



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Miroslav Kandra

Autoreferát dizertačnej práce

**MODELOVANIE KVANTITATÍVNEJ VODOHOSPODÁRSKEJ
BILANCIE POVRCHOVÝCH VÔD V PODMIENKACH
NESTACIONARITY**

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 10.11.2023



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

Predkladateľ: Ing. Miroslav Kandra
Katedra vodného hospodárstva krajiny
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Roman Výleta, PhD.
Katedra vodného hospodárstva krajiny
Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 19.12.2023 **o 9:00 h na**

Stavebnej fakulte STU v Bratislave, Katedra vodného hospodárstva krajiny
Radlinského 11, blok C, 12. posch. 810 05 Bratislava 1

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

OBSAH

ÚVOD	3
1. TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE	4
2. METODICKÝ POSTUP A NÁVRH SIMULAČNÉHO MODELU.....	4
2.1. Aproximačno Redistribučný Bilančný (ARB) model.....	5
2.1.1. Snehový submodel	5
2.1.2. Aproximačný submodel.....	6
2.1.3. Redistribučný submodel	7
2.2. Návrh koncepcie a štruktúry modelovania čiastkových povodí.....	7
3. VÝSLEDKY PRÁCE	9
3.1. Zhodnotenie kvality simulácie snehového submodelu	11
3.2. Zhodnotenie kvality simulácie ARB modelu	13
3.3. Aplikácia metodického postupu na povodí	14
3.3.1. Charakteristika modelovaného povodia	14
3.3.2. Simulácia kritických situácií v disponibilných vodných zdrojoch.....	16
3.3.3. Výhľadová analýza vodného diela Veľké Kozmálovce.....	18
4. ZÁVERY PRE PRAX.....	21
5. VEDECKÝ PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE	22
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	23

ÚVOD

Komplexné modelovanie vodných zdrojov v krajine slúži a má zmysel ako nástroj najmä pri vodnom plánovaní. V rámci Slovenska sa modelovanie vodných zdrojov objavuje najmä lokálne, vo forme prípadových štúdií, pilotných a lokálnych modelov na riešenie individuálnych vodohospodárskych problémov. Modelovanie kvantity a kvality vodných zdrojov v krajine má zmysel, len pokiaľ existujú potenciálne problémy vo vodnom hospodárstve, na ktorých detekciu a kvantifikáciu je potrebný komplexný nástroj. Takéto potenciálne problémy sú prezentovateľné pomocou scenárov „čo ak“, z ktorých najzávažnejšie sú viac celoplošného, než lokálneho charakteru.

Tieto potenciálne problémy je potrebné analyzovať a kvantifikovať, aby bolo v prípade preukázania ich nezanedbateľného vplyvu na kvalitu vodných zdrojov možné nastavovať opatrenia v rámci vodného plánovania. Alternatívou pre prípadové štúdie, ktoré vyžadujú pri

zmene záujmovej lokality relatívne časovo náročné vytváranie nového modelu, je celoštátne modelovanie.

1. TÉZY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Na základe vyššie uvedeného je možné tézy práce zhrnúť nasledovne:

- vytvorenie metodického postupu integráciu súčasnej metodiky KVHB povrchových vôd SR v závislosti od funkcionality vybraného komplexného vodohospodárskeho simulačného modelu,
- vývoj štruktúry a zostavenie komplexného vodohospodárskeho modelu pre simuláciu retrospektívneho odtoku, uspokojeného na konkrétne požiadavky modelovania KVHB povrchových vôd,
- testovanie a analýza kvality simulácie odtoku a jeho distribúcie do uzáverových profilov mikropovodí,
- návrh koncepcie a štruktúry modelovania čiastkových povodí na základe dostupných vodomerných staníc, s ohľadom na celistvé hodnotenie vodných zdrojov na Slovensku,
- simulácia kritických situácií v disponibilných vodných zdrojoch a požiadavkách na vodu v čase aj v priestore vybranom povodí v mesačnom a týždňovom časovom kroku s ohľadom na podrobnejšie priestorové rozlíšenie a podrobnejšia analýza vzájomných vzťahov jednotlivých vodohospodárskych a hydrologických prvkov bilancie,
- výhľadová analýza zabezpečenia významného odberu vody na pilotnom povodí ohrozeného zvyšujúcimi sa nárokmi na potrebu vody.

2. METODICKÝ POSTUP A NÁVRH SIMULAČNÉHO MODELU

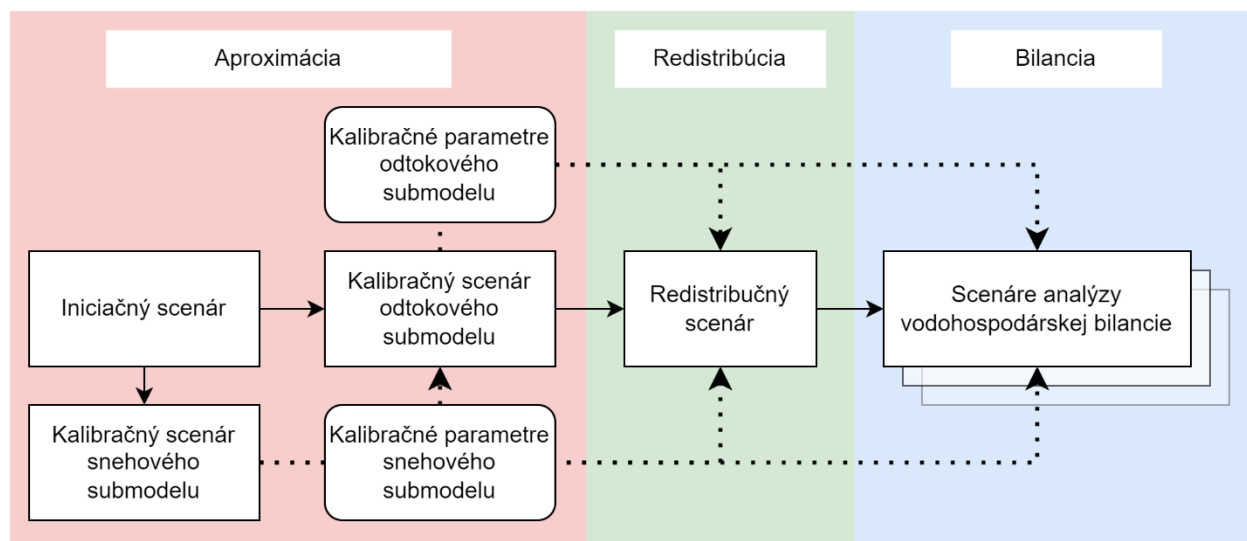
Pre modelovanie bol vybraný model WEAP vzhľadom na predchádzajúce skúsenosti s týmto modelom a funkciami vhodnými pre vývoj a implementáciu externých metódik.

V prípade distribúcie odtoku bola otázka metodiky najproblematickejšia, keďže ideou bolo kvantifikovať vodohospodársku bilanciu aj mimo bilančných profilov VHB alebo prípadne profilov vodomerných staníc. Bolo preto potrebné implementovať metodiku s dobrou rovnováhou medzi potrebnými vstupnými údajmi, náročnosťou na výpočet a výslednou kvalitou simulovaného odtoku. Výhodou retrospektívneho modelovania je vedomosť o kvantite odtoku v jednotlivých profiloch vodomerných staníc, čo je využiteľné pre spresnenie simulácie odtoku mimo týchto profilov. Aby to ale mohlo byť možné, je najskôr potrebné pomocou zrážkovo-odtokového modelu načrtnúť odtokové pomery, ktoré je až následné na základe meraných prietokov možné redistribuovať. Keďže k existencii takejto metodiky sa nebolo možné dopátrať, musela byť

vytvorená od počiatku, a to vytvorením Aproximačno Redistribučného Bilančného modelu (ARB model) spolu so snehovým submodelom.

2.1. Aproximačno Redistribučný Bilančný (ARB) model

Štruktúra ARB modelu bola vytvorená s ohľadom na schopnosť modelovacieho softvéru WEAP užívateľom vytvorené vlastnosti prvkov modelu definovať kombináciou funkcií, vstupných údajov a závislostí, a je teda do značnej miery naviazaný na softvér WEAP.



Obr. 2.1 Vetvenie scenárov ARB modelu.

2.1.1. Snehový submodel

Implementácia snehového submodelu má na Slovensku zmysel len v určitých prípadoch, a to vzhľadom na skutočnosť, že SHMÚ od roku 2013 spracováva v rastrovej forme týždenné údaje o vodnej hodnote snehu. Cieľom bolo vyvinúť nový koncepčný snehový submodel, otestovať ho na vybraných meteorologických staniách na Slovensku a začleniť ho ako submodel do modelu ARB v pilotnom povodí. Na porovnanie simulácie snehového režimu bol použitý snehový submodel, ktorý je súčasťou HBV modelu.

Z hľadiska zrážkovo-odtokového modelu je potrebný výpočet zmeny ekvivalentu snehovej vody z jedného časového kroku do druhého na definovanie jeho vplyvu na vzťah medzi zrážkami a odtokom (Holko a kol., 2021). Nový snehový submodel bol postavený na vzťahu:

$$SWB = SWE_{i-1} - SWE_i \quad (2.1)$$

kde SWB – vodná bilancia snehovej pokrývky [mm], SWE_{i-1} – vodná hodnota snehu v časovom kroku $i-1$ [mm], SWE_i – vodná hodnota snehu v časovom kroku i .

