

Hydrologické sucho v pramenných oblastech Krušných hor

Vojtěch Vlach

Anotace

Příspěvek vycházející z výsledků diplomové práce se zabývá analýzou sezonality výskytu, intenzity a příčinných faktorů hydrologického sucha v pramenných povodích krušnohorských vodních toků. Projevy hydrologického sucha v rozmezí let 1967 až 2018 byly vyhodnoceny pomocí více ukazatelů a statistických testů hydrologických i klimatických datových řad.

Klíčová slova: srážko-odtokový režim, hydrologické sucho, změna klimatu, retence vody, rašeliniště

Annotation

The paper based on the results of the master thesis deals with the analysis of seasonality of the occurrence, intensity and driving factors of hydrological drought in headwaters of the Ore Mountains watercourses. The manifestations of hydrological drought between 1967 and 2018 were evaluated using multiple indicators and statistical tests of hydrological and climatic data series.

Key words: rainfall-runoff regime, hydrological drought, climate change, water retention, peat bog

Abstract

Changes in the hydrological cycle are one of the expected impacts of climate change. Until recently, Central European mountain ranges have not been considered to be affected by water scarcity. Nevertheless, recent years have suggested an increasing risk of drought occurrence even in usually humid mountain regions, which have a major impact on the water supply to rivers that drain them. This paper presents key results of master thesis dealing with the evaluation of hydrological drought in the headwater areas of three catchments in the Ore Mountains (North-western Czechia). The comparative analysis for the period from 1967 to 2018 has been done. For two measuring profiles, complete time-series with longer period (since 1929) were examined as well. The main aim of this master thesis was to compare the hydrological drought characteristics in the catchment areas of upper Svatava River, upper Rolava River and Načetínský brook based on available hydrological and climatic data. In connection with this, the work aimed to detect the long-term trends of drought occurrence in selected basins. Furthermore, the emphasis has been given on the evaluation of natural conditions, especially the historical and current land cover changes in the study catchments.

The results pointed to a significant change in the seasonality of the occurrence of hydrological drought after 1992, when the most significant streamflow deficits started to concentrate between August and October. Furthermore, increasing trends in deficit volumes were found in the catchment areas of the upper Svatava River and Načetínský brook. The upper Rolava River basin, which has the highest average elevation, showed marked differences in the resulting values of drought indicators and trends. In the 1967-2018 period, there is a significant decrease in average and minimum flows in spring and summer months in all catchments. Regarding various hydrological drought indices, the driest years has been recorded in 2018, 2003 and 2015. The most recent period of drought even exceeded the intensity of droughts recorded in the 1930's, late 1940's and early 1950's in the basin of Načetínský brook.

1 Úvod

Během posledních několika let se nejen v Česku začala, zejména v médiích, hojně diskutovat další problematika týkající se vody. Po velmi intenzivním období častého výskytu extrémních povodní během let 1998 a 2013 se situace zdánlivě obrátila a lidé mohou být svědky poměrně dlouhého období sucha. Problémy týkající se ubývajících zdrojů vody se poprvé naplno projevíly v létě roku 2015, a od té doby se znovu vyskytují každou letní sezónu, zejména v oblastech s nižšími průměrnými úhrny ročních srážek. Nicméně i regiony s obvykle vyšším celkovým ročním přísunem srážek, například česká příhraniční pohoří, zaznamenávají z dlouhodobého pohledu také sušší periody.

Problematika sucha byla donedávna v humidních a temperátních regionech, jako je střední Evropa, často podceňována. Vývoj posledních let však dokazuje, že sucho je závažným problémem nejen pro přírodní ekosystémy, ale i pro ekonomické aktivity člověka. Zejména v průběhu vegetační sezóny, kdy díky zvyšujícím se teplotám stoupá poměr evapotranspirace, se velmi často prohlubuje intenzita a závažnost sucha, které jsou primárně způsobeny nedostatkem srážek (Hänsel et al., 2019).

Sucho však není fenoménem pouze několika nedávných let. Na území dnešního Česka se období intenzivního sucha vyskytovala dle dochovaných historických pramenů prakticky od nepaměti. Jenom v období raného novověku šlo o léta 1540, 1590, 1616 či dva po sobě jdoucí roky 1718-19 (Brázdil, Trnka et al., 2015). Ve 20. století bylo taktéž zaznamenáno několik výrazně suchých period, a to jak meteorologicky, tak i zemědělsky či hydrologicky. Jako extrémně suchá byla vyhodnocena období 1933-36, 1949-52 a 1971-74 (Kakos, Müller, 2004, cit. v Brázdil, Trnka et al., 2015). Výše uvedený výčet může napovědět, že závažná sucha sice nejsou jen záležitostmi posledních pár desítek let, nicméně mnohé současné studie (Dai, 2013; Prudhomme et al., 2014; Trenberth et al., 2014; Van Loon et al., 2016) předpovídají pravděpodobnější výskyt delších a intenzivnějších epizod sucha v souvislosti se změnou klimatu a zvýšení jeho variability.

Krušné hory, ve kterých leží tři zájmová povodí této práce, se v porovnání se zbytkem republiky nacházejí v oblasti nadprůměrného, relativně vyrovnaného ročního úhrnu srážek. S tím souvisí nižší pravděpodobnost výskytu dlouhodobě suchého období, jež by radikálně ovlivnilo funkci zdejších ekosystémů či způsobilo vysychání toků. Pásmo Krušných hor však tvoří orografickou bariéru, za níž se nachází poměrně rozlehlá oblast srážkového stínu s téměř poloviční průměrnou roční dotací. To znamená, že zejména oblasti poblíž jihovýchodního úpatí tohoto pohoří jsou velmi závislé na přísunu vodních zdrojů z toků, které Krušné hory odvodňují. Tolasz et al. (2007) uvádí, že se na hřebenech Krušných hor podle hodnot standardizovaného srážkového indexu (SPI) suché epizody vyskytují maximálně dva měsíce ročně, navíc krátce a nepravidelně. Naopak v oblasti podkrušnohorského srážkového stínu, zejména na Žatecku, dokonce přesahují období sucha způsobené nedostatkem srážek během průměrného roku až čtyři měsíce.

Výše uvedená fakta napovídají, že pokud se výrazné sucho vyskytne také ve vrcholových partiích či pramenných oblastech Krušných hor, může následně výrazně umocnit dopady sucha po proudu podkrušnohorských toků, které přijdou o svůj hlavní zdroj vodnosti. Z globálního pohledu jde o mnohem závažnější problém. V souvislosti se stále rostoucí lidskou populací, a s tím spojenou poptávkou po vodních zdrojích, se zvyšuje i tlak na vývoj přesnějších předpovědních scénářů suchých období (Mishra, Singh, 2010).

Cílem uvedené práce bylo vyhodnocení a porovnání projevů hydrologického sucha ve vybraných pramenných oblastech Krušných hor pomocí více ukazatelů na základě dostupných hydrologických a klimatických dat. Dále byla studie zaměřena na detekci dlouhodobých trendů hydrologického sucha v rámci jednotlivých povodí. Nedílnou součástí bylo též shrnutí současného stavu poznání ve věci hydrologického sucha, předně v oblastech s klimatem střední Evropy. Dále byla testována homogenita a korelace hydroklimatických řad v období 1967-2018. Důraz byl též kladen na zhodnocení přírodních podmínek v povodích, zejména pak historickým a současným změnám krajinného pokryvu.

