

**Názov výstupu:**

**Technická správa**

**Výstup z aktivity:**

C2

**Autori:**

**Ing. Martin Mišík, PhD  
Ing. Marián Kučera  
DHI SLOVAKIA, s.r.o.  
Hattalova 12, Bratislava**



**Website:**

[www.odolnesidliska.sk](http://www.odolnesidliska.sk)



*Projekt DELIVER - DEveloping resilient, low-carbon and more LIVable urban Residential area  
DELIVER: Sídlišká ako živé miesta odolné voči zmene klímy, kód LIFE17 CCA/SK/000126 - LIFE DELIVER.  
Projekt je financovaný zo zdrojov Európskej komisie, z finančného nástroja pre životné prostredie:  
program LIFE, z podprogramu „Ochrana klímy“.*

# **Modelovanie a mapovanie povodňového ohrozenia riešeného územia sídliska Dlhé diely v MČ Karlova Ves**

**Február 2019**



Správa vznikla v rámci projektu „Sídľiská ako živé miesta odolné voči zmene klímy“, **DELIVER** - **DE**veloping resilient, low-carbon and more **LIV**able urban **R**esidential area, kód LIFE17 CCA/SK/000126 - LIFE DELIVER. Projekt je financovaný zo zdrojov Európskej komisie, z finančného nástroja pre životné prostredie: program LIFE, z podprogramu „Ochrana klímy“.

## Obsah

1	Úvod .....	4
2	Záujmové územie a rozsah modelovaného územia .....	4
3	Použité podklady .....	5
3.1	Digitálny terénny model a obrysy budov .....	5
3.2	Klimatologické údaje .....	5
3.3	Rekognoskácia terénu .....	5
4	Metodika postupu modelovania .....	7
4.1	Postup práce .....	7
4.2	Analýza trás odtoku .....	7
4.3	Hydrodynamický model zrážkovo – odtokového procesu a prúdenia po povrchu .	11
5	Popis modelovaného scenára a výsledky .....	12
5.1	Modelovaný dážď .....	12
5.2	Trasy povrchového odtoku .....	12
5.3	Rozsah zaplavenia terénu a hĺbka odtekajúcej vody .....	13
6	Výstupy a ich formáty .....	14
7	Záver .....	14
8	Literatúra .....	155
	Príloha 1 .....	166
	Príloha 2 .....	177
	Príloha 3 .....	188

## 1 Úvod

Predmetom štúdie *Modelovanie a mapovanie povodňového ohrozenia riešeného územia sídliska Dlhé diely v MČ Karlova Ves* je simulácia odozvy modelovaného územia sídliska Dlhé diely na veľmi silný dážď, zistenie smerov a trás koncentrovaného odtoku a miery zaplavenia územia v dôsledku intenzívneho dažďa, teda pri takzvanej pluválnej povodni. Túto štúdiu vypracovala spoločnosť DHI SLOVAKIA, s.r.o., na základe objednávky Mestskej časti Bratislava-Karlova Ves.

V súlade so zadaním, boli predmetom práce nasledujúce analýzy a výstupy:

- Modelovanie a mapovanie povodňového ohrozenia riešeného územia v dôsledku intenzívneho dažďa,
- Zistenie trás koncentrovaného odtoku
- Zistenie rozsahu územia ktoré bude zasiahnuté koncentrovanou vodou
- Vytvorenie mapy znázorňujúcej maximálnu hĺbku vody v riešenom území

## 2 Záujmové územie a rozsah modelovaného územia

Záujmovým územím bolo sídlisko Dlhé diely, ktoré sa nachádza v Bratislave v Mestskej časti Karlova Ves. Rozsah modelovaného územia bol súčasťou zadania a je znázornený na obrázku *Obr. 1*. Plocha záujmového územia je 1,3 km<sup>2</sup>.



*Obr. 1. Rozsah modelovaného územia sídliska Dlhé diely*

## 3 Použité podklady

### 3.1 Digitálny terénny model a obrysy budov

Digitálny Model Terénu (DTM) záujmového a priľahlého územia, bol vytvorený a dodaný firmou Eurosense s.r.o., na základe farebných leteckých meračských snímok z roku 2017 (DTM@Eurosense.sk). Presnosť zalietaného DTM je  $RMSE_{xyz} \leq 0,25$  m.

