

# Porovnanie modulov na simuláciu povrchového toku v modeli MODFLOW

Ing. Petr Dušek , Ústav hydrologie SAV, Dúbravská cesta 9, 841 01, Bratislava

## Annotation

The aim of this article is the comparison of input options of river boundary condition to the three dimensional numerical simulation model of groundwater flow MODFLOW. The water level in the stream flowing through the territory of the hydrogeological layer can be computed via three built-in modules: RIV (River), STR (Stream) and SFR (Streamflow – Routing Package). We used MODFLOW to simulate idealized aquifer and stream. The differences between computed groundwater table showed to be minimal, thus in case of modules STR and SFR they are equally usable as using module RIV with external one or two dimensional simulation of surface water flow, which is more time-consuming process. However, this applies only to idealized, simplified conditions of the modeled environment. For more complex simulation of flow in streams with irregular structure of the riverbed is necessary to use either an external simulation or use the SFR module, which includes the possibility to enter a more complex hydraulic flow parameters in the model.

## Key words

surface water, groundwater, interaction, numerical simulation, flow regime

## Abstract

Water table regime is an important factor for simulation of surface water – groundwater interaction. Stream water table elevation is influenced by the stream morphology, its width and depth, by obstacles, the amount of riverbed sediments and also by the volume of water flowing through the watercourse. In case of modeling interaction with time – dependent changes in surface water level or when there is no possibility to measure water table directly it is needed to create a simulation of surface water table regime as well. With integrated numerical simulations it is possible to directly compute surface water stages as a part of groundwater simulation, or a specialized software can be used to simulate surface water regime independently of the main groundwater numerical simulation. The aim of this paper is to compare these solutions for the three - dimensional numerical model MODFLOW (Harbaugh, et. al., 2000). There are three integrated modules that are used to represent the river boundary condition in the model. The modules are RIV (River) (McDonald, et. al., 1988), STR (Stream) (Harbaugh, et. al., 2000) a SFR (Streamflow – Routing) (Prudic, et. al., 2004). Simulation of the simplified theoretical aquifer and stream flowing through showed that the differences between the computed groundwater water tables are minimal amongst all three possible solutions. Modules STR and SFR are therefore equally usable as the more time-consuming process of coupling separate surface water regime simulation (HEC-RAS, MIKE SHE, etc.) and groundwater regime simulation. In more complex simulations it is recommended to use either separate simulation of surface water regime or the SFR module, where more complex parameters of the stream can be specified. The STR module is therefore not recommended for complex surface water regime simulation, because the characteristics of the stream are very simplified. Among the advantages of the SFR module is the possibility of simulating unsaturated flow below the stream, e. g. stream that is disconnected from the groundwater table in version SFR2 (Niswonger, et. al., 2010). This module is an integral component of the MODFLOW simulation and its graphical user interfaces.

## Úvod

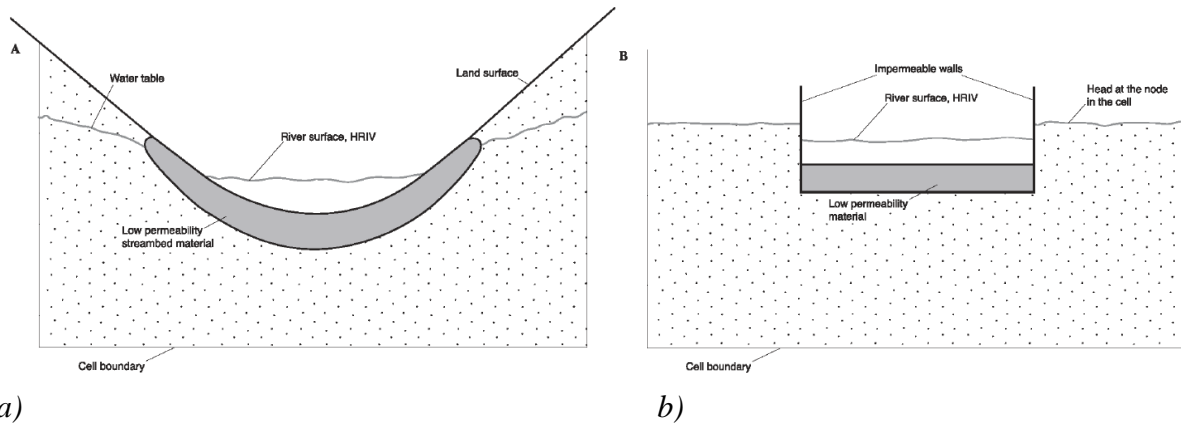
Výška hladiny v toku je dôležitým parametrom pre simuláciu interakcie povrchovej a podzemnej vody, medzi tokom a zvodnencom. Výška hladiny v toku je ovplyvnená stavbou koryta toku, jeho šírkou a hĺbkou, reguláciou toku, napr. vzdutím vodným dielom, množstvom sedimentu v koryte, a v neposlednom rade samotným prietokom. V prípade modelovania interakcie s rozkyvom hladín v toku, resp. pri modelovaní pre konkrétne časové úseky, a kde nie je možné hladiny v toku merať priamo, je potrebné prúdenie vody v toku modelovať na základe spomínaných parametrov toku a následne tak získať obraz o priebehu hladín v toku. V prípade integrovaných numerických modelov je možné tento úkon vykonať priamo ako krok v rámci výpočtu priebehu hladín podzemnej vody vo zvodnení alebo samostatne s využitím špecializovaných programov na simuláciu prúdenia vody. Cieľom práce je porovnať tieto možnosti v rámci numerického modelu MODFLOW (Harbaugh, et. al., 2000), ktorý obsahuje tri špecifické moduly, ktoré slúžia na reprezentáciu okrajovej podmienky toku.

