



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE**

**Stavebná Fakulta**

Evidenčné číslo: SvF-104305-88014

**Mgr. Marcel Garaj**

*Autoreferát dizertačnej práce*

**Identifikácia zmien hydrologickej bilancie v čiastkových  
povodiach Dunajského regiónu**



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE**

**Stavebná Fakulta**

Evidenčné číslo: SvF-104305-88014

Mgr. Marcel Garaj

Autoreferát dizertačnej práce

**Identifikácia zmien hydrologickej bilancie v čiastkových povodiach  
Dunajského regiónu**

*Na získanie akademického titulu „philosophiae doctor“, skratka „PhD.“*

*v doktorandskom študijnom programe: vodohospodárske inžinierstvo*

*študijný odbor: stavebníctvo*

*forma štúdia: denná-prezenčná*

*Miesto a dátum: Bratislava, 25.05.2020*

*Dizertačná práca bola vypracovaná na externej výskumnej inštitúcii:  
Ústav hydrológie Slovenskej akadémie vied*



*Predkladateľ:* **Mgr. Cyril Siman**  
Ústav hydrológie SAV  
Dúbravská cesta 9  
841 04 Bratislava

*školiťel:* **RNDr. Pavla Pekárová, DrSc.**  
Ústav hydrológie SAV  
Dúbravská cesta 9  
841 04 Bratislava

*Oponenti:*

*Autoreferát dizertačnej práce bol zaslaný:*

*Obhajoba dizertačnej práce sa koná.....*  
*na .....*

.....  
*prof. Ing. Stanislav Uncík, PhD*  
*Dekan Stavebnej fakulty STU*

## ABSTRAKT

Klimatická zmena je v súčasnosti často diskutovanou témou v súvislosti so zmenou zásob vody v povodiach a zmenou prvkov hydrologickej bilancie. Voda ako nevyhnutný predpoklad života môže byť v budúcnosti v niektorých častiach Európy nedostupná. Predložená dizertačná práca sa venuje práve identifikácii zmien v hydrologickom režime vybraných tokov v Dunajskom regióne. Hlavným cieľom bolo spracovať bilanciu vybraných povodí za čo najdlhšie obdobie jednotným spôsobom, aby bolo možné identifikovať dlhodobé trendy.

Na začiatku práca uvádza čitateľa do problematiky zmien režimu tokov, modelovania hydrologickej bilancie a scenárov klimatickej zmeny. Následne pokračuje opisom fyzicko-geografických atribútov povodia Dunaja a 12-tich vybraných čiastkových povodí, ktoré boli vybrané pre účely detailnejšieho výskumu zmeny jednotlivých prvkov hydrologickej bilancie. V metodologickej časti práca vysvetľuje použité štatistické metódy analýzy časových radov údajov a opisuje funkcionalitu zrážkovo odtokového modelu BILAN.

Zostavením jednoduchého multi-regresného modelu práca predkladá matematické vzťahy, ktorými je možné odhadnúť zmenu odtoku  $R$  [mm] vo vybraných povodiach pri zmene priemernej ročnej teploty vzduchu  $T$  [°C] a úhrnu zrážok  $P$  [mm]. Významnosť trendov jednotlivých prvkov hydrologickej bilancie som testoval pomocou neparametrického Mann-Kendall testu trendu (Mann, 1945 & Kendall 1975). Z výsledkov vyplýva, že najvýznamnejšie vzrástla v povodiach teplota vzduchu a aktuálna evapotranspirácia. Odtokový koeficient ( $K_r$ ) významnejšie klesá len v slovenských povodiach. Model BILAN veľmi dobre vystihol dlhodobé priemerné ročné maximá aj minimá odtoku zo slovenských povodí. Výskum tiež naznačuje akým spôsobom sa bude meniť odtok z povodí podľa 2 inkrementálnych scenárov klimatickej zmeny.

**Kľúčové slová:** hydrologická bilancia, odtok, klimatická zmena, model BILAN

## OBSAH

Úvod.....	5
1 Súčasný stav riešenej problematiky .....	6
2 Ciele dizertačnej práce .....	8
3 Údaje a metodika.....	9
3.1 Hydrologická bilancia povodia .....	10
3.2 Model BILAN .....	11
3.3 Študované povodia .....	12
4 Výsledky .....	13
4.1 Odhad zmien prvkov hydrologickej bilancie z meraných dát a pomocou viacnásobnej lineárnej regresie.....	13
4.2 Aplikácia Mann-Kendallovho neparametrického testu pre vybrané povodia .....	15
4.3 Porovnanie rozdielov hodnôt prvkov hydrologickej bilancie v čase 18	
4.4 Výsledky modelovania v prostredí modelu BILAN.....	19
5 Záver .....	21
Literatúra a zdroje .....	22
Zoznam autorových publikácií.....	25

# Úvod

Pri spracovaní dizertačnej práce nadviažem na výskumy a projekty týkajúce sa povodňového režimu Dunaja a jeho prítokov. Taktiež by som chcel nadviazať na moju diplomovú prácu (Garaj, 2016) týkajúcu sa meteorologických príčiny vzniku povodní na hornom a strednom toku Dunaja na konci 19. storočia, z ktorej vedomosti a zručnosti využijem v dizertačne práci.

Na hydrologický režim vôd a celkovú hydrologickú bilanciu v povodí má vplyv celý rad fyzicko-geografických činiteľov. Jedná sa o geomorfológiu povodia, geologické podložie, prevládajúci pôdny druh a pôdny typ, klimatické pomery, lesnatosť povodia a mnohé iné. Všetky tieto činitele spolu s antropogénnou činnosťou ovplyvňujú hydrologický režim tokov. Z klimatických prvkov má na hydrologický režim a vôbec celý hydrologický cyklus v povodí vplyv najmä úhrn zrážok, výpar a teplota vzduchu. Pri zrážkach je dôležité najmä ich množstvo, intenzita a rozloženie počas roka. Zrážky sú teda základným vstupom do systému hydrologického cyklu v povodí. Denný a ročný chod teploty vzduchu následne určuje režim odtoku, maximálne a minimálne prietoky počas roka. Na teplote vzduchu závisí množstvo vody, ktoré sa vyparí z plochy povodia keďže výpar je ďalšou premennou v rovnici hydrologickej bilancie povodia. Výskyt, stabilita a výška snehovej pokrývky má výrazný vplyv na generovanie odtoku v jarých mesiacoch. Snehová pokrývka je však v posledných desaťročiach nestabilná, čo spôsobuje meniaci sa klíma.

Preto za dôležité považujem dôkladné analyzovanie vyššie spomenutých klimatických prvkov na vybraných stanicích v predmetných povodiach na prítokoch Dunaja prostredníctvom štatistickej analýzy a priestorovej analýzy. Potrebné historické dáta a informácie budem čerpať z archívov, databáz, knižníc a ročeniek predovšetkým Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ). V predloženej práci budem analyzovať dlhodobé kolísanie zrážok, odtoku, výparu a teploty vo vybraných povodiach prítokov Dunaja.

Z uvedeného vyplýva, že predložená dizertačná téma vyžaduje multidisciplinárny prístup a spoluprácu s odborníkmi v konkrétnej oblasti. Je to syntéza viacerých vedných odborov, ktoré však spája povodie ako určitý segment krajiny. Na pozadí prebiehajúcej klimatickej zmeny je táto téma veľmi aktuálna a možné nadobudnuté poznatky môžu mať široké praktické využitie.