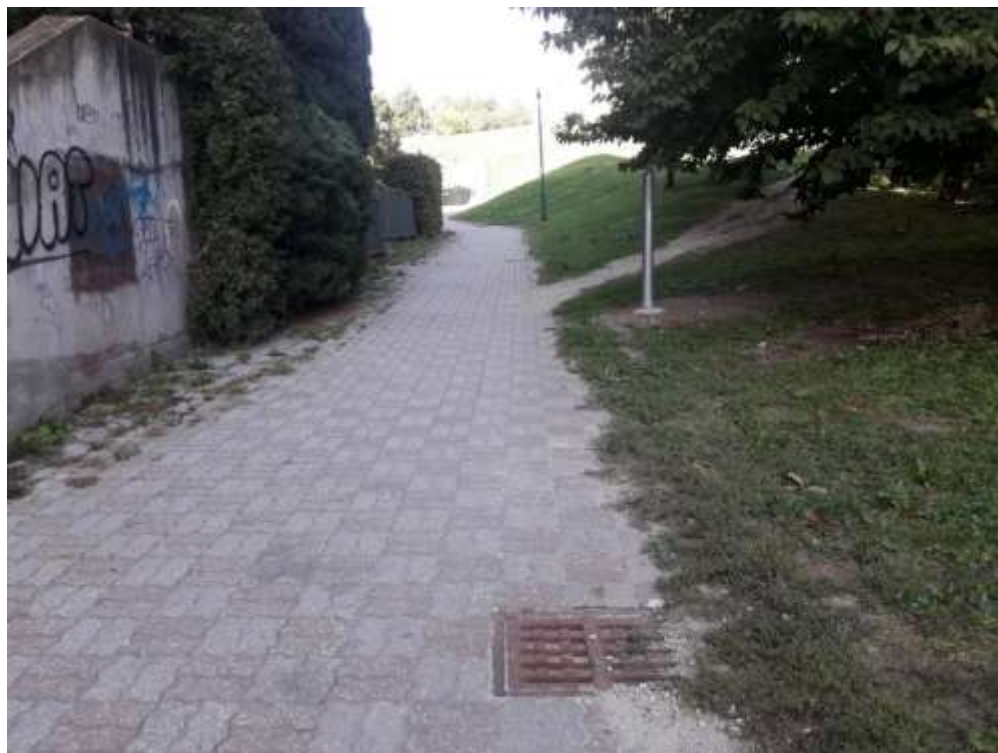
Firma Eurosense dodala aj polygón obrysu budov (2D). Celková plocha pôdorysov budov v záujmovej oblasti je 223 030 m<sup>2</sup>.

### 3.2 Klimatologické údaje

Základným údajom pre modelovanie zrážkovo-odtokového procesu bol údaj o intenzite modelového dažďa. Použité parametre modelového dažďa a logika ich voľby sú uvedené v kapitole 5.1.

### 3.3 Rekognoskácia terénu

Znalosti o modelovanom území sme získali terénnymi prehliadkami a doplnili sme ich informáciami a analýzami z nástroja Google Earth Pro.



*Obr. 2 Trasa koncentrovaného odtoku na Hlaváčikovej ulici*



*Obr. 3 Trasa koncentrovaného odtoku smerom k ulici Nad lúčkami*



*Obr. 4 Výrazné údolie smerom na Lackovu ulicu*

## 4 Metodika postupu modelovania

### 4.1 Postup práce

Pre splnenie zadania štúdie, uvedeného v úvode tejto správy, sme postupovali nasledujúcim spôsobom:

- Analyzovali sme územie na základe dát v Google Earth Pro a absolvovali sme terénne prehliadky.
- Zakúpili sme a analyzovali geopriestorové dáta, digitálny terénny model (DTM) a polygóny obrysov budov.
- Ku klimatologickým údajom o modelovom daždi sme absolvovali konzultáciu s SHMÚ.
- Po dohode s objednávateľom sme prijali zjednodušujúci konzervatívny predpoklad (zohľadňujúci najnebezpečnejšiu situáciu) že celý dážď sa premení na povrchový odtok. Ostatné zložky (intercepcia, výpar, infiltrácia, odtok do kanalizácie) sme vo výpočtoch neuvažovali.
- Analýzu odtokových trás sme robili pomocou nástroja DHI Flood Screener, verzia 1.2 z roku 2018. Zistené trasy odtoku sme exportovali do SHP formátu pre spracovanie v GIS.
- Detailné modelovanie povrchového odtoku dažďovej vody sme robili pomocou 2D hydrodynamického modelovacie nástroja MIKE 21 FM, verzia 2017.
- Výsledky 2D hydrodynamického modelu sme exportovali do SHP formátu pre spracovanie v GIS.
- Mapové výstupy sme spracovali v GIS nástroji ArcGIS Desktop 10.5.
- Postup práce a výsledky analýz sme popísali v technickej správe.

