

TVORBA A KALIBRÁCIA ZRÁŽKOVŔ ODTOKOVÉHO MODELU ÚZEMIA PRE POTREBY PROTIPOVODŇOVÉHO VAROVNÉHO SYSTÉMU

CREATION AND CALIBRATION OF RAINFALL- RUNOFF MODEL FOR THE NEEDS OF FLOOD WARNING SYSTEM

Ivan Mrnčo¹, Peter Blštak², Peter Hudec³, Tomáš Gibala⁴, Eva Michaeli⁵

Abstract:

The paper deals with the applications of the modern computational methods to address global flood forecasting and warning system. This will be built on the basis of the mathematical computer model of the selected area, where the computer model will simulate the processes associated with rainfall runoff. For selected area is simulated runoff water from the area by river. Drain water from the area is secured using flow through sewer network. For excessive rainfall event diluted water from sewer network is outlet to the river, which can cause elevated levels of water flow in river and cause local flooding. Therefore, the scope of the project is to investigate the interaction of sewage network and water flow to the extent of flooding in the assessed area. Behavior of water flow in river and in the sewer network is simulated using two mathematical computer models. Mathematical computer model MIKE 21 FM is used to simulate runoff processes in the river in a 2D environment and mathematical computer model MIKE URBAN-MOUSE is used to simulate runoff processes in the sewer network. Both models are interconnected, and the results of one serve as input boundary conditions for the second model and vice versa. Such interconnection between the two models is possible to perform the simulation of rainfall-runoff conditions of the area. An important element in the construction of a mathematical model is calibrated on the basis of measured values that were collected during the measuring campaign. For calibration of rainfall-runoff conditions in the stream are the values of the water level in the river channel and for calibration of rainfall-runoff conditions in the sewer network are the values of the water level in the collecting system and flow measuring for campaign period. Along with these values, it is important to collect information on the occurrence of rainfall in the study area during the measuring campaign. This is done using

- 1 **Ing. Ivan Mrnčo, PhD.** – ITKON, spol. s r. o., Dohnányho 2, 917 02 Trnava, e-mail: ivan.mrnco@itkon.sk
- 2 **Ing. Peter Blštak** – ITKON, spol. s r. o., Dohnányho 2, 917 02 Trnava, e-mail: peter.blstak@itkon.sk
- 3 **Mgr. Peter Hudec** – ITKON, spol. s r. o., Dohnányho 2, 917 02 Trnava, e-mail: peter.hudec@itkon.sk
- 4 **Ing. Tomáš Gibala, PhD.** – DHI SLOVAKIA s.r.o., Hattalova 12, 831 03 Bratislava, e-mail: t.gibala@dhi.sk
- 5 **prof. RNDr. Eva Michaeli, PhD.** – Katedra geografie aplikovanej geoinformatiky FHPV PU v Prešove, Ul. 17. novembra 1, 081 16 Prešov, e-mail: eva.michaeli@unipo.sk

rain gauges, which record information about yield reductions. Based on these data, compiled mathematical model is calibrated so as accurately simulate the actual condition. Thus prepared model is used to simulate different load conditions, their evaluation and to propose measures that eliminate flood damage. This leads to the protection of property, land, public health and promoting the development of an urbanized area.

Key words:

flood, mathematical modeling, hydroinformatics, development of urban areas

ÚVOD

Správna funkčnosť protipovodňového varovného systému závisí od presnosti zrážkovo-odtokového modelu, ktorý simuluje odtok vôd z vybraného územia. Samotný protipovodňový varovný systém bude postavený na báze počítačového modelu, kde je nevyhnutne potrebné, aby model zodpovedal reálnemu stavu. Proces zostavenia počítačového modelu je rozdelený do dvoch fáz. Prvou je návrh povodia pre stavbu zrážkovo-odtokového modelu spolu so získaním podrobných informácií o objektoch v posudzovanom území, akými sú informácie o koryte rieky, o stokovej sieti a o objektoch na nich sa vyskytujúcich. Nevyhnutnými údajmi sú nadmorské výšky terénu. Druhou fázou je kalibrácia modelu, ktorá spočíva v nastavení parametrov modelu tak, aby rozdiel medzi vypočítanými a meranými údajmi bol čo najmenší a teda model, čo možno najlepšie, vystihoval reálny systém. Tieto dve fázy slúžia ako podklad pre riešenie varovného protipovodňového systému. Model ako taký pozostáva z dvoch vzájomne prepojených častí – modelu kanalizačnej siete a 2D modelu záujmového územia, pričom tieto sú vzájomne prepojené tak, aby si vymieňali medzi sebou okrajové podmienky. Pre samotné výpočty je potrebné rozlišovať hydrologický model (simulácia transformácie zrážky na povrchový odtok) a hydraulický model, ktorý transformuje priebeh povrchového odtoku odvodňovacou sieťou (kanalizácia, vodné toky).

Ako vybrané územie bolo zadefinované územie nachádzajúce sa južne od mesta Trenčín a severne od Trenčianskej Turnej. V území sa nachádza aj nákupné centrum Laugaricio Trenčín. Cez územie prechádza tok Lavičkový potok.



Obr. 1 Rozsah modelu (ohraničený zeleným polygónom)

Hydrologický simulačný model

Hydrologický simulačný model vychádza z definovania jednotlivých čiastkových povodí, ich veľkosti, koeficientu odtoku (reprezentovaný efektívnou nepriepustnou plochou) a prípadne obsahuje ďalšie hydrologické parametre ako je napríklad doba koncentrácie alebo dĺžka a sklon povodia. Jednotlivé povodia sú zaústené do uzlových bodov odvodňovacej siete tak, ako je im to hydraulicky príslušné.

Súčasťou hydrologického modelu je aj definícia rady parametrov, ktorými sa stanoví počiatočná strata, retencia a retardácia povodia. Je možné voliť z niekoľkých rôznych spôsobov výpočtu odtoku z povodí. Pre účely generelu územného plánu bol zvolený model MIKE URBAN (Mouse) Level A, ktorý vychádza z princípu časopriestorovej krivky. Tento spôsob výpočtu sa obvykle volí v prípade, pokiaľ nie je výpočet zameraný na simuláciu balastných vôd v stokovej sieti.

Hydrologický model nezahŕňa simuláciu nehydrologických vôd, ako sú splaškové a priemyselné odpadové vody. Hydrologický model nerieši hydraulické chovanie sa siete, ako sú napr. oddeľovače v povodí. To je predmetom nadväzujúceho hydrodynamického modelu stokovej siete.

V rámci definície povodia rozlišujeme nasledujúce „plochy“:

- Celková plocha povodia jednotnej kanalizácie – je definovaná hranicou urbanizovaného povodia jednotnej kanalizácie.
- Efektívna nepriepustná plocha povodia, tzv. „fast runoff component“ (FRC) – sú spevnené plochy povodia, z ktorých odtékajú zrážková voda priamo do kanalizácie. Zisťuje sa na základe analýzy merania zrážok a príslušnej odozvy prietoku v kanalizácii. Efektívna nepriepustná plocha je spravidla menšia než spevnená plocha povodia.

Tvorba hydrologického simulačného modelu

Hydrologický model, ktorý simuloval zrážkovo-odtokový proces z povodí, bol vytvorený pomocou modulu MIKE URBAN (MOUSE) level A. Bol zavedený predpoklad, že v splaškovom prietoku je 30% balastných vôd. Pre stanovenie splaškového prietoku bola uvažovaná spotreba vody podľa meraných údajov. Balastné vody boli zahrnuté do výpočtu zvýšenou hodnotou spotreby vody, teda 160 l/obyv./deň vrátane balastných vôd.

K vytvoreniu hydrodynamického modelu bol použitý simulačný prostriedok MOUSE, slúžiaci k výpočtom pomaly sa meniaceho neustáleného prúdenia v stokových sieťach a odvodňovacích kanáloch.