2 Data a metody

2.1 Zájmová povodí

Pro účely této práce byla vybrána tři povodí v Krušných horách, konkrétně povodí horní Svatavy, horní Rolavy a povodí Načetínského potoka (obrázek 1). Ve všech třech případech jde o menší horská povodí na česko-saském pomezí, která zahrnují zejména pramenné oblasti. Tato povodí byla vybrána na základě dvou faktorů. Prvním z nich je délka časové řady průtoků, z nichž je nejkratší datová řada profilu Chaloupky na řece Rolavě začínající hydrologickým rokem 1967. Druhým kritériem důležitým pro možnost porovnání jednotlivých povodí mezi sebou je absence přehradních nádrží či jiných větších hydrotechnických staveb nad měrným profilem daného povodí, což by v ideálním případě mělo zajistit relativně nízkou míru přímého ovlivnění srážkoodtokového režimu. Samozřejmě nejde ani v jednom případě o ryze přírodní povodí bez jakéhokoli zásahu člověka, například v povodí horní Svatavy má v současnosti na celkové ploše relativně velký podíl stále rostoucí zástavba (10,8 %).

Co se přírodních podmínek týče, mají vybraná povodí některé rysy společné, ale i odlišné. Podloží všech povodí je tvořeno zejména granity, fylity a svory, což jsou horniny typické pro celé krušnohorské krystalinikum (Demek, Mackovčín et al., 2006). Krušné hory jako celek prodělaly v historii velmi významné změny krajinného pokryvu. Původní porosty byly poprvé téměř kompletně vykáceny v rozmezí 16. a 18. století. Současná rozloha lesů, tvořená převážně smrkovými monokulturami, je relativně stabilní od konce 19. století. Druhovú skladbu lesa v Krušných horách je také více než 100 let stabilní, nicméně na jeho zdravotním stavu se negativně podílela, a do jisté míry se stále podílí, masivní těžba a spotřeba hnědého uhlí v Podkrušnohoří, jež svého vrcholu dosáhla v průběhu 80. let 20. století (ÚHÚL, 1999).

Rozmezí nadmořských výšek všech povodí je 538 až 965 m n. m., přičemž průměrně nejvýše se nachází povodí Rolavy se závěrovým profilem Chaloupky (807 m n. m.). Toto povodí je plochou nejmenší (19 km²), zároveň nejméně sklonité díky své poloze na náhorní plošině. Dále je zde ve srovnání s dalšími povodími nejvyšší podíl rašelinných půd (25 % plochy) a také luk a pastvin. Povodí horní Svatavy (54 km²) s měrným profilem Klingenthal (540 m n. m.) disponuje naopak nejvyšším podílem svahů s vysokým sklonem, téměř žádnými rašeliništi, ale také největší zalesněností (81 %) i přes výše uvedený vysoký podíl zástavby. Plošně největší povodí Načetínského potoka (74 km²) se od dvou předešlých odlišuje zejména ve vysokém podílu podzolových a glejových půd, dále orientací svahů (převaha severních), ale také nejvyšším průměrným sklonem hlavního toku (21 ‰).



Obrázek 1: Přehledová mapa zájmových povodí (zdroje dat: ARCDATA PRAHA, LFULG, VÚV TGM)

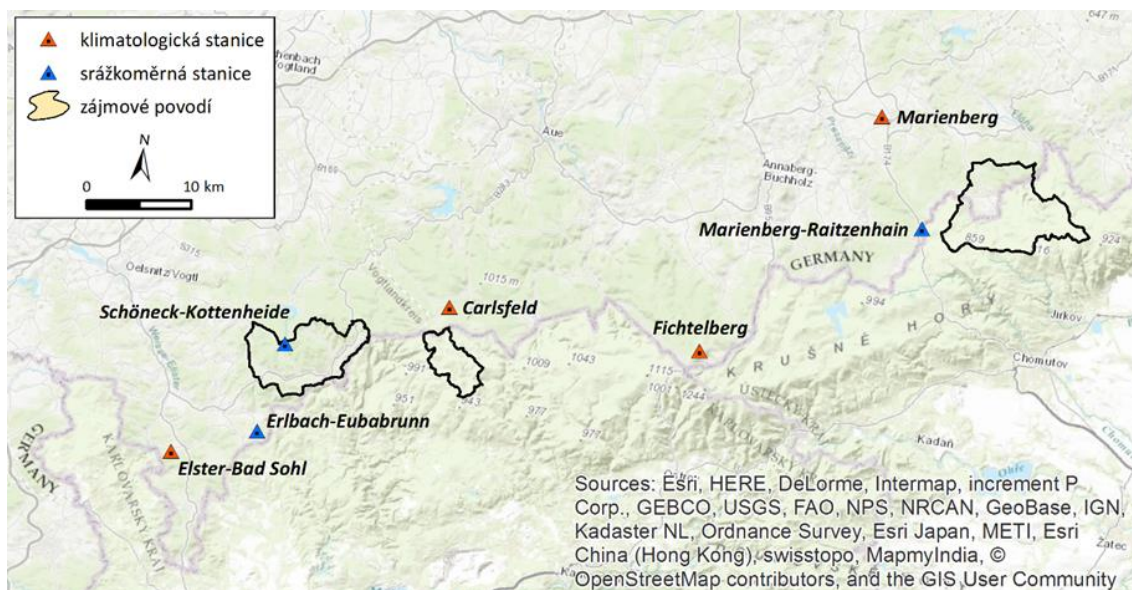
2.2 Vstupní data

Časové řady průměrných denních průtoků Q_a pro vybrané stanice byly získány od ČHMÚ (profil Chaloupky) a LFULG (profily Klingenthal a Rothenthal). Společný časový průnik těchto řad je k dispozici od počátku hydrologického roku 1967, kdy byl uveden do provozu měrný profil Chaloupky na horní Rolavě. Datové řady dvou německých stanic jsou delší, v případě profilu Klingenthal na Svatavě byly údaje o průtocích dostupné již od listopadu 1960. Nejdelší řadou disponuje stanice Rothenthal, jež je závěrovým profilem zájmového povodí Načetínského potoka. Měření vodních stavů a průtoků zde bylo zahájeno již před 91 lety a časová řada je doposud kontinuální. Většina analýz v této práci je proto provedena pro období 1967 až 2018, jelikož postihuje všechny tři vodní toky. Základní údaje vybraných měřících stanic jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Přehled vybraných vodoměrných stanic

měrný profil (vodní tok)	dostupná data	prům. průtok Q_a	medián Q_{med}	průtok Q_{355}
Klingenthal (Svatava)	1961-2018	1,14 m ³ /s	0,70 m ³ /s	0,20 m ³ /s
Chaloupky (Rolava)	1967-2018	0,57 m ³ /s	0,41 m ³ /s	0,11 m ³ /s
Rothenthal (Načetínský p.)	1929-2018	1,34 m ³ /s	0,90 m ³ /s	0,23 m ³ /s

