

**Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Fyzická geografie a geoekologie



Mgr. Andrea Blahušíaková

Dopad regionálnej zmeny klímy na hydrologický režim s ohľadom na extrémne situácie
Impact of the regional climate change on the hydrological regime with regard to extremes

Disertační práce

Vedoucí práce/Školitel: RNDr. Milada Matoušková, Ph.D.

Praha, 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 31.5.2019

.....

Poďakovanie

Na tomto mieste by som chcela vyjadriť veľké poďakovanie vedúcej mojej dizertačnej práce RNDr. Miladě Matouškovej, Ph.D. za jej odborné vedenie, cenné pripomienky, postrehy, podporu, trpezlivosť, čas a priestor, ktorý mi venovala počas písania tejto práce, ale i počas celého štúdia. Ďakujem pracovníkom Slovenského Hydrometeorologického ústavu a Slovenského vodohospodárskeho podniku v Banskej Bystrici za poskytnutie potrebných údajov k napísaniu tejto práce i za odborné konzultácie; menovite RNDr. Jane Podolinskej, Mgr. Zore Snopkovej, Ph.D., Mgr. Kateřině Hruškovej, PhD., Ing. Petrovi Borsányimu a Alžbete Dobříkovej. Za pomoc, odborné konzultácie a inšpiráciu ďakujem RNDr. Michalovi Jeníčkovi, Ph.D., Mgr. Ondřejovi Ledvinkovi, Ph.D. a Prof. Jurajovi Parajkovi. Ďakujem tiež Mgr. Kataríne Demkovej, Ph.D., Mgr. Petrovi Midovi, Martinovi Cajthamlovi, Lukášovi Veverkovi a predovšetkým Martinovi Hlinkovi za pomoc pri tvorbe článkov. Moje poďakovanie patrí i sekretariátu KFGG za pomoc, ochotu a podporu. Na záver by som chcela svoju veľkú vďaku vyjadriť mojej rodine, priateľovi a kamarátom, ktorí ma od začiatku podporovali a dodávali mi energiu.

Abstrakt

V kontexte prebiehajúcich i budúcich klimatických zmien sa do popredia dostáva výskum zmien zrážkovo-odtokového režimu vodných tokov a jeho extrémnych prejavov. Hlavným cieľom práce je skúmať kľúčové faktory, ktoré sa na týchto zmenách podieľajú, a tým ovplyvňujú hydrologický režim vodného toku. Detekované sú trendy a zmeny hydroklimatických parametrov a hodnotený je vývoj extrémov povodní a sucha. Na identifikovanie trendov a skúmanie ich zmien je použitých niekoľko metód; Mann-Kendallov test, lineárna regresia, jednoduché súčtové čiary a komparatívna analýza (IHA). Extremita povodní je vyhodnotená na základe stupňov povodňovej aktivity a N-ročnosti, frekvencia a sezónnosť použitím threshold metódy a dňa kulminácie. Extremitu, frekvenciu a sezonalitu meteorologického sucha hodnotí threshold metóda, ďalej de Martonne Aridity index a Relative precipitation index. Hydrologické sucho je hodnotené na základe Base flow indexu, Low flow indexu a threshold metódy. Hlavnými parametrami, ktoré do týchto analýz vstupovali boli ročné, sezónne a mesačné hodnoty prietokov, teploty vzduchu, zrážok a snehovej pokrývky. Databáza základných i ďalších vypočítaných parametrov je zostavená pre obdobie 1931/1961-2010/2012. Trendy a zmeny hydroklimatických parametrov, ako i vývoj sucha a povodní sú skúmané v povodí horného Hrona v centrálnej časti Slovenska.

Výsledky poukazujú na regionálne zmeny v povodí horného Hrona. K zmene vo vývoji hydroklimatických parametrov došlo od 80. rokov 20. storočia. Zaznamenaný je pokles vodnosti horného Hrona. Celoročný odtok ovplyvňujú predovšetkým zmeny v zimno-jarnom období. Podiel na klesajúcom trende odtoku má rastúca teplota vzduchu, pokles snehovej pokrývky a sezónne zmeny zrážkových úhrnov. Klesajúci trend odtoku koreluje hlavne s poklesom maximálneho odtoku, s poklesom frekvencie a extremity povodňových udalostí, a so zvýšením početnosti suchých a mimoriadne suchých období. K výraznejším zmenám dochádza v povodiach v nižších a stredných nadmorských výškach. Trendová analýza potvrdila dôležitosť dĺžky zvolenej časovej rady na detekciu trendov.

Výsledky tejto práce pomôžu pochopiť nasledujúci vývoj zrážkovo-odtokového režimu horného Hrona, i ďalších vodných tokov s podobným režimom odtoku. Práca rozširuje výskumy týkajúce sa zmeny klímy v centrálnej Európe. Jej výsledky môžu pomôcť v interpretácii súčasných i budúcich extrémov, v modelovaní zrážkovo-odtokového režimu, v predikcii dopadov zmeny klímy pod vplyvom prebiehajúcich zmien a v tvorbe stratégií a opatrení na zmierňovanie ich dopadov.

Kľúčové slová: zmena klímy, trendová analýza, povodeň, sucho, zrážkovo-odtokový režim, povodie horného Hrona

Abstract

Investigation of changes in the rainfall-runoff regimes of rivers and its extremes has become more important especially in the context of ongoing and future climate changes. The main aim of this study is to investigate the key factors involved in these changes and thus influence the hydrological regime. Trends and changes in climatic and hydrological variables are detected and the development of flood and drought extremes is assessed. Several methods are used to identify trends and examine their changes; the Mann-Kendall test, linear regression, simple mass curves, and comparative analysis (IHA). Flood extremity is evaluated based on flood activity levels and return period (N-year flood event), frequency and seasonality using the threshold method and culmination day. Extremity, frequency and seasonality of meteorological drought are evaluated by the threshold method, followed by de Martonne Aridity index and Relative precipitation index. Hydrological drought is evaluated based on Base flow index, Low flow index and threshold method. The main variables involved in these analyzes were annual, seasonal and monthly discharge, air temperature, precipitation and snow cover. The database of the base and other calculated variables is compiled for the period from 1931/1961 to 2010/2012. Trends and changes in climatic and hydrological variables, as well as the development of drought and floods, are investigated in the upper Hron catchment in Central Slovakia.

The results point to regional changes in the upper Hron catchment. The 1980s are considered a turning point in the development of all climatic and hydrological variables. A decrease in runoff was detected in the upper Hron. Changes in the winter-spring season affected the annual runoff. Increasing air temperature, a decrease in snow cover and seasonal changes in precipitation totals contribute to the declining runoff trend. The decreasing trend of runoff correlates mainly with the decrease in the maximum flow, with the decrease in the frequency and extremity of flood events, and with the increase in the number of dry and extremely dry periods. Significant changes occur at lower and middle elevations in the study catchment. The number of trends varies depending on observation length which trend analysis confirmed.

The results of this study can help to understand the following development of rainfall-runoff regime of the upper Hron, as well as other catchments with a similar runoff regime. The study extend research on climate change in the Central Europe and can help in the interpretation of current and future extremes, in the rainfall-runoff modelling, in the prediction of the impact of climate change influenced by ongoing changes and in the development of strategies and measures to mitigate the impact of hydroclimatic extremes.

Key words: climate change, trend analysis, flood, drought, rainfall-runoff regime, upper Hron

Obsah

1 ÚVOD	8
2 CIELE A ŠTRUKTÚRA PRÁCE	9
3 REŠERŠ DOTERAJŠÍCH VÝSKUMOV	11
3.1 Trendy zrážkovo – odtokového režimu	11
3.1.1 Trendy vo vývoji ročnej, sezónnej a mesačnej teploty vzduchu	11
3.1.2 Trendy vo vývoji ročných, sezónnych a mesačných zrážkových úhrnov	13
3.1.3 Trendy vo vývoji sezónnej a mesačnej snehovej pokrývky	14
3.1.4 Trendy vo vývoji ročného, sezónneho a mesačného odtoku	15
3.2 Hodnotenie extrému povodní a maximálneho odtoku	17
3.2.1 Vybrané prístupy hodnotenia povodní.....	17
3.2.2 Vývoj povodní a maximálneho odtoku.....	18
3.3 Hodnotenie extrému sucha a minimálneho odtoku	20
3.3.1 Vybrané prístupy hodnotenia sucha	20
3.3.2 Vývoj sucha a minimálneho odtoku	21
4 ZÁUJMOVÉ POVODIE.....	25
5 ZDROJOVÉ DÁTA A METODICKÝ POSTUP	30
5.1 Zdrojové dáta	30
5.2 Metodický postup.....	31
6 SYNTÉZA A DISKUSIA VÝSLEDKOV	35
6.1 Trendy zrážkovo – odtokového režimu vybraných hydroklimatických parametrov	35
6.1.1 Trendy vo vývoji ročnej, sezónnej a mesačnej teploty vzduchu	35
6.1.2 Trendy vo vývoji ročných, sezónnych a mesačných zrážkových úhrnov a snehu.....	36
6.1.3 Trendy vo vývoji ročného, sezónneho a mesačného odtoku	40
6.2 Hodnotenie extrému povodní a maximálneho odtoku.....	42
6.3 Hodnotenie extrému sucha a minimálneho odtoku	48
7 ZÁVER	53
Zoznam tabuliek	53
Zoznam obrázkov	54
Zoznam literatúry	55
8 PRÍLOHA - ČLÁNKY SUMARIZUJÚCE HLAVNÉ VÝSLEDKY PRÁCE.....	64
Príloha 8.1 Rainfall and runoff regime trends in mountain catchments (Case study area: the upper Hron River basin, Slovakia)	

Príloha 8.2 Evaluation of the hydroclimatic extremes in the upper Hron River basin, Slovakia

Príloha 8.3 Analýza povodní na hornom toku Hrona v rokoch 1930 – 2010

Príloha 8.4 Hydrological drought occurrence and drought types regarding to changes in snow cover in selected mountain catchments in Central Europe

1 ÚVOD

Klimatická zmena a výskyt rôznych extrémnych prejavov počasia, vedie mnohých odborníkov k tomu, aby detailnejšie skúmali mechanizmy týchto prebiehajúcich zmien a ich možných dopadov. K pochopeniu častejšieho výskytu extrémov a ich zmien, by malo viesť skúmanie minulosti, ktoré dokáže odhaliť, či a aký vplyv má predpokladaná zmena klímy na hydrologický režim vodných tokov (Nováky a Bálint, 2013). Toto je dôvodom rastúceho počtu výskumov, ktoré hodnotia vývoj klimatických a hydrologických charakteristík. Príkladom môžu byť výskumy z oblasti Českej republiky (Kliment et al., 2011; Langhammer et al., 2015), v ktorých autori skúmali dlhodobé zmeny klimatických a hydrologických parametrov a ich dopady na zmeny v hydrologickom režime českých tokov v horských oblastiach. Dôležitým aspektom riešenia tejto problematiky, by malo byť vzájomné prepojenie klimatických a hydrologických analýz. V mnohých prácach však tento aspekt chýba, čo neumožňuje sledovať vzájomné dopady klímy na hydrologický režim. Medzi práce, ktoré sa zaoberajú výskumom zmien klimatických podmienok na Slovensku, možno zaradiť prácu Labudovej et al. (2015), v ktorej poukazujú na posuny klimatických regiónov v rámci Slovenska. Sledovaný bol posun teplého klimatického regiónu z juhu na sever. Táto zmena zasahuje i povodie horného Hrona, hlavne jeho južné oblasti a zaznamenaný tu bol i výskyt nového klimatického sub-regiónu (teplý a vlhký, s chladnou zimou). Na druhej strane, priestorovým hodnotením vodnosti slovenských tokov sa zaoberali Poórová et al. (2013a). Vodné toky na Slovensku rozdelili podľa vývoja priemernej vodnosti, pričom povodie horného Hrona patrí do skupiny s klesajúcim až výrazne klesajúcim trendom vodnosti. Na tomto mieste by sa dalo tvrdiť, že pokles vodnosti horného Hrona je spôsobený posunom klimatických zón na Slovensku. Do akej miery je však možné prepojiť výsledky týchto štúdií, by muselo byť podrobené detailnejšej analýze. Cieľom tejto práce je práve doplniť takéto výskumy, a to so vzájomným prepojením klimatických a hydrologických analýz.

So zmenami zrážkovo-odtokového režimu súvisí výskyt hydroklimatických extrémov. Pre väčšinu oblastí centrálnej Európy je na jednej strane predpokladaný rast povodní, a to predovšetkým v súvislosti s extrémnymi zrážkovými situáciami. Na strane druhej, pod vplyvom rastúcej teploty a nedostatku zrážok, by malo rásť riziko výskytu sucha (IPCC, 2014). Podobne ako trendy vývoja klimatických a hydrologických charakteristík, i vývoj extrémov (napr. ich zvyšujúcu sa frekvenciu a intenzitu), je možné odhaliť štatistickým skúmaním určujúcich parametrov za dostatočne dlhé časové obdobie (Lapin, 2013). Takýto výskum riešili napríklad na juhu Slovenska v povodí Dunaja Blaškovičová et al. (2014), kde pozorovali rastúci trend maximálneho odtoku. Naopak Jeneiová et al. (2014) zaznamenali na povodiach východného a centrálneho Slovenska jeho klesajúci trend. Regionálne rozdiely sa prejavujú i vo vývoji minimálneho odtoku. Poórová et al. (2013b) zistili, že najpriaznivejšie podmienky v jeho vývoji sú v horných povodiach riek (napr. Váh, Hron a Slaná) a nepriaznivé v ich dolných povodiach na juhu Slovenska. Tieto výskumy sú dôkazom toho, že vývoj odtoku na Slovensku sa regionálne líši. Je možné predpokladať, že v prebiehajúcich zmenách môže dochádzať k preskupeniu tohto vývoja i do horných úsekov riek tzn. i do povodia horného Hrona.

2 CIELE A ŠTRUKTÚRA PRÁCE

Sledovanie zmien zrážkovo-odtokového režimu, hydroklimatických extrémov a nárast ich frekvencie a extremity, je v súčasnosti v strede záujmu veľkej časti odborníkov naprieč viacerými sférami ľudského života. Práve aktuálnosť a dôležitosť riešenia zmien zrážkovo-odtokového režimu a hydroklimatických extrémov viedla k napísaniu tejto práce. Jej hlavným cieľom je skúmať kľúčové faktory, ktoré sa podieľajú na týchto zmenách a ovplyvňujú hydrologický režim vodného toku. K naplneniu tohto cieľa viedlo niekoľko postupných krokov, ktorých cieľom bolo; 1) zhrnúť doterajšie poznatky o zmene klímy a jej možnom dopade na hydrologický režim, 2) zhodnotiť doterajší vývoj hydroklimatických parametrov, 3) zhodnotiť doterajší vývoj extrému povodní a 4) zhodnotiť doterajší vývoj extrému sucha. Výstupom je syntéza toho k akým veľkým zmenám doposiaľ došlo, aký je časový priebeh týchto zmien, ktoré faktory tieto zmeny vyvolali. Výsledky pomôžu pochopiť ich nasledujúci vývoj, čo je veľmi prínosné pri plánovaní opatrení na zmiernenie dopadov na jednotlivé sféry ľudského života.

Krok č. 1 si dal za cieľ preskúmať zmeny hydroklimatických režimov vodných tokov v oblasti centrálnej Európy a centrálneho Slovenska, ktoré ležia na hranici medzi suchým juhom a vlhkým severom. Zistené poznatky umožnia vytvoriť ucelenejší pohľad na dopady zmeny klímy v tomto regióne, a tiež umožnia zoskupiť oblasti s podobným vývojom. Na tieto oblasti bude prípadne možné aplikovať rovnaké opatrenia na zmiernenie dopadov zmeny klímy.

Krok č. 2 si dal za cieľ detekovať trendy a zmeny hydroklimatických parametrov pomocou dostupných a overených metód. K tomu poslúžilo vytvorenie dostatočne dlhej a kvalitnej databázy klimatických a hydrologických parametrov. K lepšiemu pochopeniu zmien režimu vodného toku a k objasneniu ich príčin viedlo vzájomné prepojenie výsledkov klimatických a hydrologických analýz. Snahou bolo zároveň porovnanie prebiehajúcich zmien s predpoveďami, ktoré nám dávajú výstupy klimatických modelov.

Krok č. 3 si dal za cieľ zhodnotiť vývoj extrému povodní a maximálneho odtoku. Skúmané boli trendy ich vývoja. Hodnotenie vychádzalo z databázy povodní vytvorenej z obdobia prístrojových meraní v záujmovom povodí. Určené boli príčiny vybraných povodní. Na základe viacerých metodických prístupov bola sledovaná ich frekvencia, extremita a sezónnosť.

Krok č. 4 si dal za cieľ zhodnotiť vývoj extrému sucha a minimálneho odtoku. Skúmané boli trendy ich vývoja. Sucho bolo hodnotené na základe viacerých metód s prepojením meteorologického a hydrologického sucha. Skúmané boli jeho príčiny, frekvencia, extremita a sezónnosť.

Cieľom posledného kroku bolo prepojenie a syntéza výsledkov a snaha o ich zasadenie do regiónu centrálnej Európy.

Dizertačná práca je zostavená ako súbor článkov, ktorých prehľad je uvedený v **Tab. 1**. Po uvedení doterajších výskumov dopadov zmeny klímy na hydrologický režim v kapitole 3 nasleduje predstavenie záujmového povodia (kapitola 4) a popis použitých dát a metodického postupu práce (kapitola 5). Kapitola 6 a 7 obsahuje syntézu výsledkov práce, diskusiu a záver. Samotné články sú zaradené na koniec práce (kapitola 8).

Tab. 1 Prehľad autorských článkov

Príloha	Názov článku	Databáza	Podiel (%)
8.1	Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2015. Rainfall and runoff regime trends in mountain catchments (Case study area: the upper Hron River basin, Slovakia). <i>J. Hydrol. Hydromech.</i> , 63, 3, 183–192. DOI:10.1515/johh-2015-0030.	WoS IF	60
8.2	Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2016. Evaluation of the hydroclimatic extremes in the upper Hron River basin, Slovakia. <i>AUC Geographica</i> , 51, 2, 189–204. DOI:10.14712/23361980.2016.16.	Scopus	70
8.3	Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2012. Analýza povodní na hornom toku Hrona v rokoch 1930 – 2010. <i>Geografie</i> , 117, 4, 415–433.	WoS IF	80
8.4	Blahušiaková, A., Matoušková, M., Jeníček, M., Ledvinka, O., Kliment, Z., Podolinská, J., Snopková, Z., (odoslaný). Hydrological drought occurrence and drought types regarding to changes in snow cover in selected mountain catchments in Central Europe. <i>Hydrological Sciences Journal</i> .	WoS IF	60

3 REŠEŘ DOTERAJŠÍCH VÝSKUMOV

Kapitola podáva prehľad doterajších poznatkov o zmene klímy a jej dopade na hydrologický režim vodných tokov. Štúdie sú zamerané predovšetkým na oblasť centrálnej Európy, Slovenska a Českej republiky. Obsahuje práce hodnotiace trendy hydroklimatických parametrov ale tiež výskumy, ktoré riešia povodňovú problematiku a sucho.

3.1 Trendy zrážkovo – odtokového režimu

Význam sledovania zmien zrážkovo-odtokového režimu vodných tokov rastie v súvislosti s regionálnou zmenou klímy. Tieto prejavy čoraz častejšie negatívne ovplyvňujú viaceré oblasti Európy vrátane Slovenska. Odborníci sa snažia pochopiť tieto zmeny a ich dopady na základe dvoch prístupov; 1) analýzou hydrologického režimu na základe meraných údajov z inštrumentálneho obdobia a proxy údajov, 2) modelovaním očakávaných zmien hydrologického režimu založenom na vzťahu medzi klimatickými a hydrologickými parametrami zahrňujúce prípravu klimatických scenárov. Základným cieľom oboch prístupov je zistiť, ako sa hydrologický režim chová resp. bude chovať pod vplyvom regionálnych zmien klímy.

3.1.1 Trendy vo vývoji ročnej, sezónnej a mesačnej teploty vzduchu

Teplota vzduchu v Európe vplyvom globálneho otepľovania signifikantne rastie. Výrazné otepľovanie je pozorované i v horských oblastiach centrálnej Európy. V priebehu 20. storočia stúpila priemerná ročná teplota vzduchu v alpskom regióne o cca 1.2°C (Auer et al., 2007), v horských oblastiach Českej republiky o 0.3 až 0.5°C (Kliment et al., 2011) a Slovenska o cca 1°C (Labudová et al., 2015). Celkový nárast priemernej ročnej teploty vzduchu v Európe je väčší v porovnaní s rastom tej globálnej. Ako porovnanie možno uviesť hodnoty za desaťročie 2006-2015, kedy došlo v Európe k zvýšeniu teploty o cca 1.5°C v porovnaní s rastom globálnej teploty o cca 0.9°C (EEA, 2017). I predpovede do budúcnosti predpokladajú rýchlejšie otepľovanie v Európe v porovnaní s globálom. Do konca 21. storočia (2071-2100) je v Európe predpoklad rastu teploty podľa scenára RCP4.5 v rozmedzí 1 až 4.5°C a podľa RCP8.5 od 2.5 do 5.5°C (referenčné obdobie 1971-2000), EEA, (2017). Globálna teplota by mala do polovice 21. storočia rásť medzi 1 (RCP2.6) a 2°C (RCP8.5) a do konca 21. storočia medzi 1 (RCP2.6) a 3.7°C (RCP8.5), referenčné obdobie 1986–2005. Tieto predpovede vychádzajú zo simulácií veľkého počtu modelov, ktorých výsledky zobrazuje **Tab. 2**. Rast teploty na Slovensku je porovnateľný s európskymi predikciami. Klimatické modely indikujú jej rast o 2 až 4°C do roku 2075 (Lapin et al., 2012).

Rozdiely zvyšovania teploty vzduchu možno sledovať v jednotlivých sezónach roka. Ako uvádzajú Luterbacher et al. (2016), letné teploty v Európe sú v posledných desaťročiach najteplejšie za uplynulých 2000 rokov. Práve v lete sa Európa ohrieva najviac (EEA, 2017). Podľa Scherrera et al. (2006), je takýto trend typický pre viac ako 90 % územia kontinentálnej Európy. Potvrdzujú to i výskumy z Českej republiky a Slovenska, kde bolo najväčšie otepľovanie pozorované práve v teplom polroku, predovšetkým od apríla do augusta (Brázdil et al., 2009a; Kliment et al., 2011; Labudová et al., 2015; Matějka, 2017). V chladnom

polroku teplota rastie najviac v zime v decembri a januári (Kliment et al., 2008; Brázdil et al., 2009a). Zaujímavé zmeny nastávajú i na jar. V poslednom období sa totiž vlny horúčav (počty dní s $T_{\max} > 25$ a 30°C) objavujú už na konci apríla (Výberči et al., 2015) a v máji (Labudová et al., 2015). Odhaduje sa, že krajiny centrálnej Európy môžu zažiť rovnaký počet tropických dní ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) aké sa v súčasnosti vyskytujú v južnej Európe (Beniston et al., 2007). Zatiaľ k najmenšiemu rastu teploty dochádza na jeseň (EEA, 2017).

Tab. 2 Predpokladaná zmena ročnej globálnej priemernej teploty vzduchu ($^{\circ}\text{C}$) do polovice a konca 21. storočia v porovnaní s obdobím 1986–2005; čísla v zátvorkách určujú rozsah teplôt podľa použitých modelov

Obdobie	RCP2.6 (32 modelov)	RCP4.5 (42 modelov)	RCP6.0 (20 modelov)	RCP8.5 (39 modelov)
2046-2065	1.0 (0.4 – 1.6)	1.4 (0.9 – 2.0)	1.3 (0.8 – 1.8)	2.0 (1.4 – 2.6)
2081-2100	1.0 (0.3 – 1.7)	1,8 (1.1 – 2.6)	2.2 (1.4 – 3.1)	3.7 (2.6 – 4.8)

pozn. RCP (Representative Concentration Pathways) - Reprezentatívne smery vývoja koncentrácií skleníkových plynov sú označené podľa približného celkového radiačného pôsobenia v roku 2100 v porovnaní s rokom 1750: $2.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ v scenári RCP2.6; $4,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ v RCP4.5; $6,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ v RCP6.0 a $8.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ v RCP8.5 (Zdroj: IPCC, 2014)

Pre územie Slovenska je predpokladaný rast teploty vo všetkých sezónach roka (Lapin et al., 2012; Rončák et al., 2016). Do r. 2025 by mala výraznejšie rásť teplota v marci a októbri, do r. 2055 vo februári, júni a októbri a do r. 2085 v júni až auguste a v decembri. Predpokladané hodnoty rastu teploty i v ostatných mesiacoch znázorňuje **Tab. 3**. Tieto rastúce trendy teploty ovplyvňujú charakter a zmeny klimatických zón. Takéto zmeny už zaznamenali na Slovensku Labudová et al. (2015). Podľa ich výsledkov sa napríklad pôvodne chladná klimatická oblasť v povodí horného Hrona zmenila vplyvom rastúcej teploty na mierne teplú oblasť. Posúvanie klimatických zón smerom z juhu na sever na Slovensku predpokladajú i modely Lapina et al. (2012). Podobne by tomu malo byť i v celej Európe, kde je do konca 21. storočia predpokladaný ich posun z juhu na sever i o 400-500 km (Beniston et al., 2007). Takéto výrazné zmeny v charaktere klimatických podmienok jednotlivých regiónov budú ovplyvňovať vývoj hydrologických režimov európskych vodných tokov.

Tab. 3 Dlhodobé priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu a zrážok v referenčnom období 1981-2010 a ich zmeny pre budúce časové horizonty v povodí Hrona

temperature [$^{\circ}\text{C}$]		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Hron	1981 - 2010	-4.1	-3.1	0.5	5.9	11.1	14.0	16.0	15.4	11.0	6.4	1.1	-3.1	
	KNMI	2025	0.0	0.8	1.0	0.4	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.6	0.5	0.1
		2055	1.3	2.6	1.4	1.0	1.6	2.0	1.9	1.9	1.5	2.0	1.5	1.8
		2085	2.8	2.8	2.3	1.7	2.7	3.5	3.7	3.3	2.4	3.0	3.1	3.4
	MPI	2025	0.1	0.8	0.4	0.1	0.6	0.7	0.6	1.0	0.9	1.5	0.9	0.3
		2055	1.9	2.9	1.3	0.7	1.3	1.3	1.5	2.2	1.7	1.9	1.9	1.6
2085		3.3	3.4	2.0	1.4	2.1	2.9	2.8	3.5	3.2	3.2	3.3	3.4	
precipitation [mm]		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Hron	1981 - 2010	48.2	45.1	53.6	56.1	94.0	101.3	93.7	82.2	66.0	59.3	67.3	62.6	
	KNMI	2025	-3.1	3.4	0.4	-4.2	-9.2	0.8	-11.4	3.9	34.3	-2.1	4.2	20.4
		2055	5.2	8.8	11.7	16.4	-0.6	-15.7	-9.5	2.9	19.4	8.5	2.5	19.9
		2085	14.1	21.8	24.9	10.3	-19.9	-32.9	-22.1	-3.1	37.7	14.6	6.8	24.1
	MPI	2025	-0.7	8.8	3.4	-3.6	-8.4	19.7	9.5	-3.3	25.1	-3.9	8.5	13.1
		2055	7.8	6.8	16.7	21.8	-10.5	7.8	-3.7	-8.3	16.4	7.8	1.6	17.1
2085		15.5	18.1	26.2	18.3	-14.7	0.1	-10.1	-3.8	30.3	18.6	13.9	14.8	

Zdroj: Rončák et al., 2016

3.1.2 Trendy vo vývoji ročných, sezónnych a mesačných zrážkových úhrnov

Charakter klimatických zón v Európe a ich zmeny ovplyvňuje rastúca teplota vzduchu. Tá má následne vplyv na vývoj zrážkových úhrnov, ich množstvo, skupenstvo i výpar. Zvyšujúce sa úhrny zrážok na západe (Z) a severe (S) Európy, a naopak klesajúce na východe (V) a juhu (J) zaznamenali od začiatku 19. storočia Kožuchowski a Marciniak (in Střeščík, 2000). V centrálnej Európe pozorovali mierny pokles. Tento výskum z obdobia 90. rokov potvrdzujú i novšie výsledky (EEA, 2017) s 10 až 40%-ným rastom na S a 20%-ným poklesom na J v priebehu 20. storočia. Centrálna Európa je prechodovou zónou medzi ich rastom a poklesom (Szolgay et al., 2008). Ich vývoj ovplyvňuje zemepisná poloha, ale i nadmorská výška. Príkladom je štúdia Bernsteinovej et al. (2015), v ktorej boli hodnotené ročné zrážkové úhrny od konca 70. rokov na českej i nemeckej strane Šumavy, pričom rastúce trendy boli sledované predovšetkým na severnejšie položených staniách a staniách vo vyšších nadmorských výškach (prevažne na českej strane Šumavy). Na nemeckej strane boli naopak pozorované mierne klesajúce trendy alebo žiadne zmeny. Podobný vývoj je očakávaný na Slovensku. Do konca 21. storočia by mal byť väčší ich rast na S a v horských oblastiach a menší na J (Mindáš et al., 2011; Gera et al., 2017). Kým staršie výskumy na Slovensku nepozorovali významné trendy vo vývoji zrážok v horských oblastiach zahrňujúce horný Hron (Faško a Šťastný, 2001), v novších výskumoch sú zaznamenané od začiatku 80. rokov ich mierne rastúce trendy práve najviac v severnejších a horských oblastiach (Zeleňáková et al., 2017). Obecný vývoj zrážok na Slovensku by sa mal do roku 2075 pohybovať v rozmedzí -15% a 10% (Szolgay et al., 2008).

Väčšie zmeny v rozložení zrážok by mali nastať v jednotlivých sezónach roka, kde sa ich slabý pokles očakáva v lete predovšetkým na J a vo zvyšnej časti roka by mali mierne rásť predovšetkým v zime a na S Slovenska (Mindáš et al., 2011). Rastúce trendy v zimnej sezóne sú od 80. resp. 90. rokov sledované Labudovou et al. (2015), pričom nie sú tak významné, ako napríklad pri teplote, ktorá významne ovplyvňuje v tejto sezóne ich skupenstvo. Toto potvrdzujú Pecho et al. (2009) v súvislosti s častejším výskytom zmiešaných a kvapalých zrážok v zimných sezónach po r. 1991. Zeleňáková et al. (2017) zaznamenali najviac významných zrážkových trendov hlavne v januári a decembri, tiež vo februári. Priestorové rozloženie týchto trendov je zaujímavé v decembri, hlavne vzhľadom na vývoj v horských oblastiach centrálneho a S Slovenska. V tomto mesiaci sa totiž najviac významných rastúcich trendov objavilo na J a JV a klesajúce na S. Autori pri tomto zistení upozorňujú v týchto oblastiach na potenciálny problém v jarnej sezóne a to v súvislosti s negatívnym vývojom odtoku a zásob podzemných vôd, čo naznačujú i zistené klesajúce trendy na jar v apríli a v máji. Vývoj v tomto smere sa stotožňuje s výsledkami modelovania zrážok v povodí horného Hrona, kde sú okrem poklesu letných zrážok predpovedané práve poklesy v jarných mesiacoch (Rončák et al., 2016, Tab. 3). Následne bol v júni a hlavne v júli zaznamenaný rastúci trend a v auguste znova klesajúci. Na jeseň sa významné trendy neobjavujú. Ako uvádzajú Zeleňáková et al. (2017) tieto zistenia naznačujú na jednej strane predĺženie suchých epizód do jarnej sezóny a na druhej častejší výskyt povodní v horských oblastiach v letnej sezóne. Častejší výskyt povodní je predpokladaný i pre zimné obdobie v súvislosti s očakávaným teplejším počasím v tomto období, ktoré spôsobí, že až do výšky 900 m n.m. bude snehová pokrývka nepravidelná. Tá bude zrejme vyššia iba vo výške nad 1200 m n.m. Keďže tieto polohy zaberajú na Slovensku menej ako 5 % rozlohy, podstatne to odtokové pomery na Slovensku pozitívne neovplyvní (Mindáš et al., 2011).

