HODNOTENIE PREDPOKLADANÝCH VPLYVOV VÝSTAVBY PODZEMNEJ ŽELEZNIČNEJ TRATE NA PRÚDENIE A REŽIM PODZEMNÝCH VÔD

EXPECTED IMPACT ASSESSMENT OF UNDERGROUND RAILWAY LINE ON THE GROUNDWATER REGIME

Andrej Šoltész, Dana Baroková

ABSTRACT
In the frame of improvement the transport infrastructure in the Bratislava region the connection between the airport and railway network is planned. One part of it should be built in the underground tunnel along the Carpathian Mountains and it will affect the groundwater flow regime. This was the reason for establishing a 2–D finite element numerical model for evaluating the impact of the railway tunnel on the groundwater level (GWL) regime as well as for introduction of technical measures to neglect the impacts. Such a model was elaborated and the results have shown the analysis, prognosis as well as possibilities of control the groundwater regime in the aquifer affected by a railway tunnel construction.

KEY WORDS
Interaction of surface and groundwater, underground wall, numerical modelling, finite element method

KĽÚČOVÉ SLOVÁ
Interakcia povrchovej a podzemnej vody, podzemná stena, numerické modelovanie, metóda konečných prvkov

ÚVOD

V rámci zlepšenia dopravnej infraštruktúry v Bratislave a jej širšom okolí (Koncepcia BID, 2008, Longa et al., 2007a, 2007b, 2007c, Kačo et al., 2007), bola od druhého polroku 2007 spracovávaná dopravno – urbanistická „Štúdia prepojenia železničného koridoru TEN–T č. 17 s letiskom a železničnou sieťou v Bratislave“. Projekt TEN–T – Trans European Network for Transport je projekt stavby železnice, cieľom ktorej je kontinuálna prestavba magistrály Paríž – Štrasburg – Stuttgart – Viedeň – Bratislava – Budapešť (Parkrová, 2009). Pripravovaná železnica má viesť centrom Bratislavy, pričom súčasťou celého komplexu štúdii prepojenia železničného koridoru TEN–T sú aj nasledujúce stavby:

Prvá stavba – vedenie prepojenia železničných staníc Bratislava Predmestie – zastávka Slovany – stanica Filiálka, s plánovanými zastávkami Nivy, Centrum (pri novostavbe Národného divadla) a Slovany (Longa, 2007c, Šoltész, Baroková, 2007).

Druhá stavba, ktorá rieši napojenie Letiska M. R. Štefánika na existujúce (aj medzinárodné) železničné trate a vybudovanie železničnej stanice Bratislava letisko (Longa, 2007 a, b), (Hornáčková-Patschová et al., 2008).

Prvá stavba projektu, Bratislava Predmestie Bratislava Petržalka, spájajúca existujúce železničné trate na oboch brehoch rieky Dunaj tunelovým vedením pod centrom mesta a popod koryto rieky, je rozhodujúcou a technicky a ekonomicky najnáročnejšou časťou projektu. Celková dĺžka uvedenej vetvy železničného prepojenia je 6,88 km, z čoho 6,43 km je vedených tunelmi. Istá časť trasy, kde sa bude niveleta trate postupne ponárať pod jestvujúci terén, sa má budovať hĺbením zhora pod ochranou pažiacich a tesniacich stien. Vzhľadom k tomu, že uvedený úsek výstavby trasy bude vedený prevažne v zvodnenej vrstve horninového prostredia pod úpätím Malých Karpát, bolo potrebné zostaviť matematický model prúdenia podzemných vôd (Šoltész, Baroková, 2008), ktorý by čo najspoľahlivejšie stanovil vplyv výstavby projektovaného železničného tunela na vývoj hladinového režimu podzemných vôd v danej oblasti.

Úlohou modelu bola simulácia tunelovej trasy

Prof. Ing. Andrej Šoltész, PhD., Ing. Dana Baroková, PhD.
Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra hydrotechniky, Radlinského 11, 813 68 Bratislava,
dana.barokova@stuba.sk, andrej.soltesz@stuba.sk

v úseku od železničnej stanice Bratislava Predmestie po železničnú stanicu Bratislava Filiálka, ktorý sa má budovať hĺbením zhora (Úsek č. 1 – znázornený na obr. 1) a jej vplyv na hladinový režim podzemných vôd.

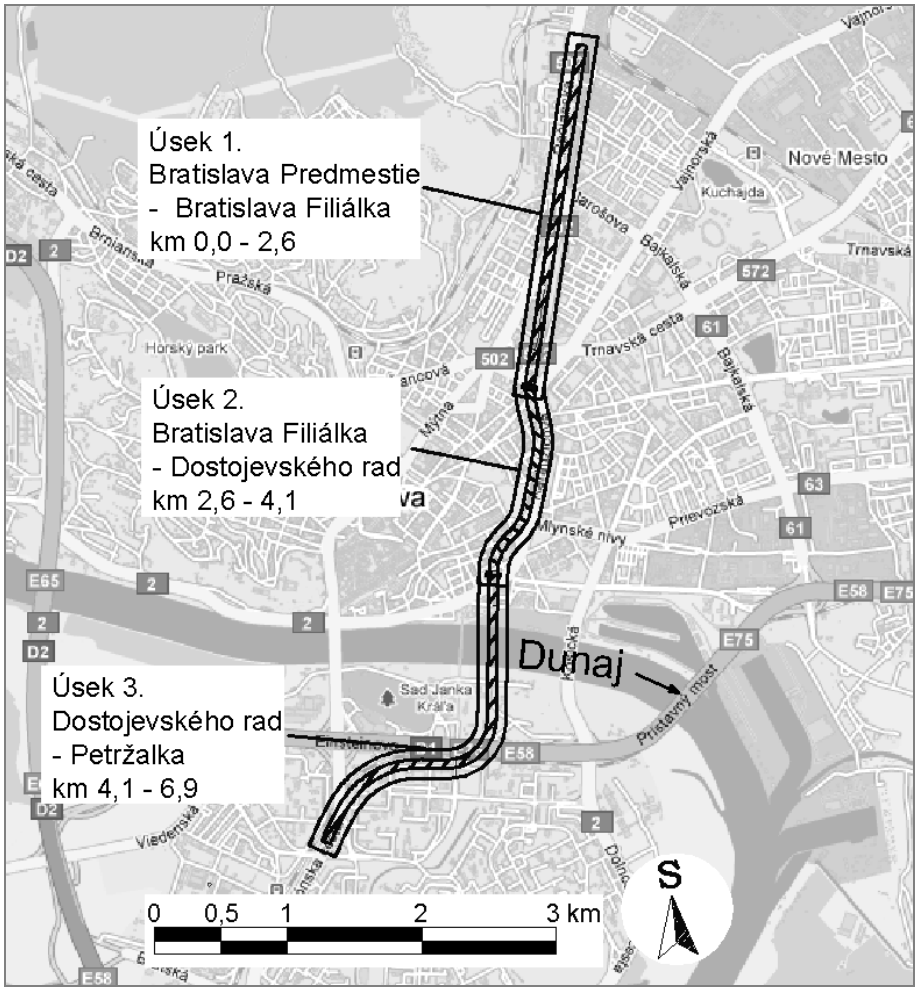
Predkladaný príspevok popisuje navrhnuté technické opatrenia, ktoré by minimalizovali negatívny dopad navrhovanej stavby ako aj účinok týchto protiopatrení na hladinový režim a smer prúdenia podzemných vôd.