## Metódy výpočtu prúdenia vody v povrchových tokoch

MODFLOW je trojdimenzionálny numerický model, ktorý slúži na simuláciu prúdenia podzemnej vody v zvodnení alebo zvodnencoch a zároveň slúži ako nástroj na kvantifikáciu interakcie medzi tokom a zvodnencom. Pre numerické vyjadrenie toku slúžia tri moduly, pomocou ktorých je v modeli definovaná okrajová podmienka toku. Jedná sa o moduly RIV (McDonald, et. al., 1988), STR (Harbaugh, et. al., 2000) a SFR1 (Prudic, et. al., 2004), resp. SFR2 (Niswonger, et. al., 2010).

### RIV modul

Vodné toky môžu dotovať zvodnenec vodou, resp. drénovať vodu zo zvodnenca do toku, v závislosti od gradientu medzi tokom a režimom podzemnej vody. Cieľom modulu River (RIV) (McDonald, et. al., 1988) je simulovať vplyv prúdenia v povrchovom toku na interakciu medzi tokom a zvodnencom. Je preto potrebné určiť parametre reprezentujúce priesak, ktoré vstupujú do rovnice prúdenia podzemnej vody pre každú bunku siete modelu, ktorá je ovplyvnená priesakom medzi tokom a zvodnencom. Priesak medzi tokom a zvodnencom je simulovaný medzi každým úsekom toku a bunkou modelu, v ktorej sa daný úsek nachádza. Balík RIV nevykonáva simuláciu samotného prúdenia vody v toku, simuluje iba priesak medzi tokom a zvodnencom. Pre model MODFLOW sú dostupné ďalšie moduly, ktoré simulujú zároveň prúdenie v toku a priesak, menovite moduly Stream (STR1) (Prudic, et. al., 2004) a moduly Stream – Flow Routing (SFR1, SFR2) (Prudic, et. al., 2004). Poradie číslovania úsekov toku preto nemá vplyv na výpočty simulácie, priesak v module RIV je samostatne počítaný pre každý úsek toku osobitne. Rez na obrázku 1 zobrazuje bunku modelu ktorá obsahuje úsek toku. V zjednodušenom systéme (Obr. 1a) je povrchová voda oddelená od podzemnej vody vrstvou dnového sedimentu toku s nízkym koeficientom nasýtenej hydraulickéj vodivosti. Idealizáciou systému (Obr. 1b) je prepojenie toku a zvodnenca reprezentované jednoduchým parametrom koeficientu pretekania, pričom cez dnový sediment prebieha jednorozmerný priesak.



Obr. 1 a) Rez zvodnenca a rieky, b) konceptualizácia prepojenia zvodnenca a rieky v modeli MODFLOW (McDonald, Harbaugh, 1988)

Predpokladá sa, že výrazné straty vo výške hladiny prebiehajú iba cez menej priepustnú vrstvu dnového sedimentu. Zároveň sa predpokladá, že bunka modelu pod menej priepustným sedimentom zostáva plne saturovaná, to znamená, že výška hladiny podzemnej vody neklesá pod dno koryta. S prihliadnutím na tieto predpoklady sa priesak medzi tokom a zvodnencom vypočíta nasledovne:

$$QRIV_n = CRIV_n (HRIV_n - h_{i,j,k}) \quad (1),$$

kde

$QRIV_n$  – priesak medzi tokom a zvodnencom, v kladnej hodnote smerom do zvodnenca,

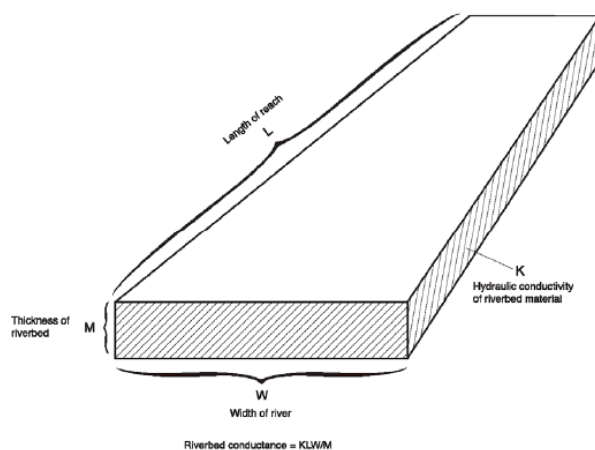
$CRIV_n$  – koeficient pretekania medzi tokom a zvodnencom,

$HRIV_n$  – výška hladiny v povrchovom toku,

$h_{i,j,k}$  – výška hladiny podzemnej vody v bunke modelu pod úsekom toku.