Štruktúra submodelu snehu bola skonštruovaná tak, aby lepšie odrážala zmeny na konci časového kroku. Nový submodel pozostáva z 5 premenných vypočítaných s 5 kalibračnými parametrami, zhrnutými v tab. 2.1.

Tab. 2.1 Premenné snehového submodelu a kalibračné parametre (T_{Csw} - koeficient prahovej hodnoty snehového režimu, X_{Csw} - indexová hodnota, C_{sw} - koeficient tvorby snehu, C_{sp} - koeficient zachovania snehu, SWE - ekvivalent snehovej vody, C_T , C_x , C_{Cx} , C_{Cy} , C_{spx} - kalibračné parametre, T - priemerná teplota vzduchu, T_{end} - priemerná teplota vzduchu na konci časového kroku, P - celkové zrážky).

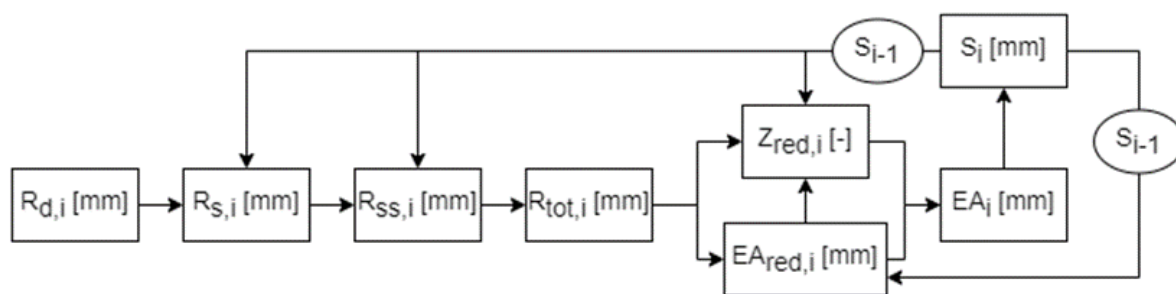
Výstupné premenné	Kalibračné parametre	Vstupné dáta	Vstupné premenné
T_{Csw}	C_T	T , T_{end}	-
X_{Csw}	C_x	T , T_{end}	-
C_{sw}	C_{Cx} C_{Cy}	T , T_{end}	X_{Csw}
C_{sp}	C_{spx}	-	C_{sw} SWE
SWE	-	P	C_{sw} T_{Csw}

Výpočet SWE sa skladá z ekvivalentu snehovej vody z predchádzajúceho časového kroku, ktorý sa vynásobí koeficientom zachovania snehu; k tomu sa pripočítajú zrážky vynásobené koeficientom tvorby snehu.

2.1.2. Aproximačný submodel

Keďže aproximačný submodel plní v ARB modeli len úlohu načrtnúť odtokový režim, bolo možné ho postaviť na zjednodušených deterministických vzťahoch. Jednotlivé premenné boli definované podľa zjednodušeného predpokladu, že okrem atmosférických zložiek sú jednotlivé zložky hydrologického cyklu vzájomne prepojené a fungujú na princípe vodnej bilancie spôsobom, že klesajú/zvyšujú sa, aby sa stabilizovala vodná bilancia v povodí. Aproximačný submodel má 5 kalibračných parametrov, pričom každé subpovodie má svoj vlastný súbor parametrov kalibrovateľných na prietok vo vodomernom profile. Každá premenná v modeli je ovplyvnená najmenej dvoma ďalšími premennými alebo kalibračnými parametrami.

Na obr. 2.2 je zjednodušená forma (bez akýchkoľvek vstupných údajov) výpočtového cyklu premenných ovplyvňujúcich výpočet celkového odtoku. Samotné premenné nemajú za cieľ presne rozdeliť časti odtoku na jednotlivé zložky odtoku, ale slúžia v postupnom slede na približné množstvo vody, ktoré je k dispozícii na odtok z dostupných zdrojov. K priamemu odtoku dochádza len vtedy, ak atmosférické zdroje (P , SWB) prevažujú nad požiadavkami (PET).



Obr. 2.2 Zjednodušené poradie výpočtu premenných aproximačného submodelu ($R_{d,i}$ – priamy odtok, $R_{s,i}$ – povrchový odtok, $R_{ss,i}$ – podpovrchový odtok, $R_{tot,i}$ – celkový odtok, $EA_{red,i}$ – redukcia evapotranspirácie, $Z_{red,i}$ – relatívna hodnota redukovanej vodnej kapacity pôdy, EA_i – skutočná evapotranspirácia, S_i – vodná kapacita pôdy v časovom kroku i , S_{i-1} – vodná kapacita pôdy z časového kroku $i-1$).

2.1.3. Redistribučný submodel

Redistribučný submodel je reprezentovaný ako nadstavba scenáru aproximačného submodelu. Nevyžaduje žiadnu kalibráciu, ale vopred vypočítané premenné v dátovej štruktúre, ktoré sú potrebné pre submodel prerozdelenia, sú vypočítané pre každé mikropovodie a každé mikropovodie je závislé od súhrnných premenných všetkých mikropovodií v subpovodi, do ktorého patria. Vynútený prepočet jednej z týchto premenných v jednom mikropovodí používateľom vyžaduje, aby sa automaticky prepočítali všetky závislé premenné mikropovodií podriadených subpovodi, čím sa výrazne zvýši výpočtový čas potrebný na prepočet týchto premenných v dátovej štruktúre modelu WEAP, čo sťažuje ich efektívnu analýzu v reálnom čase. Na druhej strane, prepočet výsledkov nie je ovplyvnený, pretože všetky premenné v scenári sa aj tak prepočítajú počas procesu.

2.2. Návrh koncepcie a štruktúry modelovania čiastkových povodí

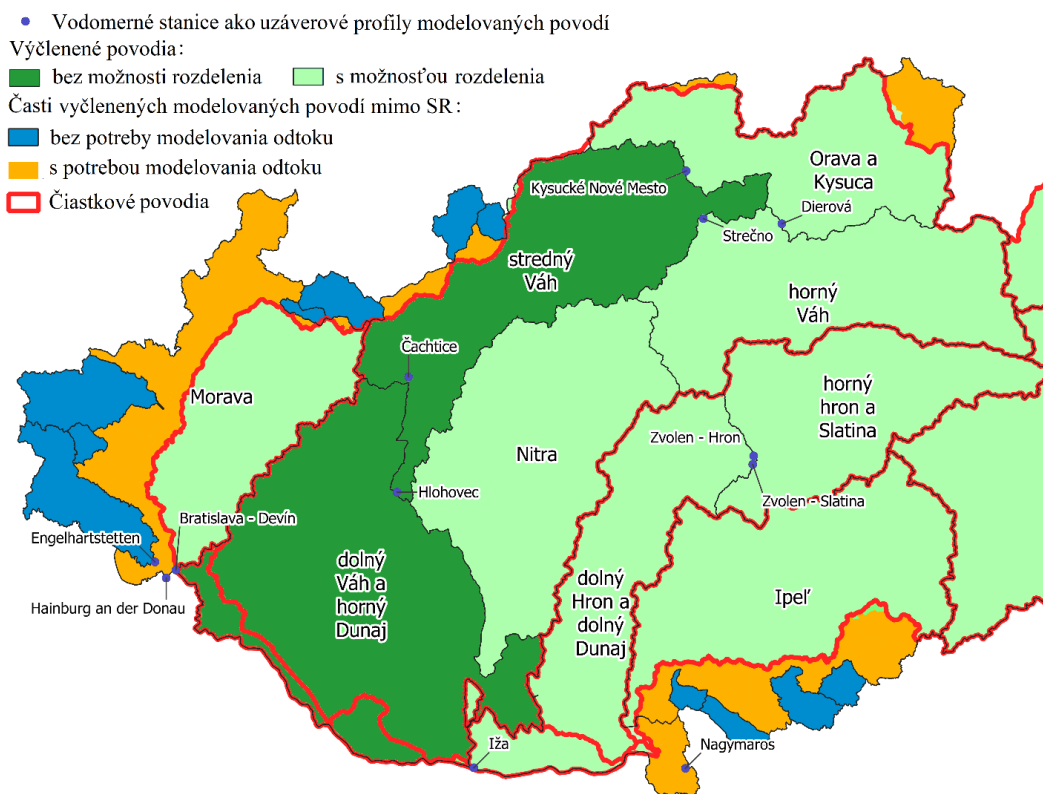
V počiatku celej práce bolo modelovanie cielené len na integráciu retrospektívnej VHB povrchových vôd, pričom jasne stanovené predpoklady a smerovanie neboli zadefinované. Predstava sústavy modelovaných povodí, ktorá by celistvo hodnotila stav vodných zdrojov na Slovensku má zmysel len v prípade, ak by model bol využívaný v širšom spektre čiastkových úloh v rámci jednotlivých inštitúcií, čím by sa zredukovalo množstvo duplicitnej práce a zároveň uľahčila komunikácia a zber obsiahleho množstva vstupných údajov.

Keďže modelované povodie ideálne vyžaduje ako uzáverový profil vodomernú stanicu, je potrebné aby sa rozdelenie územia na čiastkové povodia upravili s ohľadom na dostupné vodomerné stanice. V rámci niektorých čiastkových povodí je potrebné aby boli rozdelené na niekoľko modelovaných povodí, zatiaľ čo u iných je potrebné rozšírenie po vodomerné stanice mimo územia SR. Ako návrh boli vyčlenené jednotlivé modelované povodia na obr. 2.3 a 2.4.