NÁVRH A ZOSTAVENIE KONCEPČNÉHO MODELU

Geomorfologická, klimatická a hydrologická charakteristika územia

Železničná trasa Bratislava Predmestie – Bratislava Petržalka prechádza priamo intravilánom mesta Bratislava, mestskými časťami Petržalka, Staré Mesto a Nové Mesto. Územie, v ktorom je navrhovaná stavba uvedenej trate spadá do okresov Bratislava V, Bratislava I a Bratislava III. Zo širšieho fyzickogeografického hľadiska je Bratislava situovaná na rozhraní dvoch orografických celkov Podunajskej a Záhorskej nížiny v predhorí Malých Karpát, na sútoku riek Dunaja a Moravy. Rieka Dunaj rozčleňuje Karpaty na dva celky, a to Litavské pohorie v Rakúsku a Malé Karpaty na Slovensku. Podľa geomorfologického členenia (Mazúr, Lukniš, 1986 in Škvarka et al., 2007, Burger, 2007) záujmové územie leží na rozhraní celkov Podunajská rovina a Malé Karpaty.

Z hľadiska morfologicko – morfometrických typov reliéfu celok Podunajskej roviny predstavuje mladú jednotvárnu nerozčlenenú rovinu s generálnym úklonom k juhovýchodu. Časti Bratislavské predhorie a Homolské Karpaty predstavujú oblasť stredne členitých pahorkatín. Reliéfna členitosť, miestami trochu väčšia, je celkovo nevýrazná. Vyjmúc niektoré údolia, charakteristické väčším relatívnym prevýšením a strmšími svahmi, ide o reliéf dosť mierny.



Obr. 1: Situácia záujmového územia v Bratislave (zdroj: Škvarka et al., 2007)
Fig. 1: General overview of the solved region in Bratislava (source: Škvarka et al., 2007)

Generálny sklon územia je SZ-JV s priemerným sklonom v hornej časti 0,35 %. Nadmorská výška sa v okolí záujmovej lokality pohybuje v intervale od 134 do 140 m n.m.

Klimaticky je záujmové územie zaradené do teplej oblasti, okrsku A5, charakterizovaného ako teplý, mierne vlhký s miernou zimou. Priemerné ročné teploty sa pohybujú okolo 10,5 °C. Priemerný úhrn zrážok zo zrážkomernej stanice Bratislava – Koliba je 659 mm / rok a priemerný reálny výpar je 531 mm / rok (Švasta, Malík, 2006). Hydrologicky územie patrí povodiu rieky Dunaj, ktorá preteká naprieč skúmanou lokalitou a je hlavným hydrologickým činiteľom v území. V súčasnej dobe sú hladiny v Dunaji ovplyvnené vodnou stavbou Gabčíkovo, ktorého vzdutie siaha až nad nami skúmané územie.

Geologické a hydrogeologické pomery

Z geologického hľadiska záujmové územie zaraďujeme do podunajskej panvy. Na geologickej stavbe sa podieľajú horniny paleozoika, neogénu a kvartéru (Škvarka et al., 2007). Vzhľadom na hĺbku vedenia trasy, pozornosť venujeme len kvartérnym a neogénnym sedimentom. Neogén má v území charakter okrajovej príbrežnej fácie, kde sedimentácia prebiehala v tektonicky aktívnom období. Sedimenty neogénu nevystupujú priamo na povrch, ale sú prekryté fluviálnymi sedimentami kvartéru. Počas pleistocénu postupným zarezávaním Dunaja do masívu Malých Karpát a akumuláciou štrkopiesčitých sedimentov na neogénnu výplň kotliny sa vytvoril mohutný náplavový kužeľ dunajských fluviálnych štrkopiesčitých sedimentov. Hrúbka štrkopiesčitých fluviálnych sedimentov v území sa pohybuje od 10 do 17 m. V celom území sú najvrchnejšie polohy štrkov prekryté nesúvislou vrstvou fluviálnych hlín a pieskov o hrúbke 1 – 3 m (Šútor, Gomboš, 2007).

Hladina podzemnej vody v záujmovom území sa pohybuje v rozmedzí 3 – 8 m pod terénom. Priemerný koeficient filtrácie zvodnených štrkopiesčitých sedimentov sa pohybuje rádovo okolo 10^{-3} m·s^{-1}. Sedimenty neogénu pôsobia ako nepriepustný izolátor, môžu však obsahovať uzavreté piesčité polohy, ktoré sú zvodnelé, dotované prestupmi vo väčších hĺbkach, resp. ako uzavreté šošovky s obmedzenou výdatnosťou a s napätou hladinou.

Popis územia

Hodnotené územie, ktoré sa nachádza v oblasti Bratislavy – mestská časť Staré mesto, je ohraničené zo severu Račou, z východu Vajnormi, letiskom, Vrakuňou a Slovnaftom; z východu Petržalkou a zo západu – severozápadu pohorím Malých Karpát. Plocha riešeného územia je asi 60,2 km^2 a jeho obvod je cca 30 km.

Pre ciele zostavenia numerického modelu prúdenia podzemných vôd (Jandora in Říha et al., 1997) bol vytýčený okraj oblasti filtrácie tak, aby vystihoval hlavné rysy prirodzeného prúdenia podzemných vôd v tejto oblasti. Zväčša je vedený cez pozorovacie sondy SHMÚ, kde sa zadávala stabilná Dirichletova okrajová podmienka – piezometrická výška resp. hladina podzemnej vody (HPV) v m n. m. (Kovářík, 2000, Krčmář, 2002). Výnimkou je západná a severozápadná časť hranice, kde sa zadávala nestabilná Neumanova okrajová podmienka – prítok do oblasti podľa Malíka (2007).

HPV (m n. m.) v sondách SHMÚ bola určená pre dva kalibračné stavy: priemerný a maximálny stav. prvom prípade bola hladina daná priemernou hodnotou HPV za roky 1993 – 2006, v druhom prípade sa maximálna HPV stanovila ako priemer za mesiac apríl 2006, kedy sa nastal extrémny hydrologický stav.

