



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE STAVEBNÁ FAKULTA

Mgr. Anita Keszeliová

**Autoreferát dizertačnej práce**

**ZMENY ÚZEMNÉHO VÝPARU VO VYBRANÝCH POVODIACH SLOVENSKA**

**na získanie akademického titulu:** „doktor“ „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

**v doktorandskom študijnom programe:** 3629V09 vodohospodárske inžinierstvo D-VHI4

**v študijnom odbore:** stavebníctvo

**Forma štúdia:** denná

**Miesto a dátum:** v Bratislave 13.12.2022



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre vodného hospodárstva krajiny Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity

**Predkladateľ:** Mgr. Anita Keszeliová  
Katedra vodného hospodárstva krajiny  
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

**Školiteľ:** prof. Ing. Ján Szolgay, PhD.  
Katedra vodného hospodárstva krajiny  
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

**Oponenti:** prof. Ing. Silvia Kohnová, PhD  
Katedra vodného hospodárstva krajiny  
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

doc. Mgr. Juraj Parajka, PhD.  
TU Viedeň

RNDr. Pavla Pekárová, DrSc  
Ústav hydrológie SAV, v.v.i., Bratislava,

**Autoreferát bol rozoslaný:** .....11.11.2022 (dátum rozoslania/*Date of sending*)

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa**/*Dissertation Thesis Defence will be held on*  
.....13.12.2022

**o/at**.....**h** (*am/pm*) **na/at** Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 813 68 Bratislava.... (*presná adresa miesta konania obhajoby dizertačnej práce/exact address where the dissertation thesis defence will take place*)

.....  
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.  
dekan fakulty

## OBSAH

1	ÚVOD.....	3
2	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	3
3	DÁTA.....	4
4	METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA.....	7
5	VÝSLEDKY A DISKUSIA .....	9
6	ZÁVERY .....	24
7	Literatúra.....	27

## 1 ÚVOD

Potenciálne zmeny hydrologického režimu spôsobené meniacou sa klímou predstavujú jeden zo zdrojov neistoty v oblasti hospodárenia s vodnými zdrojmi. Na Slovensku sa môžu prejaviť poklesom výdatnosti vodných zdrojov, zmenou sezonality odtoku, zvýšením extrémnosti povodní a sucha, ako aj zmenou zásob vody v snehovej pokrývke.

Sledovanie zmien v dlhodobom režime kľúčových prvkov hydrologickej bilancie v mierke povodí je preto aktuálnou potrebou. Cez ňu je možná aj nepriama detekcia zmien v hydrologických prvkoch, keďže v bilancii sa navzájom prelínajú. Vzťah vodnej bilancie k charakteru povodia a ku klíme preto poskytuje aj náhľad do komplexného systému procesov, ktoré pôsobia v priestore a čase pri pohybe vody v prírode cez pôdu, vegetáciu a atmosféru.

Cieľom dizertačnej práce bolo preto detekcia a modelovanie zmien v hydrometeorologických časových radoch v podmienkach klimatickej zmeny cez optiku hydrologickej bilancie povodí. Aby boli výsledky relevantné pre vodohospodársky prax, bolo sledovanie vykonané v štyridsať štyroch povodiach pokrývajúcich celé územie Slovenska.

## 2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Zamerali sme sa na zmeny územného výparu vo vybraných povodiach Slovenska ako v inštrumentálnom období, tak aj v blízkej budúcnosti pri zohľadnení scenárov zmeny klímy. Z hľadiska časového kroku sme volili ročný krok a dlhé obdobie, ktoré umožňuje zanedbať sledovanie zmeny akumulácie vody v povodiach. Konkrétne ciele dizertačnej práce sme, v súlade s odporúčaniami komisie dizertačnej skúšky, stanovili nasledovne:

Prvá etapa:

- analyzovať informácie v disponibilných hydrologických a meteorologických údajoch v SR,
- vykonať výber povodí,
- zostaviť rady pozorovaných, gridových a modelovaných dát pilotných povodí na retrospektívnu analýzu bilancie a analýzu vplyvu zmeny klímy na hydrologickú bilanciu.

Druhá etapa:

- kryštalizovať metodické postupy pre hydrologickú bilanciu a štatistické testovanie zmien režimu prvkov bilancie,
- vybrať vhodný zrážkovo-odtokový koncepčný model vrátane vhodnej metódy pre jeho parametrizácie v podmienkach meniaceho sa hydrologického režimu.

Tretia etapa:

- vyšetrovať metodické problémy výpočtu hydrologickej bilancie s ročným krokom,
- porovnávať hydrologickú bilanciu podľa hydrologického a kalendárneho roku,
- zisťovať rozdielnosť jej výstupov pri použití gridových a staničných údajov.

Štvrtá etapa:

- skúmať vývoj hydrologickej bilancie v posledných desaťročiach v pilotných povodiach,
- porovnávať rozdiely hydrologickej bilancie vybraných období,
- hodnotiť trendy vývoja prvkov hydrologickej bilancie.

Piata etapa:

- odhadnúť hydrologickú bilanciu vybraných povodí podľa scenárov zmeny klímy v budúcnosti,
- vykonať porovnanie hydrologickej bilancie medzi použitými scenármi zmeny klímy.

Odporúčania pre hydrologickú prax s dôrazom na ich uplatniteľnosť v rôznych aplikáciách.

### 3 DÁTA

V práci bolo vybraných 44 povodí so zreteľom na primerané plošné pokrytie celého územia Slovenska. Pri výbere jednotlivých povodí sme brali do úvahy aj ich plochu. Vybrali sme aj vnorené povodia. Na obr. 3.1 sú vyznačené ich hranice a poloha záverečných profilov. Tabuľka 4.1 obsahuje ich zoznam, vybrané charakteristiky a zoznam k nim priradených 16 klimatických staníc.

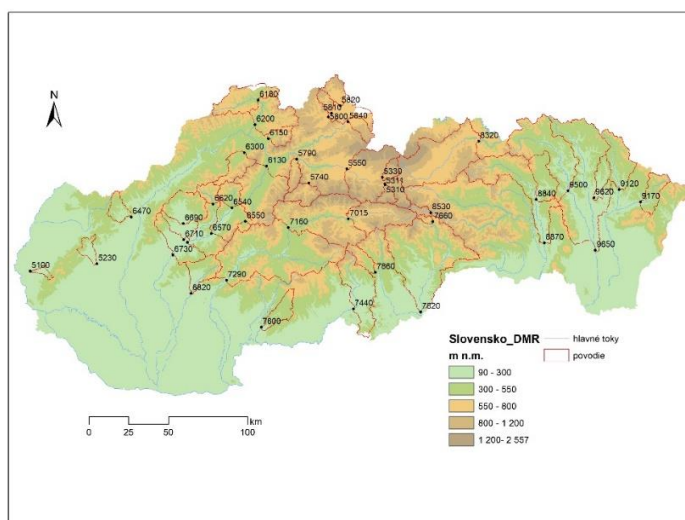
Tabuľka 3.1 Zoznam a charakteristika vybraných povodí

Poradie	Povodie	Povodie - Tok	Vodomerňá stanica	ID_vod	Plocha povodia [km <sup>2</sup> ] (GIS)	Priemerný únin zrážok [mm]	Priemerná ročná teplota vzduchu [°C]	Priemerný ročný prietok [m <sup>3</sup> /s]	Priemerný ročný odtok [mm]	Nadmorská výška		Riečny km	Klimatologická stanica	ID_klim	
										min. [m n. m.]	max. [m n. m.]				
1	Morava	Močiarika	Láb	5100	45,18	624,17	9,65	0,19	132,94	144	645	286	Bratislava - Koliba	11813	
2	Váh	Trnávka	Bohdanovce	5230	115,32	601,89	9,20	0,39	107,57	160	741	277	Myjava	11806	
3	Váh	Ipolica	Čierny Váh	5310	86,25	953,29	4,18	1,50	549,08	735	1700	1160	Telgárt	11938	
4	Váh	Čierny Váh	Čierny Váh	5311	243,27	976,47	4,22	3,51	455,47	734	1936	1125	Telgárt	11938	
5	Váh	Východná	Biely Váh	5330	98,84	847,16	4,83	1,52	484,04	751	2387	1065	Podbanské	11876	
6	Váh	Váh	Liptovský Mikuláš	5550	1101,42	994,09	4,57	20,16	577,10	568	2409	1086	Liptovský Hrádok	11874	
7	Váh	Revúca	Prodsuchá	5740	217,82	1025,36	4,69	4,63	671,01	560	1750	984	Liptovský Hrádok	11874	
8	Váh	Lubochňanka	Lubochňa	5790	118,28	1041,29	4,76	2,35	627,50	441	1660	923	Liptovský Hrádok	11874	
9	Váh	Bielá Orava	Lokca	5800	355,21	1048,94	5,34	6,87	610,23	570	1711	925	Oravská Lesná	11868	
10	Váh	Veselianska	Oravská Jasenica	5810	89,53	1050,82	5,33	1,57	554,16	618	1551	849	Oravská Lesná	11868	
11	Váh	Polhoranika	Zubrohava	5820	159,78	964,04	6,19	3,33	656,28	607	1710	830	Oravská Lesná	11868	
12	Váh	Oravica	Trstená	5840	131,96	1026,43	5,11	2,71	647,10	587	1685	869	Oravská Lesná	11868	
13	Váh	Turiec	Martin	6130	828,74	967,29	6,70	9,81	373,29	393	1593	714	Prievidza	11867	
14	Váh	Varinka	Stráža	6150	139,02	1083,39	5,27	3,12	708,54	401	1677	268	Oravská Lesná	11868	
15	Váh	Kysuca	Čadca	6180	468,45	998,81	6,31	8,49	571,69	407	1080	709	Čadca	11866	
16	Váh	Kysuca	Kysucké Nové Mesto	6200	904,81	1027,72	5,99	16,51	575,60	346	1239	649	346,09	8,00	11866
17	Váh	Rajčianka	Polovsie	6300	243,78	1016,59	6,50	3,41	441,20	397	1472	687	Prievidza	11867	
18	Váh	Jablunka	Čachtice	6470	163,00	651,03	8,75	0,88	170,24	182	956	364	Myjava	11806	
19	Nitra	Nitra	Nedožery	6640	181,28	894,42	7,56	2,07	360,18	289	1184	966	Prievidza	11867	
20	Nitra	Handlovka	Handlová	6650	38,82	944,74	6,49	0,55	442,74	384	959	612	Prievidza	11867	
21	Nitra	Nitra	Chalmová	6570	598,14	830,35	7,81	5,94	313,34	213	1344	503	Prievidza	11867	
22	Nitra	Nitra	Liesňany	6820	136,57	929,17	6,81	1,88	433,22	355	1175	625	Prievidza	11867	
23	Nitra	Nitra	Chynorany	6640	1124,07	816,92	8,00	9,61	269,69	174	1344	482	Prievidza	11867	
24	Nitra	Bebrava	Biskupce	6690	309,39	729,95	8,56	1,93	196,65	194	1032	393	Prievidza	11867	
25	Nitra	Bebrava	Nadlice	6710	589,19	721,66	8,51	3,32	177,47	174	1029	366	Prievidza	11867	
26	Nitra	Nitra	Nitrianská Streda	6730	2080,54	767,04	8,32	14,46	219,22	160	1344	417	Prievidza	11867	
27	Nitra	Žiava	Vieska nad Žitavou	6820	289,51	730,80	8,85	1,58	171,97	157	889	394	Nitra	11848	
28	Hron	Hron	Brezno	7015	578,30	884,36	4,96	7,36	401,40	490	1943	912	Telgárt	11938	
29	Hron	Hron	Banská Bystrica	7160	1767,40	880,20	5,95	25,10	447,89	332	2024	841	Telgárt	11938	
30	Hron	Hron	Brehy	7290	3696,13	833,57	6,95	45,22	385,86	193	2030	684	Slac	11903	
31	Ipeľ	Ipeľ	Hollá	7440	674,64	641,74	8,86	2,84	132,92	173	1110	373	Boľkovec	11927	
32	Ipeľ	Liava	Piáňkovec	7600	214,84	681,71	8,57	0,96	141,54	144	775	429	Víglaš - Pstruša	11904	
33	Slná	Dobšinský potok	Dobšina	7660	36,86	669,01	6,69	0,44	380,66	448	1343	797	Telgárt	11938	
34	Slná	Slná	Lenartovce	7820	1815,77	680,75	7,83	13,65	237,14	150	1477	497	Ratková	11941	
35	Slná	Slná	Lehota nad Rimavicou	7860	148,38	740,31	7,58	1,41	299,19	266	1154	655	Ratková	11941	
36	Poprad	Poprad	Chmelnica	8320	1267,24	813,42	5,44	15,15	377,00	509	2657	874	Poprad	11934	
37	Hornád	Hnilec	Stratená	8630	67,50	866,47	4,56	1,07	497,96	789	1938	1060	Telgárt	11938	
38	Hornád	Sekčov	Prešov	8840	356,05	698,30	7,41	2,00	176,76	234	1047	426	Telgárt	11962	
39	Hornád	Tonyša	Košické Oľšany	8870	1296,77	715,04	7,10	7,82	190,11	187	1262	507	Bardejov	11962	
40	Boďog	Laborec	Koškovce	9120	429,21	817,07	7,38	4,85	356,59	187	877	434	Kamenica nad Cirochou	11993	
41	Boďog	Cirocha	Snina	9170	243,98	944,63	6,54	2,97	383,56	204	1148	492	Kamenica nad Cirochou	11993	
42	Boďog	Topľa	Hanušovce nad Topľou	9500	1047,99	711,62	7,33	8,21	247,07	158	1133	434	Bardejov	11962	
43	Boďog	Oľka	Jasenovce	9620	177,82	744,23	7,97	1,26	223,13	140	554	306	Čakov	11966	
44	Boďog	Ondava	Horovce	9650	2884,15	711,49	7,84	20,72	226,53	101	1132	366	Čakov	11966	