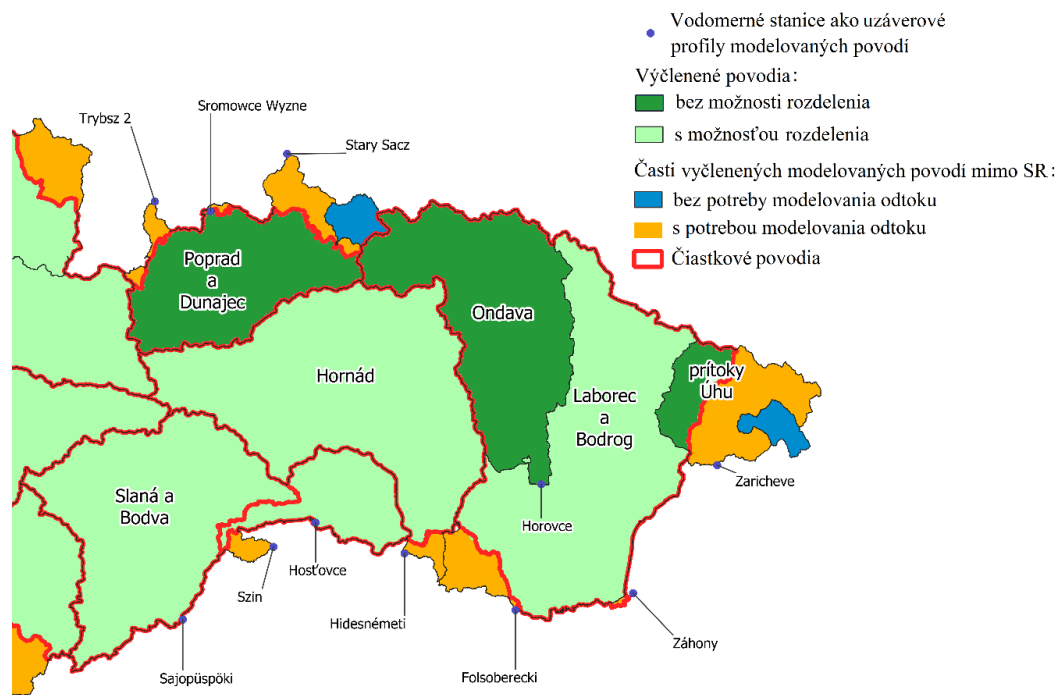
Rozčlenenie jednotlivých povodí je vypracované s ohľadom na rovnomerné rozdelenie plochy a pokrytie vodných útvarov, pričom v určitých prípadoch boli spojené dve menšie a samostatné povodia, napr. Bodva a Slaná; Orava a Kysuca.

Pri takomto členení je predpoklad, že v prípade, ak by boli vodné útvary kvôli strategickým profilom na tokoch rozčlenené, a to v priemere na 5 profilov na vodný útvar, namodelované povodia by boli dostatočne prehľadné a efektívne pre výpočet modelu. Časti bez potreby modelovania odtoku sú povodia zahraničných vodomerných staníc s celou plochou mimo územia SR. Časti s potrebou modelovania spadajú do subpovodia vodomerných staníc, ktorých časť sa nachádza aj na území SR.

Z hľadiska modelovania je pre tento účel potrebné jednotlivé modelované povodia rozšíriť o dané územia mimo SR. Plocha vyčlenených častí s potrebou modelovania odtoku je 4954 km² (10,1 % územia SR), no pri týchto územiach platí, že pre modelovanie nie je potrebné ich podrobnejšie členenie, tak ako je to na území SR. Zahnutím vodomerných staníc na prítokoch je možné predísť modelovaniu dodatočných 2545 km², čo predstavuje 5,2 % územia SR (nerátajúc prítoky Dunaj, Moravu, Dyje, Dunajec a Tisu).



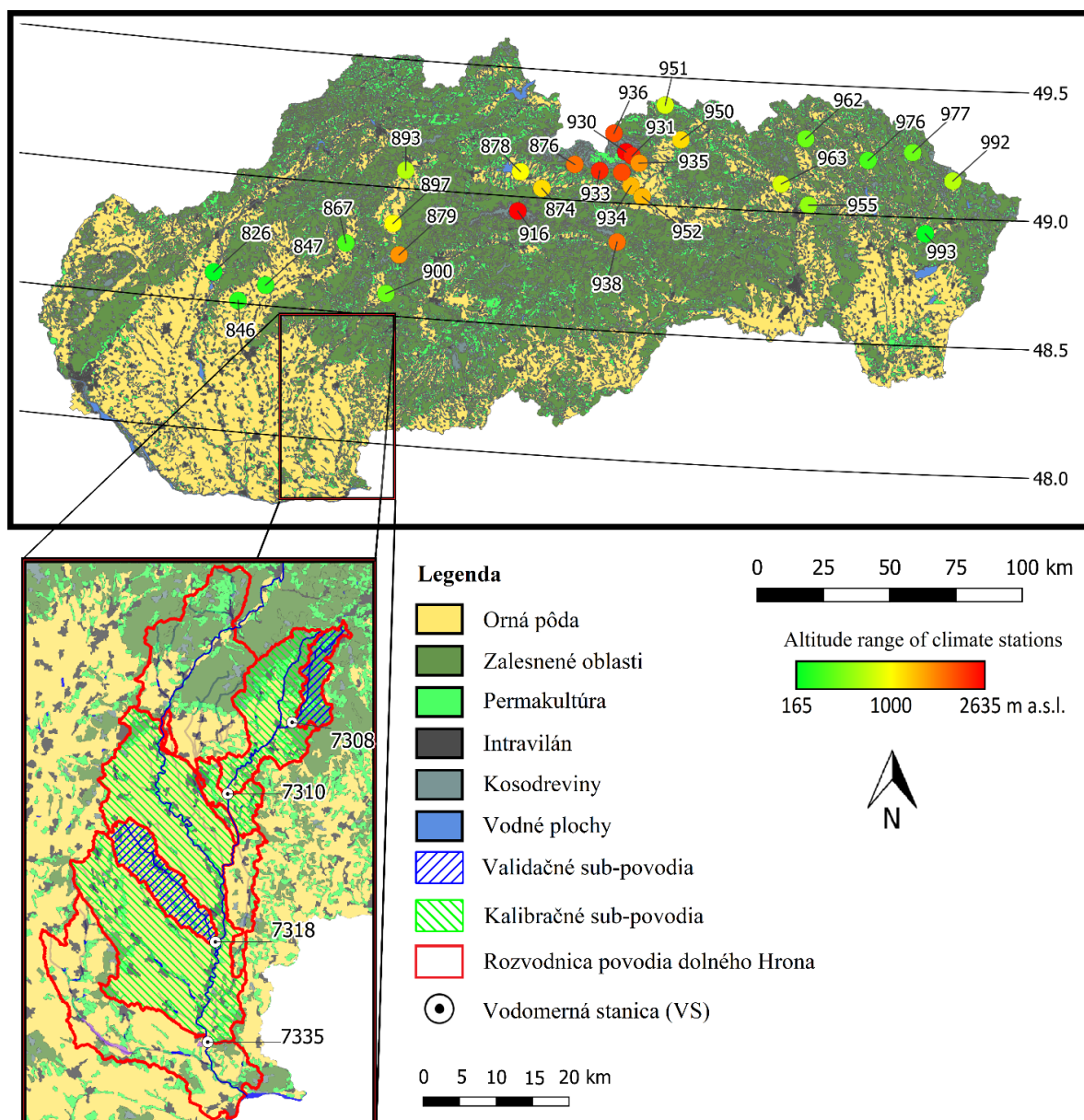
Obr. 2.3 Vyčlenenie modelovaných povodí na základe dostupných VS; západ SR.



Obr. 2.4 Vyčlenenie modelovaných povodí na základe dostupných VS; východ SR.

3. VÝSLEDKY PRÁCE

Výkonnosť snehového submodelu je porovnávaná v týždennom časovom kroku so snehovým submodelom modelu HBV modifikovaným metódou Valenta (2014) z denného na týždenný časový krok. Pre validáciu modelu ARB boli dve subpovodia vodomernej stanice (VS) modelované samostatne. Vstupné údaje, popísané v tab. 3.1 a 3.2, možno rozdeliť medzi subpovodia a mikropovodia.



Obr. 3.1 Lokalita 30 meteorologických staníc znázornených farebnými bodmi na základe rozsahu nadmorskej výšky a polohy dvoch kalibračných subpovodí s dvoma podriadenými validačnými subpovodiami v povodí dolného Hrona na Slovensku.

Tab. 3.1 Vstupné údaje pre výpočet premenných modelu ARB pre redistribučný submodel:

Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ), Slovenský vodohospodársky podnik (SVP).