# 1 Súčasný stav riešenej problematiky

Od 80-tych rokov 20. storočia sa s rozvojom výpočtovej techniky a vývojom počítačových modelov začínajú čoraz viac pri bilancii vody v povodí používať hydrologické bilančné modely. Na našom pracovisku má vývoj a používanie zrážko-odtokových modelov dlhú tradíciu. V ÚH SAV sa vývoju zrážko-odtokových modelov venovali predovšetkým Turčan a Svoboda (Svoboda, 1998, 1999). Svoboda (1996) naprogramoval vo FORTRANE konceptuálny model WBMOD so sústredenými parametrami. Tento model bol kalibrovaný pre viaceré povodia tokov SR a využitý pri riešení celého radu hydrologických štúdií (Halmová, 2000–2004). Neskôr sa problematikou zrážko-odtokových modelov v ÚH SAV zaoberali Kostka a Holko (Holko a kol., 1997; Kostka, Holko, 2001; Holko, 2001; Kostka a kol., 2005). Títo autori použili distribuované zrážko-odtokové modely TOPMODEL a WaSiM. Svoboda a Pekárová (1998) použili distribuovaný konceptuálny model AGNPS na simuláciu odtoku v povodí Malej Svinky. Ďalší model, ktorý bol využitý na našom pracovisku, je semidistribuovaný zrážko-odtokový model HBV. Model HBV použili napr. Pekárová a Velísková (1998), Pekárová a kol. (2005, 2006) a Mitková a Kohnová (2001) pri modelovaní denných prietokov v povodí Ondavy. Jeho verziu HBV-light použili Halmová a Mitková (2002) a Pekárová a kol. (2005) pri simuláciách prietokov rieky Uh v Lekárovciach.

Na Slovensku sa dlhé roky modelovaniu a predpovedi odtoku intenzívne venujú na KVHK STU. Na tomto pracovisku bol napr. vyvinutý zrážko-odtokový model KVHK (Kubeš a kol., 2004; Hlavčová a Kohnová, 2005; Szlogay a kol., 2007), alebo model transformácie povodňovej vlny korytom toku MULTI (Szlogay, Kubeš, 2005). Časové zmeny podzemného odtoku v hornej časti povodia Tople modelom BILAN analyzovali Fendeková a kol. (2008, 2010, 2017).

Blöschl et al. (2013) porovnávajú povodne v rokoch 2013, 2002, 1954 a 1899 na hornom toku Dunaja od prameňa po Viedeň. Detailne rozoberajú a porovnávajú meteorologické príčiny vzniku týchto povodní. Uvádzajú synoptické mapy, mapy príčinných zrážok v skúmanom území v konkrétnych dňoch, ktoré sú interpolované z približne 600 staníc v rámci horného toku Dunaja. Na 20 vybraných hydrologických stanicích na Dunaji a jeho prítokoch predkladajú hydrogramy odtoku pre dané povodne. Detailne sú spracované aj podmienky, ktoré povodniam predchádzali.

V práci, Hall et al. (2014), sa snažia autori identifikovať zmeny v hydrologickom a povodňovom režime riek v rámci celej Európy. Zameriavajú sa

pri tom najmä na povodne a ich frekvenčnú analýzu. Využívajú dva alternatívne prístupy. Prvý z nich spája tradičné prístupy ako sú napr., analýza trendov, spúšťačov, odoziev a homogenizácia údajov z rôznych zdrojov. Medzi hlavné katalyzátory zmien v hydrologickom režime uvádzajú antropogénne zmeny (budovanie vodohospodárskych štruktúr a zmeny vo využívaní krajiny) a zmeny klímy. Druhý prístup pozostáva z modelovania budúcich možných scenárov výskytu povodní v rôznych regiónoch Európy. Výsledkom je identifikácia na povodne bohatých a chudobných oblastí v Európe. Autori vyslovujú názor, že syntéza oboch prístupov je nevyhnutá. Zameranie sa na analýzu dlhodobých radov prvkov by malo byť uprednostňované pred detekciou krátkodobých trendov v povodňovom režime riek. Na záver autori uvádzajú, že celoeurópska spolupráca je do budúcnosti nevyhnutá a mohla by byť zabezpečená vytvorením Európskej výskumnej siete.

Identifikáciu na povodne bohatých a chudobných časových období v Nemecku sa zaoberal Merz et al. (2016). Impulzom bol najmä výskyt niekoľkých významných povodní na Rýne a Labe v rokoch 1993 a 1995 a tiež 2002 a 2013. V tých istých rokoch sa vyskytli povodne aj na iných stredoeurópskych riekach. Základom bola klastrová analýza výskytu povodní nad určitú prahovú hodnotu. K dispozícii mali údaje zo 68 povodí v Nemecku za obdobie 1932 až 2005. Z výsledkov vyplýva, že väčšina skúmaných povodí vykazuje časovú zhodu na 5% hladine významnosti, nízkych prahových hodnotách a v rozmedzí len 1 až 10 rokov. So vzrastajúcou prahovou hodnotou a časovým intervalom však následne klesá aj početnosť povodí s časovou zhodou výskytu povodní.

Hodnoteniu vplyvu klímy na minimálne prietoky sa venoval Laaha et al. (2016). Svoju prácu postavil na rôznych zdrojoch informácií, ktoré nazval piliermi. Prvým je extrapolácia pozorovaných trendov pri minimálnych prietokoch v budúcnosti, druhým sú zrážkovo – odtokové projekcie založené na klimatických scenároch a posledným je kombinácia extrapolácie zmenených charakteristik zrážok v budúcnosti so zrážkovo – odtokovým modelovaním. Výskum bol uskutočnený v štyroch rakúskych povodiach, ktoré reprezentujú klimatické pomery strednej Európy. Výsledky ukazujú, že v Alpách budeme môcť v budúcnosti pozorovať nárast minimálnych prietokov. V nížinách to bude podľa modelového scenára prevažne klesajúci trend minimálnych prietokov.



## 2 Ciele dizertačnej práce

Z prehľadu literatúry vyplýva, že v rámci Dunajského regiónu bolo spracovaných viacero prác, zaoberajúcich sa bilanciou vody v povodiach. V týchto prácach boli použité rôzne bilančné modely a rôzne obdobia, ktoré nepresahovali 30 rokov. Tieto výsledky nie je možné porovnať a nie je možné na ich základe vyhodnotiť zmeny jednotlivých prvkov hydrologickej bilancie. Preto som sa v mojej práci zameril na prípravu vstupných údajov do jedného vybraného modelu hydrologickej bilancie (model BILAN) zameril som sa na vyhodnotenie dlhodobých trendov.

Hlavným cieľom dizertačnej práce je identifikácia zmien jednotlivých zložiek hydrologickej bilancie vybraných subpovodí v povodí rieky Dunaj s dôrazom na slovenské rieky. Hlavný cieľ je rozdelený do nasledujúcich čiastkových cieľov:

1. Získavanie údajov z rôznych európskych povodí v rámci povodia Dunaja;
  - zisťovanie dostupnosti údajov;
  - analýza časových radov, revízia a kontrola homogenity, stacionarity;
  - synchronizácia hydrologických a klimatologických časových radov.
2. Analýza zmien meraných prvkov hydrologickej bilancie vo vybraných povodiach
  - štatistická analýza časových radov, detekcia trendov.
3. Modelovanie zložiek odtoku pomocou modelu BILAN v mesačnom kroku;
  - kalibrácia údajov a zmeny parametrov;
  - porovnanie výsledkov hydrologickej bilancie dvoch období.
4. Simulácia zložiek odtoku vybraných povodí pomocou kalibrovaného modelu BILAN pri zmenených teplotách a zrážkach.

### 3 Údaje a metodika

Pri spracovaní hydrologických a klimatologických radov meraní používam najmä štatistické metódy výpočtu jednotlivých charakteristík. Jedná sa napr. o stanovenie maximálneho, resp. minimálneho ročného prietoku, priemernej mesačnej teploty vzduchu a vody. Pri hodnotení vzájomnej lineárnej závislosti jednotlivých prvkov používam najmä jednoduchú alebo viacnásobnú lineárnu regresiu a tiež polynomicnú funkciu III. rádu. Na určovanie trendu pri daných radoch som použil Mann – Kendallov test trendu, ktorý je neparametrickým testom. Keďže som sa pokúšal získať čo najdlhšie časové rady meraní, bol tento test trendu najvhodnejší, pretože berie do úvahy najmä dĺžku pozorovaní (rozsah súboru) a tiež ich sezónnosť, čo dobre vystihuje pozorované prírodné zákonitosti. Väčšina získaných hydrologických a klimatologických dát bola prvotne spracovaná v programe MS Excel 2016. Pri štatistickej analýze dát využívam celý rad charakteristík, ktoré ponúkajú programy AnClim a CTPA (Change and Trend problem analysis) Tieto sú hojne využívané na Českom aj Slovenskom hydrometeorologickom ústave. Na priestorovú a geoštatistickú analýzu vo vybraných povodia som použil program ArcGIS a na modelovanie bilancie vody v povodí a modelovanie jednotlivých zložiek odtoku model BILAN.