Obr. 2 zobrazuje izolovaný dnový sediment a parametre vstupujúce do výpočtu koeficientu pretekania v jednotlivých bunkách modelu. Dĺžka ( $L_n$ ) dnového sedimentu je dĺžka úseku rieky prechádzajúceho bunkou modelu.  $W_n$  je šírka toku,  $M_n$  je hrúbka dnového sedimentu a  $K_n$  je koeficient nasýtenej hydraulickej vodivosti dnového sedimentu. Koeficient pretekania sa následne vypočíta ako

$$CRIV_n = \frac{K_n L_n W_n}{M_n} \quad (2)$$



Obr. 2 Konceptualizácia dnového sedimentu a koeficientu pretekania v bunke modelu

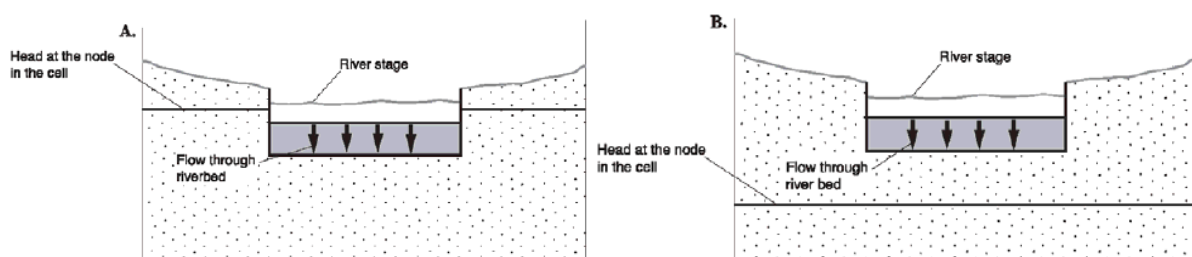
Vzťah (1) poskytuje prijateľnú aproximáciu interakcie toku a zvodnenca pri určitom rozptyle hladín podzemnej vody. Vo väčšine prípadov, ak hladina podzemnej vody v zvodnenci klesne pod určitú hodnotu, priesak z rieky prestane byť závislý na výške hladiny v zvodnenci. Toto je možné ilustrovať pomocou predchádzajúceho konceptu zjednodušenia málo priepustnej vrstvy dnového sedimentu. Obr. 3a zobrazuje situáciu opísanú vo vzťahu (1); výška hladiny podzemnej vody je vyššie ako koryto toku, priesak cez vrstvu sedimentu je priamo úmerný rozdielu hladín v rieke a v zvodnenci. Na obrázku 3b hladina podzemnej vody klesla pod dno koryta, pričom vzniká nenasýtená vrstva v zvodnenci pod dnom koryta. Keďže MODFLOW uvažuje s nasýteným prostredím v bunke modelu, výška hladiny podzemnej vody bude rovná kóte dna koryta. Ak túto výšku označíme ako  $RBOT_n$ , priesak cez dnový sediment bude

$$QRIV_n = CRIV_n(HRIV_n - RBOT_n) \quad (3),$$

kde  $QRIV_n$ ,  $CRIV_n$ , a  $HRIV_n$  sú definované rovnako ako pri vzťahu (1). Pokiaľ hladina podzemnej vody klesne pod dno koryta  $RBOT_n$ , následne nevzniká prírastok prietoku cez dnový sediment do zvodnenca, priesak zostane na konštantnej hodnote, dokým sa poloha hladiny podzemnej vody opäť nezvýši nad kótu  $RBOT_n$ . Tento prístup k výpočtu je vyjadrený pomocou vzťahov ako:

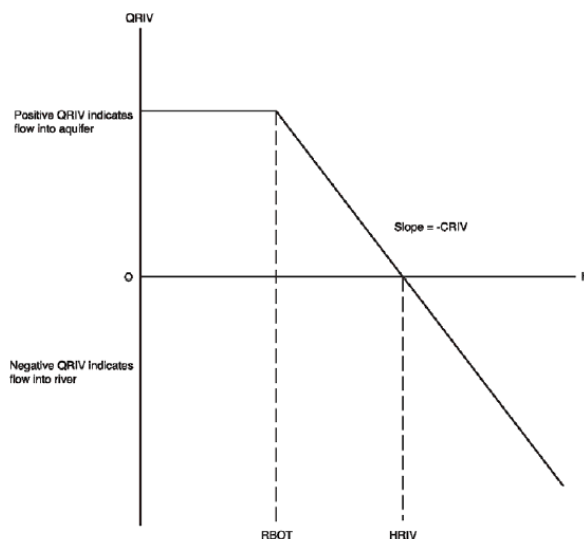
$$QRIV_n = CRIV_n(HRIV_n - h_{i,j,k}), \quad h_{i,j,k} > RBOT_n \quad (4)$$

$$QRIV_n = CRIV_n(HRIV_n - RBOT_n), \quad h_{i,j,k} < RBOT_n \quad (5)$$



Obr. 3 Vzťah medzi výškou hladiny pri dne koryta a výškou v bunke modelu. a) Výška hladiny v bunke modelu sa rovná výške HPV, b) Výška hladiny v bunke modelu sa rovná dnu koryta (Upravené podľa McDonald, Harbaugh, 1988)