Vstupné údaje	Predpočítané z	Zdroj	Meranie
Prietok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]		SHMÚ	Stanice
Výdatnosť prameňov [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]		SHMÚ	Stanice
Odbery povrchovej vody [m^3]		SHMÚ	Nahlasovanie
Vypúšťanie do toku [m^3]		SHMÚ	Nahlasovanie
Odvádzanie vody [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]		SHMÚ	Nahlasovanie
Manipulácia s objemom nádrží [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Nadmorská výška vodnej hladiny [m n.m.]	SVP	Monitorovanie
	Krivka zatopených objemov [-]		Dokumentácia

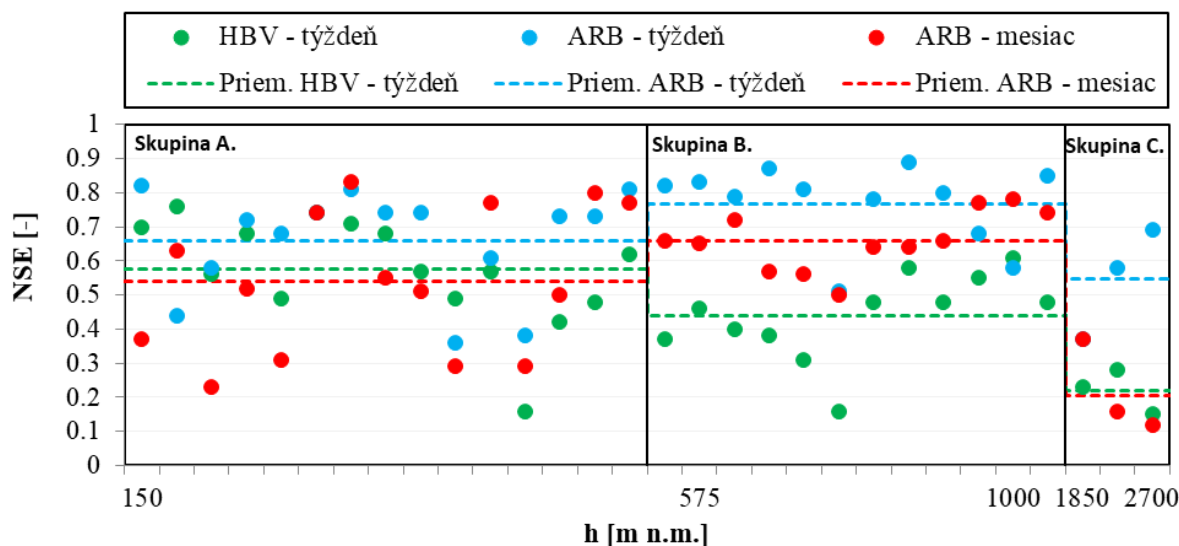
Tab. 3.2 Vstupné údaje pre výpočet premenných mikropovodia: Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ), Geodetický a kartografický ústav Bratislava (GKÚ), Štátny geologický ústav Dionýza Štúra (GÚDŠ), digitálny výškový model (DEM), letecké laserové skenovanie (ALS), S_d - potenciálna dĺžka slnečného žiarenia počas dňa [h], S_y - dĺžka priemerného ročného množstva potenciálneho slnečného žiarenia počas dňa [h].

Vstupné Dáta	Predpočítané z	Zdroj	Meranie	Aplikácia dát
Priemerná teplota v časovom kroku i [$^{\circ}\text{C}$]	Priemerná denná teplota	SHMÚ	Stanice	Snehový model
Priemerná teplota na konci časového kroku i [$^{\circ}\text{C}$]	Priemerná denná teplota	SHMÚ	Stanice	Snehový model
Celkový úhrn zrážok v časovom kroku i [mm]	Úhrn denných zrážok	SHMÚ	Stanice	Snehový model
Priemerná nadmorská výška [m n. m.]	DEM 1x1 [m]	GKÚ	ALS	Snehový model/ Aprox. model
Celková potenciálna evapotranspirácia v časovom kroku i [mm]	Priemerná denná teplota	SHMÚ	Stanice	Snehový model
	$SD(\text{DEM } 1 \times 1 \text{ [m]})$	GKÚ	ALS	Aprox. model
	$S_r(\text{DEM } 1 \times 1 \text{ [m]})$	GKÚ	ALS	Aprox. model
	Sklon (DEM 1x1 [m])	GKÚ	ALS	
Odtokový koeficient [-]	Typ pôdy	GÚDŠ	GIS	Aprox./ redistrib. model
	Využitie pôdy	Autor		

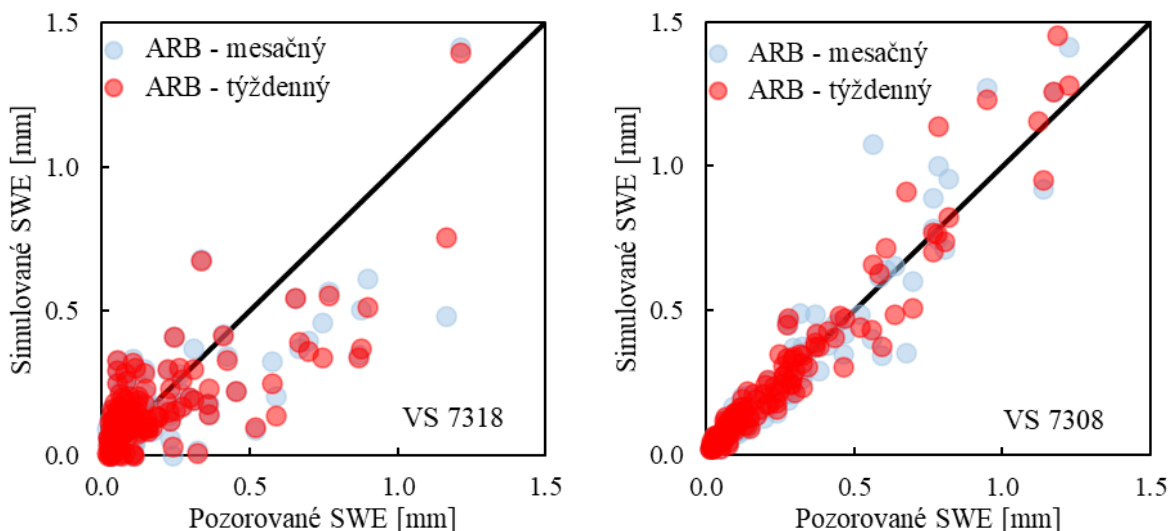
3.1. Zhodnotenie kvality simulácie snehového submodelu

Výsledky kalibrácií snehového submodelu z hľadiska NSE pre študované meteorologické stanice sú znázornené na obr. 6.2. Snehový submodel ARB modelu v týždennom časovom kroku prekonal HBV v týždennom časovom kroku aj ARB model v mesačnom časovom kroku, pričom funguje obzvlášť dobre vo vyšších nadmorských výškach skupín B a C v porovnaní s týždenným HBV alebo snehovým submodelom ARB v mesačnom kroku.

HBV – týždenný submodel vykazuje stabilnejší pokles hodnôt SWE, kým ARB – týždenný submodel sa lepšie adaptuje na prudké a náhle topenie snehu, najmä vo vysokých nadmorských výškach skupiny C.



Obr. 3.1 Porovnanie výkonnosti HBV – týždenného, ARB – týždenného a ARB - mesačného snehového submodelu podľa NSE za 25 zimných týždňov v rokoch 2013-2019 s meteorologickými stanicami zoradenými podľa stúpajúcej nadmorskej výšky.



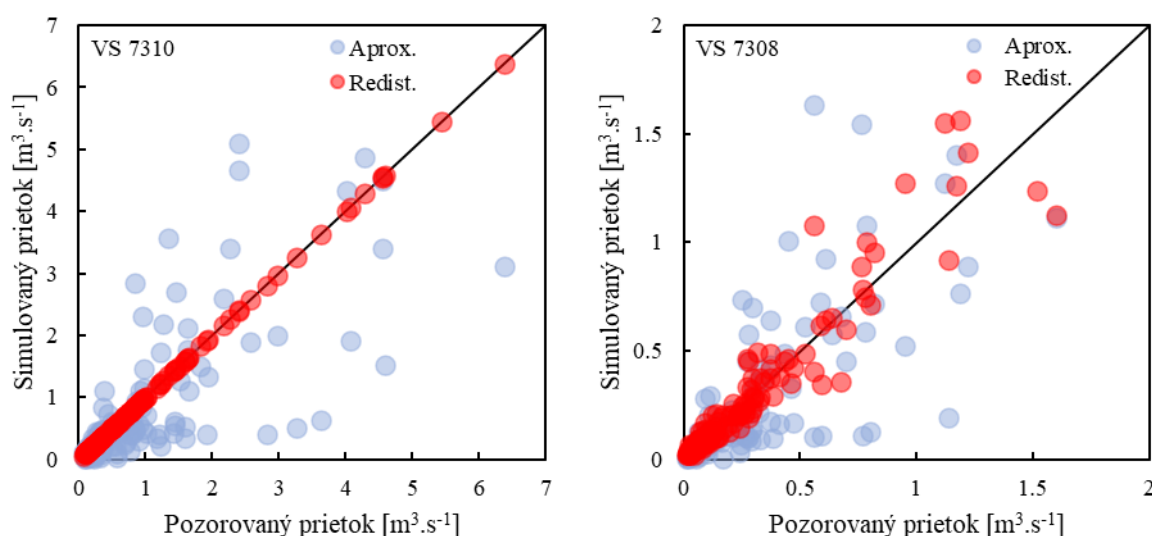
Obr. 3.3 Korelácia medzi pozorovanými a simulovanými odtokmi s použitím SWE vypočítaná v mesačných (modré bodky) a týždenných (červené bodky) časových krokoch; validačné subpovodie VS 7308 (vľavo) a validačné subpovodie VS 7318 (vpravo).

Porovnanie na obr. 3.3 neukazuje žiadne náhle zvýšenie alebo zníženie presnosti pri použití týždennej namiesto mesačnej SWE vypočítanej v modeli ARB. Štatisticky malo subpovodie VS 7308 NSE zvýšenú z 0,89 na 0,92 a r^2 z 0,9 na 0,92. Na druhej strane, subpovodie VS 7318

nevykázalo žiadne zvýšenie alebo zníženie štatistických výsledkov; NSE aj r^2 sa udržalo na hodnote 0,58. To dokázalo, o koľko menší vplyv má SWE na toto južnejšie položené subpovodie s oveľa nižšou priemernou nadmorskou výškou (pokles o 220 metrov), pričom tiež treba brať do úvahy, že VS 7318 ako overovacie subpovodie bolo súčasťou oveľa väčšieho kalibračného povodia VS 7335. Súčasne subpovodie VS 7335 malo významné prítoky z oblasti horného toku, čo malo vážny vplyv na kalibráciu a taktiež znížilo vplyv SWE.

