

Modelovanie bilancie povrchových vôd rozšírené o simulovanie podzemných vôd

Ing. Miroslav Kandra

Anotácia

Príspevok sa zaoberá problematikou modelovania retrospektívnej kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie (ďalej len KVHB) povrchových vôd na povodí rieky Hron. V nadväznosti na vypracovaný metodiku tohto modelovania v súlade so súčasnou metodikou KVHB je súčasným cieľom rozšírenie tohto modelovania o simuláciu podzemných vôd a odberov podzemných vôd, ich vzájomného vzťahu s povrchovými vodami a vplyvu na KVHB povrchových vôd. Obsahom príspevku sú doterajšie zistenia v tejto problematike a smerovanie ďalšieho výskumu.

Kľúčové slová: WEAP, MODFLOW, vodohospodárska bilancia.

Annotation

The article deals with the issue of modeling the retrospective quantitative water management balance (herein after referred as KVHB) of surface waters in the Hron river basin. Following the developed methodology of this modeling in accordance with the current KVHB methodology, the current goal is to extend this modeling to the simulation of groundwater and groundwater abstraction, their relationship with surface water and the impact on KVHB surface water. The content of the article are the previous findings in this study area and direction of ongoing research.

Key words: WEAP, MODFLOW, water management balance.

Abstrakt

Vodohospodárska bilancia (VHB) hodnotí vzťah medzi požiadavkami na vodu s využiteľným množstvom vôd, pričom jej retrospektívnu formu pre Slovensku republiku vypracováva Slovenský hydrometeorologický ústav ako bilanciu uplynulého roka.

Ako reakcia na narastajúce využívanie modelovania vodných bilancií v zahraničí, a taktiež na základe skutočností vyplývajúcich z Rámcovej smernice o vode v posledných rokoch prebehol proces testovania schopnosti modelu WEAP prispôsobenia sa súčasnej metodike VHB. Na základe výsledkov bol ako reakcia na nové zistenia a nedostatky zostaveného modelu vybraný model prúdenia podzemných vôd MODFLOW, ktorý je možné prepojiť s modelom WEAP. Cieľom tohto prepojenia je vyriešenie problému zabezpečenia modelovaných odberov podzemných vôd, ktoré na základe metodiky VHB vstupujú do VHB množstva povrchových vôd, a taktiež analýza ich skutočného vplyvu na povrchové vody.

Prvou časťou príspevku je úvod do problematiky. Nasleduje stručný opis vytvorenej metodiky modelovania kvantitatívnej VHB povrchových vôd, zhrnutie doterajších zistení a ich následná analýza. V poslednej časti je opísaný základ postupu integrácie modelov WEAP a MODFLOW, opis ich prepojenia, pilotného povodia a základ potrebných vstupných údajov. Záver obsahuje stručné zhodnotenie súčasného stavu a predpokladaný prínos výsledkov najbližšieho výskumu.

Abstract

The water management balance evaluates the relationship between the requirements for water with a usable amount of water, while its retrospective form for the Slovak Republic is prepared by the Slovak Hydrometeorological Institute as continuous balance of the past year. In response to the increasing use of water balance modeling abroad and based on the facts arising from the Water Framework Directive, the process of testing the ability of the WEAP model to adapt to the current water management balance methodology has taken place in recent years. Based on the results, the MODFLOW groundwater flow model was selected in response to new findings and shortcomings of the compiled model, which can be linked to the WEAP model. The aim of this connection is to solve the problem of unmet modeled groundwater abstractions, which enter the water management balance of amount of surface waters based on the water management balance methodology, as well as to analyze their real impact on surface waters.

The first part of article is an introduction to the issue. The following is a brief description of the developed methodology of modeling of quantitative water management balance surface waters, a summary of previous findings and their subsequent analysis. The last part describes the basis of the integration process of WEAP and MODFLOW models, a description of their interconnection, pilot basin and the basis of the necessary input data. The conclusion contains a brief assessment of the current situation and the expected benefits of the results of the next research.

1 Úvod

Vodohospodárska bilancia (VHB), v zmysle Zákona č. 364/2004 o vodách a o zmene a doplnení niektorých zákonov (vodný zákon) a Vyhlášky MP ŽP a RR SR č. 418/2010 o vykonaní niektorých ustanovení vodného zákona je podkladom na výhľadové bilancovanie vôd na účely zostavovania vodohospodárskych plánov. VHB množstva povrchových vôd je súčasťou vodohospodárskej bilancie množstva a kvality povrchových vôd. Hodnotí vzťah medzi požiadavkami na vodu s využiteľným množstvom vôd a ich kvalitou v uplynulom roku, pričom požiadavky na vodu reprezentujú uskutočnené odbery a vypúšťania odpadových vôd a osobitých vôd. (Slovenský hydrometeorologický ústav, 2020). Bilancia prebieha v 137 bilančných profiloch, v ktorých sú v mesačnom kroku vyhodnocované jednotlivé charakteristiky, popísané na Obrázok 2 (podrobnejšie Slovenský hydrometeorologický ústav, 2020).