Další nedílnou součástí vstupních dat pro analýzy týkající se indexů hydrologického sucha nebo vyhodnocení dlouhodobých trendů jsou údaje z meteorologických a klimatologických stanic v okolí zájmových povodí v měsíčním kroku. Využity byly průměry teplot vzduchu (T), úhrnů srážek (H) a sumy denní výšky sněhu (S). Data ze stanic na německé straně Krušných hor byla čerpána z volně dostupné databáze Deutscher Wetterdienst (DWD), data z českých stanic nebyla z finančních důvodů využita. Německé měřící stanice poskytly dostatečně dlouhé datové řady, ale ne každá z vybraných stanic měří kompletní spektrum všech meteorologických a klimatologických parametrů. Datové řady z těchto stanic nebyly stoprocentně kompletní, problémy s chybějícími daty se týkaly povětšinou jen několika kratších epizod či jednotek hodnot v rámci souboru. Chybějící data byla doplněna vždy pomocí lineární regrese. Při procesu doplňování dat se ukázala silná korelace průměrných měsíčních teplot mezi jednotlivými stanicemi. Polohy vybraných meteorologických stanic a zájmových povodí jsou zobrazeny v přehledové mapě (obrázek 2). Pro detailní fyzicko-geografickou charakteristiku území a analýzu dlouhodobých změn krajinného pokryvu bylo využito velké množství mapových podkladů, jak již digitalizovaných, tak i analogových, jež musely být ručně zdigitalizovány.



Obrázek 2: Přehledová mapa vybraných klimatologických a srážkoměrných stanic (zdroje: DWD, LFULG, © OpenStreetMap Contributors)

2.3 Metodika výpočtů

Před analýzami změn sezonality suchých dní a testováním statisticky významných trendů v časových řadách byla testována jejich absolutní a relativní homogenita. Účelem byla snaha o určení zlomových roků v měsíčních, sezónních a ročních hydroklimatických řadách. Využity byly dva testy homogenity: Pettittův test absolutní homogenity (Pettitt, 1979) a SNHT test (Alexandersson, 1986). Testy datových řad byly provedeny na 5% hladině významnosti.

Indexy hydrologického sucha byly vybrány na základě několika kritérií, jako je například dostupnost vhodných dat či porovnatelnost s dalšími publikovanými výzkumy podobného zaměření. Zároveň bylo v analýzách přihlédnuto k problematice hodnocení průtoků v „chladném“ a „teplém“ půlroce. Vymezení těchto dvou pomyslných polovin roku bylo provedeno za účelem odlišení extrémně nízkých průtoků způsobených mrazem od těch minimálních průtoků, které nastaly z důvodu nedostatku srážek či zásob vody v povodí. Chladný půlrok je pro této účely práce vymezen od počátku listopadu do konce dubna, zatímco teplý půlrok zahrnuje období od začátku května do konce října.

- Metoda prahové hodnoty Q_{355} : Pro každý profil byly vypočteny hodnoty průtoků, jejichž pravděpodobnost dosažení je 97,19 %. Hodnota Q_{355} byla definována nejen pro celé sledované období, ale také pro každý měsíc (Q_{355m}) a sezónu (Q_{355s}) pro účely zjištění, které měsíce nejvíce „vysychají“ nejen absolutně, ale i relativně ke svému normálu.
- Nedostatkové objemy: Na základě překročení výše uvedené prahové hodnoty byly vypočteny pro každý profil deficitní objemy (Lehner et al., 2006; Vlnas, 2015).
- LFI (Low Flow index): Poměr nejnižšího denního průtoky pro každý hydrologický rok k hodnotě dlouhodobého průměrného denního průtoky. Čím blíže je hodnota indexu nule, tím výraznější byla záporná odchylka od normálu (Poff, Ward, 1989 cit. v Pyrcce, 2004).
- BFI (Base Flow index): Podíl objemu bazálního odtoku na celkovém objemu odtoku na základě separace hydrogramu v denním kroku. V současnosti se tento ukazatel využívá také ve studiích zabývajících se suchem v různých modifikacích. V této práci je BFI vypočten jako podíl hodnoty sedmidenního minimálního průtoky a průměrného denního průtoky v daném hydrologickém roce (Poff, Ward, 1989).

Při výpočtu některých ukazatelů byl využit výše uvedený software IHA7.1, který pracuje na bázi denních řad průtoků a umožňuje výpočet 67 hydrologických parametrů i z dlouhých datových souborů. V IHA7.1 byly pro období 1967-2018 vypočteny hodnoty BFI a sedmidenního minima, dále pak byly určeny hodnoty jednodenního minima a juliánský den jeho výskytu (Richter et al., 1998).

Pro testování trendů a jejich statistické významnosti v časových řadách byl použit Mann-Kendallův neparametrický test (dále jen MK-test). Ve své původní podobě i sezónní modifikaci dle Hirsche a Slacka (1984) je používán k detekci monotónních trendů v časových řadách nejen v hydrologii či klimatologii. Pokud je hodnota testovací statistiky kladná, trend je rostoucí, záporná hodnota značí klesající trend. Signifikance trendu byla testována vždy na 5% hladině významnosti.

Vzájemná závislost měsíčních a ročních klimatických řad byla po provedení trendových analýz následně testována pomocí Kendallova koeficientu pořadové korelace τ_b (Kendall, 1955). Oproti např. Pearsonovu korelačnímu koeficientu nepředpokládá normalitu vstupních souborů, tudíž je vhodný pro použití ordinálních dat. Tento ukazatel hodnotí těsnost vztahu mezi dvěma datovými soubory na základě počtu inverzí v pořadí dvojic objektů, což je opačný přístup než při výpočtu Spearmanova koeficientu, jenž koreluje pouze pořadí. Kendallův koeficient nabývá hodnot od -1 do 1, stejně jako např. Pearsonův nebo Spearmanův korelační koeficient (Abdi, 2007). Nulová hypotéza předpokládá nulovou závislost mezi proměnnými X a Y . Alternativní hypotéza předpokládá prokázání výskytu pozitivní nebo negativní závislosti. Testování proběhlo standardně na 5% hladině významnosti.