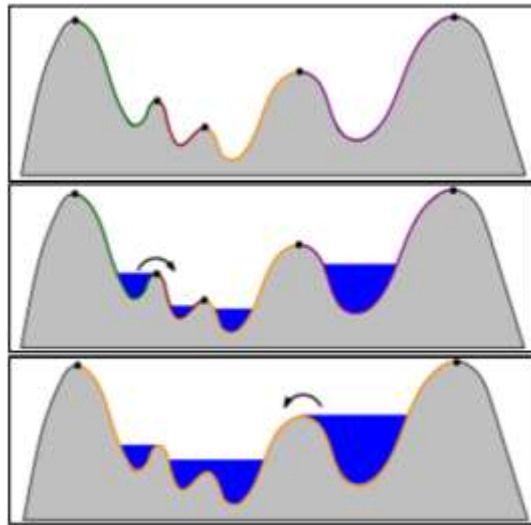
### 4.2 Analýza trás odtoku

Trasy koncentrovaného odtoku sme zisťovali analýzou pomocou nástroja DHI Flood Screener. Je to aplikácia na identifikáciu potenciálne zaplavovaných oblastí na základe analýzy digitálneho terénneho modelu (DTM), dažďa, prípadne definovanej premietanej hladiny (rieky, jazera, alebo mora). Simulačné výsledky aplikácie sú mapy zaplavených oblastí ktoré identifikujú kde bude voda z dažďa akumulovaná. Výsledky neposkytujú informáciu o časovom vývoji postupu záplavy.

Jednoduché vysvetlenie krokov vykonávaných počas výpočtu odtokových trás:

1. Simulácia začína z pôvodne suchej topografie (DTM)
2. Identifikované sú lokálne miesta s minimami v topografii a vytvoria sa dielčie „povodia“ okolo nich
3. Na povrch sa pridáva dážď - do každého identifikovaného miesta s lokálnym minimom (do depresí). Pridávaný objem začína zaplňovať dielčie „povodia“
4. Ako sa „povodia“ plnia, výška hladiny vody dosahuje výtok z „povodia“ a začína sa prelievať do susedných povodí
5. Keď je naplnených viac susedných „povodí“, spoja sa do jedného. Aktualizácia „povodí“ pokračuje až do maximálneho dažďa definovaného v simulácii.

6. Výsledok zo vstupného dažďa je mapa trás odtoku a záplavy kde zaplavené oblasti reprezentujú všetky lokálne minimá (depresie) a „povodia“ ktoré boli úplne alebo čiastočne zaplnené počas simulácie.



*Obr. 5 Ilustrácia metodiky povodňového testovania pre dažď*

*Hore: suchá topografia terénu na začiatku analýzy*

*Stred: Depresia v teréne vľavo je plná a začína sa prelievať do susedných dielčích odtokových oblastí*