Obr. 4 zobrazuje graf priesaku cez dnový sediment toku. Priesak je funkcia výšky hladiny podzemnej vody ( $h$ ), v bunke modelu ktorá obsahuje úsek toku. Priesak je nulový, ak je výška HPV rovnaká ako výška hladiny v toku ( $HRIV_n$ ). Pre výšku hladiny podzemnej vody  $h$ , ktorá je vyššia ako  $HRIV_n$  voda zo zvodnenca infiltruje do rieky, pričom je táto hodnota priesaku uvedená ako negatívna (zvodnenec stráca vodu do rieky). Pri hodnotách  $h$  nižších ako  $HRIV_n$  je priesak kladný, zvodnenec získava vodu z rieky. Kladný priesak narastá lineárne s poklesom  $h$ , pokiaľ  $h$  nedosiahne  $RBOT_n$ . Po dosiahnutí  $RBOT_n$  zostáva hodnota priesaku konštantná. Koncept interakcie povrchových vôd a podzemnej vody v modeli MODFLOW predpokladá, že interakcia je nezávislá od polohy úseku toku v bunke modelu, a že výška hladiny v toku je konštantná v celom úseku toku a časovom kroku. Je tu teda predpoklad, že prúdenie v toku sa výrazne nemení v rámci jedného časového kroku, napr. tok náhle nevyschne alebo sa náhle neprelejú bermy toku, resp. budú tieto udalosti natoľko krátke že neovplyvnia interakciu medzi tokom a zvodnencom.



Obr. 4 Graf priesaku z rieky do zvodnenca cez dnový sediment

### STR modul

Modul STR (Stream) (Harbaugh, et. al., 2000) simuluje vplyv toku na zvodnenec, a zároveň simuluje prúdenie povrchovej vody v toku. Je evolúciou modulu RIV a predchodcom modulu SFR. Modul STR využíva zjednodušené hydraulické parametre toku a Manningov vzťah pre výpočet výšky hladiny v toku. Prúdenie v povrchovom toku v modeli MODFLOW je špecifikované zadaným prietokom pre prvý úsek toku, ktorý vstupuje do modelu. Prietok v nasledujúcich úsekoch je vypočítaný ako prietok z predchádzajúceho úseku s pripočítaním alebo odčítaním priesaku do / zo zvodnenca. Schéma výpočtu uvažuje s predpokladom, že prítok v toku do modelu je okamžite k dispozícii ďalšiemu úseku toku v smere prúdenia. Tento predpoklad je akceptovateľný vzhľadom k relatívne pomalému prúdeniu podzemnej vody. Prítok do časti toku, ktorý je zložený z viacerých prítokov je vypočítaný ako súčet prietoku posledných úsekov predchádzajúcich segmentov toku. V prípade odtoku do nového segmentu toku je hodnota prietoku odčítaná od celkového prietoku v toku. V prípade, ak je hodnota prietoku pre odtok väčšia ako hodnota prietoku v hlavnom toku, hodnota odtoku zostáva nulová. Ak je priesak v úseku toku väčší ako prietok v úseku, tok môže vyschnúť, pričom prietok bude nulový. Nasledujúce úseky budú mať rovnako nulový prietok, pričom priesak do zvodnenca je rovnako nulový. Priesak zo zvodnenca do toku je možný aj pri suchom toku.

### Výpočet výšky hladiny v toku

Modul STR obsahuje možnosť výpočtu výšky hladiny v toku v každom úseku. Ak je táto možnosť využitá, výška hladiny je počítaná s predpokladom nestlačiteľného ustáleného prúdenia v toku pri konštantnej hĺbke za použitia Manningovho vzťahu (Ozbilgin, Dickerman, 1984):

$$Q = \frac{1}{n} (AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}) \quad (6),$$

kde  $Q$  – prietok, ( $m^3/s$ );

$n$  – Manningov koeficient drsnosti, bezrozmerný;

$A$  – plocha toku v reze, ( $m^2$ );

$R$  – hydraulický polomer, (m);

$S$  – sklon hydraulického gradientu, v prípade konštantnej výšky hladiny, je rovný sklonu toku, (m/m).

Plocha toku v reze a hydraulický polomer pre obdĺžnikový kanál sú:

$$A = wd \quad (7)$$

$$R = \frac{wd}{w+2d} \quad (8),$$

kde  $d$  = hĺbka vody v toku, (m),

$w$  = šírka toku, (m).

