

NUMERICKÉ MODELOVANIE PRÚDENIA PODZEMNEJ VODY PRI POVODŇOVÝCH SITUÁCIÁCH V BLÍZKOSTI TOKOV

Andrássy Tomáš

Anotácia:

Pri prechode povodňovej vlny tokom dochádza k následnému zvýšeniu hladiny podzemnej vody pri toku, a tým aj k priamemu ohrozeniu majetku, a hlavne aj zdrojov podzemnej vody (zásobovanie vodou), ktoré sa nachádzajú v blízkosti zasiahnutých tokov. Keďže pri povodniach býva voda znečistená, je riešenie tejto problematiky o to nutnejšie. Vzhľadom na to, že pri prechode povodňovej vlny dochádza k časovej (zvýšenie HPV môže nastať až za pár týždňov) a postrannej retardácii (dosah zvýšenia HPV v smere kolmom na tok), vzhľadom na hladinu podzemnej vody je nutné týmto podmienkam prispôbiť aj prevádzku vodných zdrojov. Ako vstupy pri výskume budú použité konkrétne údaje z daných území (geologické, hydrogeologické, hydrologické údaje z danej lokality). Na základe vstupných údajov sa model nakalibruje, overí, a následne bude použitý pre prognózu prúdenia podzemných vôd pri prechode povodňovej vlny tokom a pre jej následné určenie dopadu na vodné zdroje. Výstupy z modelu budú použité pre návrh prevádzkového plánu vodných zdrojov. Bližšie pomôžu pochopiť prúdenie podzemnej vody pri povodňových situáciách. Jedným z výstupov budú aj mapy ohrozenia vodných zdrojov v blízkosti tokov. Mapy budú v digitálnej aj grafickej forme. Bude na nich znázornený smer prúdenia podzemných vôd – akým smerom a v akom čase sa dostane znečistenie k vodným zdrojom

KLúčové slová: Prúdenie podzemnej vody, povodňové situácie, TRIWACO, modelovanie, Sihot'

Anotation:

During passing of flood wave in the Danube River an increasing of groundwater level occurs and thus direct threat of property and especially the groundwater resources for water supply which are located near the affected rivers is arising. Since during the flood the water is polluted the solution of this problem is more than necessary. The specific area for this problem - the SIHOT Island was chosen, which is one of the most significant area for groundwater supply in Bratislava. This island is repeatedly flooded every year with several floods. Therefore it is more than necessary to know how groundwater reacts to increased water level in the Danube River. As inputs of the research specific data from those area (geological, hydrogeological, hydrological data from the site) will be used. Based on the input data the model will be calibrated, verified and then it will be used to forecast groundwater flow during passing flood wave and for subsequent determination of impact on groundwater sources. Outputs from the model will be used for design of operational rules for groundwater sources during floods. Results of the research will help to understand the behaviour of groundwater flow in flood situations.

Key words: Groundwater flow, flood situation, TRIWACO, modeling, Sihot'

1.

Úvod

Pri prechode povodňovej vlny tokom dochádza k následnému zvýšeniu hladiny podzemnej vody pri toku, a tým aj k priamemu ohrozeniu majetku, a hlavne aj zdrojov podzemnej vody (zásobovanie vodou), ktoré sa nachádzajú v blízkosti zasiahnutých tokov. Keďže pri povodniach býva voda znečistená, riešenie tejto problematiky je o to nutnejšie. Keďže pri prechode povodňovej vlny dochádza k časovej (zvýšenie HPV môže nastať až za pár týždňov)

a postrannej retardácii (dosah zvýšenia HPV v smere kolmom na tok), vzhľadom na hladinu podzemnej vody je nutné týmto podmienkam prispôbiť aj prevádzku vodných zdrojov. Ako vstupy pri výskume budú použité konkrétne údaje z daných území (geologické, hydrogeologické, hydrologické údaje z danej lokality). Na základe vstupných údajov sa model nakalibruje, overí, a následne bude použitý pre prognózu prúdenia podzemných vôd pri prechode povodňovej vlny tokom, a pre jej následné určenie dopadu na vodné zdroje. Výstupy z modelu budú použité pre návrh prevádzkového plánu vodných zdrojov. Bližšie pomôžu pochopiť prúdenie podzemnej vody pri povodňových situáciách. Jedným z výstupov budú aj mapy ohrozenia vodných zdrojov v blízkosti tokov. Mapy budú v digitálnej aj grafickej forme. Bude na nich znázornený smer prúdenia podzemných vôd – akým smerom a v akom čase sa dostane znečistenie k vodným zdrojom

2.

