

**ANALÝZA TRENDOV A SEZÓNNOСТИ MAXIMÁLNYCH ROČNÝCH
PRIETOKOV VO VYBRANÝCH VODOMERNÝCH STANICIACH NA RIEKE HRON**

Romana Marková, Anxhela Xhaja, Silvia Kohnová

Vzhľadom na zvyšujúcu sa frekvenciu a závažnosť povodní nie len na Slovensku ale taktiež vo svete, je dôležité skúmať ich správanie a režim aby bolo možné včas reagovať na riziká, ktoré môžu vyplývať z týchto situácií. V príspevku sme sa zamerali na analýzu sezónnosti a trendov prostredníctvom smerovej štatistiky a modifikovaného Mann-Kendallovho testu pre maximálne ročné prietoky v štyroch vodomerných staniciach na rieke Hron. Analýza povodňového režimu pre riekou Hron bola spracovaná pomocou smerovej štatistiky (Burn, 1997) a výsledkom je stanovenie priemerného dátumu výskytu povodňových situácií (letných alebo zimných) a určenie indexu sezónnej koncentrácie. Výsledok analýzy smerovej štatistiky poukázal na silný sezónny výskyt maximálnych ročných prietokov v zimnom období. Výsledkom analýzy lineárnej regresie a zlomových bodov trendovej čiary je klesajúci trend a zlomové body sa vyskytujú v rokoch 1944, 1946 a 1974. Pri hodnotení radov maximálnych ročných prietokov sme sa zamerali na trendovú analýzu s použitím modifikovaného Mann-Kendallovho testu pre pohyblivý časový interval, ktorý ukázal prevládajúci klesajúci trend vo všetkých vodomerných staniciach.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: smerová štatistika, trendová analýza, ročné a sezónne povodne

TREND AND SEASONALITY ANALYSIS OF THE MAXIMUM ANNUAL DISCHARGES IN SELECTED GAUGING STATIONS AT THE HRON RIVER BASIN. Due to the increasing frequency and severity of flood events not only in Slovakia but also in the world, it is important to examine their behavior and regime in order to be able to properly and timely respond to risks that may result from these situations. In this paper we focused on seasonality and trend analysis by using directional statistics and modified Mann-Kendall test for maximum annual discharges in four gauging stations on the river Hron. The analysis of flood regime for Hron River was processed using the directional statistics (Burn, 1997) and the result is the determination of the mean date of flood situation (summer or winter) and the determination of flood variability measure. The result of directional statistics shows the strong seasonal occurrence of winter floods. The analysis of linear regression and break points shows decreasing trend and break points are located in years 1944, 1946 and 1974. When evaluating the series of maximum annual discharges we focused on trend analysis using the modified Mann-Kendall test for moving time window, which shows prevailing downward trend in all gauging stations.

KEY WORDS: directional statistics, trend analyse, annual and seasonal floods

Úvod

Voda patrí medzi živel, ktorý ovplyvňuje život v pozitívnom aj negatívnom zmysle a preto je dôležité skúmať jej kvalitatívne aj kvantitatívne vlastnosti. Medzi negatívne vplyvy pôsobenia vody patria napr. povodne, ktoré prevádzajú ľudstvo od nepamäti. Medzi predbežné a ovplyvňujúce faktory vzniku povodní patrí reliéf, využitie plôch (land use), krajinný pokryv (land cover),

pôdne vlastnosti, charakteristiky koryta a údolnej nivy, nasýtenosť povodia, stav snehovej pokrývky (Blahušiaková a Matoušková, 2012). Príčinnými faktormi sú synoptická situácia, zrážky (celkový úhrn), časové a priestorové rozloženie zrážok, ľadové javy, pretrhnutie hrádzí jazier a vodných diel (Jeníček, 2009). Nevieme ovplyvniť veľkosť a časový priebeh povodní, ale s vedomím že povodne sú, boli a budú sa musíme snažiť o najvyššiu možnú mieru zníženia povodňových rizík.

Nakoľko v posledných rokoch sa stretávame s čoraz častejším výskytom extrémnych povodňových situácií, ktoré majú tragické následky, je stále dôležitejšie skúmanie mechanizmov spôsobujúcich tieto prírodné katastrofy, ktorým sú aj analýzy časových zmien v režime extrémnych prietokov. Sezónnosť a trendová analýza patria medzi dôležité režimové ukazovatele, ktoré môžu prispieť k detekovaniu mechanizmov vzniku povodňových situácií. Jednou z metód na určenie sezónnosti je smerová štatistika. Pomocou smerovej štatistiky autori Bayliss a Jones (1993) definovali priemerný deň povodne a index variability povodne \bar{r} . Burn (1997) zoskupil povodia podľa podobnosti priemerného povodňového dňa a indexu variability povodne \bar{r} pomocou ROI metódy. Trendovú analýzu sa zaoberali napr. Giakoumakis a Balaoutsos (1998), ktorí zistili klesajúce trendy v radoch priestorových ročných úhrnov zrážok a premenlivé tendencie v priemerných ročných odtokových radoch v západnom Grécku v povodí rieky Evinos. Collischonn et al. (2001) sledovali zrážkový a prietokový režim rieky Paraguay, pričom zistili zmeny v režime prietokov, ktoré sa nedali vysvetliť antropogénnou činnosťou. Dixon et al. (2006) skúmali trendy v prietokoch v západnej časti Británie a zistili, že ročné maximálne prietoky majú klesajúci trend v južnej časti a stúpajúci trend v severnej časti skúmaného územia. Pre rakúske povodia platí rastúci trend maximálnych ročných prietokov pre obdobie 1976 – 2007 (Hall et al., 2014; Parajka et al., 2009). Parajka et al. (2009, 2010) použili index sezónnosti na identifikáciu hlavných klimatických a fyziografických činiteľov ovplyvňujúcich tvorbu povodní na slovenských a rakúskych povodiach. Nedávne štúdie zistili zvýšenie povodňových trendov v posledných desaťročiach, čo sa prejavilo najmä vo zvýšenej frekvencii povodní (Hall et al, 2014). V Nemecku bol pozorovaný stúpajúci trend zimných povodní spôsobených v dôsledku topenia snehu a prudkého dažďa. V Poľsku je pozorovaný klesajúci trend v maximálnych ročných prietokoch. Trendovou analýzou sa v našej oblasti venovala Blaškovičová a kol. (2013), ktorá analyzovala vybrané hydrologické charakteristiky: priemerné ročné prietoky, priemerné mesačné prietoky, ročné a mesačné minimálne prietoky, ročné a mesačné maximálne prietoky, rozdelenie odtoku v roku a zmeny priečného profilu na Dunaji. Jeneiová (2015) sa venovala analýze kulmináčnych prietokov a detekcii zmien v časových radoch kulmináčnych prietokov pre 138 vodomerých staníc po celom Slovensku, pričom zistila, že fixný časový interval hydrologického radu (vodomerého) nie je vhodný pre trendové analýzy a následnú extrapoláciu a regionalizáciu výskytov extrémnych udalostí. Analýza s pohyblivým začiatkom a koncom pozorovaného obdobia odhaluje výrazné odchýlky v schopnosti detekovania štatisticky významného trendu. Skúmanie maximálnych ročných prietokov pomocou štatistických metód môže pomôcť pri hodnotení povodňového režimu povodia a taktiež môže slúžiť ako podklad pre prípadové štúdie týkajúce sa návrhov ochrany povodia pred povodňami. Cieľom trendovej analýzy je identifikovať zmeny v šta-