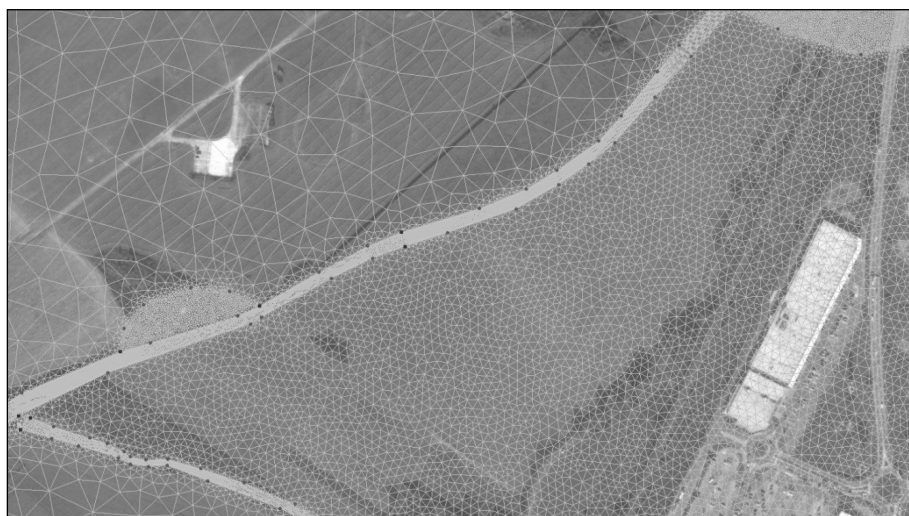
Ako podklad pre tvorbu modelu stokovej siete, boli použité nasledovné dáta: topologické dáta šachiet, geometrické dáta objektov a potrubí, informácie o ich napojení, atď.

Pri príprave modelu bola uskutočnená čiastočná vnútorná schematizácia. Tzn. že model kostry stokovej siete obsahuje všetky šachty, objekty a stokové úseky, ktoré sa na ňom nachádzajú, avšak na stokách menšieho rádu nie sú do výpočtu zahrnuté všetky šachty.

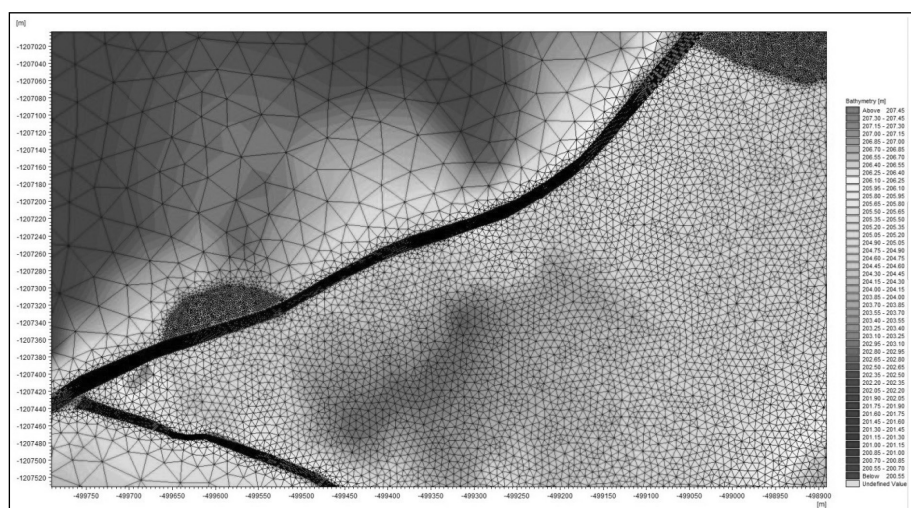
Na zostavenie dvojrozmerného hydrodynamického modelu a modelové simulácie bol použitý softvérový nástroj MIKE 21 FM. Prostriedok MIKE 21 FM je dvojrozmerný matematický model neustáleného prúdenia s flexibilnou výpočtovou sieťou vyvinutý spoločnosťou DHI a predstavuje komplexný simulačný prostriedok pre dvojrozmerné modelovanie prúdenia s voľnou hladinou. Je založený na riešení dvojrozmerných riadiacich RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) rovníc, integrovaných po hĺbke. Numerické riešenie spočíva v diskretizácii pomocou metódy konečných objemov, kde priestorová doména je diskretizovaná rozdelením na neprekrývajúce sa prvky (trojuholníky, alebo štvoruholníky). Závislé premenné systému sú reprezentované ako konštanta pre celý prvok a vzťahujú sa k stredu prvkov.