Matematický model

Matematické modelovanie [1] zohráva dôležitú funkciu vo vodnom hospodárstve. Jednou z možností modelovania prúdenia podzemnej vody je modelovanie pomocou matematického modelu, ktorý je založený na matematických vzťahoch. Prostredníctvom numerického modelu možno porozumieť prúdeniu podzemnej vody v jej priestorovej i časovej kontinuite. Adekvátnosť matematického modelu je však obmedzená jednak dostupnosťou potrebných údajov (hydrogeologické pomery, hydrologické pomery, ...), jednak obmedzením vlastného matematického modelu (zjednodušenie matematických výpočtov, konečný počet uzlových bodov v numerickom modeli, atď.). Model podzemnej vody je v podstate predstava o prúdení v pórovitom prostredí, ktorú hydrogeológovia využívajú na prognózu. V dizertačnej práci budem používať program TRIWACO 3, Uvedený balík programov na simuláciu prúdenia podzemných vôd bol vyvinutý firmou Royal Haskoning (Holandsko) [2]. TRIWACO je programový systém na kvázi trojdimezionálnu simuláciu prúdenia podzemných vôd, založený na metóde konečných prvkov (MKP). Tento program je viac-menej stavaný na riešenie prúdenia podzemnej vody v horizontálnej rovine. Model je možné použiť na modelovanie prúdenia podzemných vôd v niekoľkých priepustných vrstvách - zvodnencoch - navzájom oddelených polopriepustnými vrstvami.

3.

Záujmové územie

Riešenie problematiky vplyvu povodní sa predpokladá na záujmovom území vodohospodársky významných objektov, a to vodárenského zdroja na ostrove Sihot'. Územie patrí k jedným z hlavných zdrojov pre pitnú vodu v Bratislave. Keďže monitoring HPV na ostrove Sihot' je zastaraný – veľké množstvo monitorovacích zariadení je nefunkčných alebo často vykazujú chybné merania, je problém nájsť studne, kde je monitoring dostatočný a údaje z neho sú relevantné a použiteľné pre našu simuláciu. Na základe nefunkčného monitoringu bude použitá alternatíva manuálneho zberu dát z pozorovacích vrtov. Budú vytipované vrty tak, aby rovnomerne pokryli celé záujmové územie. Pomocou sondy na zisťovanie hladiny podzemnej vody budú postupne zberané údaje o hladine podzemnej vody za rôznych stavov Dunaja, pokiaľ množstvo údajov nebude dostatočné. Na základe týchto údajov budú neskôr vykonávané simulácie.

3.1

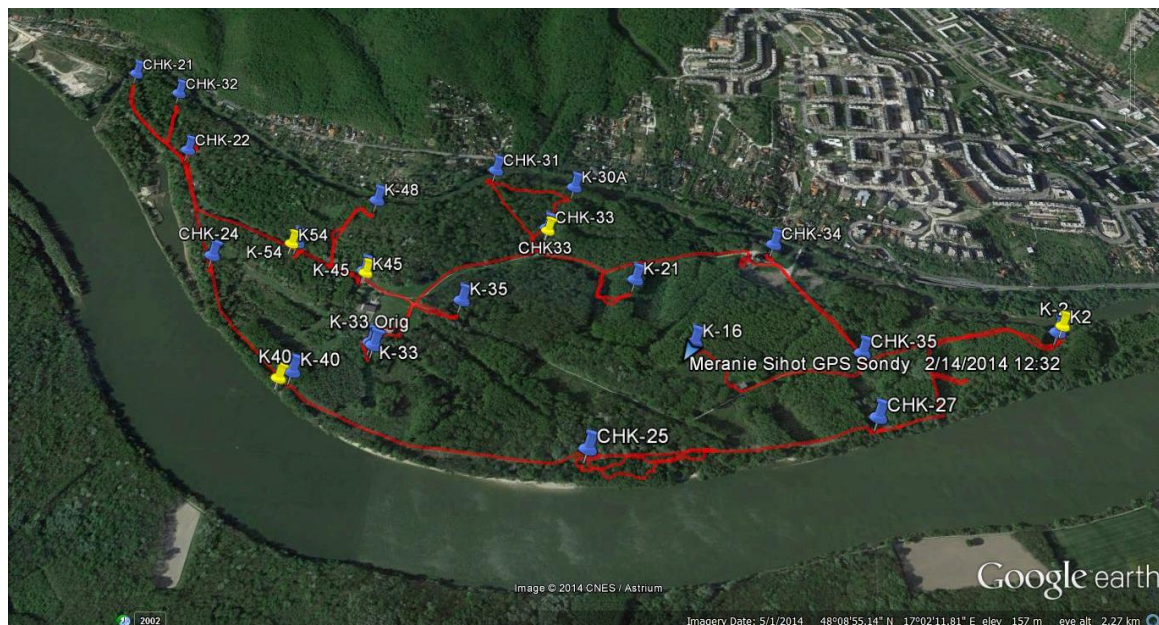
Vodárenský zdroj Ostrov Sihot'