tistických vlastnostiach uvedených údajov, ktoré by sa mohli použiť ako model správania sa hydrologického režimu v podmienkach zmeny klímy (Szolgay a kol., 2007). Cieľom predloženého príspevku je analýza zmien povodňového režimu na toku Hron s využitím metód smerovej štatistiky a modifikovaného Mann-Kendallovho testu.

Metodické postupy

Na analýzu sezónnosti sa vo svete často využíva smerová štatistika (napr. Bayliss a Jones, 1993; Magilligan a Graber, 1996, Burn, 1997). Základnými charakteristikami sú 2 parametre: Θ -priemerný dátum výskytu povodňových udalostí a r -index sezónnej koncentrácie prietokov. Hodnota Θ je určená v radiánoch a nadobúda hodnoty od 0 do 2π . Hodnota r je bezrozmerné číslo, nadobúda hodnoty od 0 po 1 (ak $r = 0$ prietoky sú rozložené rovnomerne počas celého roka, ak $r = 1$ prietoky sa vyskytli v ten istý deň roka).

Základný vzťah na výpočet priemerného dátumu výskytu povodňových udalostí je nasledovný:

$$\theta = D_i * \frac{2\pi}{365'} \quad (1)$$

kde

D_i – dátum výskytu prietokov transformovaný na uhly.

Súradnice \bar{x} a \bar{y} pre n dní i sú vyjadrené ako:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i \cos(\theta_i) \quad (2)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_i \sin(\theta_i) \quad (3)$$

Priemerný uhol je potom určený pre 1. a 4. kvadrant, $x > 0$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}}\right). \quad (4)$$

Priemerný uhol pre 2. a 3. kvadrant, $x < 0$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}}\right) + \pi. \quad (5)$$

Pre index sezónnej koncentrácie prietokov r platí:

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}. \quad (6)$$

Na analýzu testovania trendov bol použitý Mann-Kendallov test (Mann, 1945; Kendall, 1975), ktorý je často využívaný pri určovaní trendov časových radov údajov. Tento test patrí do triedy neparametrických testov čo znamená, že nie je závislý na tom, aké rozdelenie má testovaný rad (Salmi a kol., 2002). Štatistický test je daný vzťahom (Yue a kol., 2012)

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sing}(x_j - x_k), \quad (7)$$

kde $Sing(x_j - x_k)$ je:

$$\begin{cases} 1 & \text{ak } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{ak } x_j - x_k = 0. \\ -1 & \text{ak } x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Pri časových radoch $n \geq 8$ nadobúda testovacia štatistika S približne normálne rozdelenie a jej variácia sa počíta pomocou vzťahu:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)], \quad (9)$$

kde g je počet viazaných skupín (skupina dát s rovnakou hodnotou), t_p je počet čísel s rovnakou hodnotou v skupine $p=1, \dots, g$

Štandardizovaná štatistika Z je počítaná pomocou vzťahu:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{pre } S > 0 \\ 0 & \text{pre } S = 0. \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{pre } S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Ak je Mann-Kendallová štatistika Z rovná nule, dáta sú rozčlenené normálnym rozdelením so strednou hodnotou nula a s rozptylom určeným nulovou hypotézou, teda trend neexistuje. Kladné hodnoty Z signalizujú narastajúci trend a záporné hodnoty klesajúci trend (Yue et al., 2012).

Modifikovaný Mann-Kendallov test spočíva v odstránení autokorelácie. Upravený vzorec podľa autorov Hamed and Rao (1998) má nasledovný tvar:

$$V^*(S) = VAR(S) \frac{n}{n^*}, \quad (11)$$

kde

$VAR(S)$ – variácia udávaná pôvodným Mann-Kendallovým testom

n – dĺžka časového radu,

n^* – efektívna dĺžka časového radu,

$\frac{n}{n^*}$ – faktor korekcie vznikajúci pri existencii sériovej korelácie vo vzorke.