Pri aktualizovaní a spresnení modelu bola vytvorená výpočtová sieť tvorená trojuholníkovými a štvoruholníkovými prvkami, ktorá pokrýva modelované územie v plnom rozsahu. Sieť bola postavená tak, aby dostatočne vystihovala pôdorysné usporiadanie zameraného pozemku. Hustota siete bola premenlivá a zvolená tak, aby zabezpečovala dostatočnú presnosť modelovania a numerickú stabilitu simulácií. Zostavená sieť tvorí 211 017 uzlov a má celkový počet prvkov 309 465.

Do každého uzla výpočtovej siete bola v 2D modeli prevzatá zodpovedajúca výška terénu z DTM. Na základe geodetických meraní bola topografia modelu aktualizovaná. Tak vznikla topografia modelu, ktorú nazývame bathymetria.



Obr. 2 Ukážka časti flexibilnej výpočtovej siete 2D modelu



Obr. 3 Detail topografie

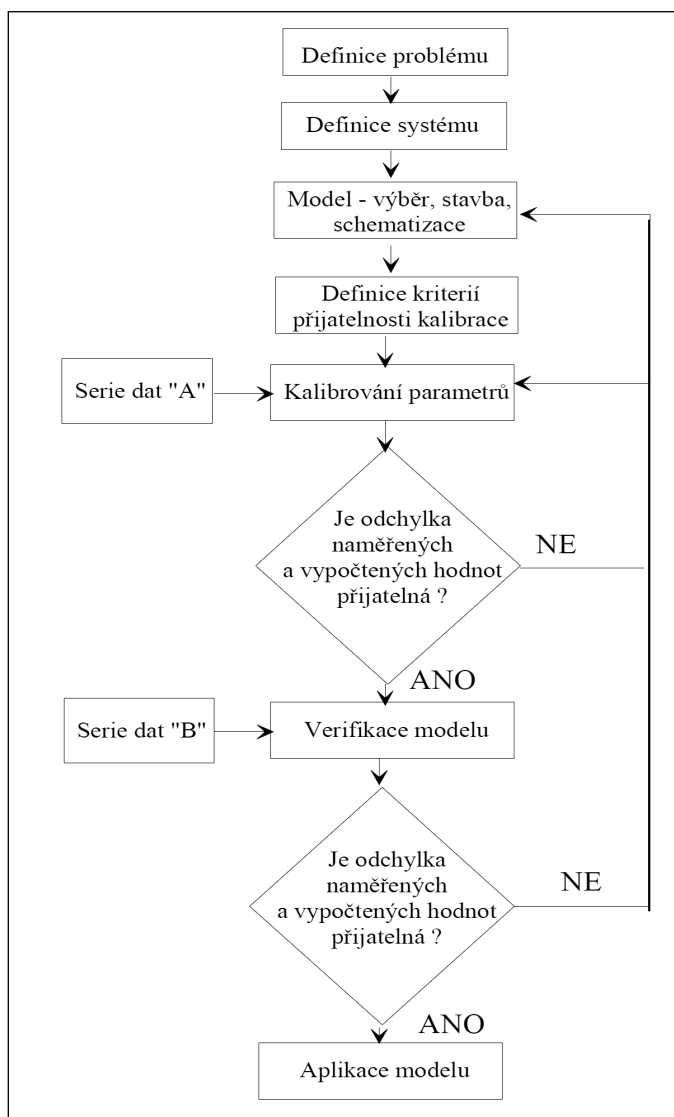
Každý prvok výpočtovej siete modelu má definovanú hodnotu hydraulického odporu, vyjadrenú vo forme Manningovho stupňa drsnosti, v závislosti od druhu povrchu terénu. Hodnoty Manningovho stupňa drsnosti boli zadávané na základe analýzy ortofotomapy, fotodokumentácie a terénnej prehliadky.

