

**Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzické geografie a geoekologie**

**Charles University, Faculty of Science
Department of Physical Geography and Geoecology**

Doktorský studijní program: Fyzická geografie a geoekologie
Doctoral study programme: Physical geography and geoecology

Autoreferát dizertační práce
Summary of the Doctoral thesis



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

Mgr. Andrea Blahušíaková

Školiteľ/Supervisor: RNDr. Milada Matoušková, Ph.D.

Praha, 2019

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 hydroklimatické parametry, 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 hydroclimatic variables 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

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 horských oblastí 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. 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 patrí práca Labudovej et al. (2015). Poukazujú v nej na posuny klimatických regiónov v rámci Slovenska. Sledovaný bol postupný posun teplého klimatického regiónu z juhu smerom na sever. Táto zmena zasahuje i povodie horného Hrona. Priestorovým hodnotením vodnosti slovenských tokov sa zaoberali Poórová et al. (2013a). Vodné toky rozdelili podľa vývoja priemernej vodnosti, pričom povodie horného Hrona zaradili do skupiny povodí 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 doplniť výskumy, ktoré vzájomne prepoja klimatické a hydrologické analýzy, čo umožní lepšie pochopiť zmeny vo vývoji zrážkovo-odtokového režimu.

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. Ich účinok na odtok skúmali v oblasti Šumavy Vlček et al. (2016) alebo Janský (2003). Na strane druhej, pod vplyvom rastúcej teploty a nedostatku zrážok, by malo rásť riziko výskytu sucha (IPCC, 2014). Jeho prejavy sú menej extrémne v pramenných oblastiach riek (Poórová et al., 2013b). Potvrdzujú to i výsledky Královca et al. (2016), ktoré indikujú, že signifikantne vyšší odtok má počas suchých období zalesnené povodie v porovnaní s nezalesneným.

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 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.

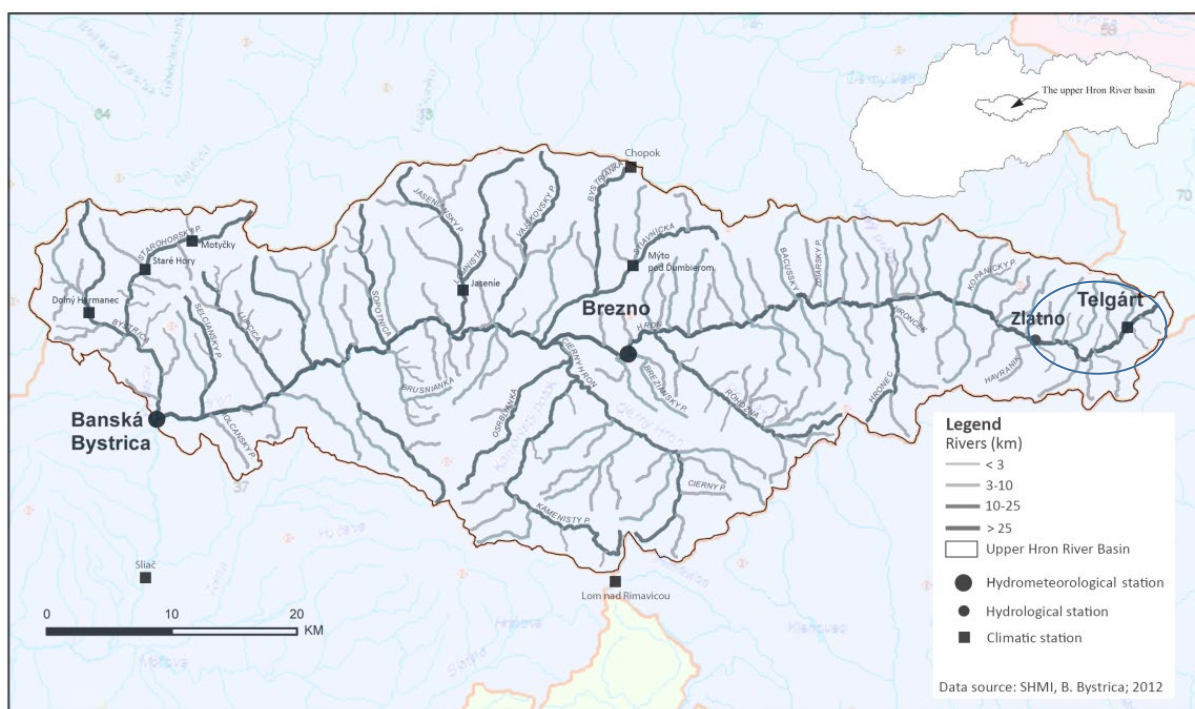
2 CIELE PRÁCE

Hlavným cieľom práce je skúmanie zmien hydroklimatických parametrov a ich dopad na hydrologický režim vodného toku. K jeho naplneniu viedlo niekoľko postupných krokov:

- 1) rešerš prác skúmajúcich zmeny hydroklimatických parametrov v oblasti centrálnej Európy; Slovenska a Českej republiky (ČR), čo umožnilo vytvoriť ucelenejší pohľad na dopady zmeny klímy v tomto regióne;
- 2) detekcia trendov a zmien hydroklimatických parametrov v záujmovom povodí, vzájomné prepojenie výsledkov klimatických a hydrologických analýz, porovnanie prebiehajúcich zmien s predpoveďami klimatických modelov;
- 3) vývoj extrému povodní a maximálneho odtoku – trendová analýza, príčiny, frekvencia, extremita a sezónnosť;
- 4) vývoj extrému sucha a minimálneho odtoku – trendová analýza, príčiny, frekvencia, extremita a sezónnosť;
- 5) diskusia a syntéza výsledkov.

3 ZÁUJMOVÉ POVODIE

Skúmanie dopadov zmeny klímy na hydrologický režim, je prezentované na čiastkovom povodí rieky Hron (plocha povodia 5 465 km²), tj. na povodí horného Hrona. Rieka Hron je druhou najdlhšou riekou Slovenska. Pramení pod Kráľovou hoľou v Nízkych Tatrách vo výške 934 m n.m. a ústí do Dunaja pri Štúrove vo výške 103 m n.m. Povodie horného Hrona je ukončené v profile Banská Bystrica (plocha povodia 1 766 km², **Obr. 1**). resp. u niektorých analýz v profile Zlatno (plocha povodia 83,7 km²).



Obr. 1 Záujmové povodie horného Hrona.

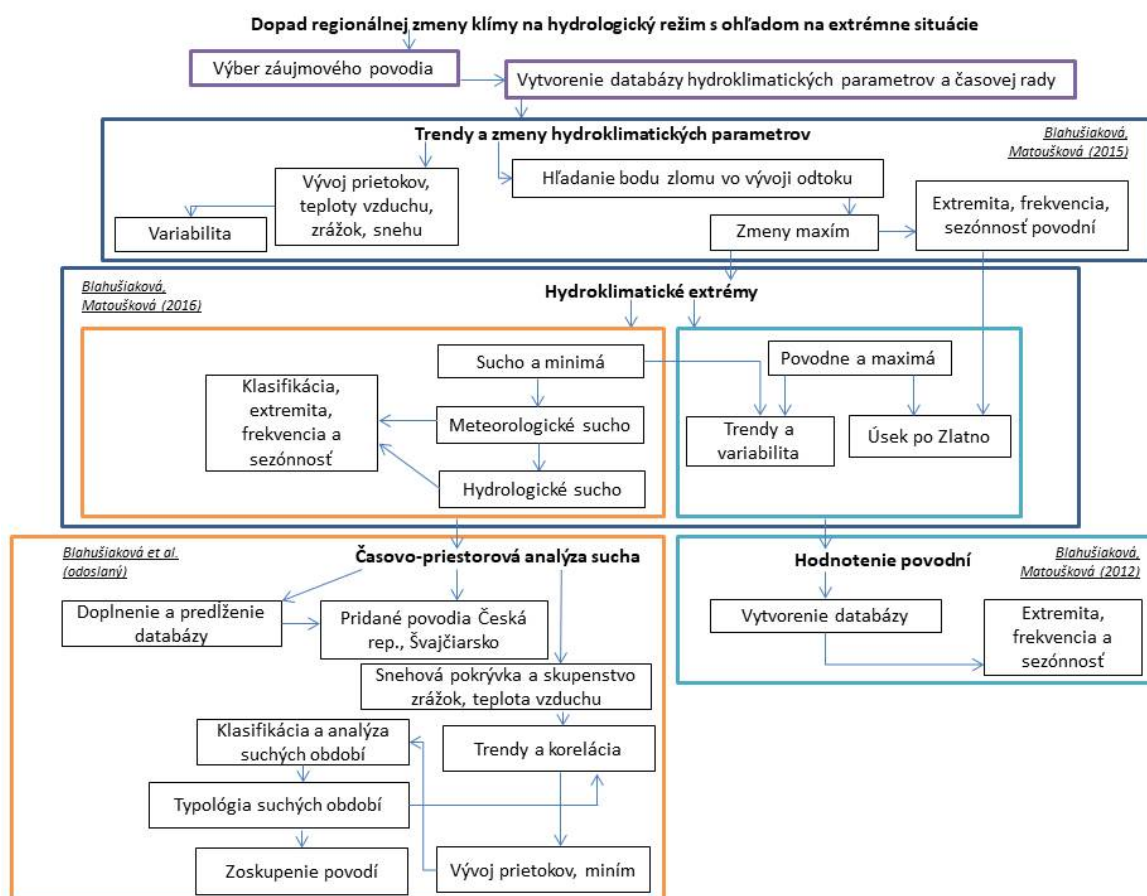
4 ZDROJOVÉ DÁTA A METODIKA

4.1 Zdrojové dáta

Databázu použitých dát možno rozdeliť na dve časti: databáza vytvorená výlučne pre sledovanie povodňového režimu horného Hrona (Blahušiaková a Matoušková, 2012) a databáza vytvorená pre sledovanie hydrologického režimu a hydroklimatických extrémov (Blahušiaková a Matoušková, 2015, 2016). Prvá databáza obsahuje informácie o dátume vzniku (kulminácia) povodní, mieste ich výskytu, vodnom stave, kulminačnom prietoku, dosiahnutom stupni povodňovej aktivity a u všetkých povodní od 90. rokov i informácie o ich príčinách a dôsledkoch. Zostavená je pre časové obdobie 1931-2010. Druhá databáza bola dopĺňovaná postupne. V prvej fáze obsahovala z hydrologických dát hodnoty priemerných prietokov v dennom a mesačnom kroku v období 1931-2010 a klimatické dáta v mesačnom kroku v období 1931/1961-2010. V druhej fáze bola časová rada 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 bolo cieľom predĺženie časovej rady (1966-2012) i jej doplnenie o povodia v ČR a Švajčiarsku. Detailné použitie základných i vypočítaných klimatických a hydrologických dát je súčasťou metodiky jednotlivých článkov autorky.

4.2 Metodický postup

Schéma na Obr. 2 stručne popisuje jednotlivé kroky postupu práce s odkazmi na príslušné články a Tab. 1 uvádza súhrn všetkých použitých metód s uvedením ich zdroja a odkazom na článok, v ktorom je daná metóda použitá.



Obr. 2 Zhrnutie postupu práce s odkazmi na jednotlivé články.

Prvým krokom bolo detekovanie trendov hydroklimatických parametrov a ich zmien (Blahušiaková a Matoušková, 2015). Pre detekciu bol použitý neparametrický Mann-Kendallov test (MK test), (Kliment a Matoušková, 2009; Ledvinka, 2016 atd.). Zmeny vo vývojovom trende odtoku, ukázali skonštruované jednoduché súčtové čiary. Zistený bod zlomu na ktorý poukázali, sa stal kritériom rozdelenia časovej rady na dve rovnako dlhé obdobia. Takto rozdelené obdobia vstupovali do komparatívnej analýzy (použité softwaru IHA; Richter et al., 1998). Analýza poukázala hlavne na zmeny vo vývoji maximálnych prietokov. Následne boli podľa veľkosti kulminačného prietoku a N-ročnosti vymedzené povodňové udalosti. Sledovaná bola ich extremita, frekvencia a sezónnosť.

V druhom kroku bolo prístupné k hodnoteniu hydroklimatických extrémov; sucha a povodní (Blahušiaková a Matoušková, 2016). Výskyt meteorologického sucha bol sledovaný použitím dvoch indexov sucha; Relative precipitation index (Novický et al., 2008) a de Martonne Aridity index (eMS, 2015). S cieľom skúmať sezónnosť, trvanie a frekvenciu suchých období, bola vytvorená ich klasifikácia. Suché obdobia boli klasifikované pomocou Threshold metódy. Hydrologické sucho bolo hodnotené pomocou dvoch hydrologických indexov; Low flow index (Poff a Ward, 1989) a Base flow index (Richter et al., 1998) a tiež na základe Threshold metódy, ktorá bola použitá i pre stanovenie hranice medzi nízkymi a vysokými prietokmi v komparatívnej analýze. Metódy hodnotiace maximá boli rovnaké ako v prvom kroku, s tým že je viac hodnotená ich sezónnosť.