Faktor korekcie sa vypočíta ako:

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{j=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)r_k^R, \quad (12)$$

kde

r_k^R – autokorelačná funkcia poradí všetkých pozorovaní a vypočíta sa nahradením vstupných údajov ich poradím. Môže byť vypočítaná podľa vzťahu (Salas a kol., 1980):

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} (X_t - E(X_t))(X_{t+k} - E(X_{t+k}))}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_t - E(X_t))^2}, \quad (13)$$

kde

$$E(X_t) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t, \quad (14)$$

kde

r_k – opravný korelačný koeficient údajov X_t ,

$E(X_t)$ – priemer vstupných údajov.

Modifikovaná Mann-Kendall štatistika je daná ako:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V^*(S)}} & \text{pre } S > 0 \\ 0 & \text{pre } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V^*(S)}} & \text{pre } S < 0 \end{cases} \quad (15)$$

Význam trendu vyskytujúceho sa v časovom rade je možno odhadnúť pomocou Theil-Senovho sklonu (Theil, 1950; Sen 1968):

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{X_j - X_l}{j-l} \right) \forall l < j. \quad (16)$$

kde β je odhad sklonu trendu a X_j je hodnota z radu pozorovaní $j=1 \dots l$.

Vstupné údaje

Pre analýzu trendov a sezónnosti boli vybrané štyri vodomerné stanice Zlatno, Brezno, Banská Bystrica a Brehy (obr. 1). Pre povodie Hrona je charakteristický odtokový režim s maximálnymi priemernými mesačnými prietokmi v apríli a s minimálnymi priemernými mesačnými prietokmi v septembri. Pre toto povodie sú typické maximálne mesačné prietoky v mesiaci apríl a minimálne mesačné prietoky v mesiaci september. Maximálne prietoky sa vyskytujú okrem apríla aj v júni, júli a auguste. Povodne na jar vznikajú predovšetkým v dôsledku topenia snehu a ide o povodňové vlny s väčším objemom. Povodne v letnom období sú následkom privalových dažďov s krátkym trvaním zasahujúce menšie územie. V tomto prípade ide o vlny s menším objemom. Minimálne prietoky sa vyskytujú v dvoch obdobiach, letno-jesenná prietoková depresia v septembri a podružná zimná prietoková depresia v januári. (Bačík, 2012). Pre oblasť povodia Hron platí, že výška úhrnu zrážok a odtok sú len mierne navýšené v porovnaní s celým územím Slovenska (tab.1).

Pre každú vodomernú stanicu boli k dispozícii rady ročných maximálnych prietokov z databázy Global Runoff Data centrum (GRDC, 2013), plocha povodia, zemepisná šírka a zemepisná dĺžka (obr. 1, tab. 2). Vstupné údaje boli použité na analýzu sezónnosti a trendov pomocou programov R (Ihaka and Gentleman, 1996) a Anclim (Štěpánek, 2007).

Tabuľka 1. Hydrologická bilancia povodia Hron za obdobie 1961 – 2000

Table 1. The hydrological balance of the Hron river during the period 1961 – 2000

územie	Plocha (km ²)	Zrážky (P) [mm]	Odtok (O) [mm]	P-O [mm]
povodie Hrona	5465	790	289	501
Slovensko	49014	743	236	506



Obr. 1. Lokalizácia vybraných vodomerných staníc na povodí rieky Hron.

Fig. 1. The location of selected gauging stations in the Hron River Basin.

Tabuľka 2. Základné charakteristiky vybraných vodomerných staníc

Table 2. Main characteristics of selected gauging stations

Evidenčné číslo	Vodomerná stanica	Tok	Obdobie pozorovania (roky)	Plocha povodia (km ²)
6950	Zlatno	Hron	1930 – 2008	83,67
7015	Brezno	Hron	1930 – 2008	582,08
6950	Banská Bystrica	Hron	1930 – 1992	1766,48
7015	Brehy	Hron	1930 – 2010	3821,38

Výsledky analýz

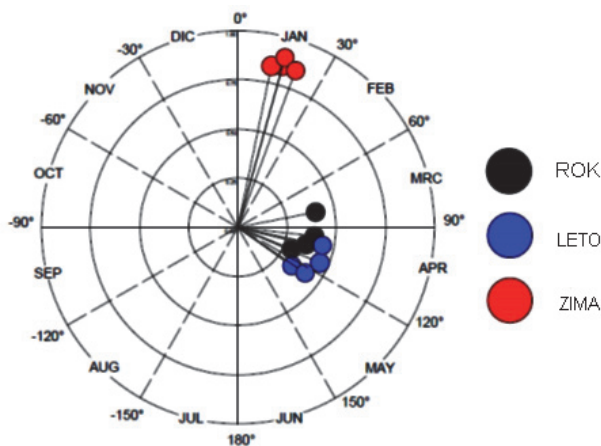
Analýza sezónnosti pre vybrané stanice Hrona bola spracovaná pre maximálne ročné prietoky a následne pre rozdelenie maximálnych prietokov na zimnú a letnú sezónu. Pre každú stanicu sme letnú a zimnú sezónu definovali podľa klimatických pomerov na povodí, najmä trvania snehovej pokrývky: letné obdobie (marec – november) a zimné obdobie (december – február). Výsledky analýzy sezónnosti pre celé obdobie ako aj letné a zimné obdobie sa nachádzajú v tabuľke 3. Priemerný dátum výskytu všetkých povodňových udalostí (Θ) pre celé obdobie je v marci a apríli (obr. 2)

a vyznačuje sa vysokou varabilitou výskytu ($r=0,30 - 0,40$). Z obrázku 2 je zrejme, že podľa hodnôt vektora Θ pre všetky stanice Hrona bol priemerný deň výskytu maximálnych ročných letných povodňových udalostí na rozhraní apríla a mája. Priemerný deň výskytu maximálnych ročných zimných povodňových udalostí je v januári. Pre letné prietoky bol index sezónnej koncentracie- r okolo 0,3 až 0,5 čo znamená vysokú variabilitu výskytu maximálnych letných prietokov. Pre zimné prietoky sa index sezónnej koncentracie- r vyskytuje v rozmedzí 0,8 – 0,9 čo predstavuje silný sezónny výskyt zimných maxím v mesiaci január. Následne sme testovali rady maximálnych ročných