Vodárenský zdroj ostrov Sihot' (**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**) je dunajským ostrovom, ktorý sa nachádza v koryte Dunaja v riečnom km 1872 - 1877. Je pretiahnutého

tvaru o dĺžke max. 3,7 km s najväčšou šírkou 1,0 km. Jeho rozloha je cca 222 ha. Od stredu Bratislavy je vzdialený asi 5 km proti toku Dunaja. V súčasnosti je v prevádzke 12 širokopriemerových kovaných studní (**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**) o priemere 2830 - 4000 mm, jedna širokopriemerová studňa systému Raney s priemerom 5000 mm a 32 vrтанých studní o priemere DN 800 a DN 1000. Zberná studňa čerpacej stanice ČS 3, do ktorej sa privádza voda násoskou zo studní č. 8, 9, 10, je ďalšou širokopriemerovou studňou. Voda sa zo studní odoberá dvoma spôsobmi, násoskami alebo ponornými čerpadlami. Násoskami sa odoberá voda zo všetkých kovaných studní (č. 3-10, 12-15) a z vrтанých studní pri ČS 4 (č. 24 - 30), ponornými čerpadlami z ostatných vrтанých studní. Vodárenský zdroj Sihot' dodáva vodu do západnej časti Bratislava-Karlova Ves, Dúbravka, Lamač, Devínska Nová Ves, Záhorská Bystrica a časť vody sa dodáva smerom do mesta, do spoločného spotrebiska I. tlakového pásma. Množstvo odoberanej vody je závislé hlavne na prietokoch v Dunaji, a s tým súvisiacou kvalitou a možnosťou odoberaného množstva. Výšková kóta terénu ostrova Sihot' sa pohybuje v rozpätí 135,80 až 139,00 m n. m. Uvedené znamená, že po zohľadnení spádu rieky Dunaj, dochádza k zaplavovaniu územia tohto ostrova pri výške vodného stavu od 570 cm podľa vodočtu Bratislava.

3.2 Sieť pozorovacích vrтов a zber údajov

Objekty pre monitorovanie hladiny podzemnej vody (Obr. 1) boli vybrané tak, aby rovnomerne pokryli celé záujmové územie, a tým vytvorili ideálnu sieť pre modelovanie. Objekty boli vybrané na základe konzultácie s BVS a.s. Monitorovanie a zaznamenávanie údajov sa predpokladá raz alebo dvakrát za týždeň, vždy podľa zmeny stavu Dunaja. Cieľom monitorovania je zistiť úroveň hladiny podzemnej vody pre konkrétne úrovne hladiny v Dunaji, pričom sa predpokladá, že budú namerané stavy HPV pre hladiny v Dunaji v rozsahu od nízkych (zimných prietokov) až po vysoké prietoky.



Obr. 1 Terénne merania - studne a trasa pri meraní.

4.

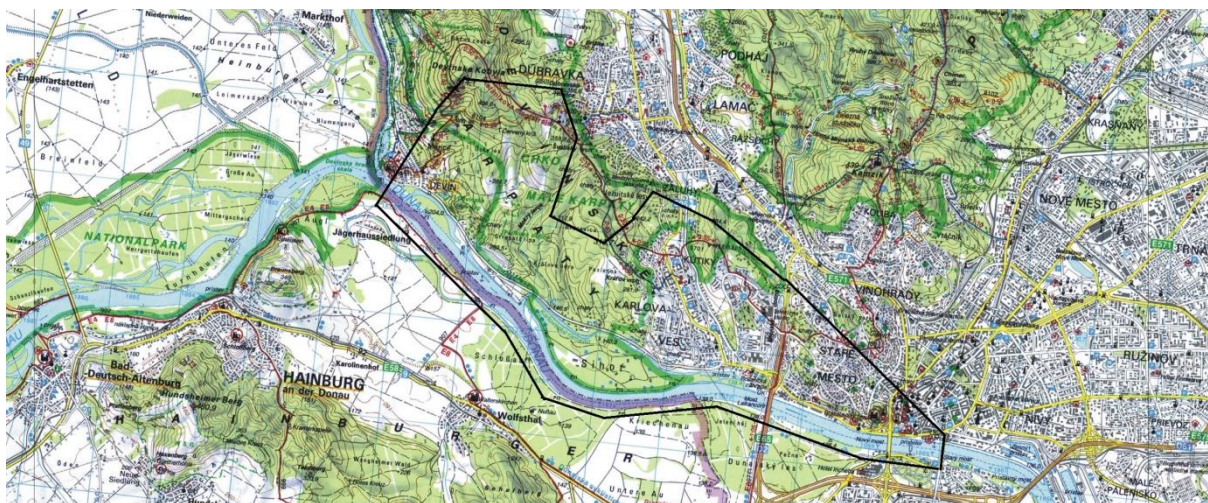
Modelovanie

Po nazbieraní údajov som pristúpil k modelovaniu prúdenia podzemnej vody na ostrove SIHOŤ. Modelovanie bolo vykonávané pomocou programu TRIWACO 3 od firmy Royal Haskoning. Priebeh bol rozdelený na niekoľko fáz:

1. Navrhnutie grridu z podkladových údajov,
2. Nastavenie inicializačného súboru,
3. Nastavenie kalibračného súboru,
4. Výpočet,
5. Verifikácia,
6. Výpočet pre min a max čerpanie,
7. Výpočet pre povodňové stavy na Dunaji,
8. Výsledky.