V treťom kroku bol detailnejšie hodnotený extrém povodní (Blahušiaková a Matoušková, 2012). Z časového hľadiska bol tento krok prvý a odštartoval celý výskum štúdia hydroklimatických extrémov horného Hrona. Povodňová aktivita bola skúmaná v období 1930-1991 a 1992-2009(2010). Sledovaná bola ich frekvencia. Sezónnosť bola určená na základe dňa kulminácie, pričom povodne boli rozdelené do dvoch povodňových režimov; zimného a letného. Kritériom pre vymedzenie povodní, boli dosiahnuté stupne povodňovej aktivity (SPA).

V štvrtom kroku bol bližšie hodnotený extrém sucha (Blahušiaková et al., -), hlavne s ohľadom na zmeny v snehovej pokrývke. Prezentovaná časovo-priestorová analýza, bola zameraná i na vybrané povodia v ČR a Švajčiarsku. Snahou bolo porovnať chovanie povodí v rôznych nadmorských výškach. Hodnotené bolo skupenstvo zrážok na základe použitia dvoch metód (Tab. 1). V trendovej analýze bola použitá modifikovaná verzia MK; trend-free prewhitening TFPW (Yue et al., 2002a). Suché obdobia boli klasifikované použitím Threshold metódy s využitím funkcie Find droughts v R (Gustard a Demuth, 2009). Následne bola vytvorená typológia sucha podľa Van Loona (2015).

Tab. 1 Súhrn použitých metód.

Methods evaluate	Calculated according to	Find in article
Trends and changes		
Mann-Kendall test (unmodified version)	Mann (1945), Kendall (1975)	Blahušiaková, Matoušková (2015, 2016)
Mann-Kendall test (modified version)	Yue et al. (2002a)	Blahušiaková et al. (-)
Comparative analysis	Richter et al. (1998)	Blahušiaková, Matoušková (2016)
Linear regression	MS Excel 2010	Blahušiaková, Matoušková (2015, 2016)
Simple-mass curves	MS Excel 2010	Blahušiaková, Matoušková (2015)
Correlation and variability		
Pearson correlation coefficient	Hollander et al. (2013)	Blahušiaková et al. (-)
Coefficient of dispersion	Richter et al. (1998)	Blahušiaková, Matoušková (2015, 2016)

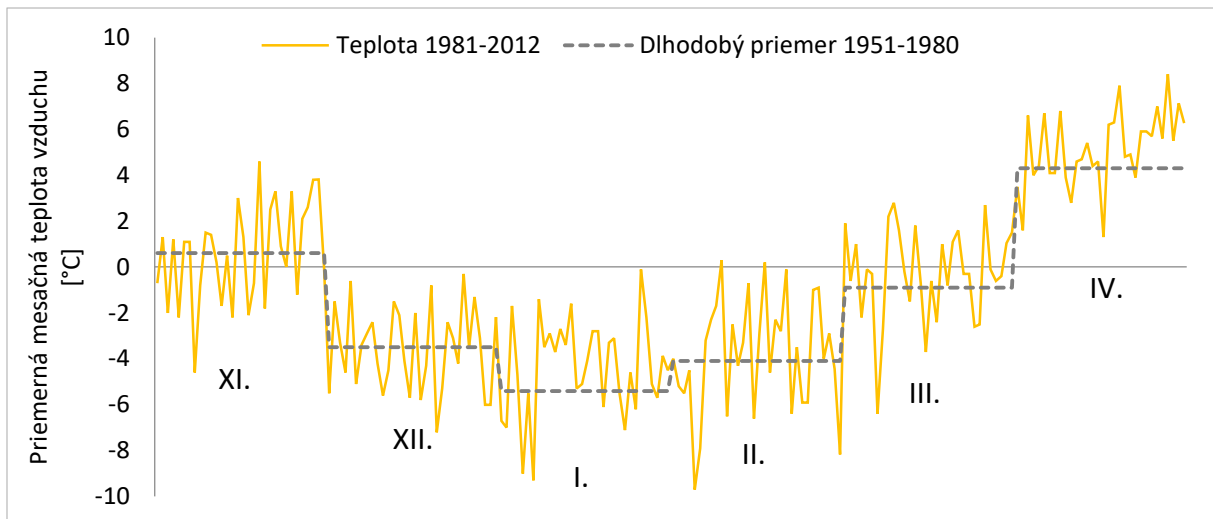
Floods		
Extremity, frequency and seasonality analysis	the methods below	Blahušiaková, Matoušková (2012, 2015, 2016)
SPA (level of flood activity)	SVP, B. Bystrica; Remžík a Janko (1987)	Blahušiaková, Matoušková (2012)
N-year flood event (return period)	Ministry of Forestry and Water Management of Slovakia (1987)	Blahušiaková, Matoušková (2015, 2016)
Threshold method, Peak flow	Richter et al. (1998)	Blahušiaková, Matoušková (2015, 2016)
Date of culmination	Remžík a Janko (1987), SHMÚ a SVP BB	Blahušiaková, Matoušková (2012, 2015, 2016)
Droughts		
Extremity, frequency and seasonality analysis	the methods below	Blahušiaková, Matoušková (2012, 2015, 2016)
Base flow index	Richter et al. (1998)	Blahušiaková, Matoušková (2015, 2016)
Low flow index	Poff a Ward (1989)	Blahušiaková, Matoušková (2016)
Relative precipitation index	Novický et al. (2008)	Blahušiaková, Matoušková (2016)
de Martonne Aridity index	eMS (2015)	Blahušiaková, Matoušková (2016)
Defining dry episodes by threshold method	Blahušiaková a Matoušková (2016)	Blahušiaková, Matoušková (2016)
Find droughts, Threshold method	Gustard a Demuth (2009)	Blahušiaková et al. (-)
Typology of droughts	Van Loon (2015)	Blahušiaková et al. (-)
Proportion of precipitation		
Snowfall fraction	Jenicek et al. (2016)	Blahušiaková et al. (-)
Snow day ratio	Sawicz et al. (2011)	Blahušiaková et al. (-)

5 SYNTÉZA A DISKUSIA VÝSLEDKOV

Analýzy ukázali, že k signifikantným zmenám hydroklimatických parametrov v povodí horného Hrona dochádza približne od 80. rokov 20. storočia, s výraznejšími prejavmi od 90. rokov. Zistený klesajúci trend odtoku koreluje hlavne s poklesom maximálneho odtoku, s rastom teploty vzduchu, poklesom snehovej pokrývky a sezónnymi zmenami zrážkových úhrnov. Je spojený i s poklesom frekvencie a extremity povodňových udalostí a zvýšením počtosti suchých a mimoriadne suchých období.

5.1 Trendy zrážkovo – odtokového režimu

Najsignifikantnejšie trendy zo všetkých skúmaných parametrov sa objavili u teploty vzduchu (Blahušiaková a Matoušková, 2015). K jej rastu dochádza na všetkých staniách, najviac na južne položených. Na staniách horného Hrona stúpla priemerná ročná teplota od 80. rokov o 0.4 až 1.2°C, čo je porovnateľné s horskými oblasťami ČR (Kliment et al., 2011). Sezónna a mesačná teplota signifikantne rastie v teplom polroku (V.-X.), najviac od mája do augusta, čo zaznamenali v európskom regióne i Luterbacher et al. (2016). V chladnom polroku (XI.-IV.) stúpla najviac v apríli a v januári (Obr. 3). Rast aprílovej teploty podtrhuje 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.



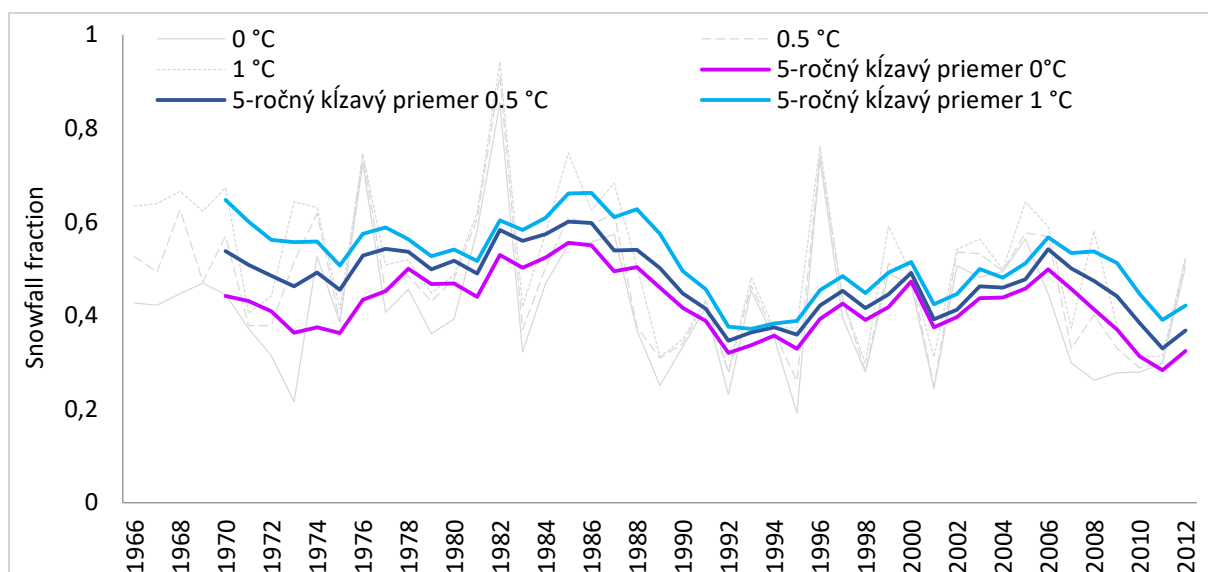
Obr. 3 Porovnanie vývoja teploty vzduchu v chladnom polroku v Telgárte v období 1981-2012 s dlhodobým priemerom 1951-1980.

V ročných zrážkových úhrnoch sa neobjavili signifikantné trendy. Podrobnejšie analýzy odhalili zmeny v ich prerozdelení počas roka. Sezónne rástli v máji a mierne klesali v novembri a februári. Rastúci trend zimných zrážkových úhrnov pozorovaný na Slovensku (Zeleňáková et al., 2017) i v niektorých ďalších oblastiach centrálnej Európy (Hänsel et al., 2007; Kliment et al., 2009) nebol v povodí signifikantne potvrdený. K zmenám zatiaľ nedochádza ani v lete a na jeseň.

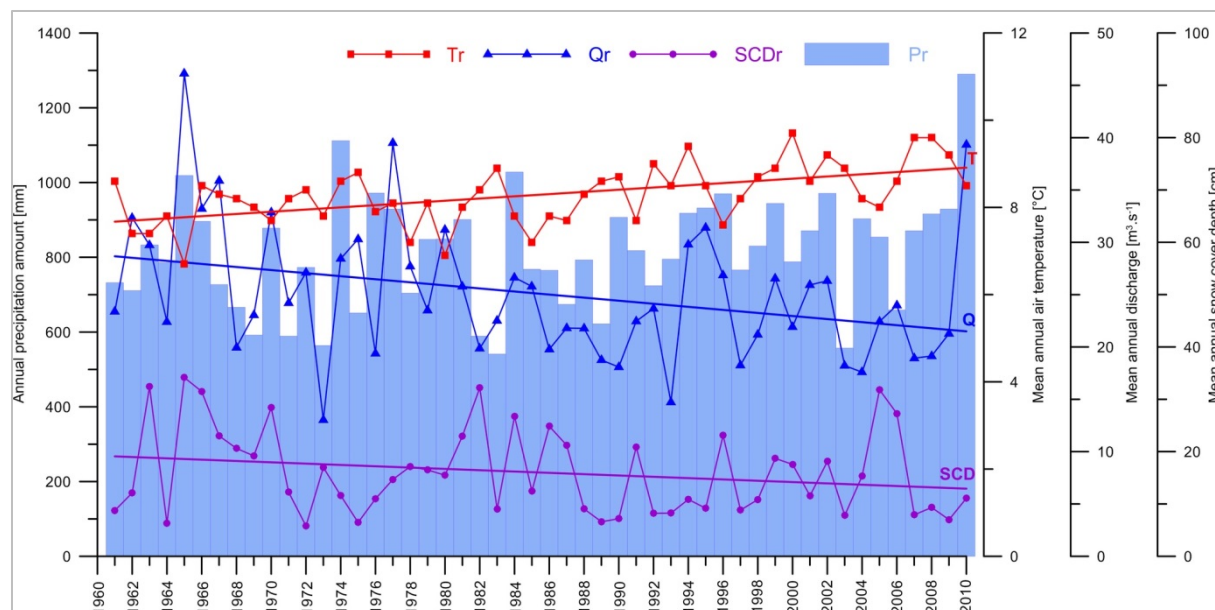
V chladnom polroku boli pozorované zmeny skupenstva zrážok (Blahušiaková et al.,-), znázornené na **Obr. 4** klesajúcou hodnotou snowfall fraction. Tento pokles je výraznejší predovšetkým na jar. Hlavným dôvodom poklesu je stúpajúca teplota, ktorá predovšetkým v druhej polovici jari negatívne ovplyvňuje trvanie a množstvo snehovej pokrývky. Podobné trendy tuhej zložky zrážok zaznamenali na Slovensku i Faško et al. (2018), v ČR Brázdil et al. (2009) alebo vo Švajčiarsku Jeníček et al. (2016). Najviac sa tieto zmeny prejavujú v stredných a nižších nadmorských výškach (do cca 1500 m). Práve tieto oblasti sú vystavené častejšej zmene skupenstva zrážok a sú náchylnejšie i na pokles snehovej pokrývky. Z výsledkov porovnania prahovej teploty pre stanovenie skupenstva zrážok vyplýva, že jej posun z 0 na 1°C spôsobuje zvýšenie početnosti a sily klesajúcich trendov tuhej zložky zrážok, a to predovšetkým v stredných a nižších nadmorských výškach. Pozorovaný je i sezónny posun trvania 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 stanicích, hlavne na začiatku a konci zimnej sezóny. Súčasne na viacerých stanicích klesá i hodnota maximálnej výšky snehovej pokrývky.