Kalibrácia hydrodynamického modelu

Zostavovanie a následná kalibrácia simulačných modelov sú vysoko odborné činnosti, ktorých cieľom je pripraviť simulačný prostriedok pre následné práce na simuláciách rôznych stavov. Väčšina výpočtových pomôcok pre riešenie problematiky povrchového odtoku je založená na viac, či menej presnom popise fyzikálne-chemicko-biologických procesov pri zrážkovo-odtokovom deji. Tento popis je mimo iného určovaný nastavením začiatkových a okrajových podmienok simulácie, teda nastavením parametrov, popisujúcich stav systému (popis povodí, percento zastúpenia nepriepustných plôch, infiltračná kapacita priepustných plôch, a pod.). Niektoré z týchto parametrov je veľmi ťažko zistiteľné meraniami. K zisteniu správnych hodnôt koeficientov a parametrov riadiacich rovníc alebo i empirických vzorcov slúži práve kalibrácia modelu.

Pre kalibráciu modelu je nevyhnutné zaobstarat' sériu vstupných a výstupných veličín pre známe začiatkové podmienky (napr. nameraný dážď a jemu zodpovedajúci prietok v stokovom systéme). Kalibrácia teda predpokladá, okrem detailnej znalosti matematického modelu a jeho riadiacich rovníc, i voľbu takej monitorovacej stratégie, ktorá umožní získanie dostatočných informácií o funkcii celého systému pri rôznych zaťažovacích stavoch. Práve na základe porovnaní meraných reálnych vstupných veličín (príčin) pri niekoľkých zaťažovacích stavoch, ktoré slúžia ako vstupy matematického modelu a na základe porovnaní meraných reálnych výstupných veličín (dôsledkov) s výsledkami matematickej simulácie overujeme platnosť a zhodu skutočných a modelových okrajových a začiatkových podmienok a koeficientov riadiacich rovníc. Verifikácia simulačného modelu je po obsahovej stránke porovnateľný proces s kalibráciou. V rámci verifikácie modelu je však potrebné overiť platnosť parametrov zistených kalibráciou na nezávislej sérii vstupných a výstupných veličín (napr. pre iný dážď, pre inú skupinu dát - pretečený objem, a pod.). Proces kalibrácie a verifikácie simulačného modelu je schematicky naznačený na nasledujúcom obr.

Je zrejmé, že proces kalibrácie, mimo už zmienených predpokladov vyžaduje taktiež nemalé časové a ekonomické nároky na užívateľa. Optimálna voľba meraných veličín tak, aby tieto poskytovali dostatok podkladov pre následnú kalibráciu a zároveň bolo ich zistenie časovo a ekonomicky možné najmenej náročné je teda jedným z veľmi podstatných krokov pri riešení problematiky mestského odvodnenia s využitím moderných simulačných prostriedkov.



Obr. 4 Kalibrácia a verifikácia simulačných modelov

Aj napriek tomu, že kalibrácia a verifikácia modelu vyžaduje viac vynaložených prostriedkov a predlžuje spracovávanie úlohy, je nevyhnutnou súčasťou aplikácie simulačných modelov.

Za účelom zjednodušenia kalibrácie a následnej verifikácie matematického modelu je nezanedbateľnou výhodou existencia citlivostnej analýzy simulačného modelu. Citlivostná analýza vstupných parametrov (vplyv percenta nepriepustných plôch na maximálny prietok, vplyv infiltračnej kapacity na celkový odtečený objem, a pod.) môže užívateľovi podstatne zjednodušiť a zrýchliť proces kalibrácie a verifikácie modelu, bez ohľadu na možnosť jednoduchšieho rozhodovania o monitorovacej stratégii práve pre účely kalibrácie a verifikácie modelu.