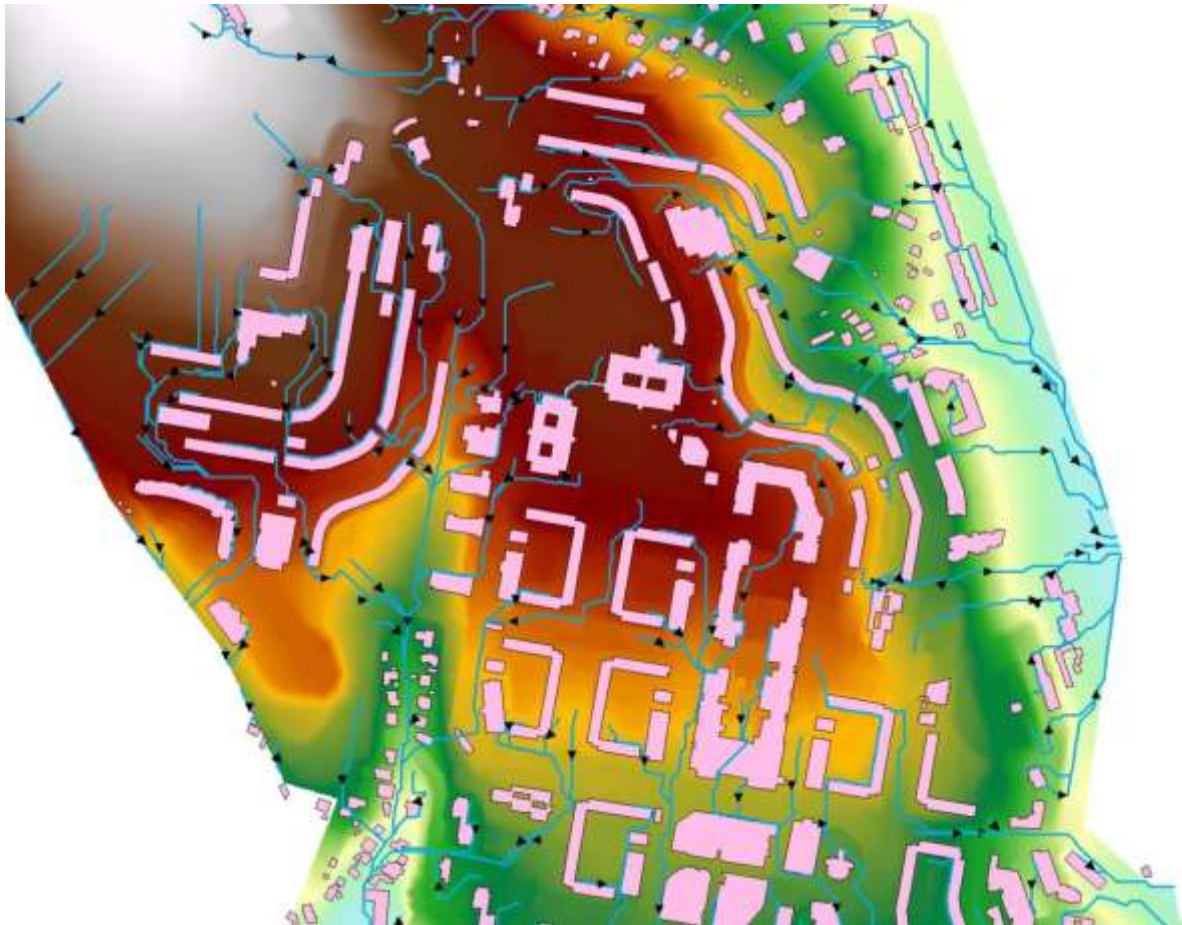
*Dolu: Depresia vpravo je plná a začína sa prelievať. Dve dielčie povodia v strede sú plné a spojili sa do jednej väčšej odtokovej oblasti (dielčieho povodia)*

Na výpočet trás odtoku vyššie popísanou metódou sme použili DTM v rastrovom formáte s priestorovým rozlíšením 1 x 1 m. Do DTM boli zapracované budovy tak, že hodnoty výšky terénu pod budovami boli zvýšené, aby cez budovy nemohla tiecť voda.





*Obr. 6 Znáozornenie rozsahu modelovaného územia a odtokových trás na podklade DTM*



*Obr. 7 Znáznorenie odtokových trás na časti modelovaného územia so znázornením budov a DTM*

Zistené odtokové trasy sme exportovali do formátu SHP a pomocou GIS sme ich znázornili na podklade open street mapy. Odtokové trasy sme exportovali aj do formátu .KMZ pre použitie v nástroji Google Earth.