Hodnotenie odtoku v období 1931-2010 poukázalo na jeho signifikantný pokles na všetkých vodomerných stanicích (Blahušiaková a Matoušková, 2015). **Obr. 5** zobrazuje jeho pokles v B. Bystrici, kde bol najvýraznejší. Zároveň je na obrázku možné sledovať rast teploty, pokles výšky snehovej pokrývky a vývoj zrážkových úhrnov. Skrátением časovej rady na obdobie od 60. rokov sa okrem B. Bystrice signifikantné trendy odtoku strácajú. Toto koreluje s výskumom Mindřáša et al. (2011), ktorí pozorujú vo vývoji odtoku na Slovensku regionálne rozdiely. Výraznejší pokles je sledovaný v oblasti južného a centrálneho Slovenska, kde leží i záujmové povodie horného Hrona. Obecne je toto povodie klasifikované ako povodie s klesajúcim dlhodobým prietokom (Poórová et al., 2013a). Podobná situácia je v období 1931-2010 u sezónneho odtoku. Pozorovaný bol signifikantný pokles v chladnom (november až február) i v teplom polroku (jún). Skrátением tohto obdobia od 60. rokov klesá

signifikantne len letný odtok (jún) a dochádza k poklesu jarného odtoku (máj). Na pokles odtoku na jar a v lete má vplyv rastúca teplota a znižujúce sa zrážky. Zimný odtok signifikantne klesá v novembri a decembri len v prípade skrátenia i konca časovej rady (1960-1990), čo súvisí s predpokladaným zvyšovaním sa zimného odtoku.



Obr. 4 Podiel tuhých zrážok na celkovom úhrne zrážok v chladnom polroku (XI-IV.) v Telgarte v období 1966-2012.



Obr. 5 Vývoj klimatických a hydrologických parametrov (priemerného ročného prietoku Q_r , teploty vzduchu T_r , úhrne zrážok Pr a výšky snehovej pokrývky $SCDr$) v B. Bystrici v období 1961-2010.

Pre povodie horného Hrona predikujú [Hlavčová et al. \(2010\)](#) rast odtoku od novembra/decembra do februára/marca a jeho pokles od mája do októbra/novembra. Tento očakávaný predpoklad sa v povodí horného Hrona v prípade zimného odtoku nepotvrdil. Skracovaním časovej rady a na druhej strane jej predlžovaním o obdobie posledných desaťročí (1961-2015) je pozorovaná zmena vo vývoji zimného odtoku smerom k pozitívnym trendom, nie je však štatisticky významná. Podobnú situáciu sledujeme i v poklese jarných a letných prietokov, ktoré od 60. rokov klesajú signifikantne na niektorých staniciach. Na viacerých povodiach centrálnej Európy ([Kulasová et al., 2008](#); [Kliment et al., 2011](#)) sú už

signifikantné trendy rastúceho odtoku v zime a klesajúceho na jar a v lete pozorované. Potvrdili to i naše hodnotenia v ČR a vo Švajčiarsku (Blahušiaková et al., -).

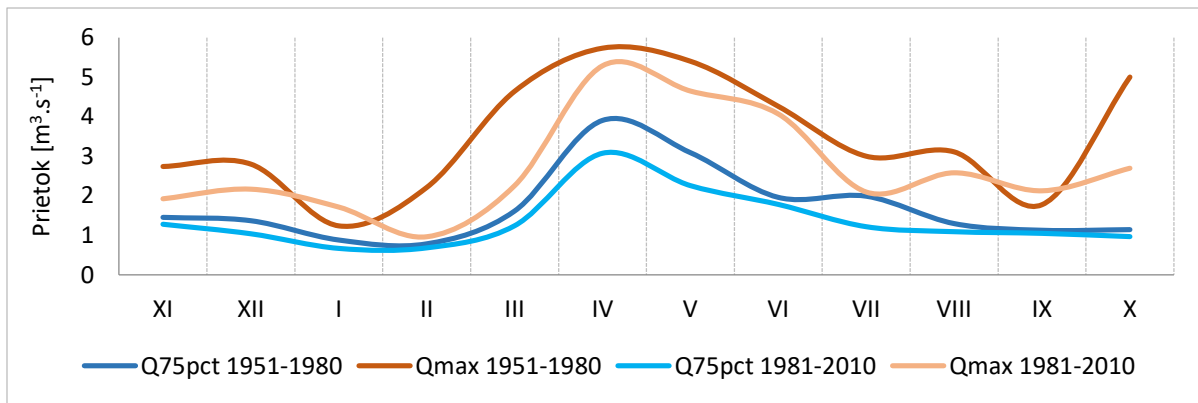
Trendová analýza na povodí horného Hrona potvrdzuje fakt, že pri aplikácii štatistických testov, je dĺžka zvolenej časovej rady veľmi dôležitá a ovplyvňuje početnosť signifikantných trendov (Yue et al., 2002b). Skúškou na rôzne dlhých časových radoch a ich kombináciách sa naozaj potvrdilo, že najpočetnejšie trendy sú v najdlhšej časovej rade od 30. rokov. Pri porovnaní výsledkov nemodifikovanej a modifikovanej verzie MK testu (Obr. 6) možno konštatovať, že výsledky oboch verzií testov sú celkom porovnateľné, s o niečo silnejšími trendmi u nemodifikovanej verzie.

	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																			
I																			
II																			
III																			
IV																			
V																			
VI																			
VII																			
VIII																			
IX																			
X																			
Year																			
XI-IV																			

Obr. 6 Porovnanie výsledkov nemodifikovanej (U) a modifikovanej (M) verzie Mann-Kendallovho testu v stanici Zlatno a Telgárt v období 1966-2012; 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.

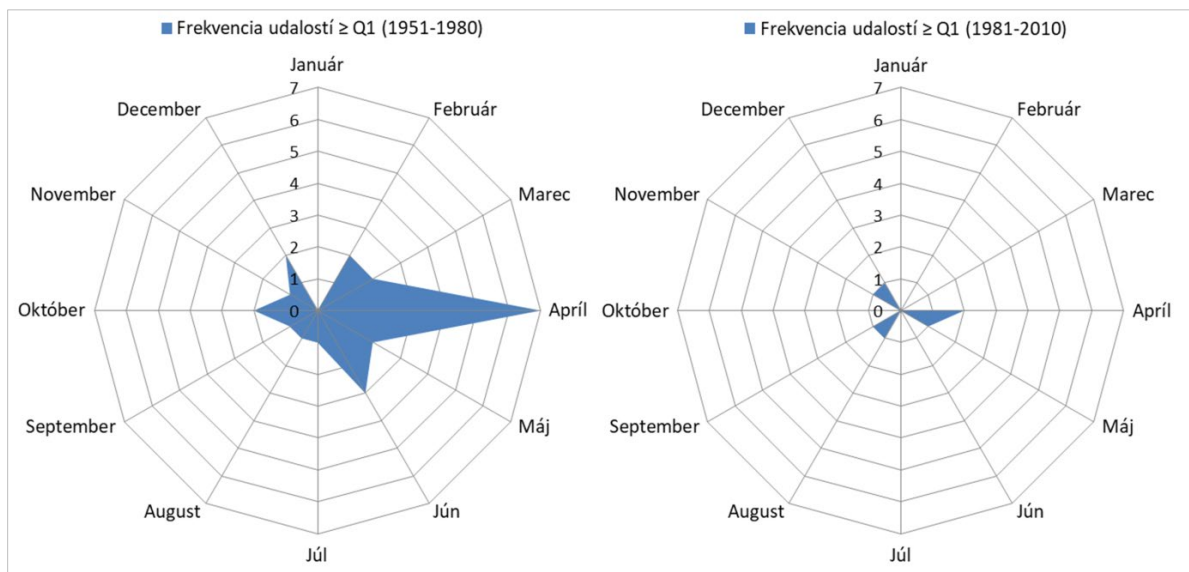
5.2 Hodnotenie extrému povodní a maximálneho odtoku

Podľa výsledkov MK testu i komparatívnej analýzy sa vodnosť horného Hrona z pohľadu maxim znižuje. Signifikantne klesá ročný, sezónny i denný maximálny odtok v období 1931-2010 (Blahušiaková a Matoušková, 2015). V chladnom polroku k najväčšiemu poklesu došlo v marci, čo potvrdzuje klesajúca hodnota 75-percentného mesačného prietoku (Obr. 7). Maximum však výrazne klesá i vo februári, novembri a decembri. Najväčší pokles v teplom polroku, bol zaznamenaný v októbri a júli. Naopak rast vykazoval január a september. U denných hodnôt maximálneho odtoku bol najväčší pokles objavený v hodnotách 1-, 3- a 7-denného maxima. Výsledky potvrdzujú výskum Jeneiovej et al. (2014), ktorí na povodiach východného a centrálného Slovenska zaznamenali obecné klesajúci trend maximálneho odtoku.



Obr. 7 Porovnanie vývoja priemerného maximálneho mesačného prietoku (Q_{max}) a 75-percentného mesačného prietoku (Q_{75pct}) v Zlatne medzi obdobím 1951-1980 a 1981-2010.

Klesajúca frekvencia i extremita a zmena sezónnosti povodňových udalostí bola zaznamenaná od 80. rokov (Blahušiaková a Matoušková, 2015, 2016). Sledovaný bol výskyt udalostí s dosiahnutým alebo prekročeným prietokom $\geq Q_1$, Q_5 , Q_{20} , Q_{50} a Q_{100} . Udalosti s 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. 8** poukazuje na klesajúcu frekvenciu i sezónnosť udalostí $\geq Q_1$. V povodí sa povodne vyskytovali najčastejšie na konci zimy a počas jari. Ich počet ale významne klesol, a to hlavne v apríli. V teplom polroku sa najčastejšie vyskytli v prvej polovici leta a na jeseň. Zaznamenaný posun výskytu udalostí s prietokom $\geq Q_1$ z jari do neskorého leta až začiatku jesene koreluje s poklesom v maximálnych hodnotách. Podobný posun sezónnosti v povodiach centrálného Slovenska zaznamenali Parajka et al. (2009). Predpokladaný posun maximálneho odtoku z neskoršej jari na jej začiatok, ako to v súvislosti s rastom teploty a skracovaním trvania snehovej pokrývky zaznamenali na Šumave v ČR 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.

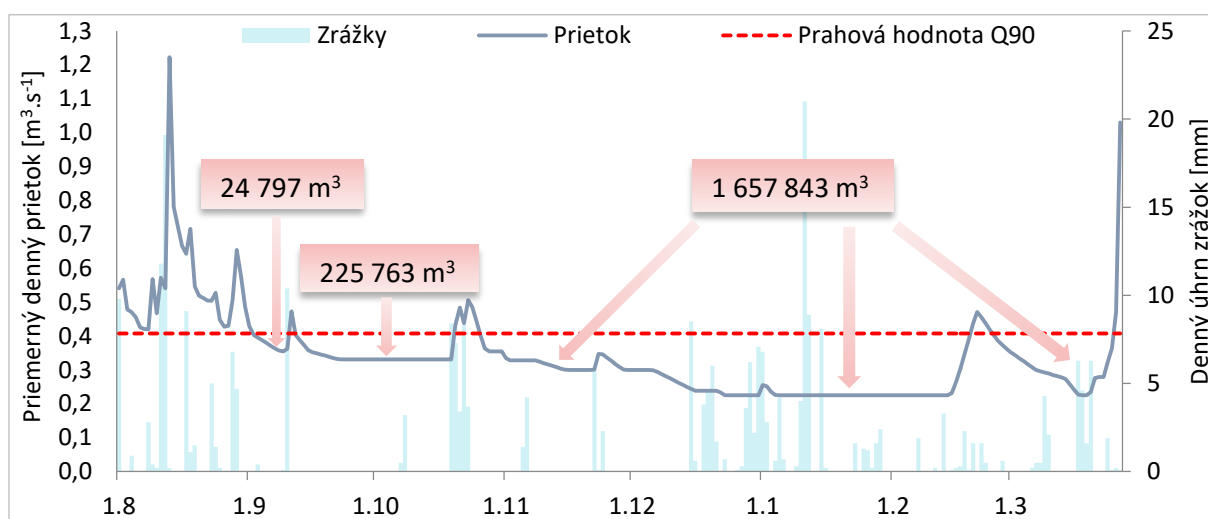


Obr. 8 Frekvencia a sezónnosť udalostí $\geq Q_1$ v B. Bystrici v období 1951-1980 a 1981-2010.