Vedenie trasy

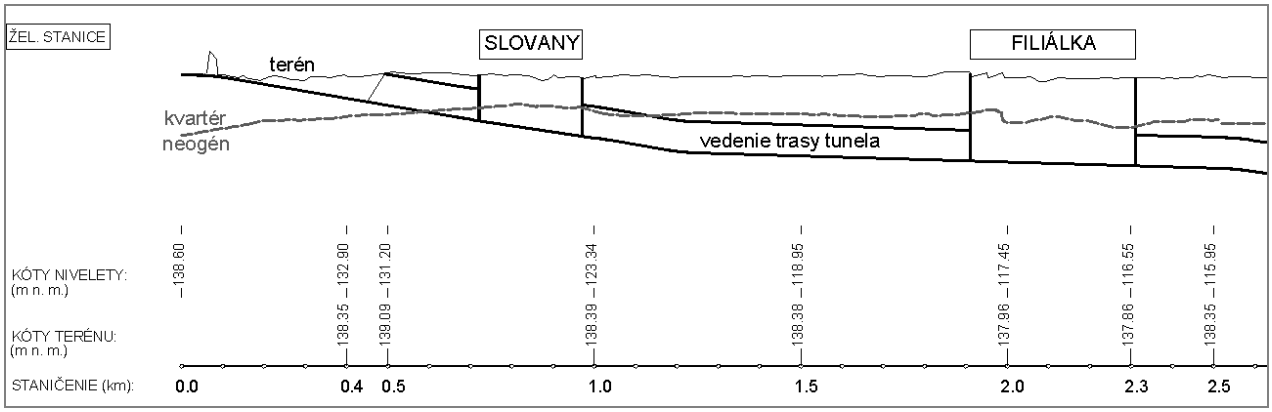
Umiestnenie vedenia budúcej trasy je zrejmé z obr. 1 a obr. 2. Podľa projektu Dopravoprojektu Bratislava (Šoltész, Baroková, 2008), je koniec železničnej stanice „Bratislava – Predmestie“ naprojektovaný v km 0,00 (obr. 2). V tomto mieste končí aj povrchový úsek vedenia trasy a začína prechodový úsek trasy hĺbeným spôsobom.

Plne hĺbená dvojkoľajná tunelová trasa začína cca v km 0,40. V km 0,74 sa plánuje s vybudovaním „železničnej zastávky Bratislava – Slovany“ (začiatočný úsek), konečný úsek zastávky má byť podľa projektu v km 0,99, odkiaľ pokračuje dvojkoľajný hĺbený úsek trate – „Tunel Jarošova“. V mieste dnešnej Kutuzovovej ulice sa plánuje s vybudovaním podzemnej stanice „Bratislava Filiálka“ (4 – 6 nástupištných hrán od km 1,8), takže v úseku km 1,93 – 2,33 sa bude nachádzať stavebná tesnená jama stanice. Od km 2,35 sa plánuje s tunelovým vedením (razením) trasy, ale táto časť by už nemala ovplyvniť režim podzemných vôd kvartéru, nakoľko podľa projektu bude budovaná v neogéne.

ANALÝZA SÚČASNÉHO STAVU

Spracovanie vstupných podkladov

Výsledky uskutočneného orientačného inžinierskogeologického prieskumu získané z dostupných archívnych geologických podkladov EKOGEOS zakladanie, s. r. o. doplnené poznatkami z realizovaného vrtného a terénneho prieskumu pre projekt TEN–T t.j. podkladmi Dopravoprojektu, SHMÚ, VÚVH, SAV a ŠGÚDŠ Bratislava a. s. (Škvarka et al., 2007, Kačo et al., 2007, Kullman et al., 2006, Čaučík et al., 2007, Blaškovičová et al., 2007, Štekauerová et al., 2009, Hornáčková–Patschová et al., 2008, Kopecký, 1999) boli spracované a použité pri zdigitalizovaní koeficientu filtrácie, pri určení mapy morfológie terénu (vrstevnicové mapy),



Obr. 2: Pozdĺžny rez prepojenia, predpokladaná stavebná jama v km 0,4 – 2,33
Fig. 2: Longitudinal cross–section of the connection, assumed foundation pit in km 0.4 – 2.33

rozhrania pokryvných vrstiev, kvartéru a neogénu, hrúbok pokryvných vrstiev, hrúbok zvodnenej vrstvy a polohy bázy kvartéru. Z vyhodnotenia geologických pomerov územia vyplýva, že hrúbka zvodnenej vrstvy narastá v smere od Z-SZ na V z hodnoty 3 – 5 m až po 19 – 20 m. Pokryvné vrstvy zemín na celom území sú tvorené prevažne hlinami, ktorých hrúbka je na celom území relatívne nízka v rozpätí od 0,5 m do 1,2 m ojedinele až 5 m. Hodnoty koeficientu filtrácie (obr. 3) sa v oblasti budúcej trasy nepriepustnej steny pohybujú v rozpätí 60 – 1000 $m \cdot d^{-1}$ ($5 \cdot 10^{-4} – 1 \cdot 10^{-2}$ $m \cdot s^{-1}$). Podľa týchto hodnôt možno zvodnený horizont hodnotiť ako horninové prostredie s relatívne vysokou priepustnosťou.

Hydrologické podklady

Predmetom skúmania bolo obdobie po dostavbe Vodného diela Gabčíkovo, a preto pri spracovaní meteorologických údajov sme sa zamerali na obdobie od začiatku hydrologického roku 1993.