Hlavným podnetom pre modelovanie VHB množstva povrchových vôd uplynulého roka bolo narastajúce využívanie modelovacích softvérov v oblasti vodných bilancií v zahraničí, a to pri hodnotení štátnych bilancií tak ako aj účelových a podrobných bilancií. Príkladom takého využitia je Český model Bilan (ČHMÚ, 2020), Španielska sada modelovacích softvérov AQUATOOL (AQUATOOL, 2021) alebo Nemecký systém empirických modelov mGROWA (Herrmann a kol., 2017). Spoločnou vlastnosťou týchto modelov je ich lokálny pôvod a využitie pri štátnych bilanciách. Rovnako bývajú ale pri štátnych, no najmä účelových a podrobných bilanciách využívané generické simulačné modely, ktoré sú produktom inštitúcií zaoberajúcich sa modelovaním v oblasti hydrologie a vodného hospodárstva. Medzi celosvetovo najznámejšie a najvyužívanejšie možno zaradiť súbor modelov MIKE HYDRO spoločnosti DHI (DHI, 2021) pôvodom z Dánska, model RIBASIM Holandskej spoločnosti DELTARES (DELTARES, 2021) alebo model WEAP Švédskej spoločnosti SEI (SEI, 2021). Pri mnohých z týchto modelov platí, že v počiatkoch ich vývoja boli zamerané len na modelovanie hydrologie povodí, pričom až v neskorších štádiách ich vývoja do nich bolo integrované modelovanie vodohospodárskych prvkov.

Ďalším dôvodom pre využívanie modelov v oblasti vodných bilancií je implementácia rámcovej smernice o vodách, ktorej environmentálne ciele zahŕňujú využívanie vodných bilancií, najmä z hľadiska povodí, a to aj v medzinárodnom rozsahu (EK, 2015). V prípade legislatívnych zmien, či už podnietených rámcovou smernicou o vodách, alebo interným záujmom v rámci SR, ktoré vyústia vo zvýšenie nárokov na vodohospodárske bilancie, najmä na VHB množstva povrchových vôd, je možné predpokladať, že modelovací softvér, ktorý bude schopný implementácie súčasnej metodiky VHB množstva povrchových vôd uplynulého roka, bude lepšie schopný integrovať takéto zmeny. Medzi takéto potencióálne zvýšenie nárokov patria napr.:

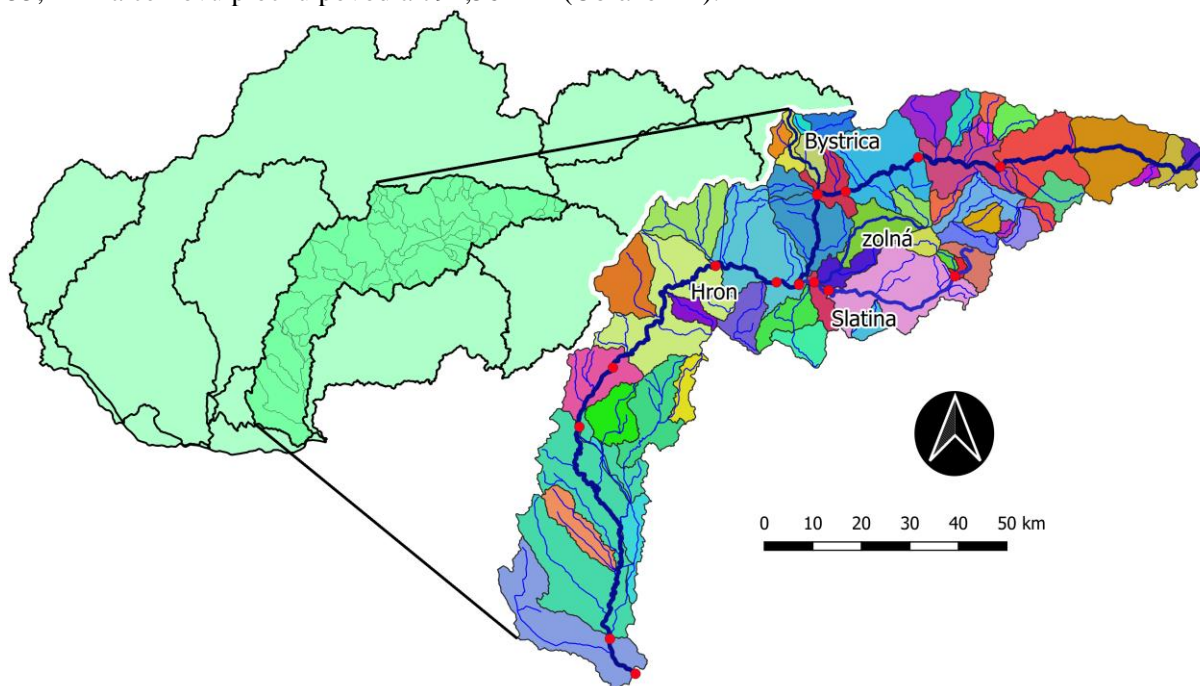
- rozšírenie siete bilančných profilov o vodomerné stanice,

- rozšírenie hodnoteného časového radu na viac-ročné obdobie,
- bilančné hodnotenie vodných útvarov, a to buď ich vstupných a výstupných profilov, alebo celkové hodnotenie pozdĺžnych profilov,
- integrácia bilancie množstva povrchových a podzemných vôd,
- podrobnejšie hodnotenie hydrologickej bilancie povodí, resp. sub-povodí bilančných profilov,
- podrobnejší časový krok.