5.3 Hodnotenie extrémneho sucha a minimálneho odtoku

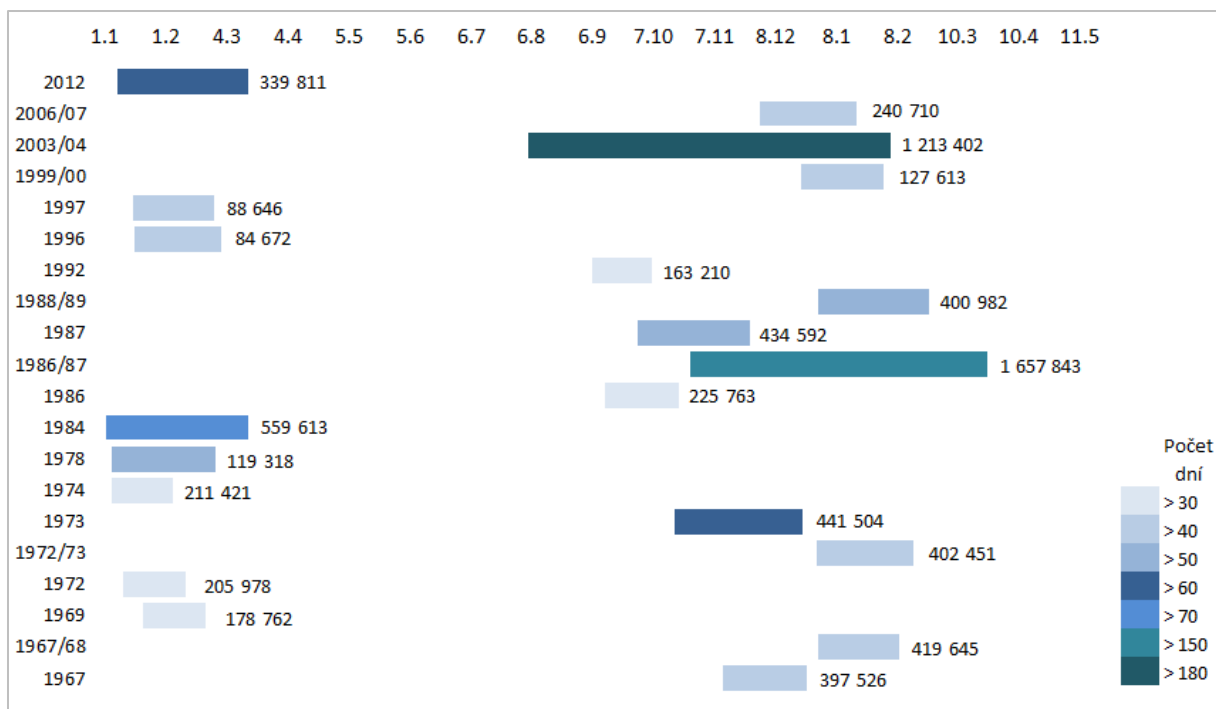
Vyhodnotenie frekvencie, extremity a sezónnosti meteorologického sucha v období 1961-2010 ukázalo, že v povodí horného Hrona boli častejšie suché epizódy v chladnom polroku, s najväčšou frekvenciou v r. 1975 a 1984. Najviac početné boli v januári a marci, čo je pre horské povodia s akumuláciou snehu 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 ich menšia frekvencia, s najväčšou početnosťou v októbri.

Výsledky meteorologického sucha korelujú so suchom hydrologickým. 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. 9**. 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. 10** je možné okrem tohto javu, sledovať i hodnoty objemu deficitu sucha, ktoré sa s predlžovaním trvania hydrologického sucha zväčšujú.



Obr. 9 Vývoj suchých epizód s vyznačeným deficitom vody v Zlatne v období 1986-1987.

Štatistické hodnotenie ročného minimálneho odtoku odhalilo signifikantné trendy len v období 1931-2010, s najväčším poklesom v hodnote Q_{330} ([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. V hodnotách 1-, 3-, a 7-denného minima sa objavil slabý rast a u 30- a 90-denného minima slabý pokles. K posunu obdobia s výskytom minimálneho prietoku v chladnom polroku nedošlo. V teplom polroku došlo ale k posunu obdobia s výskytom minima zo septembra do augusta, čo súvisí so zisteným rastom minimálneho odtoku na jeseň.



Obr. 10 Prehľad období hydrologického sucha trvajúceho nepretržite viac ako 30 dní v profile Zlatno v období 1961-2012, pozn. čísla udávajú objem deficitu vody v m³.

Výsledky typológie sucha s ohľadom na vývoj snehovej pokrývky (Blahušiaková et al.,-) potvrdili, že tu prevládajú deficitu 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 warm & cold snow season drought A, u ktorého bola zistená najväčšia signifikantná závislosť vývoja snehovej pokrývky v predchádzajúcom zimnom období na následný vývoj odtoku a minim, 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). Keďže snehová pokrývka v povodí horného Hrona už teraz signifikantne klesá a rastúca teplota ovplyvňuje skupenstvo zrážok a zvyšuje výpar, nemožno vylúčiť, že pod vplyvom týchto 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.

6 ZÁVER

Povodie horného Hrona je senzitívne na regionálne otepľovanie a zmeny klimatických parametrov, čo má signifikantný dopad na odtok. Pokles vodnosti i zmeny vo vývoji hydroklimatických parametrov sú pozorované od 80. rokov 20. storočia. Zistený klesajúci trend odtoku koreluje hlavne s poklesom maximálneho odtoku, s rastom teploty vzduchu, poklesom snehovej pokrývky a tuhej zložky zrážok i sezónnymi zmenami zrážkových úhrnov. Je spojený s poklesom frekvencie a extremity udalostí $\geq Q_1$ a zvýšením početnosti suchých období.

Horný Hron má snehovo-dažďový režim odtoku, a preto prípadné zmeny v zimno-jarnom období signifikantne ovplyvnia celoročný odtok. Toto sa v povodí i potvrdilo. Signifikantné zmeny nastávajú v teplote vzduchu. Relatívne vyššia teplota počas chladného

polroka zapríčiňuje pokles výšky snehovej pokrývky i tuhej zložky zrážok. Dochádza k skráteniu trvania snehovej pokrývky; k jej akumulácii dochádza neskôr a jej topenie naopak nastáva skôr. Tieto zmeny by mali zvyšovať zimný odtok, ako to predikujú pre povodie horného Hrona Hlavčová et al. (2010). Takto očakávaný vývoj nebol zatiaľ v povodí horného Hrona signifikantne potvrdený. Tieto výsledky súvisia i so zisteným poklesom maximálneho odtoku a s poklesom udalostí $\geq Q_1$, ktorých častejší výskyt sa posúva zo zimno-jarného obdobia na neskoré leto a jeseň. Suché epizódy sa objavili častejšie v chladnom polroku, čo je pre horské povodie s týmto režimom odtoku typické. Horný Hron patrí medzi tie slovenské povodia, kde bola zistená najväčšia frekvencia zimných dlhotrvajúcich suchých epizód (Demeterová a Škoda, 2009). Dá sa ale predpokladať, že bude rásť ich početnosť na jar a v lete, čo predikujú klimatické modely (Rončák et al., 2019). Naznačuje to i detekovaný signifikantný pokles jarného odtoku v záujmovom povodí. V porovnaní so skúmanými povodiami v ČR a Švajčiarsku, dochádza k týmto zmenám v povodí horného Hrona pozvoľna. V týchto povodiach je už zaznamenaný výraznejší pokles jarného a letného minimálneho odtoku. Dôvodom môže byť miernejší rast teploty a menej výrazné zmeny vo vývoji zrážok v chladnom polroku v povodí horného Hrona.

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 potvrdiť.

Výsledky predkladanej práce 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.

Literatúra

- Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2012. Analýza povodní na hornom toku Hrona v rokoch 1930 – 2010. *Geografie*, 117, 4, 415–433.
- 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.
- 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.
- Blahušiaková, A., Matoušková, M., Jeníček, M., Ledvinka, O., Kliment, Z., Podolinská, J., Snopková, Z., (-). Hydrological drought occurrence and drought types regarding to changes in snow cover in selected mountain catchments in Central Europe. *Hydrological Sciences Journal*.
- Blaškovičová, L., Danáčová, Z., Lovásová, E., Šimor, V., Škoda, P., 2014. Vyvoj vybraných hydrologických charakteristik na Dunaji v Bratislave. Spracované v rámci projektu „Identifikácia zmien hydrologického režimu riek v povodí 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., 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.
- 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.
- (eMS) Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2015. Verze eMS 1.2 (11/2015), ČMeS. Available from: <https://slovník.cmes.cz>.
- 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.

- Gustard, A., Demuth, S. (Eds), 2009. Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report, No. 50, WMO-No. 1029, 136 p.
- 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.
- 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 (CECILLA)*, STU Bratislava, 28 p. Available from: https://web.natur.cuni.cz/hydropredict2010/download/presentation/270_hlavcova.pdf.
- Hollander, M., Wolfe, D.A., Chicken, E., 2013. Nonparametric Statistical Methods, 3rd Edition. New York: Wiley, 848 p. ISBN 978-0-470-38737-5.
- 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.
- Janský, B., 2003. Water Retention in River Basins. *Acta Universitatis Carolinae*, 2, 173–183.
- 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.
- 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.
- 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., 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.
- 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.
- Kulasová, B., Boháč, M., Fiala, T., 2008. Climate change impacts on low flows. *Sborník příspěvků z workshopu Adolfa Patery 2008*, Praha, 95–102.
- 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., 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., 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>.
- Ledvinka, O., 2016. Statistical analysis of long hydrological and climatological data series. Diss. Thesis. Charles University, Praha, 84 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., Jungclauss, 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.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245–259. DOI: 10.2307/1907187.
- 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.
- 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 podmínkách klimatické změny na území České republiky. Úkol VÚV T.G.M. 2051, zpráva za rok 2008, VÚV T.G.M., Praha, 57 p.
- 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.
- 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.
- Poórová, J., Škoda, P., Danáčová, Z., Šimor, V., 2013a. Vývoj hydrologického režimu slovenských riek. *Životné Prostredie*, 47, 3, 144–147.
- Poórová, 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.
- 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.
- 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.
- Van Loon, A.F., 2015. Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2, 359–392. DOI:10.1002/wat2.1085.
- Vlček, L., 2017. Retence vody v púdách horských oblastí na príkladu Šumavy. Disertační práce, Karlova univerzita, Praha, 127 p.
- Výberčí, 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.
- 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.
- Zeleňáková, 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.

1 INTRODUCTION

Climate change and the occurrence of various extreme weather events have led many experts to investigate the mechanisms of ongoing changes and their possible impacts in more detail. The exploration of the past is needed to understand the more frequent occurrence of extremes and their changes (Nováky and Bálint, 2013). This assessment can be useful for detection whether and what impact has the projected climate change on the hydrological regime. This is the reason for the growing number of researches evaluating the development of climatic and hydrological characteristics. Examples include research from the Czech Republic (Kliment et al., 2011; Langhammer et al., 2015), in which the authors examined long-term changes in climate and hydrological parameters and their impact on changes in the hydrological regime of mountain Czech rivers. An important aspect of dealing with this issue should be the interconnection of climate and hydrological analyzes. However, this aspect is missing in many studies, which makes it impossible to monitor the climate impact on the hydrological regime. The study dealing with the research of changes in climatic conditions in Slovakia includes research of Labudová et al. (2015). They point to shifts in climate regions within Slovakia. The shift of the warm climate region from south to north was observed. This change also affects the upper Hron catchment. The spatial assessment of the Slovak watercourses was addressed by Poórová et al. (2013a). The catchments were divided according to the development of the average annual runoff, while the upper Hron catchment belongs to the group with decreasing runoff trend. At this point, it could be argued that the runoff decrease is caused by the shift of climate zones in Slovakia. A more detailed analysis is needed to attempt to link the results of these studies. So, the aim of this study is to supplement the research of interconnection of climatic and hydrological analyzes, which will allow better understanding of changes in the development of rainfall-runoff regime.

The occurrence of hydroclimatic extremes is related to changes in rainfall-runoff regime. Floods are projected to grow for most areas of Central Europe, on the one hand, especially in the context of extreme rainfall situations. Their effect on runoff was investigated in the Šumava region by Vlček et al. (2016) or Janský (2003). On the other hand, the risk of drought should increase under the influence of rising air temperature and lack of precipitation (IPCC, 2014). Drought impact is less extreme in head watercourses (Poórová et al., 2013b). Královec et al. (2016) confirmed it by indicating a significantly higher runoff in forested catchment compared to non-forested during dry periods.