4.2 Navrhnutie a zostavenie GRRIDU

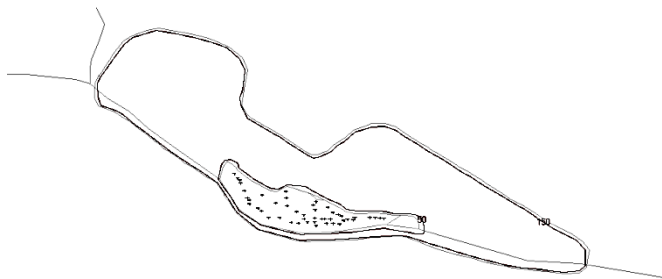
Ako hranica pre moje modelovanie bolo zvolené širšie záujmové územie okolo ostrova Sihoť, aby sme mohli zohľadniť aj špecifický prítok zo zrážok do oblasti a takisto kvôli polohe vodomerných staníc na Dunaji – DUNAJ-DEVÍN a DUNAJ-BRATISLAVA, ktoré bolo kvôli podkladovým údajom potrebné zahrnúť do modelovania. Z daných podkladov nám vznikli hranice modelovania (v Triwacu BND), ktoré sú znázornené na obr. 2



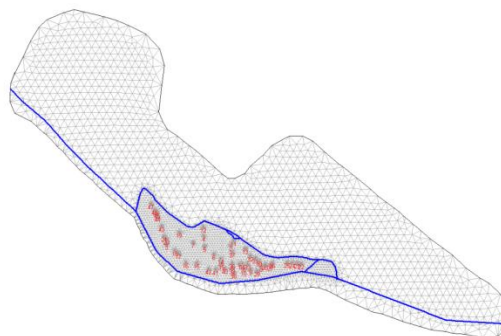
Obr. 2 hranice modelovania - BND

Zo severnej strany je modelovanie ohraničené z väčšej časti hrebeňom malých Karpát, čím bola definovaná rozvodnica zo severnej strany pre dané záujmové územie. Z východnej strany je územie ohraničené starým mostom. Z južnej strany je záujmové územie ohraničené Dunajom. Zo západnej a severozápadnej strany je územie ohraničené riekou Dunaj a Morava. Následne boli vytvorené polygóny s rôznou hustotou elementov (100 m a 50 m – obr. 3) pre vytvorenie siete konečných prvkov (Obr. 4). Na záujmové územie boli zanesené rieky Dunaj a Morava, a taktiež aj obtokové rameno ostrova Sihoť. Na ostrove Sihoť boli pomocou JTSK súradníc jednotlivých studní a pozorovacích vrtov v modeli vytvorené jednotlivé body (od 1 po 69), ktorým prislúchajú jednotlivé vrty alebo studne. V okolí týchto bodov bola pre presnejšie výpočty sieť zahustená podpornými kružnicami o veľkosti 12 elementov po obvodu a tieto kružnice boli vytvorené vo vzdialenostiach 5 m, 10 m, 20 m, 30 m a 50 m

od stredu bodov. Týmto bol dokončený návrh územia a v programe TRIWACO bola vygenerovaná sieť konečných prvkov, ktorá bola používaná pri naslednom modelovaní.



Obr. 3 Zaujmové územie s polygónmi



Obr. 4 Sieť konečných prvkov

4.3

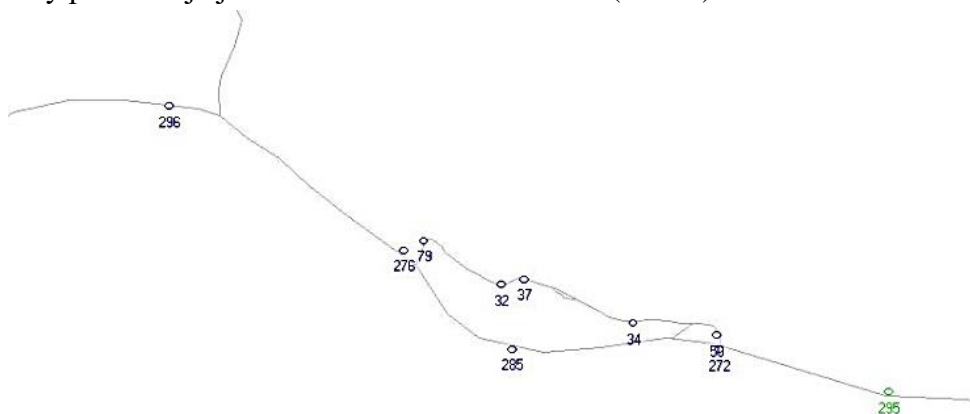
Okrajové podmienky

Pre riešenie a zadanie okrajových podmienok (O.P) som postupoval nasledovne: zo západu som si zvolil ako (O.P) hladinu vody v Dunaji a v sondách aj z východu. Zo severu aj z juhu som stanovil Neumanovu okrajovú podmienku, a to nulový prítok do oblasti, pretože som predpokladal, že územie je ohraničené rozvodnicou. Zaujmová lokalita sa nachádza v strede modelovanej oblasti, v dostatočnej vzdialenosti od okraja oblasti filtrácie, a preto vplyv (O.P) je nepatrný a nemal by ovplyvňovať výsledky riešenia (HPV) na nej.

