

HODNOCENÍ TRENDŮ V HYDRO-KLIMATICKÝCH ŘADÁCH NA PŘÍKLADU VYBRANÝCH HORSKÝCH POVODÍ

Evaluation of trends in hydro-climatic long-term data series for selected mountains catchments

Kliment, Z.¹, Matoušková, M.¹, Ledvinka, O.², Královec, V.¹

¹ Katedra fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy, Praha, Česká republika

² Český hydrometeorologický ústav, pobočka Praha a Ústav aplikací matematiky a výpočetní techniky Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy, Praha, Česká republika.

Abstrakt

Hlavním cílem předložené studie je zhodnotit vývoj srážko-odtokového režimu ve vybraných povodích v oblasti Šumavy, Jeseníků a Krušných hor za posledních 50 let. Vedle zjišťování nehomogenit v časových řadách průměrných průtokových, srážkových, teplotních a sněhových dat se práce zabývá analýzou trendů na úrovni ročních hodnot a jednotlivých měsíců. V práci jsou představeny různé metodické nástroje ke sledování změn a trendů v hydro-klimatických řadách, zejména různé metody statistického testování a aplikace Mann-Kendallova sezónního testu. Výsledky jsou porovnány nejen z hlediska použitých metod, ale i geografické rozdílnosti sledovaných území.

Klíčová slova: trendy, srážko-odtokový režim, teplota vzduchu, sněhové charakteristiky, Šumava, Jeseníky, Krušné hory

Abstract

The main aim of this work is to evaluate the development of rainfall – runoff regime in selected river basins of the Šumava Mountains (Bohemian Forest), the Jeseníky Mountains and the Krušné Mountains (Ore Mountains) in the last 50 years. Besides the identification of inhomogeneity in time series of mean discharges, rainfall amounts, air temperature and snow cover data, the work deals with an analysis of trends using annual and monthly data. Different methodological tools for identification of changes and trends in hydro-climatic time series have been introduced in this study, especially different methods of statistic testing and an application of Mann-Kendall seasonal test. The results have been compared not only from the point of view of the methods applied here, but as well from the viewpoint of geographical difference of the mentioned areas.

Key words: Trends, Rainfall-Runoff regime, Air Temperature, Snow Parameters, Šumava Mountains (Bohemian Forest), Jeseníky Mountains, Krušné Mountains (Ore Mountains)

1. Úvod

Analýzy trendu v dlouhodobých řadách hydrologických a meteorologických dat jsou důležitým nástrojem pro detekci a pochopení změn ve vývoji srážko-odtokového procesu. Výsledky vhodně doplňují poznatky prognostických modelů a jsou využitelné ve vodohospodářském plánování i protipovodňové ochraně. Za hlavní příčiny změn odtokového režimu jsou považovány globální klimatické změny v kombinaci s různým typem a stupněm lidských aktivit. Pro území České republiky se v souvislosti s globálním oteplováním nepředpokládají významné změny v celkovém objemu srážek, podstatnější změny se očekávají v časovém rozložení srážek: úbytek srážek v dubnu, srpnu a září a nárůst srážek v říjnu a zimních měsících (Kalvová a kol. 2002). Podle Kubáta (2007) dojde k poklesu celoročního odtoku. V zimních měsících se předpokládá spíše nárůst odtoku, i vzhledem

k tomu, že se srážky nebudou ukládat ve sněhu a rovnou odtečou. V ostatních měsících bude pokles odtoku výrazný. Některé předpovídané jevy je možné sledovat již v současné době (Kliment, Matoušková 2008, 2009, 2010, Fiala 2008,). Pro analýzu trendu odtoku jsou používány různé metody. Obecné způsoby detekce změn v hydrologických záznamech přehledně popsali Kundzewicz a Robson (2004). Metodickým nástrojem z pohledu detekce změn odtoku vlivem antropogenního ovlivnění může být práce Kaňoka (1997). Konkrétní příklady analýz trendů v srážko-odtokových časových řadách přináší současné studie z různých částí světa (Domonokos, Piotrowicz 1998, Pekárová 2003, Burn a kol. 2004, Falarz 2004, Fu a kol. 2004, Franke a kol. 2004, Birsan a kol. 2005, Majerčáková a kol. 2007, Chen a kol. 2007, Bae a kol. 2008, Pekárová a kol. 2008, Trömel, Schönwiese, 2008, Ma a kol. 2009, Schöner a kol. 2009 aj.).

2. Materiál a metody

Metodická část zahrnuje analytické a syntetické postupy. Analytické postupy jsou zaměřeny na analýzu trendů srážko-odtokového režimu doplněnou o analýzu teplotních a sněhových poměrů. Jedná se o použití metod jednoduchých a dvojných součtových čar srážkových a odtokových charakteristik (Kliment, Matoušková 2005) a zejména testovací metody, zahrnující testování homogenity časových řad a statistické nástroje pro analýzu trendu.

Pro hodnocení absolutní homogenity byly vybrány následující testy: neparametrický Pettittův test (Pettitt-Mann-Whitney test), parametrický SNHT (Standard Normal Homogeneity Test – Štěpánek, 2004), dále byly aplikovány jednovýběrový a dvouvýběrový Wilcoxonův test, Kruskal-Wallisův test, pro srážky rovněž von Neumannův test (Kaňok 1997). Pro všechny aplikované testy byla zvolena shodná hladina významnosti 0,05. Pro hodnocení trendu v časových řadách hydroklimatických jevů byl použit sezónní neparametrický Mann-Kendallův test (Helsel, Frans 2006, Libiseller 2004). Trendy v časových řadách byly doplněny výpočtem Kendallova koeficientu pořadové korelace τ (Mann 1945, Kendall 1975, Fu a kol. 2004). Pro výpočet plošných srážek na povodí byla použita metoda orografické interpolace (Šercl, Lett 2004). Pro všechny výše uvedené analýzy byla použita data ČHMÚ pro období 1961-2008. V případě povodí Rolavy byla využita i data Deutsche Wetterdienst a Technické Univerzity v Drážďanech. V závěrečné syntéze byly poznatky o zjištěných trendech ve srážko-odtokovém režimu porovnány se změnami ve využití krajiny a krajinném pokryvu a s intenzitou melioračních opatření ve sledovaných povodích. Jako podkladové materiály posloužily: databáze dlouhodobých změn využití podle katastrů (Bičík a kol. 2003), databáze CORINE Land cover pro roky 1990 a 2000, popř. interpretace satelitních leteckých snímků (Hais 2003, Hintnaus 2008). Databázi úprav toků a plošného odvodnění poskytla v měřítku 1:10000 ZVHS.