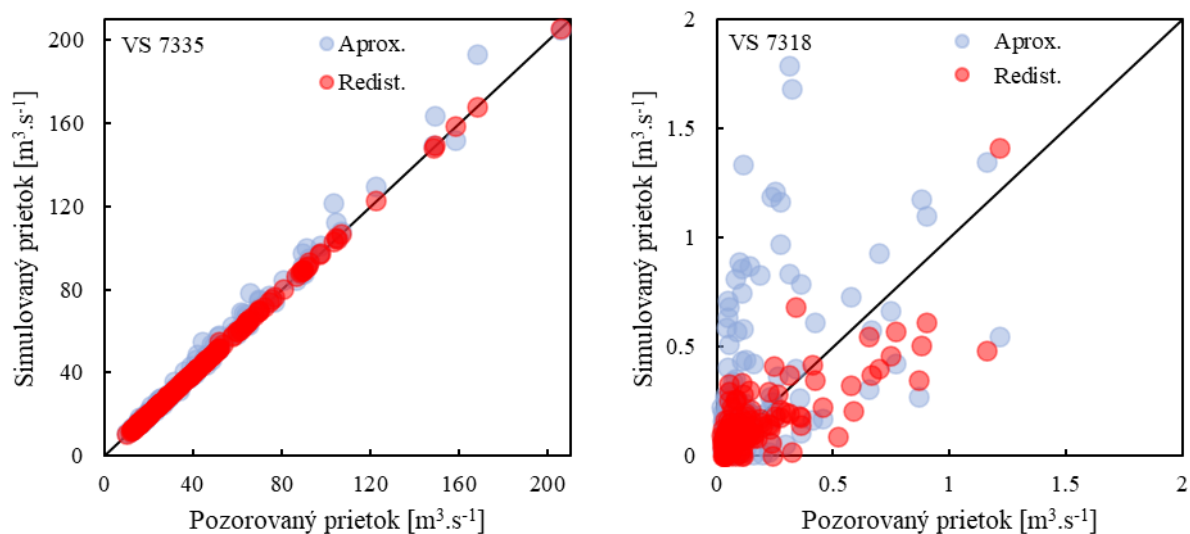
3.2. Zhodnotenie kvality simulácie ARB modelu

Výkonnosť ARB modelu bola vizuálne hodnotená pomocou korelácií medzi pozorovanými a simulovanými odtokmi (pozri obr. 3.4 – 3.5). Ľavá strana obr. 3.4 ukazuje schopnosť redistribučného modelu vyrovnávať nerovnosti medzi aproximovanými a pozorovanými odtokmi. Pravá strana obr. 3.4 ukazuje, ako pri dostatočne dobrej aproximácii môže redistribučný submodel simulovať odtok aj na prítokoch, ak je subpovodie do určitej miery homogénne, čo možno hodnotiť aj podľa podobnosti tokov modelovaných v subpovodí.



Obr. 3.4 Korelácia medzi pozorovanými a simulovanými prietokmi pre prvé testované subpovodie: scenáre aproximácie (Aprox. – modré body) a redistribúcie Redist. – červené body).

Na pravej strane obr. 3.5 modré body predstavujúce odtokové hodnoty submodelu aproximácie odtoku ukazujú všeobecné nadhodnotenie, zatiaľ čo červené body v procese prerozdelenia vedú k presnejšiemu, ale protichodnému podhodnoteniu odtokov.



Obr. 3.5 Korelácia medzi pozorovanými a simulovanými odtokmi pre druhé testované subpovodie: scenáre aproximácie (Aprox. – modré body) a redistribúcie (Redist. – červené body).

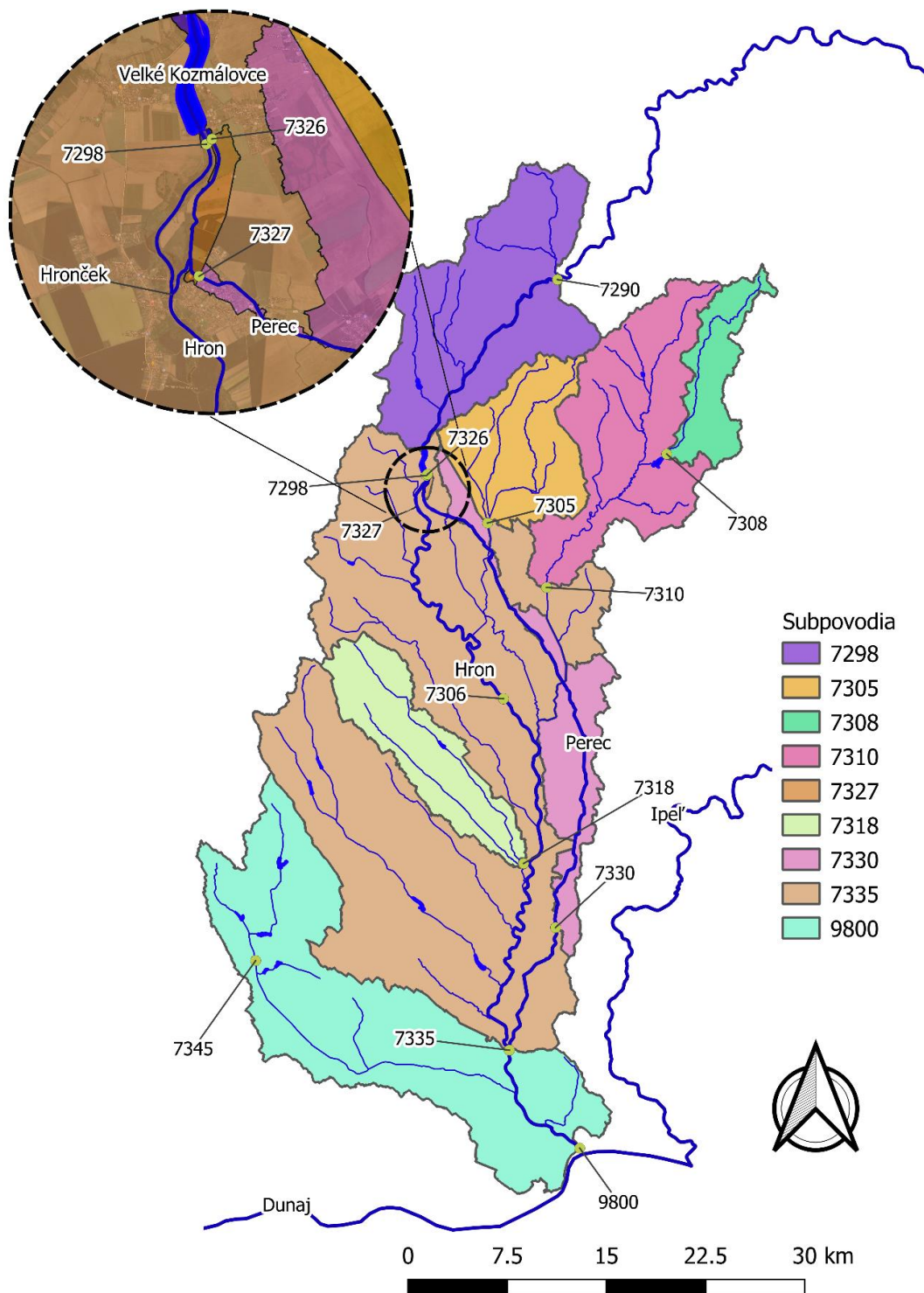
3.3. Aplikácia metodického postupu na povodí

Jednotlivé metodické postupy zostavenia a spracovania modelu boli v tejto podkapitole aplikované pri analýze vybraných problematik v súlade s tézami práce.

3.3.1. Charakteristika modelovaného povodia

Pre modelovanie kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie povrchových vôd bolo, rovnako ako pri hodnotení modelu vybrané povodie dolného Hrona, od vodomernej stanice Brehy (rkm 93,9) po ústie do Dunaja. Vybraná časť z celého povodia Hrona spĺňala nároky na pomer veľkosti povodia ku množstvu nezanedbateľných vodohospodárskych vplyvov. Dolný Hron je oproti zbytku povodia Hrona špecifický tým, že tu v plnej miere dominuje hlavný tok. Mimo rieky Hron sa na povodí dolného Hrona nachádza 29 tokov, ktoré reprezentujú vodné útvary povrchových vôd, z toho jeden (kanál Perec) je vo vodohospodárskej bilancii definovaný ako prevod. Priemerná dĺžka týchto prítokov je 15,6 km.

Mimo vodomernej stanice Brehy bolo na povodí v období rokov 2000 – 2019 aktívnych celkovo 11 vodomerných staníc, z ktorých pre účel modelovania bolo vybraných 9 staníc, z toho 8 staníc bolo aktívnych počas celého obdobia a jedna od roku 2007 do 2019. Stanice 7306 a 7345 neboli zahrnuté do modelu, keďže ich činnosť bola v priebehu modelovaného obdobia ukončená. Stanica 7326 (Veľké Kozmálovce) na kanáli Perec bola od roku 2003 ovplyvnená vzduťm na MVE Starý Tekov na Pereci, výsledkom čoho je priemerný prietok v modelovanom období o 0,656 vyšší ako maximálny odber do Pereca, definovaný manipulačným poriadkom hate Veľké Kozmálovce.



