VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta stavební
Ústav vodních staveb
Laboratoř vodohospodářského výzkumu

E. Hydrotechnické výpočty

PROVĚŘENÍ NÁVRHU PROTIPOVODŇOVÝCH OPATŘENÍ MĚSTA BRNA V LOKALITĚ SOKOLOVA – VOMÁČKOVA 2D NUMERICKÝM MODELEM

Závěrečná zpráva

Brno, říjen 2017

Obsah

1. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE 2

2. ÚVOD 3

3. PODKLADY 6

4. POSUZOVANÉ STAVY 7

4.1. TVAR TERÉNU 7
4.2. HYDROLOGIE 7

5. NUMERICKÝ MODEL 8

5.1. TEORIE A POUŽITÝ SOFTWARE 8
5.2. ROZSAH MODELU 9
5.3. ZHOTOVENÍ MODELU 9
5.3.1. Tvar terénu zájmové oblasti 9
5.3.2. Drsnost povrchu oblasti 12
5.3.3. Výpočtová síť 13
5.3.4. Podmínky jednoznačnosti 15
5.3.5. Výpočet 15
5.4. KALIBRACE MODELU 15
5.5. SIMULACE POŽADOVANÝCH STAVŮ 16

6. VYHODNOCENÍ 18

6.1. STÁVAJÍCÍ STAV 18
6.1.1. Průtok Q_{50} 18
6.1.2. Průtok Q_{100} 18
6.1.3. Průtok $Q_{100\ neovlivněný}$ 18
6.2. NAVRHOVANÝ STAV 28
6.2.1. Průtok Q_{50} 28
6.2.1. Průtok Q_{50} s mobilními protipovodňovými hrazeními 28
6.2.2. Průtok Q_{100} 28
6.2.3. Průtok $Q_{100\ neovlivněný}$ 28

7. POROVNÁNÍ STAVŮ 41

7.1. ZMĚNA ÚROVNĚ HLADINY PŘI NS 41
7.2. ZMĚNA OBJEMU VODY V ZÁJMOVÉ OBLASTI 45

8. ZÁVĚR 46

9. LITERATURA 47

10. SEZNAMY 48

10.1. SEZNAM VELIČIN 48
10.2. SEZNAM ZKRATEK 49
10.3. SEZNAM OBRÁZKŮ 49
10.4. SEZNAM TABULEK 50

1. Identifikační údaje

Název zprávy:	Prověření návrhu protipovodňových opatření města Brna v lokalitě Sokolova – Vomáčkova 2D numerickým modelem
Akce:	Studie návrhu realizace etapy protipovodňových opatření města Brna v lokalitě Sokolova-Vomáčkova
Objednatel:	AQUATIS a.s. Botanická 834/56 602 00 Brno Česká republika
IČ objednatele:	46347526
DIČ objednatele:	CZ46347526
Objednávka č.:	171247/6067
Kontaktní osoba:	Ing. Tomáš Roth
Zhotovitel:	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Ústav vodních staveb, Laboratoř vodohospodářského výzkumu Veveří 331/95, 602 00 Brno
IČ zhotovitele:	00216305
DIČ zhotovitele:	CZ00216305
Číslo smlouvy zhotovitele:	HS12760009L
Řešitel:	doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
Termín zahájení úkolu:	7. 9. 2017
Termín ukončení úkolu:	16. 10. 2017

Stručný přehled provedené práce:

Byl vytvořen dvourozměrný (2D) numerický model simulující ustálené proudění při průtoku Q_{50}, Q_{100} a $Q_{100\ \mathrm{neovlivněný}}$ (neovlivněný vodním dílem Brno) v úseku Svratky od železničního mostu Přerovské trati po pravostranný přítok Leskavy bez uvažování přetoku ze Svitavy za těchto variant:

- stávající stav,
- navrhovaný stav protipovodňových opatření v lokalitě Sokolova-Vomáčkova.