prietokov (Q_{max}). Ako prvá bola testovaná homogenita radov Q_{max} pre všetky stanice. Všetky analyzované stanice boli homogénne pri použití SNHT testu pri hladine významnosti $\alpha=0,05$ (Haenggi, 2010). Analýza trendov maximálnych ročných prietokov spočívala v detekovaní významnosti trendu a bodu zlomu trendu. Pre všetky vodomerné stanice je pozorovaný klesajúci trend s jedným zlomovým bodom (obr. 3 – 6). Pre vodomernú stanicu Brezno sa zlomový bod nachádza v roku 1946. Pre vodomernú stanicu Zlatno sa zlomový bod nachádza v roku 1944. Pre obidve stanice Brehy aj Banská Bystrica sa zlomový bod nachádza v roku 1974. Roky 1944 – 1946 sú vojnové a povojnové roky a zmena sklonu trendovej čiary mohla byť spôsobená porušením meracej stanice alebo jej rekonštrukciou. V roku 1974 mohli mať vplyv na zmenu sklonovej čiary veľká povodeň na Hrone, ktorá sa odohrala v októbri 1974 keď nastal prietok $560 \text{ m}^3/\text{s}$, ktorý korešpondoval so 100 ročnou vodou.

Pomocou Theil-Senovho sklonu a modifikovaného Mann-Kendallovho testu pre pohyblivý začiatok a koniec pozorovaného obdobia boli určené rastúce a klesajúce trendy s testom ich významnosti (obr. 7 – 10). Na osi x je znázornený rok začiatku pozorovania a na osi y je znázornený koniec pozorovaného obdobia. Červenou farbou je znázornený klesajúci trend a modrou stúpajúci trend. Odtieňmi šedej farby je znázornený štatisticky významný trend pre hladiny významnosti 5 %, 10 %.

Pre všetky vodomerné stanice smerom od prameňa až po ústie je pozorovaný prevládajúci významný klesajúci trend (obr. 7 – 10) najmä pre obdobie pozorovania 1944 – 1970. Pre stanicu Zlatno je vidieť významný klesajúci trend pre obdobie ktoré končí rokom 1971 a má dĺžku trvania najviac 29 rokov. Pre stanicu Brezno je vidieť významný klesajúci trend pre obdobie trvania 29 až 37 rokov, ktoré končí v roku 1988, ďalej ide o obdobie trvania okolo 70 rokov, ktoré končí v roku 2004 a kratšie obdobie trvania okolo 16 až 10 rokov končiace v roku 1990. Stanica Banská Bystrica vykazuje významný klesajúci trend pre obdobie 1931 – 2004. Ďalším obdobím s významným klesajúcim trendom pre stanicu Banská Bystrica je obdobie rokov od 1974 (až 1980). Pre stanicu Brehy je charakteristický významný klesajúci trend pre obdobie 1946 až 1997.



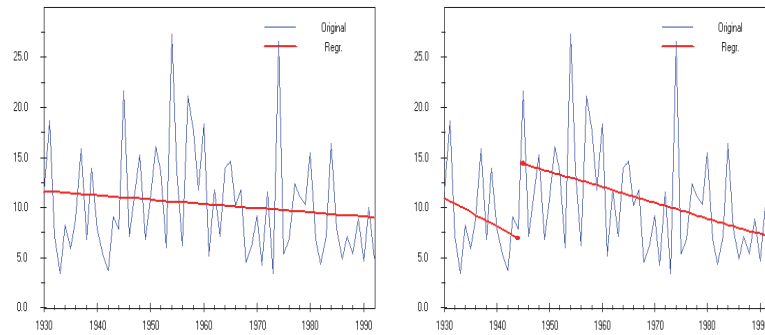
Obr. 2. Grafické znázornenie hodnôt smerovej štatistiky pre vybrané vodomerné stanice na toku Hron.

Fig. 2. Graphic representation of directional statistics for selected gauging stations at the Hron River.

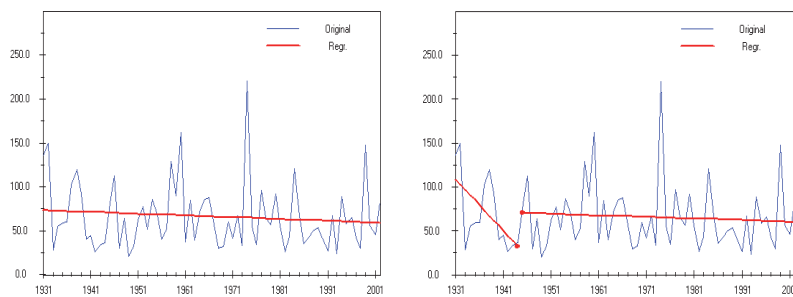
Tabuľka 3. Hodnoty smerovej štatistiky pre ročné, letné a zimné obdobie roka vo vybraných vodomerných staniách

Table 3. The values of directional statistics for annual, summer and winter period of the year in selected gauging stations

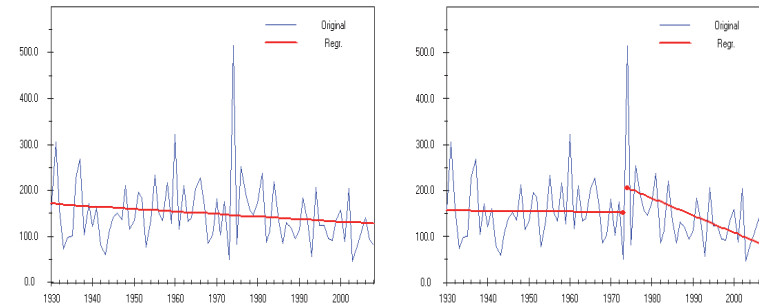
Evidenčné číslo	Vodomerná stanica	r (ročné)	r (leto)	r (zima)
7290	Brehy	0,4	0,4	0,9
7160	Banská Bystrica	0,4	0,5	0,8
6950	Zlatno	0,3	0,3	0,8
7015	Brezno	0,4	0,4	0,8