Obr. 3.6 Schéma sub-povodí modelu dolného Hrona s detailom na lokalitu VD Veľké Kozmálovce.

3.3.2. Simulácia kritických situácií v disponibilných vodných zdrojoch

Opodstatnenie pre modelovanie a hodnotenie zdrojov vo vodnom hospodárstve krajiny v týždennom časovom kroku je možné hľadať aj v spôsobe, akým sú v súčasnosti nastavené limity minimálneho prietoku MQ . Ich výpočet vychádza z denných prekročení prietokov, avšak následné hodnotenie toho, či boli dosiahnuté sa hodnotí v mesačnom časovom kroku.

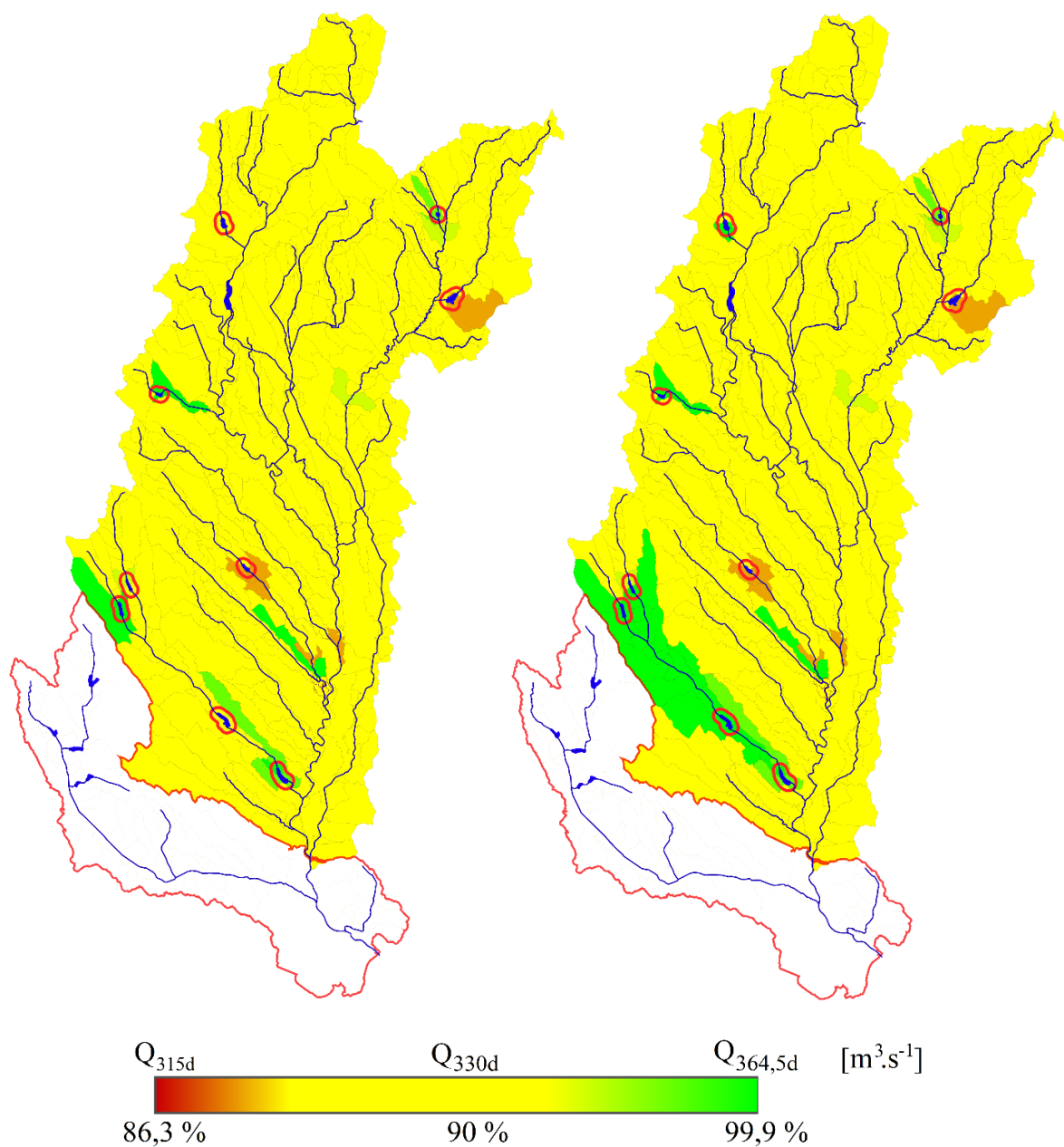
Toto porovnanie nenaznačuje, že s použitím týždenného časového kroku sa budú modelované prietoky na prítokoch vždy zvyšovať oproti mesačnému časovému kroku. Premenné kalkulované v ARB modeli iným spôsobom reagujú na týždenný a na mesačný krok. Redistribučná časť modelu taktiež nebola optimalizovaná, čím sa prejavuje u mikropovodí s veľkou odtokovou plochou skokové zníženie prietoku oproti ostatným mikropovodiam.

Keďže na povodí dolného Hrona sa mimo manipulácii a odberov z VD Veľké Kozmálovce nenachádzajú ďalšie významné odbery alebo prevody vody, bol pre analýzu zvolený vplyv malých vodných nádrží. Pre analýzu bolo vybraných 9 malých nádrží : Bátovce, Kozárovce, Bína, Kuraľany, Dedinka, Plavé Vozokany, Tekovské Lužany, Veľký Ďur, Pukanec. VD Veľké Kozmálovce ako aj nádrže pod profilom VS Kamenín neboli hodnotené.

Zásobný objem nádrží je predmetom rozdielných odhadov, pričom u väčšiny nádrží sa odhad pohybuje medzi 35 – 60 % zanesením akumuláčného objemu. Pre zjednodušenie výpočtu bolo u všetkých nádrží pri scenároch so zaneseným objemom jednotne nastavené 50 % zanesenie. Analýza prebieha v mesačnom a týždennom časovom kroku pre obdobie rokov 2000 – 2019. Boli vypracované 3 scenáre:

1. **Retrospektívny scenár** – nádrže boli simulované s pôvodnou manipuláciou hladín, so zaneseným objemom na 50 %, odtokový režim bol simulovaný ARB modelom,
2. **Nadlepšovanie so zanesením** – nádrže boli simulované bez manipulácie, pričom pre každú bolo nastavené ako jedinú požiadavku nadlepšovať prietoky na stanovené hodnoty Q_{355} . Objem nádrží bol zanesený na 50 %. Odtokový režim bol importovaný zo scenáru 1.
3. **Nadlepšovanie bez zanesenia** – podmienky rovnako ako pri druhom scenári, avšak nádrže boli bez zanesenia.

Pre jednotlivé scenáre sú porovnané čiary prekročenia prietokov od 80 % (Q_{290d}) po 99,8 % (Q_{364d}) s hodnotou MQ .

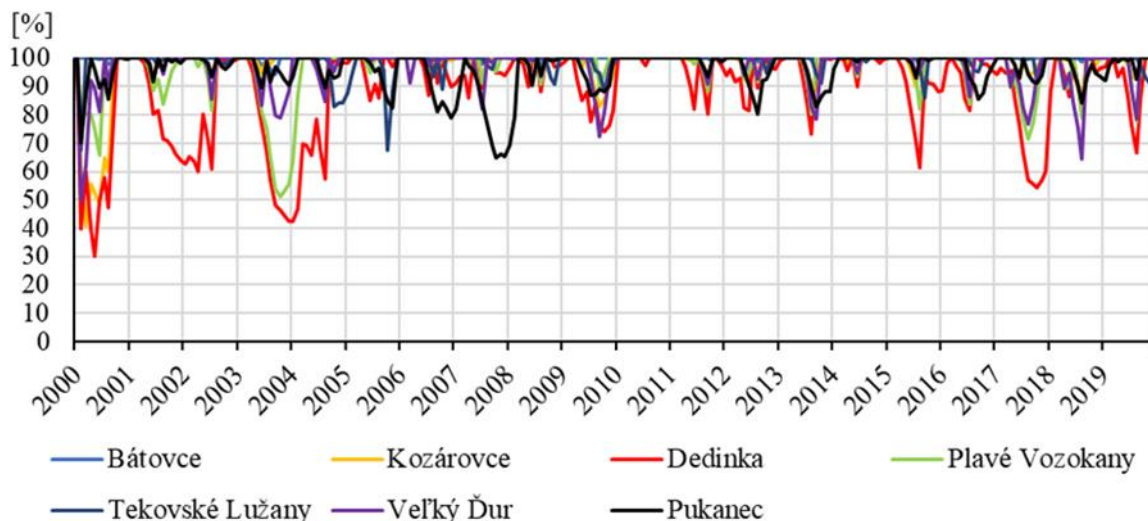


Obr. 3.7 Posun nadlepšenia prietokov scenárov 2). (Vľavo) a 3). (vpravo) v porovnaní s retrospektívnym scenárom 1). v mesačnom časovom kroku.