### 4.3 Hydrodynamický model zrážkovo – odtokového procesu a prúdenia po povrchu

Povrchový odtok z riešeného územia sídliska Dlhé diely sme simulovali pomocou 2D hydrodynamického modelu na ktorý sme aplikovali modelový dážď. Po dohode s objednávateľom sme prijali zjednodušujúci konzervatívny predpoklad (zohľadňujúci najnebezpečnejšiu situáciu), že celý dážď sa premení na povrchový odtok. Ostatné zložky (intercepcia, výpar, infiltrácia, odtok do kanalizácie) sme zanedbali. Podobná situácia môže nastať keď je po predchádzajúcich dažďoch infiltračná kapacita pôdy vyčerpaná a vpusty do kanalizácie sú upchaté, prípadne keď má dážď vysokú intenzitu s krátkym trvaním a proces povrchového odtoku na sklonitom území výrazne dominuje nad infiltráciou a schopnosťou kanalizácie účinne odvádzať dažďovú vodu.

Na modelovanie sme použili hydrodynamický 2D model MIKE 21 FM s flexibilnou výpočtovou sieťou vo verzii 2017. Prostriedok MIKE 21 FM je dvojrozmerný matematický model neustáleného prúdenia s flexibilnou výpočtovou sieťou. Bol vyvinutý spoločnosťou DHI a predstavuje komplexný simulačný prostriedok pre dvojrozmerné modelovanie prúdenia s voľnou hladinou. Je založený na riešení dvojrozmerných 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 rovnobežné štvoruholníky). Závislé premenné systému sú reprezentované ako konštanty pre celý prvok a vzťahujú sa k stredu prvku. Zostavená výpočtová sieť mala 88 673 elementov s veľkosťou plôch do 10 m<sup>2</sup>. Každému elementu modelu bola priradená nadmorská výška terénu podľa DTM a hodnota Manningovho súčiniteľa hydraulického drsnosti podľa druhu povrchu terénu. Na zostavený 2D hydrodynamický model sme nechali padať modelový dážď. Na základe výsledkov testovacích výpočtov sme zistili že pre modelované územie je kritický dážď s trvaním 30 až 40 minút. Pri daždi kratšieho trvania sa odtok na celom území nestihne plne koncentrovať a z nižšie položených území voda odtečie skôr než tam pritečie voda z vyššie ležiacich území. Pri dlhšom trvaní dažďa s konštantnou intenzitou už prietok odtekajúcej vody a rozsah zaplaveného územia nerastie. Odtekanie vody z modelu sme zabezpečili zadefinovaním 16 otvorov a hladinových okrajových podmienok v nízko položených miestach, kde odtokové trasy pretínajú vonkajšie okraje modelu.

Budovy boli vyňaté z modelovej domény (ako ostrovy), takže voda v modeli ich obtekala (nemohla sa dostať do budov), a dážď na ne nepadal, respektíve voda zo striech budov sa nemohla dostať do okolitého modelovaného územia. Aby voda ktorá padne na strechy budov v celkovej bilancii nechýbala, zvýšili sme úhrn modelového dažďa úmerne pomeru plochy všetkých budov k celkovej ploche modelovaného územia. Pri pomerne rovnomernom rozdelení budov na riešenom sídlisku je takáto úvaha prijateľná. Plocha budov mala 223 030 m<sup>2</sup>, čo z celkovej plochy modelovaného územia 1 322 370 m<sup>2</sup> predstavovalo 17 %. Na zvyšok územie mimo budov sme teda v modeli pustili  $31 \times 1,17 = 36$  mm dážď. Výsledkom modelovania bola informácia rozsahu zaplaveného územia a hĺbke vody, rozdelení rýchlostí a smerov prúdenia v celej modelovanej oblasti.

## 5 Popis modelovaného scenára a výsledky

### 5.1 Modelovaný dažď

Parametre modelového dažďa pre túto štúdiu dodal SHMÚ po konzultáciách s MČ Karlova Ves aj s DHI. Na základe výsledkov testovacích výpočtov bol zvolený dažďový scenár s úhrnom 31 mm, trvaním 30 min a s konštantnou intenzitou počas trvania dažďa.