3.1.3 Trendy vo vývoji sezónnej a mesačnej snehovej pokrývky

Na vývoj snehovej pokrývky má vplyv rastúca teplota (Beniston, 2003; Lapin et al., 2007) a tiež nadmorská výška (Lapin a Gera, 2017). Beniston konštatuje, že s každým zvýšením teploty o cca 1°C sa hranica snežnej čiary zvyšuje o cca 150 metrov. Vojtek et al. (2003) popisujú, že existuje kritická nadmorská výška, kde sa vyvíjajú buď negatívne alebo pozitívne trendy vo vývoji snehovej pokrývky. Vysoké nadmorské výšky (nad 1800 m severné svahy a nad 2300 m južné svahy) vykazujú len nepatrné alebo žiadne zmeny, zatiaľ čo v stredných polohách (1000 - 1500 m), kde majú prevahu zmiešané a kvapalné zrážky dochádza k výraznejším klesajúcim trendom. K podobným záverom dospel Pecho et al. (2009) alebo v Alpách Pellicciotti et al. (2010). Toto poukazuje na dôležitosť skúmania zmien snehovej pokrývky predovšetkých v týchto nadmorských výškach, pretože tieto zmeny môžu ovplyvniť načasovanie jarného odtoku alebo posunutie začiatku zimnej sezóny (Huntington et al., 2004). Potvrďuje to napríklad výskum Langhammera et al. (2015) v Českej republike, konkrétne v oblasti Šumavy, ktorá reprezentuje tieto nadmorské výšky. Ich výskum zmien klimatických a hydrologických parametrov sledovaný od 80. rokov poukazuje na to, že k akumulácii snehovej pokrývky dochádza neskôr a naopak k jej topeniu skôr. Toto sa prejavuje i na poklese výšky snehovej pokrývky a počtu dní so snehom. Zmeny zaznamenali i v skupenstve zimných zrážok, ktorých tuhá zložka signifikantne klesá. Pokles počtu dní so snehom bol sledovaný v ďalších českých pramenných oblastiach Klimentom et al. (2008). Na väčšine územia Slovenska pozorovali pokles tuhej zložky zrážok na ich celkovom úhrne Faško et al. (2018). S jej poklesom rovnako klesá výška snehovej pokrývky a počet dní so snehom, ktorý je signifikantný hlavne v marci. Podobne ich pokles počas jari ale i v zime zaznamenali Brázdil et al. (2009a). K skráteniu trvania snehovej pokrývky i k poklesu simulovanej vodnej hodnoty snehu došlo od 60. rokov i povodí horného Hrona a to vo všetkých mesiacoch chladného polroka (november až apríl). Signifikantný pokles bol zaznamenaný v decembri, januári a februári vo vyšších nadmorských výškach (Hlavčová et al., 2015). Rovnaký trend bol sledovaný Juričekovou et al. (2013) a Kotríkovou et al. (2014).

Na skrátenie trvania snehovej pokrývky a jej nerovnomerné rozloženie počas zimnej sezóny vplyvom prebiehajúcich klimatických zmien upozorňujú Faško et al. (2018). Z ich výskumov vyplýva, že v polovici októbra môže z jednej zrážkovej udalosti spadnúť viac snehu ako počas celej nasledujúcej zimnej sezóny. Taktiež dodávajú, že teplejšie zimné obdobia spôsobili väčšiu variabilitu zimných sezón, keď po výrazne chudobnej zime na sneh nastáva zima s jej bohatými zásobami. Počas takýchto teplejších zím stúpa i riziko vzniku povodní na čo v povodí horného Hrona upozorňujú Hlavčová et al. (2015). Toto riziko spájajú s rastom teploty a zmenami zrážkových úhrnov v posledných dekádach. Zmeny týchto parametrov ovplyvňujú posun konca trvania snehovej pokrývky do zimných mesiacov i jej nárazové a rýchle topenie, čo hladiny vodných tokov zvyšuje. Podobný posun udalostí s vysokým prietokom z konca jari na jej začiatok zaznamenali na Šumave Langhammer et al. (2015).

I napriek tomu, že v centrálnej Európe je predpokladaný rast zimných zrážok počet dní so snehom sa bude znižovať rovnako ako trvanie snehovej pokrývky a jej celkové množstvo (EEA, 2017). Scenáre vývoja snehovej pokrývky pre územie Slovenska do r. 2100 (Lapin a Gera, 2017) sa zhodujú s predpoveďami pre oblasť centrálnej Európy. K výrazným zmenám by malo dochádzať hlavne v nižších nadmorských výškach (pod 800 m), ktoré zaberajú najväčšiu časť územia Slovenska. V stredných polohách (nad 1000 m), ktoré zaberajú 5.4 % územia by nemalo dochádzať k zmenám. Rast akumulácie snehu je očakávaný len vo vyšších polohách (nad 1200 m, 4 % rozlohy), kde by mali hodnoty snehovej pokrývky z dôvodu

zvýšených úhrnov zimných zrážok rásť. Tieto predikcie naznačujú, že 90 % územia Slovenska sa bude v budúcnosti potýkať s nedostatkom snehových zrážok v chladnom polroku, čo sa nepochybne prejaví na vývoji vodnosti celého územia Slovenska.

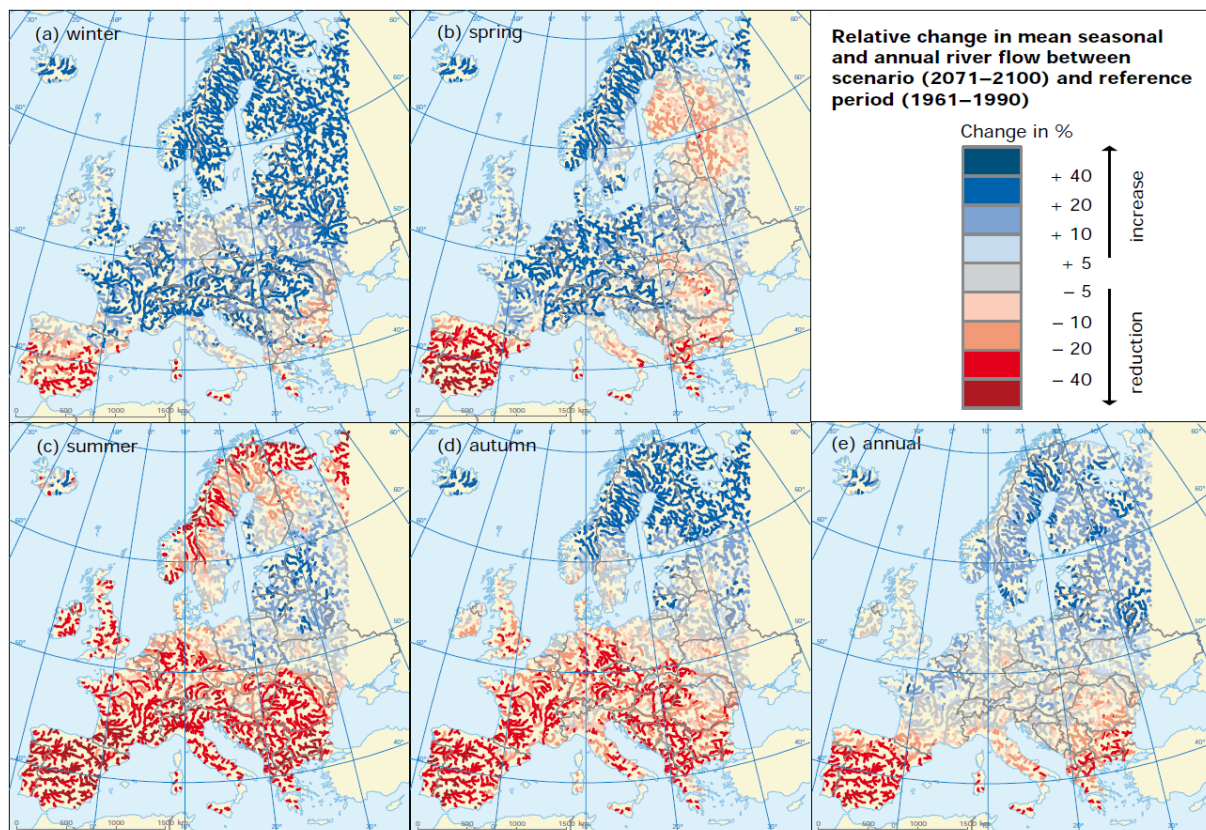
3.1.4 Trendy vo vývoji ročného, sezónneho a mesačného odtoku

Predchádzajúce štúdie naznačujú, že prebiehajúce zmeny klimatických parametrov by mohli mať dopad na celkový vývoj odtoku. Toto ukazuje práca [Klimenta a Matouškovvej \(2009\)](#) na príklade vývoja odtoku na Šumave. Okrem súčasných klimatických zmien, majú na trendy odtoku vplyv i modifikácia riečnej siete a zmeny krajinného pokryvu ([Královec et al., 2016](#)). [Berghuijs et al. \(2014\)](#) i [Dierauer et al. \(2018\)](#) poukazujú na to, že množstvo zrážok a ich skupenstvo je jedným z determinujúcich faktorov ovplyvňujúcich odtok. Koreláciu odtoku s vývojom zrážok ako ho prezentovali napríklad [Kożuchowski a Marciniak \(in Střeštík, 2000\)](#) a výskum [EEA \(2017\)](#) potrhujú výsledky [Stahla et al. \(2010\)](#). Títo autori pozorovali negatívne trendy ročného odtoku v J a V Európe a pozitívne v ostatných častiach Európy, čo súhlasí s pozorovanými zrážkovými úhrnmi. Vývoj odtoku naznačuje, že centrálna Európa je prechodovou zónou medzi jeho rastom a poklesom, čo opäť koreluje s vývojom zrážok ([Szolgay et al., 2008](#)). V Českej republike boli sledované klesajúce i rastúce trendy ročného odtoku ([Fiala et al., 2008](#); [Bernsteinová et al., 2015](#)). Naopak na Slovensku je sledovaný jeho celkový pokles ([Majerčáková et al., 2004](#); [Šipikalová et al., 2006](#); [Mindáš et al., 2011](#)). Najmenší bol zaznamenaný na S Slovenska (13%) a viac badateľný na povodiach centrálného a J Slovenska (medzi 16% a 24%). Väčší pokles v regióne centrálného Slovenska potvrdzujú [Poórová et al. \(2013a\)](#) na hornom Hrone, ktorý charakterizovali ako povodie s klesajúcim až výrazne klesajúcim trendom odtoku. Tento trend by mal na Slovensku pokračovať s tým, že má dochádzať nielen k poklesu celkového odtoku, ale i k zmenám v jeho sezónnej distribúcii. Najviac senzitivne by malo byť J Slovensko a nížiny, čo predikujú nielen modely pre územie Slovenska ([Daníhlík et al., 2004](#); [Pekárová a Szolgay, 2005](#); [Szolgay et al., 2008](#)) ale potvrdzujú to i modely zostavené pre celý európsky región ([EEA, 2008](#)). Poukazuje na to **Obr. 1**, písmeno e, kde práve na územie J Slovenska zasahuje oranžová farba znamenajúca pokles.

Ucelený pohľad na zmeny v sezónnej distribúcii odtoku v európskych krajinách (441 povodí v 15 krajinách) podáva štúdia [Stahla et al. \(2010\)](#). Obecne na týchto povodiach v období 1962-2004 zaznamenali pozitívne trendy odtoku v zimných mesiacoch a negatívne sa začínali objavovať na jar a hlavne v lete. Tieto výsledky sú v súlade s očakávanými hydrologickými odozvami z budúcich klimatických zmien, ako predpokladajú pre Európu klimatické modely do konca 21. storočia. Ich výsledky sú znázornené na **Obr. 1**, písmeno a-d. Modely predikujú rast zimného odtoku v celej Európe až na oblasť Stredomoria. K menšiemu rastu by malo dochádzať napríklad na Z a V Českej republiky. Trend sa mení počas jari hlavne pre oblasť V Európy, pričom pokles odtoku by malo zasiahnuť i veľkú časť Slovenska. Najextrémnejšie predpovede sú v letnej sezóne, kedy má pokles odtoku zasiahnuť i S Európy. Extrémnejšie prejavy poklesu sú predikované v Českej republike na SZ a na Slovensku na JZ. Počas jesene by mal pokles odtoku v centrálnej Európe pokračovať.

Štúdie, ktoré hodnotili zmeny sezónneho odtoku v Českej republike ([Fiala, 2008](#); [Kulasová et al., 2008](#) a [Kliment et al., 2011](#)) zaznamenali stúpajúci odtok v zimných mesiacoch a začiatkom jari (február a hlavne marec) a prejavujúci sa pokles odtoku koncom jari a predovšetkým v lete (máj až august). Z dôvodu rastúcej teploty a jej negatívnym vplyvom na vývoj snehovej pokrývky v priebehu jari je napríklad na Šumave sledovaný posun

výraznejšieho letného odtoku do jari (Laghammer et al., 2015). Keďže vývoj odtoku na Slovensku je menej priaznivý, sú na viacerých povodiach zaznamenané jeho klesajúce trendy v oboch sezónach roka. Výraznejší klesajúci trend v chladnom polroku (november až apríl) a miernejší v teplom polroku (máj až október) zaznamenali v povodí horného Hrona Majerčáková et al. (2004), Šipikalová et al. (2006) alebo Tegelhoffová (2010). Na druhej strane novšia štúdia Poórovej et al. (2013a) v tomto povodí nezaznamenala v chladnom polroku výraznejšie zmeny. Potvrdila však jeho pokles v teplom polroku. Tieto výsledky naznačujú, že v povodí horného Hrona dochádza v chladnom polroku k postupným zmenám, na ktorých sa podieľa rast teploty i zmeny zrážkových úhrnov. Potvrdzujú to i predikcie, ktoré uvádzajú, že toto povodie by sa mohlo stať viac zraniteľným na sucho v lete a začiatkom jesene a naopak počas zimy a začiatkom jari bude odtok rásť (Hlavčová et al., 2008). Novšie výsledky modelovania Štefunkovej et al. (2014) a Rončáka et al. (2016) upresňujú predpokladaný rast odtoku v zimných mesiacoch (predovšetkým v januári a februári). Pokles je očakávaný na jar a v lete (od mája až do augusta) a naopak vzrast na jeseň (hlavne v októbri).



Obr. 1 Predpokladaná zmena priemerného sezónneho a ročného odtoku v Európe medzi rokmi 2071–2100 a referenčným obdobím 1961–1990

pozn.: simulations with LISFLOOD driven by HIRHAM — HadAM3H/HadCM3 based on IPCC SRES scenario A2, (Zdroj: EEA, 2008)

3.2 Hodnotenie extrémnej povodní a maximálneho odtoku

Klimatické zmeny, ktorých prejavy pozorujeme stále intenzívnejšie, pôsobia na nárast početnosti výskytu a extremity prírodných ohrození. Z analýz globálnych trendov vyplýva, že zatiaľ čo počet katastrof vyvolaných tektonickými pohybmi a vulkanizmom nie je príliš premenlivý, počet katastrof spôsobených atmosférickými príčinami (napr. povodne) trvale rastie (Langhammer, 2007). Predpokladá sa, že práve povodne budú vo viacerých európskych regiónoch častejšie (Hall et al., 2014), a to predovšetkým v zime a na jar (EEA, 2017).

3.2.1 Vybrané prístupy hodnotenia povodní

Povodne môžeme hodnotiť z pohľadu dvoch prístupov. Prvý vychádza z hodnotenia historických záznamov (Brázdil a Kirchner et al., 2007) a záznamov z inštrumentálneho obdobia (Pramuk et al., 2013) a druhý z modelovania zrážkovo-odtokového režimu (Jeníček, 2005). Oba prístupy pomáhajú simulovať budúci vývoj povodňového režimu vodných tokov (Hlavčová et al., 2005), čo je v prebiehajúcich klimatických zmenách veľmi prínosné. Pri analýze povodní si musíme uvedomiť, že každá povodeň je v konkrétnom fyzicko-geografickom prostredí svojím spôsobom špecifická a jej analýza musí byť riešená komplexne (Vilímek, 2007).

Pri analýze povodní sa najčastejšie zisťujú ich príčiny, priebeh a dôsledky. Povodeň charakterizuje jej kulminačný prietok, deň kulminácie, vodný stav, doba opakovania (N-ročnosť), objem povodňovej vlny a rozsah záplavovej zóny (Makel' a Turbek, 2002). Ďalej sú charakterizované svojou sezónnosťou, ktorú vyhodnocovali Čekal et al. (2007) alebo Čurda et al. (2011); extremitou ktorú hodnotí Pekárová et al. (2008), Kocum et al. (2010) alebo Blaškovičová et al. (2014); a napokon frekvenciou, ktorú vyhodnocuje Nováky a Bálint (2013).

Sezónnosť povodní sa dá určiť podľa dňa kulminácie (Hladný a Čekal, 2008; Čurda et al., 2011) alebo je možné použiť Burnov index, ktorý vypočíta priemerný deň vzniku povodne (Burn, 1997; Hlavčová et al., 2005; Jeneiová et al., 2016). Sledovaná môže byť i zmena sezónnosti povodní. Túto je možné určiť podľa indexu sezónnosti S_{max} , a to porovnaním mesačného maxima odtoku a zrážok v roku s mesačným dlhodobým maximom (Parajka et al., 2009). Podobný index IFR (Index of Flood Regime) bol definovaný ČHMÚ (Madsen et al. 2013).

Súhrnný prehľad metód hodnotiacich frekvenciu povodní zhrňuje práca Madsen et al. (2013). Asi najčastejšie sa frekvencia hodnotí podľa počtu povodní, ktoré prekročia určitú prahovú hodnotu (Hall et al., 2014). Medzi metódy, ktoré umožňujú vymedziť týmto spôsobom povodne, a tým skúmať ich frekvenciu patrí metóda POT (peak-over-threshold) alebo metóda AM (annual maximum method; Bezak et al., 2014). V dlhých časových radoch sa môže pristúpiť k hľadaniu na povodne bohatých resp. chudobných období (Hall et al., 2014) alebo analyzovať osciláciu odtoku počas celých dekád dokonca storočí (Pekárová et al., 2003). Vyhľadávanými sú i metódy trendovej analýzy, ktoré dokážu odhaliť časové i veľkostné zmeny povodní a povodňového režimu. Pre analýzu trendov je vyvinutých niekoľko

štatistických testov, ktoré zhrňuje práca [Kundzewicz a Robson \(2004\)](#). Vhodným nástrojom pre určenie frekvencie povodní a odhalenie ich zmien je IHA analýza ([Richter et al., 1998](#)).

Extremita povodní sa určuje na základe rôznych aspektov medzi ktoré možno zaradiť hodnoty dosiahnutých kulminačných prietokov, N-ročnosť, plošný rozsah, vyčíslenie strát ľudských životov alebo materiálnych škôd. Z indexov, ktoré berú do úvahy hodnoty kulminačných prietokov a dobu ich opakovania môže byť použitý napríklad FEI (flood extremity index; [Müller et al., 2015](#)), I_{EKP} (index extremity kulminačného prietoku; [Čurda et al. \(2011\)](#) alebo IE_{100} (100 year flood extremity index, ktorý berie do úvahy fyzicko-geografické charakteristiky povodí; [Šercl, 2009](#)). Na základe N-ročnosti stanovuje extremitu povodňových prietokov metóda GEV (Generalized Extreme Value method; [Yiou et al., 2006](#)).

Vyššie uvedené metódy spravidla hodnotia povodne na základe údajov z inštrumentálneho obdobia, a tým sa snažia pochopiť ich minulé i budúci vývoj. Druhým prístupom je simulácia odtokovej odozvy počas extrémnych zrážkových udalostí, k čomu slúžia zrážkovo-odtokové modely. Fungovanie niektorých vybraných modelov (napr. MIKE-SHE alebo HEC-HMS atď.) popisuje [Jeníček \(2005\)](#) alebo [Madsen et al. \(2013\)](#).

3.2.2 Vývoj povodní a maximálneho odtoku

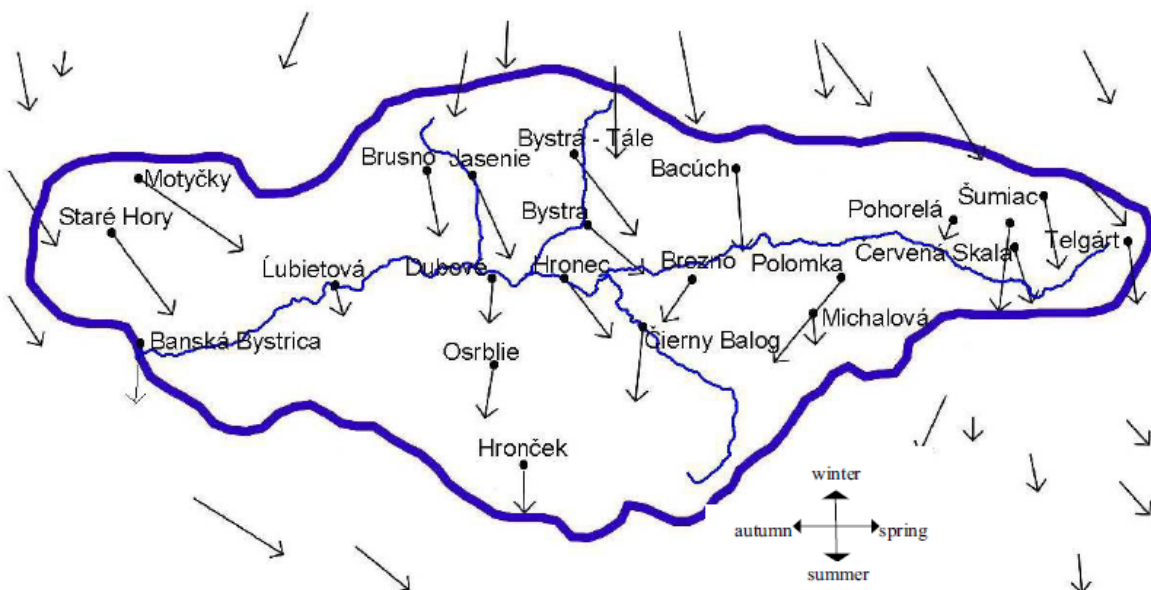
Predpokladaná hypotéza o raste maximálnych prietokov vplyvom globálneho otepľovania ([Pekárová et al., 2008](#)) nebola na väčšine staníc po celom svete (vrátane Európy) obecné potvrdená ([Kundzewicz et al., 2005](#); [Svensson et al., 2005](#)). [Kundzewicz et al. \(2005\)](#) k tomuto zisteniu dodávajú, že je dôležité určiť hlavne dôvody vysokých vodností v jednotlivých oblastiach a s tým skúmať i to, akým spôsobom klimatická zmena ovplyvňuje chovanie sa povodní. K podobnému záveru dospeli [Villarini et al. \(2011\)](#) keď tvrdia, že je ťažké detekovať vplyv novej klimatickej zmeny na vývoj povodní. Predpovede do budúcnosti však predikujú pre väčšinu oblastí centrálnej Európy ich rast v súvislosti s rastúcou teplotou a extrémnymi zrážkovými situáciami a to hlavne v teplom polroku ([IPCC, 2014](#)) a rastúcou teplotou a topením snehovej pokrývky v chladnom polroku ([Beniston a Stoffel, 2016](#)).

Zvýšená frekvencia výskytu povodňových udalostí od 80. rokov s výraznejším rastom po r. 2000 bola zaznamenaná napríklad na Šumave v Českej republike ([Langhammer et al., 2015](#)). Autori taktiež zistili skracovanie ich trvania, čo naznačuje častejší výskyt povodní z krátkodobých extrémnych zrážkových situácií, pre ktoré je typický rýchly priebeh. Tie povodia v oblasti Šumavy, ktoré majú vyššie percento zastúpenia rašelinísk reagujú na tieto extrémne zrážkové udalosti trikrát väčším prietokom a zodpovedajúcim objemom povodňových vln, než povodia s menším percentom rašelinísk ([Vlček et al., 2016](#)). Rovnako [Janský \(2003\)](#) dodáva, že oveľa väčšiu významnú rolu na vývoj odtoku v týchto oblastiach majú letné zrážkové udalosti v porovnaní so zimnými. Z výskumov v rašelinných oblastiach vyplýva, že v meniacich sa klimatických podmienkach sa stávajú počas extrémne zrážkových udalostí rizikovejšími. Následný odtok môže dosiahnuť i prekročiť hranicu povodňových stupňov.

Významné sledovanie povodní prebieha na rieke Dunaj. Od 70. rokov 19. storočia tu sledovali extremitu odtoku [Pekárová et al. \(2008\)](#), pričom nebola potvrdená významná tendencia ich rastu. Novší výskum [Nováky a Bálinta \(2013\)](#) alebo [Blaškovičovej et al. \(2014\)](#) tu potvrdil ich postupnú zvýšenú frekvenciu od 90. rokov. Zvyšujúcu sa početnosť povodní na druhej strane skracovanie ich trvania tu zaznamenali i [Pramuk et al. \(2013\)](#). Z priestorového

hľadiska je však situácia vo vývoji maximálneho odtoku na Slovensku rozdielna. Napríklad na povodiach V a centrálneho Slovenska bol zistený štatisticky významný klesajúci trend ročných maximálnych prietokov (Jeneiová et al., 2014), čo v povodí horného Hrona potvrdili i výsledky Miňďáša et al. (2011), Poórovej et al. (2013b) i Markovej et al. (2016).

Výskum Villariniho et al. (2011) ukazuje, že v hodnotách maximálnych prietokov je v centrálnej Európe výrazná sezónnosť. Veľká časť maximálnych ročných prietokov sa vyskytuje v zime v západnej časti a v lete v južnej časti skúmaného územia (Nemecko, Švajčiarsko, Česká republika a Slovensko). Jej posun z polovice jari na jej začiatok zaznamenali v Českej republike Langhammer et al. (2015). Tento posun dávajú do súvislosti s rastom teploty. Rastúcu frekvenciu povodní na konci jesene a v zime v mnohých európskych oblastiach zaznamenal už výskum Kundzewicza et al. (2005) a výskum Benistona a Stoffela (2016) v Alpách, v súvislosti s nárastom počtu udalostí s dažďom počas chladného polroka. Podľa výsledkov štúdie Parajka et al. (2009) závisí sezónnosť povodne od jej veľkosti. Extrémnejšie povodňové udalosti v Rakúsku a na Slovensku sa totiž zvyknú objavovať vždy v tom istom mesiaci, pričom menšie sa objavujú kedykoľvek počas roka. Taktiež zistili, že v horských oblastiach centrálneho Slovenska sa sezónne povodne so 40-ročnou dobou opakovania vyskytujú v máji a júni a väčšie na jeseň v septembri a októbri. Silný sezónny výskyt maximálnych ročných prietokov v zimnom (hlavne v januári) a v jarnom období (na rozhraní apríla a mája) bol sledovaný i v povodí Hrona (Marková et al., 2016). Sezónnosť ročných maximálnych povodní na staniách horného Hrona vyhodnocovali i Hlavčová et al. (2005). Obr. 2 zobrazuje výsledky ich hodnotenia. Na obrázku je vidieť silnejšiu zimnú a jarnú sezónnosť ročných maximálnych prietokov v severných oblastiach povodia a letnú až jesennú v južných oblastiach. Výsledky týchto, ale i ďalších štúdií potvrdzujú výraznú sezónnosť povodňových udalostí v centrálnej Európe, ktorú popisuje Villarini et al. (2011). Z výsledkov týchto štúdií vyplýva nevypitateľnosť výskytu povodní. Tu sa dostáva do popredia potreba ďalších výskumov povodňovej aktivity i štúdií skúmajúcich prebiehajúce zmeny hydroklimatických parametrov. Z ich výsledkov budú môcť čerpať výskumy, ktoré môžu naznačiť následný vývoj povodňových udalostí.



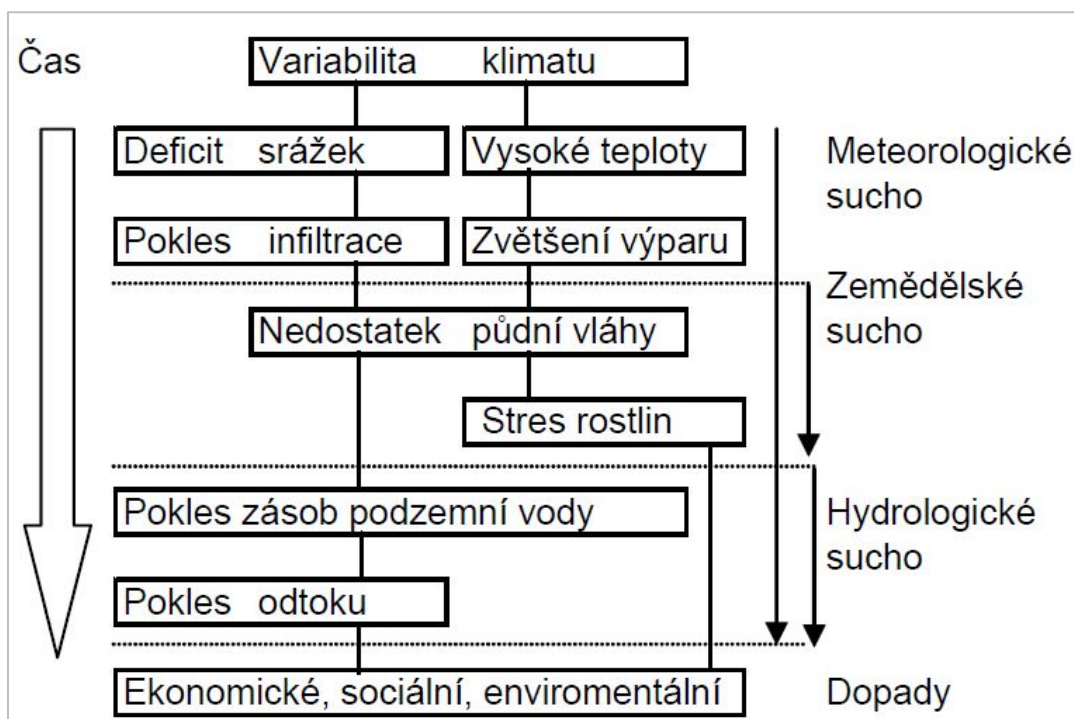
Obr. 2 Sezónny Burnov index ročných maximálnych prietokov na staniách horného Hrona a príslušných povodií; šípky indikujú smer ročných období (Zdroj: Hlavčová et al., 2005)

3.3 Hodnotenie extrémneho sucha a minimálneho odtoku

Popri povodniach rastie v poslednej dobe význam sledovania opačného extrémneho – sucha. Keďže sa často jedná o dlhotrvajúci jav, výrazne zasahuje do viacerých sfér nášho života. Má dopad na vodné hospodárstvo, poľnohospodárstvo, ekonomiku, ekosystémy, migráciu obyvateľstva a socioekonomický dopad. Zisťovanie jeho príčin, sledovanie a hodnotenie jeho priebehu a dôsledkov je preto dôležité nielen z pohľadu vedeckých odborníkov, politikov, ekonomík jednotlivých štátov ale i bežných obyvateľov.

