

PRÍLOHA Č. 9
HYDRAULICKÝ MODEL PRÚDENIA PODZEMNÝCH VÔD
TUNEL HAVRAN

HYDRAULICKÝ MODEL PRÚDENIA PODZEMNÝCH VÔD

Cieľom hydraulického modelovania bolo overenie možného vplyvu tunela Havran na prúdenie podzemných vôd v masívoch vrchov Havran a Ostré v oblasti Šípskej Fatry a predpoklad miery ovplyvnenia výdatností vodných zdrojov v bezprostrednom okolí tunelových rúr. Riešenie diaľničného variantu s tunelom Havran, ktorý je projektovaný od Stankovian po Švošov. Modelované boli tri scenáre a to 1) pôvodný stav, 2) stav ovplyvnený výstavbou tunela bez realizovania opatrení proti drenážnemu účinku tunela, 3) stav s realizáciou navrhnutých opatrení.

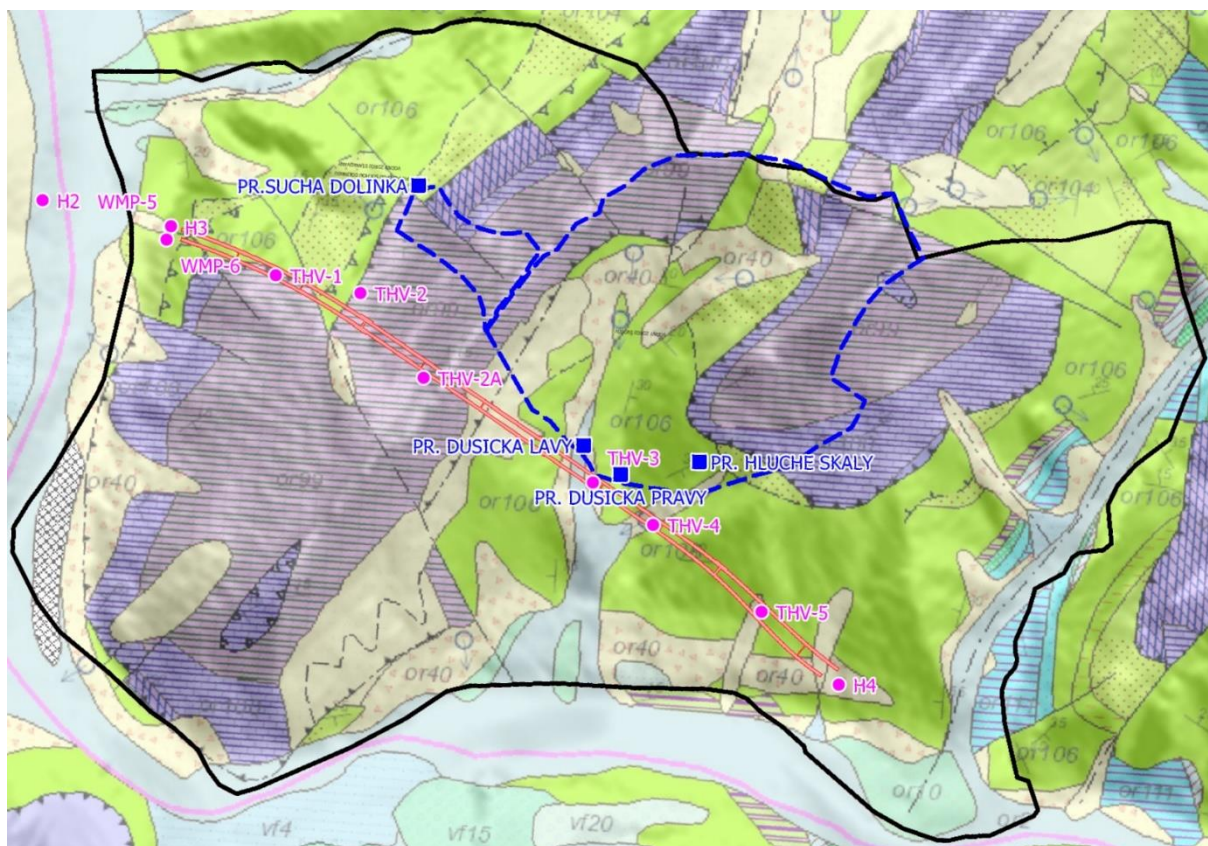
Charakter riešeného problému vyžaduje reálnu aproximáciu geologického prostredia a taktiež geometrie tunelových rúr. Pre modelovanie bol zvolený overený modulárny modelový systém MODFLOW od U.S. Geological Survey (štátna geologická služba USA) v najnovšej verzii č. 6. Modely založené na metóde konečných rozdielov (napr. MODFLOW) správnejšie stanovujú výslednú bilanciu – objemy prúdenia podzemnej vody a tým presnejšie dokážu určiť potencionálne vplyvy či už čerpania alebo drenážneho účinku tunelových rúr vo väčších vzdialenostiach od zdroja vplyvu. Jednoduchším spôsobom sa popisujú okrajové podmienky, napríklad celkový odpor a umiestnenie tunela v horninovom prostredí je nahradené jednou konštantou.

Modelový systém MODFLOW (verzia 6) je sofistikovaný softvérový balík pre dvoj a trojdimenziálne modelovanie prúdenia a transportných procesov v medzizrnovom prostredí v nenasýtených a nasýtených podmienkach. Na aproximovanie rovníc prúdenia a transportu látok je použitá diskretizácia do blokov a metóda konečných rozdielov pre výpočty ustáleného alebo neustáleného prúdenia podzemnej vody alebo transportu látok. Program dovoľuje používať 3 druhy okrajových podmienok, pričom okrajové podmienky 3. druhu sú definované ako závislé od hladiny v príslušnom bloku. Významnou prednosťou numerického modelu MODFLOW 6 je, že umožňuje simuláciu viacerých voľných hladín podzemnej vody nad sebou, širokú škálu okrajových podmienok ako aj modelovanie nepriepustných bariér. Dokonca umožňuje nepravidelné siete a aj škálovanie - kombináciu viacerých modelov do jedného výpočtového celku. V tomto prípade bolo modelované kvázi-ustálené prúdenie podzemnej vody v zóne nasýtenia, s použitím algoritmu IMS (iteratívneho) v Newton-Raphsonovej formulácii rovníc, ktorá umožňuje stabilnejšie výpočty pohybu voľnej hladiny podzemnej vody v modeli.

KONCEPČNÝ MODEL

Modelovanie prúdenia podzemných vôd vychádza z koncepčného modelu, ktorý je definovaný na základe požiadaviek na model, geologické, hydrogeologické a hydrologické podmienky, topografiu, využívanie krajiny a ľudskými zásahmi do hydrologického cyklu. Koncepčný model určuje priestorový, časový a schematizačný rámec, prijatím ktorého zahrnieme všetky relevantné zložky prúdenia podzemných vôd a eliminujeme nepodstatné zložky. Pri spracovaní hydraulického modelu nie je vhodné výrazné zjednodušenie hydrogeologickej situácie a zanedbanie dôležitých prvkov.