Schematizácia modelu je v procese prác na začiatku, v podstate definuje zjednodušenie celého systému tak, aby nebol vynechaný žiadny významný prvok systému a aby mohli byť riešené ciele projektu. Po definícii schematizácie vlastného modelu sa realizujú v podstate v súbehu dve základné činnosti, jednak merania v povodí a jednak zostavenie a kalibrácia potrebných simulačných prostriedkov na základe zvolenej technológie.

Pre schematizáciu modelu je potrebné zdôrazniť, že niektoré povodia majú parametre upravené z dôvodu, že sa v nich napríklad nachádza zaústenie priemyselnej kanalizácie, ktorá nie je zahrnutá priamo v modeli, ale uvažuje sa s ňou ako s bodovým prítokom (areál Naza a nábytkárne, a pod.), prípadne sa uvažuje s väčším odtokovým koeficientom, aký prináleží danému povodiu.

Základným vstupom pre hydrodynamický model boli zaťažovacie hydrogramy povrchového odtoku.

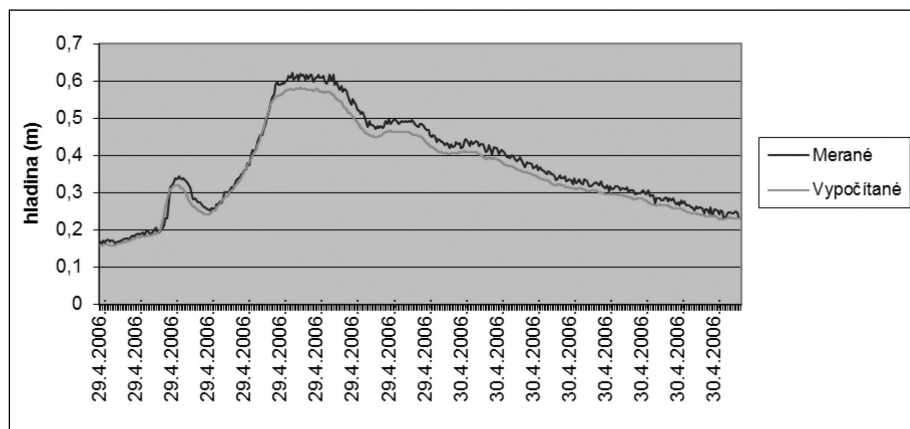
Kalibračné práce spočívali v nastavení celého systému na priebehy prietokov nameraných v rámci monitorovacej kampane. V priebehu kalibračných prác bolo nevyhnutné najmä:

- a) **Zachovať objemové bilancie** - Táto požiadavka znamená správne nastavenie systému z hľadiska porovnania objemu odtoku dažďových a splaškových vôd z modelu so skutočnosťou (=dáta z monitorovacej kampane). Tento nárok tiež súvisí s určením výskytu balastných vôd a úpravou spotreby obyvateľstva.
- b) **Zachovať maximá** - Znamená nastavenie modelu z hľadiska správneho zachytenia priebehu maximálnych prietokov v jednotlivých vlnách hydrogramu prietoku.
- c) **Zachovať tvar** - Tento bod znamená nastavenie simulačného modelu tak, aby rešpektoval tvar vzostupnej a zostupnej vetvy hydrogramu prietoku.