Údaje o hydrologických charakteristikách tokov v povodí Dunaja mám k dispozícii v rámci projektu „Flood regime of rivers in the Danube river Basin“ pod záštitou UNESCO. Hydrologické dáta zo slovenských tokov som doplnil z databázy Slovenského hydrometeorologického ústavu - SHMÚ. K dispozícii je celkovo 420 vodomerných staníc, ktoré sú vhodne priestorovo distribuované. Pri výbere staníc kladiem dôraz najmä na stanice, ktoré sú najmenej ovplyvnené antropogénnou činnosťou a sú situované ako tzv. „uzáverové“.

Z klimatologických staníc je k dispozícii spolu 117 staníc v rámci územia Slovenska. Ich priestorové rozmiestnenie v rámci Slovenska je taktiež relatívne rovnomerné. Výber klimatologických staníc bude determinovaný polohou konkrétnej vodomernej stanice v rámci čiastkového povodia. Ďalším kritériom bude dĺžka časového rádu, pre ktorý budú dostupné dáta o priemernej dennej, maximálnej a minimálnej teplote vzduchu, mesačných zrážkových úhrnoch a výške snehovej pokrývky.

### 3.1 Hydrologická bilancia povodia

Metódam hydrologickej bilancie povodí je venovaná značná pozornosť. Hydrologická bilancia kvantifikuje obeh vody v uzavretom systéme povodí s jedným sústredeným odtokom v záverečnom profile na vodnom toku. Predpokladajme, že jediným vstupom do povodia sú atmosférické zrážky v povodí a že v povodí nedochádza k odberu alebo prítoku vôd z vedľajších povodí. Potom pri bilancii môžeme použiť jednoduchú bilančnú rovnicu podľa Duba a kol. (1969, str. 208) v tvare :

$$P = R + ET + \Delta S,$$

kde:

P	–	priemerný ročný úhrn zrážok [mm];
R	–	priemerná ročná odtoková výška [mm];
ET	–	bilančný výpar [mm];
$\Delta S$	–	zmena zásob vody v povodí za čas $\Delta t$ .

Rozdiel v zásobách vody v nasýtenej a nenasýtenej zóne pôdy a v snehu na začiatku (1. novembra) a na konci (31. októbra) bilancovaného obdobia možno pre dostatočne dlhé obdobie (napr. 30 rokov) zanedbať (Majerčáková a kol. 2004 a,b). V tom prípade môžeme stotožniť ročný úhrn aktuálnej evapotranspirácie (AET) s rozdielom zrážok a odtoku – s ročným bilančným výparom (ET).

Zvyčajne sa rovnica používa na výpočet dlhodobého bilančného výparu ET. Pri mesačnej bilancii, ak určíme mesačný úhrn aktuálnej evapotranspirácie nejakým nezávislým spôsobom (napr. meraním, alebo výpočtom), dokážeme z rovnice hydrologickej bilancie určiť zmenu zásob vody v povodí v príslušnom mesiaci.

### 3.2 Model BILAN

Model BILAN (Výskumný ústav vodohospodársky T. G. Masaryka, v.v.i., 2015) simuluje zložky hydrologickej bilancie pre povodie. Štruktúra modelu je daná vzťahmi, ktoré opisujú základné princípy hydrologickej bilancie na povrchu, v pôdnej zóne (ovplyvnenej vegetačným krytom) a v zóne podzemnej vody. Na výpočet energetickej bilancie sa využíva teplota vzduchu. Časové rozlíšenie modelu je deň, resp. mesiac. Ako už bolo spomenuté, v mojej práci budem používať mesačný časový krok. Model simuluje časové rady mesačnej potenciálnej evapotranspirácie, územného výparu, infiltrácie do pôdy a dotácie podzemnej vody z pôdy. Pre každý časový krok sa tiež simuluje množstvo vody obsiahnutej v snehovej prikrývke, v pôde a zásoba podzemnej vody. Tieto veličiny sa vzťahujú k celému povodiu. V modeli pracujúcom v dennom kroku sa odtok rozčleňuje na priamy a základný (Kašpárek a Novický, 2009), v mesačnom kroku je možné odtok rozčleniť na priamy, podpovrchový a podzemný.

Vstupnými dátami pre výpočet hydrologickej bilancie (v prípade simulácie s mesačným krokom) sú mesačné úhrny zrážok reprezentujúce priemerné úhrny zrážok na plochu povodia, teplota vzduchu a voliteľne aj relatívna vlhkosť vzduchu. Tento parameter je možné nahradiť priamym zadáním priemernej hodnoty potenciálnej evapotranspirácie na plochu povodia. Za účelom kalibrácie parametrov modelu (vykonávanej optimalizačným algoritmom) sa využívajú simulované a pozorované priemerné denné hodnoty odtoku v záverečnom profile povodia, vyjadrené pomocou odtokovej výšky v milimetroch (Kašpárek a Novický, 2009).

Teplota vzduchu, prípadne relatívna vlhkosť vzduchu slúži na výpočet potenciálnej evapotranspirácie, teplota vzduchu sa používa aj pri rozlíšení zimných a letných podmienok (typu režimu). Pri výskyte snehovej pokrývky sa uplatňujú algoritmy pre akumuláciu vody v snehu a pre topenie snehu. Voda z roztopeného snehu infiltruje do pôdy, infiltrovaná voda sa z pôdy môže dostávať k poľnohospodárskym plodinám, resp. inej vegetácii. Plodiny, resp. vegetácia využívajú pôdnu vlhkosť v určitej potenciálnej miere (potenciálna evapotranspirácia) a to tak dlho, pokiaľ je jej dostatok. Pri nedostatku vody v pôde sa územný výpar zníži pod potenciálnu mieru. Za daždivých období, keď zrážky prevyšujú potenciálnu evapotranspiráciu, sa z prebytku zväčšuje zásoba pôdnej vlhky. Pokiaľ zásoba prekročí maximálnu kapacitu, dochádza k priesaku ku hladine podzemnej vody. K priamemu povrchovému odtoku dochádza pri vysokých zrážkových úhrnoch (Kašpárek a Novický, 2009).

### 3.3 Študované povodia

Pri výbere študovaných povodí bolo potrebné klásť dôraz na niekoľko selektívnych kritérií. Vzhľadom k tomu, že som sa snažil získať čo najdlhšie rady údajov, bolo potrebné nájsť vhodný pomer medzi klimatologickými a hydrologickými radmi. Dôležité boli dĺžka pozorovania, reprezentatívnosť, homogenita časového radu a poloha stanice. Ďalším kritériom boli zmeny vo využívaní krajiny povodia, ktoré môžu mať rozhodujúci vplyv na odtokové a klimatické pomery. Vybrané boli povodia s relatívne výraznou zmenou krajinej pokrývky (napr. horný tok Hrona vplyvom odlesňovania) a povodia bez výraznejšej zmeny (napr. Topľa a Kysuca). V neposlednom rade som bral do úvahy úroveň antropického ovplyvnenia toku. Čím menej regulácií, meliorácií, vodných stavieb, derivačných kanálov a iných umelých prvkov, tým objektívnejší výsledok hydrologickej bilancie povodia. Geografická poloha hydrologických rajónov a ich morfológia taktiež zohrali rolu pri výbere. Predpokladom je, že v smere západ - východ sa v dôsledku kontinentality podnebia môže režim klimatických a hydrologických prvkov správať rozdielne. V prípade morfológie sa jedná o porovnanie povodí vo vysokohorských, stredohorských alebo vrchovinovo - nížinných oblastiach a orientácií georeliéfu voči svetovým stranám ale aj voči prevládajúcemu smeru prúdeniu vzduchu.

