

PRÍLOHA Č. 6
HYDRAULICKÝ MODEL PRÚDENIA PODZEMNÝCH VÔD
TUNEL KORBELKA

HYDRAULICKÝ MODEL PRÚDENIA PODZEMNÝCH VÔD

Cieľom hydraulického modelovania bolo overenie možného vplyvu tunela Korbeľka na prúdenie podzemných vôd v masíve vrchu Kopa a predpoklad miery ovplyvnenia výdatností vodných zdrojov v bezprostrednom okolí odvodnených tunelových rúr. Hydraulický model rieši diaľničný variant s tunelom Korbeľka, ktorý je projektovaný od obce Krpeľany po obec Stankovany. Modelované boli tri scenáre a to 1) pôvodný stav, 2) stav ovplyvnený výstavbou tunela bez realizovania opatrení proti drenážnemu účinku tunela, 3) stav ovplyvnený realizáciou navrhnutých opatrení.

Charakter riešeného problému vyžaduje reálnu aproximáciu geologického prostredia a taktiež geometriu tunelových rúr. Pre aktualizované modelovanie bol zvolený overený modulárny modelový systém MODFLOW od U.S. Geological Survey (štátna geologická služba USA) v najnovšej verzii č. 6. Modelový systém je založený na metóde konečných rozdielov (napr. MODFLOW), ktorá presnejšie stanovuje výslednú bilanciu – objemy prúdenia podzemnej vody a tým určíť potenciálne vplyvy či už čerpania alebo drenážneho účinku tunelových rúr vo väčších vzdialenostiach od zdroja vplyvu. Modelový systém jednoduchším spôsobom popisuje 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 podzemnej vody v príslušnom bloku. Významnou prednosťou numerického modelu MODFLOW 6 je, že umožňuje simuláciu viacerých voľných hladín nad sebou, širokú škálu okrajových podmienok ako aj modelovanie nepriepustných bariér. Súčasne umožňuje nepravidelné výpočtové 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

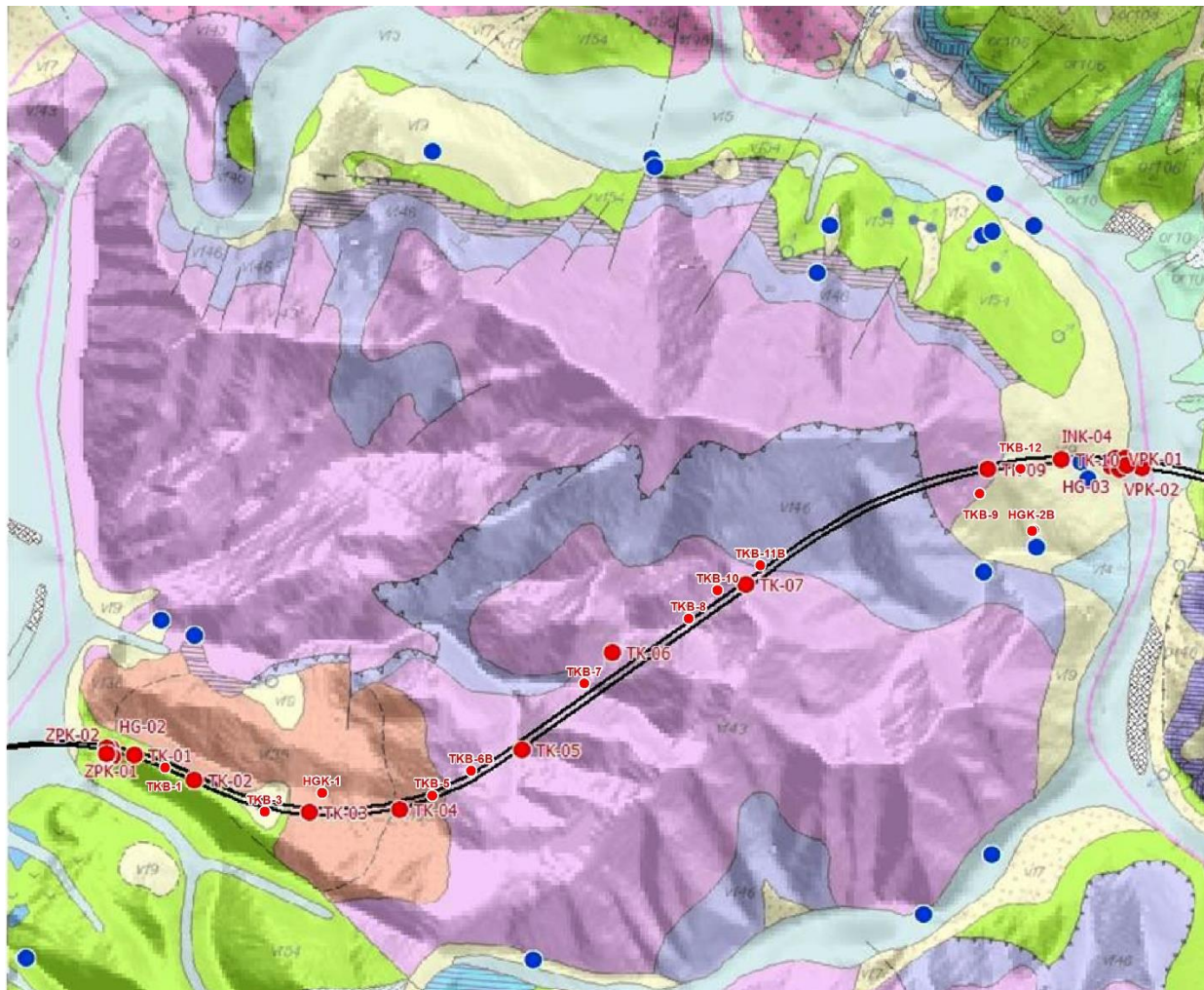
Modelovanie prúdenia podzemných vôd vychádza z koncepčného modelu, ktorý je definovaný na základe požiadaviek na model, ďalej je definovaný geologickými, hydrogeologickými a hydrologickými podmienkami, topografiou, využívaním krajiny a ľudskými zásahmi do hydrologického cyklu. Koncepčný model určuje priestorový, časový a schematizačný rámec, prijatím ktorého zahrnieme všetky relevantné zložky prúdenia podzemných vôd a eliminujeme zložky nepodstatné. Pri spracovaní hydraulického modelu nie je vhodné zjednodušenie hydrogeologickej situácie a zanedbanie dôležitých prvkov.

Rozsah územia bol volený tak, aby hranice územia boli jasne hydrogeologicky definovateľné a aby územie zahŕňalo všetky vývery a potenciálne miesta infiltrácie podzemných vôd cirkulujúcich v okolí tunela. Vzhľadom k tomu bolo zvolené modelové územie zaberajúce masív Kopy, ohraničené z východu, severu a západu riekou Váh a Krpelianskou priehradou a z juhu potokom Ľubochňanka a Bielym potokom.

Z hydrogeologického hľadiska bol model koncipovaný ako šesťvrstvový, kde 1. vrstva zodpovedá hlavne hydrogeologickej priepustnej vrstve - fluviálnym sedimentom, 2. vrstva zodpovedá proluviálnym zeminám, 3. vrstva zodpovedá deluviálnym zeminám, 4. vrstva predkvartérnym zlepencom borovského súvrstvia paleogénu, 5. vrstva zodpovedá dolomitom hronika, vápencom hronika, 6. vrstva zodpovedá slienitým vápencom mráznického súvrstvia fatrika. Výsledky monitorovania hladín podzemnej vody pre vápence a dolomity hronika nevykazovali zásadne rozdielne vlastnosti, preto boli v modeli reprezentované ako jeden druh hornín.