4.4

Parametrizácia oblasti filtrácie

Na základe popisu územia v kapitole 3 som určil nasledovné parametre : šírka rieky Dunaj je rozdielna od 350 m do 270 m, taktiež šírka rieky v Karloveskom ramene je rozdielna, pohybuje sa od 30 m do 80. Toto bolo zohľadnené pomocou parametru RW1, kde som nastavil šírky pre Dunaj aj Karloveské rameno osobitne (Obr. 5).



Obr. 5 Nastavenie parametra RW1

Hladina Dunaja bola monitorovaná v 2 stanicích. Dunaj-Devín, ktorá sa nachádza asi 2 km proti prúdu od ostrova Sihoť a v stanici Dunaj-Bratislava/Propeler, ktorá sa nachádza asi 2 km po prúde od ostrova Sihoť. Ich poloha je znázornené na obr. 6. Tieto hodnoty boli namerané a zaznamenané počas terénnych meraní, spolu s hodnotami HPV v sondách. Úroveň hladiny v toku bola zohľadnená v parametri HR1. Takisto bolo nutné zadať hodnotu drenážneho

a infiltračného odporu. Na základe mojich predchádzajúcich výskumov „Vplyv odporu dna toku na režim podzemnej vody“ (Andrássy, 2010) som zvolil hodnotu drenážneho odporu $CD = 0.05$ a hodnota infiltračného odporu bola zadaná ako $2 \cdot CD$, t. j. dvojnásobná hodnota drenážneho odporu. Pre modelovanie bolo nutné zadať hornú a dolnú hranicu zvodnenca a koeficient filtrácie. Tieto hodnoty boli zaznamenané v súboroch RL1 a TH1 a pre určenie konkrétnej hodnoty v presnom bode bola v oboch parametroch zvolená metóda interpolácie TININTERPOL.



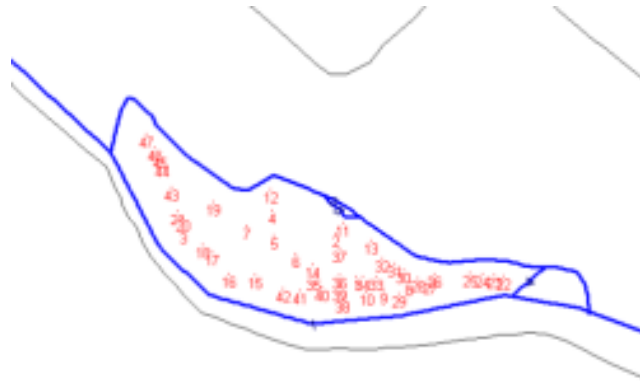
Obr. 6 Poloha vodomerných staníc

Pri zadávaní zrážok RP1 som vychádzal z priemerného mesačného úhrnu zrážok 0,0006 m.d-1 zo stanice Bratislava-Koliba [3] (Tab. 1).

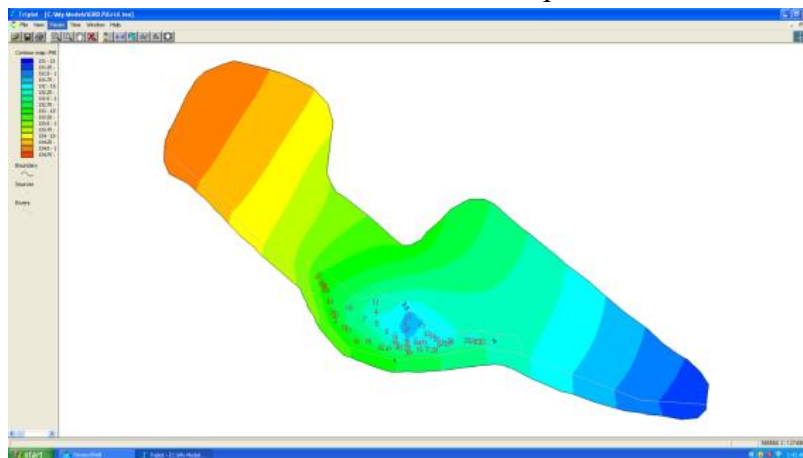
Mesiac	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
R (mm)	45.7	60.6	17.9	56.2	56.6	49.9	122.4	232.0	50.4	8.3	61.1	99.5

Tab. 1 Mesačný úhrn atmosférických zrážok [mm] za rok 2005 (SHMÚ, 2006)

Vzhľadom na možnosť vyschnutia karloveského ramena bolo nutné zohľadňovať aj aktivitu jednotlivých ramien Dunaja. Pre prvé výpočty (vzhľadom na vodu v ramene) bola hodnota RA1 nastavená ako konštanta, t. j. 1 pre všetky ramená Dunaja. Hodnota priepustnosti PX1 bola nastavená podľa čerpacích správ, a keďže záujmové územie je takmer úplne identické, bola hodnota PX stanovená ako konštanta $PX1 = 445$. Pre výpočty bolo potrebné zaniest' polohu studní a sond na ostrove Sihot', ich polohu (JTSK), nadmorské výšky. Poloha studní a čerpania boli zaznamenané pomocou parametra SQ1 (Obr. 7).