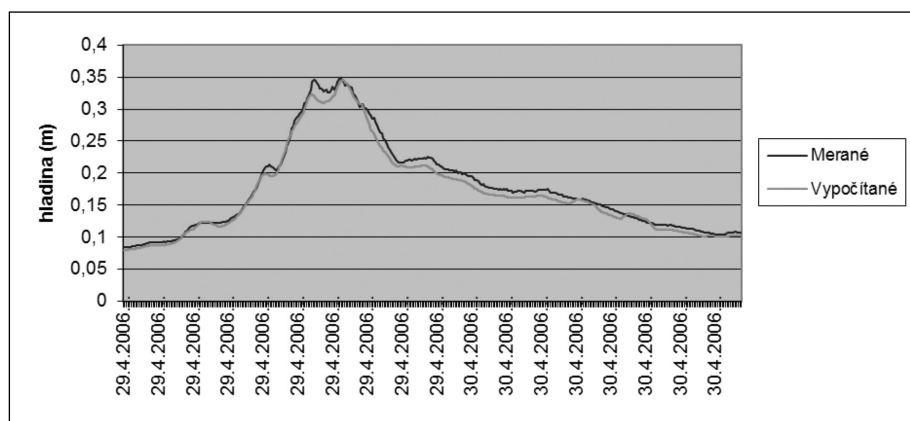
Proces kalibrácie a verifikácie hydrodynamického modelu bol zlúčený do jedného kroku tým, že bolo simulované celé kalibračné obdobie.

Výsledky kalibrácie

Na nasledujúcich obrázkoch sú ukázané príklady výsledkov kalibrácie modelu.



Obr. 5 Výsledky kalibrácie pre bod H2 - hladina



Obr. 6 Výsledky kalibrácie pre bod H1 - hladina

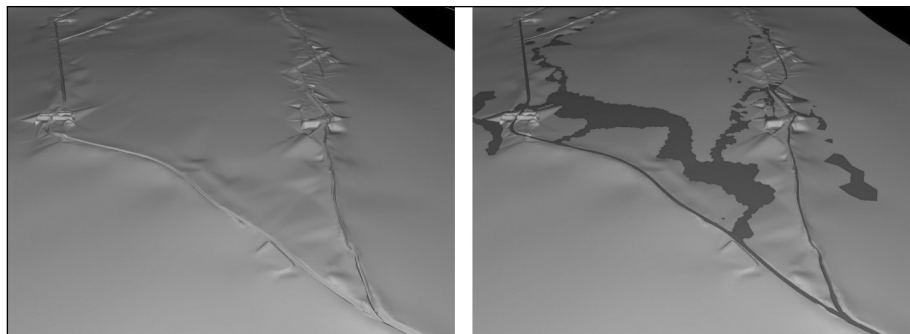
Na základe kalibrácie je možné konštatovať, že hydrodynamický model vykazuje dostatočnú presnosť pre hodnotenie súčasného stavu a pre prácu na výhľadovej koncepcii odvodnenia.

Pri podrobnej analýze skalibrovaného modelu môžeme identifikovať časové úseky, pre ktoré je v niektorých kalibračných bodoch nižšia zhoda simulovaných a meraných prietokových kriviek. Táto skutočnosť je spôsobená náhodnými okolnosťami, ktoré nie je možné bez ich detailnej znalosti modelom pochopiť. Jedná sa napríklad o lokálne zrážky so špecifickým priestorovým rozložením. Ďalej sa jedná o chyby merania spôsobené pohybom sedimentov a veľkých predmetov v kanalizácii, prevádzkové manipulácie a prevádzkové opatrenia, náhodné vypustenie veľkého

množstva odpadových vôd vyplývajúce z technológie výroby priemyselných podnikov, a pod. Niektoré profily merania prietokov nie sú ideálne z hľadiska lokálnych hydraulických podmienok (napr. extrémne malé alebo extrémne veľké rýchlosti). Z objektívnych dôvodov však nebolo možné nájsť profily hydraulicky vhodnejšie. Vyššie uvedené skutočnosti nie sú v rámci hydrologických modelov podstatné z hľadiska kalibrácie modelu a z hľadiska jeho ďalšej aplikácie pre koncepčné úvahy odvodnenia mesta Trenčín.