Na charakterizovanie hydrologickej bilancie v povodiach sme použili priemerné mesačné klimatologické a hydrologické údaje, ktoré boli poskytnuté z databáz SHMÚ z obdobia 1961 –

2010. Z nich boli vytvorené rady priemerných ročných hodnôt v kalendárnom aj hydrologickom roku.

Ďalšie klimatologické a hydrologické dáta v dennom časovom kroku z databáz SHMÚ boli poskytnuté na kalibráciu modelu TUW a modelovanie odtoku za obdobie 1981 – 2010.



*Obr.3.1 Hranice a poloha záverečných profilov vybraných povodí*

Medzinárodný projekt Carpat Clim pokrýval osem stredoeurópskych a balkánskych krajín, menovite Maďarsko, Slovensko, Srbsko, Česko, Poľsko, Ukrajina, Rumunsko, a Chorvátsko [1]. Online databáza Carpat Clim bola vytvorená 12 partnerskými organizáciami a ponúka údaje zo 4 základných klimatologických prvkov a 74 odvodených parametrov denných, mesačných a ročných meteorologických prvkov [1]. Dostupné údaje sú spracované v gridovej sieti, ktorá obsahuje 10 000 bodov (Slovensku prislúchajú body od 524 do 2240). Dáta sú dostupné za obdobie od 1961 do 2010 [1].

V práci sú, ako kontrolné údaje pre hodnotenie územného výparu získaného pomocou hydrologickej bilancie, použité aj výsledky priamych výpočtov aktuálnej evapotranspirácie a potenciálnej evapotranspirácie v sieti klimatických staníc SHMÚ. Boli vybrané stanice, ktoré sú v susedstve pilotných povodí. Ich zoznam a spôsob priradenia k pilotným povodiam je v Tabuľke 3.1. Údaje boli vypracované komplexnou metódou Budyka, ktorá bola adaptovaná na slovenské podmienky Tomlainom [2] a pre SR sa považuje za štandardnú metódu [3].

#### 4 METODIKA PRÁCE A METÓDY SKÚMANIA

V prvej fáze dizertačnej práce boli sledované dáta z gridovej databázy Carpat Clim, a to mesačné úhrny atmosférických zrážok a priemerné mesačné teploty vzduchu pre územie pilotných povodí.

Pre výpočet mesačných úhrnov zrážok a priemernej mesačnej teploty vzduchu na povodie sme zvolili metódu Thiessenových polygónov. Priemerný zrážkový úhrn a priemerná teplota vzduchu na povodí sa vypočítala ako vážený priemer údajov z jednotlivých gridových bodov databázy. Za váhu bola zvolená veľkosť plochy územia, ktoré bolo priradené k príslušnému gridovému bodu v príslušnom polygóne v rámci povodia, prípadne z jeho bezprostredného okolia. Mesačné hodnoty boli prepočítané na priemerné ročné hodnoty za kalendárny rok ako ich vážený priemer.

V druhej fáze boli spracované prietokové údaje, ktoré boli poskytnuté z databázy SHMÚ. Údaje priemerného mesačného prietoku boli spracované z obdobia 1961 - 2010, následne boli prepočítané na priemerný ročný prietok za kalendárny rok ako vážený priemer počtu dní v danom mesiaci (do úvahy sme brali aj prestupné roky). Údaje priemerných hodnôt ročného prietoku  $Q$  [ $m^3/s$ ] boli prepočítané na odtokovú výšku  $v$  [mm] a z toho bol určený dlhodobý priemer. Prvky hydrologickej bilancie sa porovnávali v dvoch disjunktných obdobiach v štyridsiatich štyroch povodiach. Dáta z obdobia 1961 – 2010 boli rozdelené na dve 25 ročné obdobia, aby sme zachovali dostatočne dlhé obdobia na sledovanie hydrologickej bilancie za dlhé obdobie. Zároveň sme analyzovali trendy z celého obdobia z hľadiska možnej zmeny hydrologickej bilancie.

Následne boli porovnané výsledky výpočtov územného výparu z hydrologickej bilancie s ročnými úhrnmi aktuálnej evapotranspirácie  $v$  [mm] vypočítaných z dát z klimatických staníc SHMÚ. K sledovaným povodiam sme priradili klimatické stanice, z ktorých sme mali dostupné dáta a boli v bezprostrednej blízkosti povodia. Výsledky boli vypracované komplexnou metódou Budyka a Tomlaina, ktorá bola adaptovaná na slovenské podmienky a považuje sa za štandardnú metódu [3].

Pretože hydrologické časové rady vo všeobecnosti majú len výnimočne normálne rozdelenie, zameriame sa predovšetkým na neparametrické metódy. Neparametrické testy sa preferujú na zisťovanie trendov aj klimatických, meteorologických a hydrologických časových radoch, ktoré sú zvyčajne asymetrické a môžu byť kontaminované odľahlými hodnotami. Mann—Kendallov test trendov je jedným zo široko používaných neparametrických testov na detekciu významných

trendov v časových radoch. Parametrické testy trendov, hoci sú výkonnejšie, vyžadujú, aby bolo známe rozdelenie pravdepodobnosti údajov, resp. údaje boli normálne rozdelené. Výhodou je, že Mann-Kendallov test je funkciou poradia pozorovaní a nie ich skutočných hodnôt, teda nie je ovplyvnený skutočným rozdelením pravdepodobnosti údajov. Uvádza sa, že je aj menej citlivý na odľahlé hodnoty [4].

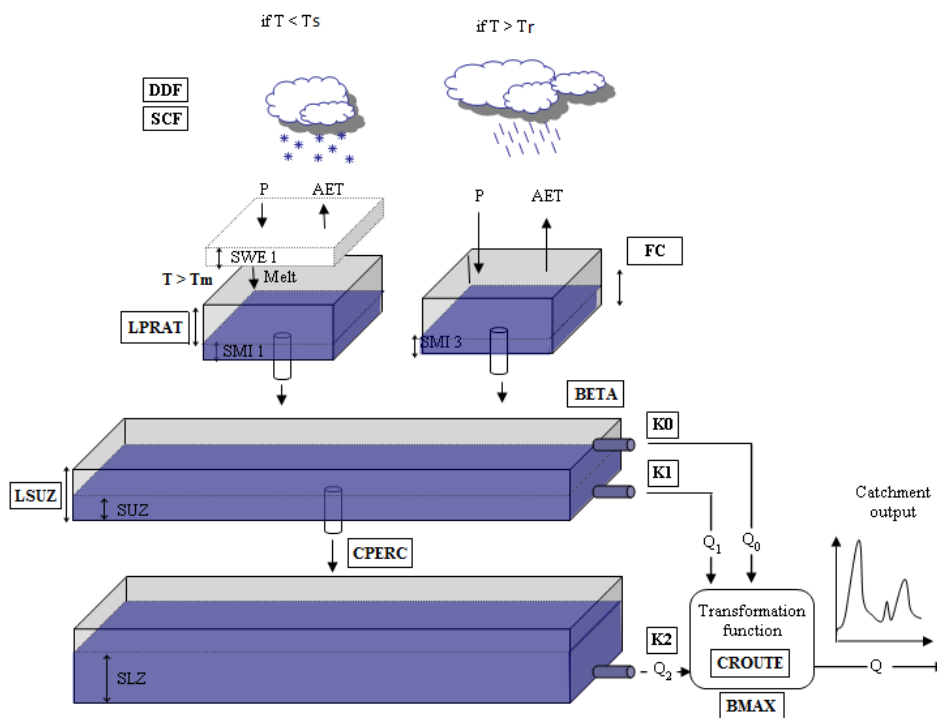
V ďalšej fáze dizertačnej práce sme preskúmali vývoj klímy v budúcnosti pomocou dvoch klimatických scenárov zmeny klímy, ktoré boli adaptované pre územie Slovenska. Výstupy klimatických modelov boli spracované na Katedre astronómie, fyziky Zeme a meteorológie (Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského) [3]. Pomocou regionálnych modelov KNMI a MPI a zrážkovo-odtokového modelu TUW sme získali prehľad možného budúceho vývoja klímy na ôsmych povodiach za obdobie od 1981 do 2100, ktoré boli rozdelené na štyri 30 ročné obdobia: 1981 – 2010 (baseline), 2011 – 2040, 2041 – 2070 a 2071 – 2100.