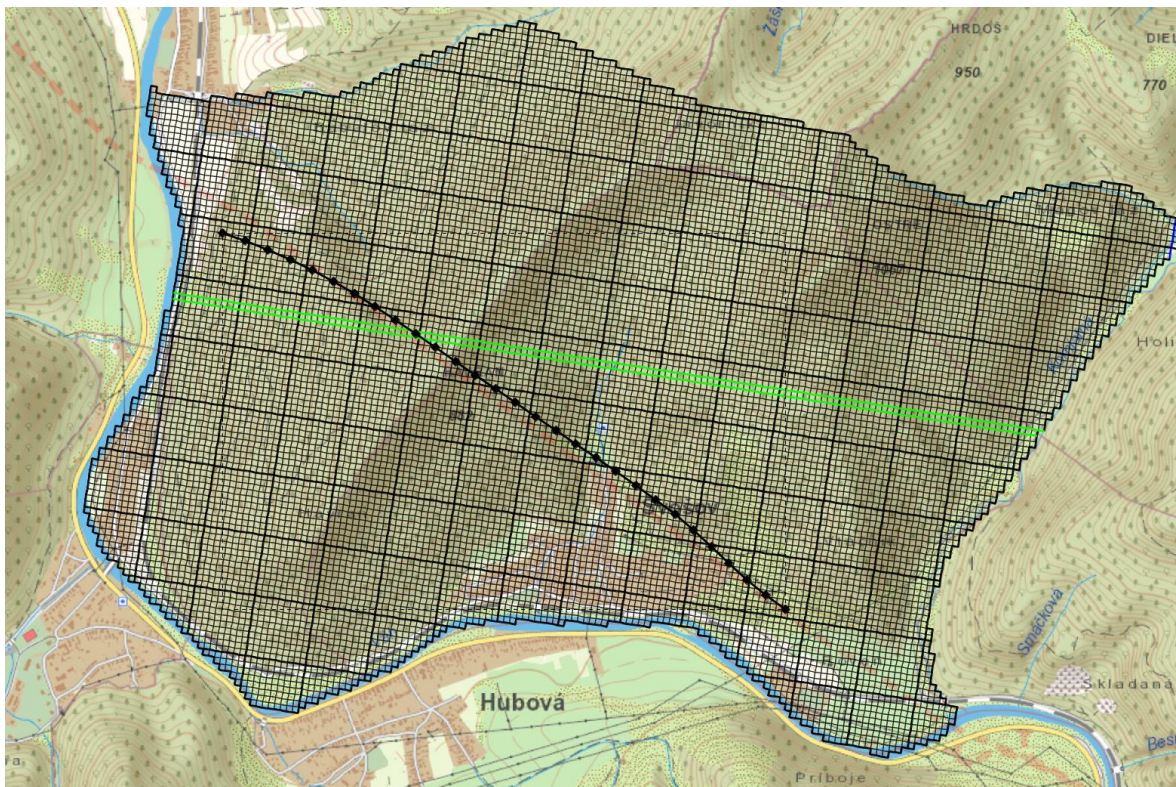
Rozsah územia bol volený tak, aby jeho hranice územia boli jasne hydrogeologicky definovateľné a aby územie zahŕňalo všetky vývery, prestupy a potenciálne miesta infiltrácie podzemných vôd cirkulujúcich v okolí tunela. Vzhľadom k tomu bolo zvolené modelové územie, ktoré zaberá masív Havrana a Ostrého, ohraničené z juhu a západu riekou Váh, z východu potokom Komjatná, zo západu bezmenným potokom ústiace do Stankovian a zo severu orografickou rozvodnicou.



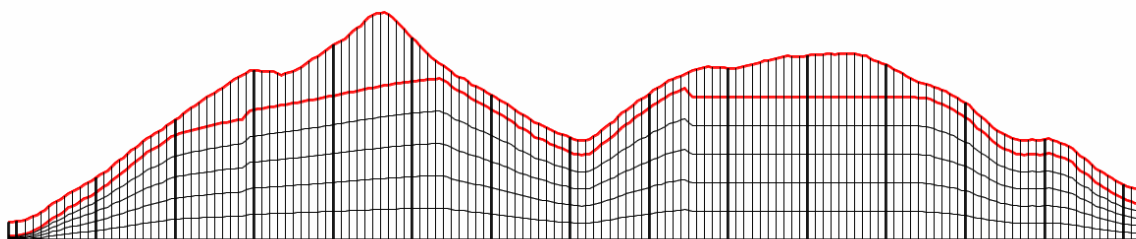
Obr. 1 Situácia hodnotenej trasy tunela Havran na podklade Geologickej mapy Slovenska M 1:50 000 s vyobrazením vrtov (červená) a prameňov s ochrannými pásmami (modrá) v oblasti (Grenčíková et al., 2019).

Z hydrogeologického hľadiska bol model koncipovaný ako dvojvrstvový. Prvá vrstva modelu predstavuje priepustnejšie horniny: ramsauské dolomity a guttensteinské vápence hronika (u ktorých predpokladáme skrasovanie a vyššie priepustnosti), fluválne a deluviálne sedimenty a v prípade slienitých vápencov, slieňovcov a ílovcov mráznického a porubského súvrstvia fatrika vrchnú porušenu vrstvu, na ktorej hrúbku poukazujú merané hladiny podzemnej vody vo vrtoch. Ďalšie vrstvy matematického modelu (druhá hydrogeologická vrstva) predstavujú menej priepustné horniny hlbšie položené mráznického súvrstvia. Tunelové rúry budú podľa predpokladov prechádzať takmer výlučne súvrstviami fatrika, pri ktorom možno očakávať vyššie priepustnosti najmä v okolí portálov tunela a v mieste križovania s bezmenným potokom v Švošove pod vodným zdrojom Dušička.

Výpočtová sieť bola vzhľadom na metódu konečných rozdielov zvolená ako pravidelná s rozmerom jedného bloku 25 x 25 m. Pri zostavovaní modelu boli realizované aj skúšky lokálneho zahustenia siete, ktoré model MOFLOW verzie 6 umožňuje, ale vplyv takéhoto zahustenia na výsledky bol zanedbateľný napriek neúmerne predĺženému času výpočtu a zníženej numerickej stabilite.



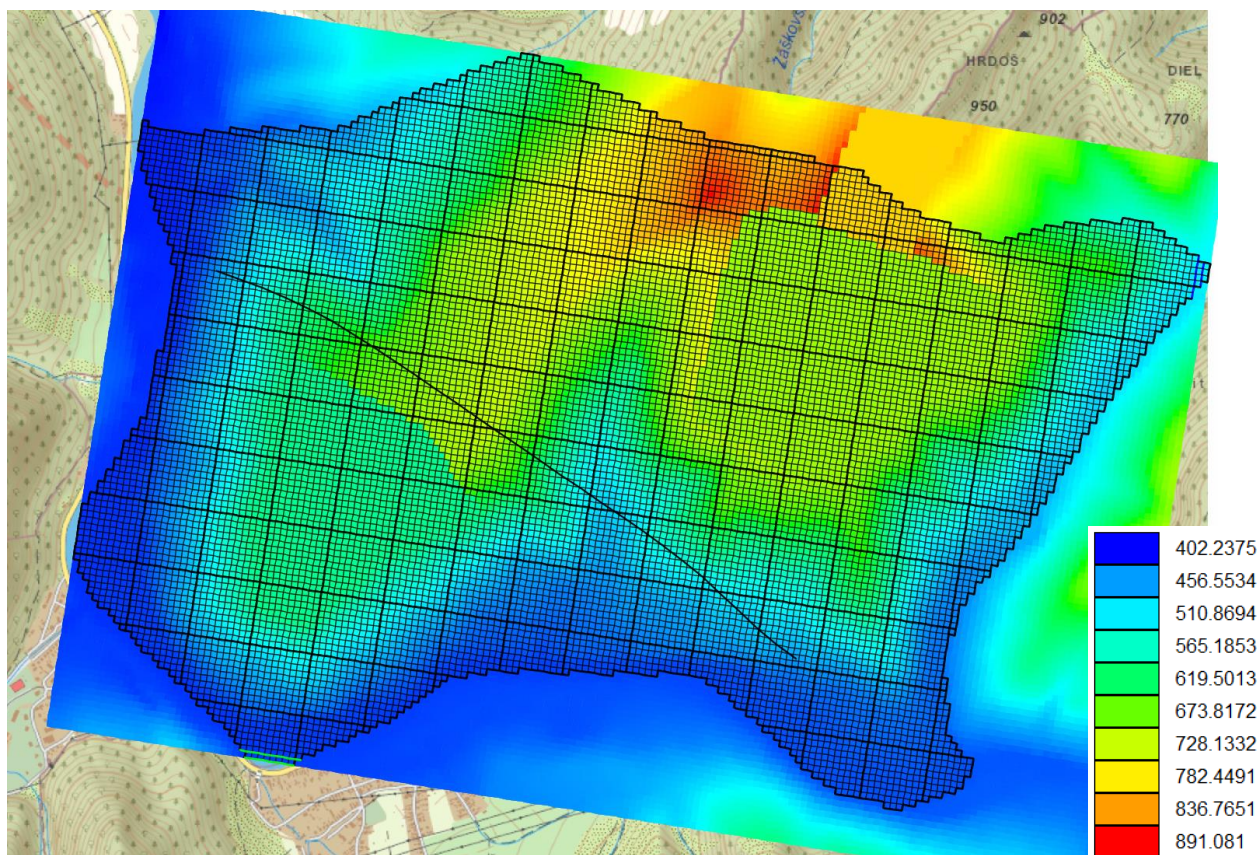
Obr.2 Výpočtová sieť zostaveného a aktualizovaného modelu (lína rezu je označená zelenou).



Obr. 3. Výpočtová sieť modelu v reze – vertikálna reprezentácia jednotlivých vrstiev modelu

Pri analýze monitorovaných piezometrických výšok podzemnej vody boli identifikované dva rôzne režimy prúdenia podzemných vôd. V ramsauských dolomitoch a guttensteinských vápencoch hronika dochádza ku krasovým javom a tohto dôvodu sú tieto horniny relatívne priepustné. Tieto horniny sa v lokalite nachádzajú podľa geologickej mapy (Obr. 1) vo vrcholovej polohe a preto boli zaradené do prvej priepustnejšej vrstvy modelu, kde bola zistená hladina podzemnej vody.