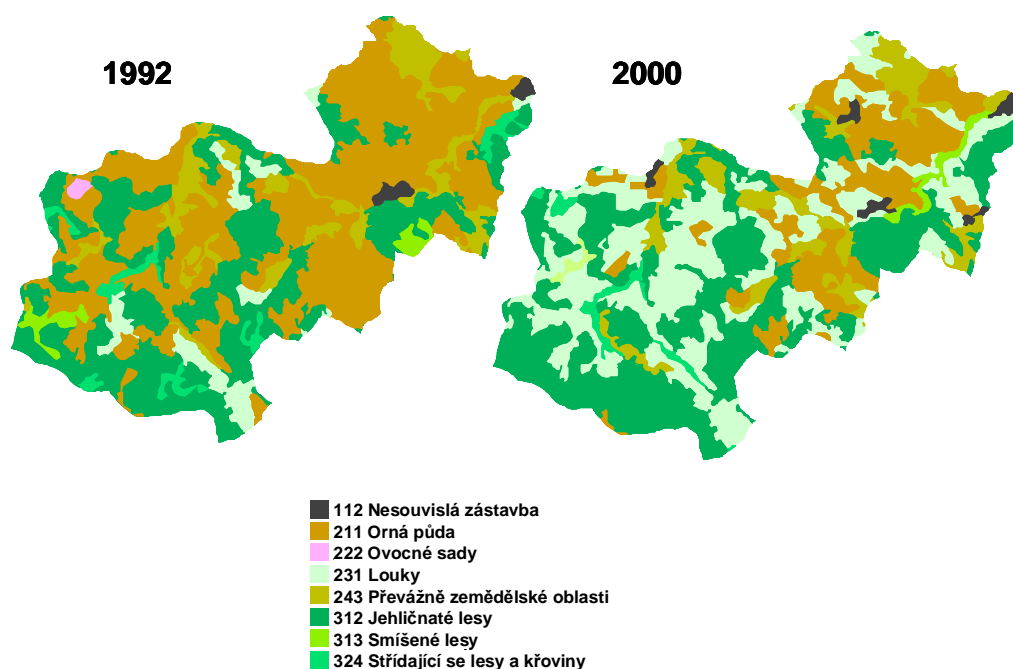
2.1. Vymezení a základní charakteristika modelových povodí

Ve studii je zahrnuto celkem šest povodí. V pramenné oblasti Šumavy se nacházejí povodí Vydry, Ostružné a horního toku Blanice, v Jeseníkách horní tok Opavy a Opavice, v Krušných horách povodí Rolavy. Základní charakteristiky jsou uvedeny v tab.1. Povodí byla vybrána s ohledem na jejich polohu, úplnost hydrometeorologických řad a výsledky předchozích výzkumů (Kliment, Matoušková 2006, Ledvinka 2008, Královec 2009).

Tab. 1: Základní charakteristiky modelových povodí

Číslo ¹⁾	Profil ²⁾	Řeka ³⁾	Od ⁴⁾	P (km ²)	H (mm)	Q _a (m ³ s ⁻¹)	φ (%)	R _{max} (m)	R _{min} (m)	Les (%)	OP (%)	Odv (%)
1350	Modrava	Vydra	1931	93,41	1357	3,4	84,6	1373	935	59,1	0	0
1390	Kolinec	Ostružná	1949	92,42	919	1,2	44,6	1177	528	49,3	17,2	8,3
1450	Blanický Mlýn	Blanice	1953	85,21	837	0,93	41,1	1228	743	64,3	0,3	5,3
2101	Stará Role	Rolava	1968	125,34	950	2,39	63,3	1008	390	34,2	21,1	-
2630	Krnov	Opava	1953	370,5	850	4,06	40,7	1492	311	61,3	6,3	4,5
2650	Krnov	Opavice	1953	175,52	776	1,37	31,7	974	311	41,8	17,2	4,2

P – plocha povodí, H – průměrné roční srážky na povodí za hydrologické období 1962-2008, Q_a – průměrný dlouhodobý průtok od počátku měření do r. 2008, φ – průměrný odtokový součinitel pro období 1962-2008, R_{max} a R_{min} – maximální a minimální nadmořská výška, Les – zalesněná plocha, OP – plocha orné půdy (CORINE, 2000), Odv – odvodněná plocha (ZVHS).

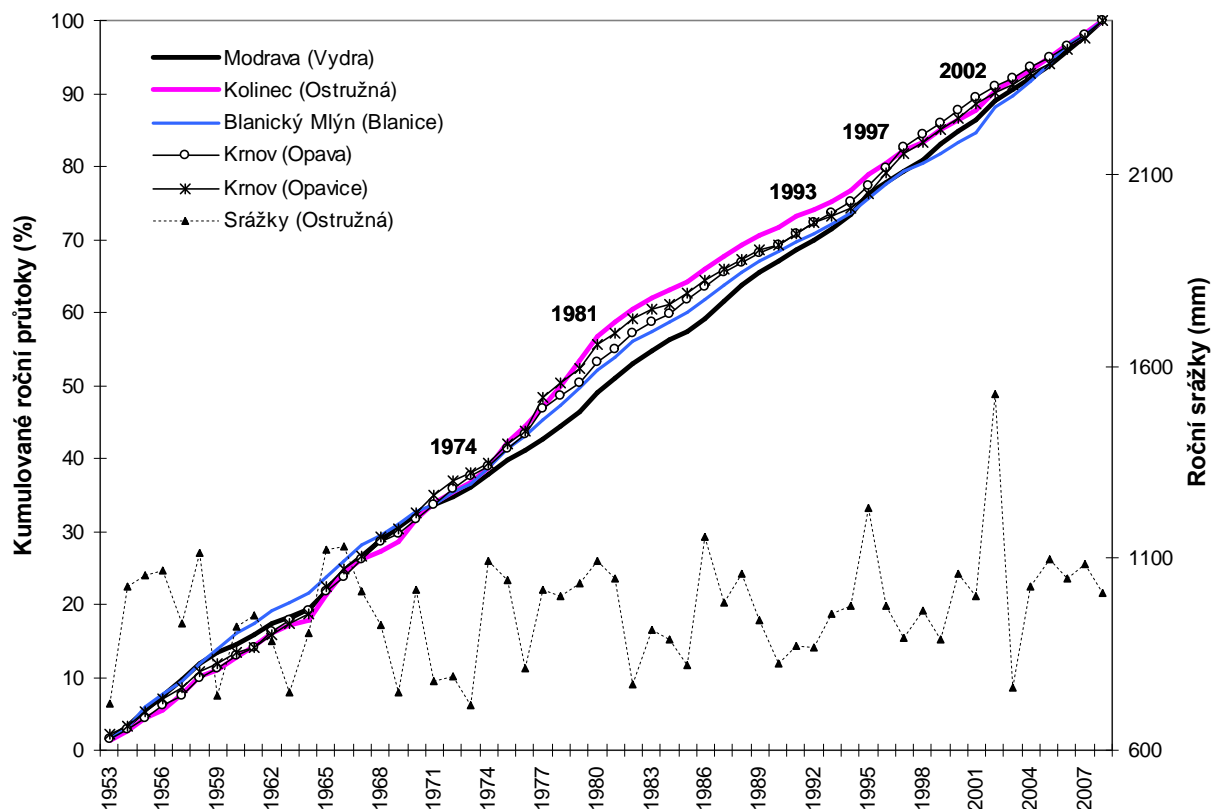


Obr. 1: Vývoj krajinného pokryvu v povodí Ostružné podle CORINE (1992, 2000)