Pre hodnotenie zmien v hydrologickej bilancii podľa klimatických scenárov KNMI a MPI pomocou modelu TUW s denným časovým krokom sme využili výstup simulácií vykonaných v rámci viacerých výskumných projektov KVHK a spoločných prác KVHK a ÚH SAV. Výsledky, z ktorých vychádzame v tejto kapitole boli podrobne zhrnuté v publikácii [5]. Pre úplnosť tu len stručne uvedieme postupy, ktoré sa použili.

Na modelovanie odtoku zo zrážok bol v pilotných povodiach použitá verzia známeho zrážkovo-odtokového (z-o) modelu HBV [6], ktorý sa dá považovať za svetovo uznávaný etalón v triede koncepčných modelov. Detailnejší opis štruktúry modelu, ako aj rozličné príklady jeho aplikácii je možné nájsť v početných prácach [7] [8] [9]. V tejto štúdii sme použili jeho verziu, ktorá vznikla na Technickej univerzite vo Viedni. Je známa pod akronymom TUW („Technische Universität Wien“, [7], [10].

Tento koncepčný model s priestorovo sústredenou parametrizáciou modeluje Z – O vzťahy zvyčajne s denným krokom. Povodie reprezentuje pomocou viacerých vzájomne prepojených virtuálnych akumuláčnych nádrží, ktoré reprezentujú základné akumuláčne priestory v povodí. Schéma modelu [11] [12] je zobrazená na obr. 4.1.





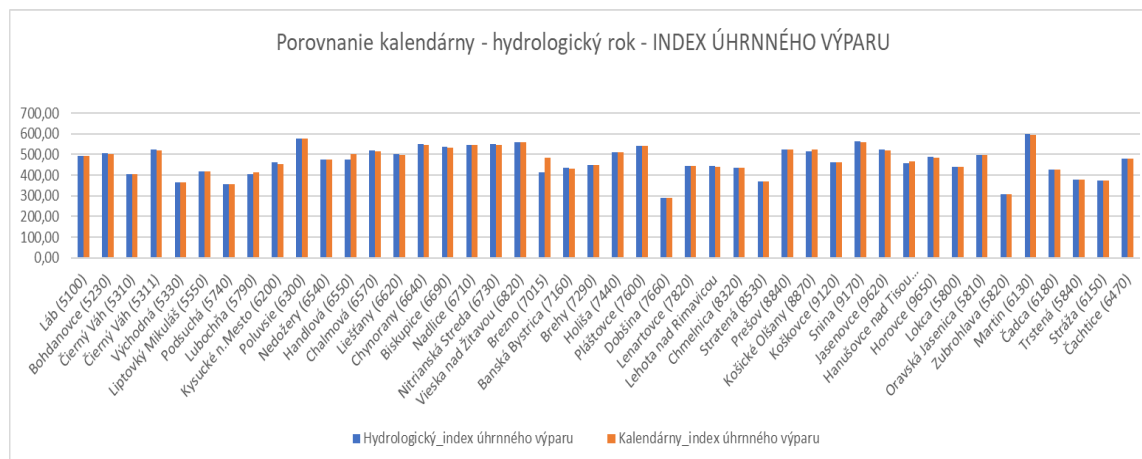
Obr.4.1. Vývojový diagram zrážkovo-odtokového modelu TUW. (napr.[11] [12])

Porovnanie vývoja hydrologickej bilancie v budúcich desaťročiach sme vykonali pre oba scenáre súčasne a samostatne pre jednotlivé pilotné povodia. Zároveň sme porovnávali zmeny dlhodobých priemerov hlavných prvkov hydrologickej bilancie medzi referenčným (baseline) obdobím 1981-2010 a obdobiami projekcie oboch scenárov. Spolu s hodnotami odtoku a úhrnného výparu sme vykonali aj hodnotenie smeru a významnosti trendov prvkov hydrologickej bilancie.

## 5 VÝSLEDKY A DISKUSIA

V prvej etape sme preto porovnali výsledky z dlhodobej hydrologickej bilancie zo všetkých dostupných dát za obdobie 1961 – 2010 pre 44 povodí. Najprv sme pre všetky skúmané povodia porovnali dlhodobé priemerné hodnoty pre úhrny zrážok na povodí, odtok z povodia, úhrnný územný výpar a teplota vzduchu v kalendárnom a v hydrologickom roku. Výsledky porovnania vyplynulo, že odchýlky medzi nimi sú minimálne. Pre účely tejto práce, kde sme chceli porovnať jednak trendy časového vývoja prvkov určujúcich hydrologickú bilanciu z databázy Carpat Clim, bolo vhodnejšie zvoliť kalendárny rok a využiť tak všetky dostupné informácie v dátach. Navyše nám spracovanie údajov za kalendárny rok umožňovalo vytvoriť dve rovnako dlhé

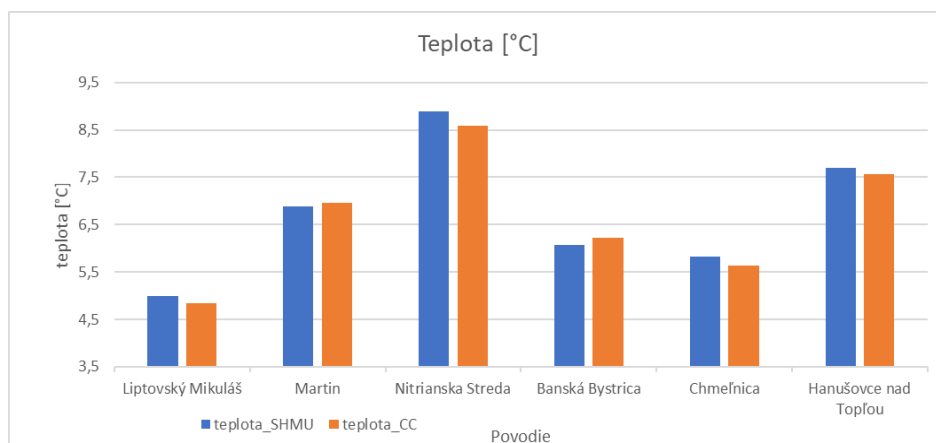
dvadsaťpäťročné obdobia. Rovnako to platí pre porovnanie úhrnného výparu za dve obdobia, kde nás primárne zaujímala rozdiel hodnôt a nie ich veľkosť.



Obr. Chyba! Dokument neobsahuje žiadny text so zadaným štýlom. *Porovnanie indexu úhrnného výparu v hydrologickom a kalendárnom roku pre všetky skúmané povodia*

V nedávnej minulosti bolo vytvorených a sprístupnených niekoľko regionálnych a globálnych gridových databáz úhrnov zrážok. Ich praktická použiteľnosť a regionálna platnosť na odhadovanie vstupov do hydrologickej bilancie sa musí stanoviť od prípadu k prípadu. Je to potrebné najmä pri hodnotení časového vývoja hydrologickej bilancie v horských oblastiach s cieľom zisťovať zmeny vo výstupných procesoch povodia, a najmä klimatického výparu z povodia. Problém reprezentatívnosti hodnôt z gridových bodov vystane v podobných podmienkach pri každej takejto databáze a jeho dôsledkom v zrážkovo-odtokovom modelovaní môže byť nekorektný odhad vstupných veličín a následne aj evapotranspirácie, lebo pri kalibrácii modelov sa zvyčajne preferuje kvalita simulovania odtoku.

V ďalšej časti dizertácie sme sa preto zamerali aj na hodnotenie použiteľnosti gridových klimatických údajov na tento účel, pričom sme ako príklad využili online databázu Carpat Clim. Keďže databáza pracuje s gridovou mriežkou s interpolovanými staničnými údajmi (a nie s reálne meranými hodnotami zrážok a teplôt vzduchu), tak pre dôveryhodnosť konečných výsledkov z analýz Carpat Climu sme vybrali 6 povodí pre porovnanie s meranými dátami z SHMÚ. Databáza Carpat Clim sa pre podobné komparatívne štúdie ukázala ako vhodná.