Trends in the climatic and hydrological development, as well as the development of extremes (e.g. increasing frequency and intensity) is possible to reveal by statistical assessment of determinant parameters for a sufficiently long time period (Lapin, 2013). Such research was carried out in the south of Slovakia (Blaškovičová et al., 2014). The authors observed an increasing trend of maximum flow in the Danube catchment. In contrast, Jeneiová et al. (2014) recorded a decreasing trend of maximum flow in Eastern and Central Slovakia. Regional differences are also reflected in the minimum flow. Poórova et al. (2013b) observed the most favorable conditions in minimum flow development in head watercourses (e.g. Váh, Hron and Slaná) and unfavorable in lower courses in the south of Slovakia. These researches show that the runoff in Slovakia differs regionally. It can be assumed that this development may regroup into the head watercourses, also into the upper Hron catchment due ongoing changes.

2 AIMS OF THE STUDY

The main aim of the research is to study changes of hydroclimatic variables influencing the runoff regime. Several subsequent steps were taken to reach the goal:

1. background search of literature focused on changes of hydroclimatic variables in the Central Europe, Slovakia and Czech Republic which has enabled to form more comprehensive view on the regional climate change impacts
2. detection of trends in hydroclimatic variables in the study catchment, mutual combination of results of climatic and hydrological analyses, comparison of ongoing changes with climate models forecasts;
3. extreme floods and maximum runoff development – trend analysis, causes, frequency, extremity and seasonality;
4. extreme drought and minimum runoff development – trend analysis, causes, frequency, extremity and seasonality;
5. discussion and synthesis of results.

3 STUDY AREA

The impacts of regional climate change on the hydrological regime are presented on the sub-basin of the Hron river (area 5 465 km²); on the upper Hron catchment. The Hron river is the second longest river in Slovakia. The Hron springs under the Kráľová hoľa Mountain in the Low Tatras at 934 m a.s.l. and flows into the Danube near Štúrovo at 103 m a.s.l. The upper Hron up to Banská Bystrica (area 1 766 km², **Fig. 1**) and up to Zlatno (area 83.7 km², were selected as the study basins.

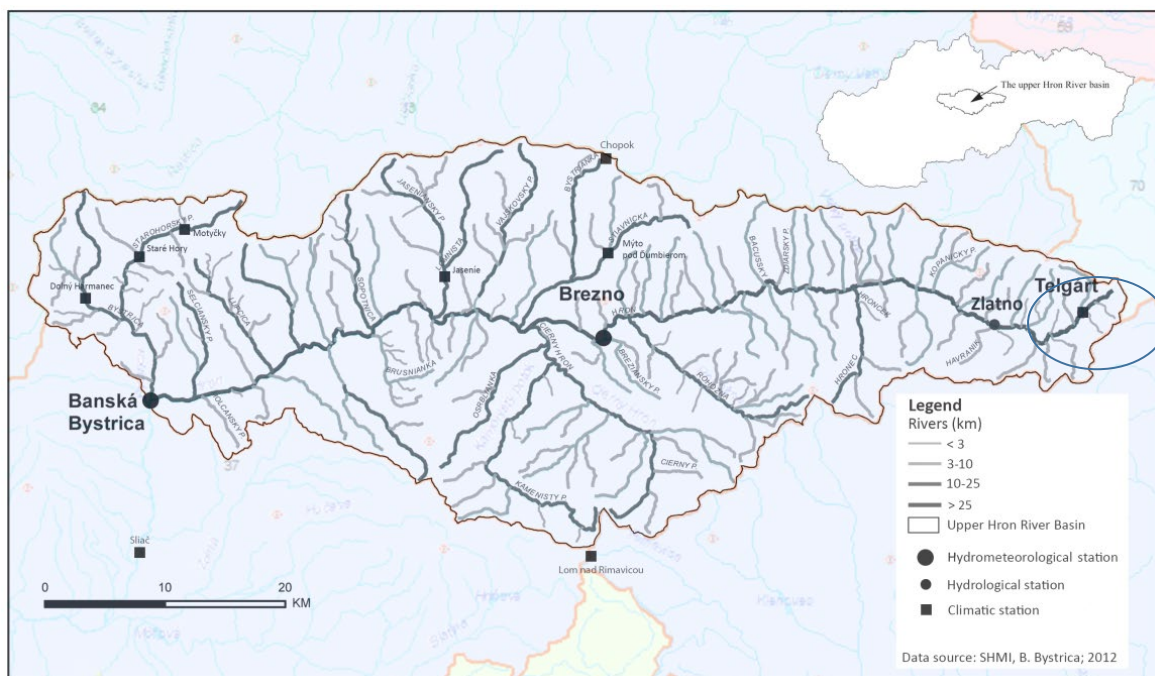


Fig. 1 Study area – the upper Hron basin, Slovakia.

4 DATA AND METHODS

4.1 Data

The database of used data can be divided into two parts: the database created especially for the observation of the upper Hron flood regime (Blahušáková and Matoušková, 2012), and the database for the observation runoff regime and hydroclimatic extremes (Blahušáková and Matoušková, 2015, 2016). The first database contains information on: date of occurrence (culmination), place of occurrence, water level, peak flow, level of flood activity, and causes and consequences at all floods that had occurred since 1990s. The database was compiled for the 1931-2010 period. The second database has been complemented gradually. In the first stage it has included hydrologic data on average daily and monthly discharge from 1931 to 2010, and monthly climatic data from 1931/1961 to 2010. In the second stage the time period was shortened from 1961 to 2010 with the aim to assess hydroclimatic extremes on daily basis in a typically headwater basin up to Zlatno. The third stage aimed at the extension of time period from 1966 to 2012 and comparison of upper Hron with other catchments (in the Czech Republic and Switzerland). Details on the use of basic as well as calculated climatic and hydrological values are the part of methodology chapter elaborated by the author.

4.2. Methodology

The scheme in the **Fig. 2** briefly describes individual steps in the working procedure together with references to the relevant journal articles. **Tab. 1** presents the summary of all used methods with the references.

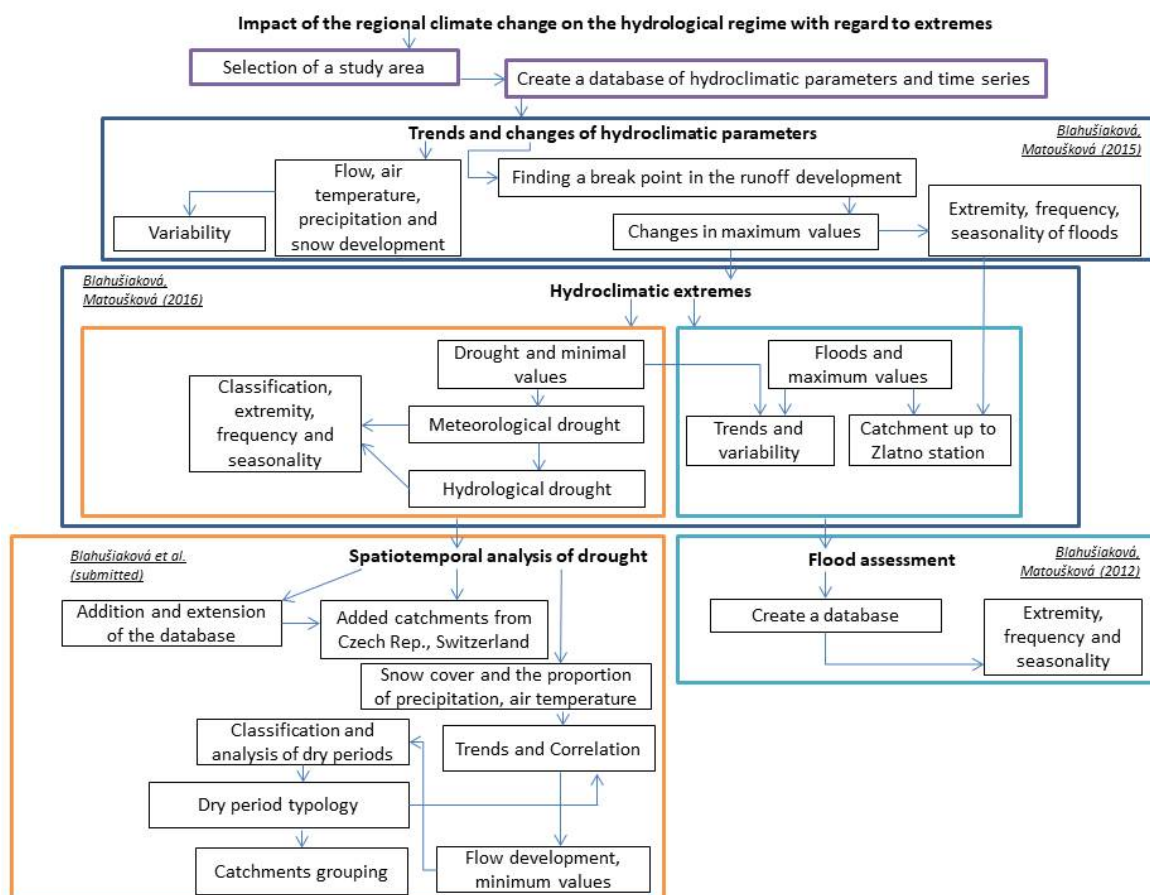


Fig. 2 Main steps of the thesis with links to individual articles.

The first step was the detection of trends in hydroclimatic variables and their changes (Blahušáková and Matoušková, 2015). Mann-Kendal non parametric test (MK test) was chosen as the main method for a trend detection (Kliment and Matoušková, 2009; Ledvinka, 2016). Constructed simple-mass curves had shown if and when a change in the runoff development occurred in the study period. A change point which was identified by simple-mass curves has become a criterion for dividing the study period into two same long periods. Using comparative analysis (Indicators of Hydrological Alteration software; Richter et al., 1998) the selected hydrological values were compared in these two periods. In particular, changes in maximum values were detected. Thus, according to a peak flow flood events were defined. The extremity, frequency and seasonality of floods were evaluated.

In the second step, hydroclimatic extremes, i.e. droughts and floods were assessed (Blahušáková and Matoušková, 2016). The meteorological drought and its occurrence were analysed using two drought indexes; Relative precipitation index (Novický et al., 2008) and de Martonne Aridity index (eMS, 2015). Dry periods were determined also according to Threshold method. Then their seasonality and frequency were examined. The hydrologic drought was assessed using two indexes; Low flow index (Poff and Ward, 1989) and Base flow index (Richter et al., 1998). The separation between high and low flows in the comparative analysis was done using a single fixed threshold. In this second step, maximum values were also examined. Especially their seasonality was evaluated.

In the third step the floods were assessed in more detail (Blahušáková and Matoušková, 2012). From the time perspective, this was the first step that started the whole research in the upper Hron. The flood frequency was evaluated from 1930 to 2010. The levels of flood activity were set as a flood-defining criterion. The levels of flood activity also determined the extremity of floods. The seasonality was determined on the basis of the culmination date. According to the date, the floods were divided into two flood regimes; winter and summer.

In the fourth step the droughts was assessed in more detail (Blahušáková et al.,-) with regard to changes in snow cover. Therefore, the proportion of precipitation occurring as snow to total precipitation was evaluated using two methods (Tab. 1). Dry seasons were classified using the Threshold method by Find droughts in R (Gustard a Demuth, 2009). The drought typology was evaluated according to Van Loon (2015). For trend detection of selected climatic and hydrological parameters a modified MK test (trend-free prewhitening TFPW) was used (Yue et al., 2002a). Spatiotemporal analysis was focused on the upper Hron but also on selected catchments in the Czech Republic and Swiss. So, it was possible to compare the changes in selected climatic and hydrological parameters in different elevations.

Tab. 1 Used methods.

Methods evaluate	Calculated according to	Find in article
<i>Trends and changes</i>		
Mann-Kendall test (unmodified version)	Mann (1945), Kendall (1975)	Blahušáková, Matoušková (2015, 2016)
Mann-Kendall test (modified version)	Yue et al. (2002a)	Blahušáková et al. (-)
Comparative analysis	Richter et al. (1998)	Blahušáková, Matoušková (2016)
Linear regression	MS Excel 2010	Blahušáková, Matoušková (2015, 2016)
Simple-mass curves	MS Excel 2010	Blahušáková, Matoušková (2015)
<i>Correlation and variability</i>		
Pearson correlation coefficient	Hollander et al. (2013)	Blahušáková et al. (-)
Coefficient of dispersion	Richter et al. (1998)	Blahušáková, Matoušková (2015, 2016)

Floods		
Extremity, frequency and seasonality analysis	the methods below	Blahušiaková, Matoušková (2012, 2015, 2016)
SPA (level of flood activity)	SVP, B. Bystrica; Remžík a Janko (1987)	Blahušiaková, Matoušková (2012)
N-year flood event (return period)	Ministry of Forestry and Water Management of Slovakia (1987)	Blahušiaková, Matoušková (2015, 2016)
Threshold method, Peak flow	Richter et al. (1998)	Blahušiaková, Matoušková (2015, 2016)
Date of culmination	Remžík a Janko (1987), SHMÚ a SVP BB	Blahušiaková, Matoušková (2012, 2015, 2016)
Droughts		
Extremity, frequency and seasonality analysis	the methods below	Blahušiaková, Matoušková (2012, 2015, 2016)
Base flow index	Richter et al. (1998)	Blahušiaková, Matoušková (2015, 2016)
Low flow index	Poff a Ward (1989)	Blahušiaková, Matoušková (2016)
Relative precipitation index	Novický et al. (2008)	Blahušiaková, Matoušková (2016)
de Martonne Aridity index	eMS (2015)	Blahušiaková, Matoušková (2016)
Defining dry episodes by threshold method	Blahušiaková a Matoušková (2016)	Blahušiaková, Matoušková (2016)
Find droughts, Threshold method	Gustard a Demuth (2009)	Blahušiaková et al. (-)
Typology of droughts	Van Loon (2015)	Blahušiaková et al. (-)
Proportion of precipitation		
Snowfall fraction	Jenicek et al. (2016)	Blahušiaková et al. (-)
Snow day ratio	Sawicz et al. (2011)	Blahušiaková et al. (-)

5 SYNTHESIS AND DISCUSSION

The significant changes in hydroclimatic variables in the upper Hron catchment have occurred since the 1980s, with more pronounced trends since the 1990s. The observed decrease in runoff correlated with a significant decrease of maximum runoff, an increase in air temperature, a decrease in snow cover and snowfall fraction and seasonal changes in precipitation totals. It is associated with decreases in the occurrence of events where discharge is $\geq Q_1$ as well as more frequent occurrence of dry episodes in cold season.

