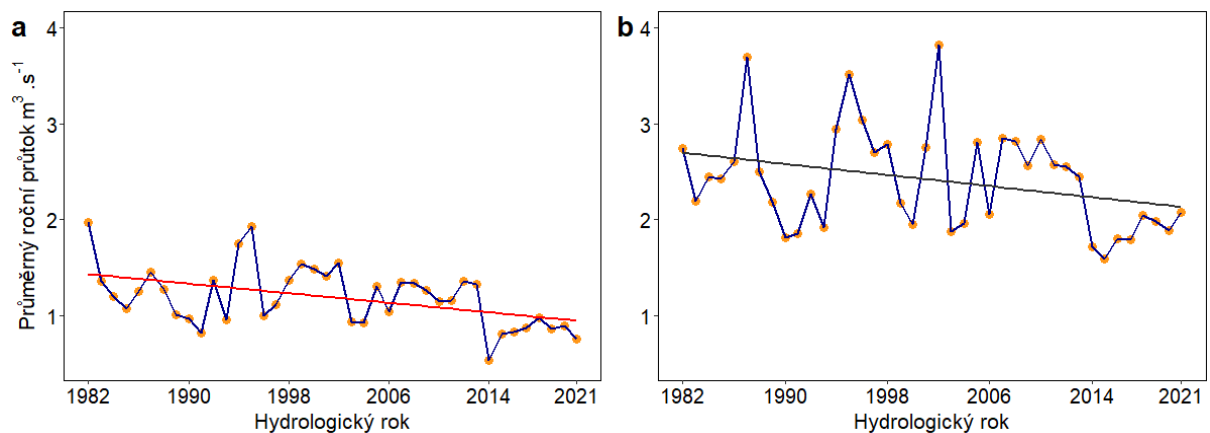
**Tabulka 7 Výsledky trendového šetření dynamiky průtoků pro jednotlivé měsíce v rámci analyzovaných povodí, interval spolehlivosti = 95%**

M	Čistá – Černý Důl		Čistá – Hostinné		Modrý potok		Úpa – H. Maršov		Úpa – Obří Důl	
	S	p	S	p	S	p	S	p	S	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

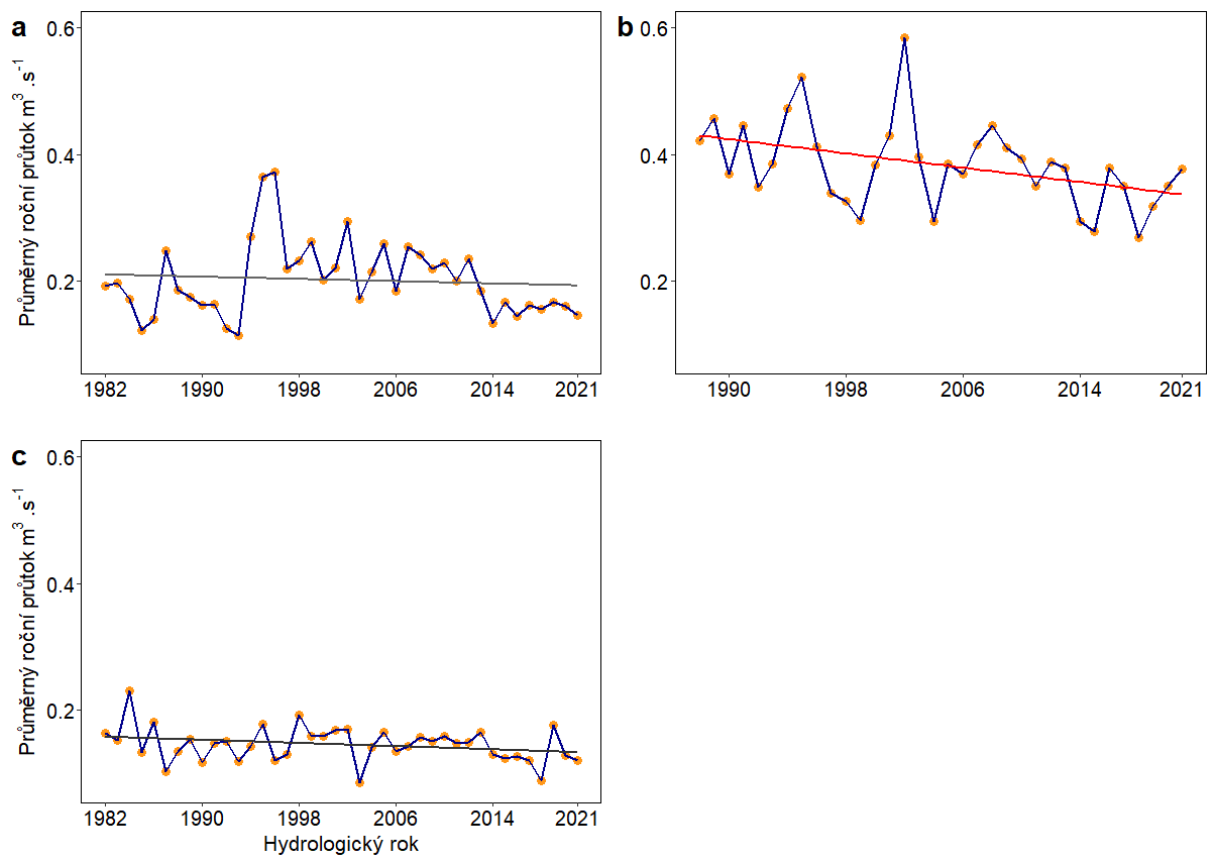
M = měsíc, S = S-statistika, p = p-value. Červené zvýraznění = pokles, zelené zvýraznění = nárůst. P-hodnoty: <0.00 = <0.001, pokud je p-hodnota zaokrouhlená na 0.05 a trend není v tabulce vyznačen, značí to, že výsledná hodnota před zaokrouhlením převyšuje hranici 0.05. Hodnoty zaokrouhleny na dvě desetinná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