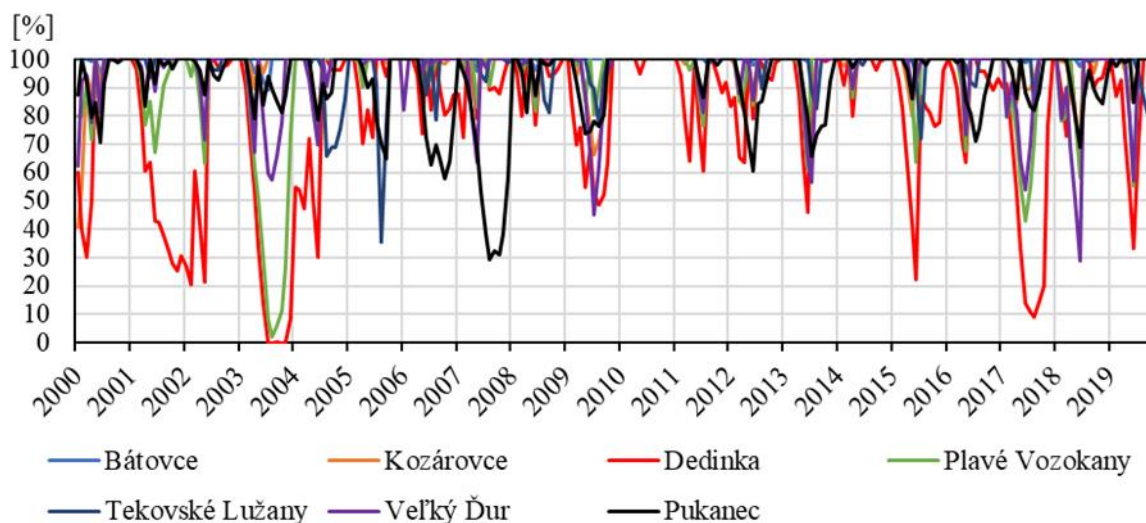
Pri mesačnom časovom kroku sa ukázal rozdiel medzi scenárom 2). a 3). až pri vizualizácii pozdĺžneho vplyvu na obr. 6.30, a to u VN Dedinka a VN Plavé Vozokany. Podobný efekt sa ale neobjavil u týždenného časového kroku na obr. 6.31.

U VN Bíňa a Kuraľany skutočnosť, že sa nachádzajú na dolnom úseku toku spolu s tým, že nad nimi prietoky nadlepšujú v značnej miere už VN Dedinka a Plavé Vozokany, spôsobili, že ich

zásobný objem sa pri scenári so zanesením rovnako ako bez zanesenia neznižoval počas 98 % z celého modelovaného obdobia.



Obr. 3.8 Simulovaná zásoba vody v nádržiach, scenár bez zanesenia v mesačnom kroku.

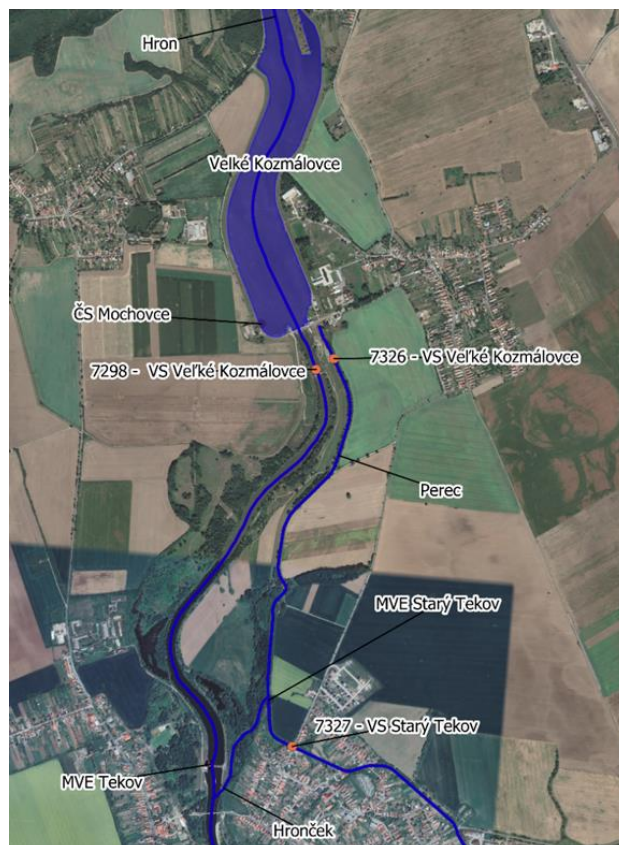


Obr. 3.9 Simulovaná zásoba vody v nádržiach, scenár so zanesením v mesačnom kroku.

Z toho dôvodu sa na vizualizácii objemov na obr. 3.8 a 3.9 VN Kuraľany a Bíňa nenachádzajú. Z porovnania týchto grafov je možné lepšie vidieť zmenu vplyvom zanesenia nádrží, pričom je na obr. 3.9 možné vidieť, že pri simulácii v mesačnom časovom kroku pri simulovanom 50 % zanesení nádrží vyčerpal v tomto scenári svoj objem VN Dedinka, a to počas extrémneho sucha v roku 2003.

3.3.3. Výchľadová analýza vodného diela Veľké Kozmálovce

VD Veľké Kozmálovce bola uvedená do dočasného užívania v skúšobnej prevádzke dňa 30.08.1988 a do trvalej prevádzky dňa 07.06.1994.



Obr. 3.10 Schéma vplyvov pod VS Veľké Kozmálovce.

Z kvantitatívneho pohľadu patria k hlavným účelom VD:

- Zabezpečenie dostatku vody pre Slovenské elektrárne, a. s., závod Atómové elektrárne Mochovce (ďalej „EMO“) a to až do $Q_{\max} = 2,40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, zabezpečenosť odberu 99 %,
- Zabezpečenie odberu pre Hron. Tento odber zabezpečuje minimálny zostatkový prietok $MQ = 6,60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, s mierou zabezpečnosti 99% a ďalšie odbery pre priemysel a závlahy s mierou 95%,
- Zabezpečenie vody pre kanál Perec predstavuje minimálny zostatkový prietok $MQ_{\min} = 0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Maximálny odber do Pereca je $3,515 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ak je v prevádzke čerpacia stanica závlahových vôd Kozmálovce I (povolený odber $0,815 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), inak je maximálny odber do Pereca $2,70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
- Energetické využitie cez MVE vybudovanej na ľavej strane hate.

Tab. 3.3 Stanovené úrovne minimálnych prietokov pre profily Hrona a Pereca pod VD Veľké Kozmálovce.

Tok		Hron			Perec	
Úroveň Q	MQ ^{H.}	Q ₃₅₅ (Q ^{H.} _{min.})	Q ₃₃₀	MQ ^{P.}	Q ^{P.} _{min.}	Q ^{P.} _{opt.} (Q ^{P.} _{max.})
Úroveň priority	2	4	6	2	3	5
Q [m ³ .s ⁻¹]	6,6	11,745	14,275	0,2	2,7	3,515

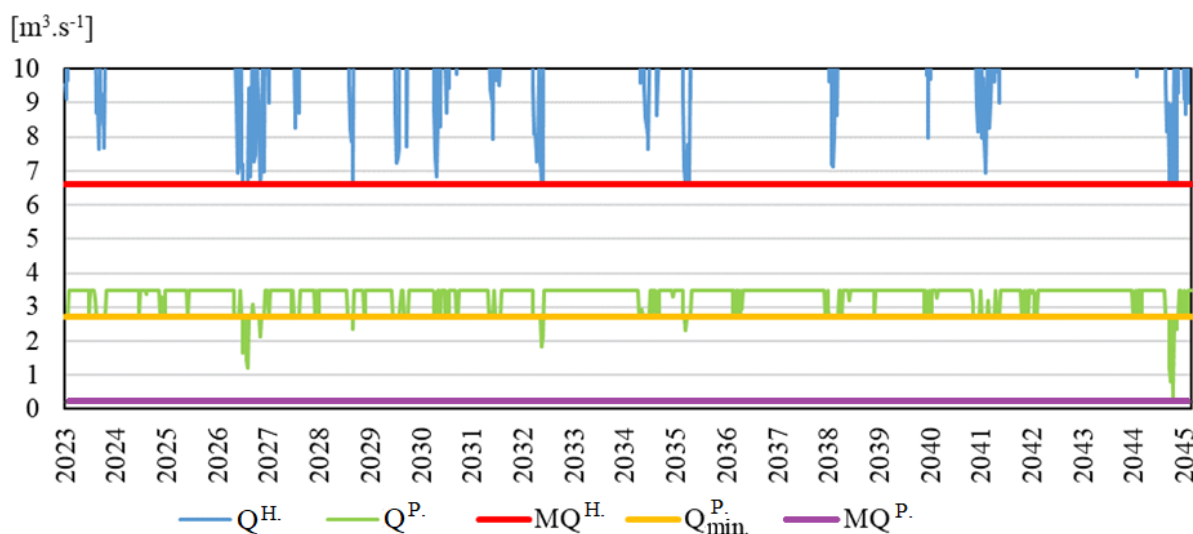
Pre účel analýzy zabezpečení požiadaviek definovaných manipulačným poriadkom bolo umiestnených do modelu pod úrovňou VD Veľké Kozmálovce 6 požiadaviek na prietok, 3 na Perec, 3 na Hron a sú zosumarizované v tab . 3.3.