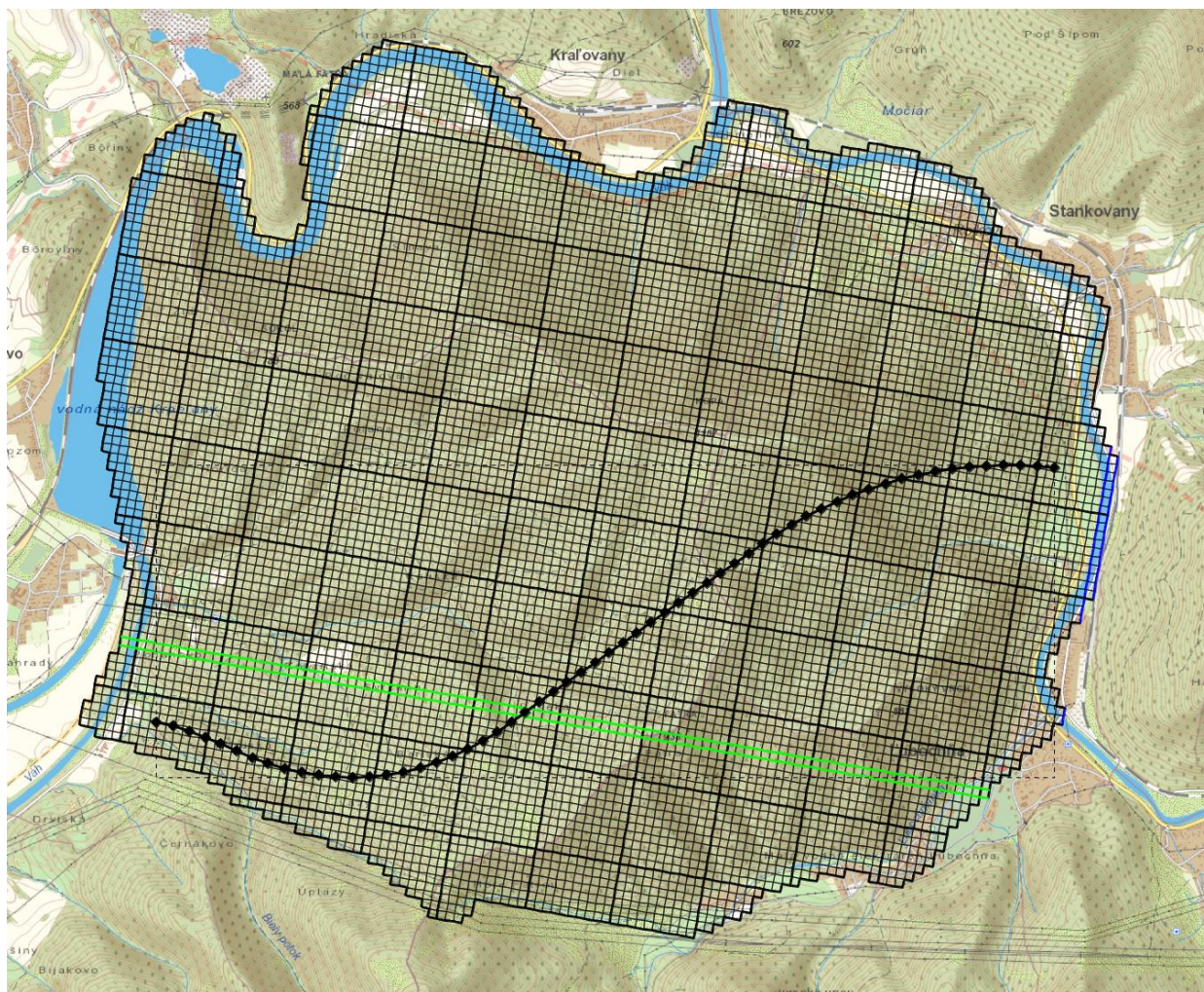
Vzhľadom k tomu, že do modelu bol zahrnutý celý horninový priestor, v ktorom možno predpokladať prúdenie podzemných vôd, bola báza modelu explicitne stanovená na základe predpokladanej hĺbky porušenia hornín jednotlivých celkov. Geometria vrstiev modelu bola zvolená tak, aby hlavná priepustná vrstva (zóna) bola kvôli stabilite výpočtov v prvej vrstve modelu (zhora). Geologická stavba bola do modelu premietnutá na základe Digitálnej geologickej mapy Slovenskej republiky v M 1 : 50 000 (Š. Káčer a kol., 2005), geologický rez z mapy Veľkej Fatry (Polák a kol., 1997).

Výpočtová sieť bola vzhľadom na metódu konečných rozdielov zvolená ako pravidelná s rozmerom jedného bloku 25 x 25 m (Obr. 2). Pri zostavovaní modelu boli realizované aj skúšky lokálneho zahustenia siete, ktoré model MODFLOW verzie 6 umožňuje, ale vplyv takéhoto zahustenia na výsledky bol zanedbateľný napriek neúmerne predĺženému času výpočtu a zníženej numerickej stabilite.

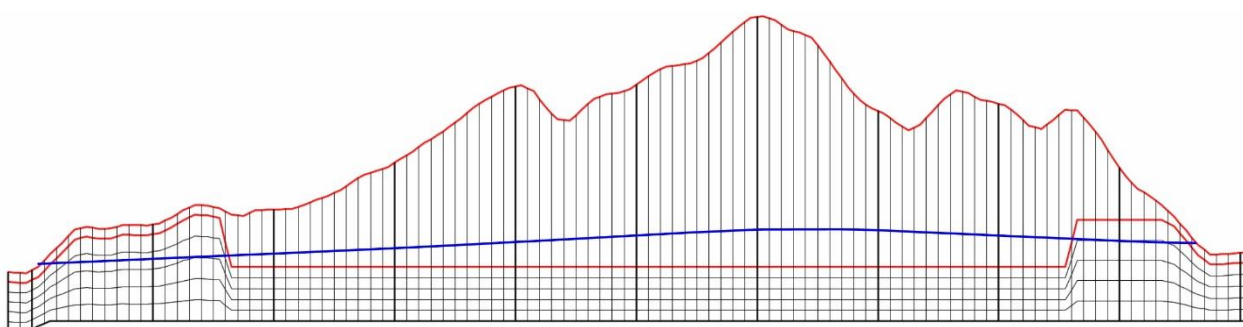


Obr. 1 Situácia trasy tunela Korbeľka na podklade Geologickej mapy Slovenska M 1:50 000 s vyobrazením vybraných vrtov (červené) a prameňov (modré) (upravené podľa Grenčíková et al., 2019).

Pri analýze dostupných podkladov o geologickej stavbe územia a výsledkov monitorovania piezometrických výšok podzemných vôd bola v rámci masívu Kopy identifikovaná „kryhovitá“ stavba priepustných vápencov a dolomitov hronika. Hladinový rozdiel v prípade vrtov TKB-8 a TKB-10 ktorý je na úrovni 100 m, indikuje, že určujúca tu bude báza obsahujúca nepriepustné polohy, a jej vertikálne umiestnenie je určujúce pre režim v jednotlivých kryhách (Obr. 3). Poloha tohoto rozhrania spolu s koeficientami filtrácie jednotlivých vrstiev bola predmetom kalibrácie.



Obr.2 Výpočtová sieť zostaveného aktualizovaného modelu a trasa tunelu
(línia rezu Obr. 3 je označená zelenou).



Obr. 3. Výpočtová sieť modelu v reze a niveleta tunelových rúr premietnutá do rezu
(1. vrstva modelu vyznačená červenou zodpovedá priepustnejším horninám)

OKRAJOVÉ PODMIENKY

Infiltrácia zrážkových vôd bola riešená Neumannovou okrajovou podmienkou (2. druhu) na povrchu terénu. Hodnota konštantného prítoku bola prevzatá z hydrologickej bilancie získanej z podrobného inžinierskogeologického a hydrogeologického prieskumu.

Napriek tomu, že výsledky prác Švastu a Malíka 2008, ktoré nepotvrdili významnejšie skryté prestupy podzemných vôd z triasových karbonátov hronika v sledovanej štruktúre do iných území bola v mieste hlavných

tokov na okraji modelu vložená okrajová podmienka $H = \text{konštanta}$, ktorá zabezpečuje stabilitu matematického modelu a zabezpečuje odtok „prebytočných“ zrážkových vôd odtekajúcich buď cez zvodnené deluviálne sedimenty alebo zvetranú vrchnú vrstvu menej priepustných sedimentov mimo model (Obr. 4).

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. 5).

Na základe podrobného inžinierskogeologického a hydrogeologického prieskumu možno v mnohých miestach očakávať v celej dĺžke tunela hladinu podzemnej vody takmer nad niveletou jeho stropu. Preto je potrebné do modelu zakomponovať samotné tunelové rúry. Tieto môžu mať, podľa spôsobu konštrukcie ostenia a odvodňovacích prvkov, rôznu funkciu vo vzťahu k podzemným vodám v okolitom horninovom masíve. Predpokladá sa, že v úsekoch tvorených menej priepustnými dolomitmi hronika a slienitými vápencami fatrika, bude tunel konštruovaný bez protiklenby, s drenážami umiestnenými v spodnej časti. V úseku tvorenom vysoko priepustnými a skrasovatenými vápencami predpokladáme budovanie protiklenby z dôvodu zníženia prítokov podzemných vôd do tunela a tým zníženie ovplyvnenia existujúcich vodárenských zdrojov a na vodu viazaných ekosystémov v okolí. Tunelové rúry sme preto simulovali ako drenážne prvky s takým hydraulickým odporom, aby zodpovedal dodaným predpokladaným množstvám presiaknutých vôd, ktoré boli stanovené v podrobnom inžinierskogeologickom a hydrogeologickom prieskume.

Razenie tunela môže mať vplyv na pukliny a tým aj priepustnosť okolitých hornín, v bloku ktorým prechádza tunel bola zvýšená priepustnosť horninového prostredia.

KALIBRÁCIA MODELU

Pre posudzovanie vplyvu výstavby tunela na režim podzemnej vody bol ako reprezentatívny vybraný nízky stav v marci roku 2021. Tento stav bol vybratý ako vhodný z dôvodu ustálených okrajových podmienok (stabilizované nízke zrážky a nízky stav povrchových tokov). Na Obr. 6 je vynesенý priebeh hladiny na vrte TK-04 a zvolený dátum. Pri kalibrácii boli využité všetky dostupné mrenia hladín a piezometrických výšok podzemnej vody.

Najcitlivejším parametrom modelu bolo rozhranie viacej a menej priepustných hornín, či už sa jednalo o zvetranú vrstvu mráznického súvrstvia alebo skrasovatelé vápence a dolomity hronika (Obr. 7). Kalibrácia modelu bola vykonaná úpravami koeficientov filtrácie (získaných zo skúšok in situ) a zmenami 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. Koeficienty filtrácie stanovené skúškami in-situ a výsledné použité v numerickom modeli je uvedené v Tabuľke 1.