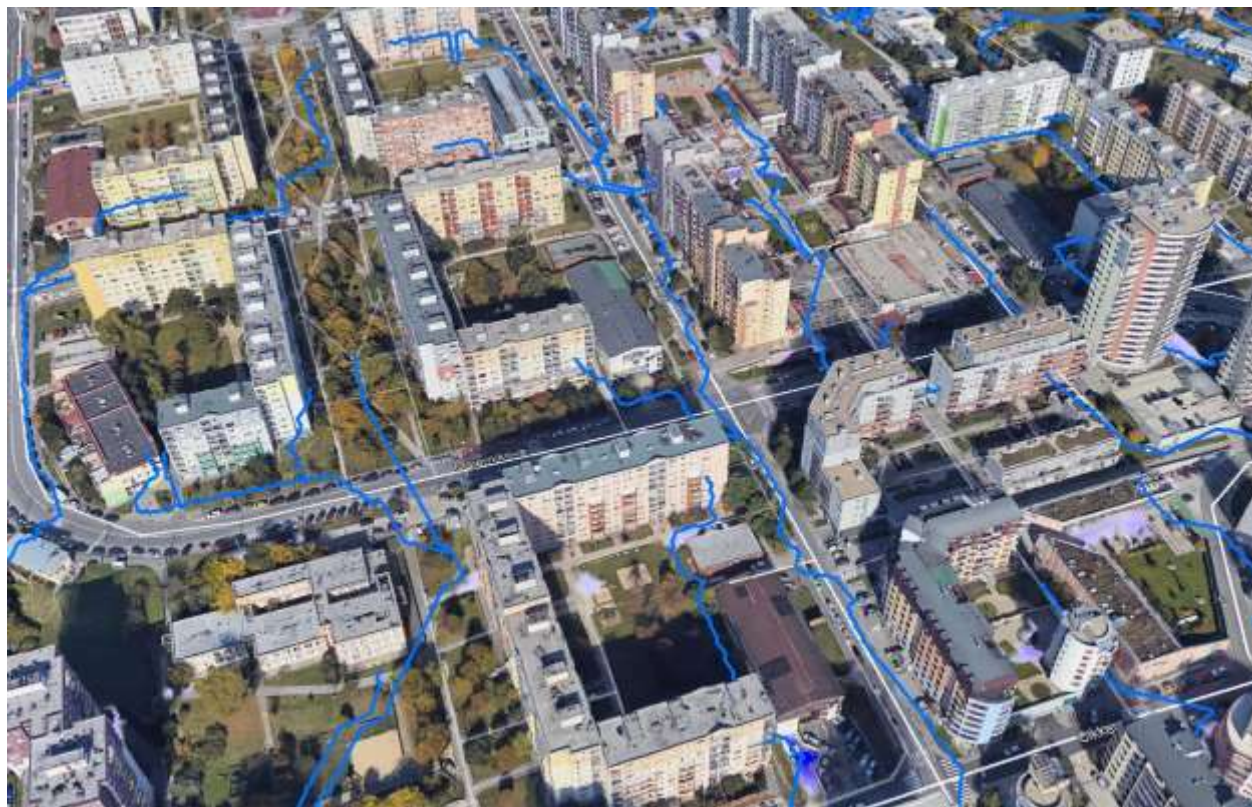
Tieto parametre vznikli nasledujúcou logikou:

Zámerom tejto štúdie bolo priniesť informáciu o odtoku zo sídliska pri silnej búrke, akú možno reálne očakávať v najbližších rokoch. Základom bol údaj reálne zaznamenaného dažďa 6. júna 2018 na zrážkomernej stanici SHMÚ v Bratislave na Kolibe (v približne rovnakej nadmorskej výške ako má sídlisko Dlhé diely), keď počas 30 minút spadlo 27 mm zrážok. Tento polhodinový úhrn bol zvýšený

o 15 % ako zohľadnenie očakávaného vplyvu klimatickej zmeny v budúcnosti.  $27 \text{ mm} \times 1,15 = 31 \text{ mm}$ . Doba trvania dažďa 30 minút bola zvolená na základe výsledkov testovacích modelových výpočtov.

### 5.2 Trasy povrchového odtoku

Trasy povrchového odtoku sme zistili pomocou nástroja DHI Flood Screener podľa metodiky popísanej v kapitole 4.2. Zistené odtokové trasy sú znázornené v *Prílohe 1*. Zistené odtokové trasy nie sú viazané na modelovaný dažďový scenár, ale sú relevantné aj pre prípadné extrémnejšie dažde.