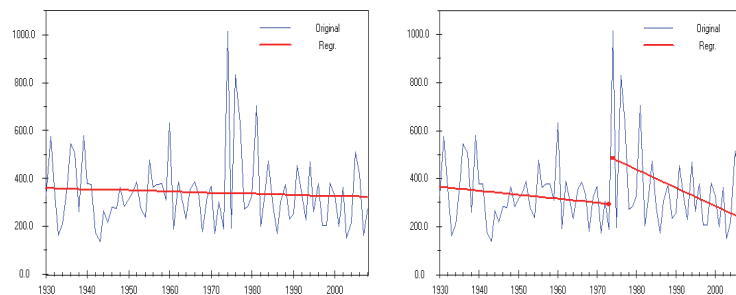
Obr. 3. *Lineárny trend maximálnych ročných prietokov so zlomovým bodom pre stanicu Zlatno.*
Fig. 3. *Linear trend of the maximum annual discharges with break point for the Zlatno station.*



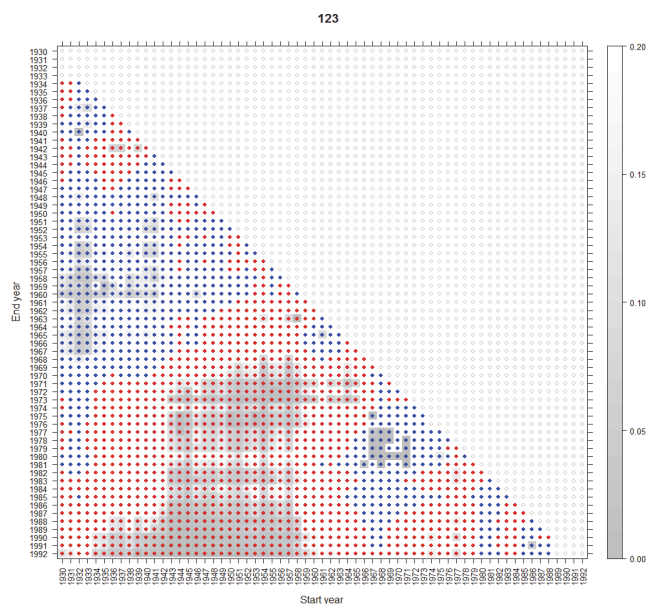
Obr. 4. *Lineárny trend maximálnych ročných prietokov so zlomovým bodom pre stanicu Brezno.*
Fig. 4. *Linear trend of the maximum annual discharges with break point for the Brezno station.*



Obr. 5. *Lineárny trend maximálnych ročných prietokov so zlomovým bodom pre stanicu Banská Bystrica.*
Fig. 5. *Linear trend of the maximum annual discharges with break point for the Banská Bystrica station.*

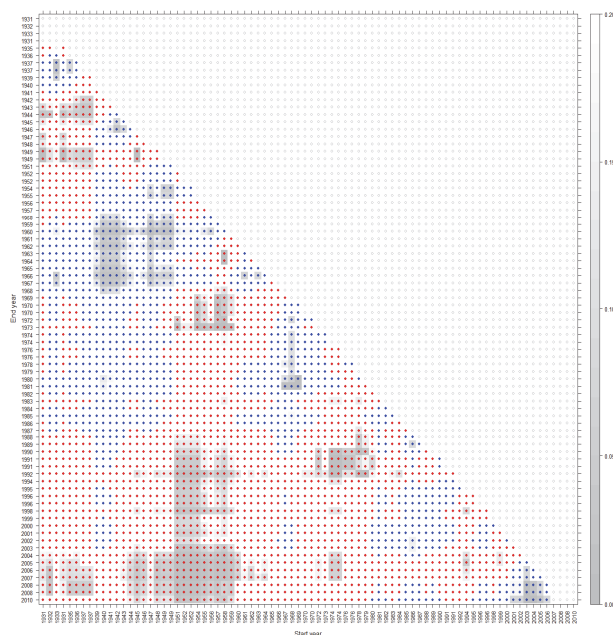


Obr. 6. *Lineárny trend maximálnych ročných prietokov so zlomovým bodom pre stanicu Brehy.*
Fig. 6. *Linear trend of the maximum annual discharges with break point for the Brehy station.*



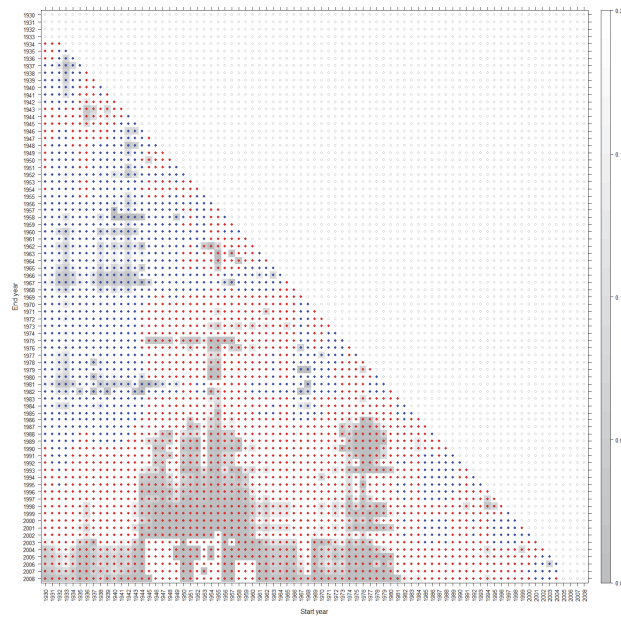
Obr. 7. Zobrazenie zmeny Theil-Senovho sklonu a významnosti trendu podľa modifikovaného Mann-Kendallovho testu pre pohyblivý začiatok a koniec pozorovaného obdobia v stanici Zlatno (Legenda: modré body – rastúci trend, červené body – klesajúci trend, šedý štvorec okolo bodu – štatisticky významný trend na hladine významnosti 5 %, 10 %).