### SFR modul

SFR (Streamflow-Routing Package) (Prudic, et. al., 2004) modul je modifikácia RIV modulu (McDonald, et. al., 1988) a je navrhnutý ako súčasť balíka MODFLOW. Modul je navrhnutý pre smerovanie prietoku cez jednu alebo viac riek, kanálov, resp. iných líniových tokov, spolu s výpočtom priesaku medzi tokom a zvodnencom. Balík nahrádza staršiu verziu pod názvom STR (Stream). SFR je navrhnutý simulovať interakciu povrchovej a podzemnej vody, a zároveň simulovať priebeh toku a prenos zlúčenín v systéme povrchových tokov. Nová verzia prináša zvýšenú efektívnosť pri zadávaní vstupných dát a ponúka viac možností v prípade výpočtu šírky a hĺbky povrchového toku (tokov). SFR nahrádza starší, ale stále používaný modul Stream (STR), pričom hlavný rozdiel vo výpočtoch spočíva v mieste výpočtu výšky hladiny v toku; v prípade SFR sa jedná o stredový bod úseku toku, na rozdiel od počiatočného bodu úseku toku pri STR module. Tento rozdielny prístup umožňuje dodatočne počítať s vodou z odtoku, zrážok a evapotranspirácie v rámci jedného úseku toku. SFR modul má 5 možností počítania hĺbky hladiny v toku a 4 možnosti počítania na odbočeniach z toku. Možnosti sú: špecifikovaná hladina v toku, výpočet pomocou Manningovho vzťahu (pre obdĺžnikový rez toku, resp. pre tok špecifikovaný 8 – bodovým rezom), resp. konzumpčnou krivkou. Každý segment toku môže mať rozdielne možnosti výpočtu hladiny. Keďže omočený obvod aj šírka toku sú rátané v rámci výpočtu, nie je potrebné koeficient pretekania dnového sedimentu počítať osobitne pri zmene prietoku.

### Porovnanie výstupov simulácií za použitia modulov RIV, STR a SFR

Pre porovnanie výstupov a možných rozdielov v simuláciách interakcie toku a zvodnenca za použitia modulov RIV, STR a SFR boli vytvorené tri simulácie idealizovaného prostredia v prostredí MODFLOW. Parametre simulovaného prostredia zvodnenca sú nasledovné (Tab. 1):

Šírka	1000 m
Dĺžka	1000 m
Mocnosť zvodnenca	60 – 90 m
Výška terénu	110 – 140 m
Koeficient nasýtenej hydraulickej vodivosti zvodnenca	$5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Tab.1 Parametre zvodnenca

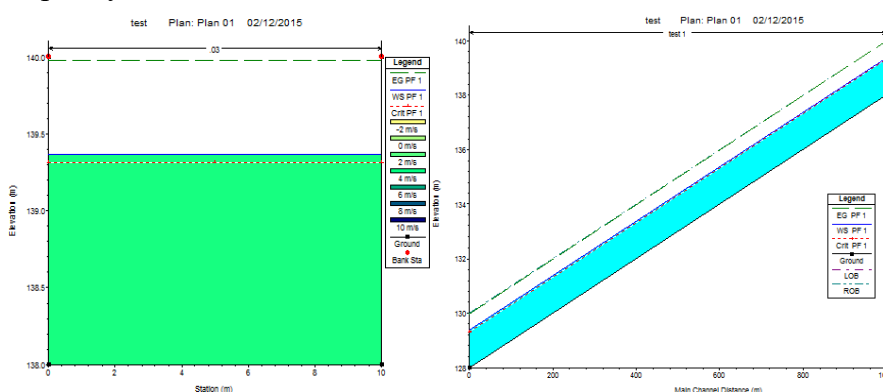
Tok prechádzajúci stredom územia vo vertikálnom smere má nasledovné parametre (Tab. 2):

Šírka toku	10 m
Dĺžka toku	1000 m
Hĺbka toku	2 m
Hrúbka dnového sedimentu	0,5 m
Výška hladiny v toku	1,36 m

Prietok	$50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Koeficient nasýtenej hydraulickkej vodivosti dnového sedimentu	$5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Tab. 2 Parametre toku

V prípade využitia modulu RIV bolo potrebné navrhovaný tok modelovať pomocou modelu prúdenia v povrchovom toku HEC – RAS (USACE, 2010). HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) je jednodimenzionálny program, v ktorom je hladinový režim pri ustálenom prúdení počítaný od profilu k profilu riešením rovnice energie iteračným spôsobom. Na matematické modelovanie ustáleného nerovnomerného prúdenia je vhodná metóda výpočtu po úsekoch a jej zodpovedajúce vzťahy medzi hydraulickými charakteristikami na základe zachovania energie. Softvérový balík HEC-RAS sa používa taktiež na modelovanie pohyblivého dna (pohyb sedimentov) a modelovanie teplotných režimov v toku.



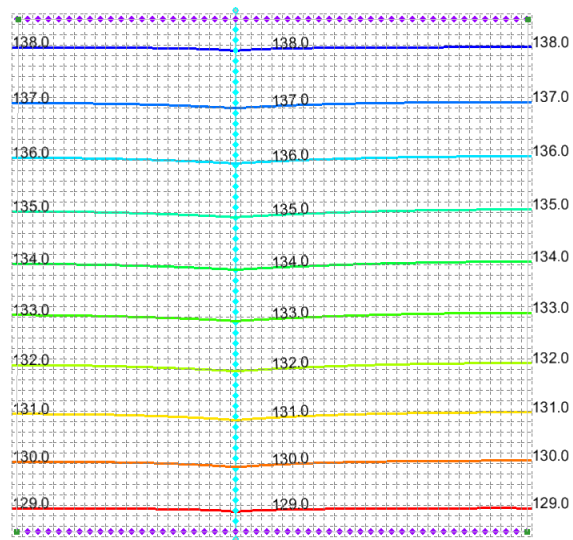
Obr. 5 Priečny a pozdĺžny rez tokom v modeli HEC-RAS

Do modelu v prostredí HEC-RAS, ktorý kopíruje model v prostredí MODFLOW, vstupujú nasledovné parametre (Tab. 3):