Obrázek 10. 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 interanuaální variability. Na všech stanicích, kromě Modrého potoka, jsou patrné výrazné změny vodnosti v poslední dekádě (2012-2021).



**Obrázek 9** Vývoj dynamiky ročních průměrných průtoků v rámci dvou níže položených závěrových profilů: Čistá – Hostinné (a), Úpa – Horní Maršov (b). Zdroj dat: ČHMÚ.

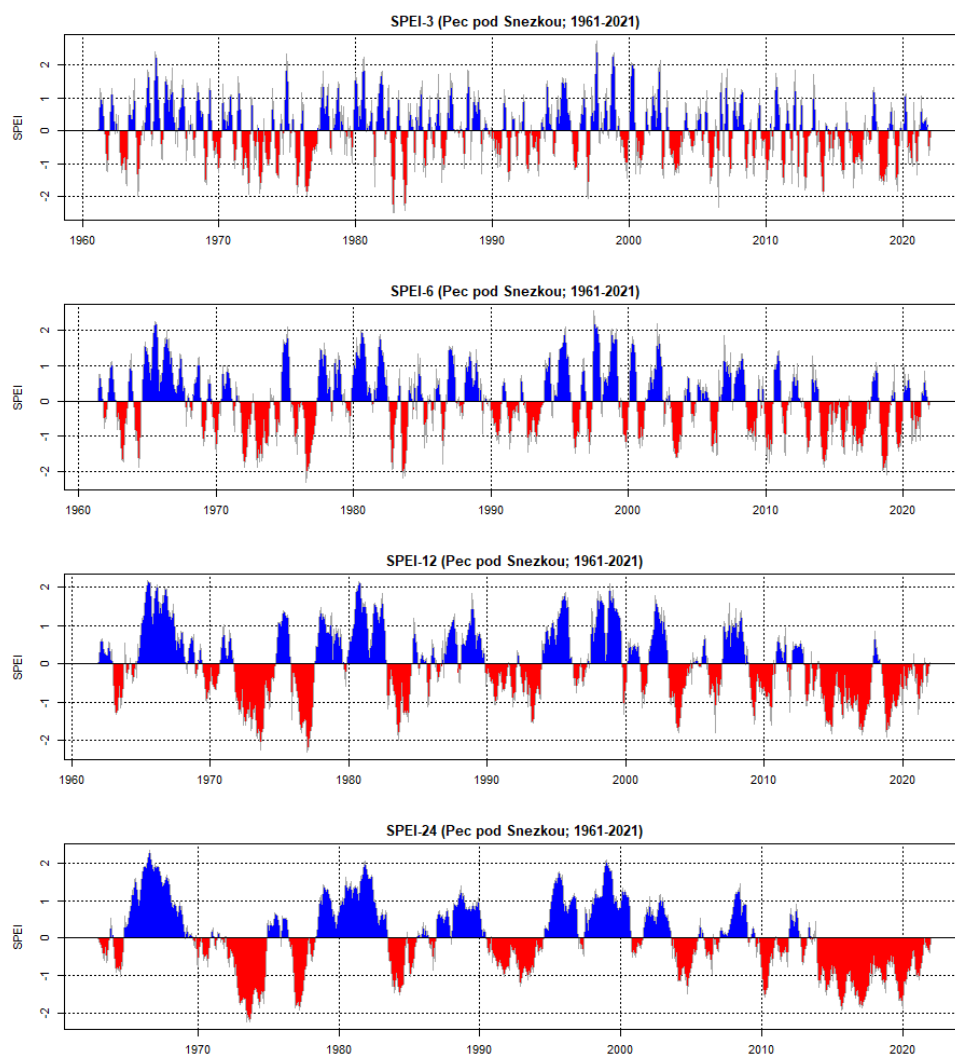


**Obrázek 10** Vývoj dynamiky ročních průměrných průtoků výše položených závěrových profilů: Čistá – Černý Důl (a), Úpa – Obří Důl (b) a Modrý potok (c). Zdroj dat: ČHMÚ.

## Hodnocení hydrologických a klimatických extrémů

Indexy pro vyhodnocení extremity hydroklimatických jevů použité v tomto projektu byly vybrány na základě dvou hlavních kritérií. Jedním byla dostupnost vhodných dat, tím druhým pak jednoduchá srovnatelnost analýz mezi dílčími povodími. Analýza zahrnovala také hodnocení hydrologických a klimatických charakteristik během 4 desetiletí (1982-1991, 1992-2001, 2002-2011 a 2012-2021) s cílem poukázat na nejvýraznější změny odtokových charakteristik během celého sledovaného období. Z časových řad byly vypočteny následující charakteristiky:

1) **SPEI index** vyjadřující vláhovou bilanci. Tento ukazatel je standardizovaným rozdílem spadlých srážek a potenciálního výparu z povodí, kdy je výpar vypočten jednoduchou formulí z dostupných dat o teplotě vzduchu (Beguería et al., 2014). Hodnoty SPEI indexu blízko nuly vyjadřují normální stav. Pokud hodnoty indexu klesnou pod -0,5, můžeme hovořit o suchu, naopak hodnoty vyšší než 0,5 značí nadbytek zásob vody oproti dlouhodobému normálu. Výstupy indexu pro retrospektivu 3, 6, 12 a 24 měsíců opět hovoří o výjimečnosti desetiletí 2012-21, ve kterém bylo zájmové území zasaženo suchem kvůli deficitu srážek a také zvýšenému výparu vlivem nadnormálních teplot vzduchu (Obrázek 11).



**Obrázek 11** Vývoj SPEI indexu (SPEI-3, SPEI-6, SPEI-12 a SPEI-24) pro stanici Pec pod Sněžkou. Zdroj dat: ČHMÚ.

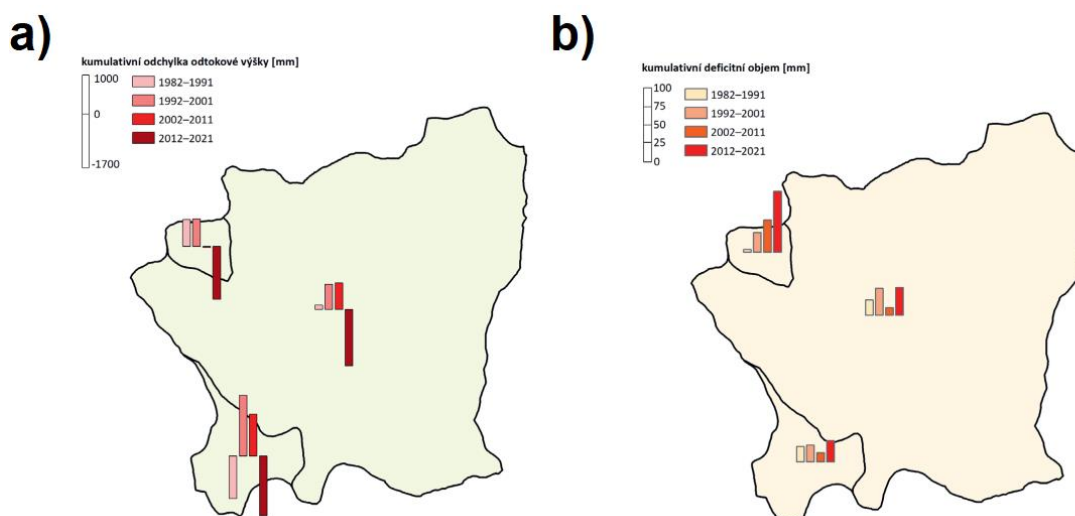
2) **Překročení prahové hodnoty – Q90.** Pro hranici hydrologického sucha a hodnocení jeho sezonality byla vybrána hranice kvantilu Q90. Tato hodnota odpovídá průtoku s pravděpodobností překročení 90 %. Kvantil Q90 byl vybrán na základě manuálu WMO pro hodnocení nízkých průtoků (Gustard a Demuth, 2008). Tato hranice poté slouží při výpočtu níže