3 Výsledky

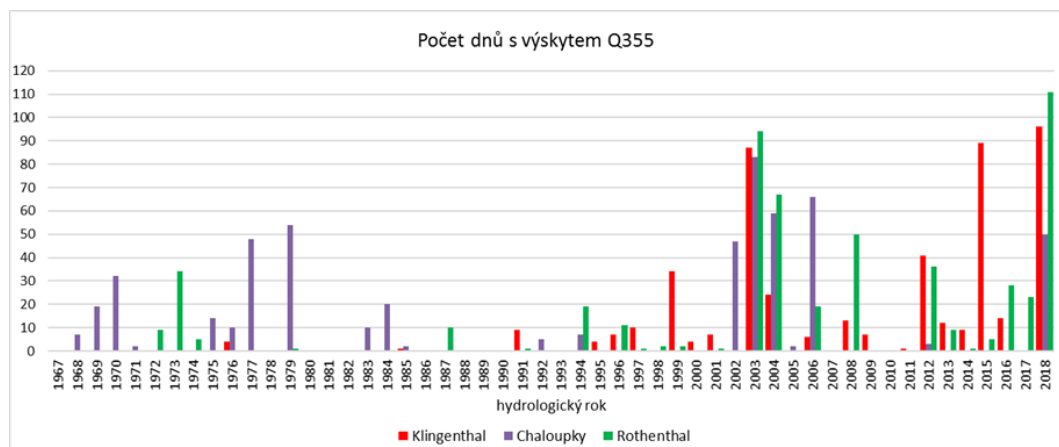
3.1 Testování homogenity časových řad

Testovány byly v měsíčním, sezónním a ročním kroku řady průměrných teplot, srážek, denních výšek sněhové pokrývky a průtoků. Na 5% hladině významnosti byly potvrzeny nehomogenity teplotních řad většiny stanic především pro jarní a letní měsíce, nejčastější výskyt zlomů se nachází v rozmezí let 1989 až 1992, a také na přelomu tisíciletí pro letní měsíce, naopak v zimních měsících a březnu nebyl zjištěn signifikantní zlom u žádné stanice. Roční průměrné teploty na všech stanicích zaznamenávají statisticky významný zlom v letech 1987 a 1988. Zatímco u teplotních řad bylo potvrzeno poměrně hodně zlomů, pro datové řady srážkových úhrnů tomu tak není. Drtivá většina všech testovaných měsíčních, sezónních i ročních řad srážkových úhrnů je dle výsledků Pettittova a SNHT testu homogenní. V případě řad výšky sněhové pokrývky se většina statisticky významných zlomů v zimních a jarních měsících opět vyskytuje v rozmezí let 1987-92, což naznačuje jistý vliv nárůstu teplot vzduchu. V neposlední řadě je třeba zmínit, že na žádné stanici nebyl detekován zlom vedoucí k nárůstu výšky sněhové pokrývky, za všemi těmito zlomy dochází k poklesu střední hodnoty. Stejně tak všechny zlomy průměrných teplot značí následný nárůst jejich střední hodnoty.

Testování homogenity průtokových řad odhalilo bez výjimky poklesy střední hodnoty průměrných měsíčních průtoků na všech vodoměrných stanicích. Pro nejvýše položené povodí horní Rolavy byly Pettittovým testem zjištěny signifikantní zlomy pro sezónní a roční průměry blíže současnosti než u zbylých dvou. V dubnu a květnu byly potvrzeny zlomy na všech třech profilech, pro Chaloupky a Rothenthal i v červnu 1996. Podobně jako u klimatických řad se často vyskytují signifikantní zlomy v období 1987-1993 a zároveň po zlomu vždy následuje pokles průměrných průtoků.

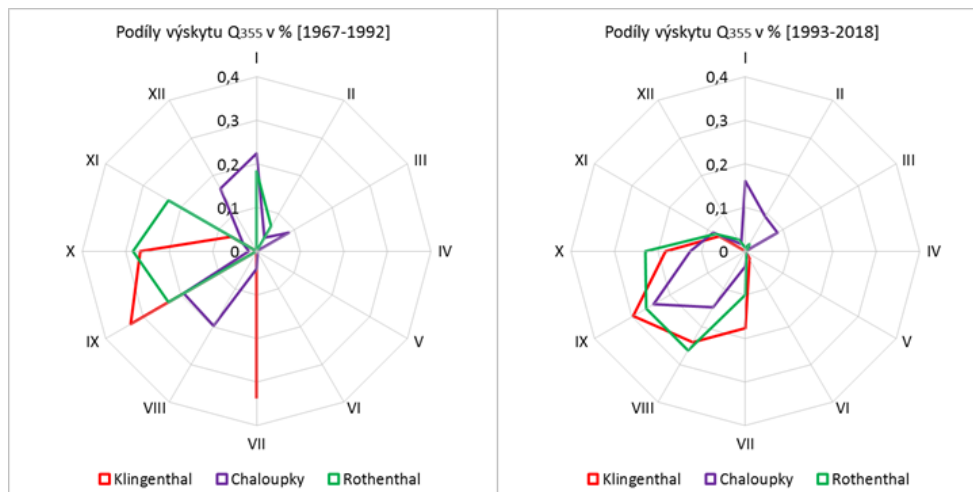
3.2 Ukazatele a sezonalita hydrologického sucha

Testy homogenity datových řad naznačily, že nejvíce statisticky významných změn v hydrologických a klimatologických parametrech se děje v jarních a také letních měsících v období 1987-1992. Proto byl i vzhledem k celkové délce sledovaného období zvolen jako dělicí rok pro analýzy změn sezonality výskytu hydrologického sucha rok 1992. Tyto změny jsou tedy sledovány pro dvě stejně dlouhé periody trvající 26 let, konkrétně 1967-1992 a 1993-2018. Z grafu ročních výskytů Q_{355} (obrázek 3) je patrné, že se profil Chaloupky od zbylých dvou výskytem dnů s extrémně nízkými průtoky v 70. letech. Naproti tomu profily Klingenthal a Rothenthal vykazují nejsušší roky z pohledu výskytu Q_{355} především ve druhé polovině sledovaného období. Zároveň je třeba poukázat na extremitu roku 2018, jenž překonal na horní Svatavě a Načetínském potoce historická maxima. Profil Klingenthal zaznamenal 96 suchých dní, Rothenthal dokonce 111, v obou případech šlo o téměř nepřerušované epizody od července do října. Na Rolavě bylo nejdelší sucho v roce 2003 (83 dnů).



Obrázek 3: Počet dnů s výskytem Q_{355} na jednotlivých profilech (zdroje dat: ČHMÚ, LFULG)

Pokud se podíváme na sezónní rozložení jednotlivých suchých dnů, respektive jejich procentuálních podílů (obrázek 4), je již na první pohled zřetelné, že od roku 1993 se suché dny koncentrují zejména mezi 7. a 10. měsícem. Dále je patrný úbytek hydrologicky suchých dní v chladnější polovině roku, což platí zejména pro Rolavu a Načetínský potok. Z pohledu deficitních objemů byl zaznamenán největší nárůst po roce 1993 v 8. a 9. měsíci ve všech třech povodích.



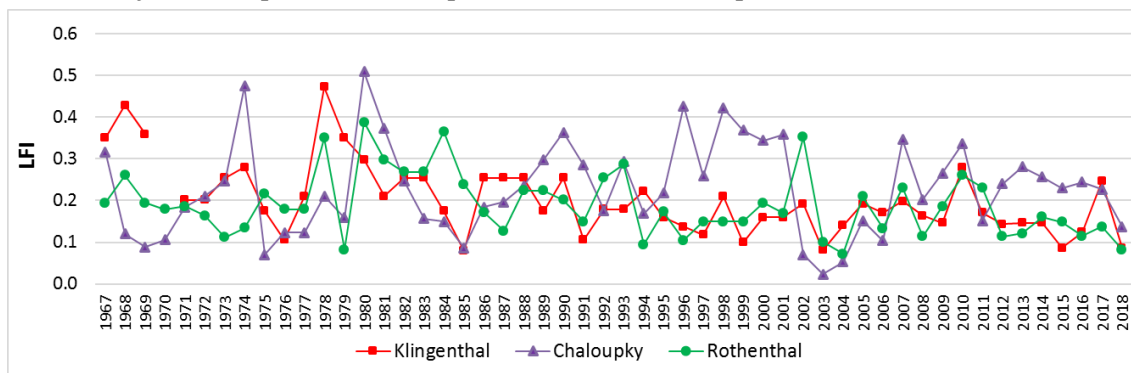
Obrázek 4: Měsíční rozložení hydrologicky suchých dnů (zdroje dat: ČHMÚ, LFULG)

Přesné datum (juliánský den) výskytu nejnižšího denního průtoku v hydrologickém roce (nebo též jednodenního minima) může napovědět, jestli se tato minima v dlouhodobém horizontu posouvají (tabulka 2). Profil Klingenthal na horní Svatavě vykazuje posun průměrného výskytu jednodenního minima blíže začátku roku v druhé polovině sledovaného období. Stejně tak se posun týká i obou zbylých stanic, nejmarkantnější je na horní Rolavě.