V slieňitých vápencoch, slieňovcoch a ílovcoch mráznického a porubského súvrstvia fatrika prúdi podzemná voda najmä v povrchovej vrstve zvetraného horninového prostredia, vo fluvialných sedimentoch a v deluvialných sedimentoch ak sú prítomné. Táto priepustnejšia vrstva bola do modelu opäť zahrnutá ako prvá priepustná vrstva a nadväzuje na vyššie spomínané dolomity a vápence. Priebeh tejto vrstvy vychádzal z publikovanej geologickej mapy Slovenska a z podrobnej inžinierskogeologickej mapy a pričných rezov trasou tunela Havran tunela zostavenej v rámci podrobného IGHP (Grenčíková et al, 2019). Priebeh tejto vrstvy je označený červenou farbou na Obr. 3 a jej báza je zobrazená na Obr. 4.



Obr. 4 Kóty bázy priepustných sedimentov v modeli – kóty dna zvodnenej povrchovej zóny porušeného fatrika a rozhrania hronika a fatrika (m n.m.).

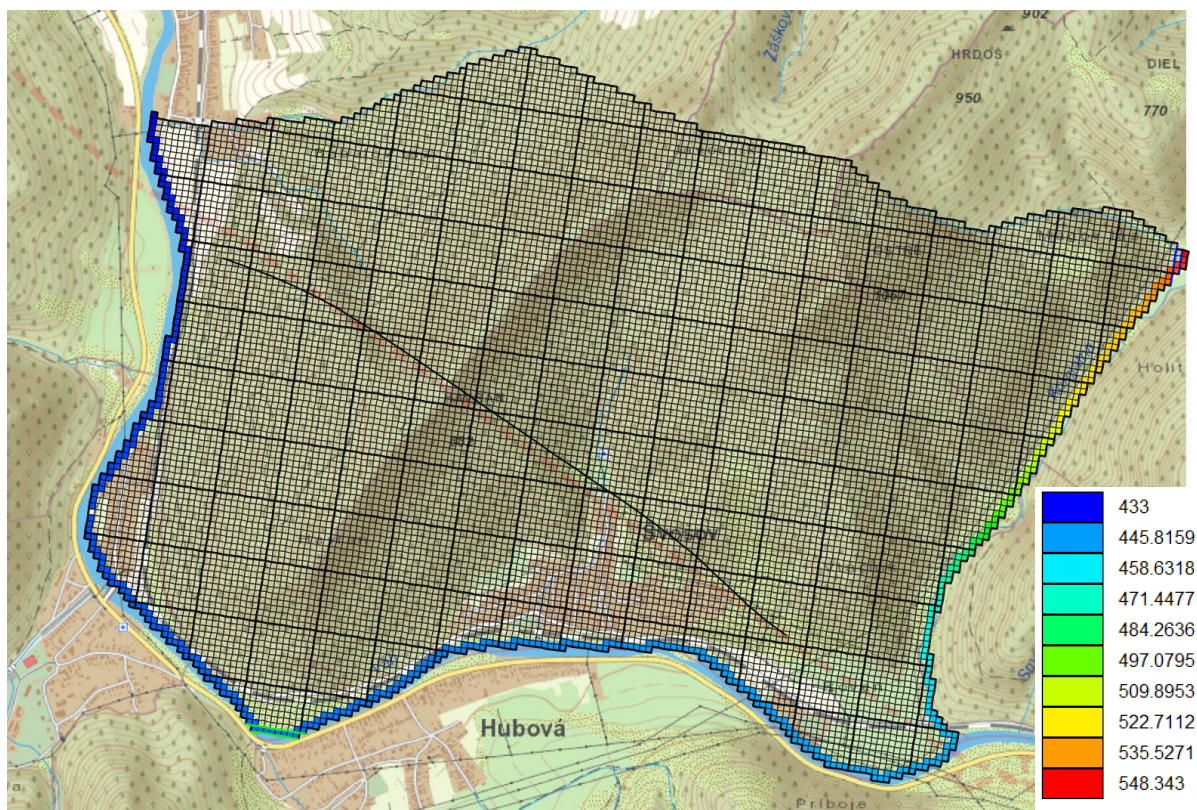
Báza výpočtového modelu (báza 6. výpočtovej vrstvy) je umiestnená na kóte 400 m n. m. a to z dôvodu aby tunelová rúra prechádzala vrstvami modelu v celej jeho dĺžke. Pod touto kótou už nepredpokladáme priepustnosti a prúdenie podzemnej vody, ktoré by dokázali signifikantne vplývať na obeh podzemnej vody v masíve, ktorým prechádza tunel Havran.

OKRAJOVÉ PODMIENKY

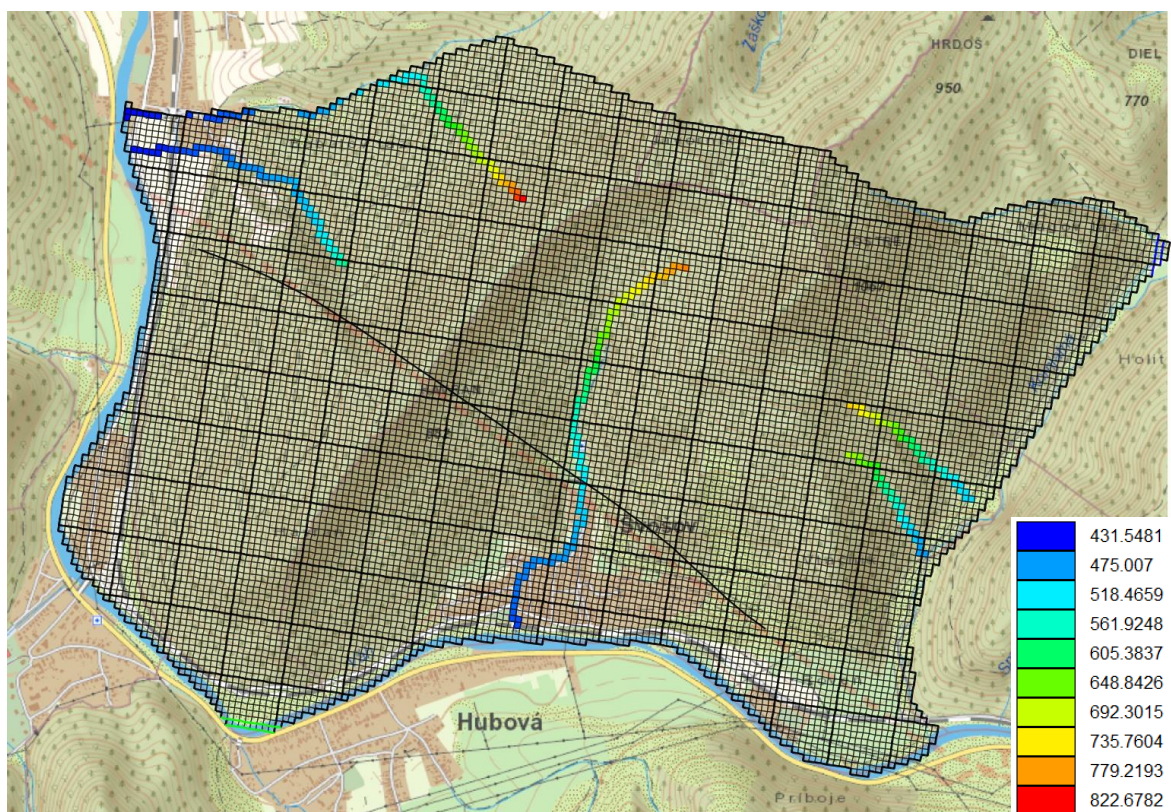
Infiltrácia zrážkových vôd bola riešená okrajovou podmienkou 2. druhu ($Q=\text{konšt.}$) na povrchu terénu. Hodnota konštantného prítoku bola prevzatá z hydrologickej bilancie vypracovanej v rámci podrobného IGHP (Grenčíková et al, 2019).

V mieste hlavných tokov na okraji modelu je vložená okrajová podmienka $H=\text{konštanta}$, ktorá zabezpečuje stabilitu matematického modelu a zabezpečuje odtok „prebytočných“ zrážkových vôd odtekajúcich buď cez zvodnené deluviálne sedimenty, kvartérne fluvialne sedimenty alebo zvetranú vrchnú vrstvu menej priepustných sedimentov mimo model (Obr. 5).