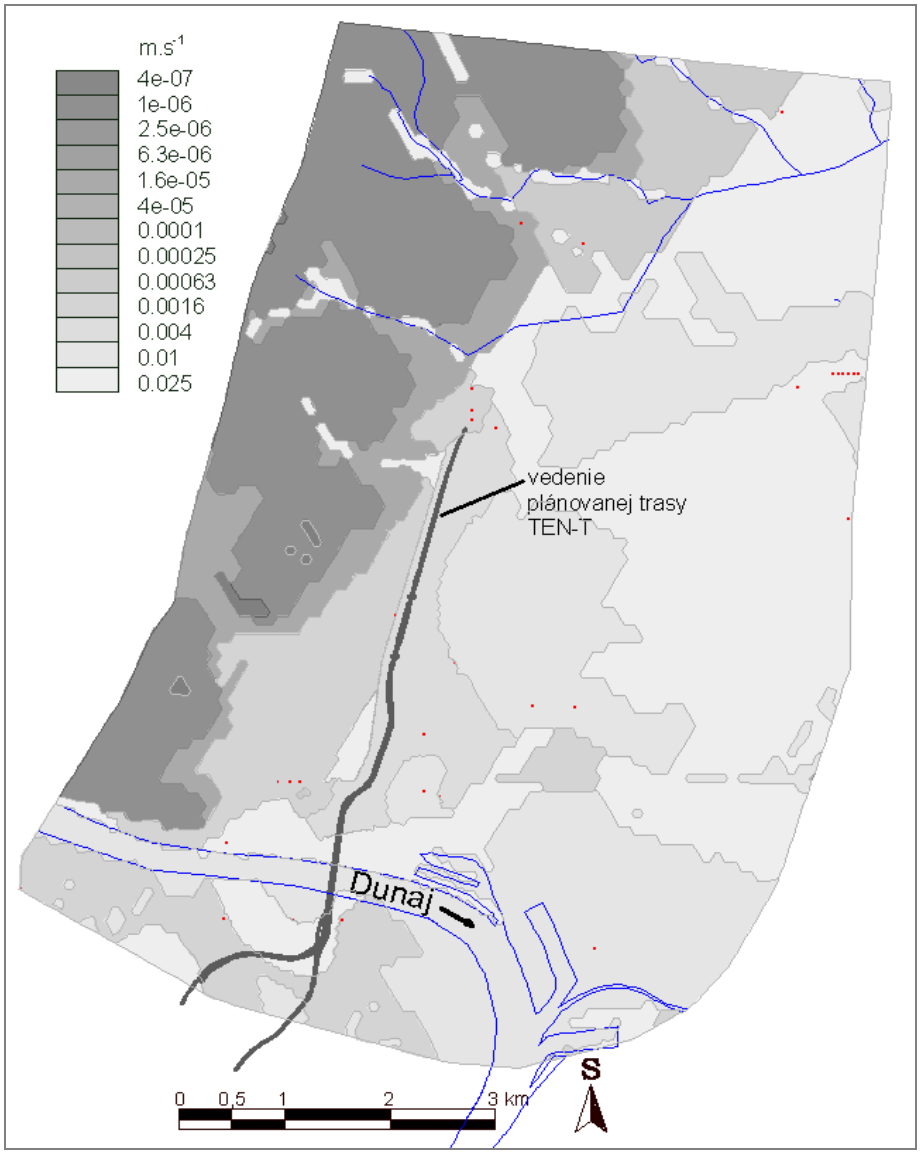
Pri kalibrácii modelu sú na porovnanie výpočtu so skutočnosťou potrebné merania hladiny podzemnej vody. Model sme kalibrovali tak na dlhodobý priemer za obdobie 1993 – 2006, ako aj pre maximálne HPV (Čaučík et al., 2007), ktoré sa na danom území vyskytli v apríli 2006. Výber spracovaných hodnôt – priemernej a maximálnej HPV v blízkosti oblasti záujmu, sú uvedené v tab. 1. Ak porovnáme rozdiely medzi priemernou a maximálnou hodnotou HPV je zrejmé, že tento rozdiel je veľmi malý, ale napriek tomu bola simulácia vykonaná pre oba stavy – priemerný a maximálny stav HPV. V tab. 1 je navyše uvedený rozptyl hladín podzemných vôd medzi maximálnou a minimálnou HPV, ktorá sa vyskytla od r. 1993 až po súčasnosť. Tieto hodnoty svedčia o tom, že režim HPV v tejto oblasti je vyrovnaný.

Do modelu vstupuje aj hodnota rýchlosti infiltrácie vo forme tzv. efektívnych zrážok, t.j. tá časť zrážkových úhrnov, ktorá je schopná infiltrovať do horninového prostredia. Tieto boli stanovené ako rozdiel zrážkových úhrnov a reálnej evapotranspirácie v území (Švasta, Malík, 2006), (Možiešiková et al., 2007). Zo SHMÚ

Tab. 1: Priemerná a maximálna hodnota HPV sondách SHMÚ v užšom okolí stavby
Tab. 1: Mean and maximum GWL values in adjacent observation SHMI boreholes

Označenie sondy SHMÚ	**Priemerná HPV** (m n. m.)	**Maximálna HPV** (m n. m.)	**Rozdiel HPV** (m)	**Rozptyl HPV** (m)
704 Trnavská cesta	131,09	131,22	0,13	1,14
1438 Kamenné nám.	131,79	132,94	1,15	2,93
1439 Račianske mýto	132,05	132,27	0,22	1,15
1443 Športová hala	130,62	130,81	0,19	1,07
1444 Slimák	134,07	134,28	0,21	1,88
7187 Bratislava	130,75	131,00	0,25	1,20
1440 Riazanská	130,82	130,97	0,15	1,04

Vysvetlivky: HPV – hladina podzemnej vody



Obr. 3: Mapa koeficientu filtrácie (m·s^{-1})
Fig. 3: Map of the hydraulic conductivity (m·s^{-1})

sme mali k dispozícii vodné stavy na Dunaji v staniciach 5127 Bratislava – Devín a 5140 Bratislava, ako aj na toku Račiansky potok v stanici 5180 Vajnory, ktoré sme do modelu zapracovali. Obdobne sme z SHMÚ získali aj priemerné mesačné odbery, ktoré sme spracovali tak pre dlhodobý priemer 1993 – 2006, ako aj pre apríl 2006.

Diskretizácia modelovanej oblasti

Na simuláciu prúdenia podzemných vôd sme použili simulačný program TRIWACO (Royal Haskoning, 2002, 2004). TRIWACO je programový systém na kvázi–trojdimenzionálnu simuláciu ustáleného aj neustáleného prúdenia podzemných vôd, založený na metóde konečných prvkov.

Pri samotnom modelovaní podzemnej tesniacej steny, boli veľkosti prvkov postupne zmenšované, aby bol čo najlepšie vystihnutý charakter steny. Ukážka zostrojenia a postupného zahusťovania navrhnutej siete konečných prvkov je znázornená na obr. 4. Sieť tvoria prvky o veľkosti od 2 do 150 m.

KALIBRÁCIA MODELU A VÝSLEDKY SIMULÁCIE

Samotné matematické modelovanie metódou konečných prvkov bolo vykonané najprv za účelom

kalibrácie zostaveného modelu ako pre priemerné hodnoty hladinového režimu podzemných vôd za roky 1993 – 2006, tak aj pre maximálny stav HPV v apríli 2006.

