



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-V28

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

Druh výstupu/výsledku:

Termín dosažení výsledku: 12/2024

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

Cíl/účel vytváření výsledku

Cílem tohoto výsledku je metodický popis pro hodnocení změn srážko-odtokového režimu a trendů vybraných hydroklimatických proměnných a hydrologických extrémů. Hlavním cílem metodiky je 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 hydrologického sucha.

Tento dílčí výsledek slouží jako podpůrný podklad pro dosažení dalších aplikovaných výsledků projektu, konkrétně V1 – Metodiky pro monitoring vlivu změn krajinného pokryvu na lokální hydrologii s využitím dálkového průzkumu Země a hydrologického modelování.

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

Dílčí metodika specifikuje doporučené postupy pro hodnocení změn srážko-odtokového režimu (S-O), trendů vybraných hydroklimatických proměnných a hydrologických extrémů. Postavena je na zpracování a vyhodnocení volně dostupných dat monitorovaných ČHMÚ.

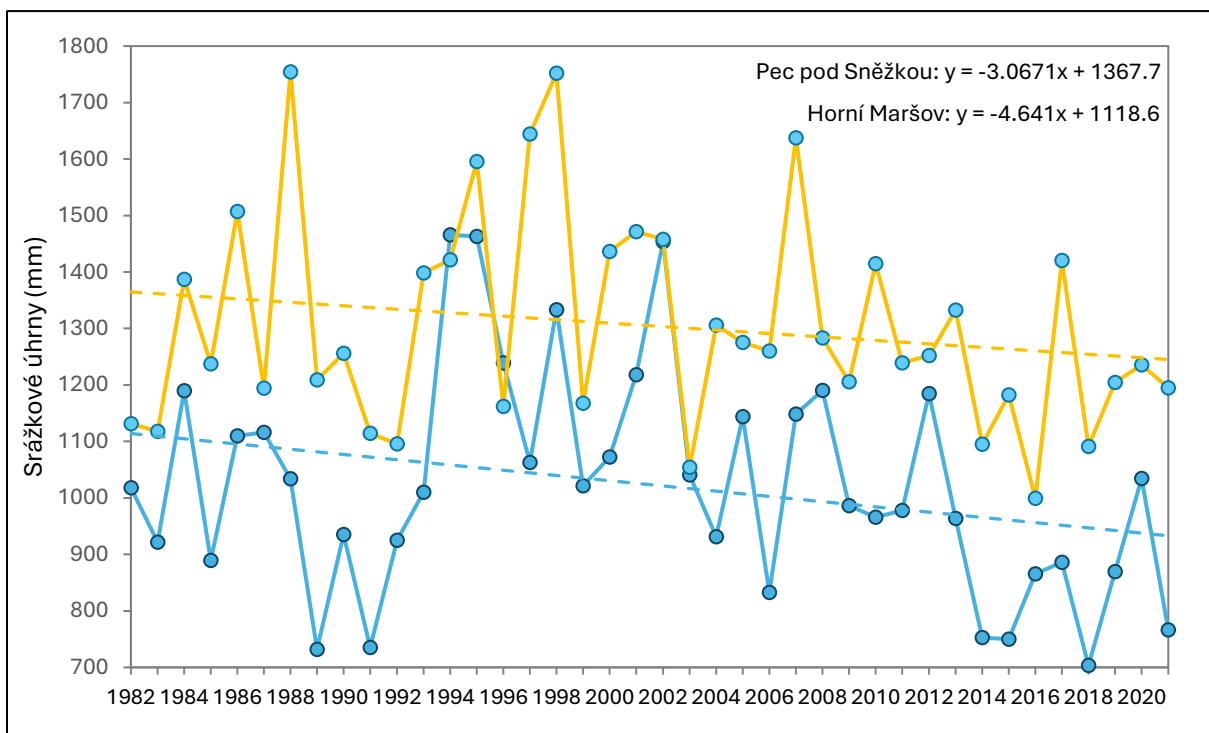
Její součástí jsou základní grafické metody pro analýzu změn S-O režimu, metody pokročilé hydrologické statistiky pro detekci trendů v datových řadách a dále metodické postupy pro hodnocení hydrologických a klimatických extrémů, např. využití SPEI indexu, překročení prahové hodnoty – Q90, metody kumulativního deficitu odtokové výšky a magnituda hydrologického sucha – kumulativních deficitních objemů.