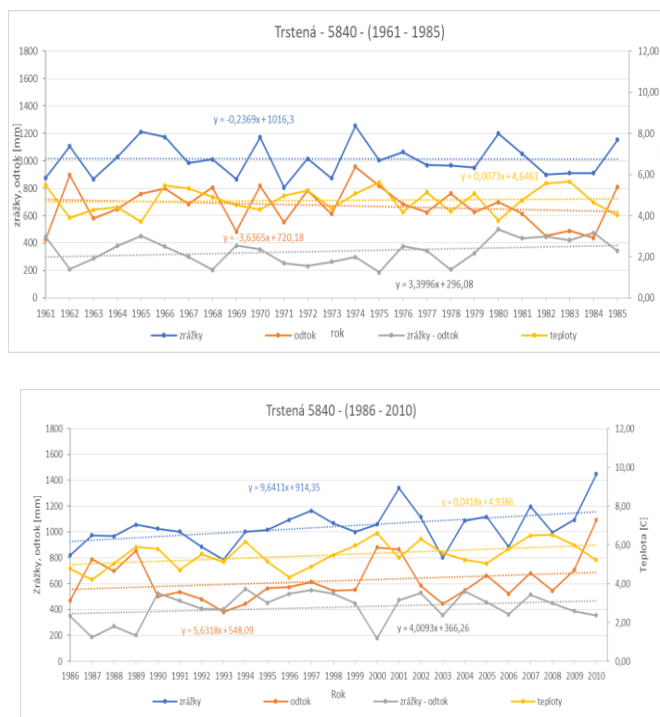


Obr. Chyba! Dokument neobsahuje žiadny text so zadaným štýlom.. Porovnanie teplôt vzduchu z databázy Carpat Clim a z údajov z SHMÚ

Tabuľka Chyba! Dokument neobsahuje žiadny text so zadaným štýlom. Porovnanie smeru a významnosti jednotlivých trendov z databázy CarpatClim a z údajov SHMÚ

Povodie	Zrážky [mm]		Teploty [°C]		Z - O	
	SHMU	CC	SHMU	CC	SHMU	CC
Liptovský Mikuláš	↑áno	↑áno	↑áno	↑áno	↑áno	↑áno
Martin	↑nie	↑nie	↑nie	↑áno	↑nie	↑áno
Nitrianska Streda	↑áno	↑nie	↑nie	↑áno	↑áno	↑nie
Banská Bystrica	↑áno	↑áno	↑áno	↑áno	↑áno	↑áno
Chmeľnica	↑áno	↑áno	↑áno	↑nie	↑áno	↑áno
Hanušovce nad Topľou	↑áno	↑áno	↑áno	↑áno	↑áno	↑áno

Keďže odhad územného výparu a prietoku boli rovnaké v oboch prípadoch (z reálnych meraných údajov z SHMÚ), vo výsledkoch úhrnného výparu sme mohli sledovať rozdiely spôsobené vplyvom odhadu úhrnov zrážok na povodie. Podotýkame, že keďže ide o úhrny zrážok na povodie, svoju rolu tu, okrem vplyvu voľby interpolačných metód a výberu interpolovaných staníc, zohráva aj rozmiestnenie gridov a zrážkomerných staníc voči povodiam. Dôležité je, že to priamo ukazovalo jeden druh neistôt spojených s určovaním územného výparu, ktorému nedá vyhnúť. V prihraničných regiónoch sa uvažovalo aj o sieťových bodoch z Českej republiky a Poľska. Takýto postup odporúčame použiť aj v podobných štúdiách. Ani ním sa však celkom nevyhneme problému nekorektného odhadu úhrnu zrážok na povodie. V prípade našej štúdie, ktorá sledovala mnoho povodí súčasne, sa k tomu pridružuje problém, že pri zovšeobecňovaní výsledkov nevychádzame z homogénneho súboru informácií a zároveň sa prejavujú aj miestne podmienky tvorby odtoku.



Obr. Chyba! Dokument neobsahuje žiadny text so zadaným štýlom. Časové rady hydrologických prvkov a teploty vzduchu v povodí Oravice v záverečnom profile Trstená

V dizertačnej práci sme potom vychádzali z gridových dát online databázy Carpat Clim, ktoré sú dostupné v obmedzenom rozsahu od roku 1961 do 2010. Keďže jeden z cieľov bolo hodnotiť vývoj prvkov hydrologickej bilancie a využiteľnosť gridových údajov pre túto úlohu, zvolili sme celý 50 ročný časový interval a zároveň aj jednotlivo dve 25 ročné obdobia získané jeho delením na dve polovice (1961 – 1985) a (1986 – 2010). Tým sme plnili podmienku dostatočne dlhého obdobia pre zanedbanie akumulácie pri určovaní hydrologickej bilancie za dlhé obdobia a získali dve disjunktné odlišné obdobia z hľadiska analýz možnej zmeny hydrologického režimu. Pritom bolo pre nás dôležité aj to, že druhé obdobia 1986 – 2010 spadá do obdobia ktoré sa považuje za teplejšie. Postupne sme teda porovnali trendy prvkov v každom období a každom povodí a porovnali sme ich. V prípade rozdielu hodnôt zrážok a odtoku používame spojenie index úhrnného výparu, lebo v ročnom kroku nie je vhodné zanedbať akumuláciu vodu v bilančnej rovnici. Na záver sme vyhodnotili trendy za celé obdobie spolu s ich významnosťou. Pre jednotlivé pod-obdobia sme významnosť, vzhľadom na relatívne krátke dĺžky, nehodnotili. Išlo nám skôr o zistenie, či sa relatívne teplejšie obdobia prejavilo na zmene ich smerovania. Výsledky jasne ukazujú, že druhé obdobia aj dát databázy Carpat Clim sa jednoznačne ukázalo ako teplejšie

(potvrďuje to výsledky iných autorov). To sa, prakticky bez ohľadu na to ako sa menili zrážky, prejavilo na raste indexu úhrnného výparu v každom povodí.

Akceptáciu trendov v radoch Z, O a Z-O sme testovali štandardným Mann-Kendallovým testom (napr. [4]), ktorého použiteľnosť sme podložili autokorelačnou analýzou ich radov. Pre autokoreláciu sme tiež použili údaje s kalendárneho roka, aby sa 50-ročné údaje pokryté Carpat Clim neskrátili z dôvodu iného začiatku hydrologického roka, ale pre samotnú koreláciu by použitie hydrologického roka zmenu zrejme neznamenal.

*Tabuľka Chyba! Dokument neobsahuje žiadny text so zadaným štýlom. Prvých 8 členov autokorelačnej funkcie hodnôt indexu úhrnného výparu Z-Q z obdobia 1961-2010. Farebne sú označené hodnoty, ktoré sa považujú za významné*

Vodomerná stanica	AR1	AR2	AR3	AR4	AR5	AR6	AR7	AR8	AR9
Bohdanovce	0.213	0.108	0.150	0.129	0.126	0.238	0.124	0.166	0.060
Čierny Váh	0.205	0.182	0.297	0.231	0.292	0.246	0.106	0.186	0.272
Podsuchá	0.108	0.124	0.040	0.068	0.221	0.095	-0.035	-0.062	0.026
Lokca	0.313	0.259	0.230	0.086	-0.003	-0.155	-0.173	-0.167	-0.198
Poluvsie	-0.072	0.071	0.019	0.061	0.220	0.030	0.026	-0.003	0.249
Biskupice	-0.128	0.093	0.046	0.254	0.185	0.002	0.116	-0.001	0.109
Vieska nad Žitavou	-0.013	0.157	0.126	-0.028	0.159	0.051	-0.015	0.071	0.163
Plastovce	-0.152	-0.073	0.302	-0.019	0.031	0.258	-0.088	-0.014	0.151
Lehota nad Rimavicou	0.081	0.121	0.257	0.193	0.184	0.276	0.020	0.088	0.295
Prešov	0.103	0.186	0.145	0.253	0.254	0.354	0.013	0.132	0.069
Snina	0.370	0.144	0.168	0.331	0.272	0.175	0.251	0.149	0.026

Pre potvrdenie zistení vyplýnutých z analýzy trendov a porovnania chodu priemerných ročných hodnôt prvkov hydrologickej bilancie na povodiach a priemerných ročných teplôt vzduchu sa porovnali v dvoch obdobiach, výsledky výpočtov územného výparu z hydrologickej bilancie porovnali s ročnými úhrnmi aktuálnej evapotranspirácie v [mm] z klimatických staníc SHMÚ. K sledovaným povodiám sme priradili klimatické stanice, z ktorých sme mali dostupné dáta a boli v bezprostrednej blízkosti povodia. Výsledky boli vypracované komplexnou metódou Budyka a Tomlaina, ktorá bola adaptovaná na slovenské podmienky a považuje sa za štandardnú metódu. Nami spracované hodnoty boli výsledkom výpočtu aktuálneho výparu, ktoré boli spracované odborníkmi z Oddelenia meteorológie a klimatológie na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského na základe údajov SHMÚ. Porovnanie potvrdilo charakter zmien úhrnného výparu získaného hydrologickou bilanciou.

Podľa výsledkov môžeme konštatovať, že dáta o priemernej teplote vzduchu na povodiach z databázy Carpat Clim preukázali podľa očakávania vo všetkých sledovaných povodiach stúpajúci trend (pričom jeho významnosť už uvedených príčin nehodnotíme).

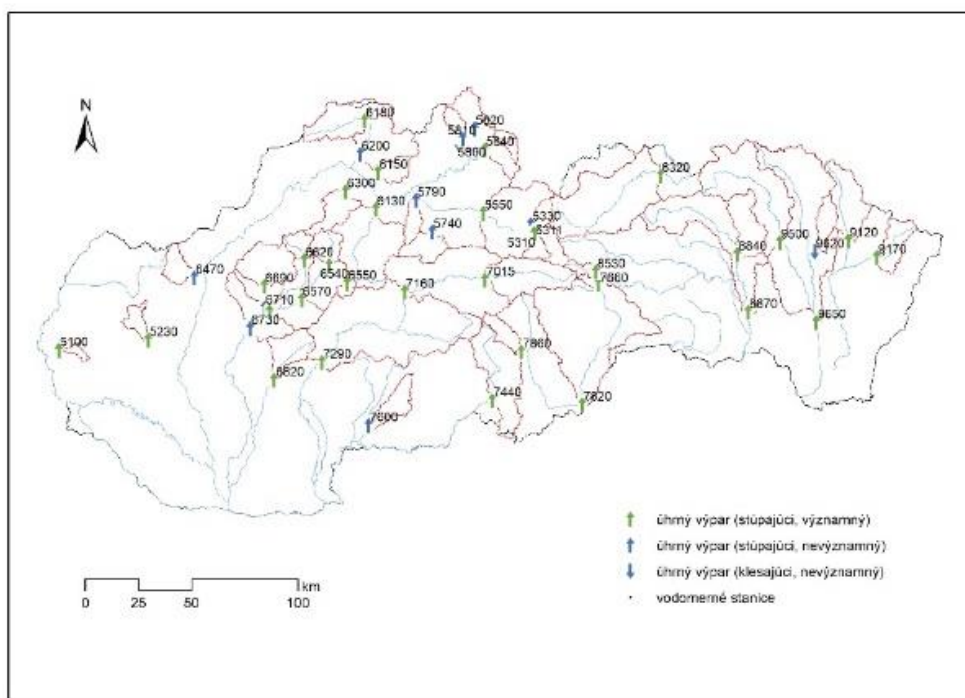
# STU

V prípade priemerných ročných úhrnoch zrážok na povodia trendy taktiež stúpali a, s výnimkou osem povodí na východe, boli všetky významné. Len osem trendov zo 44 bolo významných.

V prípade odtokovej výšky vykazovali údaje pre naše povodia prevažne klesajúci trend, výnimkou bolo jedenásť povodí so stúpajúcim trendom odtoku, ktoré sú lokalizované na severe a východe. Tridsaťtri trendov ale nebolo vyhodnotených ako významné trendy.