3. Výsledky

3.1. Analýza srážko-odtokových vztahů metodou součtových čar

Metody součtových čar bylo použito k prvotní identifikaci změn v časových řadách průtokových a srážkových charakteristik. Za základní lze považovat vykreslení jednoduchých součtových čar srážek a odtoku. Pro zpřehlednění situace byly pro všechny sledované profily se stejným výsledkem sestrojeny dvojité součtové čáry ročních průtoků vody a ročních úhrnů srážek. Z průběhu součtových čar je patrné delší období nárůstu odtoku v letech 1974-1982, které se projevuje shodně na všech sledovaných tocích s výjimkou Vydry, nejvýrazněji v povodí Ostružné a Opavice. Od počátku 80. let 20. století do současnosti je zřetelný poklesový trend v odtoku. Odchytky v průtokových řadách potvrdil i Wilcoxonův jednovýběrový párový neparametrický test.

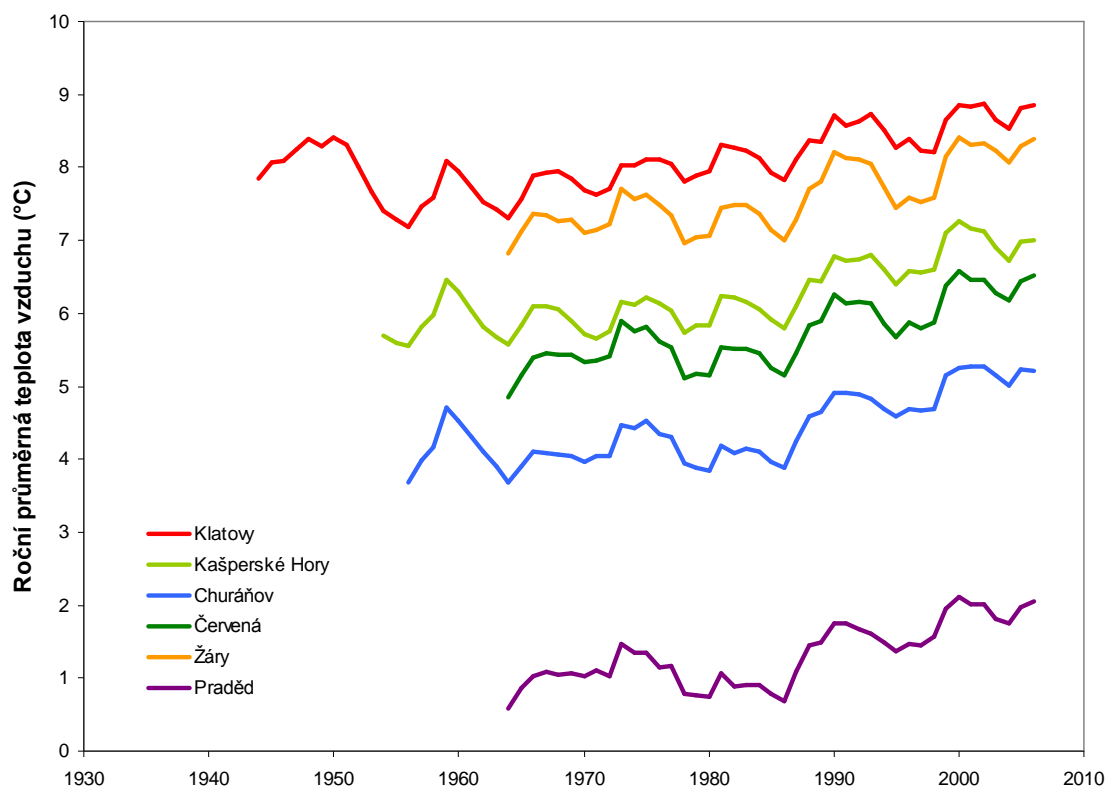


Obr. 2: Jednoduché součtové čary ročních průtoků pro sledovaná povodí informativně doplněné průběhem plošných ročních srážek v povodí Ostružné (1953-2008)

3.2. Analýza teplotních a sněhových poměrů

Teplotní a sněhové parametry byly vyhodnoceny pro vybrané klimatologické stanice vztahované k zájmovým povodím. Hlavní kritériem výběru byla dostatečně dlouhá úplná řada měření. Celkem se jednalo o 3 stanice v oblasti Šumavy (Klatovy, Kašperské Hory a Churáňov), 4 stanice v oblasti Jeseníků (Krnov, Město Albrechtice-Žáry, Červená a Praděd) a 2 stanice v oblasti Krušných hor (Karlovy Vary-lázně a Fichtelberg). Sledujeme-li vývoj průměrné teploty vzduchu zhruba za posledních 50 let, je zřejmý postupný nárůst teploty na všech sledovaných stanicích bez ohledu na jejich nadmořskou výšku a geografickou polohu. Z obr. 3 je zřetelný výraznější vzestup průměrné roční teploty vzduchu od poloviny 80. let 20. století.

Porovnáme-li průměrnou teplotu za období 1961-2006 s průměrnou teplotou za období 1901-1950 uvedenou pro některé stanice v tabulkách Podnebí ČSSR (Vesecký a kol. 1961), rozdíl se pohybuje v rozmezí 0,3-0,5°C (Klatovy: +0,5°C (7,6/8,1°C), Opava: +0,3°C (8,0/8,3°C), Krnov: +0,3°C (7,8/8,1°C), Praděd: + 0,4°C (0,9/1,3 °C)). Největší vzestupy teplot jsou pozorovány v jarních a letních měsících, ale také v zimě. Zatímco v chladném půlroce je oteplování v horních a dolních částech povodí srovnatelné, v teplém půlroce je oteplování v nižších polohách intenzivnější. Současně dochází ke změnám ve sněhové pokrývce. Úbytek počtu dní se sněhovou pokrývkou, zejména v níže položených stanicích je patrný rovněž od poloviny 80. let 20. století. Současně se výrazně snížila výška sněhové pokrývky. Nejintenzivnější pokles je přitom možné pozorovat v nejvyšších polohách, v průměru téměř o 1 cm za rok.