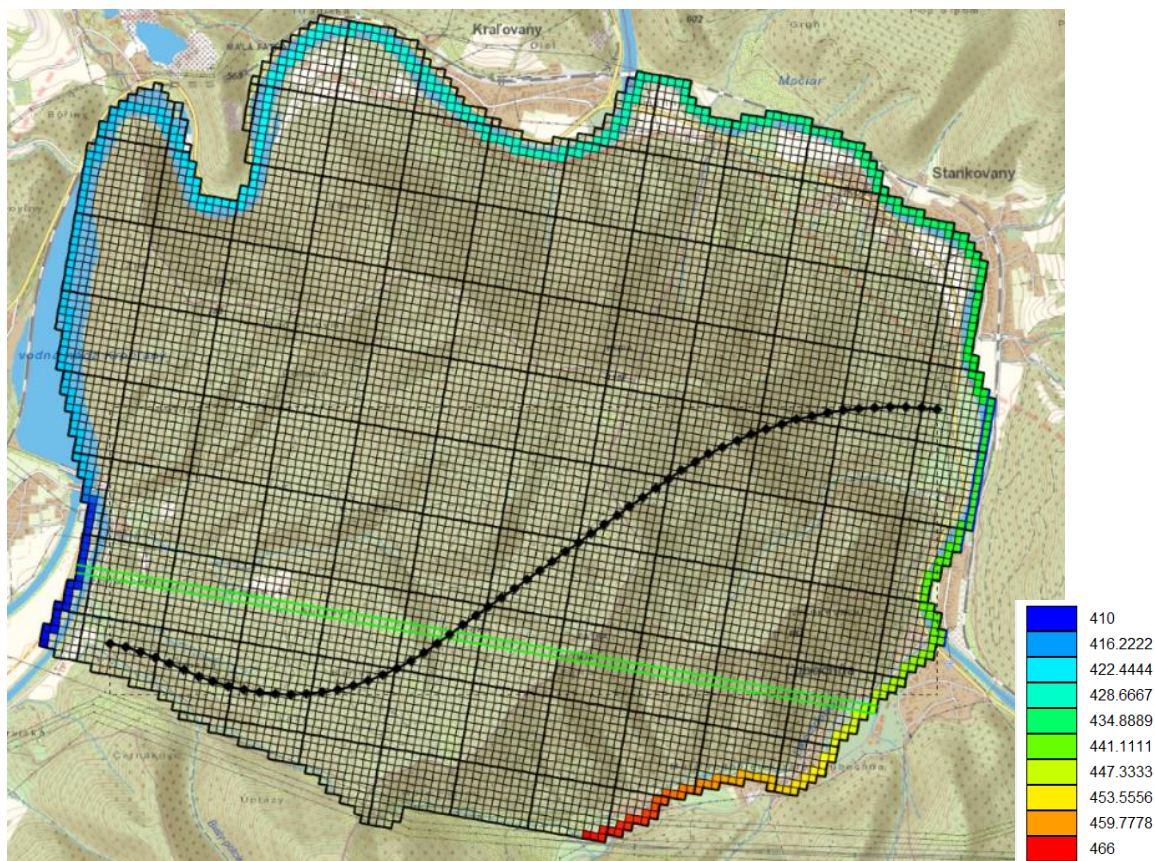
Porovnanie modelovaných a meraných piezometrických výšok podzemnej vody je na Obr. 8. V úvodnej časti tunela (do km 1,6 tunela, TKB-1, TK-2, TKB-3), kde vrty reprezentujú režim v rámci slienitých vápencov, slieňovcov a ílovcov, sú rozdiely medzi simulovanými a meranými hladinami do 7 m. Vo vrtoch zasahujúcich priepustné vápence a dolomity vo východnej časti tunela (km 1,7 – 4,1; TKB-2 až TKB-8) sú rozdiely do 5 m. V centrálnej časti masívu Kopy (km 4,2 až 5,5, vrty TKB-10, TKB-11B) sú rozdiely do 15 m, s výnimkou vrtu TK-07, ktorý nebol do kalibrácie zahrnutý. Vo vrtoch TK-9, TKB-12 a TK-10 v úseku km 5,7 až 6,5 (poloha slienitých vápencov, slieňovcov a ílovcov) sú rozdiely do 10 m (Obr. 8).

Piezometrická výška meraná vo vrte TK-07 sa odlišuje od susedných vrtov vzdialených iba 100-150 m o 100 výškových metrov. Jedná sa zjavne o anomáliu. Do numerického modelu nemá žiaden význam takúto anomáliu zahŕňať, jedná sa o lokálnu vec, pokrývajúcu niekoľko uzlov, ktoré neovplyvnia významne výslednú bilanciu, vplyv tunela na režim podzemnej vody v širšom okolí a na výdatnosť vodných zdrojov. Navyše táto anomália môže byť spôsobená zanesením staršieho vrtu alebo chybou pri jeho budovaní.

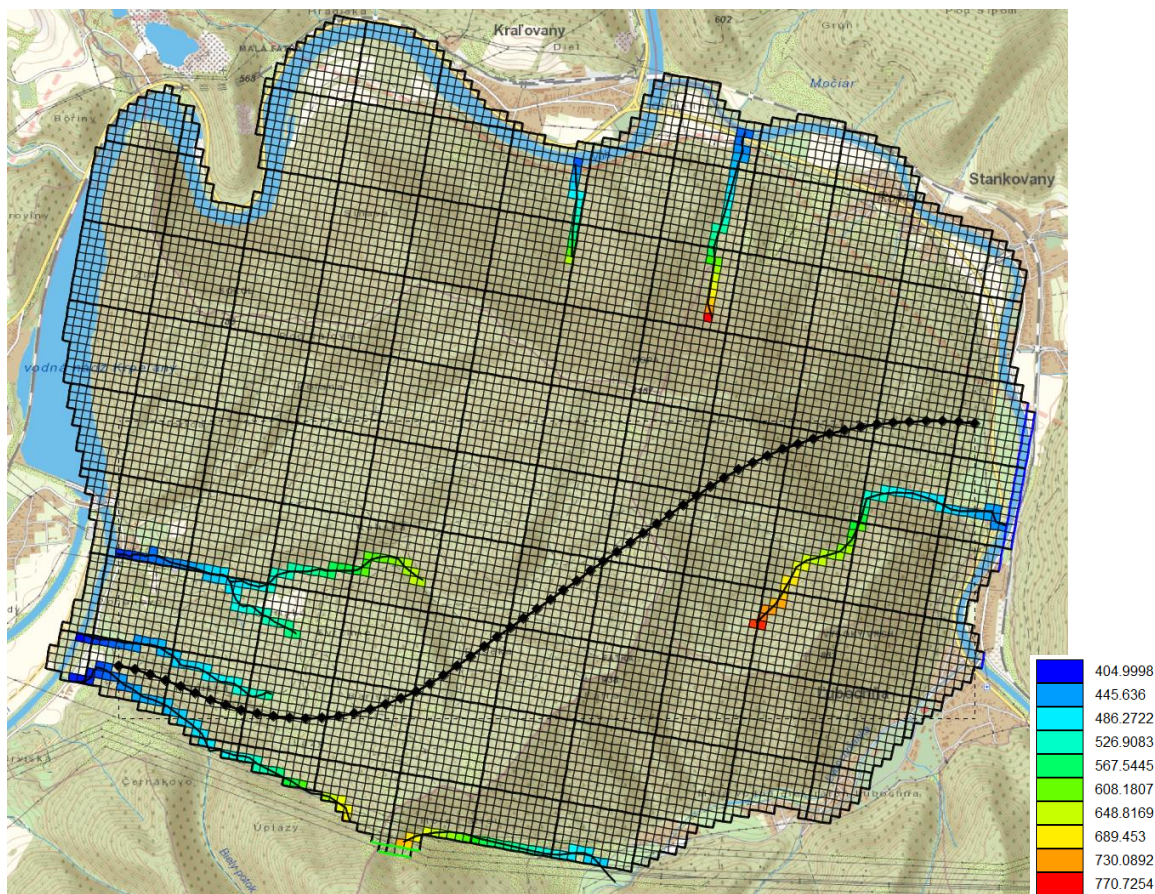
Vrt	testovaný hĺbkový úsek		VTS kf (m.s ⁻¹)	HDS kf (m.s ⁻¹)	Model kf (m.s ⁻¹)
HGK-1	106.18 - 150	Dolomit, sivej farby s ružovkastými polohami, strednej pevnosti (R3) miestami až vysokej (R3-R2), tektonicky porušený, úlomkovitý, lokálne až múčkou, v spodnej časti až striedanie dolomitu a dolomitické brekcie	-	1.1566.10 ⁻⁷ až 1.4407.10 ⁻⁸	1.10 ⁻⁷
HGK-2A	45 - 100	Ílovce, tmavosivé, tenko až stredne vrstevnaté, nízkej až veľmi nízkej pevnosti (R4-R5); Pieskovce, sivé, jemnozrnné, strednej až vysokej pevnosti (R3-R2) až ílovco-	-	2.6538.10 ⁻⁴ až 6.6407.10 ⁻⁶	1.10 ⁻⁵
TKB-2	101,2 - 103,2	Dolomitické pieskovce (paleogén), svetlosivé, stredno až hrubozrnné, úlomkovité (5-35 cm)	1,025.10 ⁻⁷	-	1.10 ⁻⁷
TKB-2	107,2 - 109,2	Dolomitické pieskovce (paleogén), svetlosivé, tektonicky porušené, charakteru drobných úlomkov 0,3-5 cm	8,819.10 ⁻⁸	-	
TKB-3	113,4 - 115,4	Karbonatické brekcie, tvorené ostrohrannými úlomkami slienitých vápencov (1-10 cm) v slienitej tmavosivej hmote. Pevnosť brekcie je nízka až veľmi nízka (R4-R5).	9,424.10 ⁻⁸	-	
TKB-3	125,4 - 127,4	Slieňovce s polohami karbonatických brekcií. Slieňovce (60%) sú tmavosivé, nízkej pevnosti (R4), s poprehýbanými a hladkými puklinami. Hustota diskontinuit je 3-10 cm.	1,800.10 ⁻⁸	-	1 až 5.10 ⁻⁸
TKB-3	134,4 - 136,4	Slienité vápence s polohami slieňovcov (20-30%). Vápence sú sivé, strednej až vysokej	6,960.10 ⁻⁸	-	
TKB-4	153,0 - 155,0	Dolomity porušené, s polohami dolomitických brekcií	3,052.10 ⁻⁶	-	4.10 ⁻⁶
TKB-4	174,0 - 180,0	Dolomity, zdravé, kompaktné	4,681.10 ⁻⁶	-	
TKB-7	183,9 - 188,9	Dolomity, vápnité, sivé, kompaktné, rekryštalizované hustou sieťou kalcitových žiliek a s drobnými dutinkami. Pevnosť dolomitov je	4,192.10 ⁻⁶	-	
TKB-7	235,4 - 237,4	Dolomity, sivé, tektonicky porušené , rozpukané na drobné ostrohranné úlomky (1-8 cm), s kalcitom a Fe-oxidmi na puklinách.	1,399.10⁻⁵	-	1 až 2.10⁻⁵
TKB-12	173,6 - 175,6	Ílovce zdravé, kompaktné, s ojedinelými polohami laminovaných až veľmi tenko vrstevnatých pieskovcov (10%)	1,109.10 ⁻⁸	-	1.10 ⁻⁸