Tabulka 2: Průměrné datum výskytu Q_{min} v obou polovinách sledovaného období

Q_{min}	Klingenthal (Svatava)		Chaloupky (Rolava)		Rothenthal (Načetínský potok)	
	juliánský den	datum	juliánský den	datum	juliánský den	datum
1967-1992	273	30. září	310	6. listopad	304	31. říjen
1993-2018	218	6. srpen	224	12. srpen	246	3. září

Dle výsledných hodnot ukazatele LFI (obrázek 5) je názorně vidět extremita sucha roku 2003 pro stanice Klingenthal a Chaloupky. Tento rok patřil mimo jiné mezi nejsušší i dle ostatních ukazatelů ve všech třech povodích. Dle LFI byl pro profil Rothenthal na Načetínském potoce nejsušší rok 2018. Z grafu pro všechny limnigrafy je dále patrná i větší variabilita profilu Chaloupky ve srovnání s dalšími, což je vidět například v druhé polovině 90. let a též na přelomu tisíciletí.



Obrázek 5: Vývoj hodnot Low Flow indexu (zdroje vstupních dat: ČHMÚ, LFULG)

Pro názorné shrnutí všech vypočtených ukazatelů sucha slouží tabulka 3, v níž jsou uvedeny vždy tři nejsušší teplejší poloviny roku (5. až 10. měsíc) v jednotlivých povodích. Teplejší polovina roku byla zvolena předně pro odlišení hydrologicky suchých epizod způsobených výlučně nedostatkem srážek ve vegetační sezóně od nízkých průtoků vyvolaných mrazem v zimním období.

Tabulka 3: Nejsušší teplejší poloviny roků dle jednotlivých ukazatelů

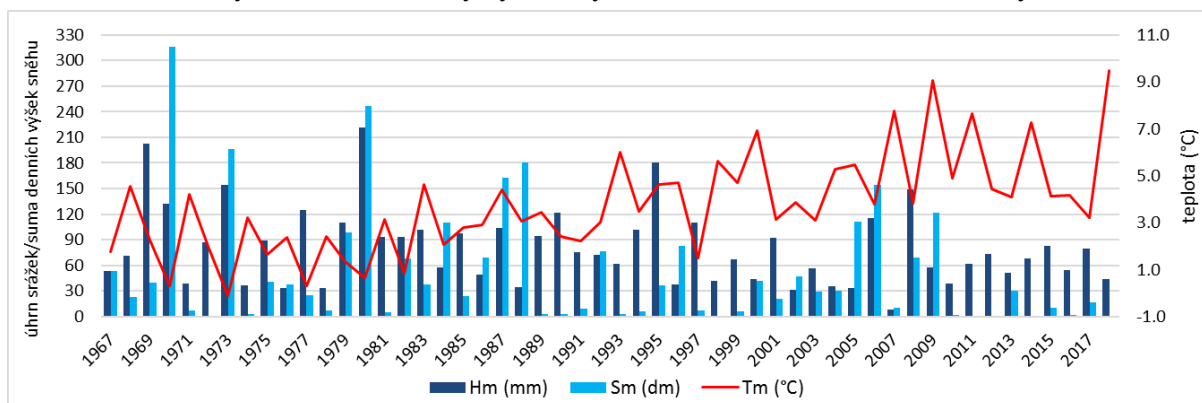
Nejsušší teplejší poloviny roků (1967-2018)	Klingenthal (Svatava)			Chaloupky (Rolava)			Rothenthal (Načetínský p.)		
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	1.	2.	3.
doba trvání	2018	2015	2003	2003	1979	2018	2018	2003	2008
magnituda (deficitní objem)	2018	2003	2015	2003	2018	1975	2018	2003	2008
intenzita (deficit/doba trvání)	2003	2018	2015	1975	2003	1969	2018	1994	2016
LFI	2003	2018	2015	2003	1975	1969	2018	1994	2003
BFI	2003	1999	2018	2003	1975	2018	2013	1994	2008
jednodenní minimum	2003	2018	2015	2003	1975	1969	2018	1994	2003
sedmidenní minimum	2003	2018	2015	2003	1975	2018	2018	2003	1994

Na první pohled je zřejmé, že roky 2003 a 2018 se v tabulce objevují nejčastěji. Podle téměř všech použitých ukazatelů bylo období od května do října roku 2018 zatím absolutně nejsušší na závěrovém profilu Rothenthal. V tabulce jsou sice uvedeny výsledky pro rozmezí let 1967 až 2018, nicméně pro závěrový profil Načetínského potoka byl rok 2018 nejsušší i při použití celé datové řady od začátku měření v roce 1929. Na horní Svatavě byla podle většiny ukazatelů nejsušší teplejší polovina roku 2003, nicméně i tyto sezóny byly v letech 2018 a 2015 velmi suché. Na horní Rolavě byl taktéž výjimečně suchý rok 2003, dále pak 1975 a 1969. Na rozdíl od zbylých dvou povodí se pro Rolavu dostaly do výčtu nejsušších i roky z první poloviny sledovaného období.

3.3 Testování trendů v časových řadách

Výsledky trendových analýz do velké míry korespondují s výsledky, které naznačilo testování homogenity. Výsledky MK-testu odhalily na všech stanicích signifikantní rostoucí trend v měsíčních řadách teplot vzduchu zejména v jarních a letních měsících, zatímco v podzimních a zimních měsících trendy potvrzeny nebyly. V řadách sezónní průměry jsou velmi výrazný rostoucí trend na jaře a v létě. Největší sílu vykazují trendy pro průměry teplé poloviny roku a celoroční průměrné teploty.

Obrázek 6 zachycuje vývoj teplot, srážek a výšek sněhu ve 4. měsíci na stanici Carlsfeld (897 m n. m.) poblíž povodí horní Rolavy. Zde byl na 5% hladině významnosti potvrzen signifikantní trend poklesu výšek sněhu a také rostoucí trend průměrné teploty vzduchu. Naopak celkové úhrny srážek jsou v dubnu relativně vyrovnané, statisticky významný trend v datové řadě detekován nebyl.



Obrázek 6: Chod teplot, srážek a výšek sněhu pro měsíc duben na stanici Carlsfeld (zdroj dat: DWD)

Statisticky významné trendy v celkových úhrnech srážek nebyly téměř nikde potvrzeny, což značí dlouhodobou vyrovnanost srážek. Na druhou stranu, se stále rostoucí teplotou klesají zimní a jarní akumulace sněhu, což potvrzují klesající trendy na většině stanic měřících výšku sněhu. Nejsilnější poklesy byly zjištěny ve všech třech jarních měsících, na dvou stanicích i v únoru.

Testování průměrných měsíčních, sezónních a ročních průtoků (tabulka 4) ukázalo velmi podobné výsledky, jako analýza trendů teplotních řad. Nejvýraznější poklesy průtoků byly zjištěny v jarních měsících, v létě, ale také v ročních průměrech a průměrech teplejší poloviny roku. Tento efekt tedy jde ruku v ruce s dřívějším táním sněhu, jehož tavná voda poté chybí v korytech toků i v letních měsících. Zároveň má tento trend vliv i na výše uvedený posun jednodenních minim blíže k začátku roku.