Obr. 3: Vývoj ročních průměrných teplot vzduchu pro vybrané klimatické stanice, 5-leté klouzavé průměry (1942-2008)

3.3. Testování homogenity (nehomogenity) v časových řadách

Příčiny nehomogenit v časových řadách mohou být různé. Vedle systematických chyb způsobených např. změnou způsobu a místa měření mohou signalizovat změny podmínek v daném povodí. Pro indikaci a zhodnocení statistické významnosti nehomogenit v časových řadách průtokových a meteorologických dat bylo využito testovacích metod uvedených v metodické části.

V řadách průměrných ročních průtoků byla Pettitovým testem zaregistrována shodně při dané hladině významnosti 0,05 na na většině sledovaných povodí významnější nehomogenita v r. 1983, tedy v roce, který dle předchozích zjištění reprezentuje určitý zlom mezi vodním a následným méně vodním obdobím. Změny v měsíčních řadách průtoků byly detekovány na více tocích zejména v jarních a letních měsících (Q_5 – 1988, 1985, Q_6 – 1988, 1981) a částečně v zimě (Q_1 – 1974). Srážkové řady vykazaly obecně vysokou homogenitu a nepotvrdily se souvislosti s nehomogenitami v ročních a měsíčních odtokových řadách (s výjimkou povodí Opavice v r. 1982). Zjištěné roky změny byly potvrzeny Wilcoxonovým dvouvýběrovým testem, popř. Kruskal-Wallisovým testem. U řad teploty vzduchu byla interpretace testů homogenity (test SNHT) složitější, a to i vzhledem k tomu, že homogenita byla sledována pouze pro jednotlivé stanice, podobně u sněhové pokrývky. Na některých stanicích byl opakovaně potvrzen rok změny 1988, od kterého se výrazněji začíná projevovat oteplování. U sněhové pokrývky se vedle roku 1988 (podružné maximum) častěji objevoval i rok 2005, ovlivněný pozicí na konci hodnocené řady. Příklady použití testů homogenity pro časové řady průtoků pro sledovaná povodí jsou uvedeny v tab.2.

Tab. 2: Testování homogenity průtokových dat pro sledovaná povodí

	Vydra - Modrava				Ostružná - Kolínek				Blanice - Blanický Mlýn			
	P	Rok změny	W	K	P	Rok změny	W	K	P	Rok změny	W	K
Q ₁₁	ano	-	-	-	ne	1983 (1975)	ne (ano)	ne	ano	-	-	-
Q ₁₂	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ano	-	-	-
Q ₁	ne	1974	ne	-	ano	-	-	-	ne	1974	ne	-
Q ₂	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ne	1974	ne	-
Q ₃	ne	1989	ne	-	ano	-	-	-	ne	1999	ne	-
Q ₄	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ano	-	-	-
Q ₅	ano	-	-	-	ne	1988	ne	-	ne	1988	ne	-
Q ₆	ne	1981	ne	-	ne	1981	ne	-	ne	1981	ne	-
Q ₇	ano	-	-	-	ne	1982 (1972)	ne (ano)	ne	ano	-	-	-
Q ₈	ano	-	-	-	ne	1984	ne	-	ano	-	-	-
Q ₉	ano	-	-	-	ne	1981	ne	-	ano	-	-	-
Q ₁₀	ano	-	-	-	ne	1982 (1974)	ne (ano)	ne	ano	-	-	-
Q _r	ano	-	-	-	ne	1983	ne	-	ano	-	-	-
	Opava - Krnov				Opavice - Krnov				Rolava - Stará Role*			
	P	Rok změny	W	K	P	Rok změny	W	K	P	Rok změny	W	K
Q ₁₁	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ano	-	-	-
Q ₁₂	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ne	1979	-	-
Q ₁	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ano	-	-	-
Q ₂	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ne	1980	ne	-
Q ₃	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ano	-	-	-
Q ₄	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ne	1989	ne	-
Q ₅	ne	1985	ne	-	ne	1981	ne	-	ne	1985	ne	-
Q ₆	ne	1988	ne	-	ne	1988	ne	-	ne	1988	ne	-
Q ₇	ne	1983	ne	-	ano	-	-	-	ano	-	-	-
Q ₈	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ano	-	-	-
Q ₉	ano	-	-	-	ano	-	-	-	ano	-	-	-
Q ₁₀	ano	-	-	-	ne	1982(1974)	ne	ne	ano	-	-	-
Q _r	ne	1983	ne	-	ne	1983(1995)	ne	ne	ano	-	-	-

P – Pettitův test, W – Wilcoxonův dvouvýběrový test, K – Kruskal-Wallisův test, v závorce podružný rok změny, ano – potvrzená homogenita, ne – potvrzená nehomogenita, * období 1968-2008.

3.4. Analýza trendu v časových řadách s využitím Mann-Kendallova testu

Zjištění trendu v časových řadách je důležité z hlediska předpovědi sledované veličiny. Sezónnímu Mann-Kendallovu testu jako základní použité metodě byly postupně podrobeny měsíční a roční časové řady průtoků a plošných srážek pro sledovaná povodí a řady srážkových úhrnů, teploty vzduchu a sněhové parametry pro srážkoměrné a klimatologické stanice vztahované k daným povodím pro hydrologické období 1962-2008. Významnost trendu byla testována při hladině 0,05. Hlavní dosažené výsledky jsou uvedeny v tab. 3 a tab. 4.

Testem byly zjištěny významné trendy úbytku odtoku v jarních a letních měsících. Zatímco na Vydrě byl zaznamenán signifikantní úbytek pouze v červnu, na většině sledovaných toků se projevil v květnu a červnu, a také v červenci. Na Ostružné byl pozorovatelný i v srpnu a září. Naproti tomu se prokázal signifikantní nárůst odtoku v zimních měsících (únor a hlavně březen), a to zejména na šumavských povodích (Blanice i Vydra) a v povodí Rolavy. Neprojevil se v povodích v oblasti Jeseníků. V řadách průměrných ročních průtoků nebyly trendy prokázány. V případě měsíčních plošných srážkových úhrnů nebyly identifikovány tak prokazatelné trendy jako u odtoku, přesto je z výsledků patrné zejména u šumavských povodích a také u Rolavy určité navýšení srážek v zimním období, zejména v lednu, únoru a březnu. Nepříliš výrazně, s výjimkou Vydry, se projevuje úbytek srážek v květnu a červnu. V řadách ročních úhrnů srážek je patrné určité navýšení srážek u šumavských povodí a povodí Rolavy, opačný nebo spíše žádný trend byl pozorován v povodí Opavy a Opavice. Zajímavé se zde však ukázalo sledovat prostorové rozložení trendu srážkových úhrnů podle jednotlivých srážkoměrných stanic. V západní části Jeseníků byly prokázány zejména v

chladném půlroce rostoucí trendy, ve východní části se naopak projevuje pokles ročních srážek.