5.1 Rainfall-runoff regime trends

The most significant trends from all investigated parameters were examined at air temperature (Blahušiaková and Matoušková, 2015). An increasing trend was observed at all stations, with the most pronounced trends at the south located stations. In the study catchment, the mean annual air temperature has risen from 0.4 to 1.2°C since the 1980s, which is comparable to the Czech mountain catchments (Kliment et al., 2011). An increase in monthly air temperature was the most significant from May to August during warm season (V.-X.). This trend was also observed in the European region by Luterbacher et al. (2016). In the cold season (XI.-IV.) air temperature increased most in April and January (Fig. 3). An increase in April's air temperature is underlined by the fact that it is not uncommon that short heat waves to appear at the end of April (Výberčí et al., 2015) or early May (Labudová et al., 2015) in

recent years. This is related to the warming in recent decades, which is the most significant over the past 2000 years (Luterbacher et al., 2016).

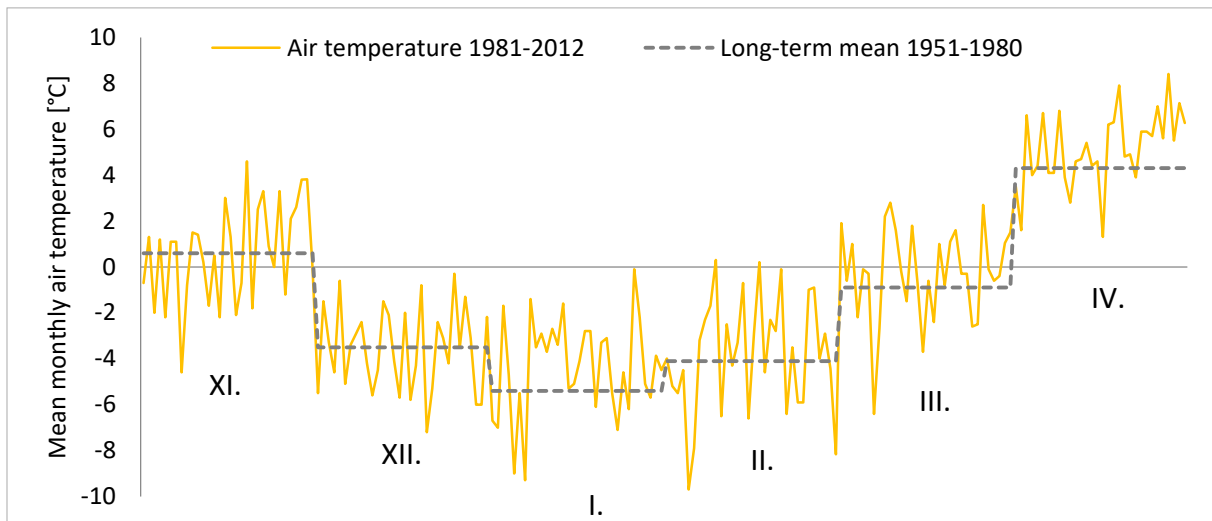


Fig. 3 Comparison of mean monthly air temperature in 1981-2012 with long-term mean monthly air temperature in 1951-1980 for Telgárt in cold season.

No evidence of statistically significant changes was found in the assessment of annual precipitation. However, changes in their distribution over the year were observed. An increase was observed in May and a slight decrease in November and February. The increasing trend of winter precipitation recorded in Slovakia (Zeleňáková et al., 2017) and in some other catchments of Central Europe (Hänsel et al., 2007; Kliment et al., 2011) has not been significantly confirmed in the upper Hron. Significant changes have not yet occurred in summer and autumn.

In the cold season, there were significant changes in fraction of snowfall to total precipitation (Blahušiaková et al., -), shown in Fig. 4 by falling snowfall fraction. This decrease is significant especially in the spring. The main reason is an increase in air temperature, which especially in the second half of the spring negatively affects the duration and amount of snow cover. The decreasing trends were recorded by Faško et al. (2018) in Slovakia, by Brázdil et al. (2009) in the Czech Republic or by Jeníček et al. (2016) in Switzerland. This was most apparent at middle and lower elevations (up to about 1500 m). These elevations are exposed to more frequent precipitation changes and are more prone to snowfall. The results of air temperature threshold for determination of proportion of precipitation occurring as snow showed that the increasing threshold value from 0 to 1°C resulted in more frequent and stronger decreasing trends of snowfall fraction (snow day ratio), especially at middle and lower elevations.

A seasonal shift of continuous snow cover from December-February to January-March was observed. This shift is related to the increase in air temperature at the beginning of winter and was confirmed by decreasing number of days with snow at some stations, especially at the beginning and end of the winter season. The value of the maximum snow cover depth also decreased at several stations.

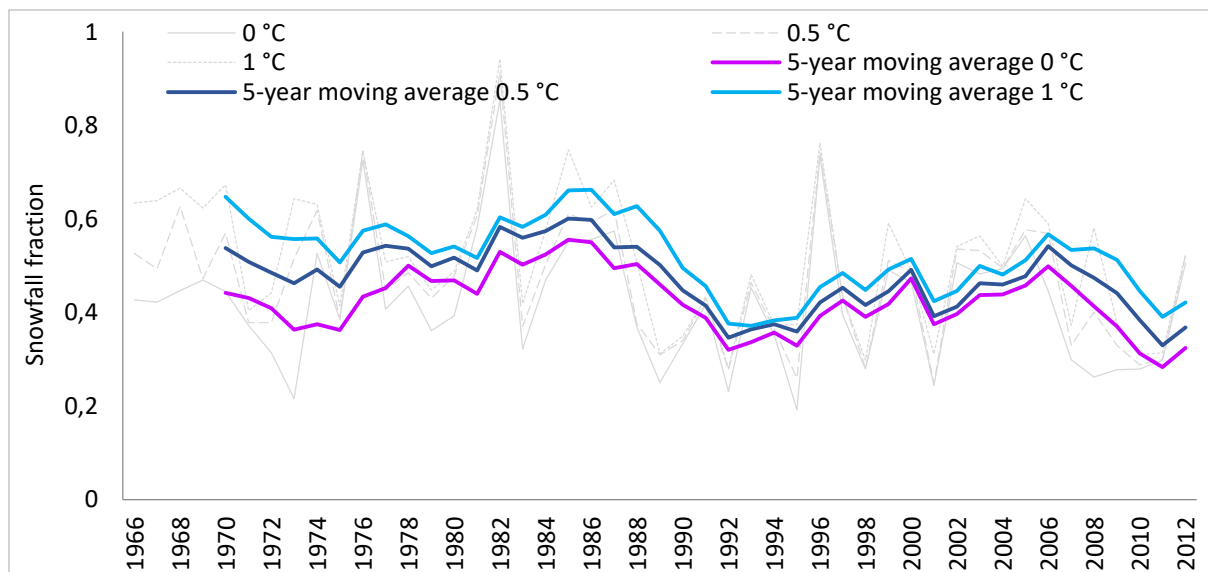
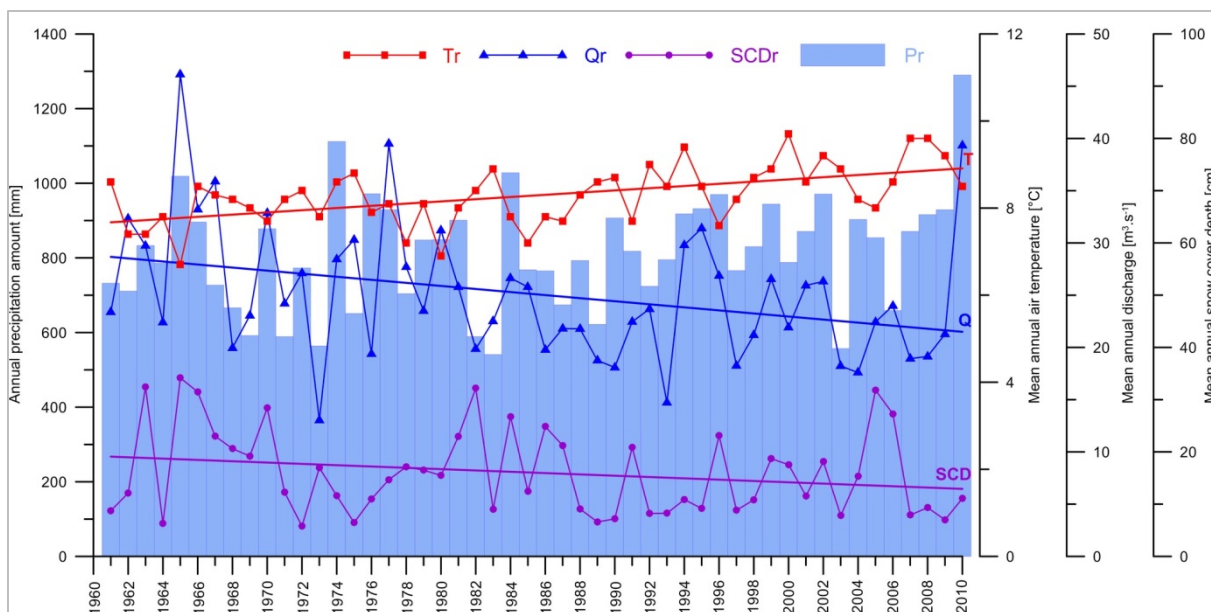


Fig. 4 Development of snowfall fraction values during cold season (XI-IV.) in Telgárt in 1966-2012.

The runoff assessment confirmed its significant decrease in all gauging stations in 1931-2010 (Blahušíaková a Matoušková, 2015). **Fig. 5** shows the most pronounced decrease in B. Bystrica. The figure also shows an increase in air temperature, decrease in snow cover depth and the development of precipitation totals. However, the significant trends did not appear after shortening time series since the 1960s, with the exception of B. Bystrica. A decrease was confirmed by the findings of Mind'áš et al. (2011) who observed regional differences in the runoff development in Slovakia. A more marked decrease is observed in the southern and central Slovakia, where the upper Hron lie. The upper Hron is classified as a catchment with a decreasing long-term runoff (Poórová et al., 2013a). Similar results were observed in the development of the seasonal runoff in 1931-2010. A significant decrease in cold (November to February) and warm season (June) was detected. Only the summer (June) and spring runoff (May) was significantly decreasing after shortening time series since the 1960s. This is due to increase in air temperature and decrease in rainfall. Shortening the end of the time series (1960-1990) only the winter runoff significantly decreased in November and December, which is related to the expected increase in the winter runoff.

Hlavčová et al. (2010) predict an increasing trend in runoff from November-December to February-March and decreasing trend from May to October/November for the upper Hron. Such an expected development of winter runoff was not confirmed by our analysis. The positive trend in winter runoff was observed only after shortening time series and, on the other hand, prolonged it by the last decade (1961-2015). However, this trend is not statistically significant. A spring and summer runoff have been significantly decreasing at some stations since the 1960s. Significant trends of increasing winter and decreasing spring and summer runoff were already observed on several catchments of Central Europe (Kulasová et al., 2008; Kliment et al., 2011). Our results from the Czech Republic and Switzerland also confirmed this development (Blahušíaková et al., -).



Obř. 5 Development of hydroclimatic values (mean annual discharge Q_r , air temperature Tr , precipitation amount Pr and snow cover depth $SCDr$) in B. Bystrica in 1961-2010.

The trend analysis confirmed that the length of the selected time series plays an important role in the detection of trends, because it affects the frequency of statistically significant trends (Yue et al., 2002b). Testing on different long time series and their combinations really confirmed that the most numerous trends have been in the longest time series since the 1930s. Comparing the results of the unmodified and modified version of the MK (Fig. 6), it can be concluded the results of both versions are quite comparable, with somewhat stronger trends for the unmodified version.