Pomocou modelu BILAN je možné skúmať ako sa menia jednotlivé zložky odtoku vo vzťahu k celkovému odtoku, či sa mení zdroj vodnosti riek (dážď, sneh) a aký vplyv to má na zmeny zásob podzemnej vody a vody v pôde. Tento model sa teda javí ako vhodný nástroj na identifikáciu zmien prvkov hydrologickej bilancie vybraných povodí. Po dôkladnej časovo-priestorovej analýze v prostredí GIS a práce s databázami som si za záujmové územia zvolil povodia riek na Slovensku, Ukrajine a v Rakúsku. Zo slovenských povodí sú to Kysuca, Ipel' a Krupinica s údajmi od roku 1962 do 2012 a Topľa, Nitra a povodie Hrona po Banskú Bystricu s časovým radom od roku 1962 do 2015. Rakúske povodia, resp. ich časti sme použili celkovo 4 (Ybbs, Mur, Salzach, Dráva) s údajmi od roku 1977 až po 2010 a ukrajinské 2 (Uh a Prut) od roku 1962 do roku 2010. Tieto povodia mali najkonzistentnejšie a najhomogénnejšie rady údajov. Získal som ich vďaka účasti na medziakademickej dohode s Ukrajinskou akadémiou vied a stáže na TU Wien.

## 4 Výsledky

### 4.1 Odhad zmien prvkov hydrologickej bilancie z meraných dát a pomocou viacnásobnej lineárnej regresie

Dôvodom pre vytvorenie výpočtu lineárnej regresie bolo odvodenie jednoduchého empirického vzťahu, ktorý by mohol jednoducho predpovedať ako sa bude meniť odtok z konkrétneho povodia pod vplyvom zmeny priemernej ročnej teploty vzduchu a úhrnu zrážok v povodí. Na základe meraných dát sme následne odvodili rovnice pre každé študované povodie (Tab. 1), ktoré s väčšou alebo menšou mierou pravdepodobnosti dokážu vystihnúť zmenené odtokové pomery s súvislosťou so zmenou klimatických prvkov hydrologickej bilancie. Vo všeobecnosti sme sa pohybovali na úrovni koeficientu determinácie ( $R^2$ ) od 0,27 až po 0,84 (Tab. 1), čo už je pomerne vysoká hodnota spoľahlivosti modelu nakoľko sa jedná o tak jednoduchý výpočet. Táto metóda je však náročná na dĺžku a kvalitu časového radu údajov aby bola jej spoľahlivosť dostatočná. Výrazný rozdiel pozorujeme medzi výsledkami modelovaných údajov z povodí s priemernou nadmorskou výškou do 1000 m n. m. a nad touto hranicou. Teda medzi povodiami s dažďovým, snehovo-dažďovým a prevažne snehovým režimom odtoku. Pri povodiach s priemernou nadmorskou výškou 1000 m spoľahlivosť empirického modelu výrazne klesá. Jedno z možných vysvetlení je významnejší výskyt a podiel snehovej pokrývky na tvorbe odtoku z povodia. Pri zahrnutí celkovej výšky snehovej pokrývky do multi-regresného modelu by sa tieto výstupy mohli v značne spresniť.

Ak sa pozrieme na konkrétne povodia jedno po druhom, tak môžeme vidieť, že najvierohodnejší výstup na základe modelovaných dát som dosiahol v povodí rieky Ybbs v Rakúsku za periódu rokov 1977-2010. Úroveň spoľahlivosti predpovede zmeny priemerného ročného odtoku na základe odvodenej rovnice tu dosahuje až takmer 85% (Tab. 1). Z rovnice môžeme uvažovať, že pokiaľ stúpne priemerná ročná teplota vzduchu o  $+1^\circ\text{C}$ , tak sa odtok z tohto územia zníži o  $-36$  mm. Na druhú stranu, pokiaľ by sa priemerné ročné zrážky v povodí znížili o  $-100$  mm, odtok by klesol o  $-75$  mm. Ak by sa obe skutočnosti udiali v horizonte najbližších 80 rokov súčasne, tak podľa tejto rovnice by odtok z povodia rieky Ybbs do roku 2100 klesol o  $-87$  mm. Pri dlhodobom priemernom ročnom odtoku 896 mm v stanici Greimpersdorf by tento pokles predstavoval takmer  $-10\%$ . Vzhľadom k faktu, že hovorím o priemerných číslach, by toto zníženie mohlo mať

výrazné negatívne dôsledky pre miestne poľnohospodárstvo, zásobovanie pitnou vodou, turizmus a iné ekonomické aktivity v tomto regióne.

Analogicky môžeme pokračovať ďalšími povodiami v zozname. Druhým najhodnovernejším výsledkom sa prezentuje dátový rad z povodia rieky Uh s koeficientom determinácie 0,733 (Tab. 1) a radom pozorovaní od roku 1962 do 2010. Keďže časť povodia siaha aj na územie Slovenska tak zmenené odtokové pomery môžu mať vplyv aj na zásoby vody na Východoslovenskej nížine a v neposlednom rade môžu negatívne ovplyvniť biotopy, rezervácie NATURA 2000 a Ramsarské lokality, ktorých existencia je úzko spätá s určitou úrovňou hladiny podzemnej vody. Pri zvýšení teploty o + 1°C v priemere by odtok z povodia rieky Uh klesol len o - 4,3 mm. Pri poklese zrážok o - 100 mm by sa tu odtok znížil o - 66 mm. Podľa predpovede by však spojenie oboch týchto skutočností znamenalo pokles odtoku v stanici Užhorod o + 218 mm, čo by pri dlhodobom priemernom odtoku 355 mm v tejto stanici predstavovalo vážne riziko výskytu hydrologického sucha a nedostatku vlhky pre vegetáciu a obyvateľstvo.

**Tab. 1** Rovnice lineárnej regresie a koeficienty determinácie medzi meranými a modelovanými údajmi o odtoku pre vybrané povodia a ich časové rady

POVODIE (DÁTA)	ROVNICA	R2
NITRA (1962-2015)	$R = -50.46 + 0.2 P + 7.58 T$	0.2711
TOPLA (1962-2015)	$R = 43.7 + 0.5 P - 25.55 T$	0.4534
KRUPINICA (1962-2012)	$R = 69.95 + 0.45 P - 25.78 T$	0.5287
HRON (1962-2015)	$R = 39.41 + 0.63 P - 51.15 T$	0.5201
KYSUCA (1962-2012)	$R = -117.66 + 0.8 P - 1.37 T$	0.6446
IPEL (1965-2012)	$R = 145.33 + 0.36 P - 27.42 T$	0.5377
UH (1962-2010)	$R = -147.72 + 0.66 P - 4.33 T$	0.733
PRUT (1962-2010)	$R = 21.42 + 0.72 P - 26.61 T$	0.602
YBBS (1977-2010)	$R = 24.7 + 0.75 P - 36.26 T$	0.8439
MUR (1977-2010)	$R = 203 + 0.63 P - 41.1 T$	0.4702
DRÁVA (1977-2010)	$R = 141.38 + 0.59 P - 3.44 T$	0.4
SALZACH (1977-2010)	$R = 224.88 + 0.62 P - 18 T$	0.2727

## 4.2 Aplikácia Mann-Kendallovho neparametrického testu pre vybrané povodia

V deviatich sledovaných povodiach bol preukázaný trend vývoja teploty vzduchu na hladine významnosti  $\alpha=0.001$ , čo znamená najsilnejšiu významnosť trendu. Existuje tu teda len 0.1% pravdepodobnosť, že hodnoty majú náhodné rozdelenie. Povodia riek Salzach a Mur v rakúskych Alpách zaznamenali hodnotu trendu zvyšovania teploty na úrovni  $\alpha=0.05$ . Najmenej významný trend v zvyšovaní priemernej ročnej teploty vzduchu bol detekovaný v povodí rieky Ybbs. Najvyššia hodnota významnosti trendu evapotranspirácie na hladine významnosti  $\alpha=0.001$  bola preukázaná v alpských povodiach Dráva, Salzach a Mur. Zo slovenských povodí je významný trend zvyšovania evapotranspirácie iba v povodí rieky Nitry ( $\alpha=0.01$ ). Napriek tomu, že hodnota výparu z povodia sa priamo úmerne odvíja od zvyšovania teploty vzduchu, je zaujímavé, že významne trendy zvyšovania ročnej sumy evapotranspirácie nastali iba v rakúskych povodiach, kde je trend zvyšovania teploty najnižší. Vysvetliť to môže skutočnosť, aj malé zvýšenie priemernej ročnej teploty vzduchu v absolútnych číslach, je vo vysokohorských oblastiach v percentuálnom vyjadrení vysoké (Tab. 3). Zvyšovanie teploty vzduchu sa tu prejavuje najmä v jarných a letných mesiacoch kedy dochádza k topeniu snehovej pokrývky a maximálnym hodnotám odtoku v rámci hydrologického roka. Kombinácia prechodné zvýšeného množstva vody v povodí, vyššej teploty vzduchu a vysokých hodnôt sýtostného doplnku vytvára vhodné podmienky pre zvyšovanie evapotranspirácie v povodí.