Prezentace výsledku (popis, obrázky, grafy apod.)

Pro veškeré doporučené aplikované metody lze využít volně dostupná klimatická a hydrologická data ČHMÚ. Pro námi zkoumaná zájmová povodí horní Úpy a horní Čisté byly využity následující limnigrafické a meteorologické stanice:

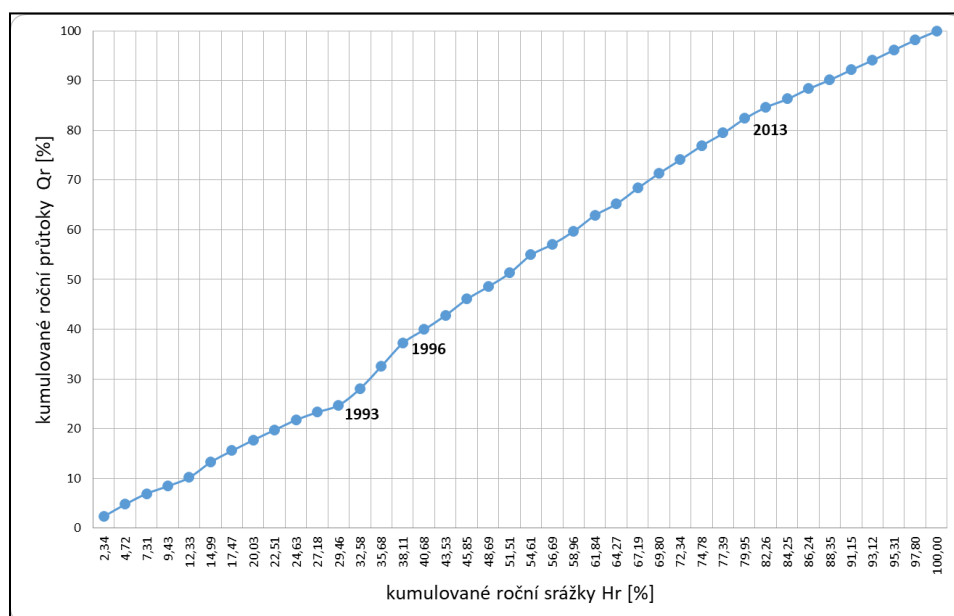
- limnigrafická stanice Úpa - Horní Maršov (013000): 1981-2021, datová řada Qd, Qm
Poloha 64,000 ř.km, nadmořská výška 570,450 m n.m., plocha povodí: 81,99 km²
- limnigrafická stanice Čistá - Černý Důl (003100): 1981-2021, datová řada Qd, Qm
Poloha: 15,700 ř.km, nadmořská výška 717,461 m n.m., plocha povodí: 6,53 km²
- 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 km²
- 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 km²

Základní metodou pro analýzu klimatických a hydrologických datových řad jsou analýzy dlouhodobého vývoje jednotlivých proměnných pomocí grafů, které je vhodné proložit směrnici lineárního trendu. Vstupními daty jsou např. průměrné roční teploty vzduchu, roční srážkové úhrny (Obrázek 1) a průměrná roční výška sněhové pokrývky).