Fig. 7. Display of Theil-Sen slope calculation and trend significance detection according to modified Mann-Kendall test for moving window for the station Zlatno (Legend: blue dots – upward trend, red dots – downward trend, grey square around the dots – significance level at 5 %, 10 %).



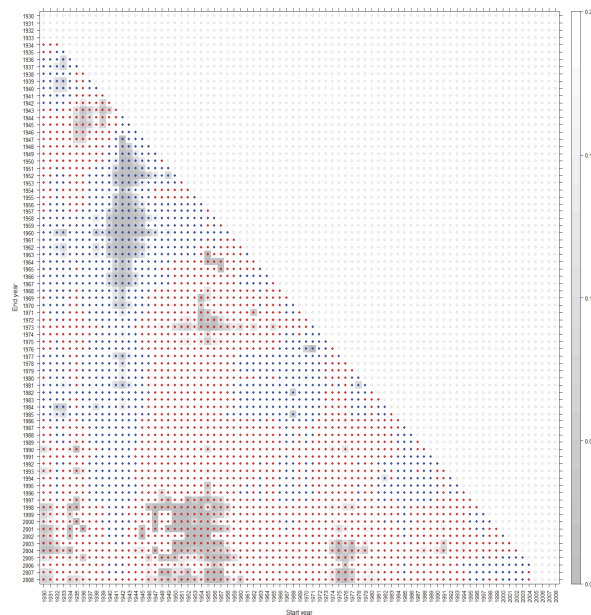
Obr. 8. Zobrazenie zmeny Theil-Senovho sklonu a významnosti trendu podľa modifikovaného Mann-Kendallovho testu pre pohyblivý začiatok a koniec pozorovaného obdobia v stanici Brezno (Legenda: modré body – rastúci trend, červené body – klesajúci trend, šedý štvorec okolo bodu – štatisticky významný trend na hladine významnosti 5 %, 10 %).

Fig. 8. Display of Theil-Sen slope calculation and trend significance detection according to modified Mann-Kendall test for moving window for the station Brezno (Legend: blue dots – upward trend, red dots – downward trend, grey square around the dots – significance level at 5 %, 10 %).



Obr. 9. Zobrazenie zmeny Theil-Senovho sklonu a významnosti trendu podľa modifikovaného Mann-Kendallovho testu pre pohyblivý začiatok a koniec pozorovaného obdobia v stanici Banská Bystrica (Legenda: modré body – rastúci trend, červené body – klesajúci trend, šedý štvorec okolo bodu – štatisticky významný trend na hladine významnosti 5 %, 10 %).

Fig. 9. Display of Theil-Sen slope calculation and trend significance detection according to modified Mann-Kendall test for moving window for the station Banská Bystrica (Legend: blue dots – upward trend, red dots – downward trend, grey square around the dots – significance level at 5%, 10%).



Obr. 10. Zobrazenie zmeny Theil-Senovho sklonu a významnosti trendu podľa modifikovaného Mann-Kendallovho testu pre pohyblivý začiatok a koniec pozorovaného obdobia v stanici Brehy (Legenda: modré body – rastúci trend, červené body – klesajúci trend, šedý štvorec okolo bodu – štatisticky významný trend na hladine významnosti 5 %, 10 %).

Fig. 10. Display of Theil-Sen slope calculation and trend significance detection according to modified Mann-Kendall test for moving window for the station Brehy (Legend: blue dots – upward trend, red dots – downward trend, grey square around the dots – significance level at 5%, 10%).

Diskusia a záver

Cieľom tohto príspevku je analýza povodňového režimu a jeho zmeny na vybraných vodomerných staniách Zlatno, Brezno, Banská Bystrica a Brehy. Pre analýzu boli použité štatistické metódy ako je smerová štatistika, modifikovaný Mann-Kendallov test trendu. Boli vybraté štyri vodomerné stanice na toku Hron s dĺžkou radu viac ako 70 rokov. Výsledkom smerovej štatistiky bolo určenie priemerného dňa výskytu maximálnych ročných povodňových prietokov pre letné a zimné obdobie a taktiež určenie variability výskytu maximálnych ročných povodňových prietokov pomocou indexu sezónnej koncentrácie-*r*. Z analýz sezónnosti pre povodie Hrona vyplýva, že zimné prietoky sa vyznačujú menšou variabilitou výskytu než letné prietoky a väčšinou sa vyskytujú v mesiaci január. Výsledky analýzy pomocou lineárnej regresie so zlomovým bodom potvrdili klesajúci trend maximálnych ročných prietokov. Zmena sklonu trendovej čiary nastala v rokoch 1944, 1946 v staniách Brezno a Zlatno, čo mohlo byť spôsobené porušením meracej stanice alebo jej rekonštrukciou. Zmena trendovej čiary v roku 1974 v staniách Brehy a Banská Bystrica mohla byť spôsobená povodňou na Hrone v októbri 1974. Pre každú stanicu bola analyzovaná významnosť trendu podľa modifikovaného Mann-Kendallovho testu pre pohyblivý začiatok a koniec pozorovaného obdobia. Výsledky ukázali prevládajúci významný klesajúci trend najmä pre obdobie pozorovania 1944-1970. Poznatky týkajúce sa zmeny povodňového režimu publikované v článku môžu slúžiť ako podklady pre štúdie protipovodňovej ochrany na povodí Hrona.