uvedených charakteristik. Pro hranici opačného extrému, tedy povodní, byla s přihlédnutím k histogramu průtokových dat všech vybraných stanic použita metoda N-letosti povodně. Tedy průtok, který se objeví v průměru jednou za N-let. Jako povodeň byla tedy označena dvouletá voda, tedy hodnota průtoků, která se vyskytne v průměru jednou za 2 roky.

3) **Odtoková výška** – celkový objem vody vztažený na plochu povodí, který odteče za daný časový úsek. I pomocí této proměnné byla zcela jasně vidět výjimečnost období 2012-21, kdy byla průměrná roční odtoková výška nejnižší ve všech povodích. Při bližší analýze kumulativního deficitu odtokové výšky vůči normálu je patrné, že během posledního desetiletí byl zaznamenán výrazný deficit v celkovém odtoku ze všech tří povodí – v průměru 1642 mm, tedy 164,2 mm za rok. V povodí horní Čistě bylo z tohoto pohledu odtokově podprůměrné i období 1982-91  
Obrázek 12a.

4) **Magnituda hydrologického sucha – kumulativní deficitní objemy** v období, kdy byla hodnota průtoků menší než Q90 – tedy průtok s 90 % pravděpodobností překročení. Pro lepší porovnání mezi jednotlivými povodími byl tento objem opět přepočten na plochu povodí v milimetrech. V chladné polovině roku pozorujeme spíše úbytek nedostatkových objemů v průběhu sledovaného období, zatímco v teplé polovině roku deficitní objemy v korytech vodních toků rostou. Nejvýraznější a kontinuální nárůst je patrný v povodí Modrého potoka, kde v porovnání prvního a posledního desetiletí vzrostl deficit o 120 mm  
Obrázek 12b. Ve zbylých dvou povodí je průběh více variabilní, i tak ale nejvyšší hodnoty nedostatkových objemů korespondují s nejteplejším a nejsušším obdobím 2012-21.



**Obrázek 12 kumulativní odchylka odtokové výšky; b) kumulativní deficitní objem pro vybraná desetiletí v rámci zájmových povodí. Zdroj dat: ČHMÚ.**

5) **Index sezonality (seasonality index – SI)** představuje průměrné sezónní rozložení hydrologického sucha pro dané časové období (Laaha a Blöschl, 2006). SI je založen na dvou parametrech ( $\Theta$  a  $r$ ), které jsou vypočítány z juliánských dnů všech pozorování, kdy hodnoty průtoku byly pod prahovou hodnotou, v našem případě Q90. Parametr  $\Theta$  představuje míru průměrné sezónnosti sucha pomocí průměrného dne výskytu v radiánech (hodnoty se pohybují od 0 do  $2\pi$ , kde 0 znamená 1. leden,  $\pi$  odpovídá 1. červenci atd.). Parametr  $r$  představuje průměrný výsledný den výskytu a je bezrozměrným ukazatelem sezónní variability sucha. Hodnoty  $r$  se pohybují mezi 0 a 1, kde 0 znamená, že sucho nemá žádnou sezónnost a v dlouhodobém měřítku je jeho výskyt rovnoměrně rozložen během celého roku. Hodnoty blíží se 1 odpovídají velmi silné sezónnosti sucha (každé sucho se vyskytuje každý rok zhruba ve stejné době. Dny s měřeným průtokem rovným nebo nižším, než Q90 jsou extrahovány za celé sledované období (1982–2021) a převedeny na juliánské dny ( $D_j$ ), které představují cyklickou proměnnou zobrazitelnou na jednotkové kružnici jako vektor. Směrový úhel v radiánech je poté vypočítán následovně:

$$\theta_j = \frac{D_j 2\pi}{365}$$

Střední hodnoty souřadnic  $x_\theta$  and  $y_\theta$  součtu  $n$  dnů  $j$  byly označeny jako:

$$x_\theta = \frac{1}{n} \sum_j \cos(\theta_j) ; y_\theta = \frac{1}{n} \sum_j \sin(\theta_j)$$