3.3.1 Vybrané prístupy hodnotenia sucha

Výber metód, ktorými môžeme sucho hodnotiť je závislý od typu daného sucha. Podľa dominujúcich prejavov sucha sa rozlišujú jeho štyri typy (Heim, 2002; Van Loon, 2015). Medzi jednotlivými typmi existuje časová postupnosť, ktorá je zobrazená na **Obr. 3**, pričom sa jeho jednotlivé prejavy môžu vyskytovať súčasne. Meteorologické sucho podmieňuje vznik sucha poľnohospodárskeho (pôdneho), hydrologického i socioekonomického (Brázdil a Kirchner et al., 2007).



Obr. 3 Časový sled vývoja meteorologického, poľnohospodárskeho a hydrologického sucha (Zdroj: Novický et al., 2008)

Meteorologické sucho je definované ako obdobie so zrážkami nižšími ako je dlhodobý normál (Tallaksen a Van Lanen, 2004), pričom stanovenie tohto sucha je závislé od zvolenej prahovej hodnoty nutnej pre vyhlásenie sucha (Novický et al., 2008). Hydrologické sucho vyjadruje nedostatok vody v hydrologickom systéme a prejavuje sa abnormálnymi nízkymi stavmi v povrchových vodách a nedostatkom podzemnej vody (Tallaksen a Van Lanen 2004).

Ostatné typy sucha práca nehodnotí, preto im nie je venovaná väčšia pozornosť. Na základe zrážok a vývoja teploty vzduchu pomenovala niekoľko typov sucha [Van Loon \(2015\)](#). Pri typológii sucha poukazuje na to, že v sezónnom podnebí s teplotami pod nulou a akumuláciou snehu v zime hrá sneh vo vývoji sucha významnú rolu. [Smakhtin \(2001\)](#) definuje rozdiel medzi suchom a nízkymi prietokmi. Sucho definuje ako prirodzenú udalosť, ktorá vznikne z menšieho než normálneho množstva zrážok počas dlhšieho obdobia. Nízke prietoky sú na druhej strane sezónnym javom a prirodzenou súčasťou prúdenia každého toku.

Vzhľadom na nejednotnosť v definíciách sucha existuje veľké množstvo spôsobov, ako sucho sledovať a hodnotiť. Ako uvádzajú [McKee et al. \(1993\)](#) v analýze sucha je dôležitých päť otázok zahŕňajúcich: 1) časové merítko, 2) pravdepodobnosť, 3) zrážkový deficit, 4) definovanie zrážok a premenných pre zásobovanie vodou a 5) vzťah definície k dopadom sucha. Sledovaná je teda napríklad doba opakovania výskytu sucha (drought frequency), extremita sucha (drought severity), doba trvania sucha (drought duration) a nedostatok vody v suchom období (drought deficit), [Van Loon \(2015\)](#).

Jednotlivé metódy hodnotenia sucha môžeme rozdeliť podľa toho, ktorý parameter je na jeho stanovenie použitý. U meteorologického sucha sú najpoužívanejším parametrom zrážky. Niekedy je zohľadňovaná i teplota vzduchu, evapotranspirácia, dĺžka slnečného svitu a rýchlosť vetra. Pri hydrologickom suchu sú najpoužívanejšími parametrami prietoky, výdatnosť prameňov, zmeny hladín v jazerách, nádržiach, studniach a vrtoch ([Fiala, 2011](#)). Vyššie zmienené parametre sú použité vo vybraných indexoch a metódach uvedených v **Tab. 4**.

3.3.2 Vývoj sucha a minimálneho odtoku

Nárast náchylnosti európskych oblastí k suchu v priebehu 20. storočia zaznamenali [Brázdil et al. \(2009b\)](#), [Trnka et al. \(2009\)](#), [Fiala et al. \(2010\)](#) a [Spinoni et al. \(2015\)](#). Za hlavnú príčinu sú považované vysoké teploty vzduchu ([Briffa et al., 2009](#)) v spojení s nízkymi úhrnmi zrážok ([Hanel et al., 2018](#)), ktoré prvotne zapríčinia vznik meteorologického sucha. Meteorologické sucho však po určitom čase podmieňuje vznik sucha hydrologického ([Brázdil a Kirchner et al., 2007](#)) prejavujúce sa nízkymi hladinami vodných tokov. Ako uvádzajú [Kubiak-Wójcicka a Bąk \(2018\)](#), väčšie vodné toky pritom reagujú na vznik hydrologického sucha až po dlhšom období s nízkymi alebo žiadnymi zrážkami. Sú teda na jeho výskyt menej náchylné v porovnaní s menšími tokmi.

Vzhľadom na predpokladaný rast teploty vzduchu a naopak pokles zrážok, a to predovšetkým v lete a na jar, je pre väčšinu oblastí Európy predpovedané zvýšené riziko výskytu sucha v tomto období ([IPCC, 2014](#)). I [Spinoni et al. \(2017\)](#) uvádzajú, že v oblasti centrálnej Európy bola v posledných troch dekádach zistená väčšia frekvencia a závažnosť sucha predovšetkým na jar. Takýto vývoj sucha koreluje s poklesom jarného odtoku, ktorý bol zistený v európskom regióne ([Stahl et al., 2010](#)). Klesajúci trend nízkych letných prietokov i zvyšujúce sa trvanie a objemy sucha v tejto sezóne boli sledované v Českej republike ([Fiala et al., 2010, 2011](#)). Česká republika bola dokonca z hľadiska ich vývoja počas sucha v r. 2015 označená ako jedna z najviac postihnutých európskych oblastí týmto suchom ([Laaha et al., 2017](#)). Extrémne sucho v r. 2015 sa prejavilo na výraznom poklese zásob podzemných vôd. Tento negatívny dopad na zásoby podzemnej vody sledovali na Slovensku [Fendeková et al. \(2017\)](#). Zistili, že nedostatočné zásoby podzemnej vody vplyvom podpriemerných zrážkových úhrnov boli pozorované už od jesene 2014. Rekordný dopad na

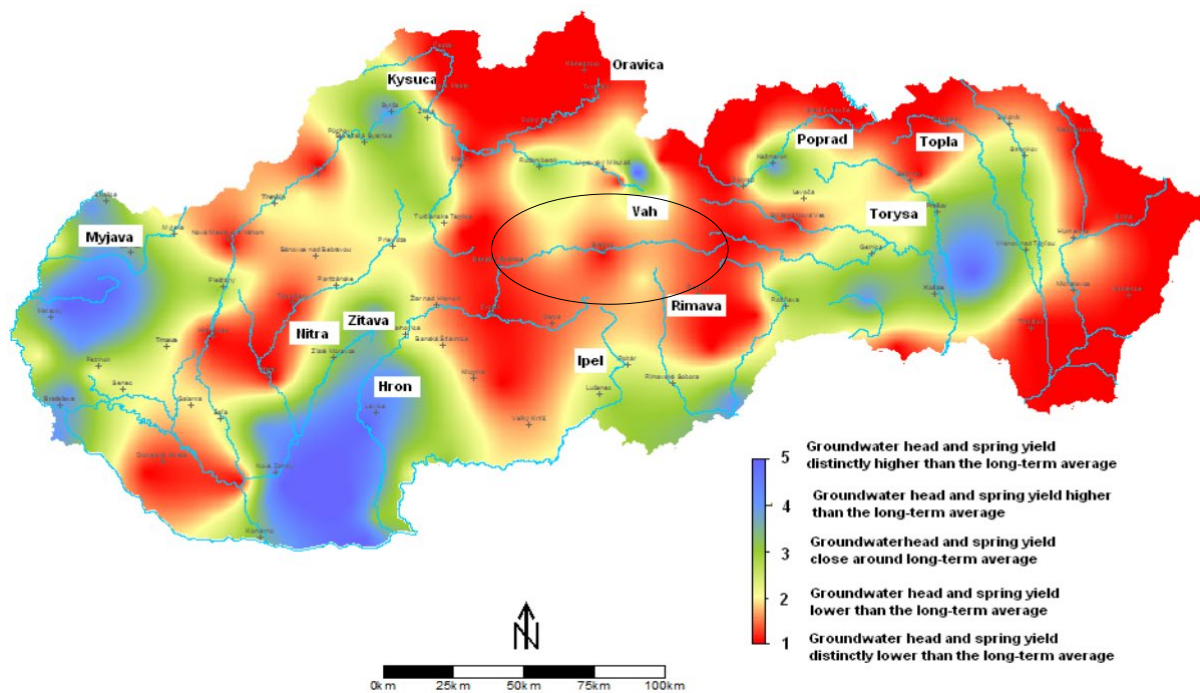
zásoby podzemnej vody sa najviac prejavil v septembri 2015. Podľa mapy na **Obr. 4** možno sledovať dopad tohto sucha na zásoby podzemných vôd i v povodí horného Hrona. Zaradilo sa medzi tie povodia, kde bol zaznamenaný ich zreteľný pokles.

Na nepriaznivý vývoj minimálnych prietokov poukazuje výskum ďalšieho sucha v tomto povodí (Fendeková et al., 2017). Počas sucha v r. 2003 tu totiž pozorovali najväčšie absolútne minimálne prietoky s viac ako 60-ročnou dobou opakovania. Dlhodobé obdobia sucha (trvajúce viac ako 30 dní) v chladnom polroku analyzovali v povodí horného Hrona Demeterová a Škoda (2009). Zaznamenali tu jednu z najväčších frekvencií zimných dlhotrvajúcich období sucha na celom Slovensku objavujúcu sa viac ako trikrát za desať rokov. Podľa predpovedí do budúcnosti (Rončák et al., 2019) by mala výskyt nízkych prietokov a dostupnosť vody počas roka ovplyvňovať i nedostatočná zásoba vody v snehu počas zimy, a to i v tomto povodí. Túto prepojenosť snehu a odtoku v teplom polroku potvrdzuje výskum Jeníčka et al. (2016) z alpskej oblasti. Z jeho výsledkov vyplýva, že podpriemerná zásoba vody v snehovej pokrývke spôsobuje pokles minimálnych letných prietokov. Vplyvom rastúcej teploty je už teraz v povodí horného Hrona sledovaný pokles snehovej pokrývky vo všetkých mesiacoch chladného polroka. Výskyt teplejších zím môže na jednej strane zvýšiť riziko vzniku povodní (Hlavčová et al., 2015), ale na strane druhej, krátke trvanie a rýchle a nárazové topenie naakumulovanej snehovej pokrývky môže spôsobiť nedostatočné zásobenie podzemných vôd. To môže mať negatívny dopad na odtok v nasledujúcej sezóne, a v tej je už teraz zaznamenaný jeho klesajúci trend. Tieto výskumy naznačujú, že povodie horného Hrona by sa mohlo zaradiť medzi tie slovenské povodia, na ktoré budú mať prebiehajúce zmeny pravdepodobne väčší negatívny dopad. Potvrdzujú to i analýzy Poórovej et al. (2013a), ktoré zaradili toto povodie medzi povodia s klesajúcim až výrazne klesajúcim trendom ročného odtoku, i keď v rámci vývoja minimálnych prietokov (Poórová et al., 2013b) zistili, že zatiaľ najpriaznivejšie podmienky vo vývoji miním sú v horných povodiach riek Váh, Hron a Slaná, rovnako ako v povodiach Hornád, Poprad, Bodrog a Dunaj. Naproti tomu južné Slovensko, t.j. povodie dolného Váhu, Hrona a Slanej a povodí Ipľu, Nitry, Malého Dunaja, Bodvy a čiastočne Moravy, vykazuje značne klesajúci trend minimálnych prietokov.

Na priaznivý vývoj minimálneho odtoku v horných povodiach riek má pozitívny účinok krajinný pokryv. Potvrdzujú to výsledky Královca et al. (2016) ktoré indikujú, že signifikantne vyšší odtok má počas suchých období zalesnené povodie v porovnaní s nezalesneným. Toto poukazuje na jeden z dôvodov, prečo je i v nížinných oblastiach J Slovenska vývoj minimálneho odtoku nepriaznivý. Na druhej strane Vlček (2017) uvádza, že lúčne povodia majú síce vyššiu retenčnú kapacitu vďaka melioračným opatreniam, svojím povrchom však odtok urýchľujú, hlavne počas extrémnych zrážkových udalostí. V súčasných podmienkach striedajúcich sa extrémnych zrážkových udalostí s obdobiami sucha, rastie dôležitosť tvorby opatrení na zadržení vody v krajine. Tá predstavuje významnú súčasť protipovodňovej ochrany (Janský a Kocum, 2007) a je veľmi dôležitá i v budovaní opatrení v boji proti suchu. Medzi takéto opatrenia patrí napríklad využitie potenciálnych akumulčných a retenčných priestorov v povodí, ktoré by mohli významne prispievať k redukcii kulminačných prietokov počas povodňových udalostí a počas suchých epizód by mohli zadržať dostatočné množstvo vody (Kocum, 2012). Keďže sa jedná o nenásilné opatrenia pre zvyšovanie retenčnej schopnosti krajiny, mali by byť v oveľa väčšej miere zaradené do riešenia problému sucha na lokálnej i regionálnej úrovni.

Tab. 4 Vybrané indexy a metody hodnotiace meteorologické a hydrologické sucho

Meteorologické sucho	Použitý/á v práci
Standardized Precipitation Index (SPI)	McKee et al., 1993; Brázdil a Kirchner et al., 2007; Spinoni et al., 2015; Fendeková et al., 2017
Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI)	Spinoni et al., 2015; Stagge et al., 2015a
Palmer Drought Severity Index (PDSI)	Palmer, 1965; Trnka et al., 2009
Standardized Snow Melt and Rain Index (SMRI)	Staudinger et al., 2014
de Martonne Aridity Index (IDM)	Sobíšek, 1993; Blahušiaková a Matoušková, 2016
Relative Precipitation Index (I)	Novický et al., 2008; Blahušiaková a Matoušková, 2016
Antecedent Precipitation Index (API)	Novický et al., 2008; Doležal et al., 2017
Threshold Level Approach	Van Loon a Laaha, 2015; Blahušiaková a Matoušková, 2016
Hydrologické sucho	Použitý/á v práci
Standardized Runoff Index (SRI)	Kubiak-Wójcicka a Bağ, 2018
Standardized Water-level Index (SWI)	Kubiak-Wójcicka a Bağ, 2018
Standardized Groundwater level Index (SGI)	Kumar et al., 2016
Hydrological drought index (PHDI)	Jacobi et al., 2013
Standardized Deficit Index (SDI)	Hanel et al., 2018
Base Flow Index (BFI)	Richter et al., 1998; Zhang et al., 2013; Blahušiaková a Matoušková, 2015
Low Flow Index (LFI)	Poff a Ward, 1989; Blahušiaková a Matoušková, 2016
Aridity index (φ)	Zappa a Kan, 2007
Threshold Level Approach	Demeterová a Škoda, 2009; Gustard a Demuth, 2009; Fiala, 2011; Kulasová et al., 2017; Blahušiaková a Matoušková, 2016

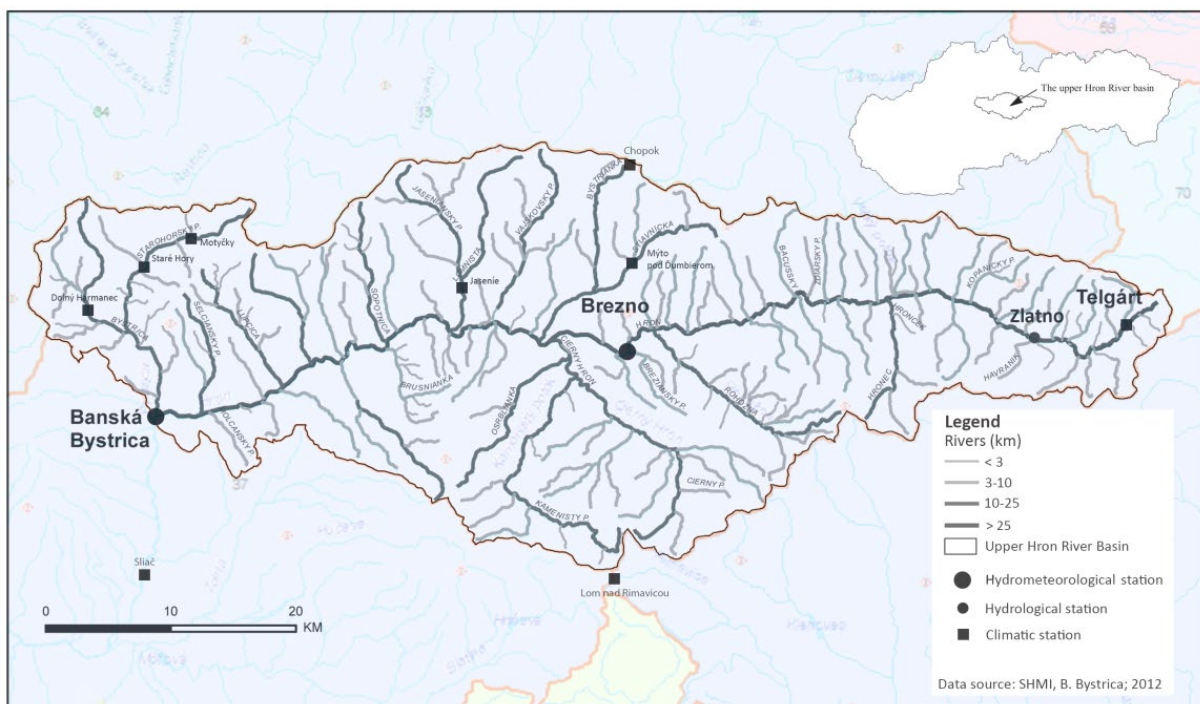


Obr. 4 Priestorové rozloženie sucha v podzemných vodách v septembri 2015 (Zdroj: Fendeková et al., 2017)

4 ZÁUJMOVÉ POVODIE

Pre svoje prirodzené podmienky tvorby odtoku je povodie horného Hrona vybrané ako pilotné povodie na území Slovenska pre rôzne projekty a modelovanie. Medzi ne patrí napríklad projekt *Centrálny geografický systém rezortu životného prostredia CGS (Informačný systém o území, 2004)* alebo *Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment Project CECILIA (Hlavčová et al., 2010)* a tiež výskumy týkajúce sa zrážkovo-odtokového modelovania (Kubeš et al., 2004; Hlavčová et al., 2007; Hrušková, 2007; Juričeková et al., 2013; Valent, 2014). Toto povodie bolo práve z tohto dôvodu vybrané pre výskum sledovania dopadov zmeny klímy na jeho hydrologický režim. Jednotlivé analýzy prebiehali buď na celom povodí horného Hrona po Banskú Bystricu (**Obr. 5**) alebo na čiastkovom hornom úseku po Zlatno (**Obr. 6**). Základné charakteristiky oboch úsekov zhrňuje **Tab. 5**.

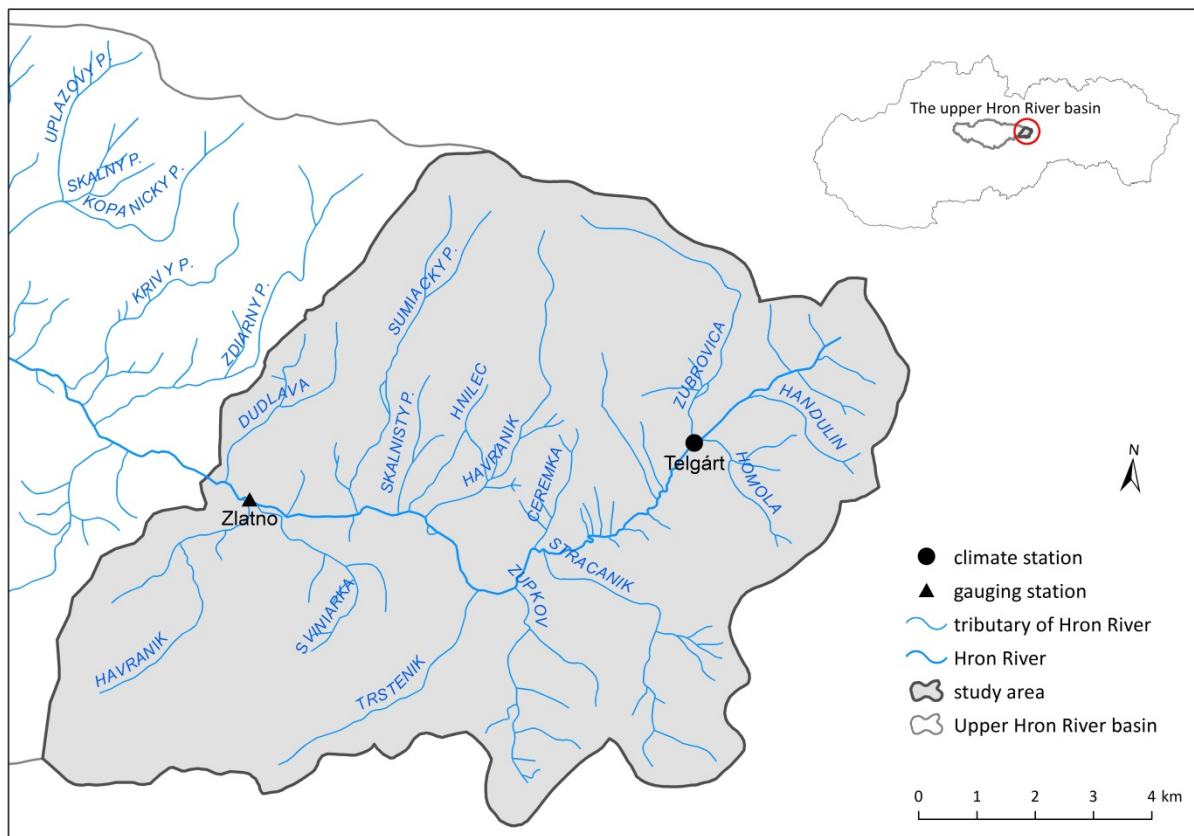
Povodie horného Hrona je situované v centrálnej časti Slovenska a odvodňuje plochu 1766,5 km². Hron pramení severovýchodne od obce Telgárt v Slovenskom Rudohorí v nadmorskej výške 934 m n.m. Preteká úzkym údolím Horehronského Podolia, ktoré zo severnej strany obklopujú Nízke Tatry a z južnej Muránska planina a Poľana. Horná časť toku je orientovaná v smere V – Z.



Obr. 5 Záujmové povodie horného Hrona po B. Bystricu

Podložie sa vyznačuje veľkou rozmanitosťou vyplývajúcou z geologického vývoja. Prevažnú časť územia vyplnía Fatransko – tatranská oblasť reprezentovaná geomorfologickými celkami Nízke Tatry, Starohorské vrchy a Veľká Fatra. Tieto vystupujú na S povodia a patria k tzv. nízkotatranskému oblúku jadrových pohorí kryštálicko-

druhohorného pásma. V centrálnej časti povodia zaberá pomerne malé plochy vnútrokarpatský paleogén Horehronského Podolia. Z a JZ časť vyplňajú celky Slovenského stredohoria reprezentované stratovulkánom Poľany a vulkanitmi Kremnických vrchov. Z kotlín sem zasahuje Zvolenská kotlina. J a JV časť zaberajú Veporské vrchy tvorené tzv. kryštalinikom veporika. Vo V časti sa rozprestiera Spišsko-gemerský kras reprezentovaný Muránskou planinou. Veporské vrchy i Spišsko-gemerský kras patria do oblasti Slovenského Rudohoria (HEP, 1999).



Obr. 6 Zaujmové povodie horného Hrona po Zlatno

Výškové (**Obr. 7**) a sklonové pomery majú vplyv na pomery klimatické, najmä na veľkosť a rozdelenie zrážok, na teplotu vzduchu, a tým aj na vodnosť a režim odtoku. Celá pravá časť povodia je veľmi strmá. Krátke prítoky tu dosahujú sklon až niekoľko desiatok promile, oveľa viac ako prítoky z ľavej strany i ako samotný hlavný tok vo svojej hornej časti. Najväčší sklon má pravostranný prítok Bystrianka (59,3 ‰). Sklon hlavného toku dosahuje najväčšie hodnoty nad Breznom (7,9 ‰), kde dochádza počas výdatných zrážok k rýchlemu odtoku vody do údolia a kvzniku povodňových prietokov. V ďalších úsekoch je sklon podstatne nižší. Od Brezna po sútok s Bystriankou klesá na 1,8 ‰, od Bystrianky po Jaseniensky potok 5,2 ‰, od Jasenienskeho potoka po Bystricu 3,2 ‰ (VP, 2007). Najvyšším bodom povodia je vrch Ďumbier (2043 m n.m.) v masíve Nízkyh Tatier.

Povodie patrí do chladného a vlhkého klimatického regiónu. Priemerná ročná teplota vzduchu v smere J – S klesá. V nižších polohách hornej časti povodia dosahuje hodnotu 6 až 8°C. S nadmorskou výškou klesá na 4 až 5°C (oblasť Slovenského Rudohoria), resp. na 2 až 3°C (oblasť Nízkyh Tatier). Najteplejším mesiacom je júl s priemernou teplotou 14 až 16°C,

najchladnejším január -4 až -6°C (Pekárová a Szolgay, 2005). Pre územie povodia horného Hrona sú typické výrazné rozdiely v priestorovom rozložení zrážok. Na pomerne malých vzdialenostiach sa striedajú relatívne suché a vlhké oblasti. Priemerný ročný úhrn zrážok v Telgárte za obdobie 1961–2010 predstavuje 853 mm. V najvyšších polohách Nízkych Tatier dosahujú 1200 mm, viac ako 900 mm v hrebeňových polohách ostatných pohorí. V najnižších polohách dosahujú ročné úhrny zrážok 550 až 700 mm. V ročnom chode sú zrážky pomerne rovnomerne rozdelené. Absolútne najnižšie mesačné úhrny zrážok sa vyskytujú prevažne od mája do augusta, ale miestami aj v jarných a jesenných mesiacoch a dosahujú 200 až 250 mm, vo vyšších polohách 250 až 350 mm (VP, 2007).

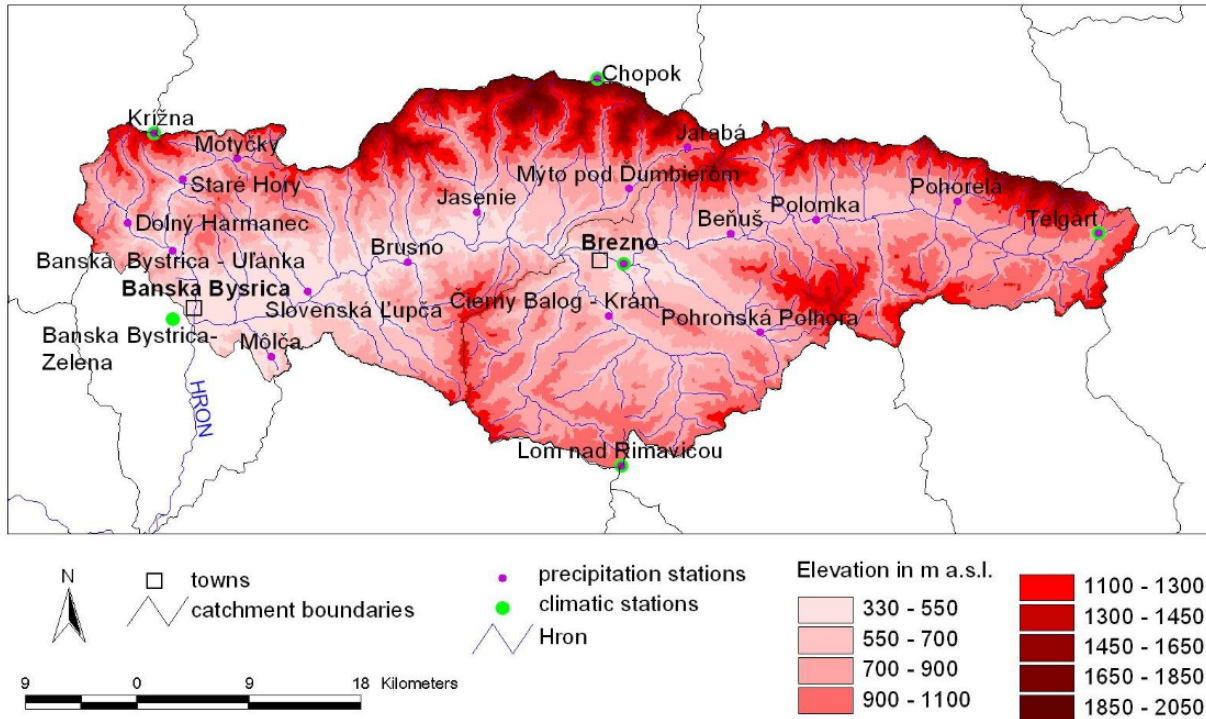
Tab. 5 Základné hydrologické a klimatické charakteristiky povodia horného Hrona

	Hron po Zlatno		Hron po Banskú Bystricu	
	Hodnota	Časový krok	Hodnota	Časový krok
Rozloha [km ²]	83,7		1766,5	
Nadmorská výška vodomernej stanice [m n.m.]	733		334	
Dlhodobý priemerný ročný prietok Q_a [m ³ .s ⁻¹]	1,4	1931-2010	26,2	1931-2010
Špecifický odtok q [l.s ⁻¹ .km ⁻²]	16,4	1961-2000	15,9	1931-1980
Ročný odtokový koeficient φ [%]	0,55	1961-2000	0,47	1961-1980
Maximálny priemerný ročný prietok Q_{rmax} [m ³ .s ⁻¹]	3,27 (1945)	1931-2010	46,14 (1965)	1931-2010
Minimálny priemerný ročný prietok Q_{rmin} [m ³ .s ⁻¹]	0,72 (1947)	1931-2010	12,93 (1943)	1931-2010
Nadmorská výška klimatickej stanice [m n.m.]	901 (Telgárt)		343, 427 (B. Bystrica)	
Dlhodobá priemerná ročná teploty vzduchu T_a [°C]	5	1931-2010	8,2	1931-2010
Maximálna priemerná ročná teplota vzduchu T_{max} [°C]	6,4	1931-2010	9,7	1931-2010
Minimálna priemerná ročná teplota vzduchu T_{min} [°C]	3,2	1931-2010	5,7	1931-2010
Dlhodobý ročný úhrn zrážok P_a [mm]	853	1961-2010	828	1931-2010
Maximálny ročný úhrn zrážok P_{max} [mm]	1282	1961-2010	1388	1931-2010
Minimálny ročný úhrn zrážok P_{min} [mm]	528	1961-2010	541	1931-2010
Dlhodobá priemerná výška snehovej pokrývky S_{da} [cm]	24	1961-2010	16	1961-2010
Maximálna výška snehovej pokrývky S_{dmax} [cm]	67	1961-2010	39	1961-2010
Minimálna výška snehovej pokrývky S_{dmin} [cm]	5	1961-2010	5	1961-2010

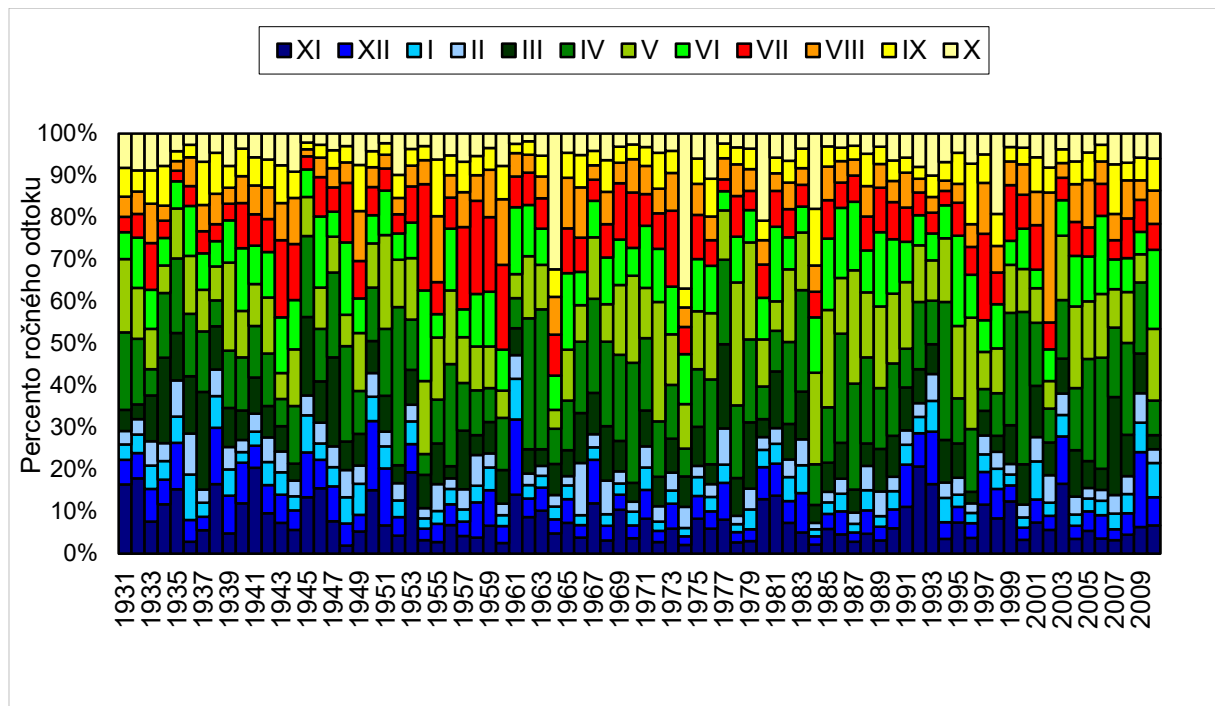
Povodie má snehovo-dažďový režim odtoku s maximálnymi priemernými mesačnými prietokmi v apríli a minimálnymi v januári, februári a septembri. Najväčší podiel jarných mesiacov na odtoku počas roka môžeme sledovať na **Obr. 8**. Viditeľné sú i sezónne zmeny v jeho vývoji, napríklad väčší podiel na odtoku mali zimné mesiace hlavne na začiatku sledovanej časovej rady, letné mesiace na konci 50. rokov a v povodňových rokoch 1997 a 2002. Podiel jesenných mesiacov bol výraznejší hlavne v r. 1974 a 1964.