V oblastiach výverov podzemných vôd do prameňov a potokov bola definovaná okrajová podmienka drenážneho prvku tesne pod terénom s limitovaním prietoku smerom mimo model, čím bolo simulované drénovanie podzemných vôd v závislosti na piezometrickej výške (Obr. 6).



Obr. 5 Okrajová podmienka 1. druhu v miestach vybraných tokov – $H=\text{konšt.}$ (m n.m.)



Obr. 6 Okrajová podmienka 3. druhu $Q=f(H)$ v miestach menších tokov – kóty dna (m n.m.)

KALIBRÁCIA

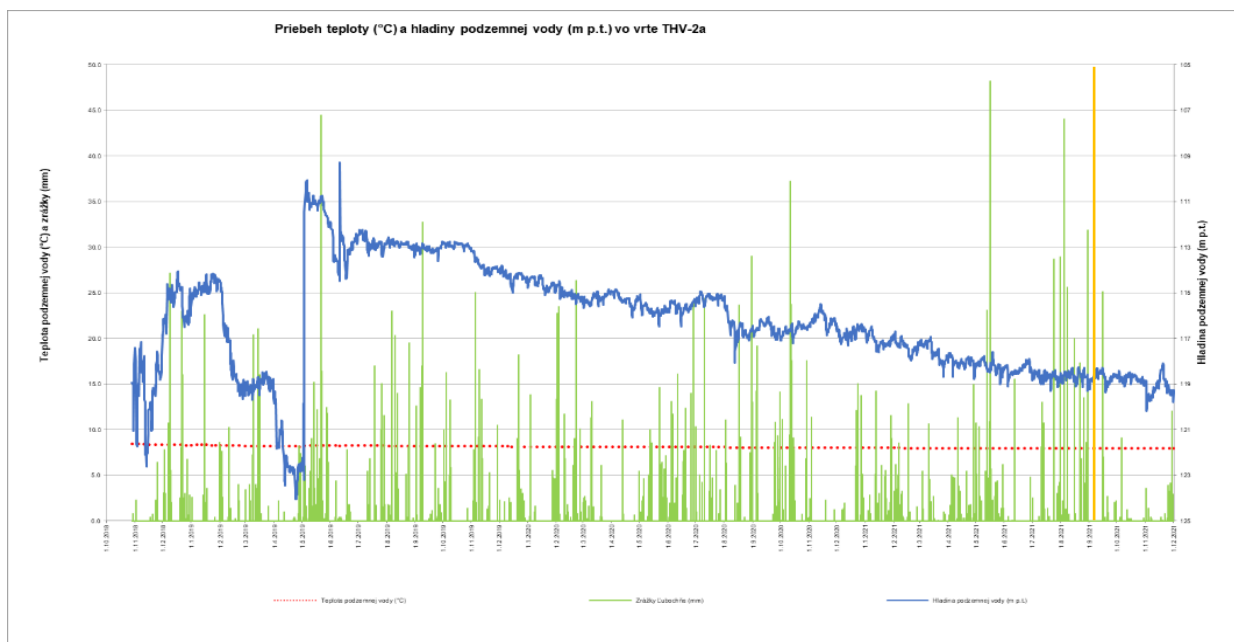
Najcitlivejšími parametrami modelu bola kóta rozhranie viacej a menej priepustných hornín (kóta bázy 1. Vrstvy modelu) a koeficient filtrácie. Tieto kóty boli v prípade tohoto modelu zvolené na základe geologickej mapy SR. Kalibrácia modelu bola vykonaná úpravami koeficientov filtrácie (získaných zo skúšok in situ) a lokálne aj úpravami kóty vyššie uvedeného rozhrania tak, aby hladiny podzemných vôd simulované modelom čo najlepšie zodpovedali nameraným hodnotám a bilancia prúdenia vody v matematickom modeli zodpovedala bilancii, ktorá bola zostavená počas prieskumu. Porovnanie koeficientov stanovených metódami in-situ a výsledných po kalibrácii je uvedené v Tabuľke č.1.

Vrt	testovany hĺbkový úsek		VTS kf (m.s ⁻¹)	HDS kf (m.s ⁻¹)	Model kf (m.s ⁻¹)
HGH-1	55 - 147	Slieňovce, slienité vápence, Tektonické brekcie - tlakovo usmernené a ílovce, s lokálnymi polohami pieskovcov	-	1.1332.10-9	5.10 ⁻⁹
HGH-2	2 - 70	Slabo zvetrané sivé slienité vápence a Zdravé slienité vápence	-	1.1087.10-8	1.10 ⁻⁸
THV-2A	131,5 - 133,5	Slieňovce, tmavosivé, zdravé, laminované až tenko vrstevnaté (0,5-20 cm), strednej pevnosti (R3). V úseku 131,3-132,1m sú slieňovce tektonicky rozpukané.	9,822.10-8	-	1.10 ⁻⁷
THV-2A	155,0 - 157,0	Slieňovce, tmavosivé, zdravé, laminované až tenko vrstevnaté, strednej pevnosti (R3). V úseku 155,5-156,2m sú horniny viac rozpukané, s ílovitou výplňou.	1,510.10-7	-	2.10 ⁻⁷
THV-2A	233,5 - 235,5	Slieňovce, tmavosivé, zdravé, kompaktné, strednej pevnosti (R3), stredne vrstevnaté, s hustotou diskontinuíť 12-40 cm.	2,731.10-7	-	
THV-3	59,5 - 61,5	Slienité vápence zbridlíchnatené ; slienité vápence, kompaktné, zdravé, s ojedinelými vrstvami slieňovcov	1,297.10-7	-	1.10 ⁻⁷
THV-3	62,5 - 64,5	Slienité vápence, kompaktné, zdravé, s ojedinelými vrstvami slieňovcov	1,006.10-7	-	

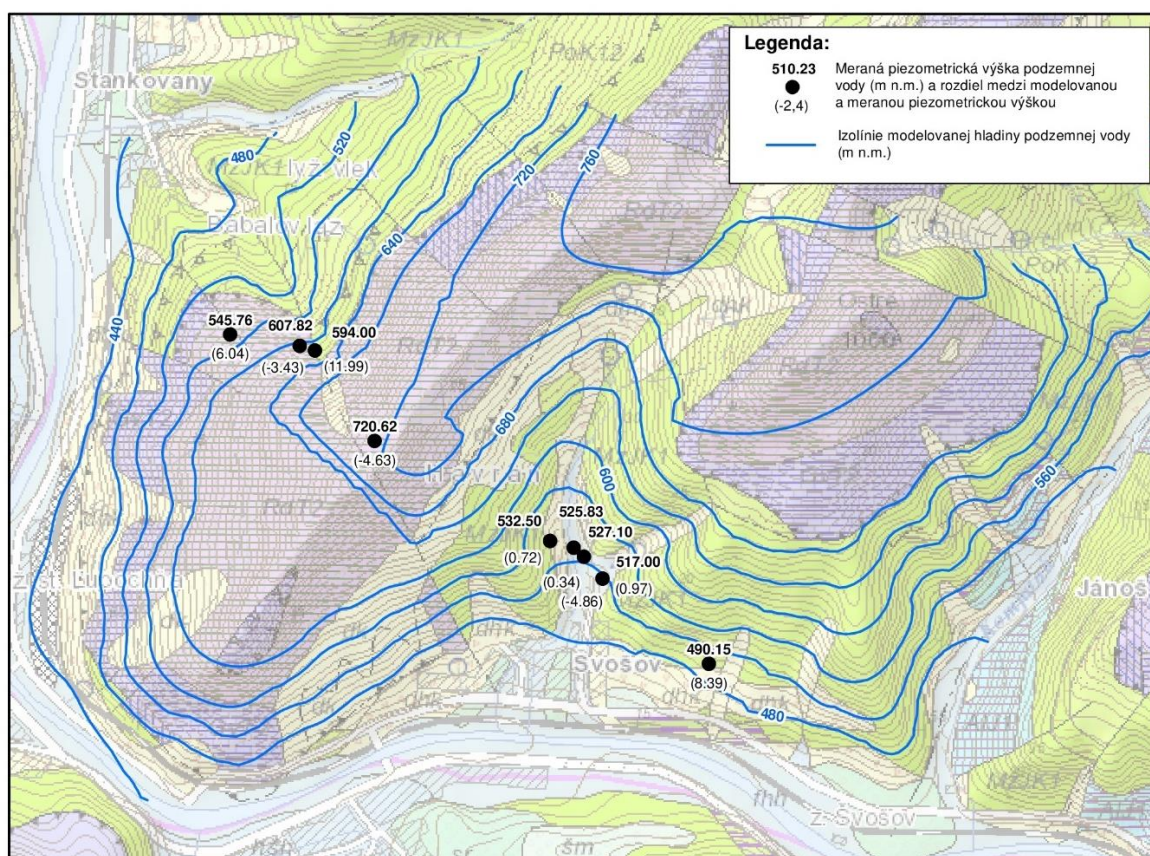
Legenda: VTS – vodnotlaková slúška, HDS – hydrodynamická čerpacia skúška

Tabuľka č. 1: Porovnanie koeficientov filtrácie stanovených in-situ a použitých v modeli

Tektonicky porušený komplex vápencov a dolomitov Chočského príkrovu nebol testovaný in situ v rámci prieskumu pre tunel Havran. Koeficienty filtrácie v modeli boli použité na základe výsledkov prieskumu pre tunel Korbeltka ($k_f=1.10^{-5}$ m.s⁻¹, na základe skúšok na vrtoch TKB-7 a HGK-2A).