Na základě toho byl úhel směru průměrného vektoru odvozen jako:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right) \quad \text{pro první a čtvrtý kvadrant: } x > 0$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right) + \pi \quad \text{pro druhý a třetí kvadrant: } x < 0$$

Průměrný den výskytu nízkého průtoku byl následně odvozen převedením průměrného úhlu zpět do formátu juliánského dne následujícím způsobem:

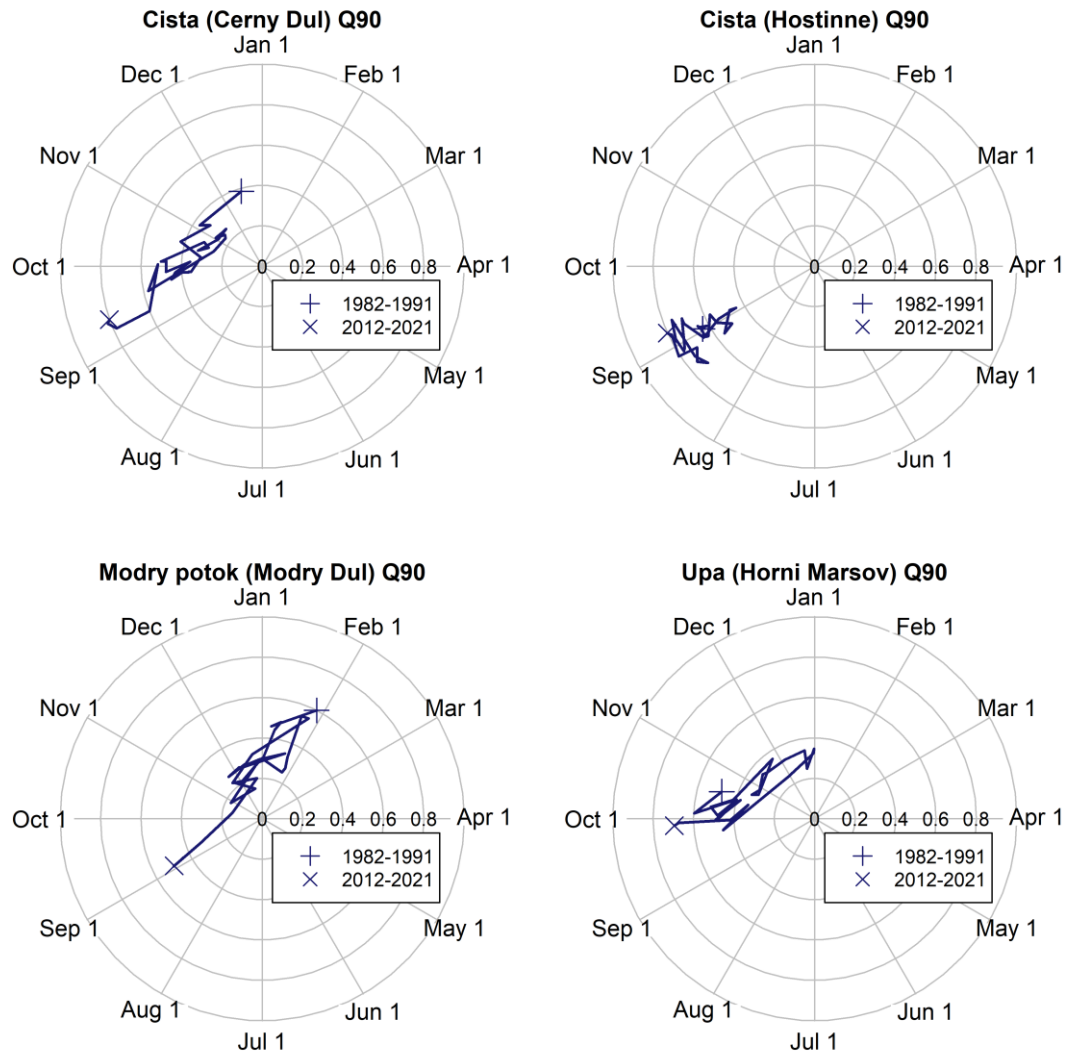
$$D = \theta \frac{365}{2\pi}$$

Nakonec byla délka průměrného vektoru  $r$ , která představuje variabilitu dnů se suchem, odvozena jako:

$$r = \sqrt{x_\theta^2 + y_\theta^2}$$

Kombinace  $r$  a  $D$  může být poté vizualizována v prstencovém grafu pro každý měrný profil za účelem zjištění vývoje průměrného dne výskytu sucha během sledovaného období spolu s jeho variabilitou. Tyto výsledné hodnoty indexu sezonality (SI) byly znázorněny jako desetileté

klouzávé průměry, aby poskytly obrázek o postupném vývoji průměrného výskytu sucha během daného období (Obrázek 13).



**Obrázek 13** Zobrazení sezónnosti hydrologického sucha dle kvantilu Q90 pomocí SI pro vybrané vodoměrné stanice. Zdroj dat: ČHMÚ.

## Závěr

Navržený metodický postup pro hodnocení změn srážko-odtokového režimu, trendů vybraných hydroklimatických proměnných a hydrologických extrémů byl aplikován na klimatické a hydrologické datové řady v základním období 1982-2021. Pro aplikaci byla využita volně dostupná data ze srážkoměrných, klimatických a hydrologických stanic ČHMÚ. Hlavním cílem metodiky bylo pomocí grafických a statistických metod detekovat změny srážko-odtokového režimu a identifikovat trendy základních hydroklimatických proměnných: teploty vzduchu, srážek a průtoků. Dále se metodika zaměřuje na analýzu hydrologických extrémů, konkrétně metod pro vyhodnocení hydrologického sucha.

Vhodných postupů pro analýzu dlouhodobých datových řad existuje celá řada, jejich výběr závisí na konkrétních cílech a požadavcích uživatele. V rámci této dílčí metodiky jsme vybrali následující metody a výpočty: lineární regresi dlouhodobých datových řad, jednoduché a podvojně součtové čáry, analýzu sezonality pomocí rozložení chodu  $T_m$ ,  $H_m$ ,  $Q_m$ . Mann-Kendallův neparametrický test ve standardní verzi (Mann, 1945, Kendall 1975) a modifikovaný Mann-Kendallův test (Hamed, Rao (1998), 1998) pro datové řady s autokorelací. Pro analýzy klimatických a hydrologických extrémů jako vhodné doporučujeme aplikovat: SPEI index, metodu překročení prahové hodnoty  $Q_{90}$ , vyhodnocení změn odtokové výšky, kumulativní deficitní objemy a index sezonality  $SI$ .

V případě dlouhodobých datových řad lze pomocí názorných grafických metod zpravidla snadno identifikovat změny, avšak je tyto změny vhodné následně ověřit pomocí statistických testů a výpočtů. Pro klimatické i hydrologické datové řady se osvědčila aplikace Mann-Kendalova neparametrického testu, neboť test lze aplikovat na měsíční proměnné a zároveň nevádí krátkodobé chybějící záznamy v datových řadách. V případě hydrologického sucha se dobře osvědčily SPEI index, vyhodnocení změn v odtokových výškách pro jednotlivé dekády a index sezonality  $SI$ .

Navržená metodika je přenositelná na jiné typy analýz v klimatických a hydrologických datových řadách.

## Literatura

Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International journal of climatology*, 34(10), 3001-3023.

Gustard, A., & Demuth, S. (2009). Manual on low-flow estimation and prediction. Operational hydrology report, No. 50 WMO-No. 1029. *World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland*, 136, 590.

Laaha, G., & Blöschl, G. (2006). Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(18), 3851-3878.

Mann, H. B. (1945): Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13, 3, 245-259.

KENDALL, M. G. (1938): A New Measure of Rank Correlation. *Biometrika*, 30, 81-93.

KENDALL, M. G. (1975): Rank Correlation Methods. Griffin, Londýn.

Kavalír, V. (2024): Hydrologické extrémny a změny kvality vody na horním toku řeky Úpy. Diplomová práce, PŘF UK, Praha, 145 s.