V povodí majú prevahu pôdy hlinito piesočnaté, piesočnato hlinité až hlinité. Vyskytujú sa tu viaceré pôdne typy v súvislosti s pestrým geologickým podložím. Najväčšie zastúpenie majú hnedé pôdy zaberajúce územie od najnižších polôh až po hornú hranicu lesa. V okolí Banskej Bystrice a severne od nej sa vyskytujú rendziny a pararendziny na vápencoch

a zvetralinách pevných karbonátových hornín. V okolí Brezna sa vyskytujú ilimerizované pôdy oglejené. Podzolové pôdy zaberajú časť Ďumbierskych a Kráľovohoľských Tatier (Bielik a Šurina, 2000; HEP, 1999).

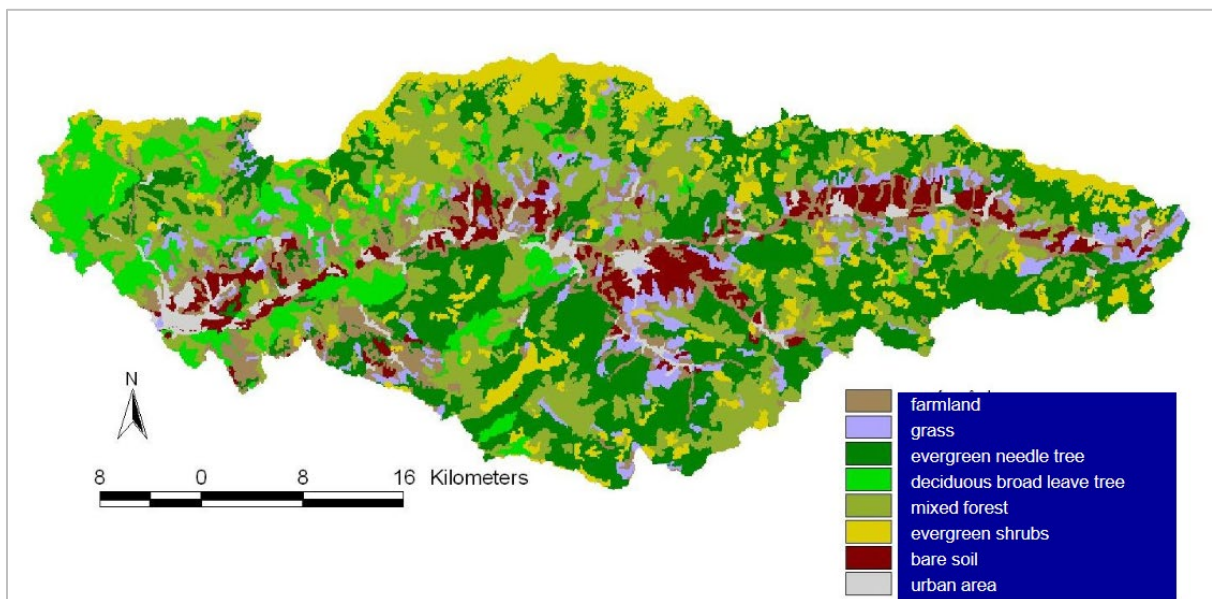


Obr. 7 Výškové pomery v povodí horného Hrona po B. Bystricu (Zdroj: Hlavčová et al., 2010)



Obr. 8 Sezónne zmeny odtoku v Zlatne v období 1931-2010

Lesy pokrývajú 66 % územia (Holko a Kostka, 2008). Táto hodnota prekračuje priemernú lesnatosť Slovenska, ktorá je 41 % (NFC, 2011). Súčasnú krajinu pokrýtie v povodí je zobrazené na Obr. 9. Percentuálne najväčšie plochy zaberajú ihličnaté lesy (36 %), ktoré sa nachádzajú vo vyšších polohách a zastúpené sú smrekom a jedľou. Listnaté lesy (17 %) sa nachádzajú v stredných polohách s bukom a v nižších polohách s dubom. Ďalej je v povodí zastúpený zmiešaný les, ktorý zaberá plochu 13 %, trávnatá plocha 24 %, poľnohospodárska pôda 6 %, zastavaná plocha 3 % a 1 % zaberajú kry (HEP, 1999; Rončák et al., 2016). Povodie je pomerne chudobné na výskyt rašelinísk, menšie lokality sa nachádzajú na Horehroní.



Obr. 9 Súčasnú krajinu pokrýtie v povodí horného Hrona po B. Bystricu (Zdroj: Hlavčová et al., 2010)

5 ZDROJOVÉ DÁTA A METODICKÝ POSTUP

5.1 Zdrojové dáta

Klimatické a hydrologické dáta pre povodie horného Hrona poskytol Slovenský Hydrometeorologický ústav (SHMÚ) v B. Bystrici a Slovenský vodohospodársky podnik, š.p. (SVP), odštepny závod B. Bystrica – Správa povodia horného Hrona (SPHH) B. Bystrica (dnes Zvolen). Dáta z povodí v Českej republike a Švajčiarska (článok 8.4) poskytol Český Hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) v Prahe a Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss v Zürichu-Flughafen. Nasledujúci popis použitých dát sa zameriava predovšetkým na dáta z povodia horného Hrona. Všetky dáta boli poskytnuté v homogenizovanej podobe.

Databázu použitých dát v tejto práci možno rozdeliť na dve časti: databáza vytvorená výlučne pre sledovanie povodňového režimu horného Hrona a databáza vytvorená pre sledovanie hydrologického režimu horného Hrona a hydroklimatických extrémov.

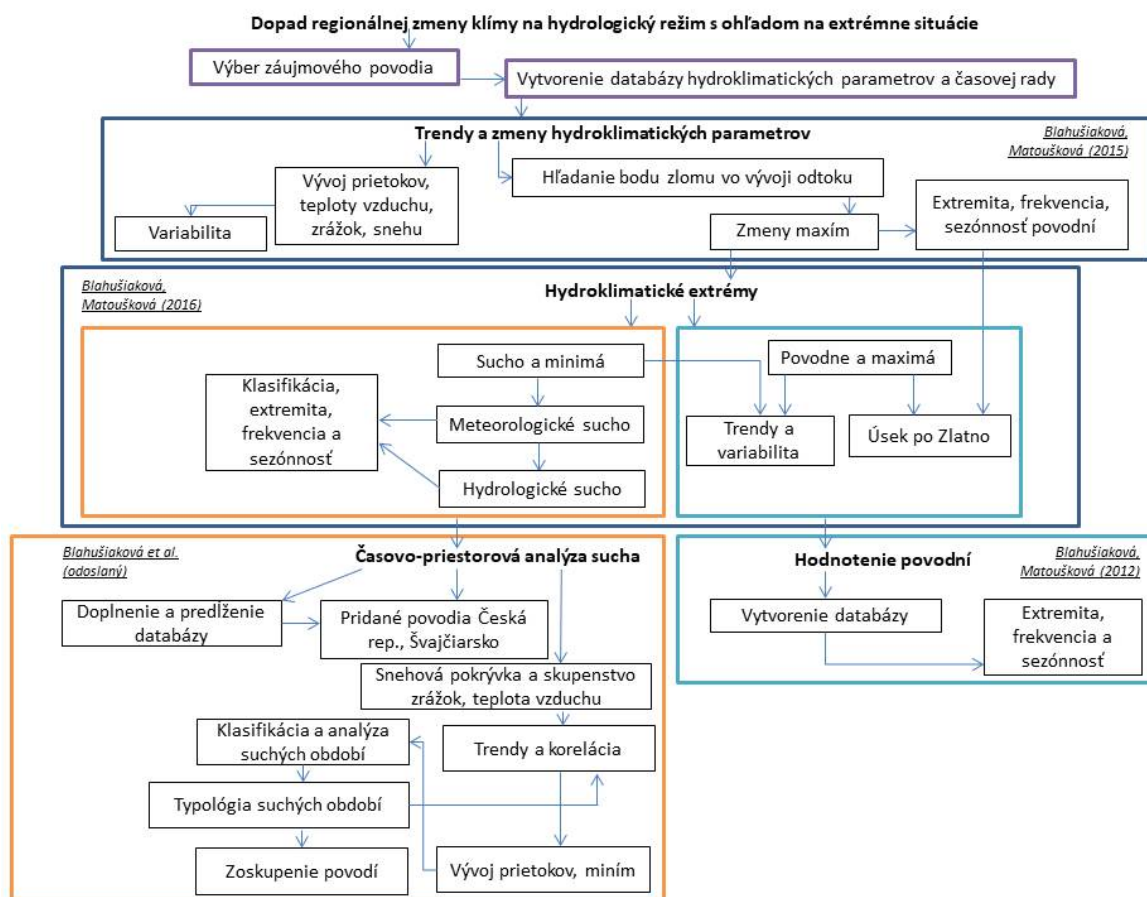
Prvá databáza bola zostavená s cieľom skúmať povodňovú aktivitu horného Hrona (**príloha 8.3**) využitím dostupných literárnych prameňov a materiálov. Začiatok skúmanej časovej rady bol stanovený rokom 1930, kedy začalo na Hrone viacúčelové sledovanie hydrologických charakteristík a ukončená je rokom 2010, kedy sa na hornom Hrone objavila posledná významná povodeň v čase zostavovania databázy. Ku každej zistenej povodni sú zostavené nasledujúce informácie: dátum vzniku (kulminácia), miesto výskytu, vodný stav, kulminačný prietok, dosiahnutý stupeň povodňovej aktivity, u všetkých povodní od 90. rokov i príčiny a dôsledky. Takto zostavená databáza neobsahuje informácie k prípadným povodniam z obdobia 40. rokov resp. málo zmapované je i obdobie 50. rokov, preto počet zistených povodní treba brať s ohľadom na historické udalosti, predovšetkým druhú svetovú vojnu.

Druhá databáza bola doplňovaná postupne. V prvej fáze (**príloha 8.1**) obsahovala z hydrologických dát hodnoty priemerných prietokov v dennom a mesačnom kroku v období 1931-2010 z 3 staníc a klimatické dáta v mesačnom kroku zo 6 resp. 12 staníc a v dennom kroku z 1 stanice v období 1931/1961-2010. V druhej fáze (**príloha 8.2**) nebola databáza doplňovaná o nové dáta, ale len skrátená na obdobie 1961-2010, s cieľom hodnotiť hydroklimatické extrémny v dennom kroku a na typickom horskom úseku záujmového povodia po Zlatno. V tretej fáze (**príloha 8.4**) bolo cieľom jednak predĺženie časovej rady o roky s extrémnymi hodnotami a porovnanie povodia horného Hrona s inými povodiami. Pri zostavovaní spoločnej databázy pre viacero vybraných povodí bol dôraz kladený na získanie dostatočne dlhých, kvalitných a súvislých časových radov. Tieto kritériá nakoniec stanovili dĺžku časovej rady na obdobie 1966-2012, tzn. rovnako dlhá pre všetky skúmané stanice, bohužiaľ na úkor nezahrnutia niekoľkých extrémnych rokov posledného desaťročia.

Detailné použitie základných i vypočítaných klimatických a hydrologických dát je súčasťou metodiky jednotlivých článkov.

5.2 Metodický postup

Nasledujúca schéma (**Obr. 10**) stručne popisuje jednotlivé kroky postupu práce s odkazmi na príslušné články.



Obr. 10 Zhrnutie postupu práce s odkazmi na jednotlivé články

Prvým krokom skúmania regionálnej zmeny klímy v povodí horného Hrona je detekcia trendov hydroklimatických parametrov a ich zmien (**príloha 8.1**). V mnohých štúdiách (Libiseller, 2004; Kliment a Matoušková, 2009; Yue et al., 2012; Murphy et al., 2013; Ledvinka, 2016 atd.) sa ako vhodný nástroj pre detekciu trendu, jeho sily, smeru a veľkosti ukázal neparametrický Mann-Kendallov test (MK test). V tejto práci je preto hlavnou metódou, ktorá trendy hodnotí. Pri jeho použití bol dôraz kladený na dĺžku pozorovanej časovej rady, pretože od nej závisí početnosť zistených trendov. Mann (1945), Kendall (1975) alebo Yue et al. (2002b) odporúčajú použitie časovej rady dlhej aspoň 30 rokov. S cieľom zistiť, ako sa dĺžka zvolenej časovej rady prejaví vo výsledkoch, bol MK test spustený pre dve rôzne dlhé obdobia (1931-2010 a 1961-2010). Druhá metóda, pomocou ktorej sú trendy vyhodnotené hlavne graficky, je lineárna regresia. Variabilita hydrologických parametrov je sledovaná pomocou koeficientu disperzie.

Zmeny vo vývoji hydroklimatických parametrov sú hodnotené metódou jednoduchých súčtových čiar a pomocou komparatívnej analýzy. S cieľom zistiť, či a prípadne kedy došlo

v časovej rade k zmene vo vývojovom trende odtoku, boli skonštruované jednoduché súčtové čiary. Zistený bod zlomu sa stal kritériom rozdelenia časovej rady, ktorá vstupovala do komparatívnej IHA analýzy. Tá na základe skúmania viacerých hydrologických premenných poukázala na zmeny nielen v ročnom, ale i mesačnom kroku. Významné zmeny odhalila v hodnotách maxím, preto je už v tejto fáze sledovaný ich vývoj. Extrémne odtokové situácie sú vymedzené na základe N-ročnosti resp. veľkosti kulminačného prietoku. Sledovaná je nielen ich extremita, ale i frekvencia a sezónnosť.

V *druhom kroku* bolo pristúpené k hodnoteniu hydroklimatických extrémov; sucha a povodní (**príloha 8.2**). Keďže primárnou príčinnou hydrologického sucha je sucho meteorologické, je hodnotené ako prvé. Jeho výskyt je sledovaný použitím indexov sucha, de Martonne Aridity index (eMS, 2015) a Relative precipitation index (Novický et al., 2008). Tieto indexy boli vybrané hlavne z dôvodu nenáročnosti na zdrojové dáta. S cieľom skúmať sezónnosť, trvanie a frekvenciu suchých období, bola vytvorená ich klasifikácia využitím Threshold metódy tzn. dopredu stanoveného maximálneho úhrnu zrážok a počtu dní s týmito zrážkami. Na jej základe sú suché obdobia rozdelené do 4 skupín.

Následne je hodnotené sucho hydrologické využitím dvoch hydrologických indexov, Low flow (Poff a Ward, 1989) a Base flow indexu (Richter et al., 1998) a threshold metódy, pre ktorú sú zvolené najčastejšie používané prahové hodnoty miním: Q_{min} , Q_{330} , Q_{355} a Q_{364} , reprezentujúce obecné nízke a extrémne nízke prietoky. Výber hydrologických indexov podliehal dostupnosti zdrojových dát. Threshold metóda je použitá i pre stanovenie hranice medzi nízkymi a vysokými prietokmi v sledovanej časovej rade v komparatívnej analýze.

Metódy hodnotiace maximá sú rovnaké ako v prvom kroku s tým, že je viac prezentovaná ich sezónnosť a sú zamerané len na úsek Hrona po Zlatno. Trendy vo vývoji miním a maxím sú hodnotené MK testom a lineárnou regresiou. Variabilita hydrologických parametrov je sledovaná pomocou koeficientu disperzie.

V *treťom kroku* je detailnejšie hodnotený extrém povodní (**príloha 8.3**). Z časového hľadiska bol tento krok prvý a odštartoval celý výskum štúdia hydroklimatických extrémov horného Hrona. Vychádza z diplomovej práce autorky, v ktorej analyzovala povodne na hornom Hrone v období 1930-2009. Zo štúdia dostupných literárnych prameňov a materiálov k povodniam na Hrone bolo zistené, že k jednotlivým povodniam do začiatku 90. rokov 20. storočia chýbajú záznamy napr. k ich príčinám či dôsledkom (dostupnejšie len u najextrémnejších). Práve dostupnosť informácií, rozdielna a podrobnejšia metodika spracovania povodní od začiatku 90. rokov (zachytené príčiny i dôsledky), rozdelila celé skúmané obdobie povodňovej aktivity na dve: 1930-1991 a 1992-2009(2010). Sledovanie frekvencie povodní rozdelilo časovú radu ešte iným spôsobom, a to na dve rovnako dlhé obdobia 1950-1979 a 1980-2009 (snaha o vynechanie obdobia 40. rokov). Sezónnosť povodní je určená na základe dňa kulminácie, pričom povodne sú rozdelené do dvoch povodňových režimov; zimného a letného, na základe ktorých sú ďalej analyzované. Kritériom pre vymedzenie samotných povodní sú dosiahnuté stupne povodňovej aktivity (SPA). Pre zaradenie povodne do vytvorenej databázy musela povodeň dosiahnuť minimálne I. SPA. Jednotlivé SPA boli odvodené z hodnôt vodných stavov Slovenským vodohospodárskym podnikom. Po veľkej povodni v roku 1974 boli hodnoty vodných stavov pre dosiahnutie určitého SPA upravované (navýšené), a preto nesúhlasili s údajmi u starších povodní. Z tohto dôvodu boli SPA u starších povodní určené na základe novších hodnôt.

V *štvrtom kroku* je bližšie hodnotený extrém sucha (**príloha 8.4**) a to hlavne s ohľadom na zmeny v snehovej pokrývke. Tá je dôležitá pre vývoj odtoku a v predchádzajúcich krokoch

jej nebol venovaný dostatočný priestor. Prezentovaná časovo-priestorová analýza je zameraná okrem povodia horného Hrona i na vybrané povodia v Českej republike a vo Švajčiarsku (výber povodí podliehal dostupnosti dát). Snahou je porovnať chovanie povodí v rôznych nadmorských výškach, ktoré sa môže vplyvom zmien hydroklimatických parametrov meniť. Pri hodnotení snehovej pokrývky je dôraz kladený na výskum zmien skupenstva zrážok. Tieto sú hodnotené na základe použitia metód Snowfall fraction (Jeníček et al., 2016) a Snow day ratio (Sawicz et al., 2011). Metóda Snowfall fraction je používaná viac, ale aby bolo možné výsledky porovnať i s inou metódou, je zvolená i metóda Snow day ratio. Výber prahovej hodnoty teploty vzduchu podliehal prieskumu, ktorá prahová hodnota je používaná najviac (opäť s možnosťou porovnania výsledkov), preto je zvolená hodnota 1°C. Pre porovnanie rozdielov vo výsledkoch sú však vyskúšané i hodnoty 0.5 a 0°C.

Následne je skúmaný vývoj trendov Snowfall fraction i Snow day ratia, spoločne s trendmi vývoja hydroklimatických parametrov v časovej rade 1966-2012. Využitá je pritom modifikovaná verzia MK. Originálny neparametrický MK test (Kendall, 1938; Mann, 1945), použitý v prvom kroku má totiž tu nevýhodu, že je navrhnutý pre tzv. iid (independent and identically-distributed) veličiny. To znamená, že pred jeho aplikáciou je vyžadovaná nezávislosť dát a niekedy tiež rovnaké štatistické rozdelenie náhodných veličín (pričom u neparametrických testov nezáleží na tom o aké ide konkrétne). Problém porušeného predpokladu nezávislosti dát je poslednou dobou často študovaný i v hydrológii, pretože environmentálne časové rady (a nielen tie) vykazujú tzv. autokorelovanosť čo znamená, že najmenej autokorelačný (autoregresný) koeficient prvého rádu sa štatisticky významne odlišuje od nuly. Pozitívna autokorelovanosť s ktorou sa v hydrológii stretávame najčastejšie, spôsobuje tzv. infláciu rozptylu testovej štatistiky. Pri nej je pozorovaný rozptyl väčší než by sme očakávali za platnosti nulovej hypotézy, kde je vyžadovaná nezávislosť dát. Negatívna autokorelácia má presne opačný efekt. MK test s modifikáciou trend-free prewhitening (TFPW) bol v hydrológii pôvodne navrhnutý pre zohľadnenie (tj. odstránenie) vplyvu pozitívnej časovej autokorelácie na trend (Yue et al., 2002a). Bolo ale preukázané, že je vhodný i pre negatívne autokorelované dáta (napr. Rivard et al., 2009). To z tohto testu činí pomerne univerzálny test pre trend, kedy nie je nutné dopredu skúmať typ autokorelácie. Preto bola zvolená táto modifikácia testu.

Suché obdobia sú klasifikované použitím threshold metódy použitím funkcie Find droughts v R (Gustard a Demuth, 2009) s tým, že z celého súboru sú analyzované len tie najdlhšie (trvajúce viac ako 40 dní). Tieto sú na základe upravenej typológie sucha podľa Van Loona (2015) ďalej hodnotené. Zisťovaný je prevládajúci typ sucha na jednotlivých povodiach, podľa čoho sú následne povodia zoskupené. Aby bolo možné vysvetliť možné príčiny výskytu suchých období, je skúmaná závislosť hydroklimatických parametrov Pearsonovým korelačným koeficientom. Ten je použitý i v prípade skúmania možného vplyvu predchádzajúcej zimy na vznik sucha.

Terénny výskum v povodí horného Hrona bol realizovaný v rokoch 2008, 2009, 2010, 2014 a 2016. Jeho cieľom bolo pozorovať povodie a jeho zmeny v jednotlivých ročných obdobiach. Pozorované boli vysoké i nízke vodnosti toku, jeho režim v chladnom i teplom polroku. Výstupom terénneho výskumu je fotografický materiál.

Následujúca **Tab. 6** uvádza súhrn všetkých použitých metód s uvedením zdroja pre výpočet a číslom článku, v ktorom je daná metóda použitá.

Tab. 6 Súhrn použitých metód

Methods evaluate	Calculated according to	Find in article
Trends and changes		
Mann-Kendall test (unmodified version)	Mann (1945), Kendall (1975)	8.1, 8.2
Mann-Kendall test (modified version)	Yue et al. (2002a)	8.4
Comparative analysis	Richter et al. (1998)	8.2
Linear regression	MS Excel 2010	8.1, 8.2
Simple-mass curves	MS Excel 2010	8.1
Correlation and variability		
Pearson correlation coefficient	Hollander et al. (2013)	8.4
Coefficient of dispersion	Richter et al. (1998)	8.1, 8.2
Floods		
Extremity, frequency and seasonality analysis	the methods below	8.1, 8.2, 8.3
Flood activity level (SPA)	SVP, B. Bystrica; Remžík a Janko (1987)	8.3
Return period (N-year flood event)	Ministry of Forestry and Water Management of Slovakia (1987)	8.1, 8.2
Threshold method, Peak flow	Richter et al. (1998)	8.1, 8.2
Date of culmination	Remžík a Janko (1987), SHMÚ a SVP BB	8.1, 8.2, 8.3
Droughts		
Extremity, frequency and seasonality analysis	the methods below	8.1, 8.2, 8.3
Base flow index	Richter et al. (1998)	8.1, 8.2
Low flow index	Poff a Ward (1989)	8.2
Relative precipitation index	Novický et al. (2008)	8.2
de Martonne Aridity index	eMS (2015)	8.2
Defining dry episodes by threshold method	Blahušiaková a Matoušková (2016)	8.2
Find droughts, Threshold method	Gustard a Demuth (2009)	8.4
Typology of droughts	Van Loon (2015)	8.4
Proportion of precipitation		
Snowfall fraction	Jeníček et al. (2016)	8.4
Snow day ratio	Sawicz et al. (2011)	8.4
Programs and software		
Indicators of Hydrological Alteration (IHA)		8.1, 8.2
IHA 7.1 statistics software		8.1, 8.2
R version 3.5.1		8.4
MS Excel 2010		8.1, 8.2, 8.3, 8.4
ArcGIS 10.5		8.1, 8.2, 8.3
Adobe Photoshop CS6, CC2019		8.1, 8.2, 8.4

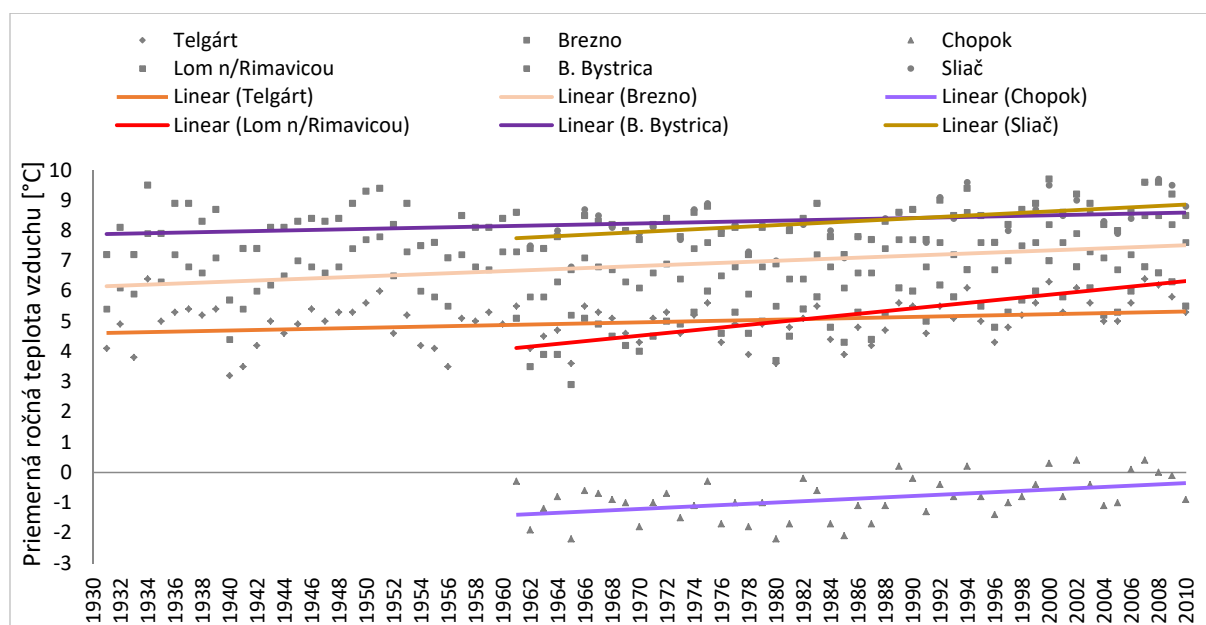
6 SYNTÉZA A DISKUSIA VÝSLEDKOV

6.1 Trendy zrážkovo – odtokového režimu vybraných hydroklimatických parametrov

Detekcia trendov hydroklimatických parametrov je zásadnou časťou sledovania dopadov ich zmien na hydrologický režim horného Hrona. Analýzy ukázali, že k signifikantným zmenám skúmaných parametrov dochádza približne od 80. rokov 20. storočia s výraznejšími prejavmi od 90. rokov.