Obr. 7 THV-2a Zvolený reprezentatívny stav hladín podzemnej vody pre kalibráciu modelu.



Obr. 8 Kalibrácia modelu – porovnanie modelovaných a meraných piezometrických výšok

Ako reprezentatívny pre posudzovanie vplyvu výstavby tunela Havran na režim podzemných vôd bol vybraný nízky stav v septembri roku 2020. Tento stav bol vybratý ako vhodný z dôvodu aspoň krátkodobo ustálenejších okrajových podmienok. Na Obr. 7 je vynesенý priebeh hladiny na vrte THV-2a a zvolený dátum. Pri kalibrácii boli využité všetky dostupné mrenia hladín a piezometrických výšok

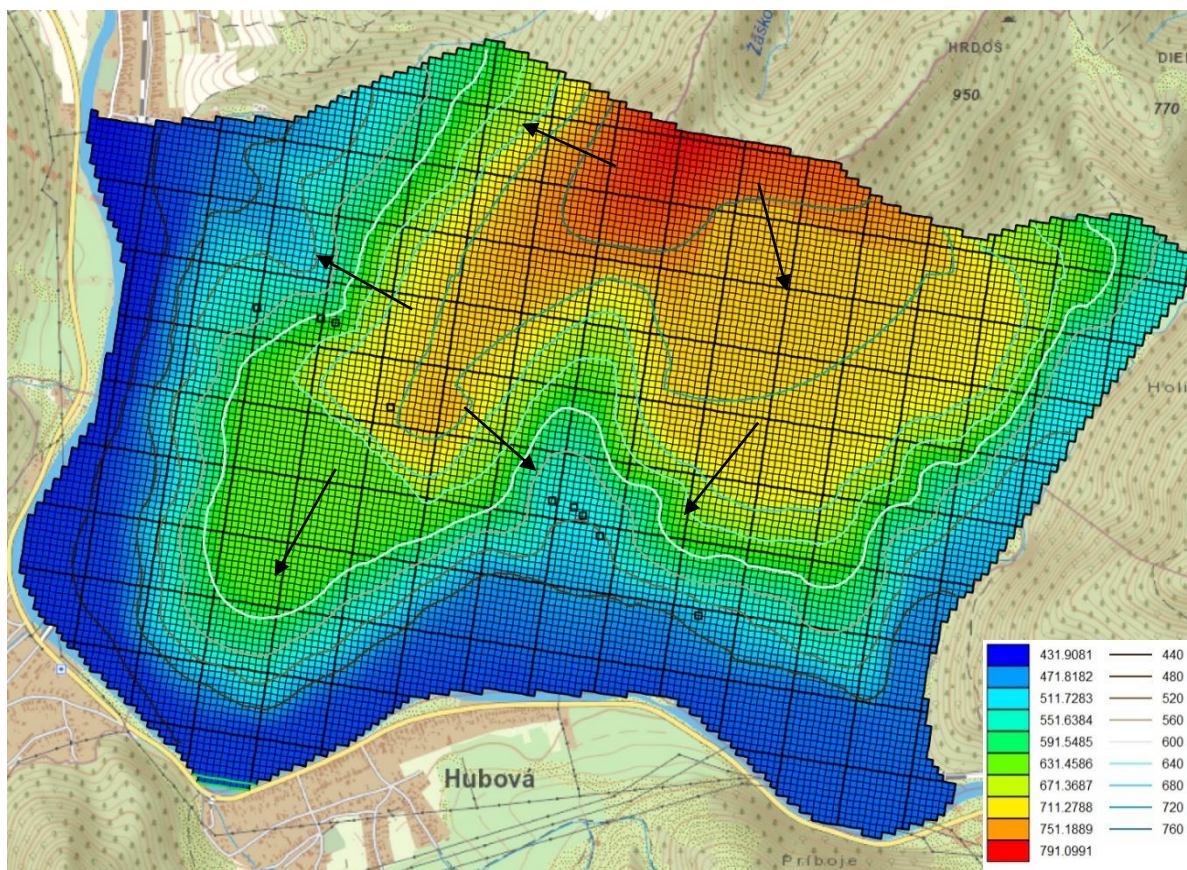
podzemnej vody. Výsledné simulované hladiny podzemnej vody a porovnanie modelovaných a meraných piezometrických výšok podzemnej vody je na Obr. 8.

VÝSLEDKY

Výsledkom je kalibrovaný model ustáleného prúdenia podzemných vôd vytvorený variantne pre neovplyvnený stav a stav po vybudovaní tunela.

NEOVPLYVNENÝ STAV

Scenár 0: neovplyvnený stav - Východiskom pre odhad ovplyvnenia podzemných vôd existenciou tunelových rúr je model kvázi prirodzeného stavu pred výstavbou (Obr. 8 a 9). Model vykazuje dobrú zhodu simulovanej piezometrickej výšky s hladinou nameranou vo vrtoch (miesta vrtov sú vyznačené štvorčekmi). V miestach alúvia (THV-3, HGH-2, TH-3/P, THV-4) sú rozdiely medzi kalibrovanými a meranými hladinami do 1 m, v rámci masívu Havran (THV-1, THV-2a, HGH-1) do 5 m. Výnimkou je vrt THV-2 na meranie pórového tlaku v ktorom je rozdiel 12 m. Prúdenie podzemnej vody vo väčšine územia (slienitých vápencov, slieňovcov a ílovcov) kopíruje svahy, v miestach výskytu dolomitov a vápencov hronika bude kopírovať rozhranie na ich báze.



Obr.9 Výsledné simulované hladiny podzemnej vody [m n. m.] - neovplyvnený stav.

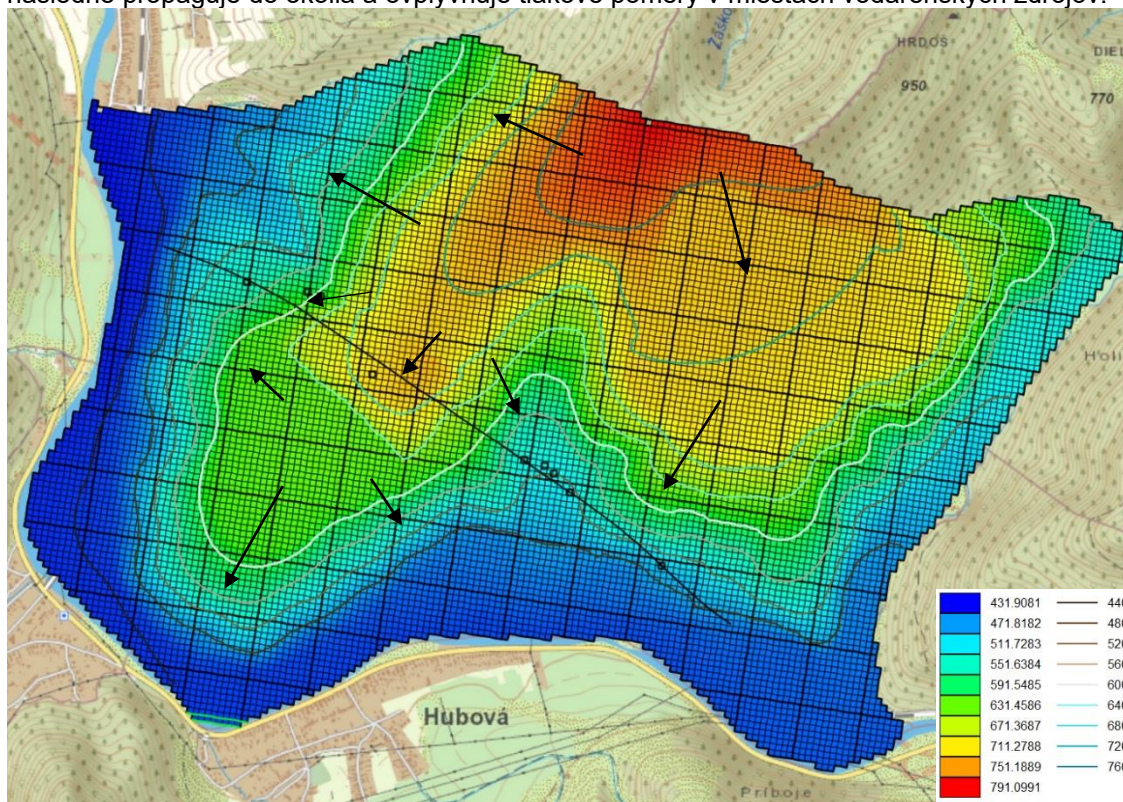
Pri porovnávaní meraných a modelovaných hladín vo vrtoch so zabudovanými piezometrami, je potrebné si uvedomiť, že merania vo vrte nemusia reprezentovať hladinu podzemnej vody ale reprezentujú piezometrickú výšku reprezentatívnu pre otvorenú (filtračnú) časť vrtu. To znamená, že ak je na väčšine vrtov zabudovaná filtračná časť výstroja od terénu až po úroveň tunela / hĺbku vrtu, budú merané výšky reprezentovať najpriepustnejšiu vrchnú úroveň. Ostatné, menej priepustné časti zabudovaného vrtu (napr. úsek slienitých vápencov, slieňovcov a ílovcov) ovplyvnia meranú hladinu vo vrte veľmi málo. Naopak na vrtoch kde sa meria pórový tlak, merané hodnoty budú viac zodpovedať