Obr. 8 Znáznornenie odtokových trás na v časti sídliska, lokalita ulíc Pribišova a Matejkova



*Obr. 9 Znáznornenie odtokových trás na v časti sídliska, údolie Dlhé diely 1*



*Obr. 10 Znáznornenie odtokových trás na v časti sídliska, lokalita ulíc Veternicova, Majerníkova, Nad Lúčkami*

### 5.3 Rozsah zaplavenia terénu a hĺbka odtekajúcej vody

Rozsah zaplavenia terénu a hĺbku odtekajúcej vody pri pluvialnej povodni v modelovanom území sme zistili pomocou 2D hydrodynamického modelu, popísaného v kapitole 4.3.

Z výsledkov modelových simulácií vyplýva, že pri daždi približne rovnomernej intenzity bude maximálny odtok zo sídliska dosiahnutý v čase 30 až 40 minút od začiatku dažďa. Trasy odtoku sledujú údolnice, zníženia terénu a trasy ulíc a sú výrazne ovplyvňované polohou budov. Pri modelovom daždi s úhrnom 31 mm a trvaním 30 minút, zistená hĺbka vody odtekajúcej po povrchu predstavuje na väčšine modelovaného územia do 5 cm, na miestach s výrazne koncentrovaným odtokom do 20 cm. Identifikované boli bezodtokové miesta, spravidla pri budovách, kde môže hĺbka vody miestne a dočasne prekročiť aj 40 cm. Smery odtoku zistené 2D hydrodynamickým modelom MIKE 21 FM a pomocou nástroja Flood Screener sa veľmi dobre zhodujú.

Mapa znázorňujúca maximálnu hĺbku vody pri modelovanom dažďovom scenári je uvedená v prílohách *Príloha 2* a *Príloha 3*.

## **6 Výstupy a ich formáty**

V súlade so zmluvou boli objednávateľovi dodané nasledujúce výstupy:

- Odtokové trasy z riešeného územia vo forme línií, formát .SHP pre spracovanie v GIS a formát .KMZ pre aplikáciu Google Earth
- Polygón rozsahu zaplaveného územia a maximálnej hĺbky vody ako vrstva pre spracovanie v GIS, formát .SHP
- Mapa maximálnej hĺbky vody v riešenom území pri scenári modelového dažďa vo formáte .jpg
- Technická správa vo formáte .doc

## **7 Záver**

Pomocou matematického modelovania zrážkovo-odtokového procesu sme zistili mieru zraniteľnosti sídliska Dlhé diely v MČ Karlova Ves v dôsledku pluvialnej povodne z intenzívneho dažďa. Pri

modelovaní sme vychádzali z reálnej topografie územia a pozície budov. Na základe simulácie intenzívneho dažďa sme zistili smery a trasy koncentrovaného odtoku, ktoré sme znázornili na mape. Vytvorili sme tiež mapu znázorňujúcu mieru povodňového ohrozenia vo forme maximálnej hĺbky vody v riešenom území.

Z výsledkov modelových simulácií vyplýva, že pri intenzívnom daždi približne rovnomernej intenzity bude maximálny odtok zo sídliska dosiahnutý v čase 30 až 40 minút od začiatku dažďa. Trasy odtoku sledujú údolnice, zníženia terénu a trasy ulíc a sú výrazne ovplyvňované polohou budov. Zistená hĺbka vody odtekajúcej po povrchu v dôsledku modelového intenzívneho dažďa predstavuje na väčšine modelovaného územia do 5 cm, na miestach s výrazne koncentrovaným odtokom do 20 cm. Identifikované boli bezodtokové miesta, spravidla pri budovách, kde môže hĺbka vody miestne a dočasne prekročiť aj 40 cm. Výsledky tejto štúdie budú podkladom pre ďalšie riešenie a manažment odtoku dažďových vôd v MČ Karlova Ves.

Zostavený matematický model odtoku bude archivovaný u zhotoviteľa, spoločnosti DHI SLOVAKIA, s.r.o., pre prípadné ďalšie použitie.