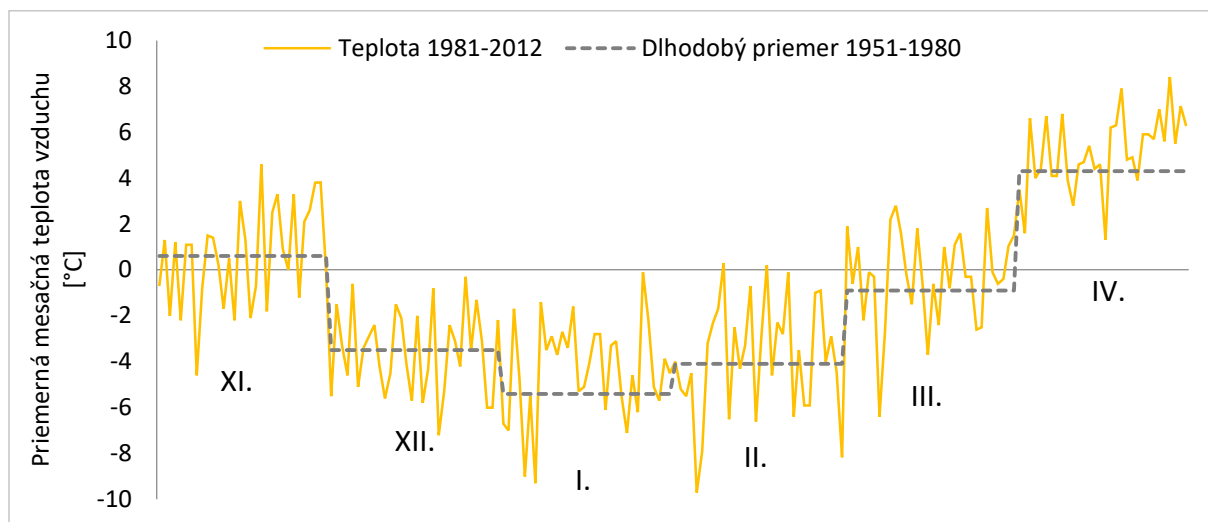
6.1.1 Trendy vo vývoji ročnej, sezónnej a mesačnej teploty vzduchu

K pochopeniu zmien hydrologického režimu horného Hrona a k objasneniu ich príčin sú najprv detekované trendy klimatických parametrov; teploty vzduchu, zrážok a snehovej pokrývky (Blahušiaková a Matoušková, 2015). Pri teplote sú zaznamenané najsignifikantnejšie trendy zo všetkých skúmaných parametrov. K jej rastu dochádza na všetkých skúmaných staniách. Na **Obr. 11** je vidieť, že k najväčšiemu rastu došlo na južne položených staniách Lom nad Rimavicou a Brezno. Na staniách horného Hrona stúpa priemerná ročná teplota od 80. rokov o 0.4 až 1.2°C, čo je porovnateľné s výsledkami Danihlíka et al. (2004), Szolgaya et al. (2008) a Lapina et al. (2012) na Slovensku alebo Klimenta et al. (2011) a Langhammera et al. (2015) v Českej republike.



Obr. 11 Vývoj priemernej ročnej teploty vzduchu 1931/61-2010

Sezónna a mesačná teplota signifikantne rastie na hornom Hrone v teplom polroku (V.-X.), najviac od mája do augusta, čo zaznamenali v európskom regióne i [Scherrer et al. \(2006\)](#), [Kliment et al. \(2008\)](#) alebo [Luterbacher et al. \(2016\)](#). V chladnom polroku (XI.-IV.) stúpa najviac v apríli a v januári, čo je pozorované napríklad v Telgárte (**Obr. 12**). Rast aprílovej teploty podtrhuje i fakt, že v posledných rokoch nie je neobvyklé, že sa krátke vlny horúčav objavujú už na konci apríla ([Výberči et al., 2015](#)) alebo začiatkom mája ([Labudová et al., 2015](#)). V porovnaní s trendmi odtoku sa početnosť trendov teploty so skracovaním časovej rady zvyšuje. Súvisí to s otepľovaním v posledných desaťročiach, ktoré je ako uvádzajú [Luterbacher et al. \(2016\)](#), najvýraznejšie za uplynulých 2000 rokov.



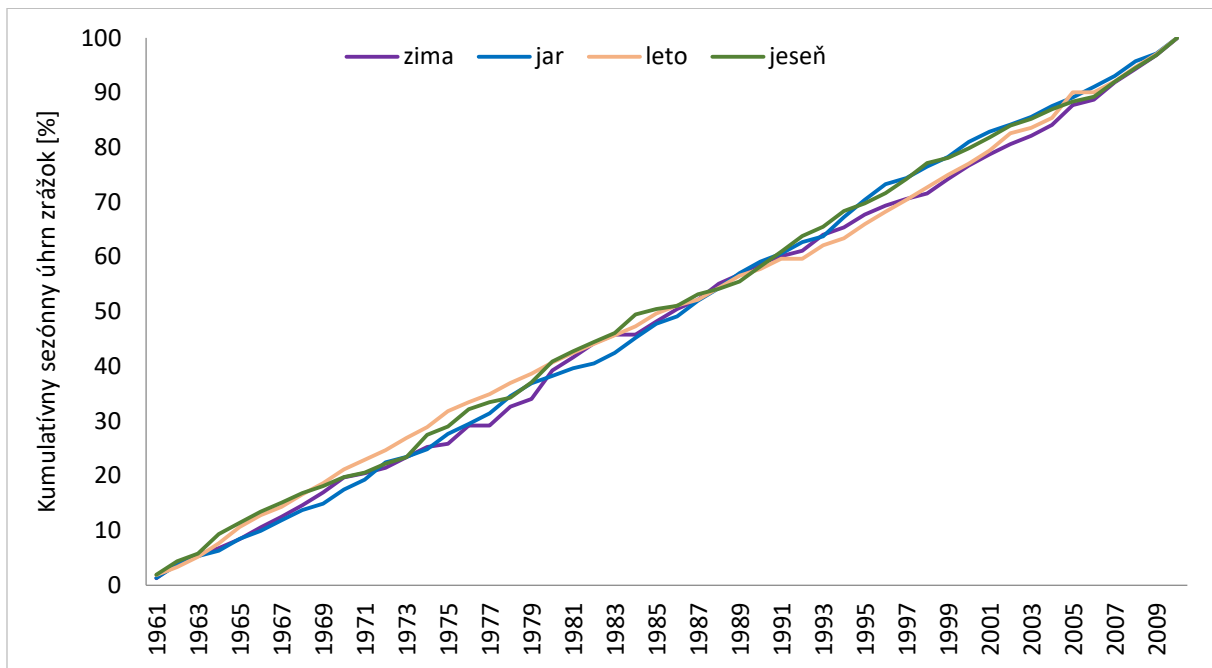
Obr. 12 Porovnanie vývoja teploty vzduchu v chladnom polroku v Telgárte v období 1981-2012 s dlhodobým priemerom 1951-1980

6.1.2 Trendy vo vývoji ročných, sezónnych a mesačných zrážkových úhrnov a snehu

V ročných zrážkových úhrnoch sa v povodí horného Hrona neobjavujú signifikantné trendy. Podrobnejšie analýzy ale odhalili zmeny v ich prerozdelení počas roka. Sezónne rastú v máji a mierne klesajú v novembri a februári. Mierne stúpajúce jarné úhrny zrážok, ktoré sú pozorované od 90. rokov napríklad v Telgárte, zobrazuje **Obr. 13**. Rastúci trend zimných zrážkových úhrnov pozorovaný na Slovensku ([Labudová et al., 2015](#); [Zeľňáková et al., 2017](#)) i v niektorých ďalších oblastiach centrálnej Európy ([Hänsel et al., 2007](#); [Kliment et al., 2011](#); [Nováky a Bálint, 2013](#); [Langhammer et al., 2015](#)) nebol v povodí horného Hrona štatisticky signifikantne potvrdený, i keď na niektorých staniciach dochádza k miernemu rastu. K významným štatisticky signifikantným zmenám zatiaľ nedochádza ani v lete a na jeseň.

V chladnom polroku dochádza k signifikantným zmenám skupenstva zrážok. Tieto zmeny sú výraznejšie od 90. rokov. Ako príklad možno uviesť vývoj hodnôt Snowfall fraction na stanici Telgárt, zobrazený na **Obr. 14**. K najväčšiemu poklesu dochádza predovšetkým na jar (marec a apríl), ale tiež i v januári a novembri. Hlavným dôvodom poklesu je stúpajúca teplota, ktorá predovšetkým v druhej polovici jari negatívne ovplyvňuje trvanie a množstvo snehovej pokrývky. Najviac sa to prejavuje v stredných a nižších nadmorských výškach (do cca 1500 m) a najmenej vo vyšších polohách, čo ukazujú výsledky z povodia horného Hrona i z povodí v Českej republike a vo Švajčiarsku (Článok 8.4). Vo vyšších polohách, i keď tu

teplota v chladnom polroku stúpa najviac, sú teploty počas zimy pod bodom mrazu, čo udržiava zrážky v tuhom skupenstve. K podobným záverom dospeli v Alpách [Giorgi et al. \(1997\)](#) alebo na Slovensku [Labudová et al. \(2015\)](#).

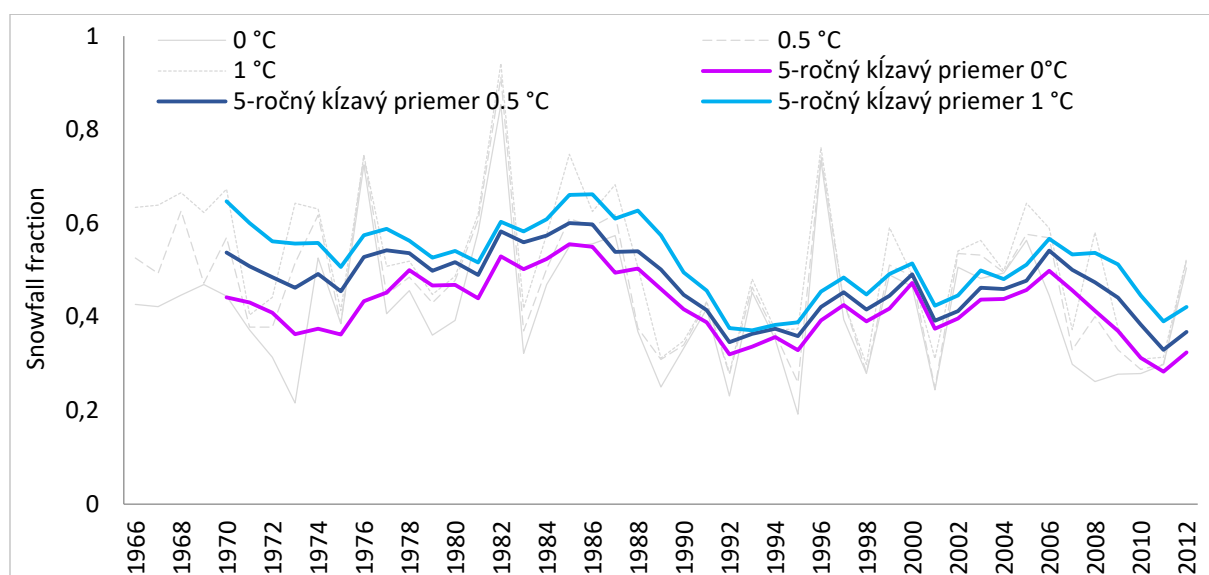


Obr. 13 Vývoj zrážkových úhrnov v jednotlivých sezónach v Telgárte v období 1961-2010

Klesajúce trendy tuhej zložky zrážok zaznamenali na Slovensku i ďalší autori ([Vojtek et al., 2003](#) a [Faško et al., 2018](#)), v Českej republike ([Brázdil et al., 2009a](#) a [Langhammer et al., 2015](#)) alebo vo Švajčiarsku ([Pellicciotti et al., 2010](#) a [Jeníček et al., 2016](#)). V skúmaní skupenstva zrážok je podstatné zvoliť vhodnú prahovú hodnotu teploty vzduchu. Pre oblasť Európy, ktorá je obecnne blízko priemeru severnej pologule, je odporúčaná teplota 1°C, ktorú použil napr. [Dai \(2008\)](#), [Berghuijs et al. \(2014\)](#) alebo [Jeníček et al. \(2016\)](#). Zvolená je i v práci [Blahušáková et al. \(-\)](#). Vyskúšané sú však i teploty 0.5 a 0°C, v snahe porovnať vplyv zvoleného prahu na zmeny skupenstva zrážok. Z výsledkov vyplýva, že posun prahovej teploty z 0 na 1°C spôsobuje zvýšenie početnosti a sily klesajúcich trendov Snowfall fraction i Snow day ratia, a to predovšetkým v stredných a nižších nadmorských výškach. Vo vyšších nadmorských výškach je to presne naopak. Tu sila a početnosť klesajúcich trendov rastie s poklesom teploty. So stúpajúcou nadmorskou výškou totiž obecnne klesá teplota a zrážky sa častejšie objavujú v tuhom skupenstve.

Centrálna Európa je prechodovou zónou medzi rastúcimi a klesajúcimi zrážkami, pričom v jej J časti je zaznamenaný klesajúci trend ročného úhrnu zrážok ([Hunkár Zemankovics, 2012](#); [Nováky a Bálint, 2013](#)) a naopak v S a Z stúpajúci trend ([Degirmendžić et al., 2004](#); [Birsan et al., 2005](#); [Hänsel et al., 2007](#); [APCC, 2014](#)). Podobné rozdiely môžeme sledovať na území Slovenska s rastúcim trendom zrážok na S a klesajúcim na J, čo potvrdzujú výsledky [Mindáša et al. \(2011\)](#) alebo [Zeľňákovéj et al. \(2017\)](#) a predpovedajú to i klimatické modely pre Slovensko ([Szolgay et al., 2008](#)). Síce nesignifikantne ale i na skúmaných staniach horného Hrona bol pozorovaný pokles zrážok na J povodia (reprezentovaný

stanicami Lom nad Rimavicou a Sliač). Len veľmi nepatrný rast bol zaznamenaný v B. Bystrici a o niečo väčší na S (reprezentovaný stanicami Chopok, Mýto pod Ďumbierom, Telgárt).

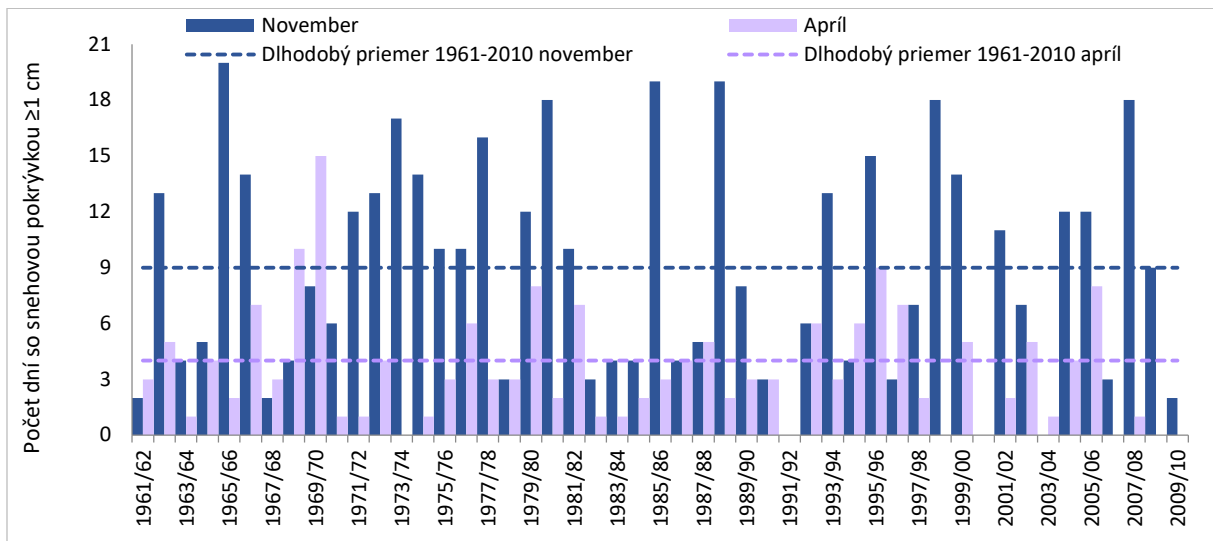


Obr. 14 Podiel tuhých zrážok na celkovom úhrne zrážok v chladnom polroku (XI.-IV.) v Telgárte v období 1966-2012

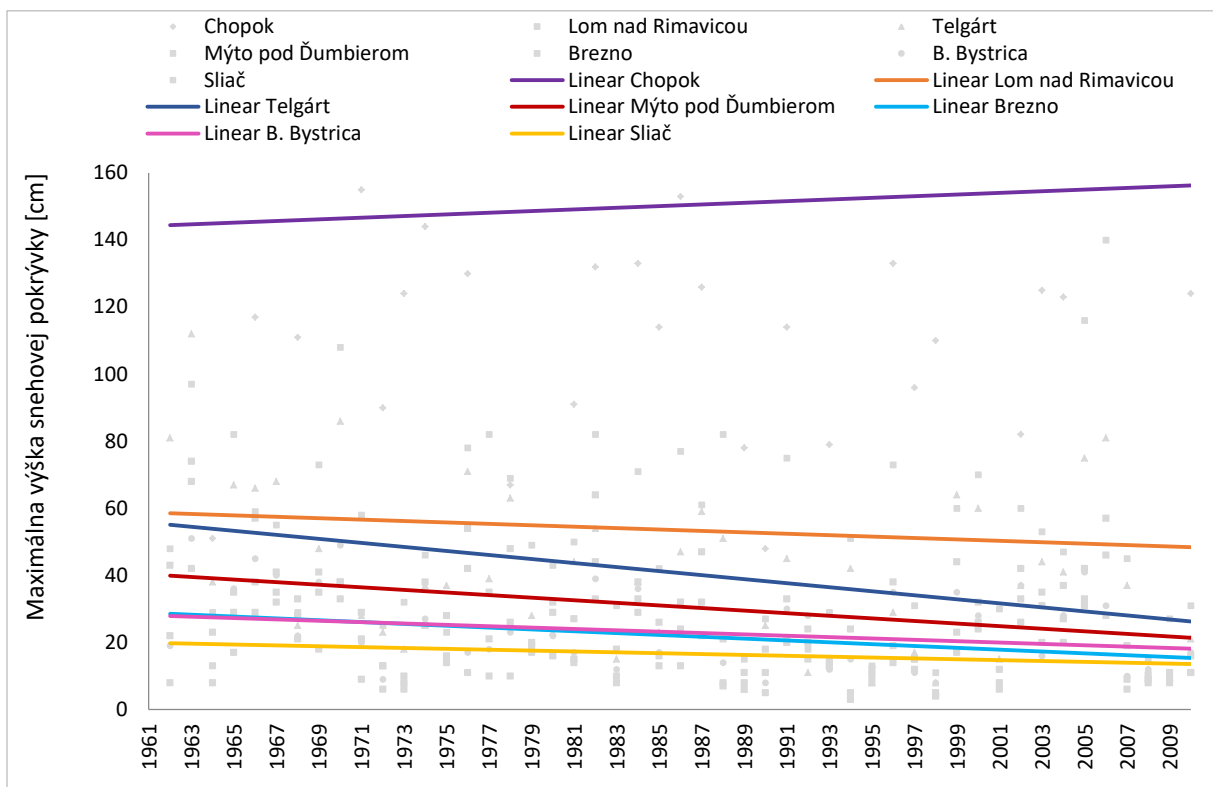
Rastúca teplota ovplyvňuje pokles snehovej pokrývky, ktorá na hornom Hrone signifikantne klesá. Zmeny v snehovej pokrývke sú pozorované od 80. rokov, pričom zahŕňajú jej pokles i väčšiu variabilitu. Podobne už [Holko et al. \(2005\)](#) sledovali v južných častiach povodia horného Hrona opakované slabé zimy striedajúce sa s nadpriemerným rokom so snehovými zrážkami. Hlavne od 90. rokov sledujeme výraznejší pokles snehu v nižších a stredných nadmorských výškach. Analýzy na povodí horného Hrona, ale i v Českej republike a vo Švajčiarsku potvrdili, že práve tieto oblasti sú vystavené častejšej zmene skupenstva zrážok a sú teda na jej pokles náchylnejšie ([Blahušiaková et al., -](#)). Podobnú situáciu v ďalších povodiach centrálnej Európy sledovali [Vojtek et al. \(2003\)](#), [Pellicciotti et al. \(2010\)](#) alebo [Faško et al. \(2018\)](#).

Pozorovaný je sezónny posun súvislej snehovej pokrývky a to z obdobia december až február na január až marec. Tento posun súvisí s rastúcou teplotou na začiatku zimy a je potvrdený i znižujúcim sa počtom dní so snehom na niektorých stanicach, hlavne na začiatku a konci zimnej sezóny. Toto možno pozorovať na **Obr. 15**, kedy hlavne v období od 90. rokov bolo trvanie snehovej pokrývky v niektorých zimných sezónach kratšie. Dokonca v niektorých rokoch sa snehová pokrývka nevyskytla ani v novembri ani v apríli. K podobnému trendu dochádza i v Českej republike ([Langhammer et al., 2015](#); [Bílá et al., 2018](#)). Súčasne na viacerých stanicach v stredných a nižších nadmorských výškach klesá i hodnota maximálnej výšky snehovej pokrývky. Výrazný pokles bol zaznamenaný napríklad v Telgárte, čo zobrazuje **Obr. 16**. K signifikantnému poklesu výšky snehovej pokrývky, ako i jej maximálnej hodnoty dochádza v zime hlavne v januári a decembri a na jar v apríli. Tento pokles koreluje s rastom teploty. Podobný vývoj je sledovaný v pramenných oblastiach Otavy v Českej republike ([Kliment a Matoušková, 2007](#)). Vo všetkých mesiacoch zimnej sezóny zaznamenali na hornom Hrone pokles snehovej pokrývky [Juričková et al. \(2013\)](#), pričom najväčší bol

v tomto období sledovaný v decembri, januári a februári [Kotříková et al. \(2014\)](#), čo potvrdili i naše výsledky. Poklesy snehovej pokrývky boli rovnako pozorované v Alpách ([Schöner et al., 2009](#); [Pellicciotti et al., 2010](#); [Jeniček et al., 2016](#); [Marty et al., 2017](#)).



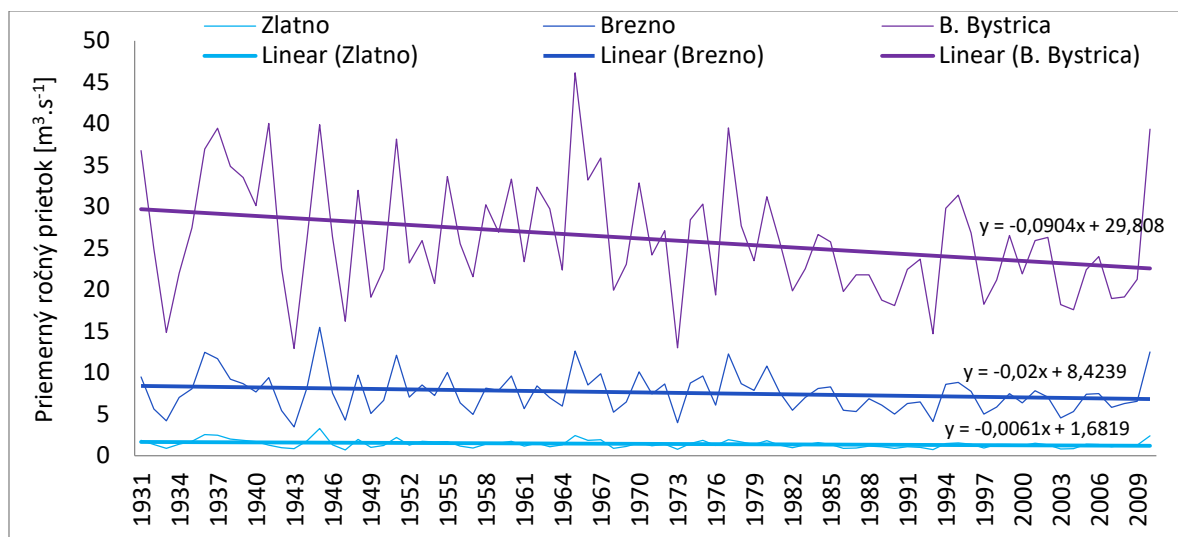
Obr. 15 Vývoj počtu dní so snehovou pokrývkou v novembri a apríli v Telgárte v období 1961/62-2009/10



Obr. 16 Trendy vývoja maximálnej výšky snehovej pokrývky v chladnom polroku (XI.-IV.) v období 1961-2010

6.1.3 Trendy vo vývoji ročného, sezónneho a mesačného odtoku

Povodie horného Hrona je klasifikované ako povodie s klesajúcim dlhodobým odtokom (Poórová et al., 2013a). Hodnotenie odtoku horného Hrona v období 1931-2010 potvrdilo jeho významný pokles na všetkých vodomerných staniciach (Blahušiaková a Matoušková, 2015). Najvýraznejší pokles bol zaznamenaný v B. Bystrici, čo zobrazuje Obr. 17. Skrátением časovej rady na obdobie od 60. rokov sa však okrem B. Bystrice významné trendy strácajú. Pokles odtoku v B. Bystrici, ktorá v rámci záujmového povodia leží najjužnejšie, potvrdzujú zistenia Mindáša et al. (2011), ktorí pozorujú v jeho vývoji na Slovensku regionálne rozdiely. Výraznejší pokles odtoku je sledovaný v oblasti J a centrálneho Slovenska, kde leží i záujmové povodie horného Hrona. Toto povodie, podobne ako centrálna Európa, leží na hranici medzi rastúcim resp. miernejšie klesajúcim odtokom na S a výraznejšie klesajúcim odtokom na J. Potvrdzujú to i práce z ostatných oblastí centrálnej Európy (Pellicciotti et al., 2010; Nováky a Bálint, 2013; Bernsteinová et al., 2015; Kormann et al., 2015; Piniewski et al., 2018).



Obr. 17 Vývoj priemerných ročných prietokov v Zlatne, Brezne a B. Bystrici v období 1931-2010

Podobná situácia je v období 1931-2010 pri sezónnom odtoku, kde pozorujeme jeho významný pokles v chladnom (november až február v Zlatne, november a február v Brezne, november a december v B. Bystrici) i v teplom polroku (jún v B. Bystrici). Skrátением tohto obdobia na obdobie od 60. rokov klesá významne len letný odtok (jún v Zlatne a B. Bystrici, od r. 1961) a dochádza k poklesu jarného odtoku (máj v Zlatne, od r. 1966), čo možno dávať do súvisu s predpokladaným znižovaním sa odtoku na jar a v lete, vplyvom rastu teploty a poklesu zrážok (Hlavčová et al., 2010). Zimný odtok významne klesá v novembri a decembri len v prípade skrátения i konca časovej rady tzn. 1960-1990, čo zas súvisí s predpokladaným zvyšovaním sa zimného odtoku (Hlavčová et al., 2010). Naznačujú to i výsledky komparatívnej analýzy, ktorá odhalila pokles odtoku takmer vo všetkých mesiacoch roka, ale práve na začiatku zimnej sezóny zaznamenala jeho nepatrný rast (október a november) resp. žiadny pokles ani rast (december). Práve v mesiacoch chladného polroka bola zistená najväčšia variabilita odtoku medzi skúmanými obdobiami 1951-1980

a 1981-2010. Zmeny vo vývoji odtoku v tejto sezóne roka možno pokladať za určujúce v celkom ročnom vývoji odtoku.

Klimatické modely predikujúce hydrologické odozvy z budúcich klimatických zmien (Stahl et al., 2010) predpokladajú na väčšine európskych povodií zvýšenie zimného odtoku a jeho pokles na jar a hlavne v lete. Takýto vývoj bol už zaznamenaný v pramenných oblastiach Otavy v Českej republike (Kliment a Matoušková, 2007). Podobný očakávaný predpoklad s rastom odtoku od novembra/decembra do februára/marca a jeho poklesom od mája do októbra/novembra v povodí horného Hrona (Hlavčová et al., 2010) sa podľa našich analýz v prípade zimného odtoku nepotvrdil. Naopak v skúmanej časovej rade 1931-2010 zimný odtok signifikantne klesá. I od 60. rokov na všetkých staniách stále klesá. Tento pokles však nie je štatisticky významný. Skracovaním časovej rady a na druhej strane jej predlžovaním o obdobie posledných desaťročí (skúška na časovej rade 1961-2015), je pozorovaná zmena vo vývoji zimného odtoku smerom k pozitívnym trendom, nie je však zatiaľ štatisticky významná. Toto možno dávať do súvisu s rastom teploty a jej vplyvom na zrážkové úhrny, ktoré odtok v zime ovplyvňujú. Klesajúce trendy odtoku v chladnom polroku pozorovali v povodí horného Hrona i Majerčáková et al. (2004), Šipikalová et al. (2006), Demeterová a Škoda (2009) a Poárová et al. (2013a, 2013b). V týchto prípadoch však nie je do hodnotení zahrnuté obdobie posledných rokov. Podobnú situáciu sledujeme i v poklese jarných a letných prietokov, ktoré od 60. rokov klesajú signifikantne na niektorých staniách hlavne v júni a tiež v máji, nesignifikantne však klesajú vo všetkých mesiacoch, čo potvrdila i komparatívna analýza. Na viacerých povodiach centrálnej Európy (Kulasová et al., 2008; Kliment et al., 2011; Nováky a Bálint, 2013; Kormann et al., 2015) sú už signifikantné trendy rastúceho odtoku v zime a klesajúceho na jar a v lete pozorované. Potvrdili to i naše hodnotenia na povodiach v Českej republike a vo Švajčiarsku (článok 8.4).

Napĺňanie predpovedí vývoja odtoku v povodí horného Hrona možno porovnať so scenárom do r. 2010 (referenčné obdobie 1951-1980), ktorý zostavili pre toto povodie Danihlík et al. (2004). Scenár predpokladal pokles ročného odtoku do r. 2010 v rozmedzí 6-16 %, pri raste teploty o 0.5 až 1°C a zvýšení zrážkových úhrnov o 0.1 %. Z nameraných dát je zistený pokles ročného odtoku v rozmedzí 17-18 %, čo mierne presahuje najväčší predpokladaný pokles (porovnávané obdobia 1961-1980 a 1981-2010). Tento rozdiel je pravdepodobne spôsobený rozdielnymi výsledkami vývoja zrážkových úhrnov i o niečo vyšším rastom teploty vzduchu. Zrážky totiž na niektorých staniách skôr klesajú (Brezno 3%), naopak na niektorých stúpajú (Telgárt 0.5 %, B. Bystrica 5 %). Rastúca teplota v rozmedzí 0.4 až 1.2°C, toto rozloženie zrážok a ich skupenstvo i výpar ovplyvňuje. Berghuijs et al. (2014) i Dierauer et al. (2018) poukazujú na to, že práve množstvo zrážok a ich skupenstvo je jedným z determinujúcich faktorov ovplyvňujúcich odtok. Predpoklad, že vyššie teploty v chladnom polroku spôsobujúce častejšie a skoršie topenie snehovej pokrývky budú odtok zvyšovať, sa však signifikantne v povodí horného Hrona nepotvrdil. Na základe upravenej časovej rady (skrátene začiatku a predĺženie konca) možno konštatovať, že sa v povodí horného Hrona pravdepodobne postupne (nie je zatiaľ štatisticky potvrdené) budú napĺňať scenáre, ktoré predpovedajú rast odtoku v zimnom období a jeho pokles v lete (Szolgay et al., 1997; Hlavčová et al. 2008; Štefunková et al., 2014; Rončák et al., 2016, 2019).

Trendová analýza na povodí horného Hrona potvrdzuje fakt, že pri aplikácii štatistických testov je dĺžka zvolenej časovej rady veľmi dôležitá a ovplyvňuje početnosť signifikantných trendov (Mann, 1945, Kendall 1975, Yue et al., 2002b). Skúškou pozorovania trendov na rôzne dlhých časových radoch a ich kombináciách sa naozaj potvrdilo, že

najpočetnejšie trendy sa vyskytujú v najdlhšej časovej rade od 30. rokov. Z dôvodu možného odstránenia časti trendu je niekedy kritizovaný použitý modifikovaný test TFPW-MK, pretože ich odstránenie môže spôsobovať zníženie sily testu a teda nedetekovania niektorých skutočných trendov (Önöz a Bayazit, 2012). Rovnako tiež predpoklad procesu AR(1), ktorý vystihuje tzv. krátku pamäť v časových radoch, môže byť nesprávny, s čím môže súvisieť naopak detekovanie nadmerného množstva trendov pri existencii dlhej pamäti (Hamed, 2008). Pri porovnaní výsledkov nemodifikovanej a modifikovanej verzie MK testu (Tab. 7) môžeme sledovať prvý prípad, a to nedetekovanie niektorých trendov u parametrov súvisiacich so snehom. Toto však môže byť spôsobené i tým, že snehové dáta nemajú tak dlhú časovú radu meraní a sú limitované dátami len z chladnej polovice roka, čo môže mať negatívny vplyv na výskyt a počet významných trendov. Obecne výsledky oboch verzií testov sú celkom porovnateľné s o niečo silnejšími trendmi u nemodifikovanej verzie. Práve z vyššie uvedených dôvodov je nutné podotknúť, že výsledky MK testu by mali byť brané s maximálnou obozretnosťou, čo však platí i o iných štatistických testoch.