Len v minimálnej miere je možné predpovedať, či a prípadne kedy by niektoré z týchto, alebo iné zvýšenie nárokov mohlo byť legislatívne implementované, prípadne kedy by bolo integrované do súčasnej metodiky aj bez legislatívnych zmien. V oblasti modelovania KVHB povrchových vôd bol vzhľadom na to pre nasledujúce obdobie vybraný širší cieľ, a to testovanie schopnosti vybraného modelu v oblasti integrácie takýchto zvýšení nárokov na KVHB. V súčasnosti prebiehajúcim krokom je integrácia bilancie množstva povrchových a podzemných vôd vo forme rozšírenia bilancie povrchových vôd o simulovanie podzemných vôd.

2 Súčasný stav modelu retrospektívnej KVHB povrchových vôd

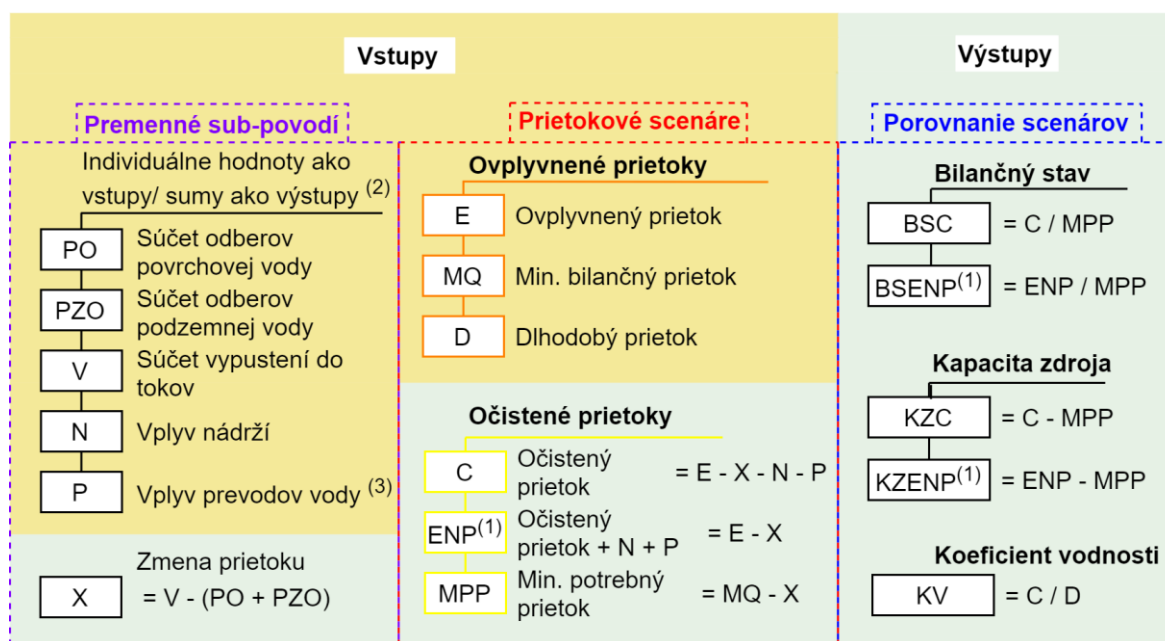
Pre účely modelovania bol vybraný na základe predpokladov a dostupnej literatúry model WEAP. Ako pilotné povodie bolo vybrané povodie rieky Hron od prameňa až po ústie do rieky Dunaj. Rieka Hron ako druhá najdlhšia rieka tečúca v celej svojej dĺžke územím Slovenska má dĺžku 298 km od prameňa na juhovýchodnom úpätí Kráľovej hole až po ústie do Dunaja, rkm 1716,00. Od prameňa tečie západne po Banskú Bystricu, kde zatača smerom na juh a následne od Zvolena v oblasti prítoku Slatiny mení smer opäť na západ. Od Žiaru nad Hronom sa tiahne prevažne južným smerom až po ústie do Dunaja pri Štúrove. Celková plocha povodia je 5463,5 km² s priemernou nadmorskou výškou 550,4 m n. m., pričom najvýznamnejším prítokom je Slatina, s jej ústím na rkm 153,0 Hrona má dĺžku 55,2 km a celkovú plochu povodia 792,56 km² (Obrázok 1).