Obr. 7 Poloha studní a čerpania



Obr. 8 Priebeh hladiny PHI1

Pre určenie hladiny podzemnej vody na okrajoch oblasti filtrácie, t. j. parameter BH1 bola pre prvotné výpočty uvažovaná hladina Dunaja (HR1), a keďže na danom území sa nachádzajú veľmi priepustné vrstvy (rádovo 10^{-3}), tak táto hodnota bola uvažovaná pre celé územie. Ostatné parametre inicializačného súboru, t. j. IR1, BA1, BB1 IS1 a SH1 boli ponechané ako konštanty a hodnoty bez zmeny.

4.5

Nastavenie kalibračného súboru

Pre prvú sériu výpočtov boli nastavené všetky parametre rovnako ako v inicializačnom súbore. S týmito nastaveniami bol vygenerovaný input file, a následne spustený výpočet. Výsledky priebehu hladiny PHI1 sú znázornené na obr. 8.

4.6

Verifikácia

Pre verifikáciu boli použité hodnoty z meraní. Výsledky sú zobrazené v nasledujúcej tabuľke a grafe, a keďže išlo o nepatrné rozdiely, považoval som model za správne nastavený a bol použitý pre ďalšie merania.

Calib - Poznámkový blok

Output of Flairs version 3.3 nov2003
input file header: 1 -578441.3 -1279921.1 1 1
Project title: cal3

NAME	AQUIFER	CLUS	CALCULATED	MEASURED	DIFFERENCE	WEIGHT (DIF^2)
2	1	1	132.031766249	132.1	-0.3123E-01	1.00000
3	1	1	132.113118461	132.0	0.1071	1.00000
4	1	1	132.218439910	132.2	0.6144E-01	1.00000
5	1	1	132.402588953	132.1	0.2576	1.00000
6	1	1	132.757152279	132.6	0.1452	1.00000
7	1	1	133.046175086	132.8	0.1992	1.00000
8	1	1	133.015110802	132.6	0.4421	1.00000
9	1	1	133.025657682	132.6	0.4037	1.00000
10	1	1	133.321136951	132.9	0.4601	1.00000
11	1	1	133.554680998	133.1	0.4057	1.00000
12	1	1	132.762632250	132.3	0.4366	1.00000
13	1	1	132.649865387	132.2	0.4829	1.00000
14	1	1	132.623401117	132.2	0.3954	1.00000
15	1	1	132.718495492	132.4	0.2835	1.00000
16	1	1	132.439748787	132.1	0.3467	1.00000
17	1	1	132.292593394	132.1	0.2336	1.00000
18	1	1	132.511406562	132.1	0.3794	1.00000
19	1	1	132.380731723	132.1	0.2677	1.00000
20	1	1	132.099205923	132.0	0.5821E-01	1.00000

Total number of comparisons (for current time) 19
Sum of weighted deviations squared 1.93236

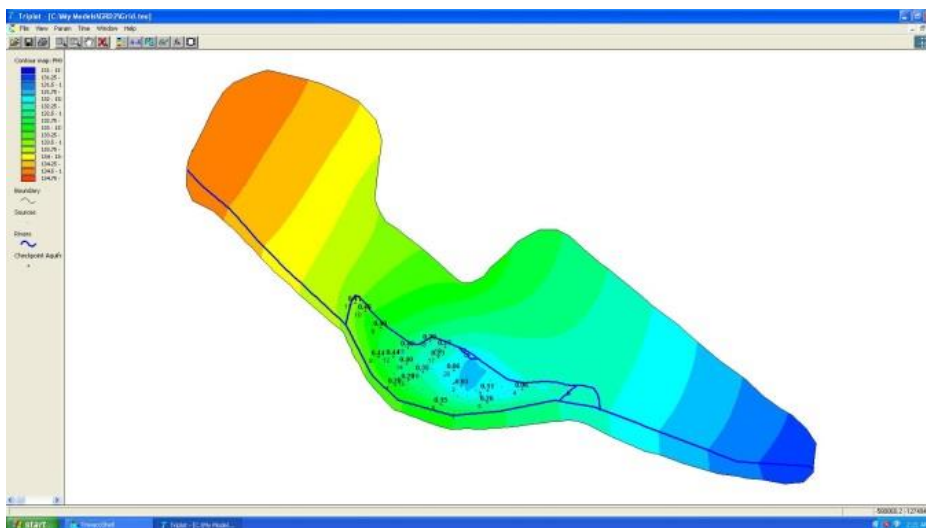
STATISTICS : ALL AQUIFERS ALL POINTS

average deviation*sqrt(weight)	0.2808
average (deviation*sqrt(wght))	0.2841
average deviation^2*weight	0.1017
minimum deviation	-0.0312
maximum deviation	0.4829
number of points	19