Tab. 7 Porovnanie výsledkov nemodifikovanej (U) a modifikovanej (M) verzie Mann-Kendallovho testu v stanici Zlatno a Telgárt v období 1966-2012

	U	M	U	M	U	M	U	M	U	M	U	M	U	M					
	Q		Q _{min}		Q ₉₀		T		P		S _d		S _{dmax}		Sf		R _{SD}		
XI																			-1.9
XII											-2.2		-2.2						
I											-2.7	-21.1	-2.7	-21.1	-2.3				-2.1
II																			
III															-2.2	-0.3			
IV					3.0	2.4					-2.0		-2.0		-3.2	-0.1		-3.8	-0.3
V	-2.4	-1.2																	
VI					3.2	2.1													
VII					2.9	2.3													
VIII					4.1	2.2													
IX																			
X																			
Year					3.3	1.0									-2.2			-3.0	-0.1
XI-IV											-1.9				-2.4	-0.2		-3.4	-0.2

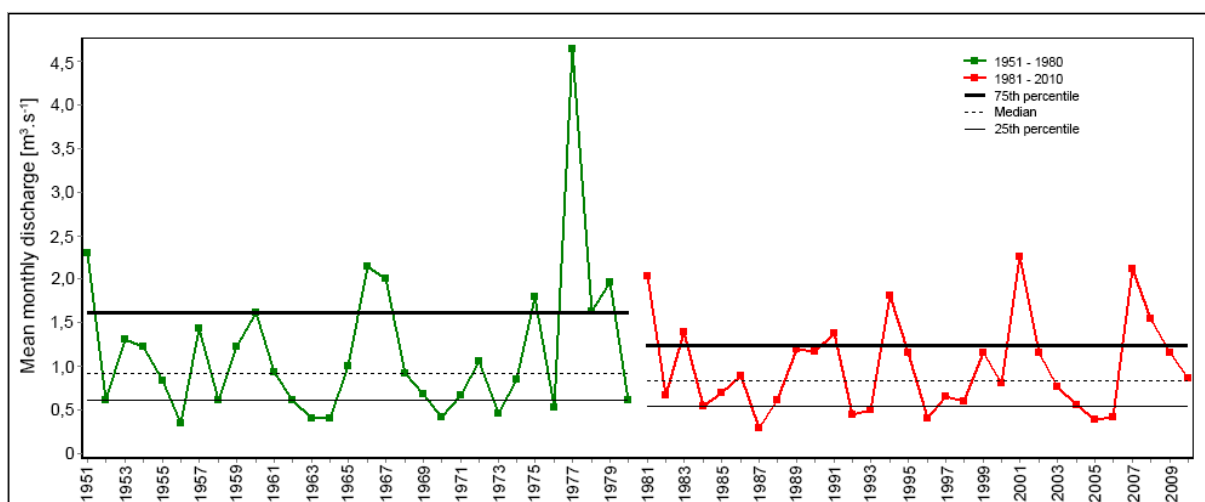
Vysvetlivky: Q – prietok, Q_{min} – minimálny prietok, Q₉₀ – prietok dosiahnutý alebo prekročený 90 dní v roku, T – teplota vzduchu, P – úhrn zrážok, S_d – výška snehovej pokrývky, S_{dmax} – maximálna výška snehovej pokrývky, Sf – Snowfall fraction, R_{SD} – Snow day ratio; použitá p-hodnota 0.05

6.2 Hodnotenie extrému povodní a maximálneho odtoku

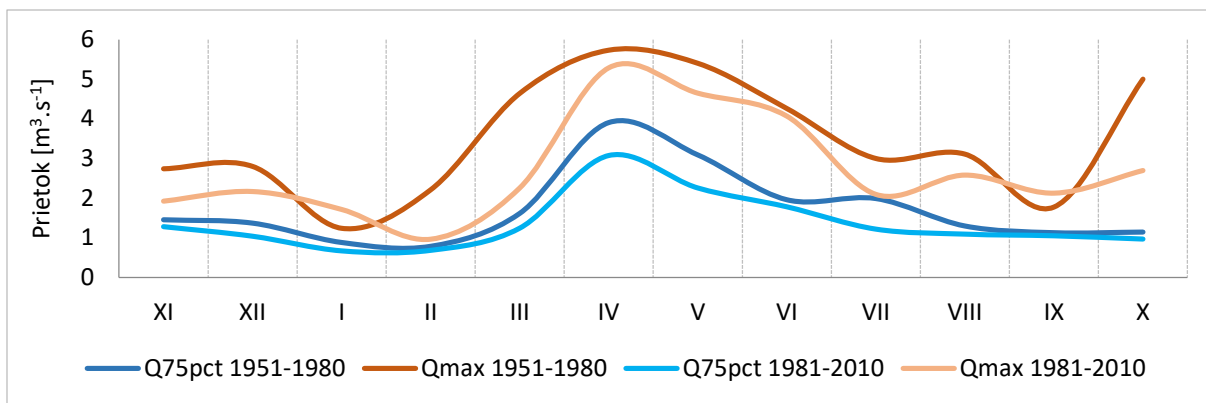
Na začiatku skúmania povodňového režimu horného Hrona, bola na základe pravdepodobnosti prekročenia, vyhodnotená vodnosť jednotlivých rokov časovej rady 1961-2010. Najviac vodnými boli obdobia 1965-1967, 1974-1981, 1994-1996, 1998-1999 a roky 2001, 2005, 2006 a 2010. Z toho najviac mimoriadne vodné, boli roky 1965, 2010 a 1975. Na základe vyhodnotenej vodnosti (ktorú v ďalšej fáze výskumu potvrdili výsledky de Martonne

Aridity indexu), bolo možné predpokladať, že sa práve v týchto obdobiach vyskytli povodňové udalosti.

Dôležitým bodom vyhodnotenia povodní, bolo skúmanie vývoja maximálneho odtoku, jeho trendov i zmien (Blahušiaková a Matoušková, 2016). Podľa výsledkov MK testu sa vodnosť horného Hrona z pohľadu maxím znižuje. Signifikantne klesala hodnota ročného i sezónneho maximálneho odtoku v období 1931-2010. Sezónny maximálny odtok v chladnom polroku, klesal vo všetkých mesiacoch, signifikantne v novembri, decembri a februári. Rovnako vo všetkých mesiacoch teplého polroka bol zaznamenaný trend poklesu, avšak štatisticky je nesignifikantný. Skrátením časovej rady na obdobie od 60. rokov, sa signifikantné trendy strácajú. Došlo tiež k zmene vývoja maximálneho odtoku v decembri, januári a októbri, kedy bol zaznamenaný ich rast. Nie je ale štatisticky významný. Klesajúcu vodnosť horného Hrona potvrdili i výsledky komparatívnej analýzy. Napríklad v Zlatne, došlo medzi obdobím 1951-1980 a 1981-2010, k poklesu maximálneho odtoku v chladnom polroku v priemere o 25 % a v teplom polroku o 18 %. V chladnom polroku k najväčšiemu poklesu došlo v marci, čo potvrdzuje klesajúca hodnota 75-percentného mesačného prietoku (**Obr. 18**). Maximum však výrazne klesá i vo februári, novembri a decembri, čo potvrdil MK test. Najväčší pokles v teplom polroku, bol zaznamenaný v októbri a júli. Naopak rast maximálneho odtoku vykazoval január a september, čo je vidieť na **Obr. 19**. U denných hodnôt maximálneho odtoku bol najväčší pokles objavený v hodnotách 1-, 3- a 7-denného maxima. Výsledky komparatívnej analýzy denných i mesačných hodnôt maximálneho odtoku zobrazuje **Tab. 8**.



Obr. 18 Vývoj priemerného mesačného prietoku v Zlatne v mesiaci marec medzi obdobím 1951-1980 a 1981-2010



Obr. 19 Porovnanie vývoja priemerného maximálneho mesačného prietoku (Q_{max}) a 75-percentného mesačného prietoku (Q_{75pct}) v Zlatne medzi obdobím 1951-1980 a 1981-2010

Tab. 8 Komparatívna analýza mesačných a denných odtokových parametrov medzi obdobiami 1951-1980 a 1981-2010

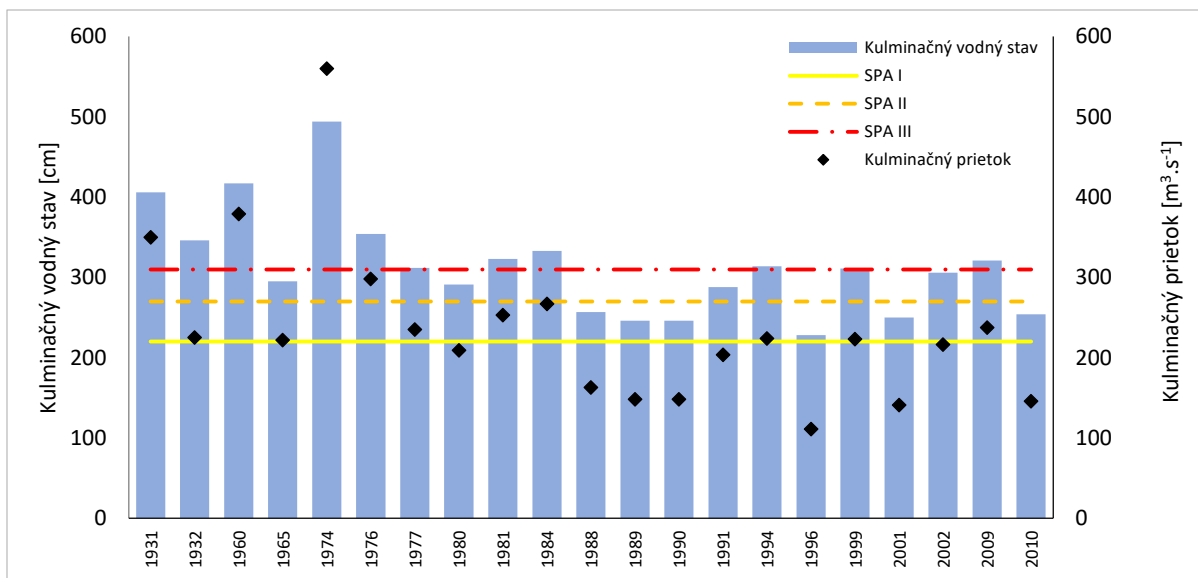
Mesiac	Medián	Koeficient disperzie	Minimum	Maximum
November	0.03	-0.22	-0.06	-0.82
December	0.00	-0.44	-0.06	-0.63
Január	-0.07	-0.41	-0.04	0.48
Február	-0.12	0.03	-0.07	-1.25
Marec	-0.09	-0.25	-0.05	-2.38
Apríl	-0.53	-0.16	-0.33	-0.45
Máj	-0.24	-0.27	0.13	-0.75
Jún	-0.30	0.14	-0.22	-0.19
Júl	-0.51	-0.16	-0.20	-0.91
August	-0.12	0.05	-0.27	-0.53
September	-0.10	0.18	-0.01	0.35
Október	0.04	-0.20	0.03	-2.30
1-denné minimum	-0.02	0.01	0.04	-0.01
3-denné minimum	-0.01	-0.02	0.03	-0.08
7-denné minimum	-0.03	-0.02	0.04	-0.03
30-denné minimum	-0.05	0.00	-0.05	0.12
90-denné minimum	-0.06	-0.21	-0.08	0.27
1-denné maximum	-3.96	-0.02	-1.43	-10.74
3-denné maximum	-3.20	0.05	-1.36	-5.91
7-denné maximum	-2.60	-0.04	-1.01	-1.99
30-denné maximum	-1.27	-0.02	-0.17	-0.09
90-denné maximum	-0.46	0.04	-0.22	-0.09
Base flow index	0.03	0.10	0.00	0.06

Vysvetlivky: pokles (-)/bez zmeny (0.00)/rast (+); vstupné dáta – priemerné denné prietoky ($m^3 \cdot s^{-1}$), tmavá šedá – rast, svetlo šedá pokles

Výsledky vývoja maximálneho odtoku v povodí horného Hrona potvrdili predchádzajúce zistenia [Jeneiovej et al. \(2014\)](#), ktorí konštatovali, že obecné klesá maximálny odtok na povodiach východného a centrálneho Slovenska. Toto potvrdzujú výsledky ďalších autorov ([Mindáš et al., 2011](#); [Poórová et al., 2013b](#); [Marková et al., 2016](#)). Naopak ich stúpajúci trend je v rámci Slovenska zaznamenaný napríklad na JZ v povodí Dunaja ([Pramuk et al. 2013](#); [Blaškovičová et al., 2014](#)). Regionálne rozdiely vo vývoji odtoku na Slovensku sú dané fyzicko-geografickými vlastnosťami jednotlivých regiónov a ich zemepisnou polohou. Podobné regionálne rozdiely, a teda i rastúce a klesajúce trendy maximálneho odtoku pozorovali napríklad v Nemecku [Madsen et al. \(2013\)](#).

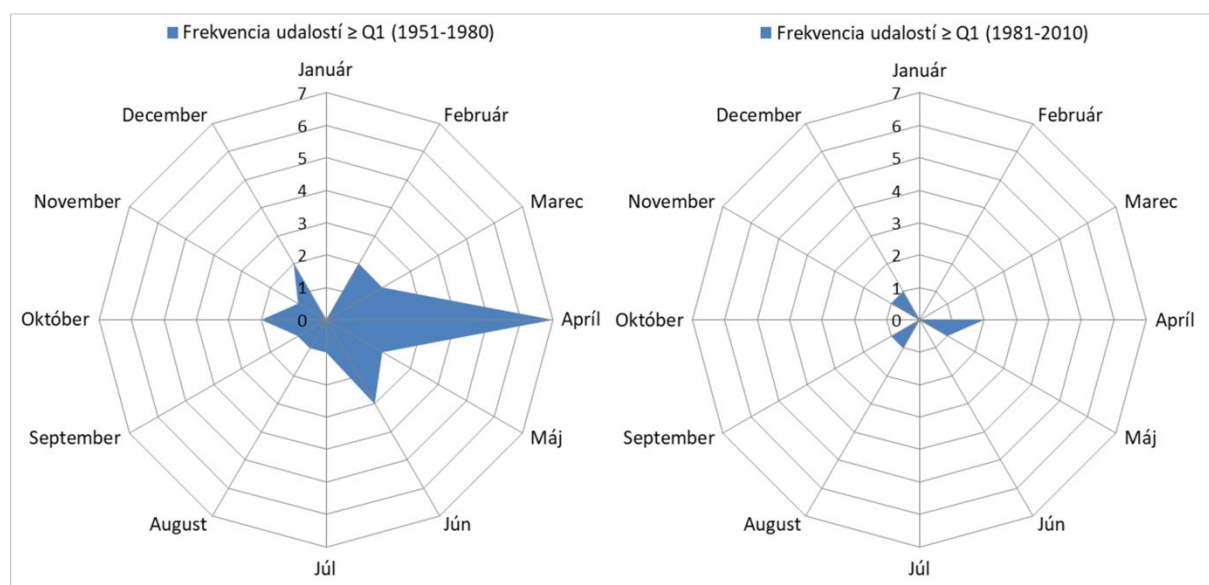
V hodnotení samotných povodňových udalostí bola sledovaná ich frekvencia, extremita a sezónnosť. Od 80. rokov bola na hlavnom toku horného Hrona zaznamenaná klesajúca frekvencia i extremita a zmena sezónnosti povodňových udalostí. Frekvencia bola vyhodnocovaná na základe dvoch prístupov s rozdielnymi výsledkami. Rozdiel vo výsledkoch, ktorý v prvom prípade ([Blahušiaková a Matoušková, 2012](#)) odhalil stúpajúcu a v druhom prípade klesajúcu frekvenciu povodňových udalostí od 80. rokov ([Blahušiaková a Matoušková, 2015](#)), je daný jednak kritériom, ktoré samotné udalosti vymedzuje; v prvom prípade sa jednalo o vymedzenie na základe dosiahnutého SPA resp. vodného stavu (článok 8.3) a v druhom prípade na základe N-ročnosti resp. dosiahnutého kulminačného prietoku (články 8.1 a 8.2). Rozdiel je spôsobený i tým, že v prvom prípade kde boli do hodnotenia zahrnuté i prítoky horného Hrona, bola obecné početnosť takto vymedzených povodní väčšia, v porovnaní s hodnotením zahŕňajúce iba hlavný tok. Pre obecnjšie vyhodnocovanie frekvencie sa ako vhodnejšie kritérium ukázal kulminačný prietok, pretože na rôznych profiloch, kde sa vytvorí rada odlišných povodňových udalostí dokáže „vyrovnať“ rozdiely medzi nimi a interpretácia výsledkov je tým jednoduchšia. Naopak pri hodnotení, ktoré okrem frekvencie sleduje i rozsah a škody povodní je vhodné okrem kulminačného prietoku zahrnúť i SPA.

Frekvenciu povodňových udalostí s dosiahnutým I. II. a III. SPA v celom profile horného Hrona uvádzajú [Blahušiaková a Matoušková \(2012\)](#). Na zvýšenú frekvenciu povodňových udalostí podľa dosiahnutých SPA poukazuje od 80. rokov v profile B. Bystrica **Obr. 20**. Na druhej strane v tom istom profile poukazuje **Obr. 21** na klesajúcu frekvenciu povodňových udalostí od 80. rokov, a to podľa kritéria kulminačného prietoku tzn. udalostí $\geq Q_1$. Tieto výsledky sú rozdielne v sledovaní frekvencie povodní, ale stotožňujú sa pri hodnotení ich extremity. V oboch prípadoch extremita povodní od 80. rokov klesá. Extremitu podľa SPA zobrazuje **Obr. 20** a podľa N-ročnosti **Obr. 22**. Na základe N-ročnosti bol sledovaný výskyt povodní s dosiahnutým alebo prekročeným kulminačným prietokom $\geq Q_1, Q_5, Q_{20}, Q_{50}$ a Q_{100} . Udalosti s kulminačným prietokom $\geq Q_5$ a väčším sa v povodí objavili len v období 1951-1980, pričom najextrémnejšie povodne v tomto období boli zaznamenané v rokoch 1954 a 1974.

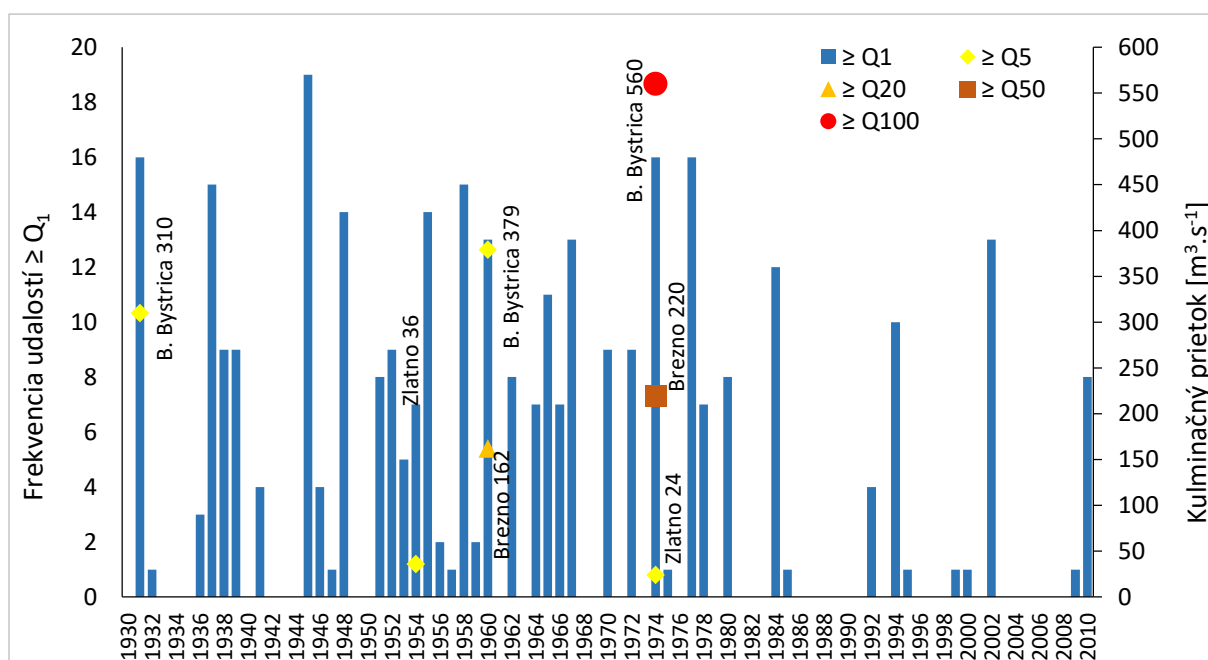


Obr. 20 Frekvencia a extremita povodňových udalostí v B. Bystrici v období 1931-2010

Výskumy frekvencie i extremity povodňových udalostí sa v oblasti centrálnej Európy vyznačujú regionálnymi rozdielmi. Rozdielny regionálny vývoj bol v 20. storočí sledovaný napríklad i v Českej republike. V južnej oblasti Čiech na Šumave zaznamenali [Langhammer et al. \(2015\)](#) zvýšenú frekvenciu dní s kulminačným prietokom s ešte výraznejším rastom po r. 2000. Naopak v centrálnych a severných Čechách ([Yiou et al., 2006](#)) a na východe republiky ([Brázdil et al., 2005](#)) bol zaznamenaný klesajúci trend frekvencie i extremity povodní. Povodie horného Hrona, ako i väčšina povodí na Slovensku vykazuje skôr klesajúce trendy v hodnotách maximálnych kulminačných prietokov ([Poórová, 2013a](#)). Na Slovensku sa tomuto trendu vymyká povodie Dunaja, ktoré má výrazne stúpajúci trend týchto hodnôt ([Poórová, 2013a](#)), čo potvrdzujú i [Nováky a Bálint \(2013\)](#) alebo [Blaškovičová et al. \(2014\)](#).



Obr. 21 Frekvencia a sezónnosť povodňových udalostí v B. Bystrici v období 1951-1980 a 1981-2010

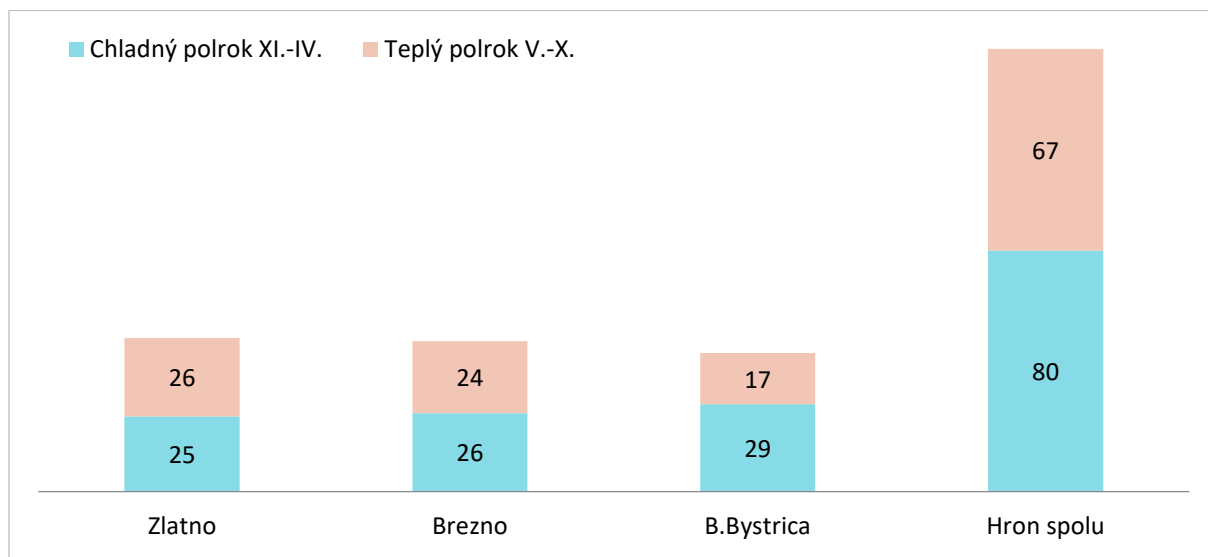


Obr. 22 Frekvencia a extremita povodňových udalostí na hornom Hrone v období 1931-2010, pozn. čísla pri značkách označujú hodnotu kulminačného prietoku

Po vyhodnotení frekvencie a extremity povodní bola hodnotená ich sezónnosť (Blahušiaková a Matoušková, 2015, 2016). Pre centrálnu Európu sú typické povodne vznikajúce ako dôsledok krátkodobých extrémnych zrážkových udalostí (tzv. bleskové povodne), povodne z výdatných dlhotrvajúcich dažďov a povodne spôsobené topením snehu hlavne v spojení so zrážkovými úhrnmi. Obecne je pre centrálnu Európu predpokladaný rast povodní v teplom polroku v súvislosti s extrémnymi zrážkovými situáciami (IPCC, 2014) a v chladnom polroku v súvislosti so zmenou skupenstva zimných zrážok a náhlým topením snehu (Beniston a Stoffel, 2016). V povodí horného Hrona prevládali v období 1931-2010 povodne v chladnom polroku, čo potvrdzujú výsledky znázornené na **Obr. 23**. K rovnakým záverom dospeli i Marková et al. (2016). Typický bol ich výskyt na konci zimy a počas jari. Signifikantne ale klesol od 80. rokov počet udalostí s kulminačným prietokom $\geq Q_1$, a to hlavne v apríli. Ich pokles je však zaznamenaný i v ďalších mesiacoch, čo môžeme pozorovať na **Obr. 21** v B. Bystrici a podobný trend bol zaznamenaný v celom profile horného Hrona. V teplom polroku sa najčastejšie povodne vyskytli v prvej polovici leta a na jeseň, pričom početnejšie boli skôr na prítokoch horného Hrona (predovšetkým na Čiernom Hrone). Práve pridanie prítokov horného Hrona do hodnotenia sezónnosti v článku 8.3 zvýšilo početnosť povodní letného povodňového režimu, v porovnaní s hodnotením len na hlavnom toku.

Posun výskytu udalostí s kulminačným prietokom $\geq Q_1$ z jari do neskorého leta až začiatku jesene koreluje s poklesom v maximálnych hodnotách. Podobný posun sezónnosti v povodiach centrálneho Slovenska zaznamenali Parajka et al. (2009). Pokles počtu povodní spojených so snehom sledovali v povodí horného Hrona i Pekárová a Szolgay (2005). Predpokladaný posun maximálneho odtoku z neskoršej jari na jej začiatok, ako to v súvislosti s rastom teploty a skracovaním trvania snehovej pokrývky zaznamenali v Českej republike Langhammer et al. (2015) sa zatiaľ v povodí horného Hrona nepotvrdil. Posun sezónnosti povodní naznačuje možnú zmenu prevládajúceho typu povodní v súvislosti s rastom teploty

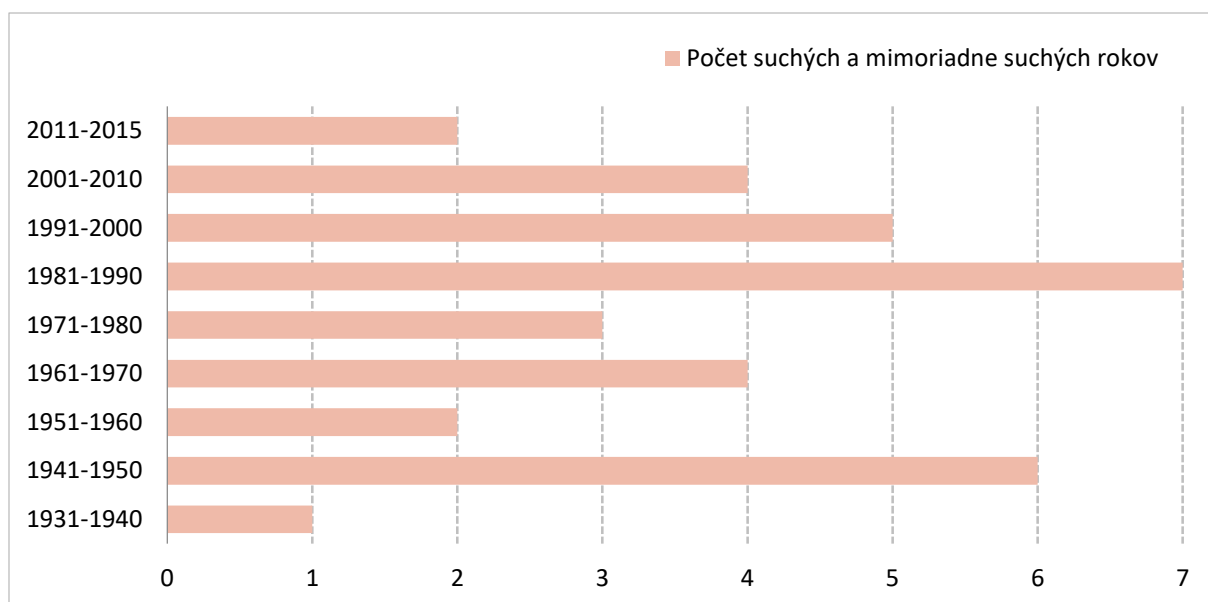
a predpovedanými extrémnymi zrážkovými udalosťami v teplom polroku. Na druhej strane, častejšie a výraznejšie kolísanie teploty v chladnom polroku môže spôsobiť nárazové topenie snehu, a keď sa k tomu pridá i dážď, môže to vyvolať vzostup vodných hladín s výskytom povodňových udalostí.