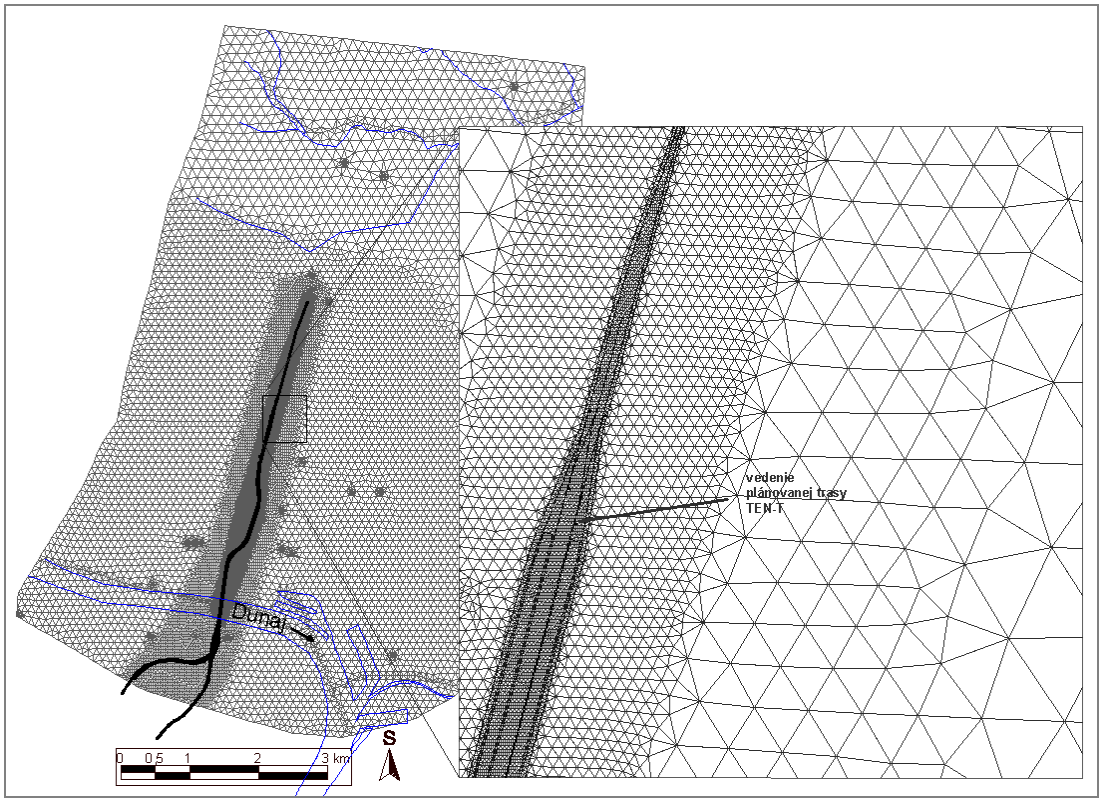
Kalibrácia modelu spočívala v nastavení hydraulických a hydrogeologických parametrov horninového prostredia s detailným pohľadom na oblasť budúcej stavebnej jamy. Týmito parametrami boli hodnoty koeficientu filtrácie, drenážneho a infiltračného odporu dna tokov (Velísková, Dulovičová, 2008) a prítok zo svahov Malých Karpát na západe a severozápade oblasti. Výsledky výpočtov v kalibračných bodoch – rozdiely nameraných a vypočítaných hodnôt HPV v blízkosti záujmovej oblasti boli do 0,50 m, ale nakoľko majú len informačný charakter neuvádzame ich. Netvrdíme, že tieto rozdiely sú zanedbateľné, ale domnievame sa, že aj vzhľadom rozptyl medzi maximálnou a minimálnou hladinou podzemnej vody (v tab. 1 – od 1,04 m do 2,93 m) a vzhľadom na možné chyby pri meraní a hladín podzemnej vody sú tieto údaje akceptovateľné.

Sklon terénu a nepriepustného podložia ovplyvňuje i sklon hladiny podzemnej vody, ako aj smer prúdenia podzemných vôd. Na základe modelu bol zistený priebeh HPV (obr. 5) a generálny smer prúdenia podzemných vôd smerom od Malých Karpát na juhovýchod. V ďalšej fáze výpočtu sme určili hĺbku HPV pod terénom, ktorá sa v okolí budúcej tesnenej steny stavebnej jamy pohybuje v súčasnosti prevažne od 5 do 7 m.

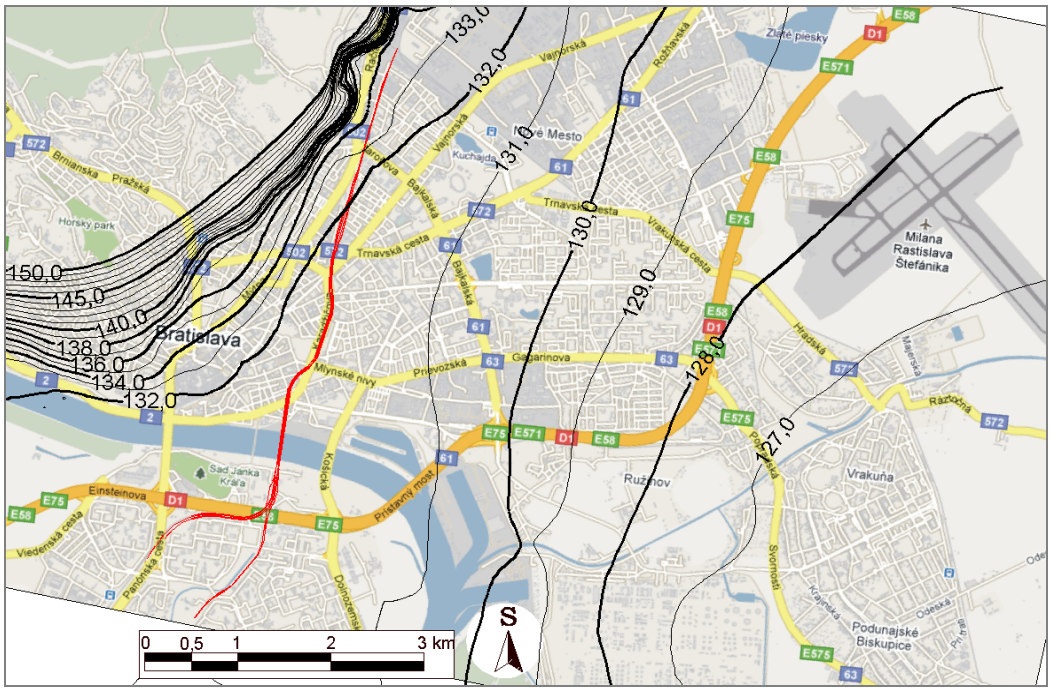
PROGNÓZA VÝVOJA HLADINY PODZEMNEJ VODY PO REALIZÁCII STAVEBNEJ JAMY

Po kalibrácii a verifikácii modelu sme mohli pristúpiť k ďalšej simulácii. Vzhľadom k tomu, že na danom území sa má vybudovať tesnená stavebná jama dĺžky asi 2 km a šírky 12 – 60 m, bolo nutné navrhnúť ďalší variant modelu pre nasimulovanie tejto stavebnej jamy podobne ako Krčmář, Hudáček (2006). Jej umiestenie v modeli je zrejmé z obr. 6. Nakoľko model TRIWACO rieši prúdenie podzemnej vody medzizrnovým prostredím, stavebnú jamu sme navrhli ako oblasť s veľmi malou hodnotou koeficientu filtrácie, rádovo stotiny až tisíciny $m \cdot d^{-1}$.