	U	M	U	M	U	M	U	M	U	M	U	M	U	M				
	Q		Q_{min}		Q_{90}		T		P		Sd		Sd_{max}		Sf		R_{SD}	
XI																		-1.9
XII																		
I																		
II																		
III																		
IV																		
V																		
VI																		
VII																		
VIII																		
IX																		
X																		
Year																		
XI-IV																		

Fig. 6 Comparison of results of the unmodified (U) and modified (M) MK test for Zlatno and Telgárt in 1966-2012; Q – discharge, Q_{min} – the lowest discharge, Q_{90} – the level at which discharges are exceeded 90% of the time, T – air temperature, P – precipitation, Sd – snow cover depth, Sd_{max} – maximum snow cover depth, Sf – Snowfall fraction, R_{SD} – Snow day ratio.

5.2 Flood and maximum runoff assessment

According to the results of the MK test and the comparative analysis, the maximum runoff decreased in the upper Hron. The annual, seasonal and daily maximum discharge significantly decreased in 1931-2010 (Blahušíaková and Matoušková, 2015). The most pronounced decrease in the cold season occurred in March, confirmed by a decrease in 75 percentile monthly discharge value (Fig. 7). However, the maximum discharge decreased significantly in February, November and December. The most pronounced decrease in the warm season was recorded in October and July. By contrast, an increase was recorded in January and September. The largest decrease occurred in value of 1-, 3-, and 7-day maximum. The results confirmed the research of Jeneiová et al. (2014), which recorded a generally decreasing trend of maximum runoff in the catchments of Eastern and Central Slovakia.

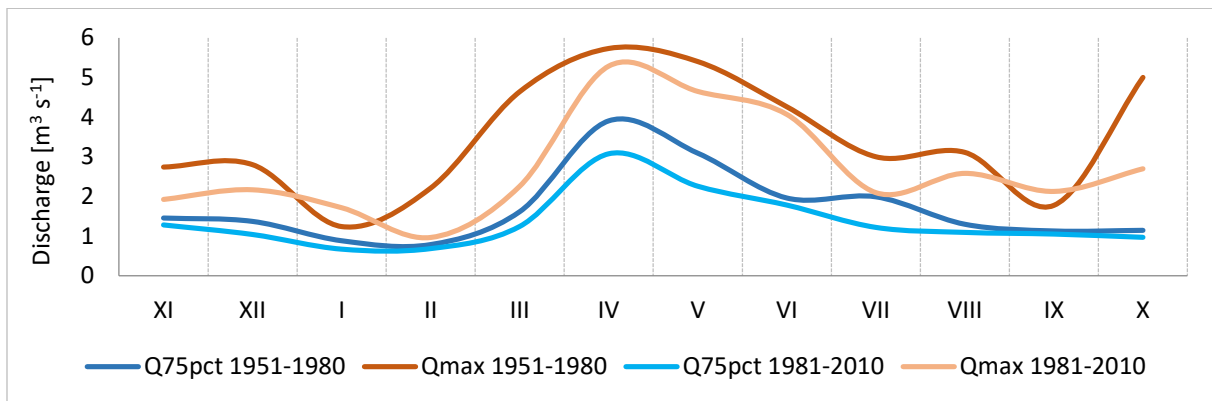


Fig. 7 Development of maximum monthly discharge (Q_{max}) and 75-percentile monthly discharge (Q_{75pct}) in Zlatno between 1951-1980 and 1981-2010.

Approximately since the 1980s the frequency and extremity of floods was decreased. At the same time the flood seasonality was changed (Blahušíaková and Matoušková, 2015, 2016). The occurrence of floods with reached or exceeded discharge $\geq Q_1$, Q_5 , Q_{20} , Q_{50} and Q_{100} was evaluated. Events with discharge $\geq Q_5$ and greater occurred only in 1951-1980, with the most extreme floods being recorded in 1954 and 1974 in this study period. Fig. 8 shows the decreasing frequency and seasonality of events $\geq Q_1$. Floods occurred most often at the end of winter and during spring in the study catchment. Their number was significantly decreased, especially in April. The most frequent floods occurred in the first half of summer and fall during warm season. The recorded shift in the occurrence of events $\geq Q_1$ from spring to late summer to early autumn correlates with a decrease in maximum values. Parajka et al. (2009) indicated the same shift in the seasonality of floods in mountainous areas of Central Slovakia. A predicted shift in the peak flow from late spring to its beginning observed in the Sumava Mountains in the Czech Republic (Langhammer et al., 2015), and which was related to increase in air temperature and shortening the duration of snow cover has not yet been confirmed in the study catchment. However, the shift in the seasonality suggests a possible change in the prevailing type of floods in connection with the increase in air temperature and the predicted extreme rainfall in the warm season. On the other hand more frequent and pronounced air temperature fluctuations can cause the faster snow melting, and when rain will added to it, it can increase water levels during the winter.

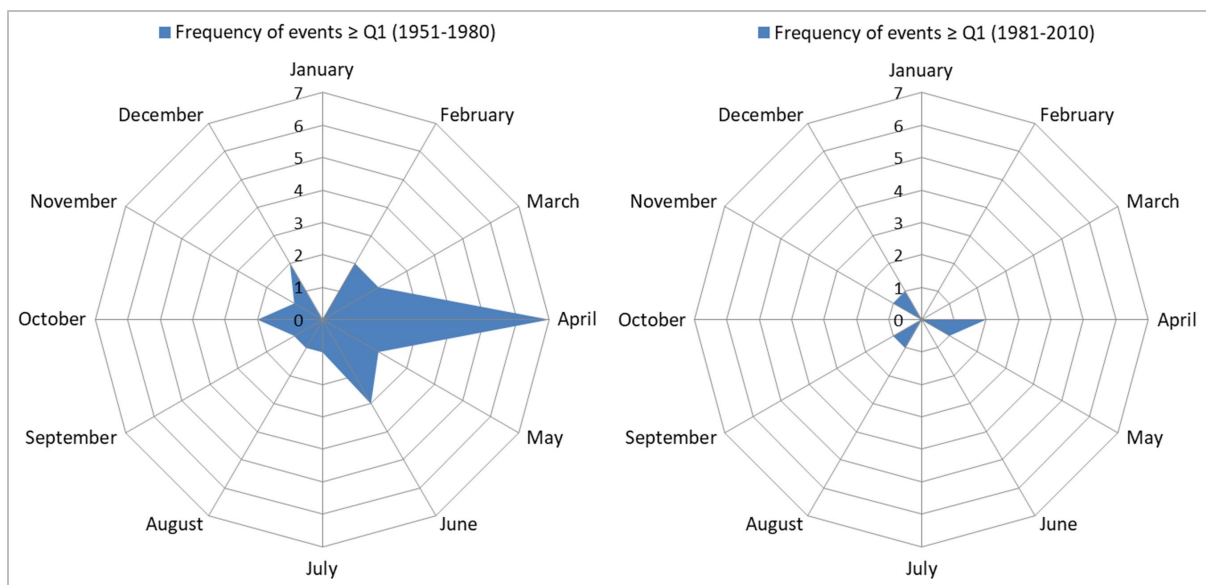


Fig. 8 Frequency and seasonality of events $\geq Q_1$ in B. Bystrica in the period 1951-1980 and 1981-2010.

5.3 Drought and minimum runoff assessment

The evaluation of the frequency, extremity and seasonality of meteorological drought showed that dry episodes were more frequent in the upper Hron in the cold season during 1961-2010. The highest frequency was observed in 1975 and 1984. There were more frequent in January and March, which is typical for the mountain catchments with snow accumulation in winter. The longest occurred between February and April (1974 and 2003) and correlated with lack of snow cover and minimum discharge. The results confirmed the upper Hron is one of the Slovak catchments characterized by the largest frequencies of winter long-lasting dry episodes (Demeterová and Škoda, 2009). The results also recorded a lower frequency of dry episodes in warm season. These were the most frequent in October.

The occurrence of meteorological drought correlates with hydrological drought. For example, the hydrological drought with a large water deficit in 1986-1987 caused primarily by the lack of rainfall (Fig. 9). Demeterová and Škoda (2009) point to a more frequent occurrence of long-lasting droughts (longer than 30 days, occur more than three times every 10 years) in the study catchment. Higher frequency and prolongation of hydrological drought has been reported in Zlatno since the 1980s. Fig. 10 shows the volume of drought deficit, which increase with the prolongation of hydrological drought.

Statistical evaluation of annual minimum discharge revealed significant trends only in 1931-2010, with the greatest decrease in Q_{330} (Blahušáková and Matoušková, 2015). Since the 1960s, significant trends were being lost. Just since the 1930s, there was a statistically significant decrease in winter runoff (the largest in December and January). After shortening the time series, winter runoff trends change to positive but were not statistically significant. In the 1-, 3-, and 7-day minimum discharge, there was weak increase and a slight decrease in the 30- and 90-day minimum discharge. There was no shift in the date of minimum occurrence in the cold season. However, in the warm season, the occurrence of the minimum discharge shifted from September to August, which is related to the observed increase in the minimum in autumn.

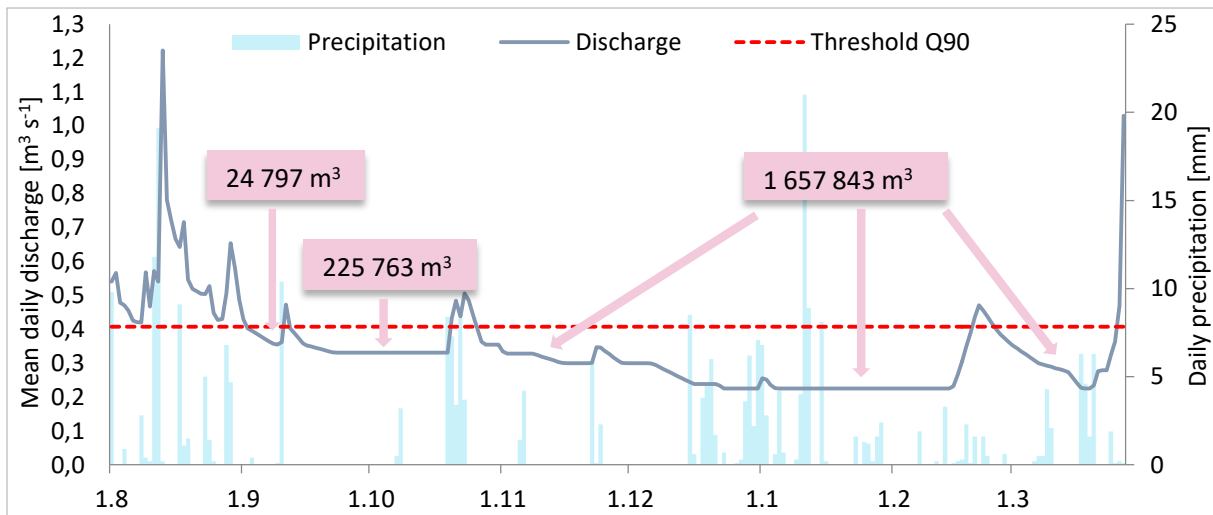


Fig. 9 Water deficits during drought episodes in 1986-1987 at Zlatno station.

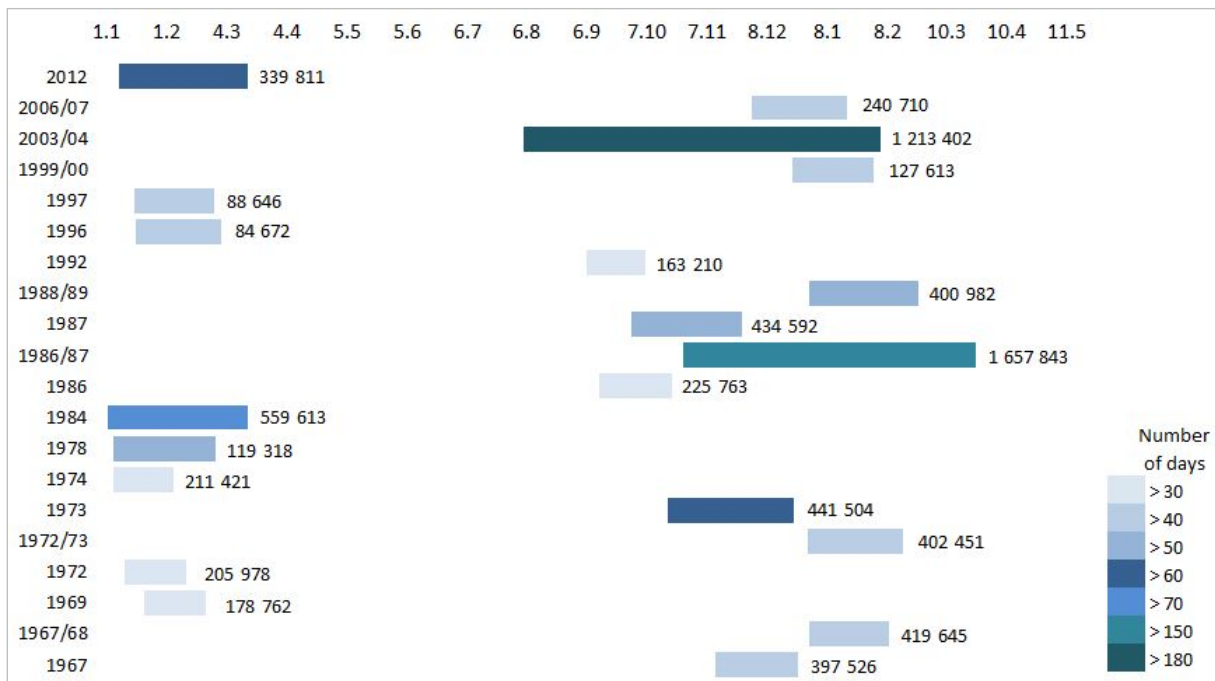


Fig. 10 An overview of the hydrological drought lasting more than 30 days for Zlatno in 1961-2012; numbers indicate the water deficit in m³.