Tab. 3: Dlouhodobé trendy v měsíčních a ročních řadách průměrných průtoků a srážek pro modelová povodí (1962-2008)

	Vydra - Modrava			Ostružná - Kolínec			Blanice - Blanický Mlýn			Opava - Krnov			Opavice - Krnov			Rolava - Stará Role		
	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend
Q ₁₁	0,798	0,4250		-0,779	0,4357		0,138	0,8906		-0,523	0,6012		-0,1742	0,8617		0,9798	0,327	
Q ₁₂	0,981	0,3265		0,284	0,7762		0,101	0,9196		-1,513	0,1302		-0,8529	0,3937		1,8508	0,0642	
Q ₁	1,403	0,1606		-0,009	0,9927		1,311	0,1897		1,2472	0,2123		0,6144	0,5389		1,8508	0,0642	
Q ₂	1,550	0,1212		0,339	0,7344		2,137	0,0326	↑	0,8345	0,404		0,2201	0,8258		2,7944	0,0052	↑
Q ₃	3,366	0,0008	↑	0,743	0,4576		3,402	0,0007	↑	0,2843	0,7762		0,1192	0,9051		2,5282	0,01146	↑
Q ₄	1,953	0,0508		-0,532	0,5948		-1,000	0,3175		-1,513	0,1302		-1,7149	0,0864		-1,222	0,22179	
Q ₅	-0,963	0,3356		-2,265	0,0235	↓	-2,632	0,0085	↓	-2,21	0,0271	↓	-2,3018	0,0213	↓	-2,94	0,00329	↓
Q ₆	-3,109	0,0019	↓	-2,889	0,0039	↓	-2,449	0,0143	↓	-3,347	0,0008	↓	-2,6686	0,0076	↓	-1,899	0,05754	
Q ₇	-0,908	0,3639		-2,357	0,0184	↓	-0,761	0,4466		-2,265	0,0235	↓	-1,8249	0,068		0,5202	0,60295	
Q ₈	-0,835	0,4040		-2,155	0,0312	↓	-0,431	0,6665		-1,018	0,3087		-0,6144	0,5389		0,6412	0,52141	
Q ₉	0,596	0,5511		-2,173	0,0298	↓	-0,835	0,4040		-0,046	0,9634		0,2476	0,8044		1,7978	0,07221	
Q ₁₀	0,770	0,4411		-1,293	0,1960		-0,193	0,8473		-0,248	0,8044		-0,5686	0,5696		1,4709	0,14131	
Q _r	0,779	0,4357		-1,146	0,2517		-0,009	0,9927		-2,21	0,0271	↓	-1,3114	0,1897		1,6218	0,10485	
H ₁₁	0,101	0,9196		0,908	0,3639		0,468	0,6400		-0,779	0,436		-0,138	0,891		1,6183	0,1056	
H ₁₂	0,890	0,3737		0,816	0,4144		0,119	0,9051		0,156	0,876		0,266	0,790		1,0519	0,29285	
H ₁	1,843	0,0653		1,403	0,1606		1,550	0,1212		0,614	0,539		-0,303	0,762		1,2663	0,2054	
H ₂	2,008	0,0446	↑	1,366	0,1718		1,623	0,1046		-0,119	0,905		-0,835	0,404		0,7221	0,47022	
H ₃	1,458	0,1448		1,697	0,0898		1,697	0,0898		1,091	0,275		0,688	0,492		0,5756	0,56489	
H ₄	-0,963	0,3356		-1,421	0,1552		-0,926	0,3543		-0,211	0,833		-0,431	0,666		-1,266	0,2054	
H ₅	-1,513	0,1302		-0,761	0,4466		0,138	0,8906		-1,531	0,126		-1,293	0,196		-1,79	0,07352	
H ₆	-2,559	0,0105	↓	-0,578	0,5634		-1,348	0,1776		-1,036	0,300		-1,183	0,237		-0,45	0,6527	
H ₇	1,146	0,2517		1,586	0,1126		0,816	0,4144		-0,963	0,336		-0,724	0,469		1,1826	0,23697	
H ₈	-0,468	0,6400		0,559	0,5759		0,064	0,9488		-0,596	0,551		-0,688	0,492		0,4082	0,68316	
H ₉	0,853	0,3937		0,596	0,5511		0,266	0,7903		1,165	0,244		1,348	0,178		1,2663	0,2054	
H ₁₀	1,036	0,3001		1,440	0,1499		1,091	0,2751		0,028	0,978		-0,156	0,876		1,9361	0,05286	
H _r	1,862	0,0627		1,880	0,0601		1,568	0,1168		-0,798	0,425		-0,945	0,345		2,0198	0,0434	↑

Q – průtok, H – úhrn srážek na povodí, MK-S – Mann-Kendallová statistika, p – míra signifikance

Tab. 4: Dlouhodobé trendy v měsíčních a ročních řadách průměrných teplot vzduchu, průměrných výšek sněhové pokrývky a počtu dní se sněhovou pokrývkou pro vybrané klimatologické stanice (1962-2008)