Obrázok 1 Poloha povodia rieky Hron vrátane bilancovaných tokov (modré čiary), bilančných profilov (červená) a farebne rozlíšených sub-povodí vodomerných staníc

Pri modelovaní kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie povrchových vôd na povodí rieky Hron v mesačnom časovom kroku bol použitý časový rad vstupných údajov od roku 2000 po 2019. Tieto vstupné údaje sú v plnej miere výstupom merania a nahlásovania. V danom období bolo vybraných v rámci analýzy možností rozšírenia siete bilančných profilov o vodomerné stanice 53

aktívnych vodomerných staníc (ďalej len VS) a 2 bilančné profily ktoré nezdieľajú polohu s VS, pre ktoré boli pomocou nástrojov GIS vykreslené územia 55 subpovodí a následne kalkulované odtokové pomery. Jednotlivé charakteristiky, ktoré sú vo VHB množstva povrchových vôd za uplynulý rok hodnotené v bilančných profiloch, boli integrované do dátovej a výpočtovej štruktúry modelu WEAP, pričom forma tejto integrácie a ich výpočtu je spracovaná na Obrázok 2.



(1) Vrátane vplyvu nádrží, prevodov vody a rozdeľovacích objektov,

(2) Individuálne užívanie vody a manipulácia s vodou sú vstupy, súčty týchto hodnôt sú výstupy,

(3) Celým názvom "Vplyv prevodov vody a manipulácie v rozdeľovacích objektoch".

Obrázok 2 Charakteristiky bilančného výpočtu vodohospodárskej bilancie množstva povrchových vôd SR a ich integrácia do modelu WEAP

Odtok z jednotlivých subpovodí je definovaný prostredníctvom vypočítaného odtokového koeficientu pre jednotlivé subpovodia v danom časovom kroku na základe údajov o zrážkach a prietokoch, podľa vzťahu:

$$C = \frac{\Delta Q - X}{AP} \quad (1)$$

kde:

C – odtokový koeficient [-],

ΔQ – rozdiel odtoku a prítoku do subpovodia podľa vodomerných staníc [m^3],

X - vplyv užívateľov vody na tok [m^3],

A – plocha subpovodia [m^2],

P – zrážkový úhrn [m].

Tento vzťah je možné použiť pri dopočítaní prietoku v bilančných profiloch a taktiež vodomerných staniach v časových úsekoch, kedy v daných vodomerných staniach nie sú dostupné prietokové údaje. V takom prípade je potrebné určiť danému subpovodiu odtokový koeficient iného subpovodia s podobnými vlastnosťami, prípadne ho interpolovať.

Odtok zo subpovodia je vypočítaný vynásobením koeficientu odtoku so zrážkovým úhrnom a jeho distribúciou do odtokových uzlov vytvorených v danom intervale riečného kilometra. Tieto uzly zdieľajú percentuálny podiel odtoku na základe ich podielu na ploche odtokovej oblasti v mieste lokalizácie vodomerných staníc. Takýmto spôsobom je možné v uzlovom, „0-D“ modeli simulovať odtokové pomery po dĺžke modelovaných tokov. Zároveň je za podmienky správneho zostavenia