The investigation of the hydrological drought typology with regard to the snow cover (Blahušiaková et al., -) confirmed that water deficits were more frequent in the cold season in the study catchment. The most common drought types were warm snow season drought A and cold snow season drought A. These types are affected by air temperature development (positive or negative) and impact on precipitation and proportion of precipitation occurring as snow. The drought type warm & cold snow season drought A with the greatest correlation between snow developments in previous winter and summer low flows did not appear in the catchment. The climate models predict a negative impact on summer low flows due to negative snow cover development (Rončák et al., 2019). The snow cover is already significantly decreasing in the catchment and air temperature influences snowfall and increases the evaporation. So it cannot be ruled out that under ongoing changes, there will be no warm & cold snow season drought A in the coming decades. Mountain and foothill

catchments with this prevailing type of drought thus seems to be most at risk of regional warming. Therefore, it would be good to investigate the occurrence of this drought type, even in other catchments.

6 CONCLUSION

The upper Hron catchment is sensitive, both to regional climate warming and changes in climatic variables, which have a significant effect on the runoff. The 1980s can be considered a change point in the development of all assessed climatic and hydrological variables. The observed decrease in runoff correlated with a significant decrease of maximum runoff, an increase in air temperature, a decrease in snow cover and snowfall fraction and seasonal changes in precipitation totals. It is associated with decreases in the occurrence of events where discharge is $\geq Q_1$ as well as more frequent occurrence of dry episodes in cold season.

Runoff regime of the upper Hron is nivo-pluvial and therefore any changes in the winter/spring season will significantly affect the annual runoff. This has been confirmed in the study catchment. Significant changes occurred in air temperature. The relatively higher air temperature during cold season caused lower snow depth, furthermore, snowfall fraction progressively decreased. The snow seasons become shorter at both ends – the snowpack accumulation starts later and the snowmelt is occurring earlier. These changes should cause higher winter discharges. [Hlavčová et al. \(2010\)](#) predict an increase of winter runoff for the upper Hron. Such an expected development was not yet confirmed by our analysis. This result is also related to decrease in the maximum runoff and events where discharge is $\geq Q_1$. The occurrence of events $\geq Q_1$ shifted from the winter-spring season to late summer and autumn. Dry episodes were common in the cold season, which is typical for the mountain catchments. The upper Hron is one of the Slovak rivers where the largest frequencies of winter long-lasting dry episodes occur ([Demeterová and Škoda, 2009](#)). But can be assumed that the number of spring and summer dry episodes will increase what climate models predict ([Rončák et al., 2019](#)). This indicates a detected significant decrease of spring runoff in the study catchment. However, observed changes are less pronounced in the upper Hron compared to the selected Czech and Swiss catchments. A more pronounced decrease of spring and summer minimum discharge has already been observed in some of these catchments. The reason may be a slightly increase in air temperature and less pronounced changes in precipitation totals in the upper Hron in the cold season.

The trend analysis confirmed that the length of the selected time series plays an important role in the detection of trends, which was mainly confirmed when assessing the runoff in the cold season. The expected increase of winter runoff, typical for mountain catchment of the Central Europe, cannot be confirmed in the upper Hron.

The results of this study point to regional changes in the upper Hron and extend such research on climate change in the Central Europe. They 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.

References

- Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2012. Analýza povodní na hornom toku Hrona v rokoch 1930 – 2010. *Geografie*, 117, 4, 415–433.
- 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.
- 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.
- Blahušiaková, A., Matoušková, M., Jeníček, M., Ledvinka, O., Kliment, Z., Podolinská, J., Snopková, Z., (-). Hydrological drought occurrence and drought types regarding to changes in snow cover in selected mountain catchments in Central Europe. *Hydrological Sciences Journal*.
- Blaškovičová, L., Danáčová, Z., Lovásová, E., Šimor, V., Škoda, P., 2014. Vyvoj vybraných hydrologických charakteristík na Dunaji v Bratislave. Spracovane v rámci projektu „Identifikácia zmien hydrologického režimu riek v povodí 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., 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.
- 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.
- (eMS) Meteorologický slovník výkladový a terminologický, 2015. Verze eMS 1.2 (11/2015), ČMeS. Available from: <https://slovník.cmes.cz>.
- 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.
- Gustard, A., Demuth, S. (Eds), 2009. Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology Report, No. 50, WMO-No. 1029, 136 p.
- 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.
- 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.
- Hollander, M., Wolfe, D.A., Chicken, E., 2013. Nonparametric Statistical Methods, 3rd Edition. New York: Wiley, 848 p. ISBN 978-0-470-38737-5.
- 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.
- Janský, B., 2003. Water Retention in River Basins. *Acta Universitatis Carolinae*, 2, 173–183.
- 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.
- 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.
- 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., 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.

- 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.
- Kulasová, B., Boháč, M., Fiala, T., 2008. Climate change impacts on low flows. *Sborník příspěvků z workshopu Adolfa Patery 2008*, Praha, 95–102.
- 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., 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., 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>.
- Ledvinka, O., 2016. Statistical analysis of long hydrological and climatological data series. Diss. Thesis. Charles University, Praha, 84 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., Jungclauss, 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., Klimenko, 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.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245–259. DOI: 10.2307/1907187.
- 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.
- 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 podmínkách klimatickej zmeny na území Českej republiky. Úkol VÚV T.G.M. 2051, zpráva za rok 2008, VÚV T.G.M., Praha, 57 p.
- 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.
- 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.
- Poórová, J., Škoda, P., Danáčová, Z., Šimor, V., 2013a. Vývoj hydrologického režimu slovenských riek. *Životné Prostredie*, 47, 3, 144–147.
- Poórová, 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.
- 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.
- 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.
- Van Loon, A.F., 2015. Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2, 359–392. DOI:10.1002/wat2.1085.

Vlček, L., 2017. Retence vody v půdách horských oblastí na příkladu Šumavy. Disertační práce, Karlova univerzita, Praha, 127 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.

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.

Zeleňáková, 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.

Curriculum vitae

Meno

Andrea Blahušiaková

Vzdelanie

- od 2010 Ph.D. štúdium – Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, obor: Fyzická geografie a geoekologie
- 2008 – 2010 Magisterské štúdium – Univerzita Mateja Bela, Fakulta Prírodných vied, Banská Bystrica, obor: Učiteľstvo akademických predmetov; téma DP: Povodne na hornom toku Hrona v rokoch 1930 – 2009
- 2005 – 2008 Bakalárske štúdium – Univerzita Mateja Bela, Fakulta prírodných vied, Banská Bystrica, obor: Učiteľstvo akademických predmetov; téma BP: Povodne na hornom toku Hrona v rokoch 1992 – 2006

Skúsenosti počas štúdia

- 2018 GAČR 18-06217Y – „Influence of seasonal snowpack on summer low flows: climate change implications on hydrological drought“
- 2017/2018 SVV 260438 – „Fyzickogeografické procesy ovplyvnené zmenou klimatu“
- 2016/2017 SVV 260307 – „Vliv změny klimatu na dynamiku fyzickogeografických procesů“
- 2015/2016 SVV 260203 – „Dynamika fyzickogeografických procesů v období změny klimatu“
- 2014/2015 SVV 260078 – „Výzkum dynamiky fyzickogeografických procesů“
- 2013/2014 SVV 267202 – „Analýza dynamiky fyzickogeografických procesů“
- 7/2013 Erasmus Intensive Programme: Geography of water – „Environmental Conflicts and Sustainable Water Policies in the Mediterranean Region“, University of Zadar, Croatia
- 2012/2013 SVV 265212 – „Dynamika vývoje fyzicko-geografických sfér země a jejich interakce“
- 7/2012 Erasmus Intensive Programme – „Aquatic and climate change modeling, Water related issues of energy plant cultivation, Lakes as magnets of tourism in Upper Bavaria“, Geography of water, Ludwig-Maximilians-Universität, München
- 2011 SVV 263202 – „Výzkum procesů fyzicko-geografické sféry“

6-7/2011 Erasmus Intensive Programme: Geography of water – „Water management in coastal and insular karst areas“, Università Degli Studi di Cagliari, Italy

Pracovné skúsenosti

od 2/2017 Základní škola Marjánka, Praha (výuka prírodopisu a ekologie)
1/2015 – 8/2016 Střední škola hotelnictví a gastronomie International, Praha (výuka zeměpisu a dějepisu)

Jazykové znalosti

Český jazyk aktívne
Anglický jazyk certifikát FCE
Nemecký jazyk mierne pokročilý

Zoznam publikácií/Selected publications

Články IF, WoS, SCOPUS

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 Science Journal*.

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.

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 (IF).

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

Kapitola v knihe

Barnikel, F., Blahušiaková, A., Kaiglová, J., 2015. Überschwemmungsereignisse am Fluss Hron (Slowakei). In *Diercke Ressource Wasser (Methoden and Aufgaben)*, Westermann, Braunschweig, 25–29.

Príspevky v konferenčných zborníkoch

Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2015. Rainfall and runoff regime trends in mountain catchments (Case study area: the upper Hron River basin, Slovakia). In Breziarská, K.: *Manažment povodí a povodňových rizík 2015 a Hydrologické dni 2015*. Bratislava, s. -. (elektronická verzia).

Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2014. Testovanie trendov zrážko-odtokového režimu v horských povodiach strednej Európy (príklad horného Hrona, Slovensko). In *Sborník*

príspevků ze semináře Adolfa Patery. Extrémní hydrologické jevy v povodích. Praha, 19–28.

Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2013. Testovanie trendov zrážko-odtokového režimu v horských oblastiach (povodie horného Hrona, Slovensko). In *Sborník příspěvků ze Semináře Adolfa Patery. Extrémní hydrologické jevy v povodích.* Praha, 39–49.

Blahušiaková, A., 2013. Hodnotenie trendov v hydro-klimatických radoch na príklade horného Hrona. In *Zborník súťažných prác mladých odborníkov.* Bratislava, 10 p.

Blahušiaková, A., Rýgl, P., 2012. Trendy zrážko-odtokového režimu horských povodí (Porovnávací analýza riek Hron a Belá - Slovensko). In *Sborník příspěvků z konference Říční krajina.* Praha, 11–16.

Blahušiaková, A., 2012. Trendy zrážko-odtokového režimu horného Hrona. In *Zborník súťažných prác mladých odborníkov.* Bratislava, 11 p.

Blahušiaková, A., Rýgl, P., 2012. Komparácia horských povodí na základe analýzy zmien odtokového režimu. In *Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery.* Brno, 195–209.

Blahušiaková, A., 2011. Analýza povodní na hornom toku Hrona v rokoch 1930–2010. In *Zborník súťažných prác mladých odborníkov.* Bratislava, 17 p.

Abstrakty v konferenčných zborníkoch

Blahušiaková A., Matoušková M., Jeníček M., Kliment Z., 2018. Zmeny v podiele snehových zrážok na celkových zrážkach v horských oblastiach centrálnej Európy. In Križan, F. – Šveda, M.(ed.): *Geografia na vzostupe?*, Bratislava, p. 47.

Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2014. Testovanie trendov zrážko-odtokového režimu v horských oblastiach na príklade horného Hrona, Slovensko. In *Sborník abstraktů z 23. sjezdu ČGS a 16. kongresu SGS – Geografie v srdci Evropy*, Praha, s. -. (elektronická verzia)

Postery na konferenciách

Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2014. Testovanie trendov zrážko-odtokového režimu v horských povodiach strednej Európy (príklad horného Hrona, Slovensko). *Seminář Adolfa Patery. Extrémní hydrologické jevy v povodích.* Praha, 11/2014.

Blahušiaková, A., Matoušková, M., 2013. Trends of rainfall and runoff regime in the mountain catchments (Case study area: the upper Hron River basin, Slovakia). *Erasmus Intensive Programme: Geography of water – „Environmental Conflicts and Sustainable Water Policies in the Mediterranean Region“*, University of Zadar, Croatia, 7/2013.

Blahušiaková, A., Rýgl, P., Matoušková, M., Kliment, Z. 2012. Rainfall and runoff regime of mountain catchments: Comparative analysis of the Hron and Belá catchments - Slovakia. *Erasmus Intensive Programme – „Aquatic and climate change modeling, Water related issues of energy plant cultivation, Lakes as magnets of tourism in Upper Bavaria“*, *Geography of water*, Ludwig-Maximilians-Universität, München, 7/2012.

Blahušiaková, A., 2011. Analysis of floods in the upper Hron river. *Erasmus Intensive Programme: Geography of water – „Water management in coastal and insular karst areas“*, Università Degli Studi di Cagliari, Italy, 6-7/2011.