Výraznejšie trendy v náraste úhrnu zrážok boli zaznamenané len v dvoch študovaných povodiach (Tab. 2), Mur ( $\alpha=0.001$ ) a Ybbs ( $\alpha=0.01$ ). V povodí rieky Ybbs sa medziročne zvýšil priemerný ročný úhrn zrážok na povodie až o + 180 mm (Tab. 3), čo je zvýšenie o + 12,4% v priemere. Existencia trendu nárastu množstva zrážok bola potvrdená aj v povodí Nitry avšak len nízkej významnosti ( $\alpha = 0.1$ ). Pri hodnotení odtoku sme zaznamenali klesajúci trend v 3 slovenských povodiach (Tab. 2). V povodí horného toku Hrona a na Ipli s významnosťou  $\alpha = 0.05$  v povodí Krupinice na úrovni  $\alpha = 0.1$ . V povodí rieky Ipeľ je to medziročne až o takmer 20% (Tab. 3).

Pri pohľade na významnosť trendov odtokového koeficientu ( $K_r$ ), ktorý určuje pomer medzi odtečeným množstvom vody v stanici a spadnutými zrážkami na povodie, je jasné, že tu dochádza k značnej priestorovej variabilite (Tab. 2). K výraznejším trendom poklesu koeficientu odtoku na hladine významnosti  $\alpha = 0.01$  dochádza len v slovenských povodiach riek Topľa, Hron a Ipeľ (Tab. 2).



Málo významný trend poklesu pozorujeme ešte v povodí rieky Krupinice po stanicu Plášťovce len na najnižšej úrovni významnosti  $\alpha = 0.1$ . V dvoch ukrajinských povodiach sa nevyskytol pokles koeficientu odtoku za obdobie rokov 1962 až 2010. Vo vybraných rakúskych povodiach taktiež k poklesu odtokového koeficientu nedochádza okrem povodia rieky Mur (Tab. 2). Tu bol za obdobie rokov 1977 až 2010 zaznamenaný významnejší pokles.

Pri komplexnom pohľade na študované povodia môžeme teda konštatovať, že prvky hydrologickej bilancie sa menia v každom zo sledovaných povodí. Rozdielne je však ich tempo rastu, resp. poklesu prvkov v priestore a čase.

**Tab. 2** Významnosť ročných trendov odtoku (R), úhrnu zrážok (P), teploty vzduchu (T), výparu (ET) a odtokového koeficientu (Kr) zo študovaných povodí

	Prvok	A	B	Test Z	Významnosť
<b>Topľa (1962-2015)</b>	Odtok	-1.143	263.857	-1.545	
	Zrážky	1.333	674.167	1.410	
	Teplota	0.035	5.445	4.783	***
	Výpar	0.808	531.739	1.686	+
	Kr	-0.002	0.390	-2.745	**
<b>Hron (1962-2015)</b>	Odtok	-1.987	429.505	-2.134	*
	Zrážky	1.266	835.272	1.044	
	Teplota	0.032	3.454	5.103	***
	Výpar	1.148	404.384	4.611	***
	Kr	-0.003	0.482	-3.268	**
<b>Kysuca (1962-2012)</b>	Odtok	-1.659	589.246	-1.446	
	Zrážky	-1.264	872.664	-1.218	
	Teplota	0.029	6.745	3.850	***
	Výpar	0.109	557.379	0.552	
	Kr	-0.001	0.668	-0.763	
<b>Krupinica (1962-2012)</b>	Odtok	-1.284	171.500	-1.771	+
	Zrážky	-0.181	654.563	-0.146	
	Teplota	0.032	7.503	4.630	***
	Výpar	0.570	487.812	1.056	
	Kr	-0.002	0.250	-1.949	+

	Prvok	A	B	Test Z	Významnosť
<b>Ipeľ (1965-2012)</b>	Odtok	-1.737	162.590	-2.426	*
	Zrážky	0.146	614.433	0.062	
	Teplota	0.027	8.272	3.689	***
	Výpar	0.735	483.640	1.004	
	Kr	-0.003	0.259	-3.013	**
<b>Nitra (1962-2015)</b>	Odtok	0.323	159.043	0.731	
	Zrážky	1.995	719.020	1.723	+
	Teplota	0.030	8.549	4.163	***
	Výpar	1.437	579.379	2.611	**
	Kr	0.000	0.222	-0.477	
<b>Uh (1962-2010)</b>	Odtok	-0.291	369.177	-0.284	
	Zrážky	0.907	763.038	0.603	
	Teplota	0.026	8.468	3.439	***
	Výpar	-0.222	709.064	-0.405	
	Kr	-0.001	0.446	-0.715	
<b>Pрут (1962-2010)</b>	Odtok	-1.852	864.934	-0.681	
	Zrážky	0.377	1591.942	0.112	
	Teplota	0.047	10.316	3.508	***
	Výpar	0.758	762.717	2.198	*
	Kr	-0.001	0.548	-0.974	
	Prvok	A	B	Test Z	Významnosť
<b>Dráva (1977-2010)</b>	Odtok	-2.488	872.061	-1.601	
	Zrážky	-0.345	1191.358	-0.119	
	Teplota	0.048	1.735	3.825	***
	Výpar	2.316	436.841	5.070	***
	Kr	-0.002	0.724	-1.305	
<b>Salzach (1977-2010)</b>	Odtok	1.067	1190.210	0.474	
	Zrážky	-0.683	1738.222	-0.267	
	Teplota	0.033	4.370	2.550	*
	Výpar	1.581	539.423	4.180	***
	Kr	0.000	0.690	0.415	
<b>Mur (1977-2010)</b>	Odtok	1.423	907.021	0.504	
	Zrážky	5.399	1354.241	3.558	***
	Teplota	0.035	4.074	2.491	*
	Výpar	1.812	496.744	4.092	***
	Kr	-0.002	0.675	-2.194	*
<b>Ybbs (1977-2010)</b>	Odtok	6.305	798.453	1.631	
	Zrážky	9.778	1356.192	2.757	**
	Teplota	0.024	7.099	1.720	+
	Výpar	0.959	624.316	2.016	*
	Kr	0.000	0.573	0.178	

### 4.3 Porovnanie rozdielov hodnôt prvkov hydrologickej bilancie v čase

Vzhľadom k rôznym dĺžkam hydrologických a klimatologických meraní, nie len medzi študovanými povodiami ale aj v rámci jedného územia, som rozdelil každý rad meraní v rámci jedného povodia na polovicu. Následne som vyrátal dlhodobé priemery prvkov hydrologickej bilancie pre obe polovice a odčítal od seba, čím som dostal hodnotu priemernej zmeny prvkov medzi staršou a novšou periódou pozorovaní. Prehľad rozdielov priemerov v absolútnych a relatívnych hodnotách sledovaných prvkov sú zobrazené v tabuľke 3. Z uvedených hodnôt vidíme, že najvýraznejší percentuálny pokles odtoku som zaznamenal v stanici Holiša v povodí rieky Ipeľ a to až o takmer - 20%. Ostatné slovenské toky zaznamenali v posledných rokoch tiež výrazný pokles odtoku. Krupinica - 17,2%, Hron - 12,4% a Topľa - 15,6%. V protiklade stojí povodie rakúskej rieky Ybbs, kde v stanici Griempersdorf narástol odtok o + 13,5% a priemerný ročný úhrn zrážok na povodie o + 12,4%. V povodí rieky Dráva sme zaznamenali najvyšší nárast aktuálnej evapotranspirácie a to o + 8,9%, čo predstavuje 40 mm. V súvislosti s tým sa v povodí Drávy vyskytol najvyšší nárast priemernej teploty vzduchu o + 0,9°C. Táto hodnota však predstavuje nárast v relatívnom vyjadrení o + 44%. Zo slovenských povodí je najvýraznejší nárast teploty vzduchu a evapotranspirácie na hornom toku Hrona a v povodí Tople.