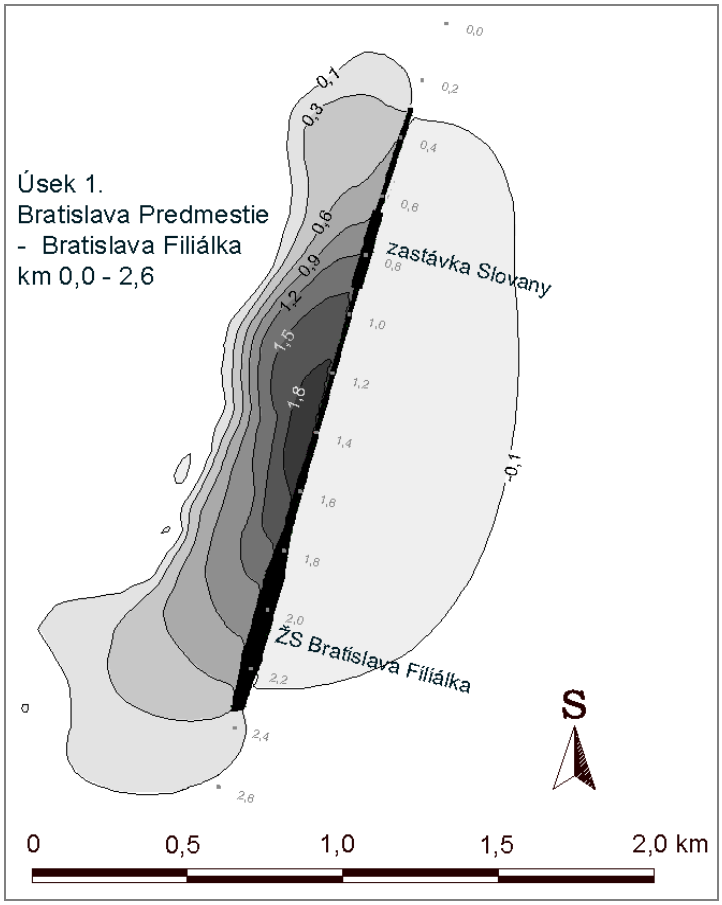
Pomocou modelu sme zistili, že po vybudovaní stavebnej jamy by dochádzalo k obtekaniu nepriepustnej stavebnej jamy po celej jej dĺžke. Z výsledkov simulácie vyplýva, že vzdutie spôsobené výstavbou trate sa bude pohybovať západne od stavebnej jamy do 2,4 m a zníženie na východnej strane bude do 0,6 m o čom svedčí obr. 6 a hĺbka HPV sa bude v okolí budúcej stavebnej jamy pohybovať prevažne od 3 do 6 m pod terénom.



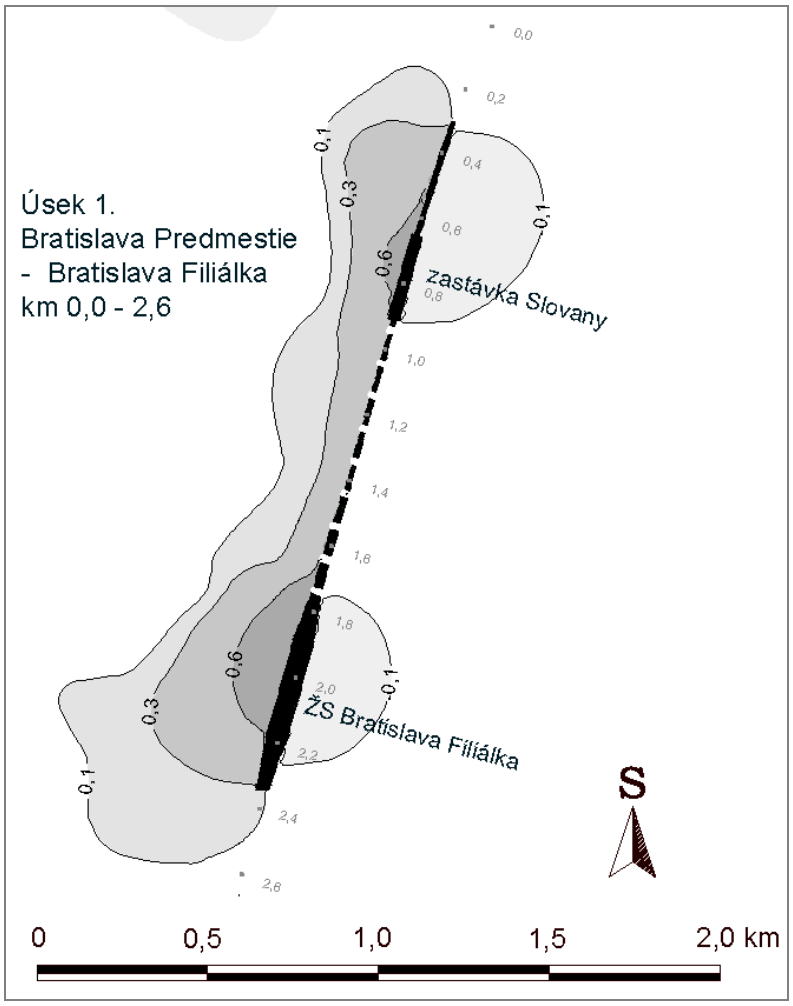
Obr. 4: Ukážka postupného zahusťovania siete konečných prvkov
Fig. 4: Illustration of sequential refining of the finite element mesh



Obr. 5: Hydroizohypsy podzemnej vody v riešenej oblasti – súčasnosť
Fig. 5: Groundwater isolines in solved region – present state



Obr. 6: Predpokladané zvýšenie HPV oproti súčasnosti (m)
Fig. 6: Assumed GWL increase according to present state (m)



Obr. 7: Predpokladaný rozdiel HPV oproti súčasnosti (m), za predpokladu realizácie otvorov v stene
Fig. 7: Assumed GWL difference according to present state (m) assuming the realisation of openings in the wall

ZÁVER

Predkladaný príspevok popisuje modelové riešenie hladinového režimu podzemnej vody v oblasti výstavby železničného koridoru TEN–T v Bratislave a to v úseku železničnej tunelovej trate Bratislava Predmestie – Bratislava Filiálka, ktorá sa má budovať hĺbeným spôsobom. Vzhľadom k tomu, že trasa výstavby je vedená prevažne v zvodnenej vrstve horninového prostredia pod Malými Karpatmi, bol zostavený matematický model prúdenia podzemných vôd, pomocou ktorého sme stanovili vplyv tejto výstavby na vývoj hladinového režimu podzemných vôd v danej oblasti. Riešenie ukázalo, že po výstavbe tunela dôjde k zvýšeniu HPV nad trasou železničného koridoru o 1,5 – 2,0 m pre priemerný stav alebo pre maximálny stav. Tento stav je riešiteľný návrhom „otvorov“ v tesniacej stene, ktoré navrhujeme umiestniť v miestach, kde je to realizovateľné, resp. realizované modelom (obr. 7).

Riešenie sme vykonali v dvoch variantoch, a to 5 otvorov vzdialených po 180 m alebo 9 otvorov vzdialených 100 m. Zníženie 9 otvormi v porovnaní s 5 otvormi nie je výrazné, ale vybudovanie väčšieho počtu otvorov svedčí v prospech bezpečnosti.