Obr. 23 Početnosť a sezónnosť udalostí s kulminačným prietokom $\geq Q_1$ v období 1931-2010

6.3 Hodnotenie extrémneho sucha a minimálneho odtoku

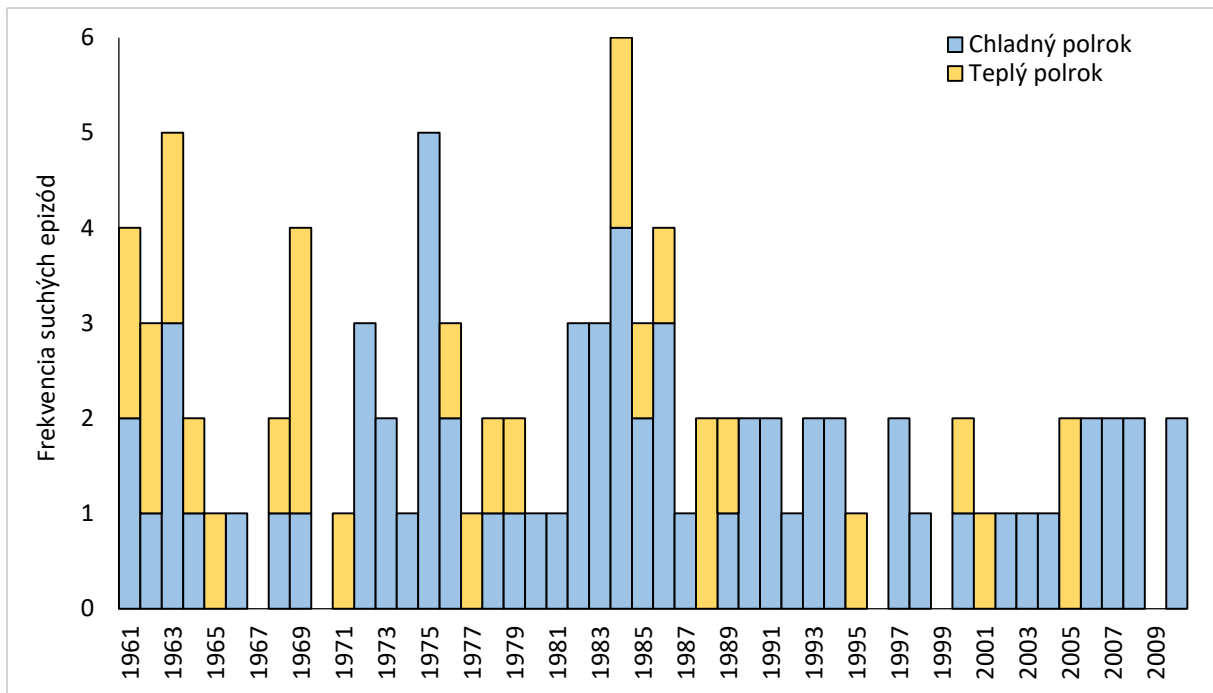
Vyhodnoteniu extrémneho sucha predchádzalo vytipovanie suchých období, ktoré by naznačilo, kde ich v skúmanej časovej rade 1961-2010 hľadať. Z tejto analýzy pravdepodobnosti prekročenia vyplýva, že najsuchšie obdobia sa objavili v 80. do začiatku 90. rokov 20. storočia, **Obr. 24** (najdlhšie 1986-1993) a v období 2003-2004. Medzi najextrémnejšie mimoriadne suché roky patril rok 1993, 1973 a 2003. Podobné výsledky vzišli z hodnotenia prostredníctvom de Martonne Aridity indexu (eMS, 2015) a Relative precipitation indexu (Novický et al., 2008); Blahušiaková a Matoušková (2016). Tieto výsledky potvrdzuje i výskum Spinoniho et al. (2015), ktorí ešte uvádzajú, že práve najextrémnejší prejav malo sucho vo V Európe, kde zaradili štáty: Slovensko, Česká republika, Poľsko, Maďarsko, Bulharsko a Rumunsko, na prelome 80. a 90. rokov so zasiahnutými 85 % tohoto regiónu. Z ich časovo-priestorovej analýzy tiež vyplýva, že v porovnaní so S a Z Európou sú častejšie a dlhšie suché obdobia od 90. rokov sledované predovšetkým v J a V Európe. Podľa Lapina (2013) klimatická zmena môže zvyšovať hlavne pravdepodobnosť výskytu sucha, a práve z tohoto pohľadu je sucho v posledných rokoch extrémom. Z časti to naznačujú i zistenia Hanela et al. (2018), ktorí pri hodnotení sucha v centrálnej Európe za posledných 250 rokov došli k záveru, že sucho v roku 2003 a 2015 sa v porovnaní so suchom v 20. či 50. rokoch vyznačovalo menšou extremitou a rozsahom.



Obr. 24 Frekvencia suchých a mimoriadne suchých rokov v Zlatne za jednotlivé desaťročia

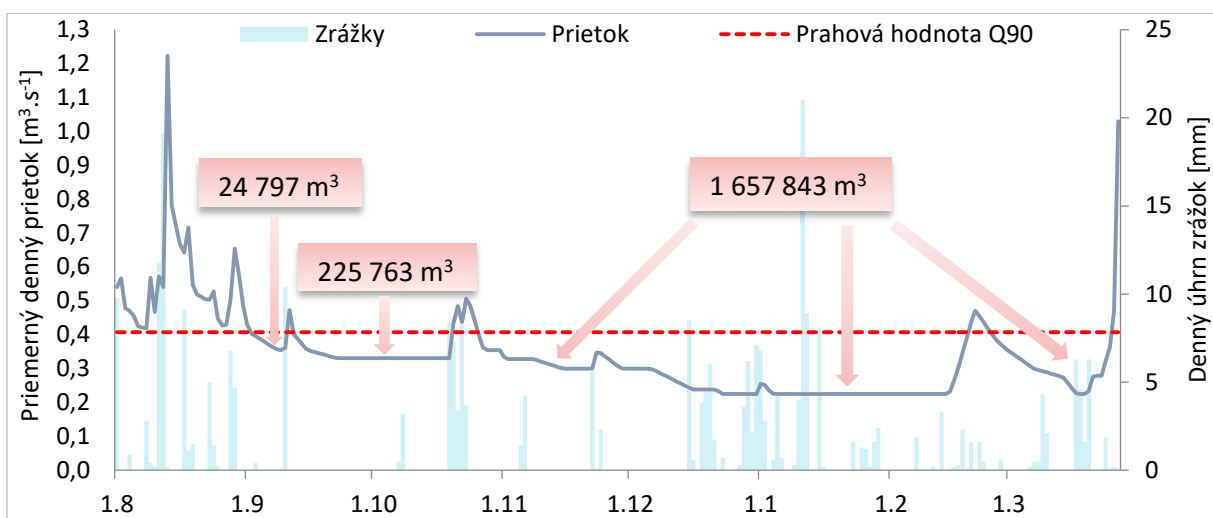
Frekvencia, extremita a sezónnosť meteorologického sucha je hodnotená metódou, ktorá stanovila na základe maximálnych úhrnov zrážok a ich trvania suchej epizódy. Táto metóda sa ukázala ako vhodná. Umožnila totiž jednoduchým spôsobom zistiť všetky tri požadované parametre hodnotenia. Z jej výsledkov vyplýva, že v období 1961-2010 boli v povodí horného Hrona častejšie suché epizódy v chladnom polroku, s najväčšou frekvenciou v r. 1975 a 1984, čo ukazuje **Obr. 25**. Najviac početné boli tieto epizódy v januári a marci, čo je pre horské povodia s akumuláciou snehu v zimnom období typické. Najdlhšie sa vyskytli od februára do apríla (1974 a 2003) a korelujú s menšími hodnotami snehovej pokrývky i s minimálnym prietokom. Tieto výsledky potvrdzujú výskum [Demeterovovej a Škodu \(2009\)](#), že povodie horného Hrona patrí medzi tie slovenské povodia, ktoré sa vyznačujú jednou z najväčších frekvencií zimných dlhotrvajúcich suchých období. V teplom polroku bola zistená menšia frekvencia suchých epizód s najväčšou početnosťou v októbri. Najdlhšie suché epizódy v tejto sezóne sa vyskytli od októbra do novembra 1978 a septembra až októbra 1985.

Ako uvádzajú [Spinoni et al. \(2017\)](#) alebo [Hanel et al. \(2018\)](#), v centrálnej Európe sa v posledných dekádach zvyšuje frekvencia a extremita sucha v jarnom a letnom období. [Hanel et al. \(2018\)](#) i [Brázdil et al. \(2013\)](#) tvrdia, že ich nástup je pravdepodobne viac ovplyvnený nárastom teploty než poklesom zrážok. I v povodí horného Hrona má na vývoj sucha vplyv hlavne rastúca teplota, ale nezanedbateľný vplyv majú i zrážky. Pri pozorovaní suchých období zaznamenaných po roku 2000 sa totiž ukázalo, že na deficite objemu vody sa podieľal aj ich pokles. Hodnotenie odtoku MK testom naznačuje, že postupne dochádza k signifikantnému poklesu jarného odtoku i v záujmovom povodí horného Hrona.

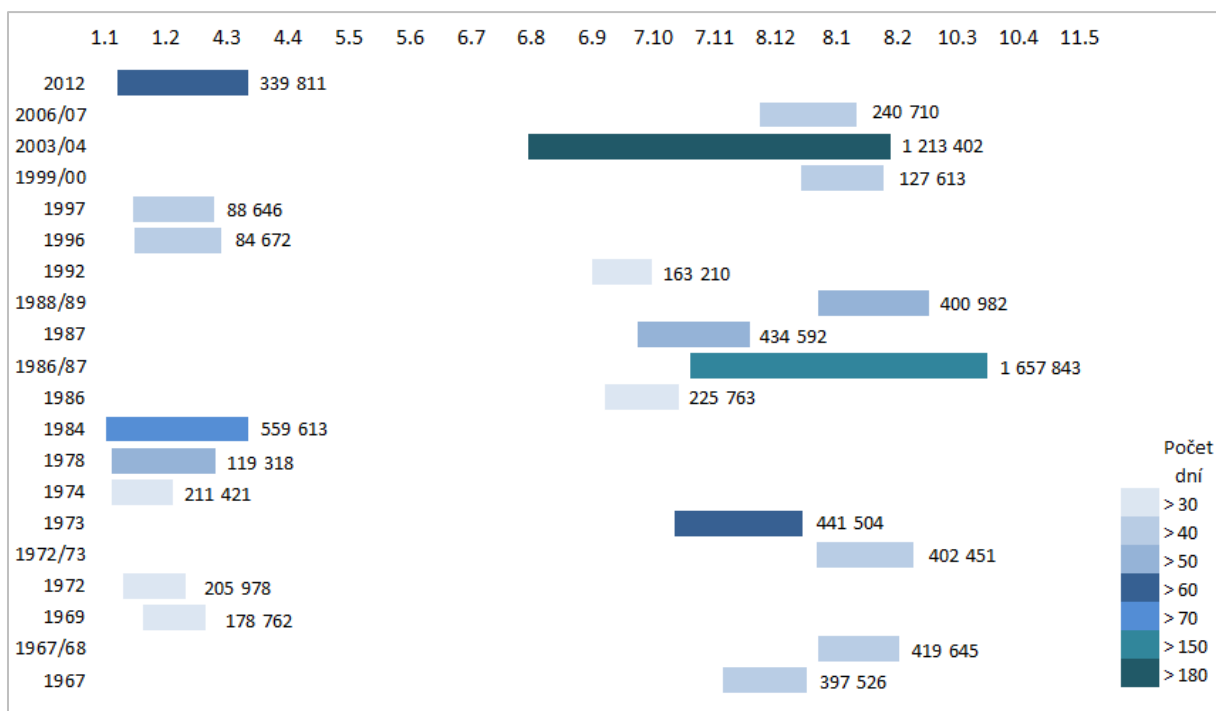


Obr. 25 Frekvencia suchých epizód trvajúcich 15 a viac dní s maximálnym úhrnom zrážok 8.5 mm v Telgárte v chladnom a teplom polroku v období 1961-2010

Výsledky meteorologického sucha korelujú so suchom hydrologickým a to najviac v najextrémnejších prípadoch. Ako príklad sa dajú uviesť suché epizódy v rokoch 1986-1987 zapríčinené primárne nedostatkom zrážok, čo malo za následok vznik hydrologického sucha s veľkým deficitom vody v povodí. Túto situáciu zobrazuje **Obr. 26**. Obecne je povodie horného Hrona typické častejším výskytom dlhotrvajúceho sucha (trvajúceho viac ako 30 dní, s frekvenciou viac ako trikrát/10 rokov), na čo upozorňujú [Demeterová a Škoda \(2009\)](#). Vyššia frekvencia a predlžovanie trvania hydrologického sucha od 80. rokov bola zaznamenaná napríklad v profile Zlatno. Na **Obr. 27** je možné okrem tohto javu, sledovať i hodnoty objemu deficitu sucha, ktoré sa s predlžovaním trvania hydrologického sucha zväčšujú.



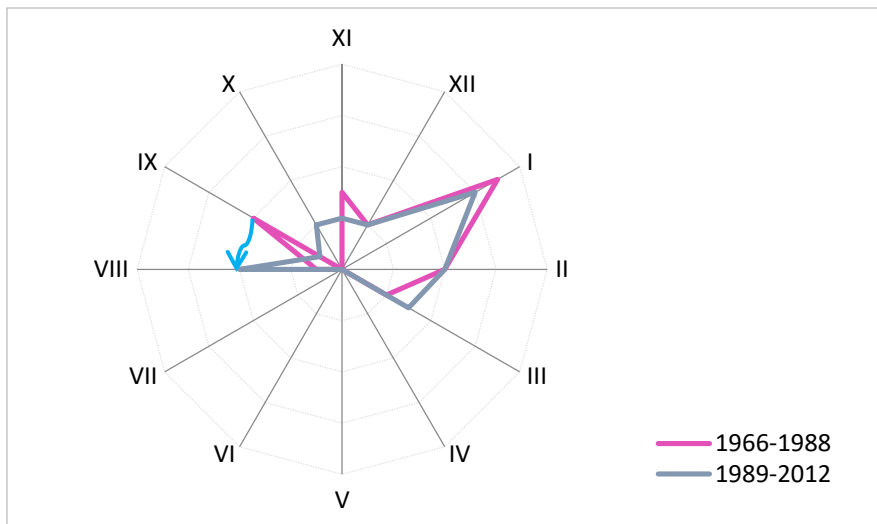
Obr. 26 Vývoj suchých epizód s vyznačeným deficitom vody v Zlatne v období 1986-1987



Obr. 27 Prehľad období hydrologického sucha trvajúceho nepretržite viac ako 30 dní v profile Zlatno v období 1961-2012, pozn. čísla udávajú objem deficitu sucha v m³

Zistenú menšiu vodnosť druhej polovice skúmaného obdobia na základe vyhodnotenia meteorologického sucha potvrdilo hodnotenie sucha hydrologického, pomocou Low flow indexu (Poff a Ward, 1989) a komparatívnej analýzy. Podľa jej výsledkov došlo v Zlatne od 80. rokov k poklesu minimálneho odtoku v chladnom polroku o 24 %, pričom klesá hlavne v apríli. V teplom polroku bol zaznamenaný 19 %-ný pokles, na ktorom sa podieľalo hlavne obdobie jún až august. Rast minimálneho odtoku je zaznamenaný v máji a októbri (Tab. 8). V hodnotách 1-, 3-, a 7-denného minima sa objavil slabý rast a u 30- a 90-denného minima slabý pokles. V hodnotách Base flow indexu k zmene nedošlo.

Štatistické hodnotenie ročného minimálneho odtoku pomocou MK testu odhalilo signifikantné trendy len v období 1931-2010, s najväčším poklesom v hodnote Q₃₃₀ (Blahušiaková a Matoušková, 2015). Jeho skrátением od 60. rokov sa signifikantné trendy strácajú. Rovnako len v časovej rade od 30. rokov je štatisticky významný pokles zimného odtoku (najväčší v decembri a januári). Skrátением časovej rady sa trendy zimného odtoku menia na pozitívne, nie sú však štatisticky signifikantné. K posunu obdobia s výskytom minimálneho prietoku v chladnom polroku nedošlo a stále zostáva v januári. V teplom polroku sa žiadne signifikantné trendy neobjavili. Nesignifikantne, v časovej rade od 30. rokov, boli trendy minimálneho prietoku vo všetkých mesiacoch teplého polroka klesajúce. Po skrátением časovej rady od 60. rokov sa menia na pozitívne, a to na konci leta a na jeseň. V teplom polroku došlo ale k posunu obdobia s výskytom minima zo septembra do augusta (Obr. 28), čo súvisí so zisteným rastom minimálneho odtoku na jeseň.



Obr. 28 Porovnanie výskytu minimálneho prietoku v Zlatne medzi obdobím 1966-1988 a 1989-2012

V rámci hodnotenia hydrologického sucha bola na hornom úseku záujmového povodia skúmaná jeho typológia, a to s ohľadom na vývoj snehovej pokrývky (Blahušiaková et al., -). Výsledky potvrdili, že tu prevládajú deficity vody v chladnom polroku. Najčastejšie sa vyskytol typ sucha warm snow season drought A a cold snow season drought A, ktoré sú ovplyvnené hlavne vývojom teploty (pozitívnym alebo negatívnym) a následne jej dopadom na zrážky a ich skupenstvo. Typ sucha, u ktorého je zistená najväčšia signifikantná závislosť medzi hydrologickými a klimatickými parametrami, a tiež závislosť vývoja predchádzajúcej zimy na následný priebeh odtoku a miním (warm & cold snow season drought A) sa v záujmovom povodí neobjavil. Klimatické modely však predpovedajú negatívny dopad nedostatočnej zásoby vody v snehovej pokrývke, na odtok v ďalších sezónach roka i na Slovensku (Rončák et al., 2019). Taktiež predpovedajú častejší výskyt sucha v lete a na jeseň, pričom ako uvádzajú Dierauer et al. (2018), práve teplé a suché zimy signifikantne korelujú s nižším odtokom a dlhšími a extrémnejšími letnými nízkymi prietokmi. Snehová pokrývka v povodí horného Hrona už teraz signifikantne klesá, rastúca teplota ovplyvňuje skupenstvo zrážok a zvyšuje výpar. V povodí horného Hrona sa zatiaľ dopad týchto zmien v chladnom polroku na pokles odtoku v nasledujúcom období signifikantne nepotvrdil. Nemožno však vylúčiť, že pod vplyvom prebiehajúcich zmien, nedôjde v nasledujúcich desaťročiach i k výskytu sucha typu warm & cold snow season drought A. Keďže práve horské a podhorské oblasti s týmto prevládajúcim typom sucha sa javia ako najviac ohrozené regionálnym otepľovaním, bude do budúca potrebné skúmať jeho výskyt i v ďalších oblastiach.

7 ZÁVER

Povodie horného Hrona je senzitívne na regionálne otepľovanie a zmeny klimatických parametrov, čo má významný dopad na odtok. Pokles vodnosti i zmeny hydroklimatických parametrov sú sledované od 80. rokov s výraznejšími prejavmi od 90. rokov 20. storočia. Zistený klesajúci trend odtoku koreluje hlavne s poklesom maximálneho odtoku, s rastom teploty, poklesom snehovej pokrývky a sezónnymi zmenami zrážkových úhrnov. Je spojený i s poklesom frekvencie a extremity povodňových udalostí a zvýšením početnosti suchých a mimoriadne suchých období.

Horný Hron má snehovo-dažďový režim odtoku, a preto prípadné zmeny v zimno-jarnom období významne ovplyvnia celoročný odtok. Toto sa v povodí i potvrdilo. Významné zmeny nastávajú v teplote vzduchu, ktorá rastie na väčšine staníc hlavne v januári, v decembri i v apríli. Pod vplyvom rastúcej teploty dochádza k zmenám v skupenstve zrážok. Pozorovaný je pokles výšky snehovej pokrývky, skrátenie jej trvania a sezónny posun súvislej snehovej pokrývky z obdobia december až február na január až marec. Zistený mierny nesignifikantný rast zrážok na jar nemá na vývoj odtoku zásadný vplyv. V tomto období je zaznamenaný i pokles maximálneho odtoku a povodňových udalostí, ktorých častejší výskyt sa posúva zo zimno-jarného obdobia na neskoré leto a jeseň. Suché epizódy sú rovnako častejšie v chladnom polroku, čo je však pre horské povodie s týmto režimom odtoku typické. Najdlhšie suché obdobia korelujú s menšími hodnotami snehovej pokrývky, nedostatkom zrážok a s minimálnym odtokom. Síce môžeme povodie horného Hrona zaradiť medzi slovenské povodia, typické jednou z najväčších frekvencií zimných dlhotrvajúcich suchých období, dá sa ale predpokladať, že bude rásť ich početnosť i na jar a v lete.

Trendová analýza potvrdzuje, že dĺžka zvolenej časovej rady hrá dôležitú úlohu v detekcii trendov, čo sa potvrdilo predovšetkým pri hodnotení odtoku v chladnom polroku. Predpokladané zvýšenie zimného odtoku, typické pre horské toky centrálnej Európy, nemožno v povodí horného Hrona obecné potvrdiť. Potrebné budú ďalšie analýzy i na ostatných profiloch horného Hrona.

Výsledky predkladanej práce a hodnotenie hydroklimatických parametrov poukazujúce na regionálne zmeny v povodí horného Hrona rozširujú výskumy týkajúce sa zmeny klímy v centrálnej Európe a môžu pomôcť v interpretácii súčasných i budúcich extrémov, v modelovaní zrážkovo-odtokového režimu, v predikcii dopadov zmeny klímy pod vplyvom prebiehajúcich zmien a v tvorbe stratégií a opatrení na zmierňovanie dopadov výskytu hydroklimatických extrémov.

Zoznam tabuliek

Tab. 1 *Prehľad autorských článkov*

Tab. 2 *Predpokladaná zmena ročnej globálnej priemernej teploty vzduchu (°C) do polovice a konca 21. storočia v porovnaní s obdobím 1986–2005; čísla v zátvorkách určujú rozsah teplôt podľa použitých modelov*

Tab. 3 *Dlhodobé priemerné mesačné hodnoty teploty vzduchu a zrážok v referenčnom období 1981–2010 a ich zmeny pre budúce časové horizonty v povodí Hrona*

Tab. 4 *Vybrané indexy a metódy hodnotiace meteorologické a hydrologické sucho*

Tab. 5 Základné hydroklimatické charakteristiky povodia horného Hrona

Tab. 6 Súhrn použitých metód

Tab. 7 Porovnanie výsledkov nemodifikovanej (U) a modifikovanej (M) verzie Mann-Kendallovho testu v stanici Zlatno a Telgárt v období 1966-2012

Tab. 8 Komparatívna analýza mesačných a denných odtokových parametrov medzi obdobiami 1951-1980 a 1981-2010

Zoznam obrázkov

Obr. 1 Predpokladaná zmena priemerného sezónneho a ročného odtoku v Európe medzi rokmi 2071–2100 a referenčným obdobím 1961–1990

Obr. 2 Sezónny Burnov index ročných maximálnych prietokov na staniách horného Hrona a príľahlých povodií; šípky indikujú smer ročných období

Obr. 3 Časový sled vývoja meteorologického, poľnohospodárskeho a hydrologického sucha

Obr. 4 Priestorové rozloženie sucha v podzemných vodách v septembri 2015

Obr. 5 Záujmové povodie horného Hrona po B. Bystricu

Obr. 6 Záujmové povodie horného Hrona po Zlatno

Obr. 7 Výškové pomery v povodí horného Hrona po B. Bystricu

Obr. 8 Sezónne zmeny odtoku v Zlatne v období 1931-2010

Obr. 9 Súčasné krajinné pokrytie v povodí horného Hrona po B. Bystricu

Obr. 10 Zhrnutie postupu práce s odkazmi na jednotlivé články

Obr. 11 Vývoj priemernej ročnej teploty vzduchu 1931/61-2010

Obr. 12 Porovnanie vývoja teploty vzduchu v chladnom polroku v Telgárte v období 1981-2012 s dlhodobým priemerom 1951-1980

Obr. 13 Vývoj zrážkových úhrnov v jednotlivých sezónach v Telgárte v období 1961-2010

Obr. 14 Podiel tuhých zrážok na celkovom úhrne zrážok v chladnom polroku (XI.-IV.) v Telgárte v období 1966-2012

Obr. 15 Vývoj počtu dní so snehovou pokrývkou v novembri a apríli v Telgárte v období 1961/62-2009/10

Obr. 16 Trendy vývoja maximálnej výšky snehovej pokrývky v chladnom polroku (XI.-IV.) v období 1961-2010

Obr. 17 Vývoj priemerných ročných prietokov v Zlatne, Brezne a B. Bystrici v období 1931-2010

Obr. 18 Vývoj priemerného mesačného prietoku v Zlatne v mesiaci marec medzi obdobím 1951-1980 a 1981-2010

Obr. 19 Porovnanie vývoja priemerného maximálneho mesačného prietoku (Q_{max}) a 75-percentného mesačného prietoku (Q_{75pct}) v Zlatne medzi obdobím 1951-1980 a 1981-2010

Obr. 20 Frekvencia a extremita povodňových udalostí v B. Bystrici v období 1931-2010

Obr. 21 Frekvencia a sezónnosť povodňových udalostí v B. Bystrici v období 1951-1980 a 1981-2010

Obr. 22 Frekvencia a extremita povodňových udalostí na hornom Hrone v období 1931-2010, pozn. čísla pri značkách označujú hodnotu kulminačného prietoku

Obr. 23 Početnosť a sezónnosť udalostí s kulminačným prietokom $\geq Q_1$ v období 1931-2010

Obr. 24 Frekvencia suchých a mimoriadne suchých rokov v Zlatne za jednotlivé desaťročia

Obr. 25 Frekvencia suchých epizód trvajúcich 15 a viac dní s maximálnym úhrnom zrážok 8.5 mm v Telgárte v chladnom a teplom polroku v období 1961-2010

Obr. 26 Vývoj suchých epizód s vyznačeným deficitom vody v Zlatne v období 1986-1987

Obr. 27 Prehľad období hydrologického sucha trvajúceho nepretržite viac ako 30 dní v profile Zlatno v období 1961-2012, pozn. čísla udávajú objem deficitu sucha v m³

Obr. 28 Porovnanie výskytu minimálneho prietoku v Zlatne medzi obdobím 1966-1988 a 1989-2012

Zoznam literatúry

APCC, 2014. Austrian Assessment Report Climate Change 2014 (AAR14): Synopsis – Main Findings. *Austrian Panel on Climate Change (APCC)*, Climate Change Centre Austria, Vienna, Austria, 12 p.

Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P.D., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760- 2003. *International Journal of Climatology*, 27, 17–46. DOI: 10.1002/joc.1377.

Beniston, M., 2003. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change*, 59, 5–31.

Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, Ch.A.T., Frei, Ch., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woith, K., 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81, 71–95. DOI: 10.1007/s10584-006-9226-z.

Beniston, M., Stoffel, M., 2016. Rain-on-snow events, floods and climate change in the Alps: Events may increase with warming up to 4 °C and decrease thereafter. *Science of the Total Environment*, 571, 228–236. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.146.

Berghuijs W. R., Woods, R. A., Hrachowitz, M., 2014. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow. *Nature Climate Change*, 4, 583–586. DOI: 10.1038/nclimate2246.

Bernsteinová, J., Bässler, C., Zimmermann, L., Langhammer, J., Beudert, B., 2015. Changes in runoff in two neighbouring catchments in the Bohemian Forest related to climate and land cover changes. *J. Hydrol. Hydromech.*, 63, 4, 342–352. DOI: 10.1515/johh-2015-0037.

Bezák, N., Brilly, M., Šraj, M., 2014. Comparison between the peaks over threshold method and the annual maximum method for flood frequency analyses. *Hydrological Sciences Journal*, 59, 5, 959–977. DOI: 10.1080/02626667.2013.831174.

Bielik, P., Šurina, B., 2000. Malý atlas pôd Slovenska. Bratislava, 36 p.

Bílá, K., Hostýnek, J., Kindlmann, P., 2018. Comparison of precipitation and temperature regime in the Šumava National Park and in the surrounding foothills. *European Journal of Environmental Sciences*, 8, 2, 131–138. DOI: 10.14712/23361964.2018.18.

Birsan, M. V., Molnar, P., Burlando, P., Pfaundler, M., 2005. Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 314, 312–329. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.06.008.

Blaškovičová, L., Danáčová, Z., Lovásová, L., Šimor, V., Škoda, P., 2014. Vyvoj vybraných hydrologických charakteristík na Dunaji v Bratislave. Spracovane v rámci projektu „Identifikácia zmien hydrologického režimu riek v povodi Dunaja“, 15 p. Available from http://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/ODBORNE_AKTUALITY/files/hydro/Vyvoj_H_charakteristik_na_Dunaji_v_BA.pdf.

Brázdil, R., Dobrovolný, P., Elleder, L., Kakos, V., Kotyza, O., Květoň, V., Macková, J., Müller, M., Štekl, J., Tolasz, R., Valašek, H., 2005. Historické a súčasné povodňe v České republice. Brno – Praha.

- Brázdil, R., Kirchner, K. et al., 2007. Vybrané přírodní extrémny a jejich dopady na Moravě a ve Slezsku. Masarykova univerzita, ČHMÚ, Ústav geoniky AV ČR, Brno-Praha-Ostrava, 431 p. ISBN 978-80-210-4173-8.
- Brázdil, R., Chromá, K., Dobrovolný, P., Tolasz, R., 2009a. Climate fluctuations in the Czech Republic during the period 1961-2005. *Int. J. Climatol.*, 29, 223–242. DOI: 10.1002/joc.1718.
- Brázdil, R., Trnka, M., Dobrovolný, P., Chromá, K., Hlavinka, P., Žalud, Z., 2009b. Variability of droughts in the Czech Republic, 1881–2006. *Theoretical and Applied Climatology*, 97, 3–4, 297–315. DOI: 10.1007/s00704-008-0065-x.
- Brázdil, R., Dobrovolný, P., Trnka, M., Kotyza, O., Řezníčková, L., Valášek, H., Zahradníček, P., Štěpánek, P., 2013. Droughts in the Czech Lands, 1090-2012 AD. *Clim. Past*, 9, 1985–2002. DOI: 10.5194/cp-9-1985-2013.
- Briffa, K. R., van Der Schrier, G., Jones, P. D., 2009. Wet and dry summers in Europe since 1750: evidence of increasing drought. *International J. Climatology*, 29, 13, 1894–1905. DOI: 10.1002/joc.1836.
- Burn, D.H., 1997. Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology*, 202, 212–230. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00068-1.
- Čekal, R., 2007. Analýza atmosférických příčin povodní na případu povodí horní Ohře. In Langhammer, J. (ed): *Povodně a změny v krajině*. PŤF UK, Praha p. 111–122. ISBN 978-80-86561-86-8.
- Čurda, J., Janský, B., Kocum, J., 2011. Vliv fyzickogeografických faktorů na extremitu povodní v povodí Vydry. *Geografie*, 116, 3, 335–353.
- Dai, A., 2008. Temperature and pressure dependence of the rain-snow phase transition over land and ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12802. DOI: 10.1029/2008GL033295.
- Danihlik, R., Hlavčová, K., Kohnová, S., Parajka, J., Szolgay, J., 2004. Scenarios of the change in the mean annual and monthly runoff in the Hron Basin. *J. Hydrol. Hydromech.*, 52, 4, 291–302.
- Degirmendžić, J., Kozuchowski, K., Zmudzka, E., 2004. Changes of air temperature and precipitation in Poland in the period 1951-2000 and their relationship to atmospheric circulation. *Int. J. Climatol.*, 24, 291–310. DOI: 10.1002/joc.1010.
- Demeterová, B., Škoda, P., 2009. Low flow in selected streams of Slovakia. *J. Hydrol. Hydromech.*, 57, 1, 55–69. DOI: 10.2478/v10098-009-0006-0.
- Dierauer, J.R., Whitfield, P.H., Allen, D.M., 2018. Climate controls on runoff and low flows in mountain catchments of Western North America. *Water Resources Research*, 54, 7495–7510. DOI: 10.1029/2018WR023087.
- Doležal, T., Vlček, L., Kocum, J., Janský, B., 2017. Evaluation of the influence of mountain peat bogs restoration measures on the groundwater level: case study Rokytká peat bog, the Šumava Mts., Czech Republic. *Acta Universitatis Carolinae Geographica*, 52, 2, 1–10. DOI: 10.14712/23361980.2017.11.
- EEA (European Environment Agency), 2008. Impacts of Europe's changing climate – indicator-based assessment, No 4/2008, Luxembourg, 427 p. DOI:10.2800/48117.
- EEA (European Environment Agency), 2017. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 – An indicator-based report., No 1/2017, Luxembourg, 424 p. DOI:10.2800/534806.
- (eMS) Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2015. Verze eMS 1.2 (11/2015), ČMeS. Available from: <https://slovník.cmes.cz>.
- Faško, P., Šťastný, P., 2001. Trendy atmosférických zrážok v horských oblastiach Slovenska. NKP SR 10/01, MŽP SR, SHMÚ Bratislava, 54–81.
- Faško, P., Markovič, L., Bochníček, O., 2018. Trends of selected snow cover characteristics in Slovakia during winter seasons 1921/1922 – 2016/2017. *Geophysical Research Abstracts*, 20, EGU2018–2266.
- Fendeková, M., Fendek, M., Labudová, L., Slivová, V., Gauster, T., Danáčová, Z., 2017. Drought in Slovakia in the 21st century – occurrence, impacts and mitigation measures. *IWRA*, Cancun, Quintana Roo. Mexico, 29 May – 3 June, 2017, 10 p. Available from: https://www.iwra.org/member/congress/resource/ABSID439_ABSID439_Fendekova_et_al_2017_revised.pdf.