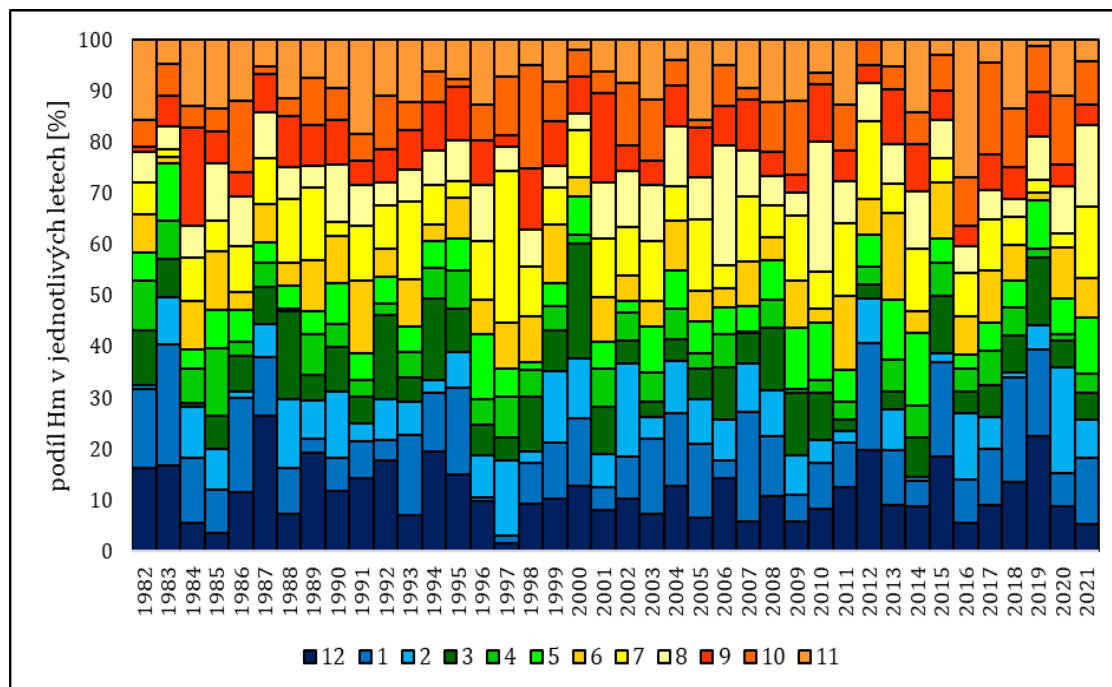
Obrázek 1 Roční úhrny srážek, stanice Pec pod Sněžkou (oranžově) a Horní Maršov (modře) s vyznačením lineárního trendu za sledované období 1982-2021. Zdroj dat: ČHMÚ.

Další doporučenou 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 2). Součtové čáry jsou konstruovány za účelem zjištění, zda a případně kdy došlo v časové řadě ke změně trendu – tzv. body zlomu. Zjištěné body zlomu se následně mohou stát kritériem pro rozdělení datových řad do dvou či více období.



Obrázek 2 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 doporučujeme zkonstruovat grafy měsíčního rozložení teploty vzduchu T_m , srážek H_m a průtoků Q_m ve sledovaném období (Obrázek 3), ze kterých lze vyčíst procentuální podíly jednotlivých měsíců na celkovém ročním úhrnu srážek, či ročním odtoku a zároveň zhodnotit změny sezonality dle ročních období (jaro, léto, podzim, zima).



Obrázek 3 Rozložení chodu měsíčních srážek, stanice Dolní Dvůr (1982-2021). Zdroj dat: ČHMÚ.

Zjištěné změny S-O režimu je nezbytné ověřit pomocí statistických metod. V rámci našich postupů doporučujeme aplikovat Mann-Kendallův neparametrický test (Mann 1945; Kendall, 1938, Kendall 1975) a to jak k detekci ročních, sezónních i měsíčních trendů. 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

Hydrologická data se standardně vyhodnocují pro hydrologický rok, tj. od listopadu do října roku následujícího.

Tabulka 1 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 v jarních měsících u tohoto povodí jsou dány vysokou nadmořskou výškou, dlouhodobější sněhovou pokrývkou a posunem doby jejího tání oproti níže položeným povodím.

Tabulka 1 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 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. 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 jednotlivými zájmovými povodími.