**Tab. 3** Absolútny a relatívny [%] rozdiel v hodnotách priemerného ročného úhrnu zrážok [P], odtoku [R], teploty vzduchu [T] a evapotranspirácie [E] vo vybraných povodiach medzi porovnávanými obdobiami

	P[mm]	R[mm]	E[mm]	T[°C]	P[%]	R[%]	E[%]	T[%]
IPEĽ	24.9	-26.7	16.4	0.5	4.1	-19.6	3.3	5.7
KYSUCA	-17.2	-24.7	-1.0	0.6	-2.0	-4.5	-0.2	8.1
HRON	37.5	-48.2	30.2	0.8	4.4	-12.4	7.2	20.8
KRUPINICA	12.5	-29.4	7.7	0.7	1.9	-17.2	1.5	8.7
TOPLĽA	21.6	-40.9	11.4	0.8	3.0	-15.6	2.1	14.0
NITRA	68.6	7.2	35.5	0.7	9.0	4.1	5.8	8.2
UH	-13.0	-17.4	-14.2	0.5	-1.6	-4.8	-2.0	5.8
PRUT	-16.9	-68.7	21.4	0.9	-1.1	-7.8	2.8	7.7
YBBS	179.8	113.0	20.6	0.4	12.4	13.5	3.3	5.9
DRÁVA	-40.1	-28.6	40.3	0.9	-3.3	-3.4	8.9	44.4
MUR	71.9	28.4	30.6	0.6	5.1	3.1	6.0	13.1
SALZACH	-28.2	24.9	30.3	0.6	-1.6	2.1	5.5	12.7
AVG	25.1	-9.3	19.1	0.7	2.5	-5.2	3.7	12.9

#### 4.4 Výsledky modelovania v prostredí modelu BILAN

Z výsledkov vyplýva, že najnižšie hodnoty podzemného odtoku model BILAN vypočítal pre slovenské povodia a najvyššie pre alpské. Všeobecne možno konštatovať, že vzrastá s nadmorskou výškou. Zo slovenských povodí odtečie podzemným odtokom v povodí Hrona takmer 50% a na Kysuci 35% vody. Pri podpovrchovom odtoku som najvyššie hodnoty zaznamenal v povodiach, ktoré dosahujú najvyššiu plochu lesa v pomere k celkovej rozlohe povodia. Jedná sa o povodia riek Uh, Ybbs, Hron a Kysuca. Napr. ako spomínam v podkapitole 4.11, tak lesnatosť v povodí rakúskej rieky Ybbs je až 69%. Najvyššia hodnota je v povodí rieky Uh, kde podpovrchový odtok predstavuje 46%. Priamy odtok je najvyšší v horských povodiach. Zo slovenských povodí je to rieka Kysuca, ktorej priamy odtok podľa modelu BILAN tvorí až 36,5%. No pri Hrone je to len 16%. Najvyššie úhrny potenciálnej aj aktuálnej evapotranspirácie sa vyskytujú v najvýchodnejších povodiach na Ukrajine a najnižšie v povodí horného Hrona. Poďme sa teda pozrieť ako model simuluje hydrologickú bilanciu podzemných vôd. Najvyššie zásoby podzemnej vody Prut, Nitra a Salzach. Naopak najnižšie zásoby podzemnej vody aj vody v pôde má povodie rieky Krupinica. Tieto hodnoty môžu byť podmienené geologickým podložím keďže povodie sa nachádza na Krupinskej planiny, ktorá je budovaná prevažne neogénnymi vulkanitmi, ktoré sa zase vyznačujú vysokou pórovitosťou a priepustnosťou pre vodu. Najviac vody v pôdy namodeloval BILAN v povodiach Dráva, Salzach a Mur. Zásoby vody v snehu sú najvyššie logicky v najvyššie položených povodiach. Do 200 mm v priemere majú povodia Dráva, Hron a Salzach. Najmenej vody je viazanej v snehu v povodí Tople, kde to je len 17,5 mm v priemere za obdobie rokov 1962-2015. Model BILAN veľmi dobre vystihol priemerné ročné maximá slovenských riek s výnimkou rieky Nitra. Minimálne ročné prietoky boli vystihnuté rovnako s veľkou presnosťou s výnimkou horného toku Hrona. V prípade rieky Dráva model BILAN simulovaný maximálny odtok v júni podhodnotil a pri rieke Salzach posunul maximum odtoku z povodia až na júl. Pri riekach Ybbs a Mur došlo tiež k podhodnoteniu situácie pri maximálnom odtoku v roku. Rieka Uh s maximom v marci a minimom v auguste je veľmi podobná slovenským povodiach. Pri rieke Prut došlo k podhodnoteniu maxima a jeho odsunutiu až na august

Ak by sa teda priemerná ročná teplota vzduchu zvýšila o 1°C a zrážky o +10% (scenár A) je zrejmé, že by stúpala hodnota odtoku [R] vo všetkých povodiach. Na Slovensku by sa zvýšil odtok najviac v povodí horného toku Hrona (+ 13,3%), na Ukrajine v povodí rieky Prut (+ 14%) a v Rakúsku v povodí rieky Mur (19,1%).

Podzemný odtok [BF] by najvýraznejšie stúpol v povodí Ipľa (+ 42,4%) a vo vybraných rakúskych povodiach. Naopak k výraznému nárastu priameho odtoku by došlo v povodí rieky Topľa (+ 28,7%). Hodnoty aktuálnej sumy evapotranspirácie by sa zvýšili vo všetkých slovenských vybraných slovenských povodiach v priemere o 10%. Zásoby vody v snehu by narástli vo všetkých povodiach okrem povodia rieky Dráva, kde model simuluje 1,5% pokles.

Pri druhom, pesimistickejšom scenári, kedy by priemerná ročná teplota vzduchu stúpla o + 1°C pri súčasnom poklese priemerného ročného úhrnu zrážok o -10% (scenár B) nastane pokles odtokovej výšky [R] zo všetkých vybraných povodí. Najvýraznejší pokles by nastal v povodí rieky Kysuca, kde by odtok klesol až o jednu štvrtinu (- 25%) dlhodobého priemeru rokov 1962-2012. Výrazný pokles, nad - 20%, by nastal aj v povodiach Hron, Uh a Prut. Najvýraznejší pokles podzemného odtoku [BF] by nastal rovnako v povodí Kysuce. Je teda zrejmé, že toto povodie je citlivé na zmeny úhrnov zrážok. Významný pokles podzemného odtoku by nastal aj v povodí rieky Mur (- 34,5%). Podpovrchový odtok [I] by poklesom rovnako vo všetkých povodiach okrem povodia rieky Salzach. Najvýraznejší pokles by nastal v povodí rieky Dráva (- 68,2%). Povodie rieky Ipel' by zaznamenalo najvyšší pokles podpovrchové odtoku (- 56,9%) ale aj priameho odtoku (- 28,5%), zo slovenských tokov. Celkovo by však priamy odtok poklesom najviac v povodí rieky Prut. Aktuálna evapotranspirácia by zaznamenala najvyšší pokles v povodiach Nitra a Krupinica. Pri tomto pesimistickom scenári by najviac utrpeli zásoby vody v snehu v povodí rieky Topľa, kde by už v zime prakticky žiadne zásoby nevyškýtovali.