Pod'akovanie

Článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Centrum excelentnosti protipovodňovej ochrany územia ITMS 26240120004 spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Autori ďakujú za podporu pri tvorbe tohto príspevku.

Literatúra

- Bača, P., Bačová Mitková, V. (2007): Analysis of seasonal extreme flows using peaks over threshold method, J. Hydrol. Hydromech., 55, 2007, 16 – 22.
- Bačík, M. (2012): Predbežné hodnotenie povodňového rizika SR: predbežná správa. Bratislava: Slovenský vodohospodársky podnik, š. p. Banská Štiavnica, Výskumný ústav vodného hospodárstva, Slovenský hydrometeorologický ústav, Slovenská akadémia vied, Ministerstvo životného prostredia R, 2012, 131 s.
- Bayliss, A. C., Jones, R. C. Peaks-over-threshold flood database: Summary statistics and seasonality. IH Report No. 121, 1993.
- Blahušíaková, A., Matoušková, M. (2012): Analýza povodní na Hornom toku Hrona v rokoch 1930 – 2010. Geografie, 117, No. 4, 415 – 433.
- Blaškovičová, L., Danáčová, Z., Lovásová, L., Šimor, V., Škoda, P. (2013): Vývoj vybraných hydrologických charakteristík na Dunaji v Bratislave. SHMÚ, 15 s.
- Burn, D.H. (1997): Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. J. Hydrol., 1997, 202, 212 – 230.
- Collischonn, W., Tucci, C.E.M., Clarke, R.T. (2001): Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? J. of Hydrology, 245: 218 – 238.
- Dixon, H., Lawler, D.M., Shamseldin, A.Y. (2006): Streamflow trends in western Britain. Geophys. Res. Lett. 33, L 19406. doi:10.1029/2006GL027325.
- Global Runoff Data Centre (2013): Koblenz, Federal Institute of Hydrology BfG. 2013. GRDC Mission and Main Objectives. 2014, Online: http://www.bafg.de/GRDC/EN/01_GRDC/11_rtnle/11_mssn/mission_node.html, 3.7.2016
- Giakoumakis, S.G., Baloutsos, G. (1998): Investigation of trend in hydrological time series of the Evinos River basin. Hydrological Sciences, Vol. 42, No. 3, 81 – 88
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T. R., Kriauciuniene, J., Kundzewicz, Z. W., Lang, M., Llasat, M. C., Macdonald, N., Mcintyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R.A. P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J. L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blöschl, G. (2014): Understanding flood regime changes in Europe: A state of the art assessment. Hydrol. Earth Syst. Sci., 2014, 18, 2735 – 2772, doi:10.5194/hess-18-2735-2014, 2.
- Haenggi, P.R (2010): *scripts*, Dostupné na: <https://sites.google.com/site/phaenggi23/rscripts>, Navštívené: 5.1.2014. 2010
- Hamed, K.H., Rao, A.R. (1998): A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 1998, 204, 182 – 196.
- Ihaka, R., Gentleman, R.: R: A language for data analysis and graphic *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 1996, 5: 299 – 314.
- Jeneiová, K. (2015): Detekcia zmien v časových radoch maximálnych prietokov, 2015, Dizertačná práca, SvF STU v Bratislave.
- Jeníček, M. (2009): Modelování průběhu extrémních povodní v kontextu krajinných změn a integrované protipovodňové ochrany. Dizertačná práca. Karlova Univerzita v Prahe. Přírodovědecká fakulta, Praha, 128 s.
- Kendall, M.G. (1975): Rank Correlation Methods. Griffin, London. 1975.
- Magilligan, F. J., Graber, B. E. (1996): Hydroclimatological and geomorphic controls on the timing and spatial variability of floods in New England, USA, *Journal of Hydrology*, 1996, 178, 1, 159 – 180.
- Mann, H.B. (1945): Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13. 245 – 259
- 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*, 2009, 54(3), 456 – 473.
- Parajka, J., Kohnová, S., Bálint, G., Barbuc, M., Borga, M., Claps, P., Cheval, S., Dumitrescu, A., Gaume, E., Hlavčová, K., Merz, R., Pfaundler, M., Stancalie, G.,

- Szolgay, J., Blöschl, G. (2010): Seasonal characteristics of flood regimes across the Alpine-Carpathian range. *Journal of Hydrology*. 2010, roč. 394, 78 – 89.
- Pekárová, P., Pacl, J., Liová, S., Miklánek, P., Škoda, P., Pekár, J. (2009): Analysis of the maximum annual discharge regime in the high mountain basin of Belá River in Podbanské, *Acta Hydrologica Slovaca*, 10, 300 – 311, 2009.
- Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., Lane, W.L. (1980): *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*, Water Resources Publications, Littleton, CO, USA
- Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., Amnell, T. (2002): Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates the excel template application MAKESENS. *Publications on air quality No. 31*, ISBN 951-697-563-1, 2002.
- Sen, P. K. (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendalls tau. *J. Am. Statist. Assoc.* 1968, 63, 1379 – 1389.
- Szolgay, J., Hlavčová, K., Lapin, M., Parajka, J., Kohnová, S. (2007): *Vplyv zmeny klímy na odtokový režim na Slovensku*. 1 vydanie. Ostrava: KEY Publishing, 2007. 160 s. ISBN 978-80-87071-50-2
- Štěpánek, P. (2007): *AnClim-software for time series analysis (for Windows)*. Dept. Of Geography, Fac. Of Natural Sciences, Masaryk University, Brno. 1.47MB
- Theil, H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, I, II, III. *Nederl. Akad. Wetensch. Proc.*, 1950 53, 386 – 392, 512 – 525, 1937 – 1412.
- Yue, S., Kundzewicz, Z. W., Wang, L. (2012): *Detection in Flood risk in Europe*, Chap. 2, 11-26, IAHS special publication 10, 2012.