piezometrickým výškam podzemnej vody v mieste osadenia snímača. Meraný pórový tlak lokálne môžu silne ovplyvniť neočakávané anomálie.

SIMULÁCIA VPLYVU TUNELOVÝCH RÚR NA PODZEMNÉ VODY

Scenár 1: realizácia tunela bez opatrení - V riešení je predpokladaná konštrukciu tunela s betónovým ostením hrúbky 300 mm a drenážou na päte ostenia tvorenou zbernými potrubiami a obsypom.

Vzhľadom na očakávané prítoky vôd vo vyrazených tunelových rúrach v úseku potencionálneho kontaktu s alúviom bezmenného potoka pod vodným zdrojom Dušička (obec Švošov) bude vhodné vybudovať ostenie s protiklenbou, ktorá výrazne obmedzí prítok zo spodnej časti tunelovej rúry. Teleso tunelových rúr je simulované ako drenážny prvok, ktorý odvádza vodu z masívu. Kóta dna drénu bola zvolená na úrovni nivelety, a hydraulický odpor drenážneho prvku zodpovedá priepustnosti rozvoľneného masívu. Simuláciou drenážneho vplyvu takto definovaných tunelových rúr bolo zistené významné lokálne ovplyvnenie prúdenia podzemných vôd v rámci masívu Havrana a v miestach bezmenného potoka v Švošove pod vodným zdrojom Dušička (Obr. 10). Vplyv sa z týchto miest následne propaguje do okolia a ovplyvňuje tlakové pomery v miestach vodárenských zdrojov.

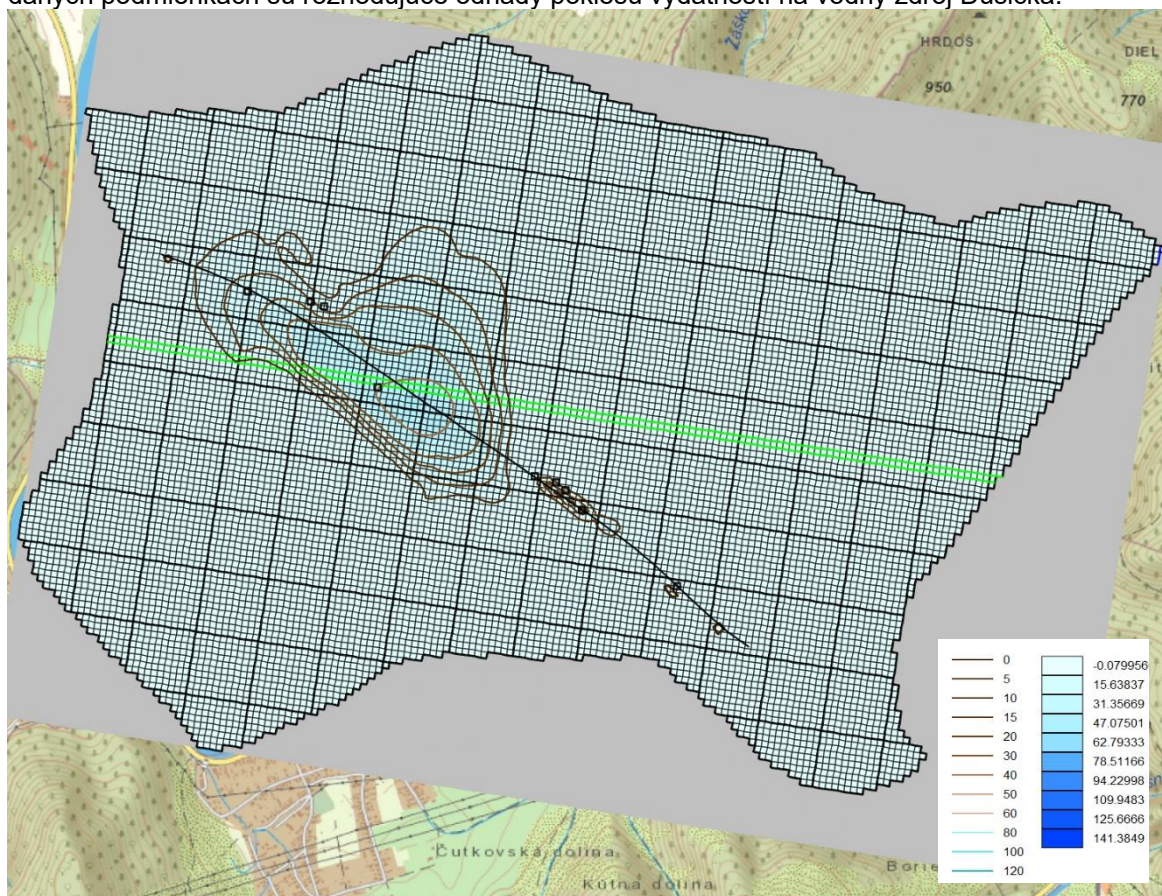


Obr. 10 Simulované hladiny podzemnej vody [m n. m.] – realizácia tunela bez opatrení.

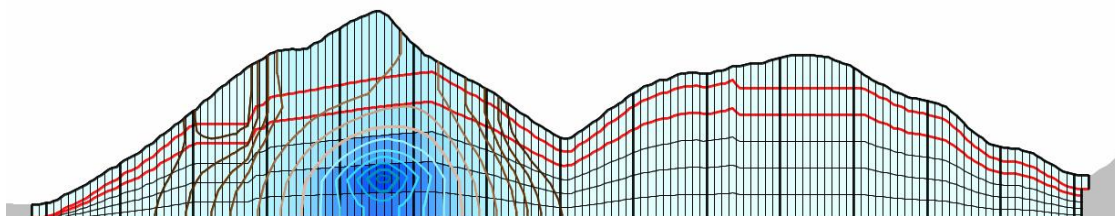
Pokles hladín pri vybudovaní tunela bez opatrení (Obr. 11) je možné očakávať jednak v centrálnej časti masívu Havrana, kde ale je relatívne nízke zvodnenie. Významnejší pokles hladín nastane v miestach alúvia bezmenného potoka v Švošove pod vodným zdrojom Dušička. V týchto miestach by vzhľadom na existenciu zlomov, ktoré určili tvar doliny, a ich možnú relatívne vysokú priepustnosť mohlo v extrémnom prípade dôjsť až ku priesaku celého prietoku bezmenného potoka do tunela. Opatrenia v týchto miestach preto na základe výsledkov prieskumu potvrdeného modelovaním sú nevyhnutné.