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

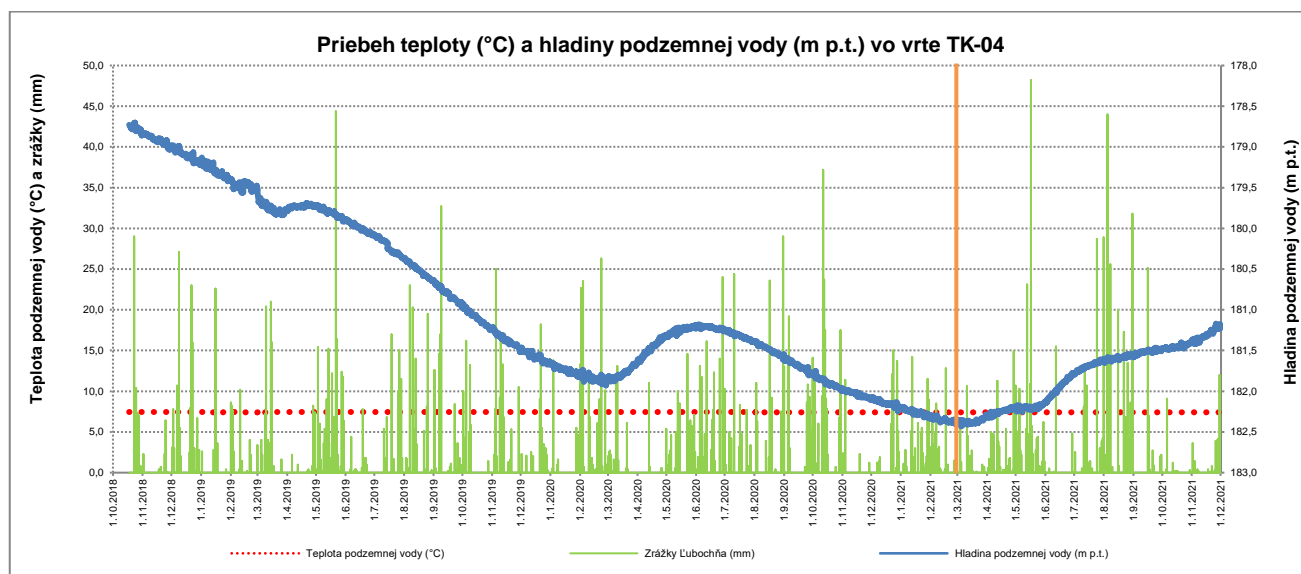
Tabuľka č. 1: Porovnanie koeficientov filtrácie stanovených in-situ a použitých v modeli



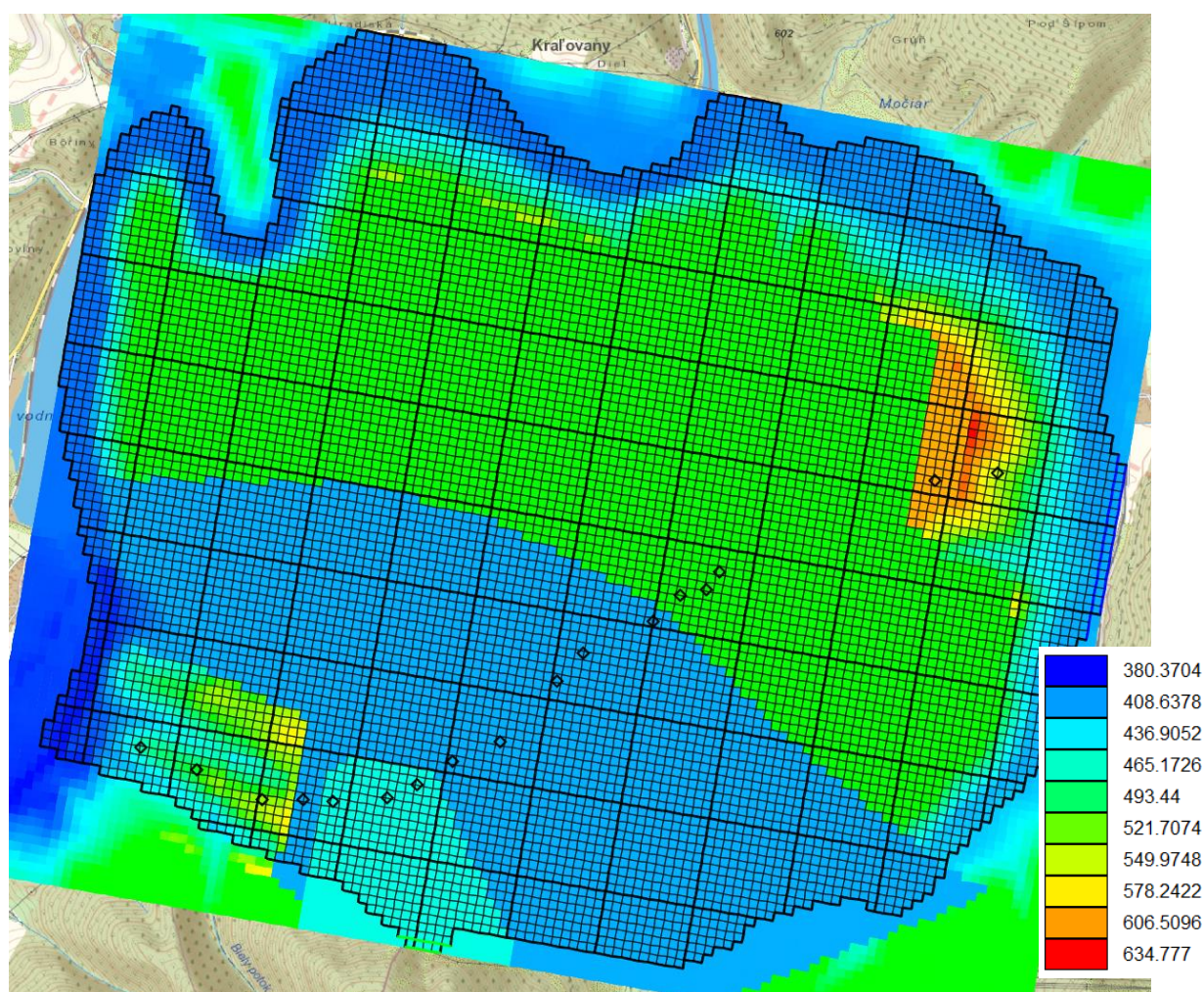
Obr. 4 Okrajová podmienka 1. druhu v miestach vybraných tokov – $H=\text{konšt.}$ (m n.m.)