Tabulka 4: Výsledky MK-testu pro řady Q_m , Q_r a Q_s (zdroje dat: ČHMÚ, LFULG)

Qm, Qr, Qs (1967-2018)	Klingenthal (Svatava)			Chaloupky (Rolava)			Rothenthal (Načetínský p.)		
	KTRL	Stat.	p-hodnota	KTRL	Stat.	p-hodnota	KTRL	Stat.	p-hodnota
listopad	-0.002	-0.45	0.71	0.001	0.36	0.776	-0.003	-0.26	0.621
prosinec	-0.005	-0.89	0.47	0.001	0.71	0.575	-0.009	-1.02	0.101
leden	0.002	0.32	0.79	0.002	0.90	0.478	-0.003	-0.20	0.754
únor	0.004	0.55	0.66	0.003	1.87	0.140	-0.001	0.07	0.903
březen	-0.001	-0.07	0.95	0.002	0.84	0.507	-0.006	-0.31	0.682
duben	-0.031	-4.09	0.00	-0.016	-5.38	0.000	-0.036	-2.16	0.005
květen	-0.018	-5.37	0.00	-0.011	-6.34	0.000	-0.026	-3.17	0.000
červen	-0.007	-2.91	0.02	-0.006	-4.40	0.001	-0.019	-2.88	0.000
červenec	-0.008	-3.25	0.01	-0.003	-2.77	0.029	-0.011	-2.08	0.005
srpen	-0.008	-3.27	0.01	-0.003	-3.08	0.015	-0.010	-2.00	0.003
září	-0.006	-2.52	0.04	-0.001	-1.08	0.394	-0.010	-1.72	0.019
říjen	-0.003	-1.20	0.33	-0.001	-0.54	0.670	-0.008	-1.30	0.062
rok	-0.008	-3.81	0.00	-0.003	-3.72	0.003	-0.015	-2.40	0.001
III-V	-0.019	-3.37	0.01	-0.009	-4.90	0.000	-0.026	-2.18	0.007
VI-VIII	-0.009	-3.13	0.01	-0.013	-3.79	0.003	-0.015	-2.32	0.001
IX-XI	-0.006	-1.91	0.12	-0.001	-0.30	0.813	-0.010	-1.62	0.015
XII-II	0.002	0.29	0.81	0.002	1.02	0.421	-0.006	-0.58	0.354
XI-IV	-0.007	-1.85	0.13	-0.002	-1.56	0.218	-0.011	-1.58	0.030
V-X	-0.010	-3.81	0.00	-0.005	-4.50	0.000	-0.016	-2.76	0.000

Analyzovány byly také řady měsíčních, sezónních a ročních minimálních průtoků Q_{\min} . Oproti testům průměrných průtoků byly zjištěny poměrně výrazné rozdíly. U profilů Klingenthal a Rothenthal se pro měsíční Q_{\min} prodloužilo období klesajících trendů až do září, respektive do října, zatímco na stanici Chaloupky byl zjištěn klesající trend na 5% hladině významnosti pouze od dubna do června s největší silou v květnu. Mezi listopadem a březnem nebyl detekován žádný statisticky významný trend. Pro sezónní minima byl na stanicích Klingenthal a Rothenthal detekován silný klesající trend Q_{\min} na jaře, v létě, na podzim a v teplejší polovině roku, naopak na Chaloupkách byl detekován pouze na jaře. U celoročních minim se pokles týká opět jen Svatavy a Načetínského potoka.

Dalšími testovanými časovými řadami byly deficitní objemy (tabulka 5). Aby se dalo říci, jak se každý měsíc „vysušuje“ vzhledem ke svému normálu, bylo třeba určit hodnoty Q_{355} pro každý měsíc, sezónu a celé období zvlášť. Nejsilnější statisticky významné trendy pro stanice Klingenthal a Rothenthal se vyskytují zejména v dubnu, květnu a červnu. Pro duben a květen přitom při použití konstantní hladiny průtoků Q_{355} pro celé sledované období nebyly nedostatkové objemy zaznamenány vůbec. Při použití Q_{355m} a Q_{355s} byl také detekován nárůst deficitů v prosinci na profilu Klingenthal, ačkoli byl ve stejném měsíci na stanici Chaloupky zaznamenán opačný trend. Na stejném profilu byl pouze na jaře zaznamenán mírný nárůst. Na ostatních profilech dochází též k nárůstu na jaře a také v teplé polovině roku. V rámci ročních deficitů je nejvíce výrazný nárůst na Svatavě, o něco méně výrazný je rostoucí trend na Načetínském potoce, zatímco pro Rolavu statisticky významný trend zjištěn nebyl.

Tabulka 5: Výsledky MK-testu pro řady deficitních objemů (zdroje dat: ČHMÚ, LFULG)

nedostatkové objemy dle Q355m a Q355s (1967-2018)	Klingenthal (Svatava)		Chaloupky (Rolava)		Rothenthal (Načetínský p.)	
	Statistika	p-hodnota	Statistika	p-hodnota	Statistika	p-hodnota
listopad	0.70	0.221	-0.43	0.505	0.14	0.784
prosinec	1.20	0.036	-1.87	0.018	0.49	0.244
leden	0.07	0.889	0.02	0.969	-0.26	0.610
únor	0.06	0.839	-0.10	0.864	-0.30	0.556
březen	-0.37	0.459	0.11	0.794	-0.16	0.754
duben	0.78	0.218	1.49	0.021	2.80	0.001
květen	2.34	0.004	1.54	0.052	2.62	0.002
červen	1.63	0.026	0.01	0.989	1.89	0.007
červenec	1.27	0.064	-0.51	0.466	1.63	0.020
srpen	1.11	0.026	-0.29	0.653	1.65	0.011
září	1.26	0.046	-0.08	0.875	1.39	0.047
říjen	1.30	0.040	1.29	0.046	1.38	0.065
rok	4.55	0.000	-1.40	0.206	3.49	0.002
III-V	1.86	0.048	2.37	0.014	3.60	0.000
VI-VIII	1.80	0.027	-0.56	0.548	3.09	0.000
IX-XI	2.14	0.009	0.50	0.579	1.75	0.044
XII-II	0.99	0.149	-1.79	0.055	-0.19	0.786
XI-IV	1.71	0.084	-0.73	0.496	1.76	0.095
V-X	2.73	0.006	0.84	0.441	3.63	0.000

V neposlední řadě byl testován vliv délky datových řad na výsledky trendových analýz. Průtoková data pro Klingenthal byla k dispozici již od hydrologického roku 1961, pro Rothenthal od roku 1929. Dle pramenů uvedených v rešerši této práce byly na území Česka zaznamenány velmi suché epizody ve 30., 40. i 50 letech 20. století, pročež se již před zahájením výpočtů daly očekávat určité rozdíly v porovnání se zkrácenou řadou od roku 1967. Analýza trendů Q_{\min} delší řady pro Svatavu odhalila velmi podobné výsledky pro kratší i delší, o 6 let prodloužené řady. Všechny statisticky významné trendy byly potvrzeny ve stejných měsících, jen s rozdílnou silou, povětšinou menší signifikancí. Pro povodí Načetínského potoka byly zjištěny daleko větší rozdíly při použití kompletní řady. Za pozornost stojí absence dříve přítomných statisticky významných trendů Q_{\min} v rozmezí června a října, ale také zesílení klesajícího trendu pro květen.