Výsledky modelovania preukázali, že týmto návrhom by sa podarilo znížiť hladinu o 1,3 – 1,6 m oproti stavu s tesniacou stenou a zvýšenie hladiny podzemnej vody po realizácii týchto opatrení oproti súčasnosti sa bude pohybovať (obr. 7) v rozpätí len 0,4 – 0,7 m, t. j. HPV bude 5,7 – 6 m pod terénom, čo je podľa nášho názoru akceptovateľný stav. Presné umiestnenie a postup realizácie otvorov je predmetom ďalšieho výskumu.

POĎAKOVANIE

Príspevok bol spracovaný s podporou grantovej agentúry VEGA v rámci riešenia úlohy č. 1/0894/10.

LITERATÚRA

BLAŠKOVIČOVÁ, L., PODOLINSKÁ, J. LIOVÁ, S., FABIŠÍKOVÁ, M., RISCHANEKO-VÁ, M., DANÁČOVÁ, Z., PAĽUŠOVÁ, Z., BORODAJKEVYČOVÁ, M., ŠIPIKALOVÁ, H. 2007: *Hydrologická ročenka – povrchové vody 2006*. Bratislava, Reprografické pracovisko SHMÚ 2007, s. 215.

KULLMAN, E. et al. 1994 – 2006: *Hydrologická ročenka - podzemné vody 1994 až 2006.* Bratislava, Reprografické pracovisko SHMÚ.

BURGER, F. 2007: Modelling and Numerical Simulation of Groundwater Flow in the Reparian Alluvial Aquifer. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 55, č. 3, s. 168-184, ISSN 0042/790X

ČAUČÍK, P., MIHÁLIK, F., LEITMANN, Š., GAVURNÍK, J., SOPKOVÁ, M., MOŽIEŠIKOVÁ, M., MOLNÁR, L., ŠELLENG, J., JURÁČKOVÁ, D. 2008: *Vodohospodárska bilancia SR. Kvantitatívna vodohospodárska bilancia za rok 2007. Časť podzemné vody.* Bratsilava, SHMÚ 2008, s. 224.

HORNÁČKOVÁ-PATSCHOVÁ, A., KULLMAN, E., CHALUPKOVÁ, K., MAKIŠOVÁ, Z. 2008: Štúdia vplyvu tunelovej trasy na prúdenie a režim podzemných vôd v rámci prepojenia železničného koridoru TEN–T s letiskom a železničnou sieťou v Bratislave: Úsek nová železničná trať na letisko M. R. Štefánika v súbehu s Ivánskou cestou. Manuskript – archív VÚVH Bratislava, 114 s.

ŘÍHA, J. et al., 1997: *Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů*. Brno, Fakulta Stavební VUT 1997. s. 185, ISBN 80-214-0827-8

Koncepcia Bratislavskej integrovanej dopravy, BID s.r.o., http://imhd.zoznam.sk/ba/, 2007, s. 90.

KOVÁŘÍK, K. 2000: *Numerical Models in Groundwater Pollution*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag 2000. s. 221, ISBN 3-540-66792-X

KRČMÁŘ, D. 2002: *Moderné výpočtové aplikácie v hydrogeológii,* Práce a štúdie č. 143. Bratislava, VUVH 2002. s. 80, ISBN 80-89062-07-2

KRČMÁŘ, D., HUDÁČEK, M. 2006: Využitie matematického modelovania na posúdenie miery vplyvu vybudovania tesniacej clony na zmenu hladinového režimu podzemných vôd v čiastkovom povodí Moravy. *Podzemná voda*, 12, č. 2 s. 124-134, ISSN 1335-1052

KAČO, I., RIPKA, I., MARIOTH, J., DURDÍKOVÁ, B., MATONOKOVÁ, L., MACHÁČOVÁ, Z., ŠIMKO, V., PEKÁROVÁ, G., LONGA, J., GUMAN, J. CHUDÍK, M., ADAMCZAK M., LACHOVÁ, T., ŽÁČEK, T., KRUPOVÁ, V., ŽÁČEK, I., HONÉTZYOVÁ PRIBULOVÁ, S., MALÁ, L. 2007: Dopravnourbanistická štúdia prepojenia železničných koridorov č. IV A v projekte TEN–T 17 a napojenie letiska na železničnú sieť v Bratislave (návrh). Manuskript – Dopravoprojekt, a.s., AUREX, s.r.o. Bratislava, 120 s.

KOPECKÝ, M. 1999: Inžinierskogeologický prieskum a sanácia zosuvu odrezu na Tupého ulici v Bratislave. In: *4. Geotechická konferencia*, Vyd. STU Bratislava, 1999, s. 13-18

KULLMAN, E., HORNÁČKOVÁ-PATSCHOVÁ, A., MIHÁLIK, F., LEITMANN, Š., GAVURNÍK, J., SOPKOVÁ, M., MOŽIEŠIKOVÁ, K., MOLNÁR, Ľ., ČAUČÍK, P., JURÁČKOVÁ, D. 2006: *Kvantitatívna vodohospodárska bilancia za rok 2005, časť Podzemné vody*. Bratislava, SHMÚ 2006. s. 356.

LONGA, J, KAČO, I., MARTINKOVÁ, D., KNAŽICKÁ, M., MARKO, J., NÉMETHYOVÁ, S., BARBUŠOVÁ, Ľ., MACHLICA, J., HAMZA 2007a: Štúdia prepojenia železničného koridoru TEN–T s letiskom a železničnou sieťou v Bratislave, ŽSR, Bratislava – Železničné zapojenie Letiska M. R. Štefánika, 2. etapa. Manuskript – Dopravoprojekt, a.s. Bratislava, 58 s.

LONGA, J, KAČO, I., MARTINKOVÁ, D., KNAŽICKÁ, M., MARKO, J., NÉMETHYOVÁ, S., BARBUŠOVÁ, Ľ., MACHLICA, J., HAMZA 2007b: Štúdia prepojenia železničného koridoru TEN–T s letiskom a železničnou sieťou v Bratislave, ŽSR, Bratislava – Železničné zapojenie Letiska M. R. Štefánika, 3. etapa. Manuskript – Dopravoprojekt, a.s. Bratislava, 65 s.

LONGA, J, KAČO, I., MARTINKOVÁ, D., KNAŽICKÁ, M., MARKO, J., NÉMETHYOVÁ, S., BARBUŠOVÁ, Ľ., MACHLICA, J. 2007c: Štúdia prepojenia železničného koridoru TEN–T s letiskom a železničnou sieťou v Bratislave, sŽSR, Bratislava predmestie – Bratislava filiálka – Bratislava Petržalka (prepojenie koridorov). Manuskript – Dopravoprojekt, a.s. Bratislava, 91 s.

MALÍK, P. 2007: Stanovenie okrajových podmienok modelového územia pre projekt TEN–T Bratislava. Manuskript – dáta vo formáte *.shp a *.xls, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra Bratislava.