Index úhrnného výparu ako prvku hydrologickej bilancie preukázal vo väčšine stúpajúci smer trendu, okrem dvoch povodí, v ktorých sme indikovali klesajúci trend indexu úhrnného výparu. Je to v severnom povodí Bielej Oravy v Lokci (5800) a vo východne lokalizovanom povodí Oľky v Jasenovciach (9620). Iba v jedenástich povodiach sú trendy nevýznamné. Pre tridsaťsedem povodí platí, že smer trendov odtoku a indexu územného výparu je opačný.

Kľúčové zistenie je, že indikované trendy v priemerných údajoch na povodie pri zrážkach a odtoku sa vo väčšine sa nedajú považovať za významné, ale pri indexe úhrnného výparu už áno. Zjednodušene môžeme prijať (na základe toho, že rady sice vykazujú formálne stúpajúci trend, ale jeho významnosť sa nedá predpokladať) tézu, že zrážky sa mierne rastú resp. neklesajú. Rovnako môžeme konštatovať, že teplota vzduchu jednoznačne stúpa (bez ohľadu na to, že sa nevyjadrujeme k významnosti trendu). Ako dôsledok oboch konštatovaní môžeme uviesť stúpajúci trend indexu úhrnného výparu, lebo ten je vo väčšine prípadov významný a pripísať ho musíme vplyvu teploty vzduchu. Zmiešaný obraz zmien v odtoku môžeme pripísať kombinácii intenzity rastu zrážok a teploty vzduchu a lokálnych podmienok tvorby odtoku (napr. akumulačnej schopnosti a orientácii povodí).



Obr.5.4. Prítomnosť a významnosť lineárneho trendu a významnosť podľa Mann-Kendallovho testu – rady priemerných indexov úhrnného výparu z povodia.

Celkovo tak výsledky tejto práce podporujú zistenia v prácach [13], [14]. Niektoré zistené lokálne anomálie nebolo možné vysvetliť pomocou zdrojov dostupných pre túto štúdiu. Možno ich pripísať kombinovaným účinkom tvarov, aspektov, geológie, lokálnej distribúcie ukladania a umiestnení, hustoty a neistoty v interpolácii bodov siete Carpat Clim. Na tieto aspekty sa budú musieť zamerať budúce štúdie; dovtedy odporúčame starostlivé kontroly údajov, keď je potrebné použiť údaje Carpat Clim v povodiach s vyššími nadmorskými výškami, najmä pri modelovaní zrážok a odtoku s krátkymi časovými krokmi. Je zrejmé, že pri hromadnom porovnaní hydrologickej bilancie a jej zmien v desiatkach povodí nie je možné detegovať a vysvetliť miestne vplyvy a odlíšiť ich od systematických neistôt, ktoré sú obsiahnuté v podkladových údajoch. Na druhej strane podrobnejší pohľad uvedený v diskusii k výsledkom nepoprel všeobecné tendencie, ktoré zaznačilo hromadné spracovanie hydrologickej bilancie.

Vo všeobecnosti bola preukázaná použiteľnosť a užitočnosť gridových údajov z databázy Carpat Clim (a jej podobných) pre využitie v hydrologickej bilancii. Avšak potrebné budú ďalšie kontroly na potvrdenie všeobecnej použiteľnosti pre celé Slovensko, najmä v horských povodiach vo vyšších nadmorských výškach. Jednou z možností je posúdiť trendy v zložkách bilancie na

základe odhadu zrážok v povodí z údajov meteorologickej stanice s použitím rôznych metód. Takáto kontrola (a samozrejme ďalšie) by bola potrebná na definovanie kritických oblastí pre použitie gridových údajov, napr. pre potrebu stochastického modelovania zrážok, modelovania odtoku zo zrážok, ktorých uvedené závery sa netýkajú.

Hlavným záverom diskusie a výsledkov z tejto časti dizertácie týkajúceho sa manažmentu vodných zdrojov je, že hydrologická bilancia sa zmenila smerom k zvýšeniu skutočnej evapotranspirácie povodí a k zníženiu odtoku z nich. Vo vyšších polohách (cca nad 800 m n. m.) však môžu pôsobiť lokálne faktory tvorby odtoku, najmä poloha a orientácia povodí, čím sa čiastočne maskujú očakávané všeobecné tendencie v danej nadmorskej výške. Tieto faktory môžu znížiť alebo zintenzívniť zmeny v odtoku a skutočnej evapotranspirácie v povodiach v podobných nadmorských výškach. Na druhej strane v nižších polohách, kde je tvorba odtoku menej intenzívna, je rozhodujúci vplyv klimatických faktorov.

V druhú časť dizertácie sme sa dedikovali odhadu hydrologickej bilancii tohto storočia do roku 2100. Venovali sme sa v štúdiu zmien odtoku ôsmich pilotných povodí podľa dvoch scenárov zmeny klímy v dennom časovom kroku. Pri modelovaní odtoku sme prevzali publikované známe metodické postupy a údaje, ktoré vznikli v spolupráci Katedry vodného hospodárstva krajiny SvF a Výskumnej základne pre horskú hydrologiu v Liptovskom Mikuláši ÚH SAV, v.v.i.. Opierali sme sa pritom aj o výsledky z PhD dizertácie [11] a výsledky publikované v prácach [5],[9].

Zanalyzovali sme vývoj dlhodobej hydrologickej bilancie podľa klimatických scenárov KNMI a MPI a jeden emisný scenár pre štyri obdobia do roku 2100 a tiež zmeny vo vnútro-ročnom chode prvkov hydrologickej bilancie. Výstupy klimatických modelov boli spracované na Katedre astronómie, fyziky Zeme a meteorológie (Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského). K dispozícii sme mali hydrologické a klimatické údaje (atmosférické zrážky [mm], teplota vzduchu [°C] a simulovaný odtok [mm]) za obdobie od 1981 do 2100.

Cieľom prác v tejto kapitole nebolo vypracovať nové modelovacie postupy pre hodnotenie vplyvu zmeny klímy na hydrologický režim, ale pomocou simulovaných časových radov získaných takými parametrami zrážkovo-odtokového modelu TUW, ktoré sa dajú považovať za reprezentatívne pre blízku budúcnosť, získať nové vedomosti o možných dopadoch zmeny klímy na hydrologickú bilanciu. Úlohu hodnotiť vplyv zmeny klímy pomocou klimatických scenárov MPI



a KNMI na hydrologickú bilanciu v blízkej budúcnosti sme, vzhľadom na jej rozsah, riešili na podmnožine povodí používaných v prvej časti tejto práce.

Časové rady simulovaných denných prietokov pre predikciu zmien hydrologickej bilancie pre budúcnosť sme získali na šiestich vybraných povodiach Slovenska: Liptovský Mikuláš (5550), Martin (6130), Nitrianska Streda (6730), Banská Bystrica (7160), Chmeľnica (8320), Hanušovce nad Topľou (9500). Spracované výstupné rady prietokov z modelu TUW sú totožné s výstupmi, ktoré boli publikované v práci [5].



*Obr. Chyba! Dokument neobsahuje žiadny text so zadaným štýlom. Povodia vybrané pre impaktovú štúdiu vplyvu zmeny klímy na hydrologickú bilanciu*

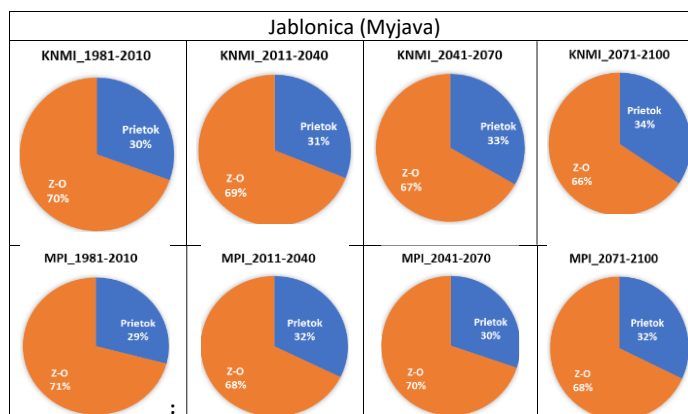
Z nich odvodené simulované hodnoty hydrologickej bilancie boli skúmané v štyroch obdobiach:

- prvé obdobie 1981 – 2010, ktoré bolo použité ako referenčné,
- druhé obdobie 2011 – 2040,
- tretie obdobie 2041 – 2070,
- štvrté obdobie 2071 – 2100.

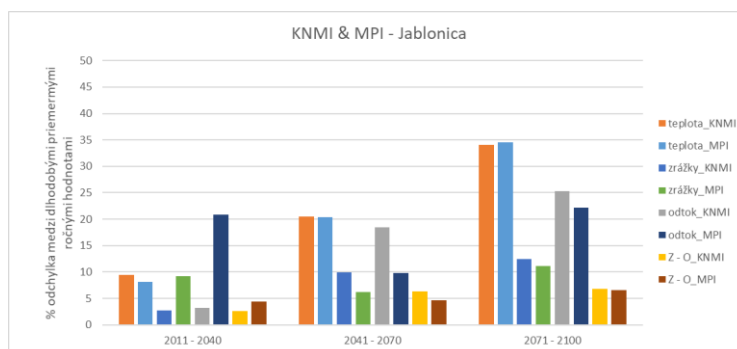
Pri interpretácii výsledkov tejto kapitoly treba mať na pamäti neistoty zviazané s celým metodickým postupom. Impaktové štúdie sú už zo svojej podstaty zaťažené kaskádou neistôt a ich vplyv sa prenáša z jedného kroku hodnotenia na ďalší. Neistoty sú vlastné emisným scenárom, klimatickým modelom, potom nasledujú neistoty vstupov a parametrov zrážkovo-odtokových modelov. Výsledky majú z tohto pohľadu niekoľko neistôt, ktoré sa však v rámci priestoru v dizertácii nedajú v celej šírke riešiť. Pri formulovaní metodiky riešenia sme preto uskutočnili niekoľko rozhodnutí, ktoré treba mať pri hodnotení výsledkov na pamäti. Ide najmä o nasledovné voľby:



- v spolupráci s odborníkmi odd. meteorológie a klimatológie FMFI UK sme vybrali klimatické modely a scenáre, ktoré najlepšie reprodujú klímu inštrumentálneho obdobia SR a osvedčili v rade impaktových štúdií,
- vybrali výstupy so zrážkovo-odtokového modelu TUW, s ktorým sú v regióne dobré a veľmi široké skúsenosti v štúdiách rôzneho typu,
- vybrali sme údaje z kalibrácie modelu z posledného teplejšieho obdobia predpokladajúc, že takáto kalibrácia bude vhodná pre teplejšiu budúcnosť, ktorú naše scenáre zmeny klímy predpokladajú.