Pri interpretovaní výsledkov, je potrebné si uvedomiť, že miera ovplyvnenia obehu podzemnej vody nezodpovedá len zmene hladiny resp. piezometrickej výšky. V miestach bezmenného potoka v Švošove pod vodným zdrojom Dušička sú hladiny stabilizované blízkosťou okrajovej podmienky – potoka a relatívne vysokou priepustnosťou fluviálnych sedimentov v nadloží tunela. Bez utesnenia by v týchto miestach dochádzalo k intenzívnej drenáži a pokiaľ by sa v týchto miestach nachádzalo výrazne priepustnejšie zlomové pásmo, ktoré nezachytíli prieskumné vrty, mohlo by dôjsť k úplnému odtrénovaniu alúvia a bezmenného potoka. Výsledky z hydrodynamickej skúšky na HGH-2

neidentifikovali takúto situáciu. Pre interpretáciu vplyvu výstavby tunela na režim podzemných vôd v daných podmienkach sú rozhodujúce odhady poklesu výdatností na vodný zdroj Dušička.



Obr. 11 Pokles hladiny podzemnej vody v oblasti pre scenár výstavby tunela bez opatrení.



Obr. 12 Pokles hladiny podzemnej vody v oblasti pre scenár výstavby tunela bez opatrení v reze modelom.

Pokles piezometrických výšok podzemnej vody v reze modelom je zobrazený na Obr. 12, miesto rezu je vyznačené zelenou farbou na Obr. 11. Numerickým modelovaním simulované poklesy piezometrických výšok sa prejavajú aj na zmenšení prítoku vody do miest drenážnych prvkov predstavujúcich pramene vodárenských zdrojov. Odhadnutý percentuálny pokles výdatností v okolitých vodných zdrojoch na základe výsledkov modelovania pri tomto variante je uvedený v sumarizačnej tabuľke výsledkov modelovania (Tab.2).

Scenár 2: realizácia tunela s realizovanými opatreniami - V predmetnom scenári sa uvažuje s vybudovaním tunela, kde je predpokladaná konštrukcia tunela podobná s prechádzajúcim variantom, navyše sa v exponovaných miestach uvažuje s betónovým ostením hrúbky 300 mm, celoplošnou hydroizoláciou a utesneným okolím oboch tunelových rúr (nepriepustný tunel). Predpokladané miesta a podrobný popis opatrení je na Obr. 13.

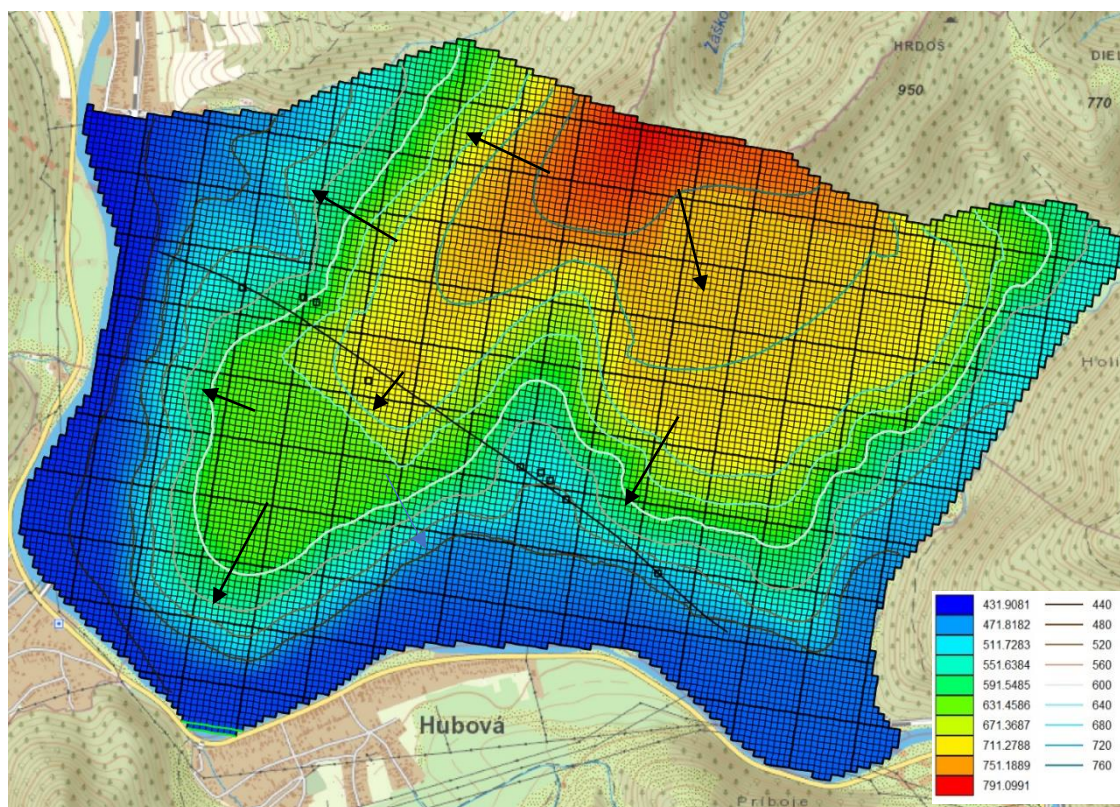


Obr. 13 Navrhované opatrenia na zníženie drenážneho účinku tunela

Zelená farba – v miestach zvodnených zón a porúch utesnenie tunela (injektáž, izolácia), realizácia predvrtov,

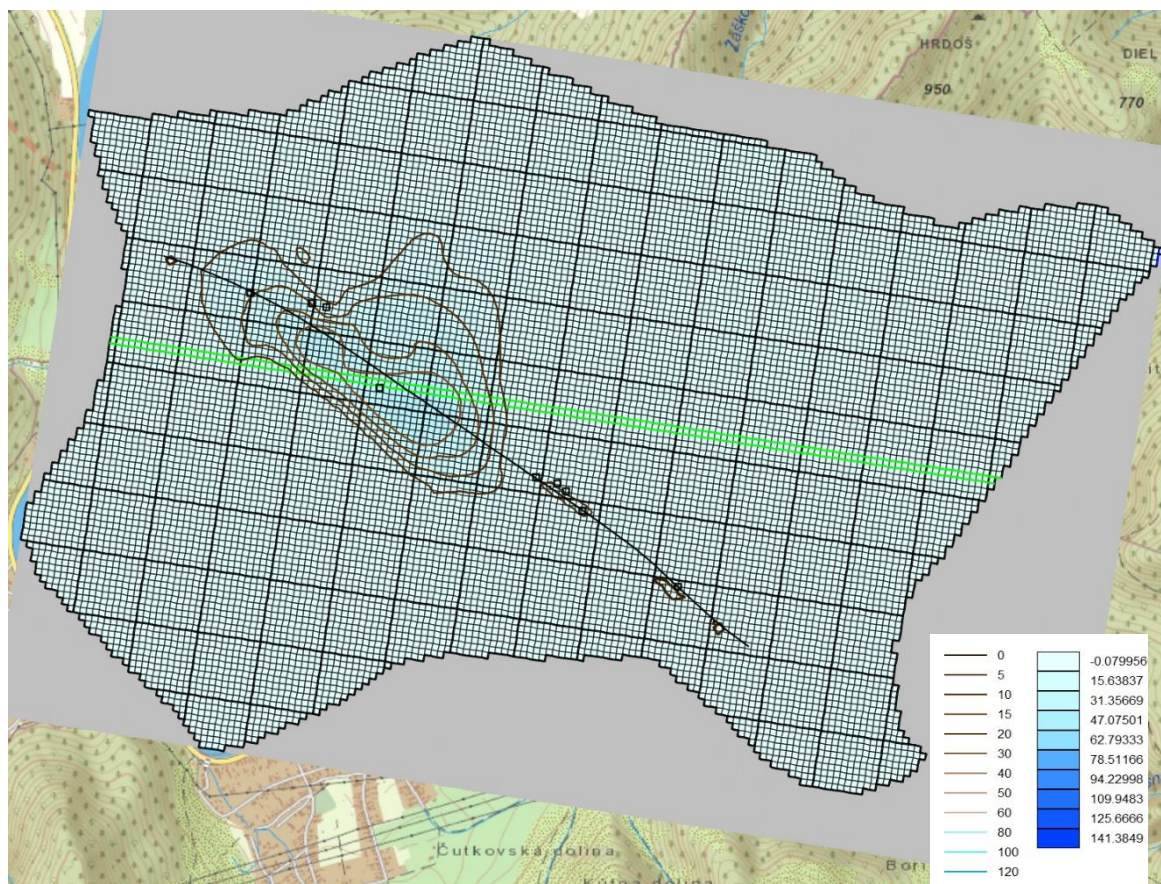
Šedá farba – v miestach zvodnených zón a porúch utesnenie tunela (injektáž, izolácia),

Fialová farba - aplikácia celobvodovej hydroizolácie prípadne injektáž, realizácia predvrtov.