MOŽIEŠIKOVÁ, K., SOPKOVÁ, M., ŠVASTA, J. 2007: Povodie Nitry a Žitavy – modelovanie režimu podzemných vôd (Triwaco). In: *Zborník 14. slovenskej hydrogeologickej konferencie*, Banská Bystrica 09/2007, Vyd. SAH Bratislava, 2007, s. 28-34, ISBN 978-80-969342-3-2

PARKROVÁ, J. 2009: *Trať vlaku TEN–T má byť do júna zladená s električkou*. SME 22. 1. 2009, ISSN 1335-4418

ROYAL HASKONING, 2002: Triwaco a Simulation Package for Groundwater, Version 3. 0 internal release RH, Royal Haskoning division Water. Rotterdam, Netherlands.

ROYAL HASKONING, 2004: Triwaco groundwater modelling software, Triwaco User's Manual, Haskoning Netherlands BV, Netherlands, 322 s.

ŠKVARKA, J., KUPKA, Š., ŠIKULOVÁ, Z., ŠIKULA, G. 2007a: Grafická a písomná dokumentácia z archívnych podkladov, Štúdia prepojenia železničného koridoru TEN–T s letiskom a železničnou sieťou v Bratislave, Podrobný inžiniersko-geologický prieskum, Archívne podklady Bratislava Predmestie – Bratislava Filiálka. Manuskript – EKOGEOS Zakladanie spol. s.r.o. Bratislava, 26 s.

ŠKVARKA, J., KUPKA, Š., ŠIKULOVÁ, Z., ŠIKULA, G. 2007b: Grafická a písomná dokumentácia z archívnych podkladov, Štúdia prepojenia železničného koridoru TEN–T s letiskom a železničnou sieťou v Bratislave, Orientačný inžiniersko – geologický prieskum, Archívne podklady Bratislava Filiálka – Petržalka Dunaj. Manuskript – EKOGEOS Zakladanie spol. s r.o. Bratislava, 52 s.

ŠKVARKA, J., KUPKA, Š., ŠIKULOVÁ, Z. 2007c: Grafická a písomná dokumentácia z archívnych podkladov, Štúdia prepojenia železničného koridoru TEN–T s letiskom a železničnou sieťou v Bratislave, Orientačný inžiniersko – geologický prieskum, Archívne podklady: Dunaj – stanica Petržalka. Manuskript – EKOGEOS Zakladanie spol. s r.o. Bratislava, 61 s.

ŠKVARKA, J., KUPKA, Š., TAKÁČOVÁ, M., ŠIKULA, G. 2007d: Štúdia prepojenia železničného koridoru TEN–T s letiskom a železničnou sieťou v Bratislave, Záverečná správa z orientačného inžiniersko – geologického prieskumu. Manuskript – EKOGEOS Zakladanie spol. s r.o., Bratislava, 129 s.

ŠOLTÉSZ, A,, BAROKOVÁ, D. 2007: Modelové riešenie vplyvu trasy prepojenia železničného koridoru TEN-T na prúdenie a režim podzemných vôd v úseku železničná stanica Bratislava predmestie – železničná stanica Bratislava filiálka. Manuskript – SvF STU v Bratislave Bratislava, 37 s.

ŠOLTÉSZ, A., BAROKOVÁ, D. 2008: Modelové riešenie vplyvu trasy železničného koridoru TEN–T na režim prúdenia podzemných vôd v úseku Dunaj – súbeh so železničnou traťou Petržalka. Čiastkové riešenie pre "Štúdiu prepojenia železničného koridoru TEN–T s letiskom a železničnou sieťou v Bratislave". Manuskript – SvFSTU v Bratislave, 54 s.

ŠVASTA, J., MALÍK, P. 2006: Priestorové rozloženie priemerných efektívnych zrážok na území Slovenska. *Podzemná voda*, 12, č. 1, s. 12-20, ISSN 1335-1052

VELÍSKOVÁ, Y., DULOVIČOVÁ, R. 2008: Variability of bed sediments in channel network of Rye Island (Slovakia) In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *Vol. 4, No 1 doi: 10.1088/1755-1307/4/1/012044*, 2008, ISSN 1755-1315

ŠÚTOR, J., GOMBOŠ, M. 2007: Prognosis of soil drought in Žitný ostrov region. In: *Pollution and Water Resources, Columbia University Seminar Proceedings: Environmental Problems in US and Central Europe including social Aspects of both Areas. Vol. XXXVII*, Vyd. Ústav hydrológie SAV Bratislava, 2007, s. 165-172, ISBN 978-80-89139-12-5

ŠTEKAUEROVÁ, V., ŠÚTOR, J., NAGY, V. 2009: Natural Environment of the Žitný ostrov. In: *Pollution and Water Resources, Columbia University Seminar Proceedings: Scientific and Social – Institutional Aspects of Central Europe and USA. Vol. XXXVIII-XXXIX, 2008-2009*, Vyd. Hungarian Academy of Sciences Pécs, 2009, s. 15-38, ISBN 978-963-9899-11-7

SUMMARY

In frame of improvement the transport infrastructure in Bratislava region the connection between the airport and railway network is planned. One part of it should be built in the underground tunnel along the Carpathian Mountains (Fig. 1) and it will affect the groundwater flow generally directed from mountains towards the Danube River. Mentioned flow will be partially cut by building the underground tunnel in the aquifer and that was the reason for establishing a 2–D finite element numerical model for evaluating the impact of the railway tunnel on the groundwater level regime.

Geological data of the solved region have been introduced into the model according to (Škvarka et al., 2007). Due to the depth of the tunnel construction the main emphasis has been taken on quaternary and neogene sediments. The thickness of the gravel–sand fluvial sediments is changing between 10 – 17 m. In the whole region they are covered by loamy soils and sands of 1 – 3 meters. The mean value of hydraulic conductivity of fluvial gravel–sand sediments varied in order of 10^{-3} m·s^{-1}.

Using the 2–D finite element model calibration and verification process was carried out for mean and maximum groundwater level (GWL) values (April 2006). The results have shown that the groundwater regime in this region is very steady and there are no great differences between mean and maximum GWL values. For simulation of groundwater flow the TRIWACO programming system (Royal Haskoning, 2002) for quasi–threedimensional simulation of steady and unsteady groundwater flow has been applied based on finite element method. In the simulation process of the groundwater flow the finite elements have been refined gradually from 150 – 2 m to describe the conditions in the vicinity of the underground tunnel as exact as possible.

Modelling calculations have shown that after constructing the underground tunnel the groundwater level will increase from 1.5 – 2.0 m for mean as well as for maximum hydrological conditions. Mentioned increase of groundwater level can be solved by introducing “holes” in the sealing wall which have been proposed in those places where it is possible according to the tunnel construction and its position in the aquifer (Fig. 6). This solution has been elaborated in two variants with different number of holes. Modelling results have shown that by means of technical measures introduction groundwater level decrease from 1.3 – 1.6 m can be expected with respect to sealing wall situation. It means that after construction of the underground tunnel and after realizing the technical measures the increase of GWL in range of 0.4 – 0.7 m (Fig. 7) can be expected, i.e. the groundwater table will be approximately 5.7 – 6.0 m under the terrain what is fully acceptable.