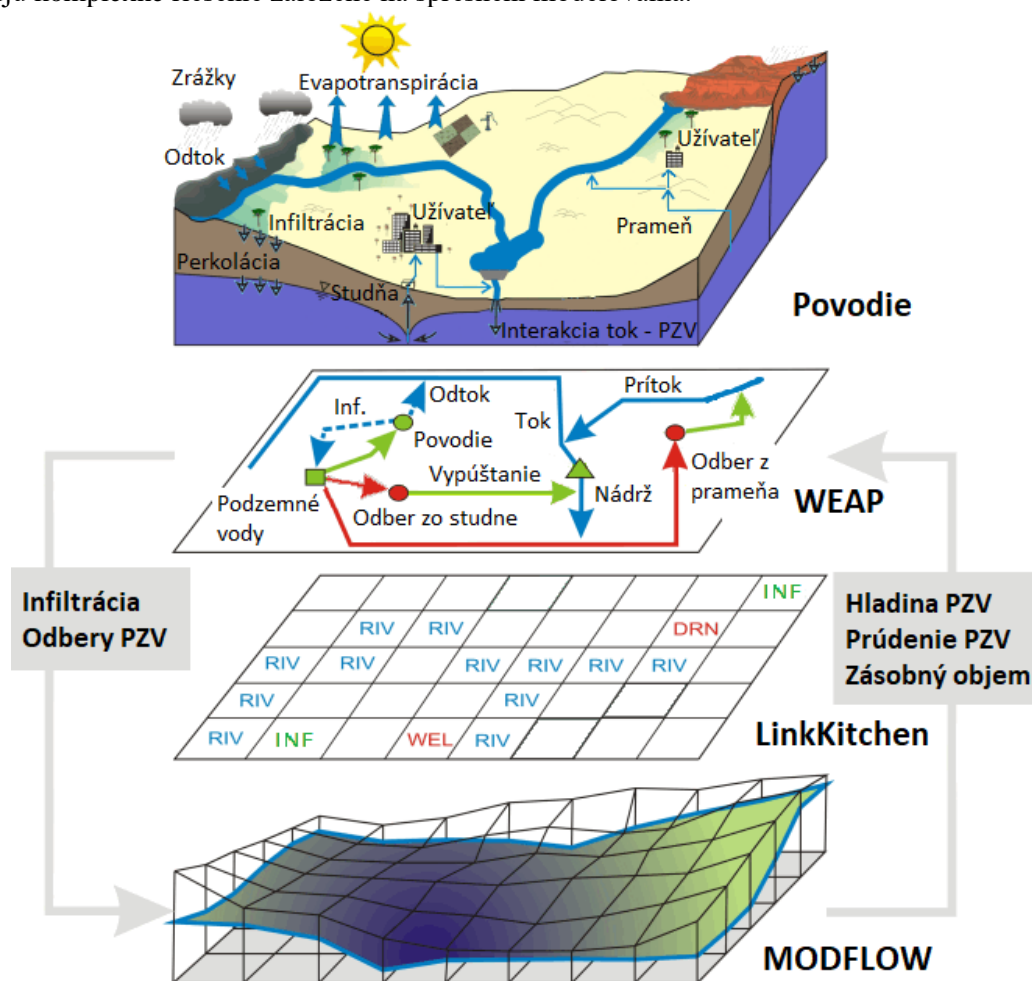
modelu a 100 percentného zabezpečenia odberov možné docieľiť úplnú zhodu namodelovaných a nameraných prietokov vo vodomerných staniciach, čo bolo jednou zo stanovených podmienok pre modelovanie KVHB množstva povrchových vôd. Po prvotnej kontrole zostavenia sub-povodí bol počet vodomerných staníc s percentuálnym rozdielom medzi nameraným a namodelovaným priemerným mesačným prietokom menším ako 1 percento 34 staníc z celkových 53 staníc.

Tento stav bol predovšetkým dôsledkom značného množstva nezabezpečených odberov, a to povrchových tak aj podzemných vôd, pričom išlo len o namodelovanú nezabezpečenosť odberov, a tieto odbery boli v plnej miere realizované. Nezabezpečené odbery povrchových vôd boli dôsledkom zväčša neprítomnosti malých vodných nádrží, z ktorých boli tieto odbery napájané. Tento problém vyžaduje modelovanie aj týchto vodných nádrží, a to buď s dostupnými údajmi o manipulácii tak ako sú modelované nádrže už zahrnuté v modeli, alebo simuláciou ich objemu.

V rámci metodiky VHB je vplyv odberov podzemných vôd na povrchové vody započítavaný v 100 percentnom rozsahu. V súčasnom tabelárnom spracovaní VHB je ich priradenie k bilančným profilom definované ako priradenie kolmicou na príslušný tok a uvádzajú sa sumárne k najbližšiemu nižšie položenému bilančnému profilu (Slovenský hydrometeorologický ústav, 2020).

Pri modelovaní sa ukázalo takéto priradenie ako problémové, najmä pri kombinácii vysokých hodnôt odberu podzemných vôd v blízkosti modelovaného toku s nízkymi hodnotami modelovaného odtoku. Nízky odtok v bode napojenia odberu teda nebol schopný zabezpečiť daný odber. Pre potreby ďalšieho postupu v modelovaní bolo teda potrebné vyriešiť problematiku priradenia, určenia vplyvu a zabezpečenia odberov podzemných vôd.

Výsledkom doterajšieho modelovania bolo teda úspešná implementácia metodiky VHB v modeli WEAP a taktiež odhalenie nových problémov, ktoré pre zlepšenie kvality modelovania vyžadujú komplexné riešenie založené na spresnení modelovania.



Obrázok 3 Schematické nastavenie prepojenia systému WEAP-MODFLOW (BGR, 2021)