## 5 Záver

Hydrologické zrážkovo-odtokové modely majú veľký význam pri riadení alebo hodnotení konkrétnych situácií v povodiach. Na modelovanie prvkov hydrologickej bilancie zvyčajne používajú konceptuálne modely hydrologickej bilancie so sústredenými parametrami. Jeden z takýchto modelov som použil v predloženej práci. Zameral som sa na kalibráciu modelu BILAN na základe údajov z dvanástich vybraných povodí Slovenska. Ak vieme predpokladať zmeny prvkov hydrologickej bilancie sme schopní na základe scenárov odhadnúť trend vývoja do budúcnosti. Zmena klímy je nezvratný proces. Rýchlosť akou sa zmeny dejú je rôzna s nárastom nadmorskej výšky ale aj geografickej šírky a dĺžky. Hydrologické modely podávajú relatívne spoľahlivé scenáre vývoja zásob vody a celkovej situácie vo vybraných povodiach. Avšak to len za predpokladu dostatočnej dĺžky a kvality dát. Poskytnutie údajov pre práce týkajúce sa vplyvu zmeny klímy by malo byť samozrejmosťou. Zvýšené nároky na zásoby vody a riziko sucha v povodiach si v budúcnosti vyžadujú dôkladnú prípravu adaptačnej stratégie v súčasnosti. Táto úloha je nevyhnutná a vyžaduje si úzku spoluprácu klimatológov, hydrológov, vodohospodárov a hydrogeológov. Treba si však uvedomiť, že sa jedná o simuláciu matematickým modelom za nezmenených vegetačných podmienok v povodí. Takáto simulácia nemôže zachytiť všetky zmeny v povodí, ktoré môžu v povodí prebiehať pri zvýšení zrážkových úhrnov, alebo zvýšení teploty vzduchu. V budúcnosti by práca mohla byť rozšírená o ďalšie povodia, ďalšie obdobie a vypracovanie viacerých scenárov, z ktorých by sme následne vedeli vytvoriť regionálne scenáre zmeny odtokových pomerov v povodiach

## Literatúra a zdroje

BLÖSCHL, G., NESTER, T., KOMMA, J., PARAJKA, J., PERDIGÃO, R. A. P., 2013. The June 2013 flood in the Upper Danube basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, s. 5197-5212.

DUB, O., NĚMEC, J., a kol., 1969. *Hydrologie. Technický průvodce* 34, Číslo spisu 353, SNTL – Nakladatelství Technické Literatúry. Praha 1969. 377s.

FENDEKOVÁ, M., FENDEK, M., GREGOROVÁ, M., MACHLICA, A., STOJKOVÁ, M., 2008. Analýza veľkosti a časových zmien podzemného odtoku v hornej časti povodia Tople. *Podzemná voda* XIV, 2, 129–138.

FENDEKOVÁ, M., ŽENIŠOVÁ, Z., DEMETEROVÁ, B., FENDEK, M., FLAKOVÁ R., GAVURNÍK, J., KRČMÁŘ, D., MACURA, V., NĚMETHY, P., SLIVOVÁ, V., 2010. *Hydrogeologické sucho*. 1. vyd. Bratislava, Slovenská asociácia hydrogeológov, 2010. 190 s. ISBN 978-80-969342-7-0.

FENDEKOVÁ, M., DANÁČOVÁ, Z., GAUSTER, T., LABUDOVÁ, L., FENDEK, M., HORVÁT, O., 2017. Analysis of hydrological drought parameters in selected catchments of the southern and eastern Slovakia in the years 2003, 2012 and 2015. *Acta Hydrologica Slovaca*, 18, 2, 135-144.

GARAJ, M., 2016. Meteorologické príčiny povodní na hornom a strednom toku Dunaja v rokoch 1895, 1897 a 1899. Diplomová práca, Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra fyzickej geografie a geoekológie, 79 s.

HALL, J., ARHEIMER, B., BORGA, M., BRÁZDIL, R., CLAPS, P., KISS, A., KJELDSSEN, T. R., KRIAUCIUNIENE, J., KUNDZEWICZ, Z. W., LANG, M., LLASAT, M. C., N., MACDONALD, 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., SCHAR, C., SZOLGAY, J., VIGLIONE, A., BLÖSCHL, G., 2014. Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 2735-2772, doi:10.5194/hess-18-2735-2014.

HALMOVÁ, D., 2000. Vplyv zmien klímy na zabezpečenosť odberu vody z vodného diela Orava. Acta Hydrologica Slovaca, ÚH SAV, 1, 2, 3–12.

HALMOVÁ, D., 2002. Simulácie celkového objemu nádrží s uvažovaním rozdielnych scenárov zmeny klímy. Acta Hydrologica Slovaca, ÚH SAV, 3, 2, 174–184.

HALMOVÁ, D., 2004. Vplyv potenciálnych klimatických zmien na zabezpečenie požadovanej dodávky vody vodnou nádržou Vihorlat. Acta Hydrologica Slovaca, ÚH SAV, 5, 1, 42–51.

HALMOVÁ, D., MITKOVÁ, V., 2002. Simulácia povodne z roku 1998 na rieke Uh zrážko-odtokovým modelom HBV-light. Vodohosp. spravodajca, 45, 7-8, 21–23.

HLAVČOVÁ K., KOHNOVÁ, S., 2005. Návrh rámcových adaptačných opatrení. In: PEKÁROVÁ, P., SZOLGAY, J., eds.: Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny. Veda - Vydavateľstvo SAV, Bratislava 2005, 419–492. ISBN 80-224-0884-0.

HOLKO, L., KOSTKA, Z., BUCHTELE, J., LEPISTO, A., 1997. Runoff modelling in a mountain catchment. Ecohydrological processes in small basins. UNESCO, Technical documents in Hydrology 14, Paris, 169–173

HOLKO, L., 2001. Testovanie bodovej verzie energeticky založeného modelu akumulácie a topenia snehovej pokrývky UEB v povodí Jaloveckého potoka. Acta Hydrologica Slovaca, 2, 1, 105–112.

KAŠPÁREK, L., NOVICKÝ, O., 2009. Manuál k modelu Bilan. Praha: Výskumní ústav vodního hospodářství T. G. Masaryka. 15s.

KOSTKA, Z., HOLKO, L., 2001. Runoff modelling in a mountain catchment with conspicuous relief using TOPMODEL. J. Hydrol. Hydromech., 49, 3-4, 149–171.

KOSTKA, Z., HOLKO, L., BABIAKOVÁ, G., LEŠKOVÁ, D., 2005. Simulácia vodnej hodnoty snehu v povodí Popradu v hydrologických rokoch 1999–2005 – vplyv zmeny vegetačných pomerov a predpoveď odtoku počas jarného obdobia. Acta Hydrologica Slovaca ÚH SAV., 6, 1, 149–160.



KUBEŠ, R., KUMANČÍK, I., PECUŠOVÁ, Z., PARAJKA, J., SZOLGAY, J., 2004. Vplyv zmeny metódy priestorovej interpolácie zrážok na presnosť simulácie odtoku v povodí Hrona. *Acta Hydrologica Slovaca*, 5, 2, 266–274.

LAAHA, G., PARAJKA, J., VIGLIONE, A., KOFFLER, D., HASLINGER, K., SCHÖNER, W., ZEHETGRUBER, J., BLÖSCHL, G., 2016. A three-pillar approach to assessing climate impacts on low flows. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 3967-3985, 2016 doi:10.5194/hess-20-3967-2016.

MAJERČÁKOVÁ, O., ŠKODA, P., ŠŤASTNÝ, P., FAŠKO, P. 2004a. Vývoj zložiek hydrologickej bilancie za obdobia 1931–1980 a 1961–2000. *J. Hydrol. Hydromech.*, 52, 4, 355–364.

MAJERČÁKOVÁ, O., FAŠKO, P., ŠKODA, P., ŠŤASTNÝ, P. 2004b. Porovnanie hydrologickej bilancie Slovenska za obdobia 1931–1980 a 1991–2001. *Vodohospodársky spravodajca*, XLVII, 2–3, 12–15.

MERZ, B., NGUYEN, V. D., VOROGUSHYN, S., 2016. Temporal clustering of floods in Germany: Do flood-rich and flood-poor periods exist?, *Journal of Hydrology*, Volume 541, Part B, Pages 824-838, ISSN 0022-1694, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.041>.

MÍTKOVÁ, V., KOHNOVÁ, S., 2001. Rainfall-runoff simulation using HBV-light model at the Ondava catchment. 19 European Conference of ICID on "Sustainable Use of Land and Water", Brno, 61.

PEKÁROVÁ, P., VELÍSKOVÁ, Y., 1998. Modelovanie kvality vody v povodí Ondavy. VEDA, vyd. SAV, (ISBN 80-224-0535-3), 254.

PEKÁROVÁ, P., HALMOVÁ, D., MÍTKOVÁ, V., 2005. Simulation of the catastrophic floods caused by extreme rainfall events - Uh River basin case study. *J. Hydrol. Hydromech.*, 4, 219–230.