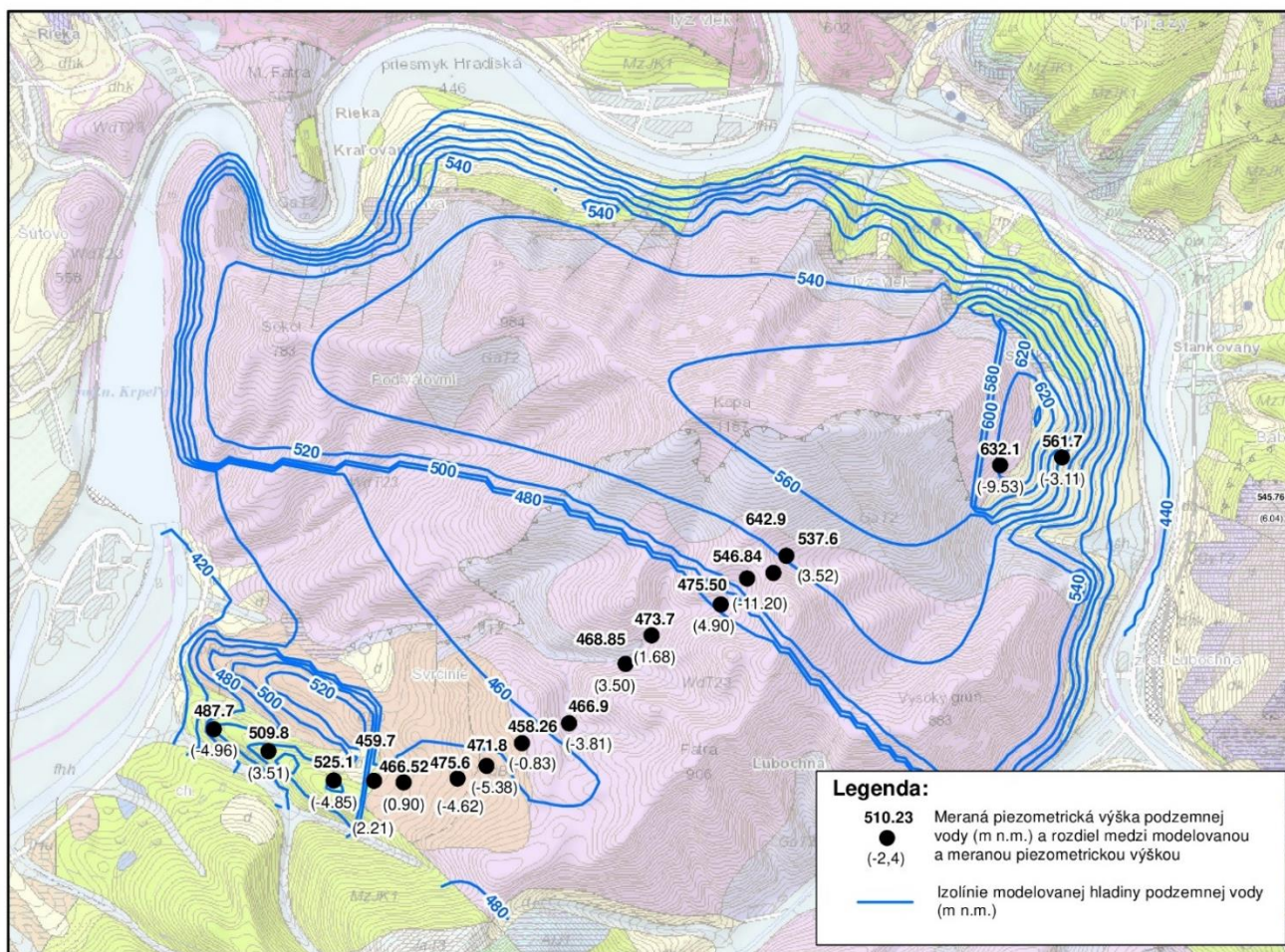
Obr. 5 Okrajová podmienka 3. druhu $Q=f(H)$ v miestach menších tokov – kóty dna (m n.m.)



Obr. 6 Zvolený reprezentatívny stav hladín podzemnej vody pre kalibráciu modelu.



Obr. 7 Kóty bázy priepustných sedimentov v modeli (v m n.m.) – kóty dna zvetranej zvodnenej povrchovej zóny, rozhrania menej priepustných vápencov a dolomitov hronika a identifikované miesta zvýšenej priepustnosti zlomových línií pri VZ Korbeľka.



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

VÝSLEDKY

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

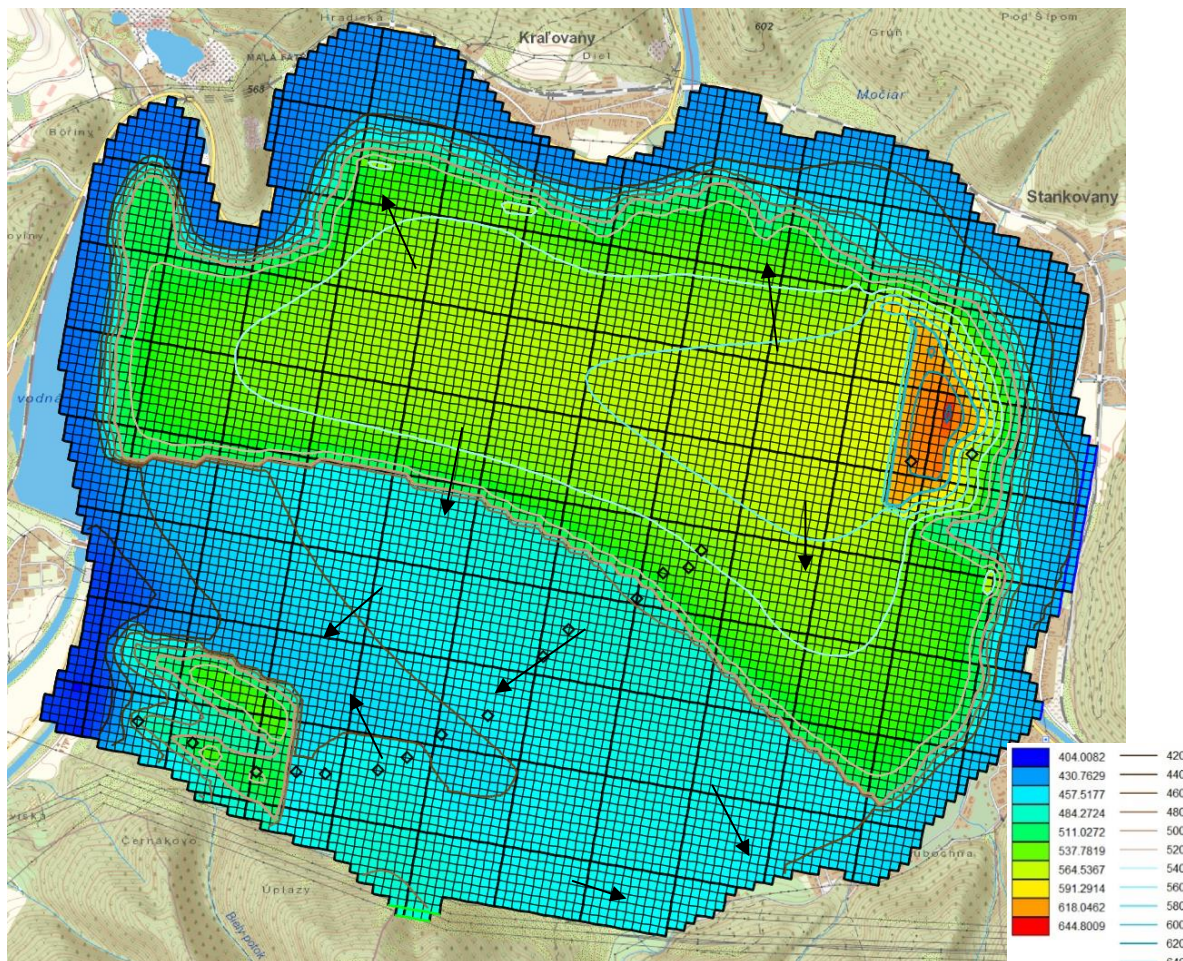
Modelované boli nasledujúce scenáre – pôvodný neovplyvnený stav bez tunelových diel, stav ovplyvnený výstavbou tunela bez opatrení a stav ovplyvnený výstavbou tunela s realizovanými opatreniami.

NEOVPLYVNENÝ STAV

Scenár 0: neovplyvnený stav - Východiskom pre posúdenie vplyvu výstavby tunelových rúr na režim podzemných vôd je model kvázi prirodzeného stavu pred výstavbou. Model vykazuje dobrú zhodu simulovanej piezometrickej výšky s hladinou nameranou vo vrtoch (Obr. 8 a Obr. 9 - miesta vrtov s údajom o piezometrickej výške podzemnej vody sú vyznačené štvorčekmi).

V rámci dolomitov a vápencov hronika v centrálnej časti masívu predpokladáme 2 principiálne časti, „dve kryhy“, ktoré majú rôznu úroveň priepustnosti. Južnejšia časť, je nižšie položená, hladina podzemnej vody je na úrovni nivelety tunela alebo pod ňou a prevažujúci smer prúdenia je ku vodnému zdroju Teplica. Druhá severná kryha, má vyššie položenú bázu priepustnejších hornín a má celkovo nižšiu priepustnosť. Voda v nej prúdi smerom do strán a to na juh, východ a sever a dotuje okolité horniny, vrátane prvej kryhy (Obr. 8). Prúdenie podzemnej vody v miestach kde vystupujú na povrch slienité vápence, slieňovce a ílovce kopíruje svahy.

Pri porovnávaní meraných hladín podzemných vôd vo vrtoch so zabudovanými piezometrami a modelovaných hladín vo vrtoch 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 vrtu od terénu až po úroveň tunela, 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.



Obr. 9 Výsledné simulované hladiny podzemnej vody [m n.m.] – neovplyvnený stav a smery prúdenia podzemnej vody.