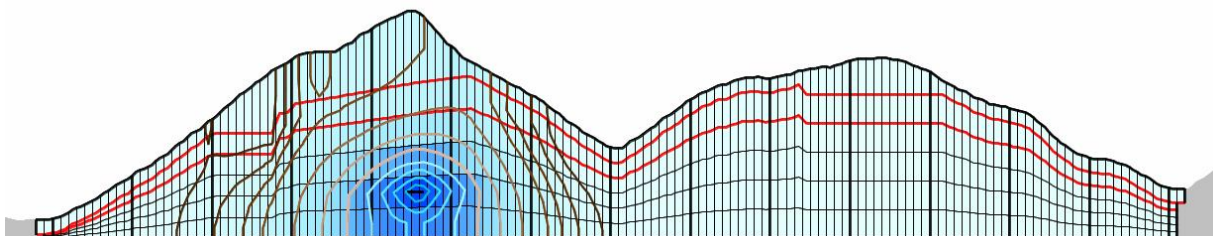


Obr. 14 Simulované hladiny podzemnej vody [m n. m] v oblasti pre scenár s opatreniami.

Teleso tunelových rúr je simulované ako drenážny prvok, ktorý odvádza vodu z masívu s relatívne nízkym hydraulickým odporom na plášti tunelových rúr. Kóta dna drénu bola zvolená na úrovni nivelety, a hydraulický odpor bol znížený na úroveň 30% hodnoty v miestach realizácie opatrení. Hodnota 30% bola zvolená na základe konzervatívneho odborného odhadu. V skutočnosti úroveň opatrení zodpovedá poklesu hydraulického odporu až na úroveň jednotiek percent, ale takto sú výpočty na strane bezpečnosti keby došlo pri opatreniach časom alebo inými vplyvmi ku zmenám priepustnosti ostenia tunelu. Simuláciou drenážneho vplyvu takto definovaných tunelových rúr bolo zistené významné menšie ovplyvnenie prúdenia podzemných vôd väčšinou iba významu a menší celkový vplyv na výdatnosti vodárenských zdrojov. V miestach nivy bezmenného potoka v Švošove pod vodným zdrojom Dušička bude vplyv tunela významne nižší a opatrenia zabránia nežiadúcemu prieniku vody z alúvia do tunelových rúr (Obr. 14 - 16). Opatrenia v týchto miestach vzhľadom na možný výskyt priepustnejších zlomových pásiem nezachytených vrtní považujeme za nevyhnutné.



Obr. 15 Pokles hladiny podzemnej vody v oblasti pre scenár výstavby tunela s opatreniami.



Obr. 16 Pokles hladiny podzemnej vody v oblasti pre scenár výstavby tunela s opatreniami v reze.

Výsledný vplyv pre najkritickejší variant a to pre typ tunela – priepustný – otvorený hydroizolačný systém s postrannou drenážou a pre variant s realizovanými opatreniami (nepriepustný tunel – uzatvorený hydroizolačný systém v miestach určených v zmysle podrobného IGHP – Grenčíková et al, 2019 stanovený na základe modelovania prúdenia podzemných vôd je sumarizovaný v Tabuľke č. 2. Pri realizácii navrhovaných opatrení bude priemerný pokles hladín podzemných vôd v masíve Havranu znížený o 12,2 m pri minimálnom stave hladiny podzemných vôd (oproti priemernému poklesu 18,6 m bez opatrení) ako aj zmeny výdatností vodných zdrojov budú nižšie v porovnaní s variantom bez opatrení. V tomto prípade, aj pri scenári s opatreniami bol postup konzervatívny, čiže modelovalo sa utesnenie tunela na úroveň 30%. V skutočnosti správne realizované opatrenia vrátane injektáže okolia tunela majú potenciál utesniť tunel tak, že jeho drenážny účinok poklesne na úroveň jednotiek percent voči otvorenému tunelu, v tomto prípade môže byť celkový vplyv na obeh vôd v masíve Havran a na vodný zdroj Dušička a Pod Suchou dolinkou zanedbateľný.

Tabuľka č. 2: Prehľad simulovaného ovplyvnenia vodných zdrojov o oblasti masívu Havran

Vodný zdroj	Priemerná výdatnosť	Simulovaná výdatnosť – scenár – neovplyvnený stav (l.s ⁻¹)	Simulovaná výdatnosť – stav bez opatrení (l.s ⁻¹)	Pokles výdatnosti – stav bez opatrení (%)	Pokles priemernej výdatnosti – stav bez opatrení (l.s ⁻¹) *	Simulovaná výdatnosť – stav s realizáciou opatrení (l.s ⁻¹)	Pokles výdatnosti – stav realizácia opatrení (%)	Pokles výdatnosti – stav realizácia opatrení (l.s ⁻¹)
Dušíčka – pravý	2.31	2.53	2,09	17.24%	0.40	2.27	10.20%	0.24
Dušíčka – ľavý	1.06	0.91	0,76	16.58%	0.18	0.82	9.86%	0.10
Suchá dolinka	7.81	8.72	7,37	15.41%	1.20	7.62	12.58%	0.98
Spolu	11.18				1.78			1.32

* hodnoty čiernou farbou sú stanovené modelom, modrou - hodnoty z monitorovania a predpokladané poklesy monitorovaných hodnôt

Poznámka: stav bez opatrení – priepustný tunel, otvorený izolačný systém s postrannou drenážou
stav realizácia s opatreniami – nepriepustný tunel (uzatvorený hydroizolačný systém) a polopriepustný tunel

Matematický model bol zostavený na základe dostupných výsledkov hydrogeologického prieskumu, úrovne poznatkov o prúdení vody v masíve, ktorým prechádza tunel Havran. Prieskum a tým aj dostupné znalosti sú podrobnejšie najmä v trase tunela a nie je možné vylúčiť, že sa vplyv výstavby tunela prejaví aj iným spôsobom ako ho predpovedá matematický model.

Za najrizikovejší úsek tunela sa javí miesto pod alúviom bezmenného potoka v Švošove pod vodným zdrojom Dušíčka až po miesta v okolí vrtu THV-4. V týchto miestach by vzhľadom na existenciu zlomov, ktoré určili tvar doliny potoka, a ich možnú priepustnosť mohlo v extrémnom prípade dôjsť až ku priesaku celého prietoku bezmenného potoka do tunela. Opatrenia v týchto miesta preto na základe výsledkov prieskumu potvrdeného modelovaním sú nevyhnutné a je ich potrebné realizovať počas razenia tunela (injektáž zlomov a rozrušeného zóny v okolí tunela, celoplošná hydroizolácia).

Vzhľadom na vyššie uvedené je potrebné, aby počas výstavby (razenia) tunela bol na lokalite zriadený on-line monitorovací systém na všetkých troch vodných zdrojov a to Dušíčka – pravý, Dušíčka – ľavý, pod Suchou dolinkou a na monitorovacích vrtoch nie priamo zasiahnutých razením tunela. V prípade prudkého poklesu výdatnosti alebo piezometrických výšok na sledovaných vrtoch bude potom možné operatívne realizovať opatrenia na minimalizáciu nežiadúcich vplyvov.

V Bratislave, júl 2022

RNDr. Ľubomír Banský, PhD.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- Langevin, Hughes, Banta, Niswonger, Panday a Provost. 2017: Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia USA, 197 s
- Geologická mapa Slovenska M 1:50 000 [online]. Bratislava: Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, 2013. Dostupné na internete: <http://apl.geology.sk/gm50js>.
- Gross, P., Filo, I., Halouzka, R., Haško, J., Havrila, M., Kováč, P., Maglay, J., Mello, J. a Nagy, A., 1994: Geologická mapa južnej a východnej Oravy. Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava.
- Matejček, A., 2007: Tunel Havran: Účelová inžinierskogeologická mapa. GEOFOS s.r.o., Žilina.
- Švasta, J., Malík, P., 2006: Priestorové rozloženie priemerných efektívnych zrážok na území Slovenska. Podzemná voda XII. / 2006 č. 1, Slovenská asociácia hydrogeológov, ISSN 1335-1052, Bratislava, s. 65-77.
- Malík, P., Švasta, J., 2013: Regionálne hodnoty indexu prietochnosti predkvartérnych hornín Slovenska. Podzemná voda. Bratislava: Slovenská asociácia hydrogeológov, roč. XVIII, č. 2, s. 156–172.

- Grenčíková, A. et al., 2019: Diaľnica D1 Turany – Hubová, Záverečná správa z podrobného inžinierskogeologického a hydrogeologického prieskumu, DPP Žilina s. r. o., Žilina.