ZÁVER

Z výsledkov simulovania zrážkovo-odtokového procesu a jeho transformácie na vybranom území pre extrémnu zrážku vyplýva, že záplava sa prejaví v miestach inundačného územia. Vyhotovené boli grafické prílohy zobrazujúce 2D modelom vypočítanú nadmorskú výšku hladiny vody, hĺbku vody a rozsah záplavy – vid' nasledujúce obrázky. Zároveň bolo vyhotovené aj video z postupu zaplavovania vybraného územia. Výsledky simulácie kanalizačnej siete ukazujú, že stoková sieť aj napriek extrémnej zrážke si plní svoju funkciu, ale zvýšeným podielom ju prenáša na Lavičkový potok, čo vedie k lokálnemu zaplaveniu územia po prúde toku.



Obr. 7 Topografia modelu – stav bez záplavy (vľavo), stav v čase záplavy (vpravo).



Obr. 8 Znáznornenie hĺbok záplavy na vybranom území



Obr. 9 Znáznornenie hladín záplavy na vybranom území

Samotný skalibrovaný zrážkovo-odtokový model spolu s modelmi hydrauliky prúdenia v odvodňovacom systéme predstavuje fundamentálny základ pre predpovedanie povodňových stavov a ich rozsahu na vybranom území. Takto zostavené a správne prepojené modely predstavujú podklad pre vytvorenie protipovodňového varovného systému, ktorý bude na základe reálnych dát z územia vedieť vyhodnotiť riziko ohrozenia a predčasne varovať dotknuté orgány. Týmto sa bude dať predísť škodám spôsobeným na majetku a ľudských životoch.

Poznámka:

„Príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj, pre projekt: Kompetenčné centrum znalostných technológií pre inovácie produkčných systémov v priemysle a službách, kód ITMS: 26220220155, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“

LITERATÚRA

- MRNČO I., POLÁČEK M., BLŠTAK P., HUDEC P., GIBALA T., BRTKO P. 2012. Odvádzanie odpadových vôd ako zdroj povodňového znečistenia: Konferencia Odpadové vody 2012, NOI Bratislava, ISBN: 978-80-970896-2-7
- MRNČO I., BLŠTAK P., POLÁČEK M. Štruktúra dát v systémoch hydroinformatiky a ich vzájomné prepojenie. Konferencia Inovatívne informačno-komunikačné technológie vo vodnom hospodárstve, ISBN: 978-80-89535-14-9

SUMMARY

Aim of the study was to create and calibrate rainfall-runoff model for the needs of flooding warning system. For the study there was selected area located south of city of Trencin and north of city of Trencianska Turna. Inside the area is located shopping center Laugaricio with sewage network. Rainfall-runoff waters are collected to the small river Lavickovy potok which is crossing selected area. Huge rainfall event is causing increasing of water level in river from sewage network. There have been prepared two mathematical models for the simulation of hydraulic conditions for the sewer network and for the river. Mathematical computer model MIKE 21 FM was used to simulate runoff processes in the flow in a 2D environment and mathematical computer model MIKE - mouse was used to simulate runoff processes in the sewer network. Both models are interconnected, and the results of one serve as input boundary conditions for the second model and vice versa. Such interconnection between the two models is possible to perform the simulation of rainfall-runoff conditions of the area. An important element in the construction of the mathematical model was calibration based on the measured values, which were collected during the measuring campaign. In the case of calibration for rainfall-runoff conditions in terms of flow to value water level in the river channel and for calibration of rainfall-runoff conditions in the collecting system are the values of the water level in the collecting system and flow measuring campaign period. The results of the simulation of rainfall-runoff process and its transformation in the area of extreme precipitation shows that result will in the inundation of the area. There have been prepared graphic Annexes of 2D model calculated the elevation of water level, water depth and extent of flooding. Simulation results show that sewerage network despite the extreme collision fulfills its function, but it carries an increased share of the bench creek, leading to local flooding area downstream flow. Calibrated rainfall-runoff model with models of hydraulic flow in the drainage system is a fundamental basis for further development options for flood forecasting system.