V rámci naší metodiky doporučujeme při hodnocení extrémů počítat následující indexy:

- 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). Naše výstupy SPEI indexu pro retrospektivu 3, 6, 12 a 24 měsíců hovoří o výjimečnosti desetiletí 2012-21, ve kterém bylo zájmové území zasaženo suchem kvůli deficitu srážek a také zvýšenému výparu vlivem nadnormálních teplot vzduchu.
- 2) **Překročení prahové hodnoty – Q90**. Pro hranici hydrologického sucha a hodnocení jeho sezonality byla vybrána jako prahová hodnota 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). 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.
- 3) **Odtoková výška** – celkový objem vody vztažený na plochu povodí, který odečte 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 sledovaných povodích.
- 4) **Magnituda hydrologického sucha – kumulativní deficitní objemy** v období, kdy byla hodnota průtoku menší než Q90 – tedy průtok s 90% pravděpodobností překročení. Pro možnost porovnání jednotlivých zájmových povodí doporučujeme tento objem přepočítat na plochu povodí v milimetrech.
- 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 (θ a r), které jsou vypočítány z juliánských dnů všech pozorování, kdy hodnoty průtoku byly pod prahovou hodnotou, v našem případě Q90.

Vyhodnocení výsledku (základní zjištění, přínos, případně využití)

Vhodných metod pro analýzu změn v dlouhodobých datových řadách existuje celá řada, jejich výběr závisí na konkrétních cílech a požadavcích uživatele. Podstatná je i dostupnost zdrojových dat. Metodika je postavena na hodnocení volně dostupných klimatických a hydrologických datových řad ČHMÚ. V rámci řešení našeho výzkumného úkolu jsme vybrali a následně doporučili následující výpočetní postupy: 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 pro datové řady s autokorelací (Hamed, Rao (1998)). Pro analýzy klimatických a hydrologických extrémů doporučujeme aplikovat: SPEI index, metodu překročení prahové hodnoty Q_{90} , vyhodnocení změn odtokové výšky, kumulativní deficitní objemy a index sezonality SI. Dostupné výsledky z vybraných zájmových povodí prokázaly možnost detekce změn a dlouhodobých trendů S-O režimu. Z vypočtených indexů hydrologických extrémů lze velice dobře doložit hydrologickou výjimečnost poslední dekády 2012-2021 z celého hodnoceného období 1981-2021.

Pracovníkům KRNAP bude k dispozici jak metodický postup, tak konkrétní výsledky analýz datových řad a specializovaná mapa vývoje hydroklimatických proměnných a hydrologických extrémů.

Doložení výsledku

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

Popis novosti

Inovaci spatřujeme především ve snaze o propojení hodnocení klimatických a hydrologických proměnných a dále v možnosti jednoduchého vzájemného porovnání jednotlivých zájmových povodí. Metodika podtrhuje význam statistických metod v hydrologii. Pro správnou interpretaci výsledků je podstatná kombinace jednotlivých výsledků dílčích analýz a jejich vzájemné propojení.

Informace o rozsahu využití dílčí metodiky

Výsledek bude využit organizacemi zapojenými do řešení projektu jako vstup pro tvorbu dalších uvedených souhrnných výsledků řešení projektu. Další možné využití je správou KRNAP.

Informace o přínosech pro uživatele

V případě dlouhodobých datových řad lze pomocí názorných grafických metod zpravidla snadno identifikovat změny, avšak tyto změny je vhodné následně ověřit pomocí statistických testů a výpočtů. Pro klimatické i hydrologické datové řady je doporučena aplikace Mann-Kendallova neparametrického testu, neboť test lze aplikovat na měsíční proměnné a zároveň nevádí krátkodobé chybějící záznamy v datových řadách. V případě hydrologického sucha se osvědčily SPEI index, metoda prahové hodnoty Q_{90} , vyhodnocení změn v odtokových výškách pro jednotlivé dekády a index sezonality SI. Navržená metodika je přenositelná na jiné typy podobných analýz v datových řadách.

Seznam odborných podkladů

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 extrémy a změny kvality vody na horním toku řeky Úpy. Diplomová práce, PŘF UK, Praha, 145 s.

Výsledek je volně dostupný zde*:

[2024 – LUCC4Hydro](#)

* V případě, že je možné výsledek volně zpřístupnit.

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