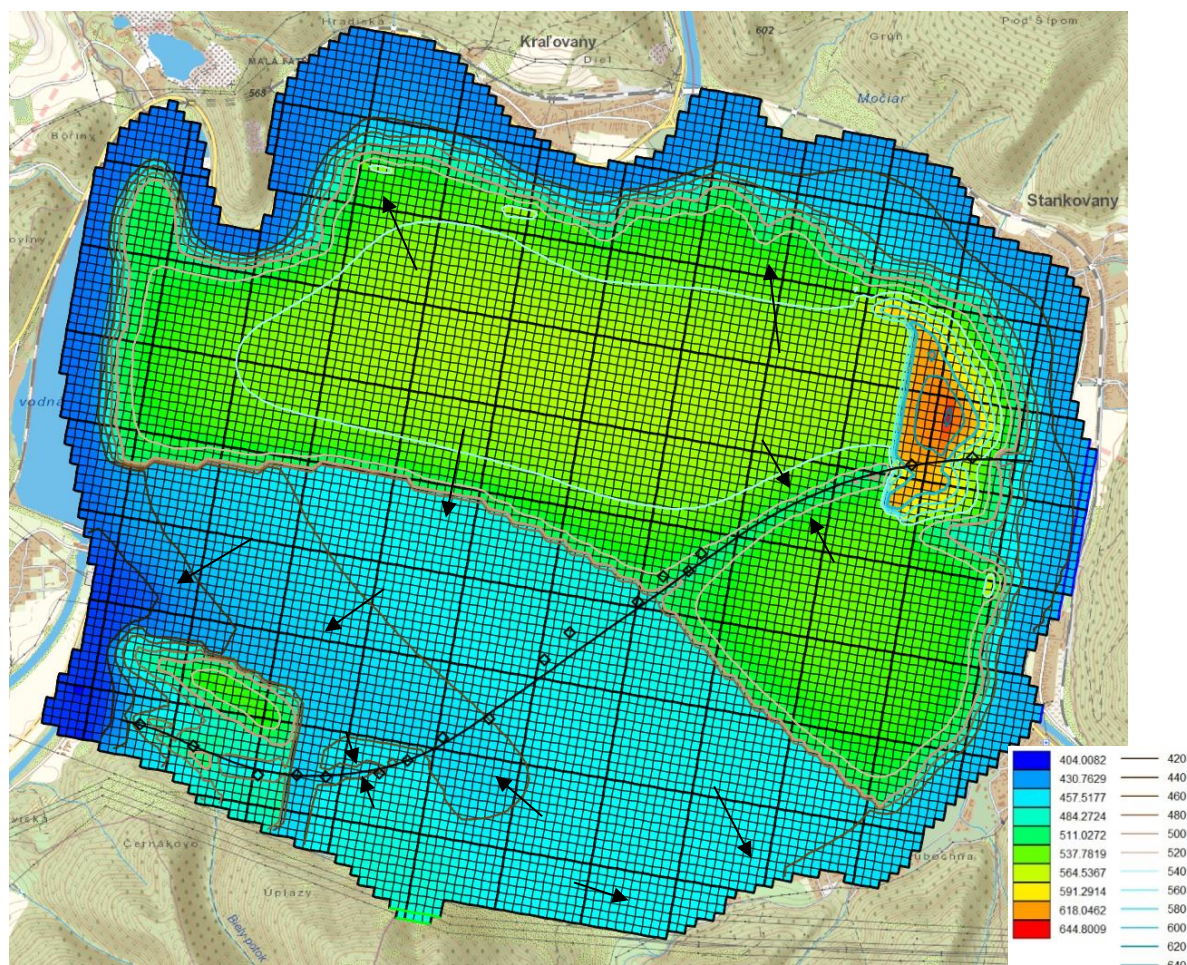
SIMULÁCIA VPLYVU TUNELOVÝCH RÚR NA PODZEMNÉ VODY

Scenár 1: realizácia tunela bez opatrení - V tomto scenári je predpokladaná konštrukcia 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 bude v úseku tvorenom skrasovatými vápencami 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 s relatívne nízkym hydraulickým odporom na plášti tunelových rúr. Kóta dna drénu bola zvolená na úrovni nivelety, a hydraulický odpor bol zvolený tak aby zodpovedal priepustnosti rozvoľneného masívu. Simuláciou drenážneho vplyvu takto definovaných tunelových rúr bolo zistené významné ovplyvnenie prúdenia podzemných vôd (Obr. 10, 11 a 12).

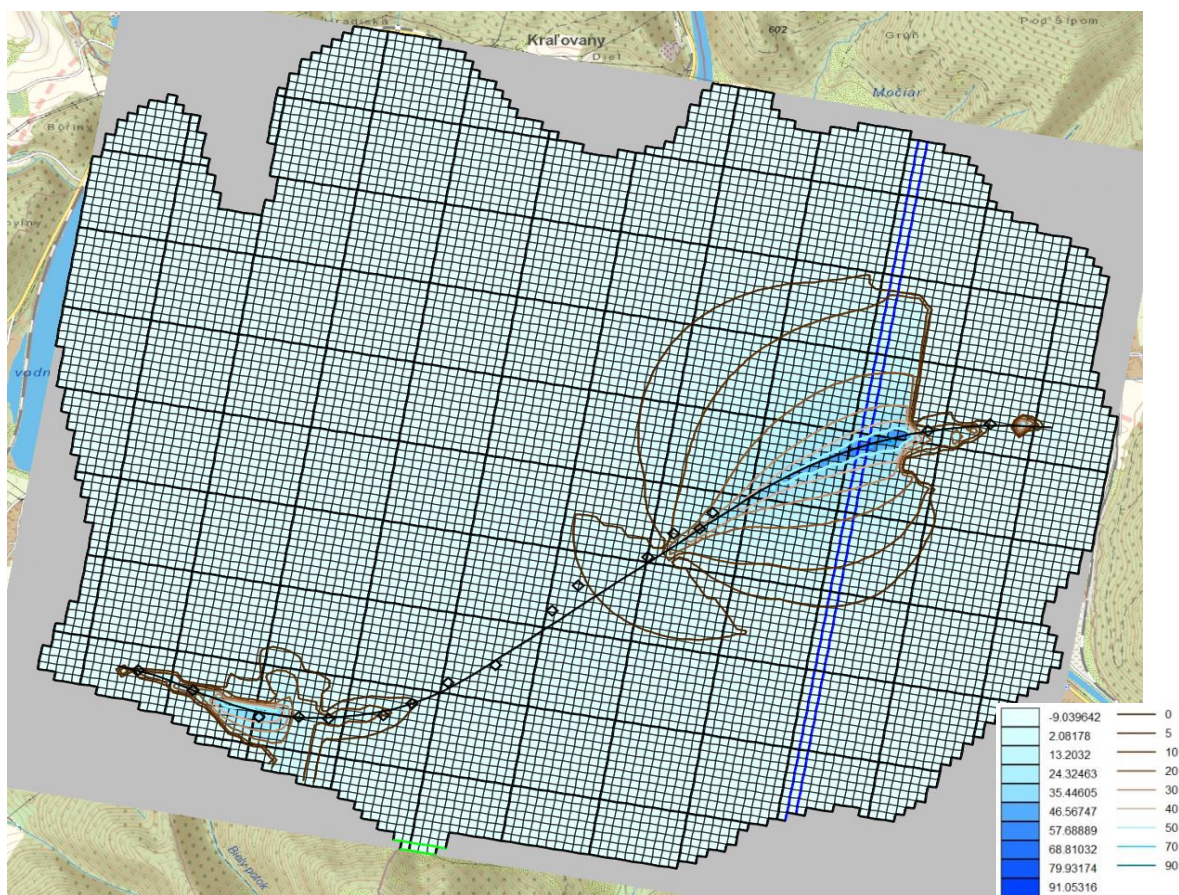
Pozdĺž tunelových rúr by došlo na viacerých miestach ku zníženiu voľnej hladiny podzemnej vody a to najmä v úvodnej časti (západ), kde je niveleta tunelových rúr na nižšej úrovni a je pod hladinou podzemnej

vody a v centrálnej časti, kde prechádza tunel priepustnými horninami severnej kryhy dolomitov a vápencov hronika. Pri tomto scenári bude mať najväčší vplyv na režim podzemnej vody drenáž v úseku km 1,7 až 2,7 (TKB-2 až TKB-5), kde dôjde ku odvedeniu vôd z dobre zvodnených vápencov napájajúcich oblasť vodný zdroj Teplica. V tomto úseku vzhľadom k významnému vodárenskému zdroju bude nevyhnutné realizovať opatrenia.

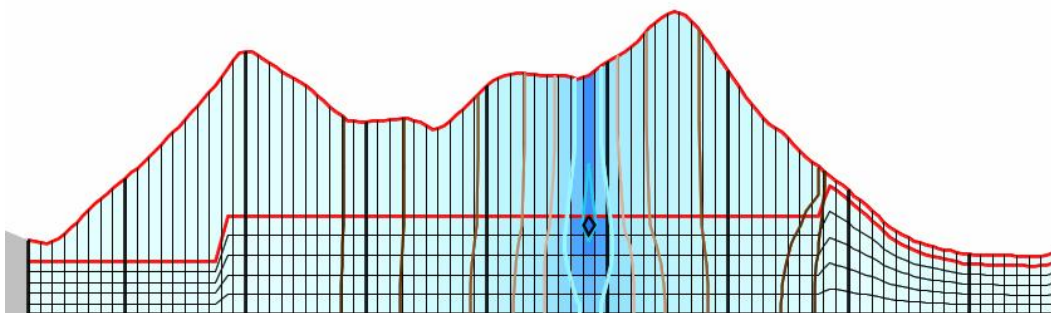
Vo východnej oblasti vo vápencoch a dolomitoch križnianskeho príkrovu (TKB-6 až TKB-8) sú poklesy malé, lebo dno tunela sa prevažne nachádza nad hladinami podzemnej vody a pokles hladín v týchto miestach je spôsobený iba ako sekundárny vplyv drenáže iných častí tunela.



Obr. 10 Simulované hladiny podzemnej vody [m n. m.] pre scenár vybudovania tunela bez opatrení.



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



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

Druhú úsek, kde môže dôjsť ku významnému drenážnemu vplyvu na režim podzemnej vody je v miestach západne položenej kryhy (km 4,2 až 5,7 tunela). V týchto miestach je hladina podzemnej vody tunelom, preto je na výsledkoch významné zníženie, a by pri výstavbe tunela bez opatrení došlo ku drénovaniu centrálnej časti masívy Kopy, ktorý napája vodný zdroj na východnej a severnej strane. Pokles hladín v týchto miestach by navyše spôsobil aj zmenšenú dotáciu podzemnej vody smerom na juhovýchod, čo bude mať za následok, že hladiny by mohli poklesnúť niekoľko metrov aj v úseku tunela kde je hladina pod jeho niveletou. Aj v tomto úseku bude nevyhnutné realizovať opatrenia.