	Karlový Vary			Krnov			Klatovy			Kašperské Hory			Červená			Churáňov			Fichtelberg		
	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend	MK-S	p	Trend
T ₁₁	0,321	0,7480		-0,110	0,9123		0,009	0,9927		-0,339	0,7344		-0,028	0,9780		0,293	0,7692		0,669	0,5032	
T ₁₂	0,891	0,3731		1,303	0,1926		1,733	0,0831		1,596	0,1105		1,358	0,1744		2,063	0,0391	↑	2,283	0,0224	↑
T ₁	1,615	0,1063		2,045	0,0408	↑	1,752	0,0799		2,118	0,0341	↑	2,138	0,0325	↑	1,458	0,1448		1,715	0,0864	
T ₂	1,432	0,1522		1,385	0,1660		1,357	0,1747		1,110	0,1897		1,440	0,1498		1,330	0,1836		1,807	0,0708	
T ₃	1,918	0,0551		1,239	0,2154		1,807	0,0708		1,770	0,0767		1,257	0,2088		1,458	0,1448		1,467	0,1423	
T ₄	1,971	0,0488	↑	2,588	0,0097	↑	1,935	0,0530	↑	1,972	0,0486	↑	2,147	0,0318	↑	1,908	0,0565		2,421	0,0155	↑
T ₅	3,460	0,0005	↑	3,563	0,0004	↑	3,357	0,0008	↑	3,622	0,0003	↑	2,845	0,0044	↑	3,852	0,0001	↑	3,081	0,0021	↑
T ₆	2,442	0,0146	↑	3,619	0,0003	↑	1,605	0,1085		2,421	0,0155	↑	2,093	0,0363	↑	2,201	0,0277		1,275	0,2024	
T ₇	2,248	0,0246	↑	3,771	0,0002	↑	1,623	0,1046		2,091	0,0365	↑	2,340	0,0193	↑	1,513	0,1302		1,311	0,1897	
T ₈	3,388	0,0007	↑	4,048	0,0001	↑	2,660	0,0078	↑	2,999	0,0027	↑	3,148	0,0016	↑	3,219	0,0013	↑	2,660	0,0078	↑
T ₉	0,229	0,8185		0,624	0,5324		-0,064	0,9488		0,138	0,8906		-0,156	0,8760		0,220	0,8258		0,165	0,8689	
T ₁₀	0,826	0,4086		1,230	0,2188		1,220	0,2226		1,403	0,1606		0,294	0,7690		0,624	0,5329		-0,119	0,9051	
T _r	3,866	0,0001	↑	4,072	0,0000	↑	3,897	0,0001	↑	4,063	0,0000	↑	3,724	0,0002	↑	4,246	0,0000	↑	3,861	0,0001	↑
SN ₁₁	0,618	0,5367		-1,035	0,3007		-0,276	0,7823		0,759	0,4481		-1,697	0,0896		-0,275	0,7836		1,431	0,1525	
SN ₁₂	-0,739	0,4600		-1,009	0,3129		0,000	1,0000		-1,266	0,2057		-2,559	0,0105	↓	-1,220	0,2226		-0,257	0,7973	
SN ₁	-0,413	0,6798		-0,606	0,5447		0,421	0,6740		-0,028	0,9773		-2,320	0,0203	↓	-0,945	0,3449		-1,192	0,2332	
SN ₂	-1,146	0,2516		-0,248	0,8043		0,315	0,7531		-0,502	0,6158		-3,586	0,0003	↓	-1,642	0,1007		-2,228	0,0259	↓
SN ₃	-1,048	0,2948		-0,046	0,9633		-0,068	0,9456		-1,127	0,2598		-2,054	0,0399	↓	-1,605	0,1085		-2,137	0,0326	↓
SN ₄	1,070	0,2845		-1,199	0,2305		1,408	0,1592		0,034	0,9731		-1,986	0,0471	↓	-1,697	0,0898		-1,917	0,0553	
SN ₅										-1,530	0,1260		-1,845	0,0595		-1,946	0,0516	↓	-4,025	0,0001	↓
SN _r	-1,115	0,2648		-0,110	0,9124		0,642	0,5209		0,468	0,6400		-3,476	0,0005	↓	-2,045	0,0409	↓	-2,137	0,0326	↓
SD ₁₁	0,914	0,3606		-0,150	0,8806		-1,787	0,0740		-0,074	0,9413		0,349	0,7269		0,588	0,5565		0,524	0,6000	
SD ₁₂	-0,797	0,4254		-0,837	0,4026		-2,913	0,0036	↓	-0,395	0,6926		-1,135	0,2564		-0,575	0,5652		-0,374	0,7081	
SD ₁	-1,233	0,2177		-1,334	0,1821		-2,022	0,0432	↓	-1,221	0,2222		-1,772	0,0764		-1,475	0,1402		-1,523	0,1279	
SD ₂	-0,993	0,3208		-0,901	0,3676		-1,443	0,1489		-1,018	0,3088		-1,402	0,1609		-0,067	0,9464		-0,058	0,9540	
SD ₃	-0,676	0,4991		-0,700	0,4836		-2,121	0,0339	↓	-1,323	0,1859		-1,274	0,2026		-0,524	0,6002		-0,152	0,8790	
SD ₄	0,994	0,3202		-0,832	0,4055		-1,778	0,0754		-1,662	0,0965		-1,625	0,1043		-0,616	0,5381		-2,163	0,0306	↓
SD ₅										-2,163	0,0306	↓	-2,099	0,0358	↓	-2,331	0,0198	↓	-3,670	0,0002	↓
SD _r	-1,586	0,1128		-1,450	0,1472		-3,083	0,0020	↓	-1,854	0,0638		-1,845	0,0651		-0,514	0,6074		-1,854	0,0637	

T – průměrná teplota vzduchu, SN – průměrná výška sněhové pokrývky, SD – počet dní se sněhovou pokrývkou,

analyzovaných stanicích bez ohledu na nadmořskou výšku a geografickou polohu můžeme sledovat signifikantní nárůst průměrné roční teploty vzduchu. Nejvíce patrný je v období duben až srpen (nejvíce v květnu a srpnu) a také v zimním období, nejvíce v prosinci a lednu. Hledat trendy v časových řadách sněhových charakteristik je obtížnější vzhledem k menšímu počtu hodnocených případů, nesouvislému výskytu i proměnlivým vlastnostem sněhové pokrývky. V hodnocených řadách je možné vysledovat spíše úbytek sněhové pokrývky, který se projevil snížením průměrné výšky sněhové pokrývky (u výše položených stanic) a snižováním počtu dnů se sněhovou pokrývkou (u níže položených stanic). S pomocí Kendallova koeficientu pořadové korelace τ byly prokázány významné pozitivní korelace mezi srážkami a odtokem, především v teplém půlroce, mezi výškou sněhové pokrývky a odtokem v chladném půlroce, mezi výškou sněhové pokrývky a srážkami zejména u výše položených stanic, negativní korelace mezi délkou trvání sněhové pokrývky a teplotou vzduchu. Již slabší přímé vztahy se projevíly mezi průtokem a teplotou vzduchu, záporné korelace v teplém půlroce a kladné v chladném půlroce.