3.4 Vzájemné korelace mezi časovými řadami

Před korelační analýzou klimatických a průtokových řad byly otestovány vztahy měsíčních teplotních a sněhových řad. Důvodem pro ověření těsnosti vztahu těchto parametrů byla jejich výrazná změna ve sledovaném období, a soulad jejich trendů s trendy průtoků. Z výsledků vyplývá, že všechny teplotní a sněhové řady vykazují negativní hodnoty Kendallova koeficientu. Tato skutečnost značí, že rostoucí teploty obvykle vedou k poklesu výšky sněhové pokrývky v daných měsících. Nejsilněji se tento vztah jeví v říjnu a listopadu na nejvýše položených stanicích Carlsfeld a Fichtelberg (-0,56 až -0,59), zatímco na nejnižše položené stanici Elster-Bad Sohl se zdá být závislost výšky sněhu na teplotě vzduchu nejsilnější v lednu a březnu (-0,51 a -0,57). Je však třeba zmínit, že pro žádný měsíc ani roční řady nebyla prokázána velmi silná závislost s hodnotami koeficientu nad 0,7.

Překvapující výsledky přinesla korelační analýza klimatických a průtokových řad. Zjištěny byly pouze slabé či středně silné závislosti průměrných průtoků na srážkách, teplotách či výšce sněhu. Nejsilnější korelace byla na 5% hladině významnosti potvrzena mezi průměrným ročním průtokem a úhrnem srážek na horní Rolavě (0,51). U řad Q_{\min} nepřesáhly korelační koeficienty v drtivé většině ani hranici 0,4 či -0,4, stejně tak pro řady deficitních objemů na všech profilech. Příčinou slabých korelací zřejmě byl měsíční krok datových řad ve výpočtech, přesnější by byly výpočty na bázi denních řad.

4 Diskuze

V nedávné minulosti se začala problematika sucha ukazovat jako velmi aktuální i v regionech, které dříve nebyly deficitem vody sužovány tak často. Proto je při porovnávání výsledků této práce se zjištěními jiných studií důležité brát zřetel nejen na rozdílné fyzicko-geografické podmínky porovnávaných lokalit, ale také na různé časové rozmezí zkoumaných jevů a jejich datových souborů.

Výsledky této práce do jisté míry korespondují s různými přírodními podmínkami zájmových povodí. Jako nejméně ohrožené suchem se zdá být povodí horní Rolavy, zejména díky vyšší průměrné nadmořské výšce, průměrné sklonitosti terénu, vyššímu podílu rašelinišť a trvale zamokřených ploch či téměř zanedbatelnému antropogennímu ovlivnění odtoku. Srážkoměrná stanice Carlsfeld, jež se nachází nejbližší tomuto povodí, je zároveň jedním z nejdeštivějších míst v celých Krušných horách. Díky nechráněnému návětrnému svahu tato stanice dlouhodobě zaznamenává vyšší roční úhrny srážek, než například o 300 metrů výše položená stanice Fichtelberg. I díky kombinaci těchto faktorů nejsou letní sucha na horní Rolavě zdaleka tak výrazná, jako na zbylých dvou profilech.

Výjimečnost suchých epizod posledních let potvrzuje předběžná zpráva o vyhodnocení sucha z roku 2018 (ČHMÚ, 2019). Dle tohoto reportu byl rok 2018 z pohledu srážek druhý nejsušší hned po roce 2003, a to od začátku evaluace such v roce 1961. Stejně tak bylo léto v roce 2018 společně s létem 2003 vůbec nejteplejším obdobím od počátku sledování. Dále je ve zprávě uvedeno, že 2018 byl pátý suchý rok v řadě, což mělo velký vliv na umocnění nedostatku vod povrchových i podzemních.

Výsledky trendových analýz této práce se poměrně dobře shodují i s případovou studií horního toku řeky Hron ve slovenských Nízkých Tatrách (Blahušiaková a Matoušková, 2016). Stejně jako ve všech třech krušnohorských povodích je na horním Hronu zaznamenán sestupný trend průměrného ročního průtoku. Klesající tendence je však výrazná zejména v rozmezí listopadu a února, což je výrazný rozdíl oproti Krušným horám, kde průtoky klesají zejména v jarních a letních měsících. Taktéž dochází na horním Hronu ke značnému poklesu hodnot minimálních průtoků v chladném půlroce, totéž platí pro teplý půlrok, ale pokles není tak výrazný. Shodné rysy jsou k nalezení v nejdelších periodách sucha, hlavně v roce 2003. Renner a Bernhofer (2011) odhalili při zkoumání průtokových a klimatických řad saských stanic pro období 1930 a 2009 zlom v teplotách vzduchu v roce 1988, což souhlasí s výsledky této práce. Autoři také uvádějí posun vysokých průtoků z jarního tání až o tři týdny dříve než v první polovině sledovaného období, zejména ve výše položených povodích.

Zajímavé je též porovnání výsledků této práce s výstupy Skály (2017), jenž aplikoval podobný přístup ke studiu sucha na Šumavě. Autorovy výsledky vycházejí z delších souborů, které mají počátek v 30. letech 20. století. To má velký vliv na testování trendů, které poukazují na pokles nedostatkových objemů pro všechny zkoumané profily. Nicméně z tohoto pohledu jsou tyto výsledky v rozporu s analýzou kompletní řady pro profil Rothenthal v Krušných horách, který je v provozu od roku 1929. Tato stanice totiž vykazuje nárůst nedostatkových objemů na jaře. Dále uvádí, že dochází k postupné marginalizaci epizod sucha ve sledovaném období, což je opět v rozporu s většinou analýz pro Krušné hory. Tento fakt ale může být ovlivněn chybějícími roky 2015 až 2018 právě v práci Skály (2017).

Při testování trendů v časových řadách pomocí MK-testu zvyšuje výskyt autokorelace v datové řadě pravděpodobnost detekce statisticky významného trendu (Von Storch, 1995 cit. v Vlnas, 2015). V této práci byla využita verze MK-testu, která obsahuje automatickou korekci autokorelace, tudíž by měly být nesprávně identifikované trendy vyfiltrovány. Dalším faktorem částečně zkreslujícím výsledky je přirozená variabilita klimatu. Provádění analýz pro jednotlivé měsíce může být v tomto ohledu do jisté míry problematické, nicméně i výsledky ostatních studií napovídají, že výskyt hydrologického sucha se v souvislosti s klimatickou změnou opravdu mění. Otázkou také zůstává samotná vhodnost použití řad, se kterými bylo vícekrát manipulováno, či byla měněna metodika jejich měření. Proto by měl být v případném budoucím studiu upravovaných řad kladen větší důraz na verifikaci věrohodnosti samotných datových sad.