TREND AND SEASONALITY ANALYSIS OF THE MAXIMUM ANNUAL DISCHARGES IN SELECTED GAUGING STATIONS AT THE HRON RIVER BASIN

Water is the element that affects life in positive and negative sense and therefore it is important to examine the qualitative and quantitative characteristics. Among the negative effects of water activity include for example floods that accompany mankind from time immemorial. We can not influence the size and timing of the flood but knowing that floods are and will be we have to strive for the highest possible rate of reduction of flood risk. Due to increasing occurrence of extreme flood events it is important to investigate the mechanisms that caused these natural disasters. Preliminary and influencing factors of floods is relief, land use, land cover, soil characteristics, the characteristics of the channel and floodplain, catchment saturation and snow cover (Blahušiaková and Matoušková, 2012). Causal factors are synoptic situation, rainfall, temporal and spatial distribution of precipitation, ice phenomena, bursting dams and water structure (Jeníček, 2009). This article deals with flood regime changes in maximum annual discharges at the Hron River basin. During the last years there have been visible flood changes all over Europe, mostly in the magnitude of flooding and regime change. Flood peak analysis is a useful primary way of analysing changing patterns in the flood regime (Hall et al., 2014). The knowledge of flood regime helps us better understand processes which influence and run floods in our country and thus prevent flood risk. In this study we processed 4 gauging stations at the Hron River – Zlatno, Brezno, Banská Bystrica and Brehy with the period of observation more than 70 years. Hron Basin is characterized by a drainage system with a maximum average monthly discharges in April and the smallest average monthly discharges in September. Maximum discharges occur in April, June, July and August. Spring floods arise mainly due to snowmelt and flood wave is

larger size. Summer floods arise from torrential rains of short duration affecting smaller area. Summer flood wave is smaller size. Minimum discharges occur in two periods, summer-autumn flow depression in September and minor winter flow depression in January. The amount of rainfall and runoff for Hron River basin are slightly increased compared to whole territory of Slovakia. For each gauge were informations about catchment area, latitude, longitude available. The size of basins varies from 83 km² to 3821 km². For the analysis of maximum annual discharges we used directional statistics (Bayliss a Jones, 1993; Magilligan a Graber, 1996; Burn, 1996; Burn, 1997), SNHT test for homogeneity (Haeggi, 2010), Mann-Kendall test (Kendall, 1975), modified Mann-Kendall test (Hamed and Rao, 1998) and Theil-Sen slope (Theil, 1950; Sen 1968). The analysis of flood seasonality is based on directional statistics. Flood seasonality analysis is often very useful and data tend to be readily available, the application is limited to those flood drivers that have clear seasonal characteristics (Hall et al., 2014). The basic characteristics are Θ – mean date of flood and r – the variability of date of occurrence around the mean date. The length of vector r represents the spread of the flood occurrences and ranges from zero (high variability of the date of occurrence, low seasonality) to $r=1$ (all flood events occur on the same date, low variability of the day of occurrence, high seasonality). The seasonality analysis was processed for whole year period, summer period and winter period. Summer and winter seasons were defined according to climatic conditions in the basins, particularly duration of snow cover. According to results of circular statistics the winter floods are concentrated in January and summer floods are concentrated in April and May. The seasonal concentration index- r is the highest in winter (0,8–0,9).

The high value of seasonal concentration index means strong seasonal occurrence. The seasonal concentration index for summer and all year season are approximately same (0,3–0,5) and this values mean high variability of peak flows. All gauging stations are homogeneous according to SNHT test for significance level $\alpha=0,05$. For trend analysis we used linear regression for several parts and modified Mann-Kendall trend test. The linear regression for several parts with break point shows decreasing trend of maximum annual discharges for all gauging stations. The break points for station Brezno is located in 1946, for station Zlatno is located in 1944. The break point for station Banská Bystrica and Brehy is located in 1974. Years 1944–1946 are war and post-war years and slope change of trend line could be caused by a breach of the station or its reconstruction. The break point in 1974 could be caused due to big flood on the River Hron, in october 1974 when discharge values reached $560 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ which corresponds to a 100-year flood. Using Theil-Sen slope (Theil, 1950; Sen 1968) and modified Mann-Kendall test (Hamed and Rao, 1998) for moving window were defined time periods for upward and downward trends at signifance level at 5% and 10%. All gauging stations

from the source to mouth show prevailing downward trend for period 1944–1970. The Zlatno station shows significant for the period ending in the year 1971 and maximum duration of 29 years. The Brezno station shows significant downward trend for the duration of 29 to 37 years, ending in 1988, period of 70 years, ending in 2004 and short period of 10–16 years, ending in 1990. The station Banská Bystrica shows a significant downward trend for the period 1931–2004 and for the period 1974–1980. The station Brehy shows significant downward trend for the period 1946–1997. The decreasing trends of annual maximum floods were also found in some other Slovak catchments, such as alpine Belá River (1925–2008) (Pekárová et al., 2009) and the Rybárik experimental catchment (1964–2004) (Bača and Bačová Mitková, 2007). Due to increasing occurrence of flood situations not only in Slovakia but also in the whole world it is important to investigate these situations in terms flood seasonality and trend analysis according to different statistical tests. The results of this study can help to better protection of the Hron River basin against flood hazard and can serve as a basis for case studies related to flood protection in Hron River basin.

Ing. Romana Marková
Anxhela Xhaja
Prof. Ing. Silvia Kohnová, PhD.
Katedra vodného hospodárstva krajiny, SvF. STU
Radlinského 11
813 68 Bratislava
Tel.: 0915 135 067
E-mail: romana.markova@stuba.sk
anxhela.xhaja@hotmail.com
silvia.kohnova@stuba.sk