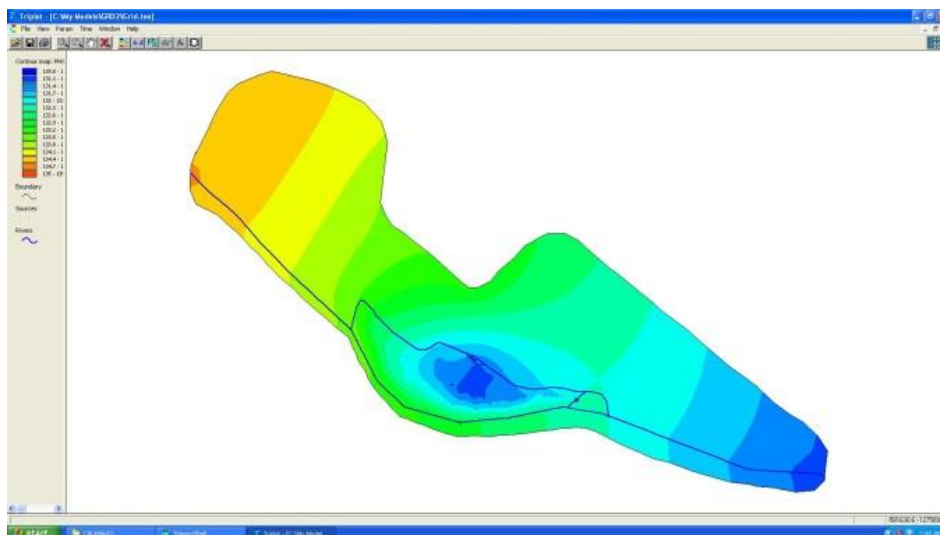
Obr. 9 Rozdiely hodnôt pri verifikácií

4.7 Výpočet úrovne HPV pri normálnom a maximálnom čerpaní

Boli vykonané výpočty pri priemernom čerpaní - 41 aktívnych studní (Obr. 10), t. j. 464 ls-1 a pri maximálnom čerpaní (Obr. 11) 868 ls-1 pri bežnom stave v Dunaji. Z výsledkov je jasné že pri maximálnom čerpaní sa vytvára vo východnej časti ostrova, t. j., kde sa nachádza najväčší počet aktívnych studní, oveľa väčšie zníženie HPV ako pri priemernom čerpaní.



Obr. 10 Priemerná hodnota čerpania



Obr. 11 Maximálna hodnota čerpania

4.8 Výpočet úrovne HPV pri povodňových stavoch na Dunaji

Výpočet úrovne HPV bol vykonávaný pre všetky 3 stavy povodňovej aktivity na Dunaji. Ako podkladové údaje boli prebrané z povodne na Dunaji zo začiatku júna roku 2013. Údaje hladiny ako aj povodňové stavy sú znázornené v nasledujúcej tabuľke (Tab. 2).

tok:	DUNAJ				
STANICA:		Bratislava		Devin	
Nula vodočtu:		128.43	[m n.m.]	132.87	[m n.m.]
Datum	STUPEN PA	cm	H [m n.m.]	cm	H [m n.m.]
3.6.2013	1ST	708	135.51	670	139.57
4.6.2013	2ST	820	136.63	800	140.87
5.6.2013	3ST	940	137.83	920	142.07

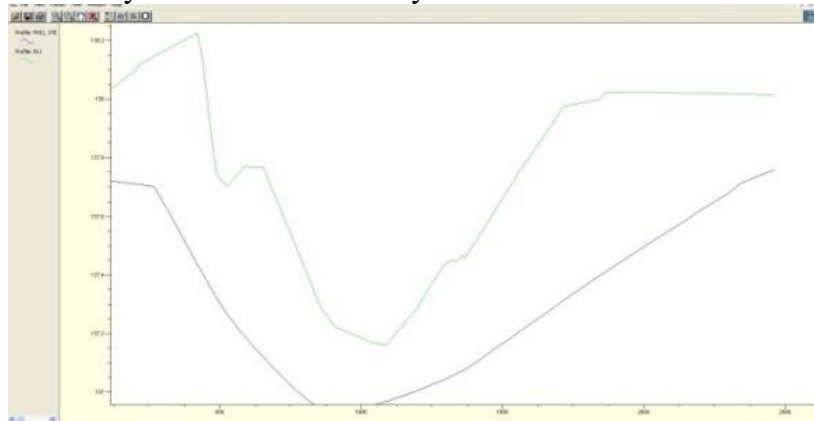
Tab. 2 Úrovne hladiny v Dunaji počas povodne – jún 2013

4.9 Výpočet úrovne HPV pri rôznych st. PA

Pri simulácii bola menená len úroveň hladiny v toku a počas simulácií boli dosiahnuté nasledujúce výstupy. Ako je vidieť z obr. 12 úroveň HPV pri 1st. PA sa drží približne 1m pod úrovňou terénu takmer pod celým ostrovom. Pri 2 st. PA (Obr. 14) je úroveň HPV takmer prepojená z úrovňou hladiny v Dunaji, pričom, na niektorých miestach je ostrov zaplavený a hladiny sú úplne prepojené. Pri 3. st. PA (Obr. 16) už je HPV úplne prepojená s hladinou v toku a celý ostrov je úplne zaplavený. Obrázky 13, 15, 17 ukazujú reálne stupne zaplavenie pri danom stupni povodňovej aktivity