PEKÁROVÁ, P., MIKLÁNEK, P. 2006. Predpoveď odtoku z topenia snehu z malého povodia. *Acta Hydrologica Slovaca*, ISSN 1335-6291, 2006, roč. 7, no. 1, 65–75.

SZOLGAY, J., KUBEŠ, R. 2005. Multilineárny model transformácie prietokov v korytách tokov. In: PEKÁROVÁ, P., SZOLGAY, J., eds.: Scenáre zmien vybraných zložiek hydrosféry a biosféry povodí Hrona a Váhu v dôsledku klimatickej zmeny. Veda, Bratislava 2005, 203–252.

SZOLGAY, J., HLAVČOVÁ, K., LAPIN, M., PARAJKA, J., KOHNOVÁ, S., 2007. Vplyv zmeny klímy na odtokový režim na Slovensku. KEY Publishing, 160 str.

## **Zoznam autorových publikácií**

GARAJ, Marcel - PEKÁROVÁ, Pavla\*\* - PEKÁR, Ján - MIKLÁNEK, Pavol. The Changes of Water Balance in the Eastern Slovakia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 5th World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium, WMESS 2019; Prague; Czech Republic; 9 September 2019 through 13 September 2019, 2019, vol. 362, no. 012014. ISSN 1755-1307.(Vega 2/0004/19 : Analysis of changes in surface water balance and harmonization of design discharge calculations for estimation of flood and drought risks in the Carpathian region). Typ: ADMB

GARAJ, Marcel - MELO, Marián - PEKÁROVÁ, Pavla. Analýza príčin ľadovej povodne na hornom toku Dunaja v roku 1895 s využitím historických dát. In XXIII. Stretnutie snehárov. - Banská Bystrica : Slovenský hydrometeorologický ústav, Regionálne pracovisko Banská Bystrica, 2019, s. 32-35. ISBN 978-80-99929-01-3. Typ: AFD

GARAJ, Marcel - PEKÁROVÁ, Pavla - MIKLÁNEK, Pavol - PEKÁR, Ján. The changes of water balance in the eastern Slovakia. In World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium : Abstract collection book. - Prague : WMESS, 2019, p. 1-1. Typ: AFG

PEKÁROVÁ, Pavla - MIKLÁNEK, Pavol - BAČOVÁ MITKOVÁ, Veronika - GARAJ, Marcel - PEKÁR, Ján. Assessment harmonization problems of the long return period floods on the Danube river. In XXVIII CONFERENCE OF THE DANUBIAN COUNTRIES ON HYDROLOGICAL FORECASTING AND HYDROLOGICAL BASES OF WATER MANAGEMENT : electronic book with

full papers from XXVIII onference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management [elektronický zdroj]. Edit. Liudmyla Gorbachova, Borys Khrystiuk. - Kyiv : Ukrainian Hydrometeorological Institute : Department of Hydrological Research, 2019, p. 140-152. ISBN 978-966-7067-38-0. Názov z obrazovky. Požaduje sa Adobe Reader. Typ: AFC

RÖSSLER, Ole - BELZ, Jörg Uwe - MÜRLEBACH, Michael - LARINA-POOTH, Maria - HALMOVÁ, Dana - GARAJ, Marcel - PEKÁROVÁ, Pavla. Analysis of the intra-annual regime of flood flow and its changes in the Danube basin. In Flood regime of rivers in the Danube River basin : The Danube and its Basin – Hydrological Monograph Follow-up Volume IX. 1st edition. - Bratislava : Slovak Academy of Sciences, Institute of Hydrology, 2019, p. 101-122. ISBN 978-80-89139-45-3. Dostupné na internete: <<https://doi.org/10.31577/2019.9788089139460> >. Typ: ABD

GARAJ, Marcel - PEKÁROVÁ, Pavla - MIKLÁNEK, Pavol - PEKÁR, Ján. Dlhodobý vývoj hydrologickej bilancie v povodí Tople za obdobie 1961 – 2015, časť II: Simulácia vývoja odtoku za zmenených klimatických pomerov modelom BILAN [Longterm development of hydrological balance in the Topľa basin in 1961–2015. part II.: Simulation of the runoff development by BILAN model in changed climate conditions]. Pavla Pekárová, Pavol Miklánek, Ján Pekár. In Acta Hydrologica Slovaca, 2018, roč. 19, č. 1, s. 27-34. ISSN 1335-6291. Typ: ADFB

GARAJ, Marcel - PEKÁROVÁ, Pavla - MIKLÁNEK, Pavol - PEKÁR, Ján. The changes of water balance components in Slovakia. In Abstract book 17th Alps-Adria Scientific Workshop - Conference [elektronický zdroj]. - Gödöllő : Szent István Egyetemi Kiadó Nonprofit Kft., 2018, s. 84-85. ISBN 978-963-269-734-5. Názov z obrazovky. Požaduje sa Adobe Reader. Typ: AFG

GARAJ, Marcel - PEKÁROVÁ, Pavla - ZABOLOTNIA, Tetiana - GORBACHOVA, Liudmyla. Changes in the hydrological balance components in selected subcatchments of Slovakia and Ukraine. Marcel Garaj, Pavla Pekárová, Tetiana Zabolotnia, Liudmyla Gorbachova. In HydroCarpath International Conference: Catchment processes in regional hydrology: experiments, patterns and predictions : abstracts of the Conference. - Sopron : University of Sopron Press, 2018, s. 21-21. ISBN 978-963-334-199-5. Typ: AFG

PEKÁROVÁ, Pavla - GARAJ, Marcel - PEKÁR, Ján - MIKLÁNEK, Pavol. Dlhodobý vývoj hydrologickej bilancie v povodí Topľa za obdobie 1961 – 2015. časť I : zmeny zásob vody v povodí Topľa v mesačnom kroku [Longterm development of hydrological balance in the Topľa basin in 1961–2015. part I: changes of water storage in monthly step in the Topľa basin.]. Marcel Garaj, Ján Pekár, Pavol Miklánek. In Acta Hydrologica Slovaca, 2018, roč. 19, č. 1, s. 17-26. ISSN 1335-6291. Typ: ADFB

PEKÁROVÁ, Pavla - PEKÁR, Ján - MIKLÁNEK, Pavol - HALMOVÁ, Dana - BAČOVÁ MITKOVÁ, Veronika - GARAJ, Marcel. Vývoj koeficientu šikmosti teoretického LP3 rozdelenia maximálnych ročných prietokov po dĺžke toku Dunaja [Development of the skew coefficient of the LP3 distribution of the maximum annual discharges along the Danube river]. In 24. Posterový deň s medzinárodnou účasťou a Deň otvorených dverí na ÚH SAV - 24th International Poster Day and Institute of Hydrology Open Day : zborník recenzovaných príspevkov - proceedings of peer-reviewed contributions [elektronický zdroj]. Editor: Anežka Čelková ; recenzenti: Veronika Bačová Mitková, Milan Gomboš, Ladislav Holko, Branislav Kandra, Radka Kodešová, Pavol Nejedlík, Tomáš Orfánus, Kálmán Rajkai, Jana Skalová, Peter Šurda, Andrej Tall. - Bratislava : Ústav hydrologie Slovenskej akadémie vied, 2017, s. 211-222. ISBN 978 - 80 - 89139 - 40 - 8. Názov z obrazovky. Požaduje sa Adobe Reader. Typ: AFD

PEKÁROVÁ, Pavla - PEKÁR, Ján - MIKLÁNEK, Pavol - HALMOVÁ, Dana - BAČOVÁ MITKOVÁ, Veronika - GARAJ, Marcel. Vývoj koeficientu šikmosti teoretického LP3 rozdelenia maximálnych ročných prietokov po dĺžke toku Dunaja [Development of the skew coefficient of the LP3 distribution of the maximum annual discharges along the Danube river]. In 24. Posterový deň s medzinárodnou účasťou a Deň otvorených dverí na ÚH SAV - 24th International Poster Day and Institute of Hydrology Open Day : zborník recenzovaných príspevkov - proceedings of peer-reviewed contributions [elektronický zdroj]. - Bratislava : Ústav hydrologie Slovenskej akadémie vied, 2017, s. 343-343. ISBN 978 - 80 - 89139 - 40 - 8. Názov z obrazovky. Požaduje sa Adobe Reader. Typ: AFH