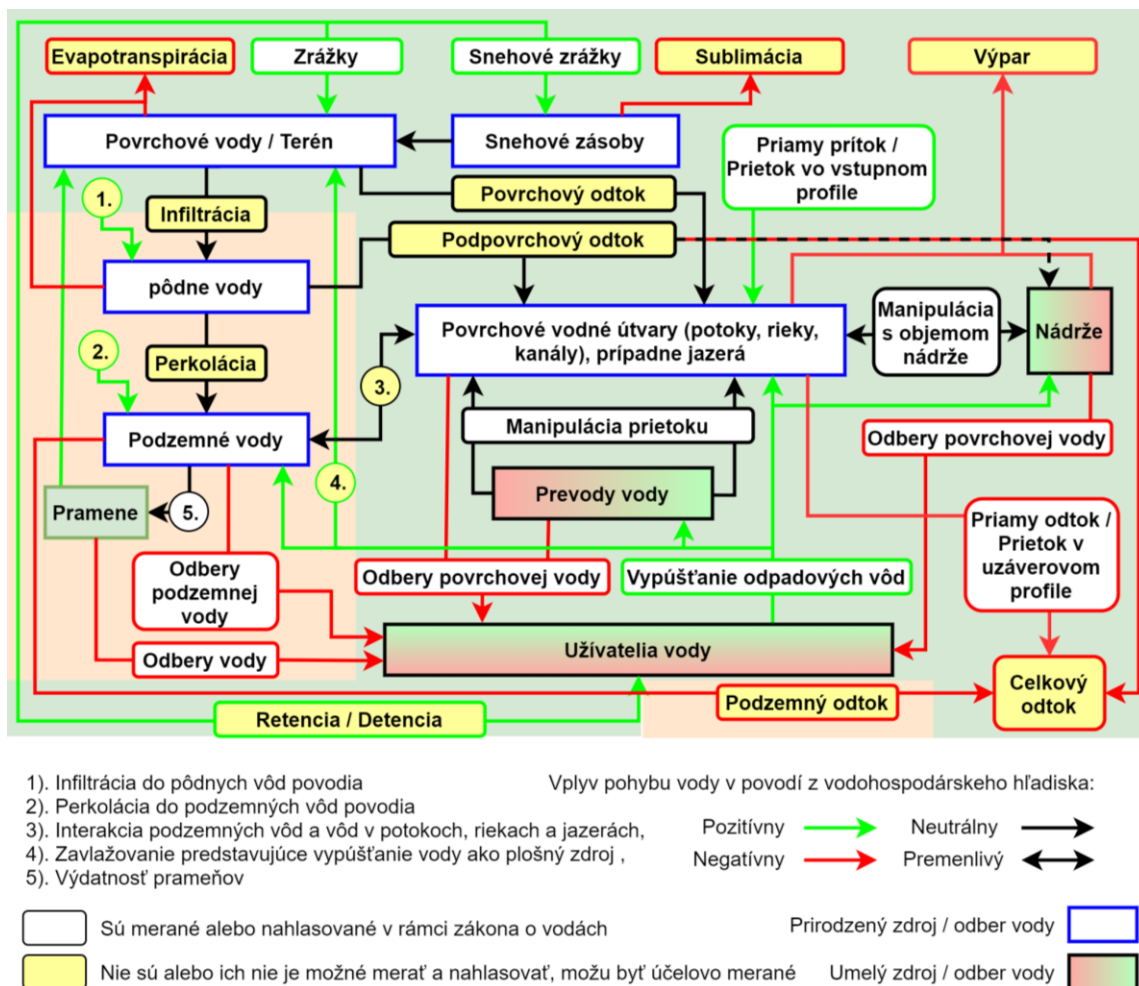
3 Integrácia modelov WEAP a MODFLOW

Z doterajších zistení vyplýva, že pre správnu modelovanie KVHB je potrebné zabezpečenie odberov podzemných vôd. Typologicky je možné odbery podzemných vôd rozdeliť na:

- odbery z prameňov,
- odbery z vrtov.

Základným rozdielom medzi týmito odbermi je skutočnosť, že voda odoberaná z vrtov by pri scenári, v ktorom by nebola odoberaná, ostala súčasťou disponibilného množstva podzemných vôd. Voda odoberaná z prameňov by sa pri takomto scenári stala súčasťou povrchového, resp. priameho odtoku. Tieto odbery sú zároveň zabezpečené výdatnosťou prameňov, teda nie priamo zásobou podzemnej vody alebo povrchovej vody v toku.

Tento rozdiel bol základom pre stanovenie miesta vplyvu a veľkosti vplyvu odberov podzemných vôd na povrchové vody. Pri odberoch podzemných vôd z prameňov bolo stanovené, že v mieste prameňa bude do modelu zahrnutá výdatnosť prameňa, znížená o realizované odbery z daného prameňa, pričom umiestnenie vplyvu na povrchové toky bude určený podľa povrchového odtoku na základe digitálneho modelu reliéfu.