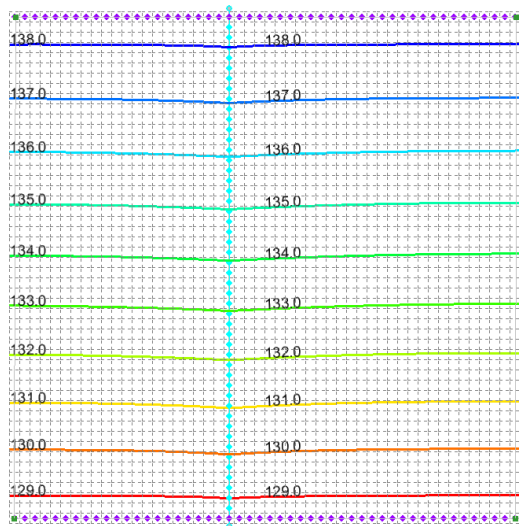
Dĺžka toku	1000 m
Šírka toku	10 m
Hĺbka toku	2 m
Prietok	$50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Sklon toku (okrajová podmienka)	0.01

Tab. 3 Parametre toku v modeli HEC – RAS

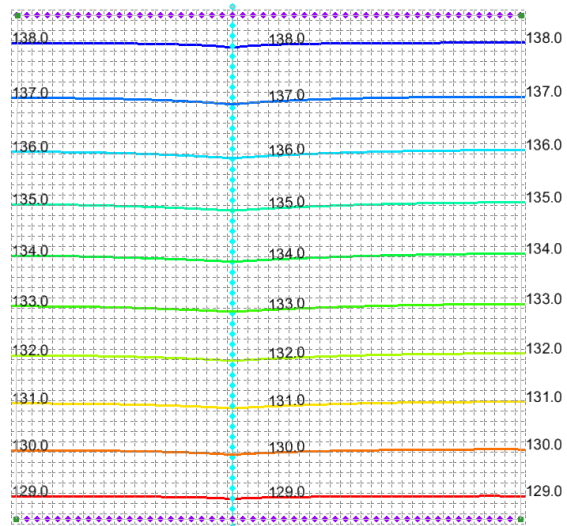
Na základe vstupných parametrov bol následne vykonaný výpočet priebehu hladiny, pričom pre prietok  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  bola hladina na úrovni 1,36 m pre oba priečne rezy toku. Pre modul RIV boli do modelu zadané hodnoty prietoku ako aj výšky hladiny. Pre moduly STR a SFR MODFLOW počíta priebeh hladiny samostatne, nebolo teda potrebné do modelu zadávať hodnoty výšky hladiny. Okrajové podmienky v modeli MODFLOW zahŕňali okrem okrajovej podmienky toku aj okrajovú podmienku modelu, t. j. akým spôsobom je špecifikovaný prietok, resp. hladina podzemnej vody na okraji modelu. Pre južnú a severnú stranu modelu (Obr. 7) bola okrajová podmienka špecifikovaná ako konštantná hladina (CHD – specified head) na úrovni 128,5 m n. m. pre južnú stranu modelu a 138,5 m n. m. pre severnú stranu modelu. Hladina podzemnej vody bola teda špecifikovaná ako nižšia ako hladina v toku, pričom hladina podzemnej vody mala zároveň kótu vyššiu ako je kóta dna koryta (128 m n. m. a 138 m n. m.). Vo výstupe simulácie bude teda tok prevažne strácať vodu do zvodnenca. Na obr. 7 sú zobrazené priebehy hladiny podzemnej vody pre všetky tri scenáre.



a)



b)

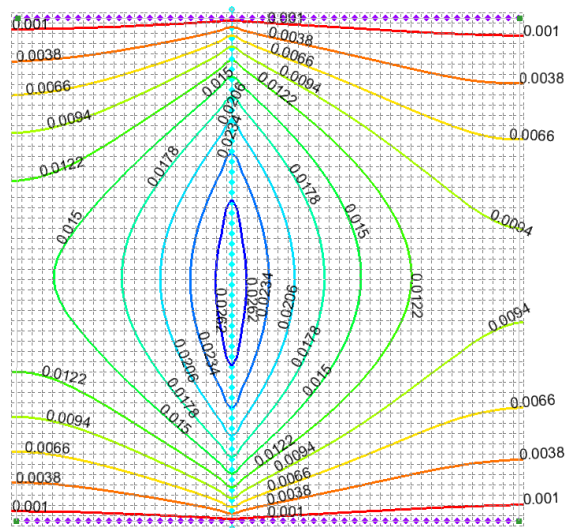


c)

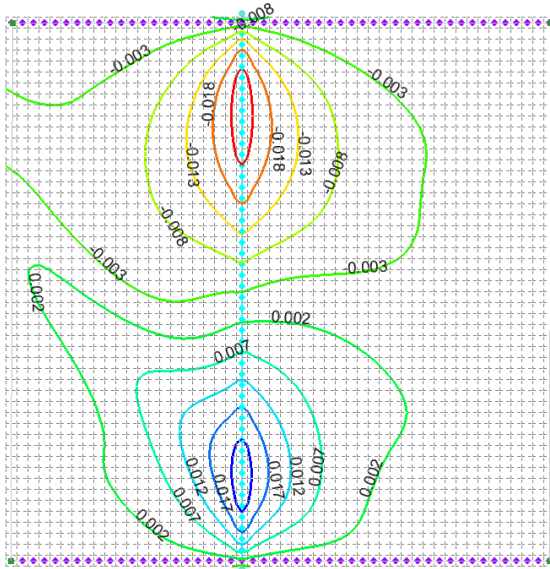
Obr. 7 Porovnanie výstupných hladín podzemnej vody pre moduly a) RIV, b) STR, c) SFR