Obr. Chyba! Dokument neobsahuje žiadny text so zadaným štýlom. Porovnanie vývoja hydrologickej bilancie v troch budúcich obdobiach voči baseline scenáru pre oba klimatické scenáre súčasne v povodí Myjava



Obr. Chyba! Dokument neobsahuje žiadny text so zadaným štýlom. Zmeny hodnôt dlhodobých priemerov hlavných prvkov hydrologickej bilancie medzi baseline obdobím 1980-2010 a tromi obdobiami projekcie oboch scenárov v povodí Myjava

Tabuľka Chyba! Dokument neobsahuje žiadny text so zadaným štýlom. Porovnanie smernice lineárneho trendu a jeho významnosti podľa Mann-Kendallovho testu pre prvky hydrologickej bilancie a teploty vzduchu v povodí Myjava

Jablonica	1981-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2100	
KNMI	nie ↑	nie ↓	nie ↑	nie ↑	zrážky [mm]
	nie ↓	áno ↑	áno ↑	áno ↑	teplota [°C]
	nie ↑	nie ↓	nie ↑	nie ↑	odtoková výška [mm]
	nie ↑	nie ↑	nie ↑	nie ↓	Z - O
MPI	nie ↑	nie ↓	áno ↑	nie ↑	zrážky [mm]
	nie ↓	nie ↑	nie ↑	nie ↑	teplota [°C]
	nie ↑	nie ↓	áno ↑	nie ↑	odtoková výška [mm]
	nie ↑	nie ↑	nie ↑	nie ↑	Z - O

Vzhľadom na prirodzené neistoty riešenia sme nepovažovali za vhodné podrobne opísať výstupy z projekcií pre jednotlivé povodia. Vhodnejšie bolo pokúsiť sa vyhodnotiť celkový obraz

možných zmien dlhodobej hydrologickej bilancie za jednotlivé obdobia, a smery vývoja medzi nimi a v ich vnútri.

Celkový obraz o dlhodobej hydrologickej bilancii sa dá, podľa podielu odtoku a územného výparu na zrážkach rozdeliť ich vertikálnej zonality, na dve priestorovo rozdelené skupiny povodí. Toto delenie sa javilo rovnaké v oboch scenároch. Povodia Myjavy, Nitry, Turca a Váhu vykazovali nárast odtoku a pokles územného výparu s nadmorskou výškou. Ide o rovnakú tendenciu, ktorú vykazovali povodia na západnej strane karpatského oblúka nameraných údajoch v [15]. Druhá skupina je tvorená povodiami Laborca, Tople, Hrona a Popradu, ktoré sú v strede a na východe SR. Vertikálna zonalita je zachovaná medzi východom a stredom, avšak vo vnútri oboch podskupín sa neprejavovala. Tieto prejavy zonality nie sú rovnako silno zjavné v meraných údajoch z referenčného obdobia, kde výšková zonalita (prakticky) bola prítomná (až na Topľu a len čiastočne Poprad).

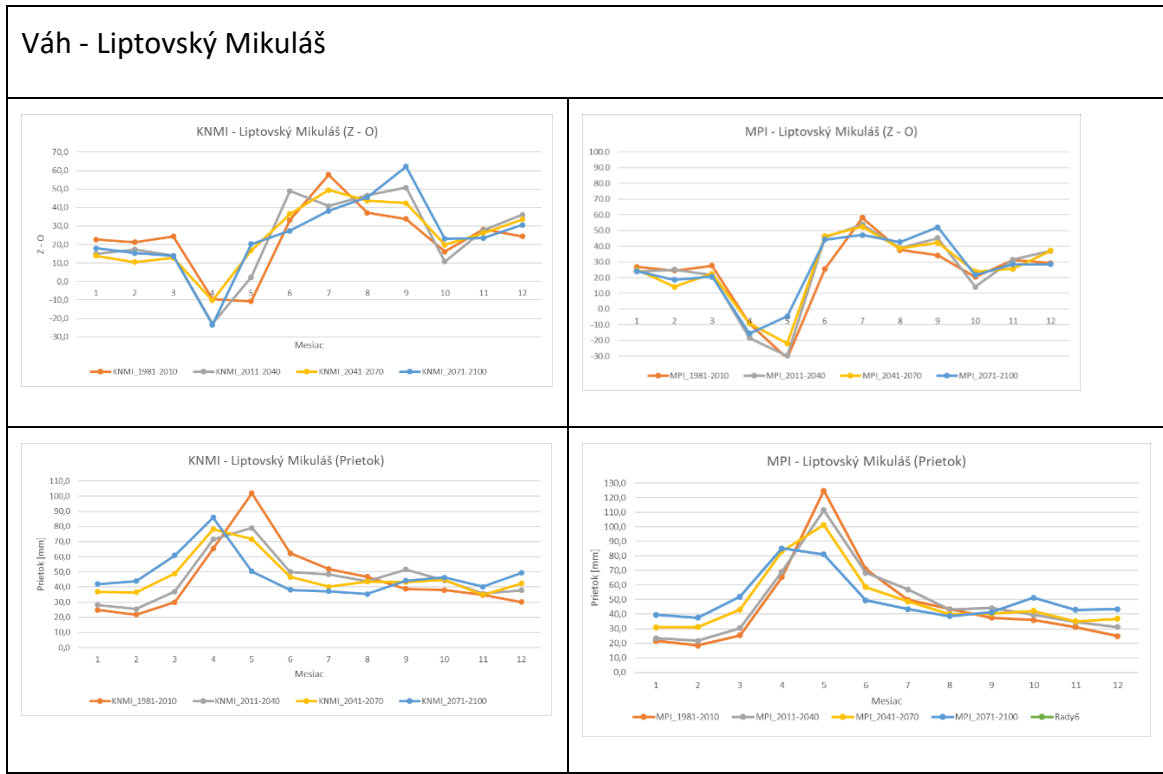
Podstatnejšie však je, že vývoj v čase je podľa oboch scenárov rovnaký a charakteristický tým, že tieto projekcie nepredpokladajú hydrologickej bilancii voči baseline scenáru výrazne zmeny. K tomu treba opäť zdôrazniť, že oba scenáre sú založené na tom istom GCM ECHAM5. Z porovnania zmien hodnôt dlhodobých priemerov hlavných prvkov hydrologickej bilancie medzi baseline obdobím 1980-2010 a tromi obdobiami projekcie oboch scenárov vo všetkých povodiach vyšlo, že sa líšia v projekcii zrážok a vo veľkosti rastu teploty vzduchu. Opäť je však podstatné, že oba scenáre pripúšťajú aj nárast zrážok. Rastúcou teplotou vzduchu, ktorá nie je spochybniteľná, rastie aj územný výpar, ale nárast zrážok umožňuje aj rast (dlhodobého) priemerného ročného odtoku. To vedie k tomu, že oba scenáre prakticky nepredpokladajú zmenu celkovej hydrologickej bilancie.

Ak hodnotíme trendy v jednotlivých povodiach, musíme mať na pamäti, že z dlhodobého hľadiska sa trendy z tridsaťročného obdobia nedajú považovať za smerodajné. Tu sme ich vyhodnotili najmä s tým, že sa pozrieme skôr na hodnotenie ich významnosti, než smeru. Celkovo teda indikujeme, že prevláda nárast hodnôt všetkých hodnotených prvkov hydrologickej bilancie v radoch ich priemerných ročných hodnôt.

Vyhodnotili sme samostatne aj zmeny vo vnútro-ročnom rozdelení odtoku a indexu územného výparu. Charakter vnútro-ročného rozdelenia odtoku sa v tejto štúdii neodlišuje od výsledkov podobných štúdií na území SR. Všeobecný obraz sa dá charakterizovať pomerne jednoducho. Na začiatku kalendárneho roka sa odtok voči baseline scenáru zvyšuje (prvé dva až

štyri mesiace). Podobný obraz sa vyskytuje ku konca roka, avšak zvyšovanie nie je tak výrazné (dva až tri mesiace) a odtok celkovo nižší. V zbytku roka sa dá očakávať pokles odtoku voči baseline scenáru. Rozdiel medzi zrážkami a odtokom vykazuje zrkadlový obraz kolísania. Aj týchto výsledkov vyplynulo celkovo, keď sa pozrieme na dlhodobú bilanciu, že tieto dva scenáre signalizujú nárast ako odtoku tak územného výparu cez všetky tri obdobia v budúcnosti. Ešte raz zdôrazňujeme, že to vedie k tomu, že oba scenáre prakticky nepredpokladajú zmenu celkovej hydrologickej bilancie.

V ďalšom sa pozrieme na neistoty, ktoré zaťažujú výroky o možných zmenách prvkov hydrologickej bilancie v našich pilotných povodiach v budúcom období. Spoľahlivý odhad hydrologických impaktov zmeny klímy musí byť založený na vysoko kvalitných meteorologických a hydrologických údajoch, klimatických scenároch zohľadňujúcich alternatívy socioekonomického rozvoja a jeho ich premenlivosti. Rovnako potrebujeme aj spoľahlivé modelovacie nástroje pre hodnotenie zmien a ich neistôt. Impaktové štúdie sú zo svojej podstaty zaťažené kaskádou neistôt, ktoré sú vlastné všetkým krokom hodnotenia vplyvu zmeny klímy na odtok pomocou hydrologického modelovania [16] a ich vplyv sa reťazí. Na počiatku sú neistoty vlastné klimatickým scenárom a ich downscalingu, potom nasledujú problémy spojené s určovaním vstupov a s parametrizáciou zrážkovo-odtokových modelov.



Obr. Chyba! Dokument neobsahuje žiadny text so zadaným štýlom. Porovnanie mesačného chodu dlhodobých priemerov odtoku a rozdielu úhrnu zrážok na povodí a odtoku z neho pre oba scenáre súčasne v povodí Váhu

Vo svete v regionálnych a lokálnych štúdiách v oblasti klimatických scenárov dominujú regionalizované výstupy z regionálnych klimatických modelov (RCM) a to v multi-scenárovej, multi-emisnej, multi-modelovej podobe, čo ústi v ansámblové projekcie možných zmien. Projekcie sú niekedy spájané so socioekonomickými predstavami o budúcom vývoji, čo ústi aj do zohľadňovania spätných väzieb zmien klímy a prostredia.