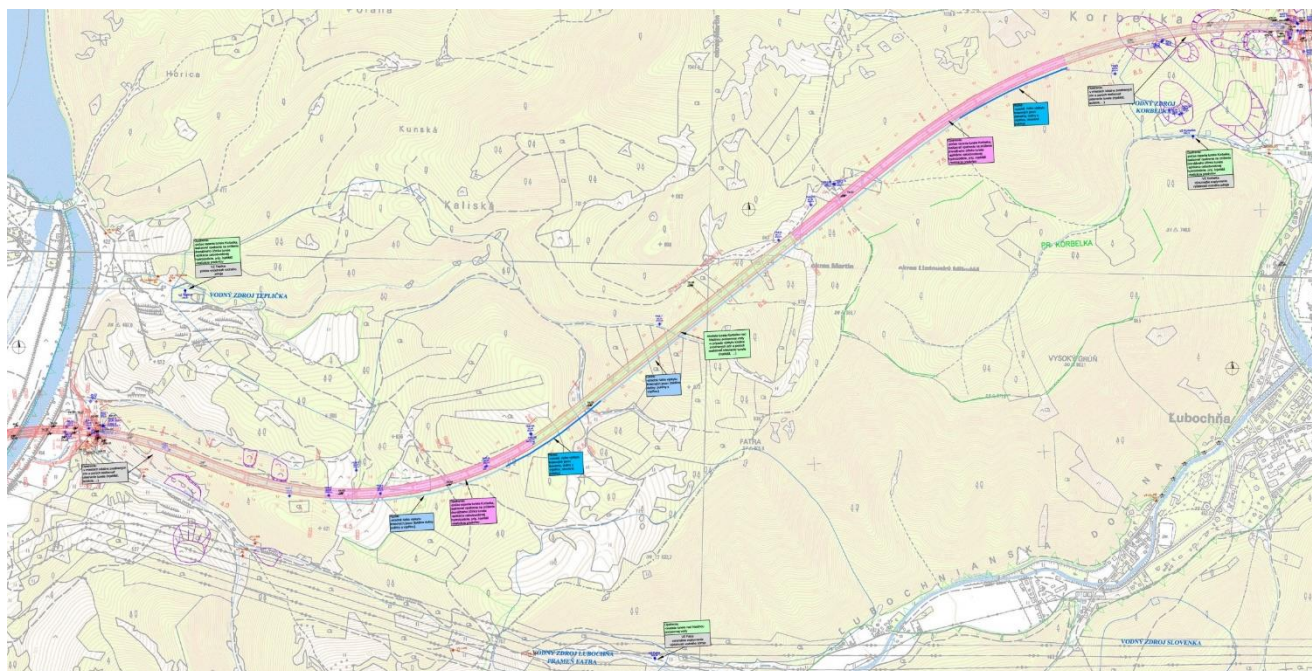
Numerickým modelovaním bol odhadnutý aj pravdepodobný percentuálny pokles výdatností okolitých vodných zdrojov a je uvedený v Tab. 2.

Scenár 2: realizácia tunela s realizovanými opatreniami - V riešení je predpokladaná konštrukcia tunela podobná s prechádzajúcim variantom, navyše sa v exponovaných miestach uvažuje s betónovým ostením hrúbky 300 mm, celoplošovou hydroizoláciou a utesneným okolím oboch tunelových rúr (nepriepustný tunel) – Obr. 13. 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% zníženia hodnoty hydraulického odporu bola zvolená na základe konzervatívneho odborného odhadu. V skutočnosti úroveň opatrení zodpovedá poklesu hydraulického odporu až na úroveň jednotiek percent, výpočty sú na strane bezpečnosti, keby došlo pri opatreniach v dôsledku iných vplyvov ku zmenám priepustnosti celoizolovaného profilu ostenia tunelu.

Simuláciou drenážneho vplyvu takto definovaných tunelových rúr bolo zistené významné menšie ovplyvnenie prúdenia podzemných vôd a to väčšinou iba lokálneho významu (Obr. 14, 15 a 16). Nedôjde ku zásadným zmenám smerov prúdenia ani množstva podzemnej vody a významne klesne riziko ohrozenia vodného zdroja Teplica a vodného zdroja na severe masívu Kopy.

Napriek zvoleným opatreniam je predpoklad, že najviac bude ovplyvnený VZ Korbeľka, ktorý je veľmi závislý od lokálnych pomerov, má nízku a premenlivú výdatnosť. V jeho prípade treba vopred uvažovať s jeho náhradou.

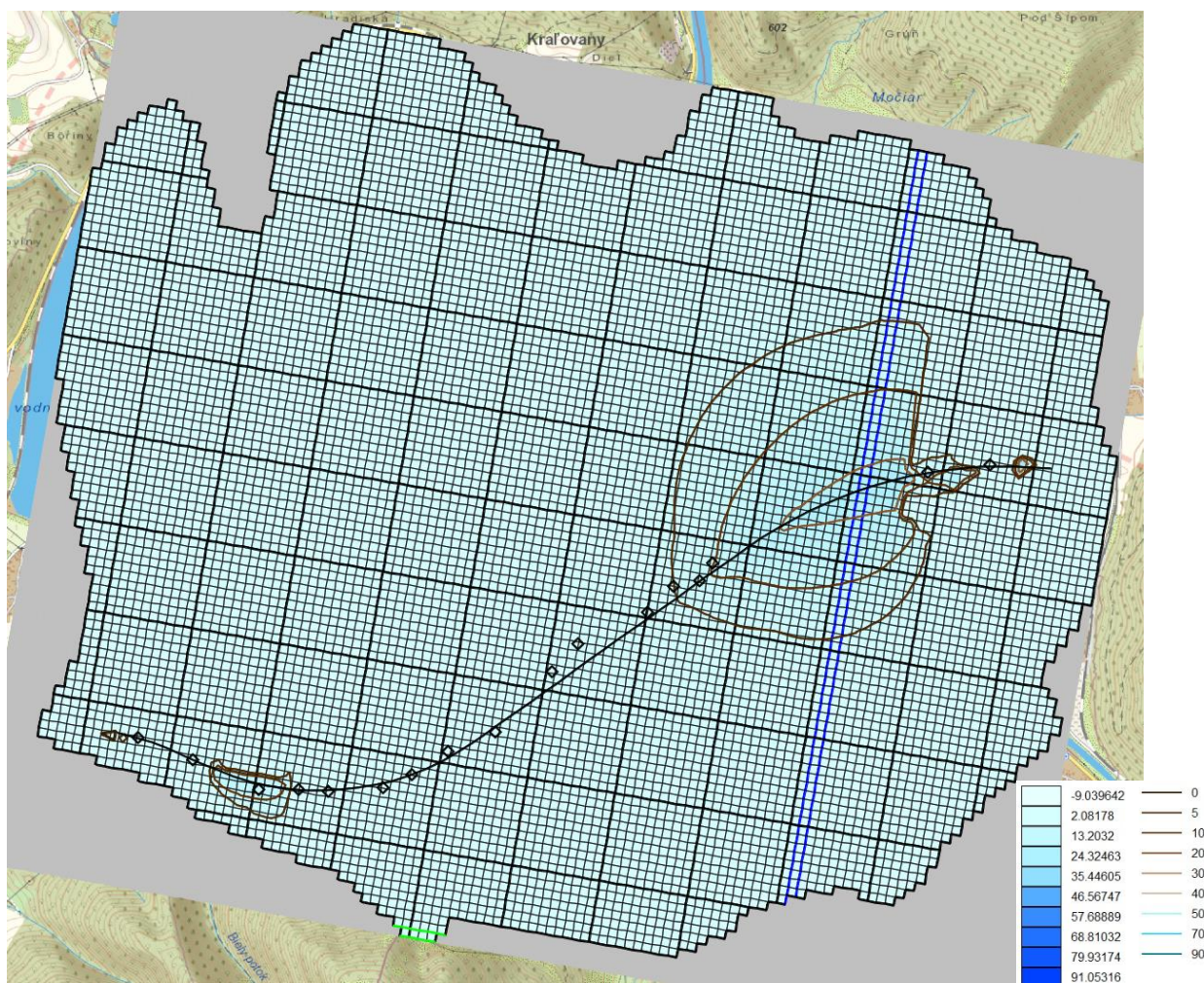


Obr. 13 Navrhované opatrenia na zníženie drenážneho účinku tunela – scenár 2.