Rozdiel hladín je minimálny. Rozdiel medzi výstupom pre modul RIV a STR je maximálne 0,03 metra, rozdiel medzi výstupom modulu RIV a SFR je -0,02 m až 0,02 m. Rozdiel vo výstupe hladín modulov STR a SFR je maximálne -0,04 m (obr. 8).

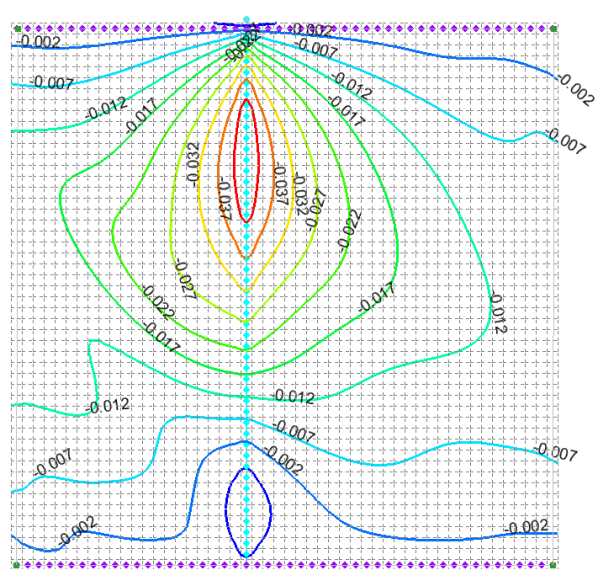




a)



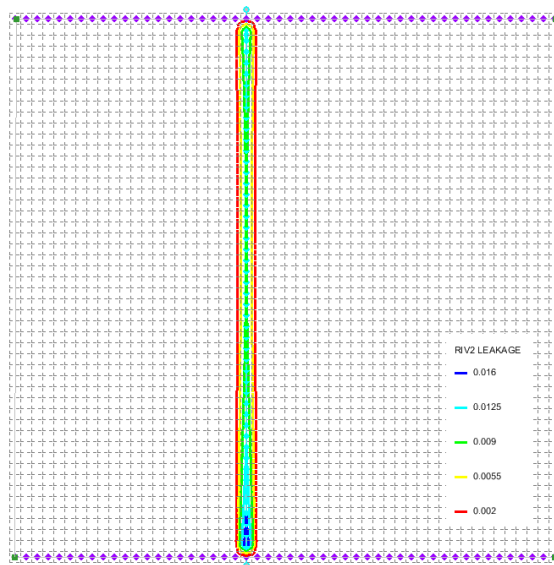
b)



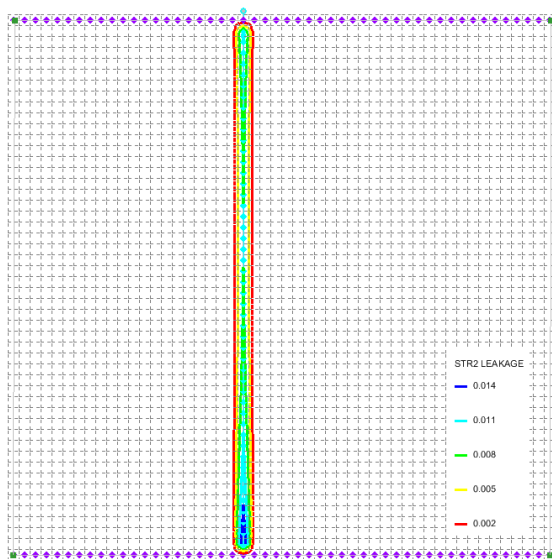
c)

Obr. 8 Rozdiely v depresii hladiny v okolí toku a) RIV a STR, b) RIV a SFR, c) STR a SFR

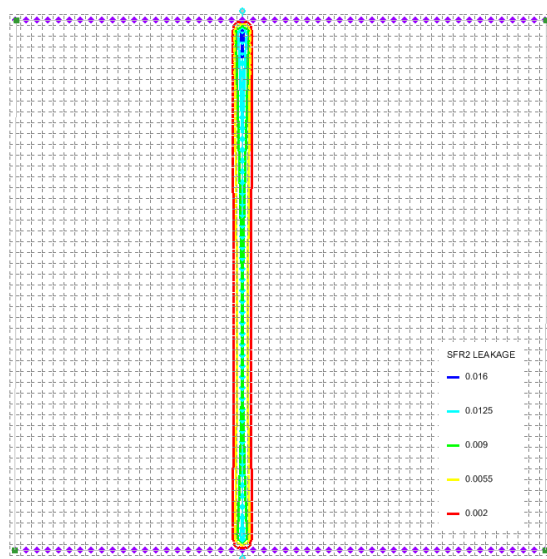
Priesak vody z toku do zvodnenca je v modeli MODFLOW špecifikovaný súbormi RIVER LEAKAGE (pre modul RIV), resp. súborom STREAM LEAKAGE (pre moduly STR a SFR). Tieto súbory predstavujú grafické vyjadrenie interakcie medzi tokom a zvodnencom (obr. 9).