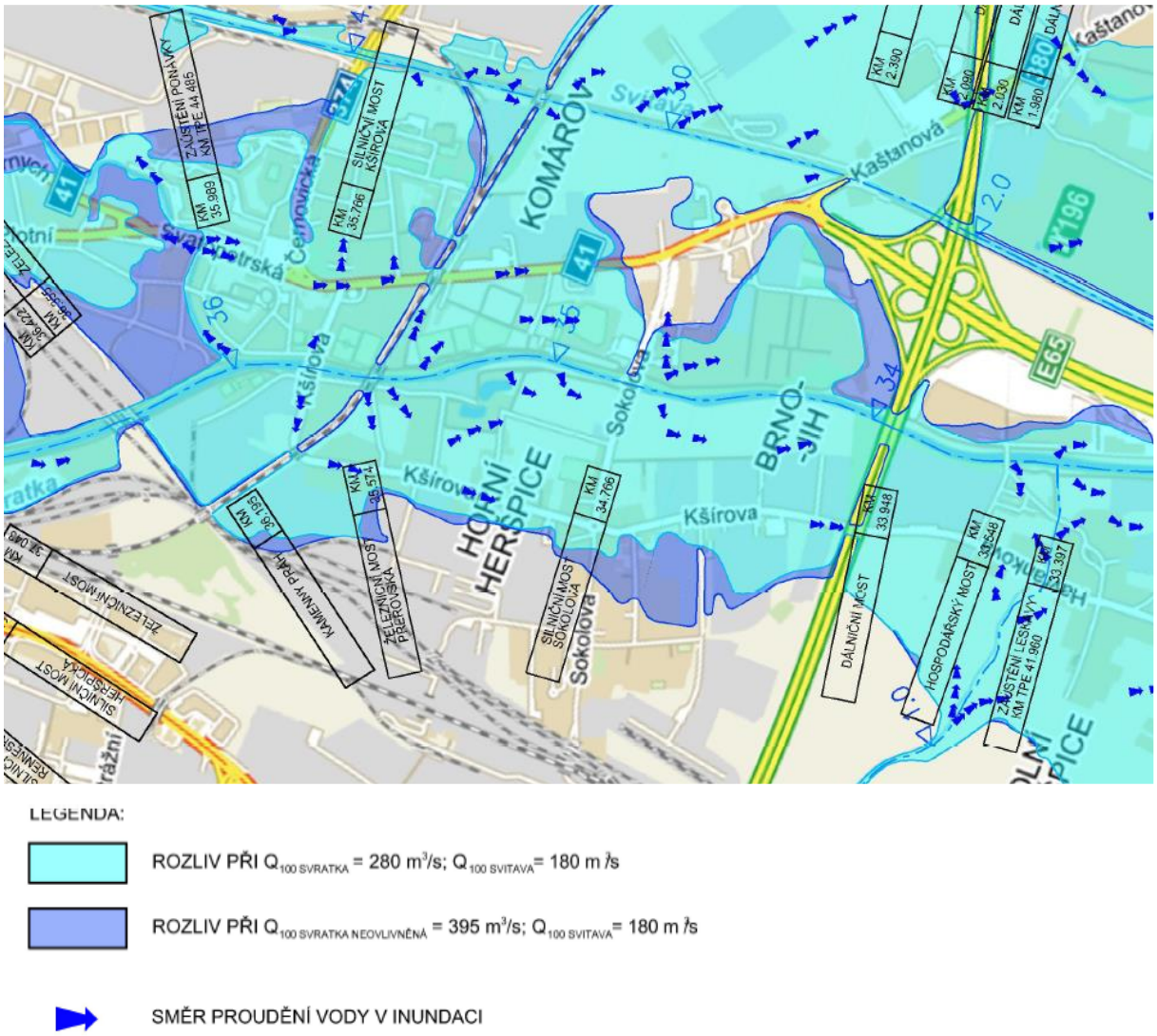
Výsledkem simulací bylo stanovení úrovně hladiny, svislicových rychlostí a hloubky vody pro všechny výše uvedené stavy a průtoky v celé řešené oblasti a stanovení objemu vody v úseku Sokolova-Vomáčkova (zájmové území). Z těchto výsledků byly stanoveny mapy rozdílů úrovní hladin v celé řešené oblasti a změny objemů vody v úseku Sokolova-Vomáčkova za navrhovaného stavu oproti stávajícímu stavu.