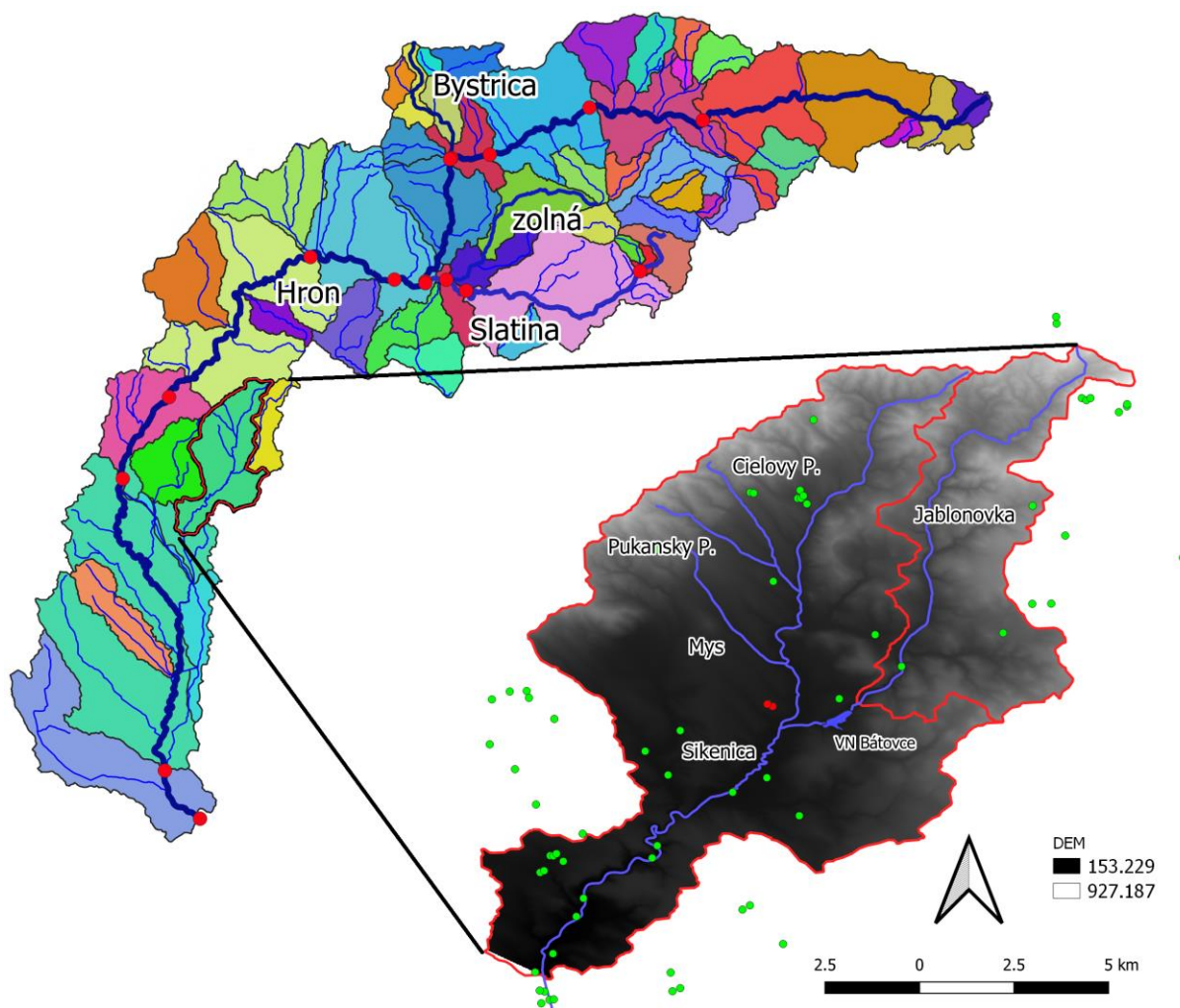


Obrázok 4 Schéma vodnej bilancie povodia pre Slovensku republiku s pokrytím modelu WEAP (bledo-zelená) a MODFLOW (bledo-oranžová)

Vplyv odberov podzemných vôd z vrtov na povrchové vody je bez simulácie prostredia podzemných vôd a jej interakcie s modelom povrchových vôd veľmi zložité kvantifikovať. Pre účel výskumu a zistenia nárokov takéhoto modelovania bol pre simuláciu podzemných vôd vybraný 3-D

model prúdenia podzemnej vody MODFLOW, vyvinutý U. S. Geological Survey (USGS). Vzájomnú interakciu uzlového modelu WEAP a 3-dimenzionálneho modelu MODFLOW umožňuje softvér Linkitchen, vyvinutý Nemeckým Federálnym inštitútom pre geovedy a prírodné zdroje (Nem. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)) (BGR,2021). Ich vzájomná interakcia je schematizovaná na Obrázok 3.

V rámci podrobnej vodohospodárky zameranej schémy vodnej bilancie povodia na Obrázok 4 sú jej jednotlivé prvky farebne rozlíšené podľa potencionálneho pokrytia týmito modelmi z hľadiska modelovania, simulácie a výpočtu. Akou metódou výpočtu a ktoré prvky budú vo výsledku výstupom sústavy modelov WEAP-MODFLOW, bude závisieť od jej možnosti a časovej náročnosti.



Obrázok 5 Testovacie sub-povodia ohradené červenou; modelované toky na ktorých sú aktívny užívatelia povrchových vôd (modrá), hydrogeologické vrtý – SHMÚ (červená), hydrogeologické vrtý – GÚDŠ (zelená), Digitálny model reliéfu v rozlíšení 1m - Úrad geodézie, kartografie a katastra SR (ÚGKK SR)

Pre testovanie prvotného zostavenia, kalibrácie a adaptácie systému modelov WEAP-MODFLOW na súčasnú metodiku VHB boli vybrané sub-povodia dvoch vodomerných staníc v povodí rieky Sikenica v oblasti dolného Hrona. VS Sikenica na rkm 13,9 toku Sikenica a VS Jablňovka na rkm 2,6 jej prítoky, Jablňovky. Celková plocha oboch sub-povodí je 217,84 km² (Obrázok 5).