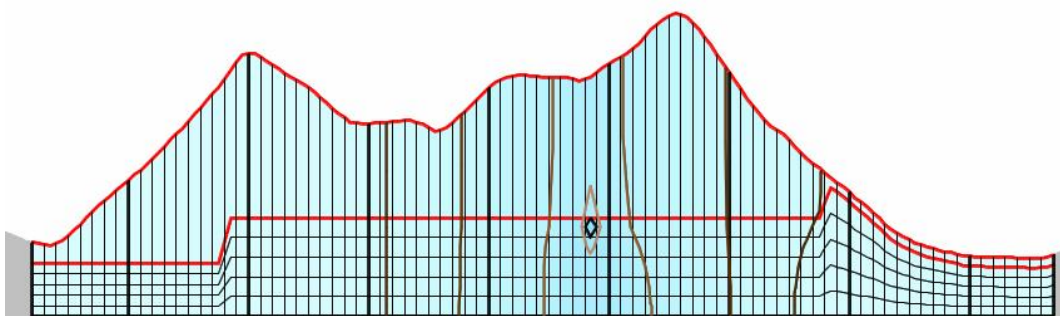
Zelená farba – niveleta tunela nad HPV – v prípade výskytu zvodnených zón a porúch utesnenie tunela (injektáž)

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

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



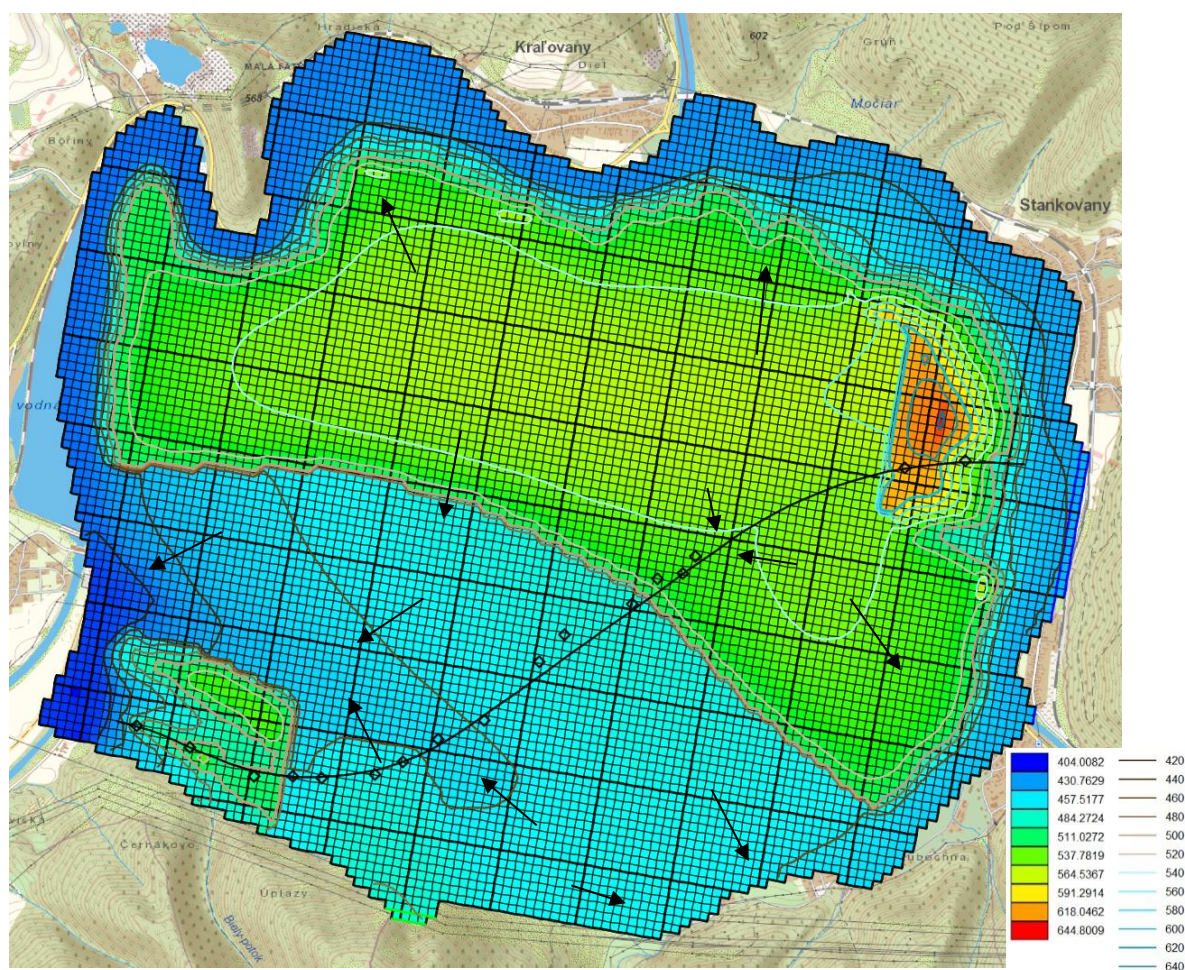
Obr. 14 Pokles hladiny podzemnej vody v oblasti pre scenár výstavby tunela s opatreniami



Obr. 15 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 (viac kapitola 4.6) a pre variant s realizovanými opatreniami (nepriepustný tunel – uzatvorený hydroizolačný systém) je stanovený v hydraulickom modeli prúdenia podzemných vôd a je sumarizovaný v tabuľke č. 1. Pri realizácii navrhovaných opatrení bude priemerný pokles hladín podzemných vôd v masíve Kopa 28,2 m pri minimálnom stave hladiny podzemných vôd (voči 45,8 m bez opatrení) ako aj zmeny výdatností vodných zdrojov budú významne nižšie v porovnaní s variantom bez opatrení.

Čiastočne budú ovplyvnené všetky vodné zdroje v oblasti (Teplica 1 a 2, Fatra, Korbeľka, Rojkov a Pod Kopou), ako aj menšie vodárensky nevyužívané pramene (Krpel'any, Ľubochňa, Kľačany, Sinava a ďalšie). Celkové zníženie výdatnosti všetkých vodárenských zdrojov bolo vypočítané na $5,52 \text{ l.s}^{-1}$ (Tab. 1).



Obr. 16 simulované hladiny podzemnej vody [m n. m.] pre scenár vybudovania tunela s opatreniami.

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

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 s realizáciou opatrení (%)	Pokles priemernej výdatnosti – stav s realizáciou opatrení (L.s^{-1})
Teplica	26.04	35.24	30.20	14.30%	3.72	32.10	8.90%	2.32
Fatra	5.79	2.65	2.52	4.90%	0.28	2.57	3.20%	0.19
Korbeľka	0.49	2.51	1.58	37.10%	0.18	1.73	31.10%	0.15
Rojkov	4.73	12.34	11.82	4.20%	0.20	11.99	2.80%	0.13
Pod Kopou	15.03	10.89	8.25	24.20%	3.64	8.91	18.20%	2.74
Spolu	52.08				8.03			5.52

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

stav bez opatrení – priepustný tunel, otvorený izolačný systém s postrannou drenážou

stav realizácia s opatreniami – nepriepustný tunel (uzatvorený hydroizolačný systém) a polopriepustný tunel v zvolených miestach

Výdatnosť reálnych prameňov je odrazom premenlivej infiltrácie, akumulácie a obehu podzemných vôd, ktoré sú predurčené zložitými hydrogeologickými podmienkami. Aj napriek vysokej komplexnosti prezentovaného modelu nebolo možné, vzhľadom na prijatý koncept, dosiahnuť absolútnu zhodu simulovaných a reálnych výdatností. Matematický model v miestach jednotlivých prameňov má inú mierku, keďže vychádza z regionálneho prieskumu masívu, inú mierku má model v trase tunela Korbeľka, pre ktorý bol realizovaný podrobný inžinierskogeologický a hydrogeologický prieskum.

Matematický model však dokáže stanoviť ovplyvnenie hladín a množstvá podzemnej vody

v oblastiach jednotlivých vodných zdrojov a prameňov. Preto bol prijatý spôsob vyjadrenia zmeny výdatností pomocou percentuálneho rozdielu medzi simulovaným neovplyvneným a ovplyvneným stavom a tento rozdiel potom aplikovať na reálne výdatnosti vodných zdrojov, čím bol získaný odhad poklesu výdatnosti v jednotkách l.s^{-1} .

Matematický model bol zostavený na základe dostupných výsledkov inžinierskogeologického a hydrogeologického prieskumu, úrovne poznatkov o prúde vody v masíve Kopy. Pri geologickom prostredí s veľmi vysokou heterogenitou, v podmienkach puklinovej priepustnosti a možnosti výskytu krasových javov, môže dôjsť pri výstavbe tunela ku anomálnym prejavom spôsobených individuálnymi puklinami a krasovými prvkami, ktoré prieskum nezachytil.

Preto je nevyhnutné, aby počas výstavby (razenia) tunela bol na lokalite zriadený on-line monitorovací systém, sledujúci minimálne pramene VZ Teplica, Fatra, Korbeľka, Pod Kopou a vybrané monitorovacie vrty, aby v prípade prudkého poklesu výdatnosti alebo piezometrických výšok bolo možné operatívne realizovať opatrenia na minimalizáciu nežiadúcich vplyvov.

VZ Korbeľka je veľmi závislý od lokálnych pomerov, má nízku a premenlivú výdatnosť a aj na základe výsledkov modelovania bude pravdepodobne najviac ovplyvnený. V jeho prípade treba uvažovať s jeho odstavením a náhradným riešením – najlepšie pripojením ním napájaných objektov na diaľkový vodovod.

V Bratislave, marec 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>.
- Malík, P., Kordík, J., Bottlik, F., Kováčová, E. 2006: Základná hydrogeologická mapa západnej časti Veľkej Fatry v mierke 1 : 50 000. Čiastková záverečná správa. Manuskript – Archív odboru informatiky ŠGÚŠS (Geofond), Bratislava, 277 s.
- Polák, M., Bujnovský, A., Kohút, M., Filo, I., Pristaš, J., Havrila, M., Vozár, J., Mello, J., Rakús, M., Buček, S., Lexa, J., 1997: Geologická mapa Veľkej Fatry, Bratislava, GS SR.
- Švasta, J. - Malík, P., 2008: Vzťah podzemných a povrchových vôd v oblasti hydrogeologickej štruktúry karbonátov hronika Kopy vo Veľkej Fatre. Podzemná voda XIV /2006 č. 2, Slovenská Asociácia Hydrogeológov, Bratislava, s. 151 – 160
- Grenčíková, A. et al., 2019: Diaľnica D1 Turany – Hubová, Záverečná správa z podrobného inžinierskogeologického a hydrogeologického prieskumu, DPP Žilina s. r. o., Žilina.