- Fiala, T., 2008. Statistical characteristics and trends of mean annual and monthly discharges of Czech rivers in the period 1961–2005. *J. Hydrol. Hydromech.*, 56, 133–140.
- Fiala, T., Ouarda, T. B. M. J., Hladný, J., 2010. Evolution of low flows in the Czech Republic. *Journal of Hydrology*, 393, 206–218. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.08.018.
- Fiala, T., 2011. Evolution of deficit volumes and mean and low flows in the Czech Republic. Dissertation thesis, Charles University, Prague, 126 p.
- Gera, M., Damborská, I., Lapin, M., Melo, M., 2017. Climate Changes in Slovakia: Analysis of Past and Present Observations and Scenarios of Future Developments. In: Negm, A., Zeleňáková, M. (eds): *Water Resources in Slovakia: Part II. The Handbook of Environmental Chemistry*, 70, 21–47. DOI:10.1007/698_2017_157.
- Giorgi, F., Hurrell, J., Marinucci, M., Beniston, M., 1997. Elevation Dependency of the Surface Climate Change Signal: A Model Study. *J. Climate*, 10, 288–296.
- Gustard, A., Demuth, S. (Eds), 2009. Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report, No. 50, WMO-No. 1029, 136 p.
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kriaučiūnienė, J., Kundzewicz, Z.W., Lang, M., Llasat, M.C., Macdonald, N., Mcintyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blöschl, G., 2014. Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art-assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2735–2772. DOI: 10.5194/hess-18-2735-2014.
- Hamed, K.H., 2008. Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349, 3-4, 350–363.
- Hänsel, S., Petzold, S., Matschullat, J., 2007. Precipitation trend analysis for Central Eastern Germany. In: Střelcová, K., Škvarenina, J. & Blaženec, M. (eds.): *BIOCLIMATOLOGY AND NATURAL HAZARDS*, International Scientific Conference, Poľana nad Detvou, Slovakia, September 17 – 20, 2007. ISBN 978-80-228-17-60-8.
- Hanel, M., Rakovec, O., Markonis, Y., Máca, P., Samaniego, L., Kyselý, J., Kumar, R., 2018. Revisiting the recent European droughts from a long-term perspective. *Scientific Reports*, 8:9499. DOI:10.1038/s41598-018-27464-4.
- Heim, R.R., 2002. A review of twentieth-century drought indices in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 8, 1149–1165.
- HEP (Hydroekologický plán), Povodie Hron, II. cyklus, 1999. SHMÚ, Úsek hydrologie, Bratislava, 33 p.
- Hladný, J., Čekal, R., 2008. Regionalizace povodí České republiky na základě sezónní analýzy výskytu povodní. In Langhammer, J. (ed): *Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní*. PŘF UK, Praha, 8–26. ISBN 978-80-86561-59-2.
- Hlavčová, H., Kohnová, S., Kubeš, R., Szolgay, J., Zvolenský, M., 2005. An empirical method for estimating future flood risks for flood warnings. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, European Geosciences Union, 9, 4, 431–448.
- Hlavčová, K., Szolgay, J., Kohnová, S., Bálint, G., 2008. Hydrological scenarios of future seasonal runoff distribution in Central Slovakia. In: *Proc. XXIVth Conf. of the Danubian Countries, IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci.*, 4, 9 p.
- Hlavčová, K., Výleta, R., Szolgay, J., Kohnová, S., Macurová, Z., Šúrek, P., 2010. Modelling changes in the runoff regime in Slovakia using high resolution climate scenarios. *Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment (CECILIA)*, STU Bratislava, 28 p. Available from: https://web.natur.cuni.cz/hydropredict2010/download/presentation/270_hlavcova.pdf.
- Hlavčová, K., Kotříková, K., Kohnová, S., Valent, P., 2015. Changes in the snow water equivalent in mountainous basins in Slovakia over recent decades. *Proc. IAHS*, 370, 109–116. DOI:10.5194/piahs-370-109-2015.
- Holko, L., Pecušová, Z., Kostka, Z., 2005. Snow. In: Pekárová P., Szolgay, J. (Eds.): *Assessment of Climate Change Impact on Selected Components of the Hydrosphere and Biosphere in Slovakia*. Bratislava, 105–167.
- Holko, L., Kostka, Z., 2008. Analysis of runoff regime by means of flashiness index. *Acta Hydrologica Slovaca*, 9, 2, 262–268.

- Hollander, M., Wolfe, D.A., Chicken, E., 2013. *Nonparametric Statistical Methods*, 3rd Edition. New York: Wiley, 848 p. ISBN 978-0-470-38737-5.
- Hrušková, K., 2006. Modelování odtoku z tajícího sněhu v povodí horního Hronu. Diss. Thesis. Masaryk University, Brno, 106 p.
- Hunkár Zemankovics, M., 2012. Mitigation and adaptation to Climate Change in Hungary. *Journal of Central European Agriculture*, 13, 1, 58–72. DOI: 10.5513/JCEA01/13.1.1015.
- Huntington, T., Hodgkins, G.A., Keim, B.D., Dudley, R.W., 2004. Changes in the Proportion of Precipitation Occurring as Snow in New England. *Journal of Climate*, 17, 2626–2636. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<2626:CITPOP>2.0.CO;2.
- Informačný systém o území. *Informačný systém o území* [online]. Copyright © 2004 [cit. 25.05.2019]. Available from: <http://isu.enviroportal.sk/index.php/item/zakladne-informacie>.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Jacobi, J., Perrone, D., Lyons Duncan, L., Hornberger, G., 2013. A tool for calculating the Palmer drought indices. *Water Resources Research*, 49, 6086–6089. DOI: 10.1002/wrcr.20342.
- Janský, B., 2003. Water Retention in River Basins. *Acta Universitatis Carolinae*, 2, 173–183.
- Janský, B., Kocum, J., 2007. Retenční potenciál v pramenných oblastech toků. In Langhammer, J. (ed): *Povodně a změny v krajině*. PŘF UK, Praha p. 307–315. ISBN 978-80-86561-86-8.
- Jeneiová, K., Sabo, M., Kohnová, S., 2014. Detekovanie trendu v dlhodobých časových radoch maximálnych ročných prietokov na Slovensku. *Acta Hydrologica Slovaca*, 15, 1, 161–170.
- Jeneiová, K., Kohnová, S., Hall, J., Parajka, J., 2016. Variability of seasonal floods in the Upper Danube River basin. *J. Hydrol. Hydromech.*, 64, 4, 357–366. DOI: 10.1515/johh-2016-0037.
- Jeníček, M., 2005. Možnosti využití srážko-odtokových modelů na malých a středně velkých povodích. In Langhammer, J. (ed): *Vliv změn přírodního prostředí povodí a údolní nivy na povodňové riziko*. PŘF UK, Praha, 112–126.
- Jeníček, M., Seibert, J., Zappa, M., Staudinger, M., Jonas, T., 2016. Importance of maximum snow accumulation for summer low flows in humid catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 859–874. DOI: 10.5194/hess-20-859-2016.
- Juričeková, K., Hlavčová, K., Szolgay, J., Bartóková, L., Szász, V., 2013. Posúdenie zmeny simulovanej vodnej hodnoty snehu na povodí horného Hrona. *Acta Hydrologica Slovaca*, 14, 1, 261–271.
- Kendall, M.G., 1938. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30, 81–93.
- Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*. 4th ed. Charles Griffin, London.
- Kliment, Z., Matoušková, M., 2007. Změny srážko-odtokových poměrů v pramenných oblastech povodí Otavy. In Langhammer, J. (ed): *Povodně a změny v krajině*. PŘF UK, Praha p. 317–331. ISBN 978-80-86561-86-8.
- Kliment, Z., Matoušková, M., Královec, V., Ledvinka, O., 2008. Změny odtokového režimu v pramenných oblastech vodních toků. In Langhammer, J. (ed): *Údolní niva jako prostor ovlivňující průběh a následky povodní*. PŘF UK, Praha, 83–92. ISBN 978-80-86561-59-2.
- Kliment, Z., Matoušková, M., 2009. Runoff changes in the Šumava Mountains (Black Forest) and the foothill regions: Extent of influence by human impact and climate change. *Water Resources Management*, 23, 1813–1834.
- Kliment, Z., Matoušková, M., Ledvinka, O., Královec, V., 2011. Trend analysis of rainfall-runoff regimes in selected headwater areas of the Czech Republic. *J. Hydrol. Hydromech.*, 59, 1, 36–50.
- Kocum, J., Janský, B., Česák, J., 2010. Potential compensation of hydrological extremes in headwaters: case study of upper Vltava River basin, Sumava Mts., Czechia. *EGU General Assembly 2010*, held 2 – 7 May, 2010 in Vienna, Austria, p. 206.
- Kocum, J., 2012. Tvorba odtoku a jeho dynamika v pramenné oblasti Otavy. Disertační práce, Karlova univerzita, Praha, 203 p.

- Kormann, C., Francke, T., Renner, M., Bronstert, A., 2015. Attribution of high resolution streamflow trends in Western Austria – an approach based on climate and discharge station data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 1225–1245. DOI: 10.5194/hess-19-1225-2015.
- Kotříková, K., Fencík, R., Hlavčová, K., 2014. Changes in Snow Storage in the Upper Hron River Basin (Slovakia). *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 10, 2, 145–159. DOI: 10.2478/aslh-2014-0011.
- Královec, V., Kliment, Z., Matoušková, M., 2016. Evaluation of runoff response on the basis of a comparative paired research in mountain catchments with the different land use: case study of the Blanice River, Czechia. *Geografie*, 121, 2, 209–234.
- Kubeš, R., Kumančík, Ľ., Pecušová, Z., Parajka, J., Szolgay, J., 2004. Vplyv zmeny metódy priestorovej interpolácie zrážok na presnosť simulácie odtoku v povodí Hrona. *Acta Hydrologica Slovaca*, 5, 2, 266–274.
- Kubiak-Wójcicka, K., Bąk, B., 2018. Monitoring of meteorological and hydrological droughts in the Vistula basin (Poland). *Environ Monit Assess*, 190, 11, 691, 16 p. DOI: 10.1007/s10661-018-7058-8.
- Kulasová, B., Boháč, M., Fiala, T., 2008. Climate change impacts on low flows. *Sborník příspěvků z workshopu Adolfa Patery 2008*, Praha, 95–102.
- Kulasová, B., Belz, J.U., Boháč, M., Čekal, R., Dreibrodt, J., Kendík, T., Kremsa, J., Marche, N., Walther, P., 2017. Hydrologické vyhodnocení sucha v povodí Labe v roce 2015. MKOL, Magdeburk, 66 p.
- Kumar, R., Musuuza, J.L., Van Loon, A.F., Teuling, A.J., Barthel, R., Broek, J.T., Mai, J., Samaniego, L., Attinger, S., 2016. Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 1117–1131. DOI: 10.5194/hess-20-1117-2016.
- Kundzewicz, Z.W., Robson, A., 2004. Change detection in hydrological records – a review of the methodology. *Hydrol. Sci. J.*, 49, 1, 7–19. DOI: 10.1623/hysj.49.1.7.53993.
- Kundzewicz, Z.W., Graczyk, D., Maurer, T., Pińskwar, I., Radziejewski, M., Svensson, C., Szwed, M., 2005. Trend detection in river flow series: 1. Annual maximum flow. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 5, 797–810. DOI:10.1623/hysj.2005.50.5.797.
- Laaha, G., Gauster, T., Tallaksen, L.M., Vidal, J.-P., Stahl, K., Prudhomme, C., Heudorfer, B., Vlnas, R., Ionita, M., Van Lanen, H.A.J., Adler, M.-J., Caillouet, L., Delus, C., Fendekova, M., Gailliez, S., Hannaford, J., Kingston, D., Van Loon, A.F., Mediero, L., Osuch, M., Romanowicz, R., Sauquet, E., Stagge, J.H., Wong, W.K., 2017. The European 2015 drought from a hydrological perspective. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3001–3024. DOI: 10.5194/hess-21-3001-2017.
- Labudová, L., Faško, P., Ivaňáková, G., 2015. Changes in climate and changing climate regions in Slovakia. *Moravian Geographical Reports*, 23, 3, 70–81. DOI: 10.1515/mgr-2015-0019.
- Langhammer, J., 2007. Současné přístupy k hodnocení a modelování povodňového rizika. In: Langhammer, J. (ed): *Povodně a změny v krajině*. PŘF UK, Praha, 13–31. ISBN 978-80-86561-86-8.
- Langhammer, J., Su, Y., Bernsteinová, J., 2015. Runoff response of climate warming and forest disturbance in a mid-mountain basin. *Water*, 7, 3320–3342. DOI:10.3390/w7073320.
- Lapin, M., Faško, P., Pecho, J., 2007. Snow cover variability and trends in the Tatra Mountains in 1921–2006. In: Ducrocq, V. (Ed.): *Proceedings of the 29th International Conference on Alpine Meteorology*. Chambéry, France, 683–686.
- Lapin, M., Bašták, M., Ďurán, I., Gera, M., Hrvol, J., Kremler, M., Melo, M., 2012. New climate change scenarios for Slovakia based on global and regional general circulation models. *Acta Met. Univ. Comen.*, 37, 25–74.
- Lapin, M., 2013. Hodnotenie mesačných a sezónnych priemerov a extrémov teploty vzduchu. Available from: <http://www.milanlapin.estranky.sk/clanky/hodnotenie-mesacnych-a-sezonnnych-priemerov-a-extremov-teploty-vzduchu.html>.
- Lapin, M., Gera, M., 2017. Methods of snow cover change scenarios design for Slovakia in 1951-2100. In: Šiška, B. et al.(ed): *Snow an ecological phenomenon Smolenice*. Slovakia, 19th – 21st September 2017, 4 p.
- Ledvinka, O., 2016. Statistical analysis of long hydrological and climatological data series. Diss. Thesis. Charles University, Praha, 84 p.
- Libiseller, C., 2004. MULTMK/PARTMK. A program for computation of multivariate and Partial Mann-Kendall test. LIU, Linköping, 18 p.

- Luterbacher, J., Werner, J.P., Smerdon, J.E., Fernández-Donado, L., González-Rouco, F.J., Barriopedro, D., Ljungqvist, F.C., Büntgen, U., Zorita, E., Wagner, S., Esper, J., McCarroll, D., Toreti, A., Frank, D., Jungclaus, J.H., Barriendos, M., Bertolin, C., Bothe, O., Brázdil, R., Camuffo, D., Dobrovolný, P., Gagen, M., García-Bustamante, E., Ge, Q., Gómez-Navarro, J.J., Guiot, J., Hao, Z., Hegerl, G.C., Holmgren, K., Klimentko, V.V., Martín-Chivelet, J., Pfister, C., Roberts, N., Schindler, A., Schurer, A., Solomina, O., von Gunten, L., Wahl, E., Wanner, H., Wetter, O., Xoplaki, E., Yuan, N., Zanchettin, D., Zhang, H., Zerefos, C., 2016. European summer temperatures since Roman times. *Environ. Res. Lett.*, 11, 024001, 12 p. DOI:10.1088/1748-9326/11/2/024001.
- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., Kjeldsen, T.R., 2013. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment. *Centre for Ecology and Hydrology*, 180 p. ISBN: 978-1-906698-36-2.
- Majerčáková, O., Škoda, P., Šťastný, P., Faško, P., 2004. Vývoj zložiek hydrologickej bilancie za obdobia 1931–1980 a 1961–2000. *J. Hydrol. Hydromech.*, 52, 4, 355–364.
- Makel, M., Turbek, J., 2002. Hydrológia - terminologický výkladový slovník: Hydrology - the lexicographical dictionary. MŽP Slovenskej republiky, Bratislava, 182 p.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245–259. DOI: 10.2307/1907187.
- Marková, R., Xhaja, A., Kohnová, S., 2016. Analýza trendov a sezónnosti maximálnych ročných prietokov vo vybraných vodomerných staniách na rieke Hron. *Acta Hydrologica Slovaca*, 17, 2, 224–234.
- Marty, Ch., Tilg, A-M., Jonas, T., 2017. Recent Evidence of Large-Scale Receding Snow Water Equivalents in the European Alps. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 1021–1031. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0188.1.
- Matějka, K., 2017. Vývoj teplot a srážek v ČR od roku 1961. Available from: <https://www.infodatasys.cz/climate/KlimaCR1961.htm>.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, 17 – 22 January 1993, 6 p.
- Mindáš, J., Páleník, V., Nejedlík, P. (ed.), 2011. Dôsledky klimatickej zmeny a možné adaptačné opatrenia v jednotlivých sektoroch. *EFRA – Vedecká agentúra pre ekológiu a lesníctvo*, Zvolen, Bratislava, 253 p.
- Ministry of Forestry and Water Management of Slovakia, 1987. Forecasting, reporting and warning flood service. Flood protection. Bratislava, 322 p.
- Murphy, C., Harrigan, S., Hall, J., Wilby, R.L., 2013. Climate-driven trends in mean and high flows from a network of reference stations in Ireland. *Hydrol. Sci. J.*, 58, 4, 755–772.
- Müller, M., Kašpar, M., Valeriánová, A., Crhová, L., 2015. Novel indices for the comparison of precipitation extremes and floods: An example from the Czech territory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 11, 4641–4652. DOI: 10.5194/hess-19-4641-2015.
- NFC (National Forest Centre), Zvolen, 2011. *Forest portal*. Available from <http://www.forestportal.sk>.
- Nováky, B., Bálint, G., 2013. Shifts and Modification of the Hydrological Regime Under Climate Change in Hungary. *Climate Change - Realities, Impacts Over Ice Cap, Sea Level and Risks*. Bharat Raj Singh, *IntechOpen*, 163–190. DOI: 10.5772/54768.
- Novický, O., Kašpárek, L., Fridrichová, R., Mrkvičková, M., Horáček, S., Fiala, T., Brzáková, J., Kourková, H., Tremel, P., Vaculík, M., 2008. Časová a plošná variabilita hydrologického sucha v podmíenkach klimatickej zmeny na území Českej republiky. Úkol VÚV T.G.M. 2051, zpráva za rok 2008, VÚV T.G.M., Praha, 57 p.
- Önöz, B., Bayazit, M., 2012. Block bootstrap for Mann-Kendall trend test of serially dependent data. *Hydrological Processes*, 26, 23, 3552–3560.
- Parajka, J., Kohnová, S., Merz, R., Szolgay, J., Hlavčová, K., Blöschl, G., 2009. Comparative analysis of the seasonality of hydrological characteristics in Slovakia and Austria. *Hydrological Sciences Journal*, 54, 3, 456–473. DOI: 10.1623/hysj.54.3.456.
- Palmer, W.C., 1965. Meteorological Drought. U.S. Department of Commerce, Research paper No. 45, 58 p.
- Pecho, J., Faško, P., Mikulová, K., Lapin, M., Šťastný, P., 2009. Long-term changes of snow cover regime in connection with observed solid, liquid and mixed precipitation ratio trends in Slovakia. Presented at 9th Annual Meeting of the European Meteorological Society, *Nineth European Conference on Applied Meteorology (ECAM)*, Toulouse, France, 28th September – 2nd October.

- Pekárová, P., Miklánek, P., Pekár, J., 2003. Spatial and temporal runoff oscillation analysis of the main rivers of the world during the 19th–20th centuries. *Journal of Hydrology*, 274, 62–79.
- Pekárová, P., Szolgay, J., 2005. Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry v povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimateckej zmeny. Bratislava, 496 p.
- Pekárová, P., Škoda, P., Miklánek, P., Halmová, D., Pekár, J., 2008. Detection of changes in flow variability of the upper Danube between 1876–2006. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 4, 012028. DOI: 10.1088/1755-1307/4/1/012028.
- Pellicciotti, F., Bauder, A., Parola, M., 2010. Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps. *Water Resources research*, 46, W10522. DOI:10.1029/2009WR009039.
- Piniewski, M., Marcinkowski, P., Kundzewicz, Z. W., 2018. Trend detection in river flow indices in Poland. *Acta Geophysica*, 66, 347–360. DOI: 10.1007/s11600-018-0116-3.
- Poff, N.L., Ward, J.V., 1989. Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46, 1805–1818. DOI: 10.1139/f89-228.
- Poárová, J., Škoda, P., Danáčová, Z., Šimor, V., 2013a. Vývoj hydrologického režimu slovenských riek. *Životné Prostredie*, 47, 3, 144–147.
- Poárová, J., Blaškovičová, L., Škoda, P., Šimor, V., 2013b. Trendy minimálnych ročných a mesačných prietokov na slovenských tokoch. In: *Proc. Seminar Sucho a jak mu čelit*. Prague, 20–23.
- Pramuk, B., Pekárová, P., Halmová, D., 2013. Identifikácia zmien povodňových prietokov Dunaja v stanici Bratislava v období 1876–1943 a 1944–2010. *Acta Hydrologica Slovaca*, 14, 2, 327–336.
- Remžík, K., Janko, I., 1987. Predpovedná, hlásna a varovná služba, ochrana pred povodňami. Bratislava, 322 p.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Braun, D.P., Powell, J., 1998. A spatial Assessment of Hydrologic Alteration Within a River Network. *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 14, 329–340.
- Rivard, C., Vigneault, H., 2009. Trend detection in hydrological series: when series are negatively correlated. *Hydrological Processes*, 23, 19, 2737–2743.
- Rončák, P., Hlavčová, K., Látková, T., 2016. Estimation of the effect of changes in forest associations on runoff processes in basins: Case study in the Hron and Topľa river basins. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 24, 3, 1–7. DOI: 10.1515/sjce-2016-0011.
- Rončák, P., Hlavčová, K., Kohnová, S., Banasik, K., 2019. Impacts of Future Change on Runoff in Selected Catchments of Slovakia: Managing Risks and Building Resilience to Climate Change. In: *Climate Change Adaptation in Eastern Europe*, 279–292. DOI: 10.1007/978-3-030-03383-5_19.
- Sawicz, K., Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P.A., Carrillo, G., 2011. Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 2895–2911.
- Scherrer, S.C., Appenzeller, Ch., Liniger, M.A., 2006. Temperature trends in Switzerland and Europe: Implications for climate normals. *Int. J. Climatol.*, 26, 565–580. DOI: 10.1002/joc.1270.
- Smakhtin, V. U., 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240, 147–186. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00340-1.
- Schöner, W., Auer, I., Böhm, R., 2009. Long term trend of snow depth at Sonnblick (Austrian Alps) and its relation to climate change. *Hydrological Processes*, 23, 7, 1052–1063. DOI: 10.1002/hyp.7209.
- Sobíšek, B., 1993. Meteorologický slovník výkladový a terminologický, Academia, Praha.
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. V., Barbosa, P., 2015. The biggest drought events in Europe from 1950 to 2012. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 509–524. DOI: 10.1016/j.ejrh.2015.01.001.
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt J.V., 2017. Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Global and Planetary Change*, 148, 113–130. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.11.013.
- Svensson, C., Kundzewicz, W. Z., Maurer, T., 2005. Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 5, 811–824. DOI: 10.1623/hysj.2005.50.5.811.

- Stagge, J.H., Kohn, I., Tallaksen, L.M., Stahl, K., 2015a. Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe. *Journal of Hydrology*, 530, 37–50. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.039.
- Stahl, K., Hisdal, H., Hannaford, J., Tallaksen, L. M., Van Lanen, H. A. J., Sauquet, E., Demuth, S., Fendekova, M., Jódar, J., 2010. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 2367–2382. DOI:10.5194/hess-14-2367-2010.
- Staudinger, M., Stahl, K., Seibert, J., 2014. A drought index accounting for snow. *Water Resources Research*, 50, 7861–7872. DOI: 10.1002/2013WR015143.
- Střeščík, J., 2000. Long-term climatic changes observed in Prague-Klementinum. *Geophysics and Geodesy*, 30, 3, 169–196.
- Szolgay, J., Hlavčová, K., Parajka, J., Čunderlík, J., 1997. Impact of climate change on the runoff regime in Slovakia. In: *National Climate Programme of the Slovak Republic*, No. 6, SHMI, Bratislava, 11–110.
- Szolgay, J., Hlavčová, K., Parajka, J., Kohnová, S., Lapin, M., Hlásny, T., 2008. Climate change impact on runoff in the Hron River basin. Key Publ., Ostrava, 116 p.
- Šercl P., 2009. The influence of physical and geographical factors on characteristics of theoretical designed floods waves, CHMI, Praha.
- Šipikalová, H., Škoda, P., Demeterová, B., Majerčáková, O., 2006. Nové hydrologické údaje povrchových vôd. *Vodohosp. Sprav.*, 49, 5–6, 26–29.
- Štefunková, Z., Hlavčová, K., Valent, P., 2014. Posúdenie vplyvu zmeny klímy na povodí horného Hrona na základe výsledkov simulácie troch hydrologických modelov. *Acta Hydrol. Slovaca*, 15, 1, 213–222.
- Tallaksen, L. M., Van Lanen, H. A. J., 2004. Hydrological Drought. Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Elsevier, Amsterdam, 579 p.
- Tegelhoffová, M., 2010. Analýza priemerných mesačných prietokov vo vodomernej stanici Banská Bystrica 7160. *Acta Hydrologica Slovaca*, 11, 2, 302–309.
- Trnka, M., Dubrovský, M., Svoboda, M., Semerádová, D., Hayes, M., Žalud, Z., Wilhite, D., 2009. Developing a regional drought climatology for the Czech Republic. *Int. J. Climatol.*, 29, 863–883. DOI: 10.1002/joc.1745.
- Valent, P., 2014. Zrážkovo-odtokové modelovanie pre frekvenčnú analýzu prietokov. Diz. práca, STU Bratislava. 156 p.
- Van Loon, A.F., 2015. Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2, 359–392. DOI:10.1002/wat2.1085.
- Van Loon, A.F., Laaha, G., 2015. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 526, 3–14.
- Vilímek, V., 2007. Vliv extrémních povodní na reliéf krajiny. In Langhammer, J. (ed): *Povodně a změny v krajině*. PŕF UK, Praha p. 199–207. ISBN 978-80-86561-86-8.
- Villarini, G., Smith, J. A., Serinaldi, F., Ntelekos, A. A., 2011. Analyses of seasonal and annual maximum daily discharge records for central Europe. *J. Hydrol.*, 399, 3–4, 299–312. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.01.007.
- Vlček, L., Kocum, J., Janský, B., Šefrna, L., Blažková, Š., 2016. Influence of peat soils on runoff process – Case study of Vydra River heatwaters. *Geografie*, 121, 2, 1–17.
- Vlček, L., 2017. Retence vody v půdách horských oblastí na příkladu Šumavy. Disertační práce, Karlova univerzita, Praha, 127 p.
- Vojtek, M., Faško, P., Šťastný, P., 2003. Some selected snow climate trends in Slovakia with respect to altitude. *Acta Met. Univ. Comeniana*, XXXII, 17–27.
- VP (Vodohospodársky plán), Povodie Hron, III. Cyklus, 2007. Slovenský vodohospodársky podnik, š. p. Banská Štiavnica, OZ Povodie Hrona Banská Bystrica, 98 p.
- Výberči, D., Švec, M., Faško, P., Savinová, H., Trizna, M., Mičietová, E., 2015. The effects of the 1996-2012 summer heat events on human mortality in Slovakia. *Moravian Geographical Reports*, 23, 57–69.
- Yiou, P., Ribereau, P., Naveau, P., Nogaj, M., Brázdil, R., 2006. Statistical analysis of floods in Bohemia (Czech Republic) since 1825. *Hydrological Sciences Journal*, 51, 5, 930–945. DOI: 10.1623/hysj.51.5.930.

- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., Cavadias, G., 2002a. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16, 1807–1829.
- Yue, S., Pilon, P., Cavadias, G., 2002b. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.*, 259, 254–271. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00594-7.
- Yue, S., Kundzewicz, Z.W., Wang, L., 2012. Detection of changes. In: Kundzewicz, Z.W. (ed): *Changes in Flood Risk in Europe*. IAHS Press, Wallingford, 387–434.
- Zappa, M., Kan, C., 2007. Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 375–389.
- Zeľeňáková, M., Vido, J., Portela, M. M., Purcz, P., Blišťán, P., Hlavatá, H., Hlušík, P., 2017. Precipitation trends over Slovakia in the period 1981-2013. *Water*, 9, 922, 20 p. DOI:10.3390/w9120922.
- Zhang, Y., Ahiablame, L., Engel, B., Liu, J., 2013. Regression Modeling of Baseflow and Baseflow Index for Michigan USA. *Water*, 5, 1797–1815. DOI: 10.3390/w5041797.

8 PRÍLOHA - ČLÁNKY SUMARIZUJÚCE HLAVNÉ VÝSLEDKY PRÁCE

Príloha 8.1

Rainfall and runoff regime trends in mountain catchments (Case study area: the upper Hron River basin, Slovakia)

Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2015. Rainfall and runoff regime trends in mountain catchments (Case study area: the upper Hron River basin, Slovakia). *J. Hydrol. Hydromech.*, 63, 3, 183–192. DOI: 10.1515/johh-2015-0030.

Príloha 8.2

Evaluation of the hydroclimatic extremes in the upper Hron River basin, Slovakia

Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2016. Evaluation of the hydroclimatic extremes in the upper Hron River basin, Slovakia. *AUC Geographica*, 51, 2, 189–204. DOI: 10.14712/23361980.2016.16.

Príloha 8.3

Analýza povodní na hornom toku Hrona v rokoch 1930 – 2010

Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2012. Analýza povodní na hornom toku Hrona v rokoch 1930 – 2010. *Geografie*, 117, 4, 415–433.

Príloha 8.4

Hydrological drought occurrence and drought types regarding to changes in snow cover in selected mountain catchments in Central Europe

Blahušiaková, A., Matoušková, M., Jeníček, M., Ledvinka, O., Kliment, Z., Podolinská, J., Snopková, Z., (odoslaný). Hydrological drought occurrence and drought types regarding to changes in snow cover in selected mountain catchments in Central Europe. *Hydrological Sciences Journal*.