5 Závěr

Jelikož se stále zvětšuje množství konceptů a indexů k hodnocení sucha, měl by nyní být kladen důraz na jejich systematizaci pro monitoring či předpověď sucha a adaptační opatření proti němu. Výsledky práce do jisté míry korelují s výzkumy, které předpovídají zvýšené riziko výskytu sucha ve spojitosti s probíhajícím globálním oteplováním, a to i v regionu střední Evropy. Toto riziko se však netýká jen tradičně sušších oblastí, ale i výše položených regionů či pohoří s obvykle vyšší srážkovou dotací, které do jisté míry předurčují vodnost dolních toků řek.

Výsledky práce naznačily určitá specifika v reakci vybraných krušnohorských povodí na deficit srážek a výskyt hydrologického sucha. I když celkové srážkové úhrny v této oblasti dlouhodobě neklesají, hodnoty průměrných i minimálních průtoků vykazují v průběhu sledovaného období sestupnou tendenci. Lze se tedy domnívat, že hlavními příčinami zvyšujícími se výskytu epizod sucha s velkou intenzitou je především oteplování klimatu. Zvýšení teploty má za následek menší akumulace sněhu v zimních měsících a jejich rychlejší tání na jaře, což také zřejmě přispívá k posunu data výskytu minimálních průtoků blíže k začátku roku v druhé polovině vybraného období.

Výjimečnost extremity suchých period v posledních letech na území Česka potvrdily i výsledky této práce. Na profilu Rothenthal v povodí Načetínského potoka byl rok 2018 absolutně nejsušším od počátku měření v roce 1929 z pohledu nedostatkových objemů i doby trvání sucha. Naopak v povodí horní Rolavy nebylo sucho v létě 2018 zdaleka tak výrazné, např. ve srovnání s rokem 2003, což dokazuje, že každé povodí reaguje na nedostatek srážek rozdílně v závislosti na dalších fyzickogeografických faktorech.

Budoucí výzkum by se mohl zabývat změnami v časovém rozložení srážkových úhrnů a jejich skupenstvím v detailnějším měřítku než na úrovni měsíčních průměrů. V návaznosti by pak mohl být posouzen vliv těchto změn na výskyt hydrologického sucha v dané oblasti. Přínosné by jistě bylo i detailní zkoumání krušnohorských rašelinišť, například jejich hydrologického režimu během dlouhých epizod s nedostatkem srážek.

Na základě provedených výpočtů vycházejících z dostupných datových souborů pro zájmová povodí Krušných hor byly následně vyvozeny tyto závěry:

- Průměrné teploty vzduchu se ve všech zájmových povodích konstantně zvyšují. V řadách teplot vzduchu, výšek sněhové pokrývky a průměrných průtoků byly nalezeny zlomové body v rozmezí let 1987-1992, po kterých dochází k oteplení, úbytku sněhu a vodnosti toků.
- V průběhu sledovaného období dochází k signifikantnímu posunu v sezónnosti výskytu hydrologického sucha. Po roce 1993 se suché dny koncentrují v rozmezí července a října, zároveň dochází k výraznému úbytku extrémně nízkých průtoků v chladnější polovině roku.
- Analýzy trendů potvrzují pokles průměrných i minimálních průtoků ve všech povodích, zejména v jarních měsících. Vzestupné trendy nedostatkových objemů byly však zjištěny pouze na horní Svatavě a Načetínském potoce.
- K výraznější změně krajinného pokryvu došlo ve sledovaném období pouze v povodí horní Svatavy v souvislosti s přírůstkem zástavby. Ve všech povodích však dochází k mírnému nárůstu lesních ploch.
- Nejvýše položené povodí horní Rolavy s významným podílem rašelinišť a nejmenší měrou antropogenního ovlivnění vykazuje rozdílné chování ve srovnání s ostatními povodími, zejména v sezonalitě výskytu sucha a trendech nedostatkových objemů.

6 Zdroje

- Abdi, H., 2007. *The Kendall rank correlation coefficient*. Encyclopedia of Measurement and Statistics. Sage, Thousand Oaks, CA, s. 508-510.
- Alexandersson, H., 1986. *A homogeneity test applied to precipitation data*. Journal of Climatology, 6(6), s. 661-675.
- Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2016. *Evaluation of the hydroclimatic extremes in the upper Hron river basin, Slovakia*. AUC Geographica, 51 (2), s. 189-204.
- Brázdil, R., Trnka, M. et al., 2015. *Sucho v českých zemích: minulost, současnost a budoucnost*. Centrum výzkumu globální změny Akademie věd České republiky, 400 s.
- ČHMÚ, 2019. *Sucho v roce 2018, předběžné hodnocení*. [online]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/tiskove_zpravy/2019/Predbezna_zprava_o_suchu_2018.pdf
- Dai, A., 2013. *Increasing drought under global warming in observations and models*. Nat. Clim. Chang. 3, 52–58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
- Demek, J., Mackovčín P. et al., 2006: *Hory a nížiny. Zeměpisný lexikon ČR*. MŽP ČR. 580 s.
- Hänsel, S. et al., 2019. *Assessing seasonal drought variations and trends over Central Europe*. Adv. Water Resour. 127, 53–75. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.005>
- Hirsch, R. M., Slack, J. R., 1984. *A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence*. Water Resources Research, 20 s. 727-732
- Kendall, M.G., 1955. *Rank Correlation Methods*, 2nd edition. New York. Hafner Publishing Company
- Lehner B. et al., 2006. *Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis*. Climatic Change, 75, s. 273–299.
- Mishra, A. K., Singh, V. P., 2010. *A review of drought concepts*. J. Hydrol. 391, 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Pettitt, A. N., 1979. *A non-parametric approach to the change-point problem*. Applied statistics, 28, no. 2, s. 126-135.
- Poff, N. L., Ward, J. V., 1989. *Implications of Streamflow Variability and Predictability for Iotic Community Structure: a Regional Analysis of Streamflow Patterns*. Canadian Journal of Aquatic Sciences, 46, s. 1805-1818.
- Prudhomme, C. et al., 2014. *Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment*. Proc. Natl. Acad. Sci. 111, 3262–3267. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222473110>
- Pyrce, R., 2004. *Hydrological low flow indices and their uses*. Watershed Science Centre, WSC Report 04-2004, Peterborough, Ontario, 33 s.
- Renner, M., Bernhofer, C., 2011. *Long term variability of the annual hydrological regime and sensitivity to temperature phase shifts in Saxony/Germany*. Hydrology and Earth System Sciences, 15 (6), s. 1819-1833.

Richter, B. D. et al., 1998. *A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network*. *Regulated Rivers: Research & Management*, 14, 4, s. 329–340.

Skála, V., 2017. *Hydrologické sucho v pramenných oblastech šumavských toků*. Diplomová práce, KFGG PřF UK, Praha, 77 s.

Tolasz, R. et al., 2007. *Atlas podnebí Česka*. Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého, 1. vydání, 256 s.

Trenberth, K. E. et al., 2014. *Global warming and changes in drought*. *Nat. Clim. Chang.* 4, 17–22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>

ÚHÚL, 1999. *Oblastní plán rozvoje lesů: Přírodní lesní oblast 01 Krušné hory*. Brandýs nad Labem, pobočka Plzeň, 635 s.

Van Loon, A. F. et al., 2016. *Drought in the Anthropocene*. *Nat. Geosci.* 9, 89–91. <https://doi.org/10.1038/ngeo2646>

Vlnas, R., 2015. *Pozorované změny složek hydrologické bilance z hlediska využitelných vodních zdrojů*. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 57(4–5), s. 27–32