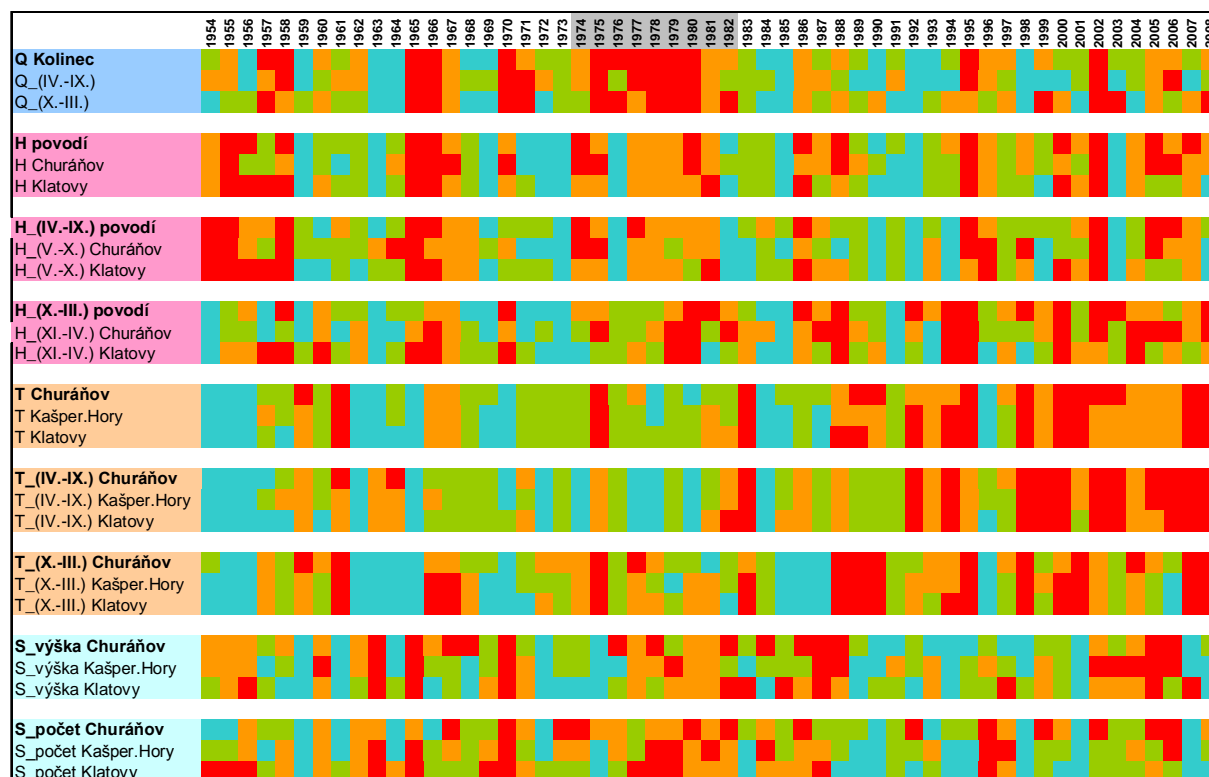
4. Diskuze a závěr

Studie se zabývá analýzou časových řad odtokových a vybraných klimatických charakteristik v pramenných oblastech Šumavy, Jeseníků a Krušných hor za cca posledních 50 let. V závěrech, jež jsou ovlivněny především kvalitou a délkou časových řad, se projevují i zjištění, daná patrně rozdílnými poměry sledovaných povodí, zejména geografickou polohou, nadmořskou výškou a odlišnostmi ve využití území a v krajinném pokryvu. Přesto je možné prokázat určité odchylky a trendy, které jsou pro sledované oblasti podobné. V tomto smyslu se na prvním místě jedná o zjištění období nárůstu průměrných průtoků v letech 1974-1982, které se různou měrou uplatnilo s výjimkou Vydry u všech sledovaných toků. Je patrné, že směrem do nižších poloh, do území s nižším stupněm zalesnění a vyšší mírou antropogenního ovlivnění se tato odchylka projevila výrazněji. Hlavní souvislosti je třeba hledat ve vývoji klimatu, zejména v bohatších, po celé období poměrně vyrovnaných srážkách, ve vyšší sněhové pokrývce spolu s teplotně mírnějším průběhem zim a také v poměrně nízké teplotě vzduchu v letních obdobích (viz obr. 4). Spojení s uvedenými významnými melioračními zásahy v 70. a 80. letech 20. století může být spíše náhodné. Časově se sice shoduje v povodí Blanice a zejména Ostružné, kde bylo provedeno nejrozsáhlejší plošné odvodnění, ne již v povodí horní Opavy a Opavice, kde plošné meliorace byly realizovány později a v menší míře. Zjištěné období nárůstu průtoků nelze vysvětlit výskytem větších povodní. Velké vody na úrovni 5-10-leté vody se vyskytly pouze v povodí Opavice a Opavy.

V následném období po r. 1982 do současnosti, s výjimkou katastrofálních povodní v letech 1997 a 2002, se prokázalo postupné snižování odtoku, opět výraznější u povodí v níže ležících méně zalesněných polohách. Odchylky v odtoku, které se projevíly v součtových čarách, byly do určité míry statisticky ověřeny různými testy homogenity, zejména Pettittovým testem, Wilcoxonovým dvouvýběrovým testem a také Kruskal-Wallisovým testem. V řadách průměrných ročních průtoků se na většině sledovaných toků projevila významná nehomogenita v r. 1983, který představuje dle předchozích zjištění určitý zlom mezi vodným a následným méně vodným obdobím. V měsíčních průtokových řadách byly na více tocích detekovány změny v letech 1988 a 1985 pro květnové a červnové průtoky, a částečně i v roce 1974 pro lednové průtoky. V řadách plošných srážkových úhrnů spadlých na jednotlivá povodí se významné nehomogenity neprokázaly a nepotvrdily se přímé souvislosti s nehomogenitami v odtokových řadách. Pro jednotlivé klimatologické stanice vztažené k zájmovým povodím proběhlo s pomocí testu SNHT testování homogenity řad teploty vzduchu a sněhových parametrů. Interpretace poznatků je zejména vzhledem k rozdílným výsledkům

testů u měsíčních řad obtížná. Na některých stanicích byl opakovaně potvrzen rok změny 1988, od kterého se výrazněji začíná projevovat oteplování.

Podstatným výsledkem je zjištění trendů v hydroklimatických časových řadách s využitím sezónního Mann-Kendallova testu. Testem byly na všech sledovaných tocích potvrzeny významné úbytky odtoku v květnu a červnu. Neprokázala se, s výjimkou Vydry, statisticky významná přímá vazba na úbytek srážek v těchto měsících. Na šumavských tocích a na Rolavě se projevil významný nárůst odtoku v zimních měsících. Tento trend může být dán do souvislosti nejen s celkově se zvyšující teplotou vzduchu, ale i se zvyšujícím se úhrnem zimních srážek v těchto oblastech. V povodích Opavy a Opavice se podobný jev neprokázal. V ročních i měsíčních řadách plošných srážek na povodí nebyly obecně významné trendy potvrzeny. Při analýze řad pro jednotlivé srážkoměrné stanice se projeví rozdílné trendy ve vývoji srážek v západní a východní části Jeseníků, které by mohly být dány do souvislosti se změnami v cirkulaci. Podle Cahynové a Hutha (2007) přibývá v zimě, na jaře a na podzim dní s výskytem západní cyklonální situace (Wc). Statisticky významné trendy u všech sledovaných povodí bez ohledu na nadmořskou výšku a geografickou polohu se prokázaly v řadách teplot vzduchu, a to jak pro celé roky, tak i jednotlivé měsíce. Oteplování se nejméně výrazněji projevuje v období duben až srpen a v prosinci až lednu. Zejména v letních měsících může vyšší teplota vzduchu zesilovat proces evapotranspirace a podílet se tak výraznou měrou na snižování odtoku. S poklesem odtoku a nedostatečnými zásobami podzemní vody souvisí i zjištěné trendy ve sněhové pokrývce, které se projevují snižováním průměrné výšky sněhové pokrývky a počtu dní se sněhovou pokrývkou, v druhém případě zejména u níže položených stanic.