## 8 Literatúra

MIKE by DHI: MIKE 21 FLOW MODEL FM, Hydrodynamic Module, User Guide, 2017  
MIKE by DHI: MIKE 21 & MIKE3 FLOW MODEL FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation, 2017

## Príloha 1

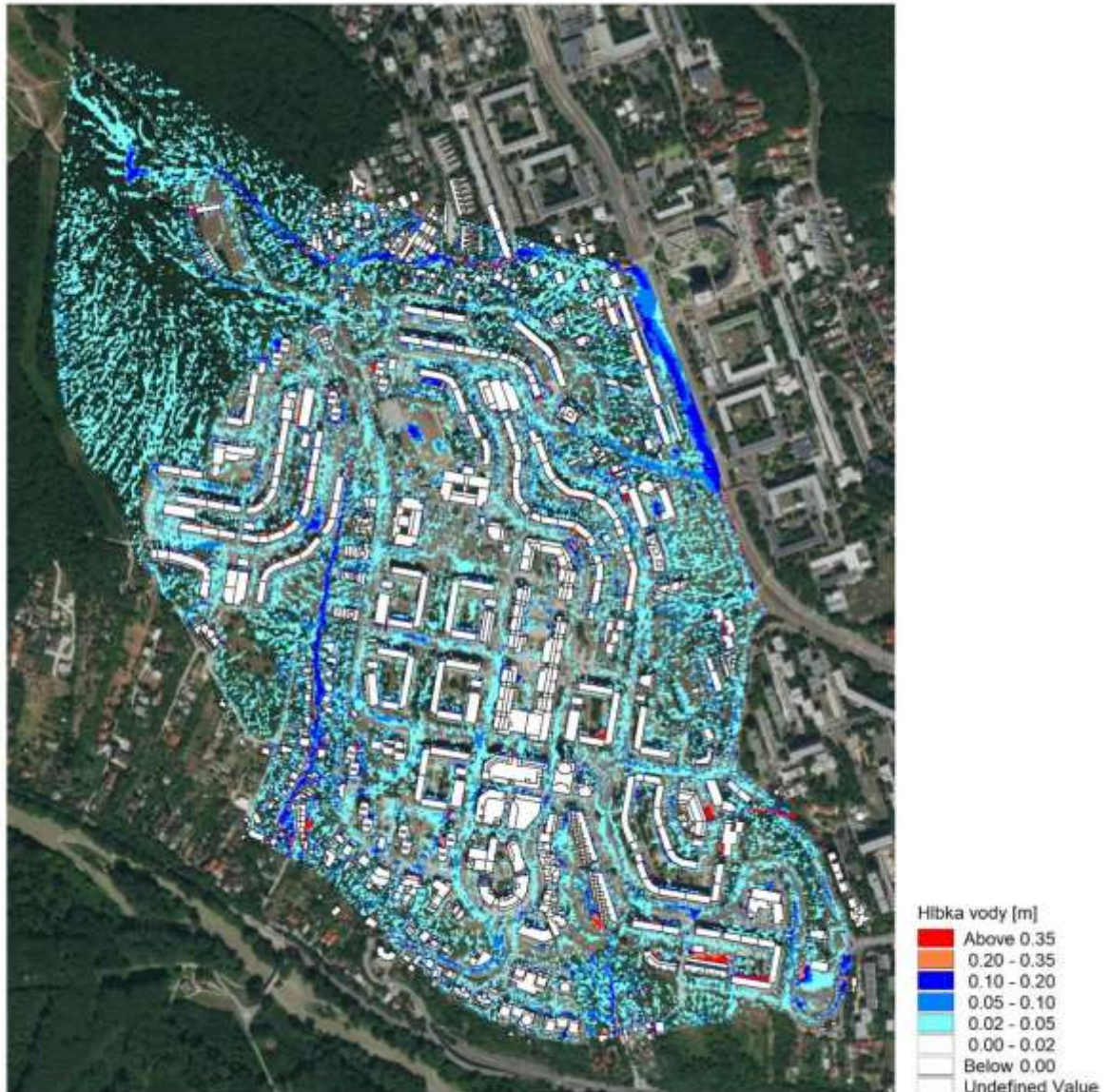
Znázornenie trás odtoku zo sídliska Dlhé diely pri intenzívnom daždi





## Príloha 2

Znázornenie maximálnej hĺbky odtekajúcej vody zo sídliska Dlhé diely pri intenzívnom daždi s úhrnom 31 mm a s trvaním 30 minút, na podklade ortofotomapy



### Príloha 3

Znázornenie maximálnej hĺbky odtekajúcej vody zo sídliska Dlhé diely pri intenzívnom daždi s úhrnom 31 mm a s trvaním 30 minút, na podklade open street mapy