a)



b)



c)

Obr. 9 Priesak cez dnový sediment pre moduly a) RIV, b) STR, c) SFR

Numerické vyjadrenie interakcie medzi tokom a zvodnencom je vyjadrené bilanciou prítoku a odtoku pre jednotlivé bunky modelu a rovnako aj pre celý model. Táto bilancia sa v modeli MODFLOW nazýva FLOW BUDGET (Harbaugh, et. al., 2000) (Tab. 4 – 6).

Sources/Sinks	Flow IN ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Flow OUT ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
CONSTANT HEAD	0.0686	-0.1060
RIVER LEAKAGE	<b>0.5399</b>	0.0
Total Source/Sink	0.6085	-0.1060

Tab. 4 MODFLOW Flow Budget pre RIV modul

Sources/Sinks	Flow IN ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	Flow OUT ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
CONSTANT HEAD	0.0705	-0.1039
STREAM LEAKAGE	<b>0.4800</b>	0.0
Total Source/Sink	0.5505	-0.1039

Tab. 5 MODFLOW Flow Budget pre STR modul

Sources/Sinks	Flow IN (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Flow OUT (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
CONSTANT HEAD	0.0643	-0.1024
STRAM LEAKAGE	<b>0.5473</b>	0.0
Total Source/Sink	0.6116	-0.1024

*Tab. 6 MODFLOW Flow Budget pre SFR modul*

Podľa tabuliek 4 – 6 je opätovne rozdiel v priesaku cez dnový sediment minimálny. Pri hodnotách RIVER LEAKAGE, resp. STREAM LEAKAGE je pre celý tok (50 buniek modelu) rozsah hodnôt celkového priesaku 0,48 až 0,55 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

## Záver

Simulácia zjednodušeného idealizovaného zvodnenca a toku, ktorý ním preteká preukázala, že rozdiely v modelovaných hladinách podzemnej vody pre rôzne moduly výpočtu priebehu hladiny v toku sú minimálne, a teda sú v prípade modulov STR a SFR použiteľné rovnako ako pracnejší, a hlavne časovo náročnejší, výpočet pomocou modulu RIV za využitia externého 1D alebo 2D modelovacieho prostredia na simuláciu priebehu hladiny v toku (HEC – RAS, MIKE SHE a pod.). Toto tvrdenie však platí len pre spomínané idealizované prostredie. V prípade zložitejších simulácií tokov s nepravidelnou stavbou koryta je potrebné využiť, buď externú simuláciu priebehu hladiny v toku, resp. modul SFR, ktorý zahŕňa možnosť zadania zložitejších hydraulických parametrov toku do modelu. Modul STR je v takom prípade nevhodný na výpočet vzhľadom k možnosti zadávania iba základných parametrov toku, bez možnosti spresnenia, napr. viacbodovými priečnymi rezmi koryta toku a pod. Medzi výhody modulu SFR patrí aj možnosť simulácie nenasýteného prostredia v okolí toku vo verzii modulu SFR2 (Niswonger, et. al., 2010), ktorý je štandardnou súčasťou balíka MODFLOW a aj jeho grafických nadstavieb.

## Literatúra

- Aquaveo (2011): MODFLOW – STR Package, Aquaveo  
 Aquaveo (2011): MODFLOW – SFR2 Package, Aquaveo  
 Aquaveo (2011): MODFLOW – Conceptual Model Approach I, Aquaveo  
 Harbaugh, A. W.: MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process, USGS, 2005  
 Harbaugh, A. W., Banta, Hill, M. C., McDonald, M. G.: MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process, USGS, 2000  
 McDonald, M. G., Harbaugh, A. W.: A Modular Three – Dimensional Finite – Difference Ground – Water Flow Model, USGS, 1988  
 Niswonger R. G., Prudic, D. E.: Documentation of the Streamflow-Routing (SFR2) Package to Include Unsaturated Flow Beneath Streams—A Modification to SFR1, USGS, 2010  
 Ozbilgin, M. M., Dickerman, D. C.: A modification of finite difference model for simulation of two dimensional ground-water flow to include surface – ground water relationships, USGS, Water Resources Investigation Report 83 – 4251, 1984  
 Prudic, D. E., Konikow, L. F., Banta, E. R.: A NEW STREAMFLOW-ROUTING (SFR1) PACKAGE TO SIMULATE STREAM-AQUIFER INTERACTION WITH MODFLOW-2000, USGS, 2004  
 Prudic, D. E.: DOCUMENTATION OF A COMPUTER PROGRAM TO SIMULATE STREAM-AQUIFER RELATIONS USING A MODULAR, FINITE DIFFERENCE, GROUND-WATER FLOW MODEL, USGS, 1989

U.S. Army Corps of Engineers: HEC-RAS River Analysis System, User's Manual, US Army Corps of Engineers, 2010