Vstupom pre model MODFLOW, reprezentujúcim terén, bude digitálny model reliéfu (DMR) v rozlíšení 1m, ktorý je vytvorený z údajov leteckého laserového skenovania, ktoré od roku 2017 zabezpečuje Úrad geodézie, kartografie a katastra SR (ÚGKK SR). V závislosti od nadmorských

výšok z DMR budú na základe hĺbok vrstiev a ich typu z dostupných hydrogeologických vrstiev, prostredníctvom GIS spracované rastrové vrstvy dolných hraníc jednotlivých geologických vrstiev. Tieto vrstvy budú spolu s DMR agregované do jednotného rozlíšenia s ohľadom na jeho vplyv na výpočtový čas. Spolu s informáciou o odtokovom koeficiente jednotlivých vrstiev budú základným vstupom do modelu MODFLOW. V prípade, ak budú dostupné, budú využívané aj ďalšie geomorfologické údaje.

Testovanie na týchto sub-povodiach je zamerané najmä na:

- schopnosť adaptácie systému modelov WEAP-MODFLOW na súčasnú metodiku VHB,
- náročnosť na vstupné údaje modelu MODFLOW, ich spracovanie, automatizácia a výsledná kvalita,
- náročnosť modelu MODFLOW a následne súbežného systému modelov WEAP-MODFLOW na výpočtovú techniku.

V prípade úspešného vytvorenia modelu bude následné zameranie sústredené na spôsob kvantifikácie jednotlivých zložiek hydrologického režimu, ktorého cieľom bude najmä kvantifikácia infiltrácie z povodia do podzemných vôd.

4 Záver

Cieľom tohto príspevku bolo stručné zhodnotenie doterajšieho postupu v modelovaní kvantitatívnej vodohospodárskej bilancie povrchových vôd a súčasného smerovania výskumu v tejto oblasti. Toto modelovanie ma predovšetkým slúžiť ako výskum pre prípad budúceho zvyšovania nárokov na metodiku VHB. Na nedostatky a problémy vynárajúce sa v dôsledku snahy o implementáciu súčasnej metodiky VHB pri modelovaní v modeli WEAP boli navrhnuté opatrenia a riešenia, ktoré sú predmetom budúceho výskumu, pričom zároveň majú potenciál vysoko skvalitniť výstupy VHB a taktiež rozšíriť ich množstvo.

Integrácia modelov WEAP a MODFLOW do systému WEAP-MODFLOW je krokom k vysporiadaniu sa nie len s otázkou zabezpečenia odberov podzemných vôd v modeli povrchových vôd, do ktorých na základe metodiky VHB vstupujú, ale taktiež sa priblížiť a prípadne odpovedať na otázku, aký je ich skutočný vplyv na povrchové vody, a to v čase, priestore aj množstve.

Literatúra

AQUATOOL, 2021. *AQUATOOL user manual*. © 2021. [online]. [cit. 22.10.2021]. Dostupné z: <https://aquatool.webs.upv.es/aqt/en/manuals/>

BGR, 2021. *BGR user manual*. © 2021. [online]. [cit. 7.7.2021]. Dostupné z: https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/TZ/Acsad_dss/dss_fb_en.html

ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV (ČHMÚ), 2020. Hydrologická bilance množství a jakosti vody České republiky, 2019. chmi.cz [online]. © 2019 Český hydrometeorologický ústav, Praha. Posledná zmena 08.10.2020 16:43 [cit. 22.10.2021]. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/opzv/bilance/bilance.htm>

DELTA RES, 2021. *Why RIBASIM*. [online]. [cit. 22.10.2021]. Dostupné z: <https://oss.deltares.nl/web/ribasim/why-ribasim>

DHI, 2021. *MIKE HYDRO basin user guide*. © 2021. [online]. [cit. 22.10.2021]. Dostupné z: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2020/MIKE_HYDRO.htm

EK, 2015. European Commission (Ed.) *Guidance document on the application of water balances for supporting the implementation of the WFD_Report_2015*. Technical Report - 2015 - 090. Final – Version 6.1 – 18/05/2015. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg, ISBN 978-92-79-52021-1

HERRMANN, Frank, a kol., 2017. Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA. *Hydrologische Wasserbewirtschaftung*, 57: 206-224. Dostupné z: http://doi.bafg.de/HyWa/2013/HyWa_2013,5_2.pdf

SEI, 2021. *WEAP Water Evaluation And Planning System user guide*. © 2021. [online]. [cit. 22.10.2021]. Dostupné z: https://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf

SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV, 2020. Vodohospodárska bilancia množstva povrchových vôd za rok 2019. Shmu.sk [online]. © 2019 Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava. Posledná zmena 28.12.2020 19:15 [cit. 22.10.2021]. Dostupné z: <http://www.shmu.sk/sk/?page=1834>