Predkladaná štúdia má z tohto pohľadu niekoľko podĺžností, ktoré sa však v rámci priestoru v dizertácii nedali komplexne (a ani uspokojivo) vyriešiť. V prvom rade sa v rámci takéhoto projektu nedá vyriešiť situácia s nedostatočným s etablovaním celoslovensky platných multi-emisných a multi-RCM klimatických scenárov v SR. Zúžili sme preto výber regionálnych klimatických modelov expertným spôsobom v spolupráci s odborníkmi odd. meteorológie a klimatológie FMFI UK a SHMÚ. A napokon sme vybrali dva modely a emisné scenáre SRES, ktoré na základe ich odporúčaní najlepšie reprodukovujú klímu inštrumentálneho obdobia Slovenska. Opierali sme sa aj o to, že tieto sa prakticky výlučne uplatňovali v nedávnej minulosti v impaktných štúdiách (napr. [17]). Tým sme ale nedokázali vyriešiť to, že sa u nás nedostatočne uplatňujú nové typy RCP emisných scenárov. Napokon sme preto prebrali už regionalizované

výstupy dvoch RCM pre náš región, len pre jeden scenár SRES reprezentujúci priemerné zmeny. Tým sme si vedome zúžili priestor na hodnotenie neistôt výstupov (to ale platí o väčšine importných štúdií z nedávnej minulosti v SR).

Neistoty spojené s modelovaním odtoku koncepčnými modelmi sú dávno známe a mnohokrát diskutované v literatúre [18]. Metodický pokrok smeruje k overovaniu a kvantifikovaniu neurčitosti zapríčinených štruktúrou a parametrizáciou modelov. Uplatňuje sa ako skvalitňovanie parametrizácie samotných modelov napr. cez viacrežimové modely (napr. [7], [11]) alebo multi-modelovací prístup. Otázky kalibrácie modelov na dátach s cieľom predpovedať odtok v budúcnosti a s tým spojený problém prenositeľnosti parametrov v čase sú tiež dôležité [5].

Tu sme sa takejto komplexnosti riešenia vyhli tým, že sme si zvolili predpoklad, že kalibrácia modelu v teplejšom období z nedávnej minulosti, ktoré by mohlo byť charakteristické pre klimatické podmienky v budúcnosti. Štúdia, z ktorej sme využili výsledky modelovania odtoku [5], podrobne analyzovala kalibráciu a krížovú verifikáciu modelu TUW na viacerých obdobiach a ukázala, že kalibrácia z posledného teplého obdobia nevykazovala prijateľné výsledky validácie v minulých menej teplých obdobiach. Podobný záver platil aj pre opačný postup. Preto sme potom nepriamo predpokladali, že takáto kalibrácia bude pre teplejšiu budúcnosť v našom prípade vhodná.

Už v práci [5] sa ukázali mierne rozdiely pri hodnotení zhody dlhodobých mesačných priemerných prietokov v simulácii pri niektorých povodiach. Pri hodnotení hydrologickej bilancie v našej práci sa potom ukázali aj nedostatky v kvalite simulácie hydrologickej bilancie baseline obdobia. Na obr. 5.8. je znázornené porovnanie podielov odtoku a úhrnného výparu na zrážkach pre pozorované údaje a baseline obdobie oboch RCM modelov pre dve skupiny povodí ležiacich pod a nad nadmorskou výškou 700 m.n.m. Túto hranicu sme zvolili, aby sme zohľadnili rozdielny charakter tuhých zrážok pri porovnávaní výstupov modelu TUW.

Ak si subjektívne zvolíme rozdiel päť percent z hodnoty dlhodobého priemeru simulovaného odtoku voči pozorovanému ako akceptovateľnú hranicu neistoty simulácie, tak vidíme, že sme prekročili túto hranicu v povodiach Myjavy, Nitra, Turca a Popradu, teda v polovičke pilotných povodí. Zastúpené sú povodia z oboch skupín. Príčiny môžu byť mnohoraké a pri každom pilotnom povodí iné, resp. v inej kombinácii príčin. Preto by bola ich identifikácia v rámci takejto hromadnej zložitej a časovo náročnej. Medzi príčiny môžeme radiť napríklad:

- špecifiká downscalingu scenárov do klimatických staníc,
- horizontálna (priestorová) a vertikálna reprezentatívnosť zrážkomerných staníc a jej vplyv na korektný odhad úhrnu zrážok na povodie pre potreby modelovania a bilancovania,
- nedostatky v štruktúre modelu TUW vo vzťahu k špecifikám tvorby odtoku v dotknutých povodiach,
- nevhodná parametrizácia niektorých procesov zapríčinená kalibráciou na teplom období, v dôsledku čoho sa niektoré hydrologické situácie neprejavili v plnej variabilite.

## 6 ZÁVERY

Potenciálne zmeny hydrologického režimu spôsobené meniacou sa klímou predstavujú jeden zo zdrojov neistoty v oblasti hospodárenia s vodnými zdrojmi. Na Slovensku sa môžu prejavíť zmenami výdatnosti povrchových aj podzemných vodných zdrojov. V budúcnosti sa očakáva, že signály meniacej sa klímy sa budú ešte silnejšie prejavovať, ale ich intenzita sa bude regionálne alebo sezónne líšiť. Zmeny zistené v nedávnej minulosti majú potenciál v prehľadnej podobe signalizovať nerovnovážne stavy v hydrologickom cykle a riziká vzniku krízových situácií v budúcnosti. Je teda zrejmé, že regionálny odhad hydrologickej bilancie územia v rôznych časových a priestorových mierkach nadobúda čoraz väčší význam. Vzťah hydrologickej bilancie povodia k lokálnej a regionálnej klíme poskytuje aj náhľad do komplexného systému procesov, ktoré pôsobia v priestore a čase pri pohybe vody v prírode cez pôdu, vegetáciu a atmosféru.

Jednou z možností, ako zisťovať a dokumentovať zmeny v hydrologickom režime je dlhodobé sledovanie hydrologickej bilancie. Od hydrológie sa preto očakáva, aby vyvíjala metódy na detekciu zmien v hydrologickej bilancii a poskytla obraz o prebiehajúcich zmenách v adekvátnych priestorových a časových mierkach. Zmeny v odtoku v dôsledku meniacej sa klímy sa z pohľadu hydrologickej bilancie povodí môžu prejavovať rozmanitým spôsobom. Prejav zmiern v dlhodobom režime odtoku nie sú zatiaľ jednoznačne ponímané v praxi, skôr sa vnímajú anomálie sezónnom chode a správaní sa extrémov prvkov hydrologickej bilancie. Sledovanie zmien v dlhodobom režime kľúčových prvkov hydrologickej bilancie v mierke povodí je preto aktuálnou potrebou. Cez ňu je možná aj nepriama detekcia zmien hydrologického režimu a v hydrologických prvkoch, keďže tieto sa v bilancii navzájom prelínajú.

Pri zostavení hydrologickej bilancie je kľúčové, v závislosti od veľkosti bilančnej jednotky, časového kroku jej výpočtu a dĺžky obdobia bilancovania, integrácia odpovedajúceho množstva dát o hydrologickom cykle do konzistentného súboru údajov. Tento súbor musí adekvátne



reprezentovať procesy hydrologického cyklu, ktoré je potrebné v danej bilancii zohľadniť. Pri interpretácii výsledkov je potrebné tiež identifikovať nedostatky v pozorovaniach jednotlivých komponentov súboru. Preto pre používanie hydrologickej bilancie ako metódu pre zmien hydrologického režimu v období meniacej sa klímy môžeme povedať, že je vhodné sa pokúsiť ju používať v mierkach povodí, s ročným časovým krokom a za dostatočne dlhé časové obdobie (rádovo desaťročia). Cieľom tejto práce preto bolo pri komparatívnom hodnotení zmien hydrologickej bilancie počas dlhého obdobia s ročným časovým krokom sledovať práve úhrny zrážok na povodie, odtok, územný výpar z povodia a s nimi spolu aj priemernú teplotu vzduchu na povodí.

Kľúčovým faktorom medzi prvkami hydrologickej bilancie je územný výpar, ktorý nie je priamo merateľný. Na odhad evapotranspirácie existujú síce rozmanité metódy, ale je zložité ich extrapolovať do mierok povodí. Rovnica hydrologickej bilancie nám umožňuje z úhrnu zrážok na povodie a z riečneho odtoku v záverečnom profile povodia (nepriame) určiť celkový výpar z povodia.

Fyzicko-geografické podmienky v povodí a klimatické pomery v rôznych priestorových a časových mierkach tvoria výslednicu komplexného systému procesov pôsobiacich na hydrologickú bilanciu. Ak sa sústredíme na odhad územného (celkového, klimatického) výparu, určujúce bude dostupnosť vody v povodí a energetická bilancia. Dostupnosť a zásoby vôd primárne závisia od zrážok, podmienok tvorby a veľkosti odtoku a akumuláčnej schopnosti povodia (fyzicko-geografických a hydrogeologických podmienok). Energetická bilancia sa zjednodušene dá reprezentovať teplotou vzduchu. Cieľom dizertačnej práce bola preto detekcia a modelovanie zmien v hydrometeorologických časových radoch v podmienkach klimatickej zmeny cez optiku hydrologickej bilancie povodí s dôrazom na zmeny v územnom výpare.

Pritom sme zdôraznili, že v rámci dlhodobej hydrologickej bilancie je v mierke povodia jediná spoľahlivo určovaná hodnota odtok (za predpokladu, že celý odtok preteká záverovým profilom toku), lebo úhrn zrážok spadnutých na povodie odhadujeme z (v priestore nie vždy reprezentatívne rozmiestnených) bodových meraní alebo z nich odvodených gridových údajov. Pre výpočet hydrologickej bilancie nemáme vždy ani pre stredné a veľké povodia (v priemere) dostatočne hustú sieť zrážkomerných staníc. Jedným z riešení problému reprezentatívnosti údajov sa ukazujú gridové databázy klimatických dát. Cieľom tejto práce bolo preto aj vo

vybraných povodiach testovať a porovnať bodové a gridové údaje pre určovanie hydrologickej bilancie za dlhšie obdobie v podmienkach meniacej sa klímy.

Z hľadiska hospodárenia s vodou tieto výsledky opäť upozorňujú na šancu zmeny sezónneho rozdelenia odtoku v roku. V hydrologickej bilancii s ročným krokom totiž presun zvýšeného odtoku do zimy a skorej jari javiaci sa v našich výsledkoch kompenzuje zníženie odtoku a zvýšenie potenciálneho výparu v lete. Zmeny dlhodobej bilancie medzi obdobiami a ani voči baseline tak nevychádzali ako výrazné. Skôr sa zdá, že celková dlhodobá bilancia sa má šancu zachovať na súčasnej úrovni. Presun vodnosti na jarné obdobie opäť nastoľuje otázku, ako akumulovať prebytky vody z jari v povodiach pre ich využitie v lete, kde oba scenáre indikujú pokles odtoku a vysoký potenciál výparu v dôsledku rastu teplôt vzduchu.