Scenár A). s prioritou na MQ podľa tab . 3.3 je vyhodnotený na obr. 3.11. Pre porovnanie bol vytvorený druhý scenár B). s nastavenou prioritou $Q_{min}^P = 2,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ na Pereci rovnou prioritou MQ^{H.} na Hrone. Tento scenár je zhodnotený na obr. 3.12. V scenári A). bol v období 2023 – 2045 simulovaný minimálny prietok na Hrone $6,6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, Pereci $0,277 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ a v scenári B). na Hrone $4,88 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ a Pereci $1,99 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

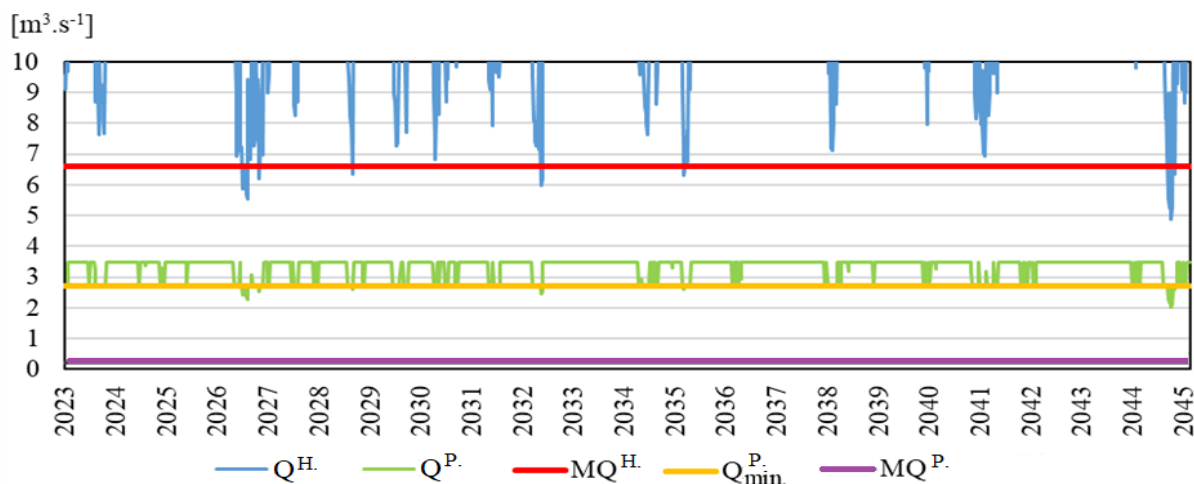
Tab. 3.4 Porovnanie percentuálneho zabezpečenia prietokov za obdobie 2023–2045.

[%]		Hron				Perec	
Scenár	MQ ^{H.}	Q ^{H.} _{min.}	Q ₃₃₀	Q ^{H.} _{opt.}	MQ ^{P.}	Q ^{P.} _{min.}	Q ^{P.} _{opt.}
A).	100	82.79	70.84	17.21	100	98.66	79.4
B).	98.66	82.79	70.84	17.21	100	98.66	79.4

Z tab. 3.4 pri scenári B). simulácia naznačuje nemožnosť 99 % zabezpečenia MQ na Hrone, ak by bolo cieľom udržiavať prevod do Pereca na optimálnej úrovni $2,7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, ako to definuje manipulačný poriadok VD Veľké Kozmálovce. Tento scenár avšak v žiadnej miere nezmenil percentuálnu zabezpečenosť ostatných prietokov.



Obr. 3.11 Schéma nízkych simulovaných prietokov v období rokov 2023–2045 na tokoch Hron a Perec pod VD Veľké Kozmálovce – priorita na MQ^{H.}.



Obr. 3.12 Schéma nízkych simulovaných prietokov v období rokov 2023–2045 na tokoch Hron a Perec pod VD Veľké Kozmálovce – priorita na $Q_{\min}^P$.

Z analýzy je zrejmé, že v najbližších desaťročiach sa na toku Hron v profile VD Veľké Kozmálovce budú častejšie vyskytovať obdobia, kedy sa vplyvom sucha a zvýšením požiadavky na odber pre EMO požiadavky na minimálny prietok na Hrone a Pereci budú musieť posúvať do ústrania, ak má byť zabezpečená plynulá prevádzka EMO. To je však v rozpore so súčasnou politikou vychádzajúcou z rámcovej smernice o vode, aj so súčasnými aktivitami, ktoré smerujú k zmenám a vo väčšine prípadov k zvýšeniu úrovni MQ. Záverom analýzy je skutočnosť, že v profiloch pod VD Veľké Kozmálovce na takúto zmenu bez vytvorenia adekvátneho zásobného objemu vody, ktorý by dokázal zvýšenie požiadaviek zabezpečiť, nie je priestor. Je pri tom potrebné brať do úvahy, že závery, ktoré analýza poskytuje, sú postavené na modeli využívajúcom mierny scenár odtoku za obdobie 2000 – 2022, kedy sa vyskytli extrémne suchá len v rokoch 2003 a 2022, rovnako ako mierny odhad kontinuálneho nárastu odberu do EMO.

4. ZÁVERY PRE PRAX

Z dosiahnutých výsledkov je možné usúdiť, že modelovaním vodohospodárskej bilancie pomocou vytvorenej metodiky je možné analyzovať retrospektívne manipuláciu užívateľov povrchových vôd, aj vo forme výhľadových scenárov posudzovať mieru zabezpečenia jednotlivých požiadaviek na vodu. Z analýzy nadlepšovania malých vodných nádrží na dolnom Hrone vyplýva, že aj pri uvažovaní súčasného zanesenia sedimentami nie sú úrovne minimálnych prietokov tak vysoké, že by ich za obdobie rokov 2000 – 2019 nebolo možné dodržať. Zároveň, ale nie je vzhľadom na nespochybniteľnú odchýlku simulovaných prietokov od reálnych prietokov

možné jednoznačne povedať, že za dané obdobie analyzované nádrže v žiadnej miere nenadlepšovali, čoho príkladom bolo viditeľné nadlepšovanie u VN Bátovce.

U analýzy VD Veľké Kozmálovce bolo pomocou výhľadových scenárov ukázané, že s plánovaným nárastom odberov pre dostavbu tretieho a štvrtého bloku EMO sa významne znižuje dostupné množstvo vody v Hrone pre zabezpečenie stanovených minimálnych prietokov, a ešte významnejšie ak sa berú do úvahy značne vyššie prietoky, než MQ, ktoré sa dlhodobo majú dodržiavať v rámci manipulačného poriadku VD na Pereci. Sebakritikou analýzy je absencia modelovania teploty vody, ktorá je kľúčovou premennou pri zásobovaní vody pre jadrové elektrárne najmä u výhľadových scenárov, kde ju najviac ovplyvňujú súčasné zmeny klímy a ktorá by zároveň omnoho negatívnejšie ovplyvnila scenáre zabezpečenia vody pre EMO, a nie len zabezpečenie MQ.

5. VEDECKÝ PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce bolo vytvoriť metodiku pre modelovanie zdrojov a zásob povrchových vôd na Slovensku, kompatibilnú s už zaužívanou metodikou VHB povrchových vôd. Mnohé časti práce opisujú tvorbu parciálnych nástrojov, ktorá bola podmienená absenciou existujúcich a dostatočne kompatibilných nástrojov, ktoré by bolo možné využiť a zakomponovať.

Integráciou metodiky kvantitatívnej VHB povrchových vôd v modeli WEAP sa prišlo na skutočnosť, že aby bola naplno možná a bez očividných nedostatkov, bolo potrebné na distribúciu odtoku vytvoriť kompatibilný integrovaný zrážkovo-odtokový model, čoho výsledkom bol vývoj a testovanie ARB modelu spolu so snehovým submodelom (Kandera a Výleta, 2023). Tým bol skompletizovaný kompatibilný nástroj na komplexné hodnotenie vodných zdrojov. Už v počiatkoch bol celý systém vyvíjaný tak, aby bol otvorený prípadnému rozšíreniu o modelovanie kvality povrchovej vody alebo modelovanie podzemných vôd. Zároveň ako nový a nie dostatočne odskúšaný nástroj vyžaduje potrebnú mieru optimalizácie a dodatočného testovania.

Celá práca bola orientovaná tak, aby bola s čo najširším záberom spracovaná metodika modelovania kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie povrchových vôd ako nástroja na hodnotenie a analýzu vodných zdrojov v podmienkach vodného hospodárstva na Slovensku. Ohľad pritom bol kladený nie len na metodiku a potreby retrospektívnej vodohospodárskej bilancie povrchových vôd SR, ale na mnoho ďalších úloh, ktoré v širšom kontexte prispievajú do vodného plánovania SR, čoho súčasťou sú práve aj vodohospodárske bilancie. U mnohých z týchto úloh sa duplikuje práca súvisiaca najmä s kvantitatívnym hodnotením vodných zdrojov povrchových vôd. Modelovaním vodohospodárskej bilancie vo forme, akú predkladá táto práca, by bolo mnoho úloh možné riešiť komplexnejšie, bez nároku na neodôvodnenú a duplicitnú prácu.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

KANDERA, M. - VÝLETA, R.: Development and validation of an Approximate Redistributive Balance model to estimate the distribution of water resources using the WEAP: The lower Hron river basin, Slovakia. *Acta Hydrologica Slovaca*, 2023. roč. 24, č. 1, s. 122-133. Dostupné z: <https://doi.org/10.31577/ahs-2023-0024.01.0014>

SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV: Vodohospodárska bilancia množstva povrchových vôd za rok 2020. Shmu.sk [online]. © 2020 Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava. Posledná zmena 8.11.2023 19:15 [cit. 8.11.2023]. Dostupné z: <http://www.shmu.sk/sk/?page=1834>

SLOVENSKÝ VODOHOSPODÁRSKY PODNIK: Manipulačný poriadok pre vodnú stavbu hať Veľké Kozmálovce na toku Hron r. km 73,500. Banská Bystrica, september 2021.