5. Záver

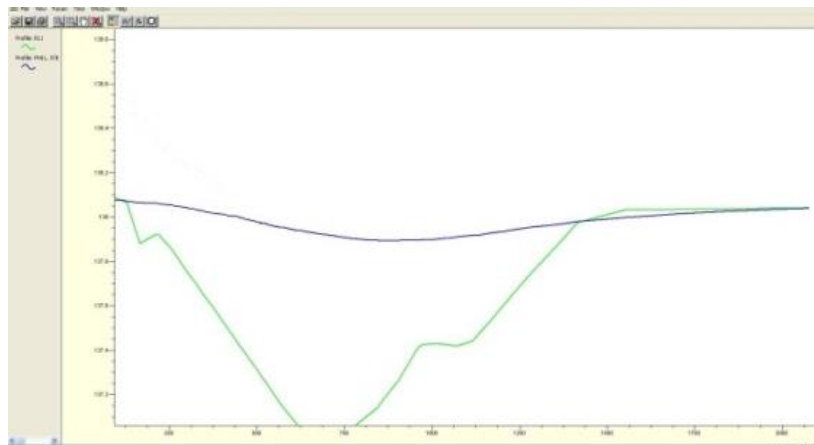
Na základe získaných geologických, hydrogeologických a topografických údajov bolo v modelovacom programe Triwaco vytvorené predmetné záujmové územie. Následne bol vytvorený, nakalibrovaný a neskôr verifikovaný model.



Obr. 12 1. st. PA rez cez ostrov Sihot'.



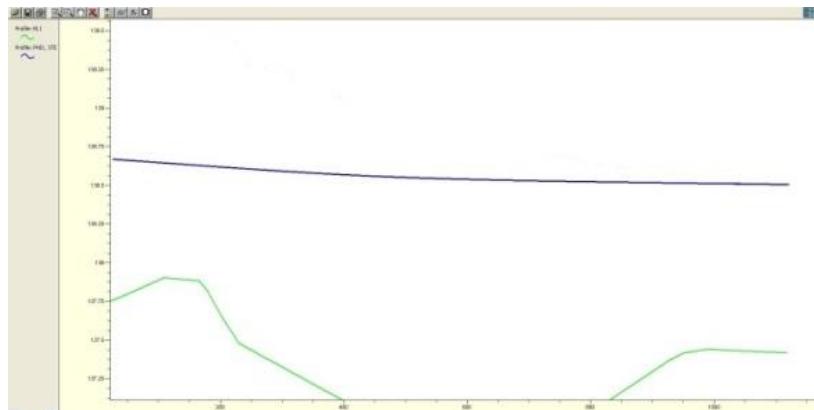
Obr. 13. Úroveň vody pri 2. st. PA na ostrov Sihot'.



Obr. 14 2. st. PA rez cez ostrov Sihot'.



Obr. 15. Úroveň vody pri 2/3 st. PA na ostrove Sihot'.



Obr. 16 3. st. PA rez cez ostrov Sihot'



Obr. 15. Úroveň vody po prekročení 3 st. PA na ostrov Sihot'.

Verifikácia modelu bola na rozsahu údajov, ktoré boli získané terénnymi meraniami. Následne boli vykonané výpočty hladiny podzemnej vody pre priemerné a maximálne odbery, ktoré potvrdili, že pri maximálnych odberoch vznikajú výrazne väčšie poklesy (depresné kužely) vo východnej časti ostrova, kde sa zároveň nachádza najväčší počet aktívnych studní. Následne boli vykonané simulácie pre rôzne stupne povodňovej aktivity. Modelovaním bolo dokázané presne to, čo sa v reálnej situácii deje. Od 2. st. PA dochádza k postupnému zaplavovaniu ostrova a prepojenia úrovne hladiny podzemnej vody s úrovňou hladiny v toku. Tomuto je potrebné prispôbiť aj prevádzku vodných zdrojov (zvýšiť kontrolu kvality pitnej vody, prípadne zvýšiť dávku dezinfekčných činidiel). Pre budúce výpočty bude vytvorený viacvrstvový model, ktorý bude založený na presnejších vstupných údajoch, t. j. koeficient filtrácie pre každú studňu zvlášť, presnejšie úrovne hladiny v toku, bude zvolený širší časový interval, a teda bude potrebné rozšíriť merania. Takto nastavený nakalibrovaný a verifikovaný model by mal slúžiť pre výpočet hladiny podzemnej vody pre akýkoľvek stav v Dunaji. Ako výstupy budú mapy úrovne HPV, smer prúdenia, prípadne rýchlosti. Výsledky budú môcť byť použité pre eventuálnu úpravu čerpaceho plánu ostrova Sihot'.

Literatúra

1 . **Andrássy, T.** *Vplyv odporu dna toku na hladinový režim podzemných vôd*. Bratislava: s.n., 2010. SVF-5378-26922.

2. **Baroková, D.** *Určenie vplyvu vodnej stavby na hladinový režim podzemných vôd a možnosti jeho regulácie*. Bratislava: s.n., 2006. ISBN 80-227-2367-3.

3. **Hydrologická ročenka 2005** – povrchové vody, SHMU Bratislava 2006, 218 strán