Takto sa javia projekcie oboch použitých scenárov, čo do istej miery zvyšuje hodnovernosť zistenia. Napriek tomu, že sa rozchádzajú v projekcii zrážok a teplôt vzduchu, ich výsledné pôsobenia na hydrologickú bilanciu je podobné. Tieto výsledky taktiež podopierajú vierohodnosť downscalingu a modelovania. Zároveň však jasne ukazujú, že tým, že spoločným menovateľom oboch scenárov je ten istý emisný scenár, bude potrebné zaviesť multi-scenárové hodnotenie obsahujúce obe strany extremity možného vývoja emisií.

Jav, že sa celková hydrologická bilancia nemusí výrazne meniť, sa menej často objavuje v diskusiách o dopadoch zmeny klímy na hydrologický režim u nás. Jeho potvrdenie alebo vyvarenia (resp. zrealnenie) multi-scenárovým a multi-modelelovým prístupom by bol preto viac než potrebný. Pre návrh adaptácie by bolo potrebné jednoznačne mať širší výber emisných a klimatických scenárov, a paralelných multi-modelových štúdií, aby sme sa vyhli jednosmernému uvažovaniu vedenému stále tým istým smerom. U nás takéto prístupy zatiaľ absentujú.

## 7 LITERATÚRA

- [1] SZALAI, S. – NEJEDLIK, P. – ŠTASTNÝ, P. – MIKULOVÁ, K. – SZENTIMREY, T. – BIHARI, Z. – LAKATOS, M.: Climate of the Carpathian Region, a project for a high resolution harmonized gridded database. 2012; *Forum Carpathicum 2012*, Stara Lesna, April, online: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/publications/>
- [2] TOMLAIN, J.: Evaporation from the soil surface and its distribution on the territory of Czechoslovakia. 1980; *Vodohospodársky časopis* Vol. XXVIII, No. 2, 170-205.
- [3] LAPIN, M. – BAŠTÁK, I. – GERA, M. – HRVOL', J. – KREMLER, M. – MELO, M.: New climate change scenarios for Slovakia based on global and regional general circulation models. *Acta Meteorol. Univ. Comen.* 2012, 37, 25–74.
- [4] ĎURIGOVÁ M.: Detekcia zmien hydrometeorologických časových radov na Slovensku v podmienkach klimatickej zmeny. 2020; Dizertačná práca, SvF-104305-42099, SvF
- [5] SLEZIAK, P. – VÝLETA, R. – HLAVČOVÁ, K. – DANÁČOVÁ, M. – ALEKSIĆ, M. – SZOLGAY, J. – KOHNOVÁ, S.: A Hydrological Modeling Approach for Assessing the Impacts of Climate Change on Runoff Regimes in Slovakia. *Water* 2021, 13, 3358. <https://doi.org/10.3390/w13233358>
- [6] BERGSTROM, S.: The HBV model. In: Singh, V. P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, 1995; *Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO*, 443–476.
- [7] PARAJKA, J. – MERZ, R. – BLÖSCHL, G.: Uncertainty and multiple objective calibration in regional water balance modelling: case study in 320 Austrian catchments. 2007; *Hydrological Processes*, 21, 435-446. <https://doi:10.1002/hyp.6253>.
- [8] CEOLA, S. – ARHEIMER, B. – BARATTI, E. – BLÖSCHL, G. – CAPELL, R. – CASTELLARIN, A. – FREER, J. – HAN, D. – HRACHOWITZ, M. – HUNDECHA, Y. – HUTTON, C. – LINDSTRÖM, G. – MONTANARI, A. – NIJZINK, R. – PARAJKA, J. – TOTH, E. – VIGLIONE, A. – WAGENER, T. : Virtual laboratories: new opportunities for collaborative water science, 2015; *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 2101–2117. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2101-2015>.
- [9] SLEZIAK, P., – SZOLGAY, J., – HLAVČOVÁ, K., – DUETHMANN, D., – PARAJKA, J., DANKO, M.: Factors controlling alterations in the performance of a runoff model in

- changing climate conditions. 2018; *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66, 381–392. <https://doi:10.2478/johh-2018-0031>.
- [10] VIGLIONE, A. – PARAJKA, J.: TUWmodel: Lumped/semi-distributed hydrological model for education purposes. 2020; *R package version 1.1-1*. <https://cran.r-project.org/web/packages/TUWmodel/index.html>.
- [11] SLEZIAK, P.: Modelovanie zrážkovo-odtokových procesov v podmienkach meniacich sa klimatických pomerov. 2017, *Dizertačná práca*, SvF-104305-65272, 189 s.
- [12] LUKÁČ, Z.: Úlohy vodárenských spoločností v období adaptácie na zmenu klímy. 2018; *Dizertačná práca*, SvF-104303-7904, 265 s.
- [13] FENDEKOVÁ, M. – GAUSTER, T. – LABUDOVÁ, L. – VRABLÍKOVÁ, D. – DANÁČOVÁ, Z. – FENDEK, M. – PEKÁROVÁ, P.: Analysing 21st century meteorological and hydrological drought events in Slovakia. 2018; *J. Hydrol. Hydromech.*, Vol. 66, No. 4, 2018, p. 393 – 403
- [14] GARAJ, M. – PEKÁROVÁ, P. – PEKÁR, J. – MIKLÁNEK P.: The Changes of Water Balance in the Eastern Slovakia. 2019; IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 362 012014
- [15] KESZELIOVÁ, A. – HLAVČOVÁ, – K. DANÁČOVÁ, – M. DANÁČOVÁ, Z. – SZOLGAY, J.: Detection of Changes in the Hydrological Balance in Seven River Basins Along the Western Carpathians in Slovakia. 2021; *Slovak Journal of Civil Engineering*, vol.29, no.4, 2021, pp.49-60. <https://doi.org/10.2478/sjce-2021-0027>
- [16] DANKERS, R. – KUNDZEWICZ, Z.W: Grappling with uncertainties in physical climate impact projections of water resources. *Climatic Change* 163, 1379–1397 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02858-4>
- [17] FENDEKOVÁ, M. – POÓROVÁ, J. – SLIVOVÁ, V., Eds.: Hydrologické sucho na Slovensku a prognóza jeho vývoja. 2017;1. vydanie. Bratislava, Univerzita Komenského, 2017. ISBN 978-80-223-4398-5, 300 s.
- [18] UHLENBROOK, S. – SEIBERT, J. – LEIBUNDGUT, Ch. – RODHE, A.: Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. 1999; *Hydrological Sciences Journal*, 44:5, 779-797, <https://doi.org/10.1080/02626669909492273>

### Zoznam publikačnej činnosti spojenej s dizertáciou

- KESZELIOVÁ, Anita. Porovnanie zmien územného výparu vo vybraných povodiach Slovenska. In *Meteorological Journal*. Roč. 23, č. 2 (2020), s. 103-112. ISSN 1335-339X. Kategória publikácie do 2021: ADF
- KESZELIOVÁ, Anita - HLAVČOVÁ, Kamila - DANÁČOVÁ, Michaela - DANÁČOVÁ, Zuzana - SZOLGAY, Ján. Detection of changes in the hydrological balance in seven river basins along the Western Carpathians in Slovakia. In *Slovak Journal of Civil Engineering*. Vol. 29, no. 4 (2021), s. 49-60. ISSN 1210-3896 (2021). Kategória publikácie do 2021: AND
- DANÁČOVÁ, Michaela - KESZELIOVÁ, Anita - SZOLGAY, Ján. Parametrization of a hydrological flood routing model KLN- Multi for rivers with variable travel-time of flood peaks. In *Transport of water, chemicals and energy in the soil-plant-atmosphere system in conditions of the climate variability [elektronický zdroj] : book of Abstracts and Posters. Via the WEB Portal, November, 11–13 2020*. 1. vyd. Bratislava : Institute of Hydrology of the Slovak Academy of Sciences, 2020, CD-ROM, s. 39. ISBN 978-80-89139-48-4. Kategória publikácie do 2021: AFH
- KESZELIOVÁ, Anita. K parametrizácii matematických modelov odtoku na základe stanovištných podmienok a ekologických indikátorov. In *Konferencia mladých výskumníkov - KOMVY 2017 [elektronický zdroj] : zborník prednášok. Chvojnica, SR, 20. - 22. 11. 2017*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017, CD-ROM, s. 56-62. ISBN 978-80-227-4749-3. Kategória publikácie do 2021: AFD
- KESZELIOVÁ, Anita. Hodnotenie kolísania prvkov hydrologickej bilancie v dôsledku zmeny klímy. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 28th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 24th 2018, Bratislava*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, CD-ROM, s. 464-469. ISBN 978-80-227-4864-3. Kategória publikácie do 2021: AFD
- KESZELIOVÁ, Anita. Porovnanie územného výparu vo vybraných povodiach Slovenska. In *Zborník súťažných prác mladých odborníkov 2019 [elektronický zdroj] : Bratislava, 14. novembra 2019*. 1. vyd. Bratislava : Slovenský hydrometeorologický ústav, 2019, CD-

ROM, [9] s. ISBN 978-80-99929-03-7.  
 Kategória publikácie do 2021: AFD

KESZELIOVÁ, Anita. Zmeny úhrnného výparu vo vybraných povodiach SR. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 29th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 16th 2019, Bratislava*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2019, CD-ROM, s. 503-508. ISBN 978-80-227-4972-5. Kategória publikácie do 2021: AFD

KESZELIOVÁ, Anita. Hodnotenie vplyvu spoľahlivosti vstupných údajov na výpočet územného výparu v rovnici hydrologickej bilancie. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 30th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 14th 2020, Bratislava, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2020, CD-ROM, s. 584-589. ISBN 978-80-227-5052-3. Kategória publikácie do 2021: AFD

KESZELIOVÁ, Anita. Porovnanie zmien územného výparu v hydrologickom a kalendárnom roku v povodiach západno-východného transektu v SR. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 31st Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 13th 2021, Bratislava, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2021, CD-ROM, s. 562-567. ISBN 978-80-227-5150-6. Kategória publikácie do 2021: AFD

RONČÁK, Peter - HLAVČOVÁ, Kamila - SZOLGAY, Ján - MALIARIKOVÁ, Marcela - NOSKO, Radovan - KESZELIOVÁ, Anita. Assessment of changes in forest composition in future decades in Slovakia and their impact on runoff processes. In *Geophysical Research Abstracts. Volume 20/2018 [elektronický zdroj] : the open-access abstracts of the EGU General Assemblies*. Göttingen : Copernicus Publications, 2018, online, [1] s. ISSN 1607-7962. Kategória publikácie do 2021: AFG