Obr. 4: Vývoj hodnocených hydrologických a klimatických prvků v povodí Ostružné (1954-2008)

Q – průměrný průtok, H – úhrn srážek, T – průměrná teplota vzduchu, SD – průměrná výška sněhové pokrývky, SN – počet dní se sněhovou pokrývkou. Červeně: hodnoty > horní kvartil, oranžově: <horní kvartil, medián>, zeleně: <medián, dolní kvartil>, modře: <dolní kvartil

Dedikace

Dovoluujeme si poděkovat za finanční podporu řešených projektů, zejména VaV SM/2/57/05 “Dlouhodobé změny poříčních ekosystémů v nivách toků postižených extrémními záplavami“ a VZ MSM 0021620831 “Geografické systémy a rizikové procesy v kontextu globálních změn a evropské integrace“.

Použitá literatura

- Bičík I. a kol. (2003): Vývoj struktury ploch v povodí Otavy. In: Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní (ed. Langhammer). PřF UK, Praha.
- Burn D. H. a kol. (2004): Hydrological trends and variability in the Liard River basin. *Hydrological Science Journal.*, 49(1): 53-68.
- Cahynová M., Huth R. (2007): Trendy v kalendáři povětrnostních situací HMÚ/ČHMÚ v období 1946-2002. *Meteorologické zprávy*, 60(6): 175-182.
- CORINE (1992, 2000). Databáze Corine Land cover, MŽP
- Domonkos P., Piotrowicz K. (1998): Winter temperature characteristics in Central Europe. *International Journal of Climatology*, 18: 1405-1417.
- Helsel D. R., Frans L. M. (2006): Regional Kendall Test for Trend. *Environmental Science and Technology*, 40: 13.
- Falarz M. (2004): Variability and trends in duration and depth of snow cover in Poland in the 20th century. *International Journal of Climatology*, 24: 1713-1727.
- Fiala T. (2008): Statistical characteristics and trends of mean annual and monthly discharges of Czech rivers in the period 1961-2005. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 56(2): 133-140.
- Franke J., Goldberg V., Eichelmann U., Freydank E., Bernhofer C. (2004): Statistical analysis of regional climate trends in Saxony, Germany. *Climate Research*, 27: 145-150.
- Fu G. a kol. (2004): Hydro-climatic trends of the Yellow River basin for the last 50 years. *Climatic Change*, 65: 149-178.
- Hais M. (2003): Vývoj a změny land coveru v povodí Otavy za posledních 15 let. In: Hodnocení vlivu změn přírodního prostředí na vznik a vývoj povodní (ed. Langhammer). PřF UK, Praha.
- Hintnaus I. (2008): Změny ve vývoji krajiny v pramenné oblasti Blanice. Bakalářská práce. PřF UK, Praha.
- Chen H. (2007): Historical temporal trend of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. *Journal of Hydrology*, 344(3-4): 171-184.
- Kalvová J. a kol. (2002): Globální klimatické modely a scénáře změny klimatu pro Českou republiku. In: Národní klimatický program České republiky, 32, Praha, s. 1-58.
- Kaňok J. (1997): Antropogenní ovlivnění velikosti průtoků řek povodí Odry po profil Kožle. *Spisy prací Přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity*, 103, Ostravská univerzita, Ostrava.
- Kendall M.G. (1975): Rank correlation methods. Charles Griffin, London.
- Kliment Z., Matoušková M. (2005): Trendy ve vývoji odtoku v povodí Otavy. *Geografie*, 110(1): 32-45.
- Kliment Z., Matoušková M. (2006): Changes of runoff regime according to human impact on the landscape. *Geografie*, 111(3): 292-304.
- Kliment Z., Matoušková M. (2008): Long-term Trends of Rainfall and Runoff Regime in Upper Otava River Basin. *Soil and Water Research*, 3(3): 155-167.
- Kliment Z., Matoušková M. (2009): Runoff changes in the Šumava Mountains (Bohemian Forest) and the foothill regions: Extent of influence by human impact and climate changes. *Water Resources Management*, 23: 1813-1834.

- Kliment Z., Matoušková M., Ledvinka O., Královec V. (2010): Trend analysis of rainfall-runoff regimes in selected headwater areas of the Czech Republic. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 58(4) – v tisku.
- Královec V. (2009): Změny srážkoodtokových poměrů v povodí horní Opavy. Diplomová práce. PřF UK, Praha.
- Kubát J. (2007): Dopady klimatických změn na hydrologický režim v České republice [online, cit.2009-03-06]. Dostupné z: <http://www.chmi.cz/katastrofy/kubat1607.pdf>
- Kundzewicz Z., Robson A. (2004): Change detection in hydrological records – a review of the methodology. *Hydrological Science Journal*, 49(1): 7-20.
- Ledvinka O. (2008): Trendy srážkoodtokového režimu v povodí Rolavy. Diplomová práce. PřF UK, Praha.
- Libiseller C. (2004): MULTMK/PARTMK. A program for computation of multivariate and partial Mann-Kendall test. LIU. Linköping.
- Ma X. a kol. (2009): Response of hydrological processes to land-cover and climate changes in Kejie watershed, south-west China. *Hydrological Processes*, 23: 1179–1191.
- Majerčáková O., Škoda P., Danáčová Z. (2007): Vývoj vybraných hydrologických a zrážkových charakteristik za období 1961-2000 a 2001-2006 v oblasti Vysokých Tatier. *Meteorologický časopis*, 10(4): 205-210.
- Mann H.B. (1945): Nonparametric test against trend. *Econometrica*, 13: 245-259.
- Pekárová P. (2003): Identifikácia dlhodobých trendov a fluktuácií hydrologických radov. Časť II. Výsledky. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 51(2): 97-108.
- Pekárová P., Miklánek P., Pekár J., Olbřímek J. (2008): Analýza zmien štatistických charakteristik denných úhrnov zrážok na stanici Hurbanovo v rôznych obdobiach. Časť I. Viacročná variabilita a spektrálna analýza. *Acta Hydrologica Slovaca*, 9(1): 64-76.
- Schöner W., Auer I., Böhm R. (2009): Long term trends of snow depth at Sonnblick (Austrian Alps) and its relation to climate change. *Hydrological Processes*, 23: 1052-1063.
- Štěpánek P. (2004): Homogenizace teploty vzduchu na území České republiky v období přístrojových pozorování. *Práce a studie*, 32, ČHMÚ, Praha.
- Šercl P., Lett P. (2004): Výpočet rastru srážek v prostředí GIS. Uživatelská příručka. ČHMÚ, Praha.
- Trömel S., Schönwiese C. D. (2008): Robust trend estimation of observed German precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, 93: 107-115.
- Vesecký A. a kol. (1961): Podnebí Československé socialistické republiky. Tabulky. ČHMÚ, Praha.

Kontaktní adresa 1. autora:

kliment@natur.cuni.cz