2. Úvod

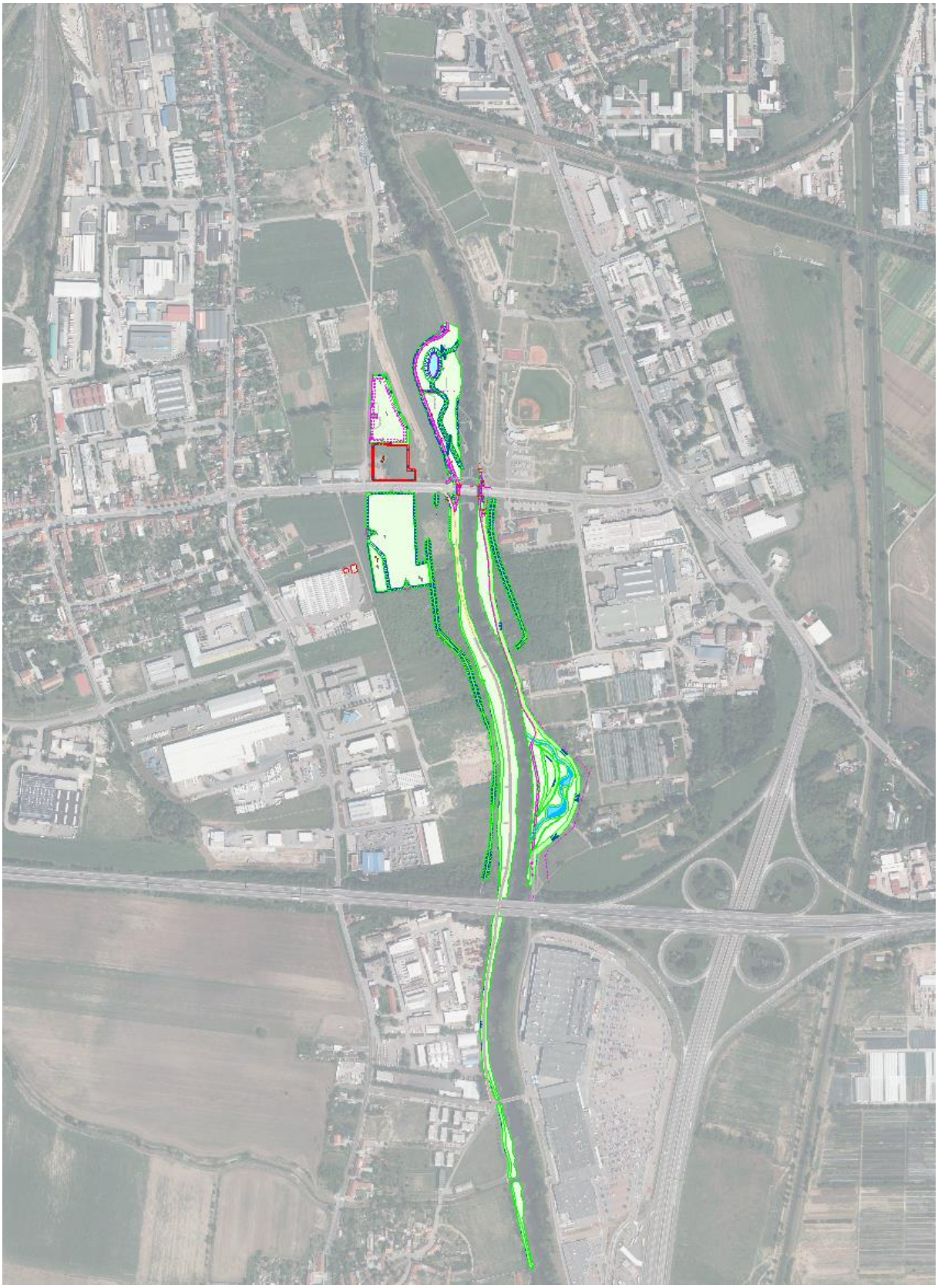
Předmětem prací je prověření návrhu protipovodňových opatření města Brna v lokalitě Sokolova-Vomáčkova dvourozměrným (2D) numerickým modelem za průtoků ve Svratce Q_{50}, Q_{100} a $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$.

Současný stav (SS) rozlivů popisuje Obr. 1. Rozlivy byly stanoveny na základě výpočtů jednorozměrným (1D) síťovým modelem provedeným Povodím Moravy, s.p. Při posuzovaných průtocích se voda v zájmovém území rozlévá do širokého inundačního území. Hlavními překážkami v proudění jsou příčné liniové stavby (násypy silnic, dálnice, železnice) s mosty a zástavba.

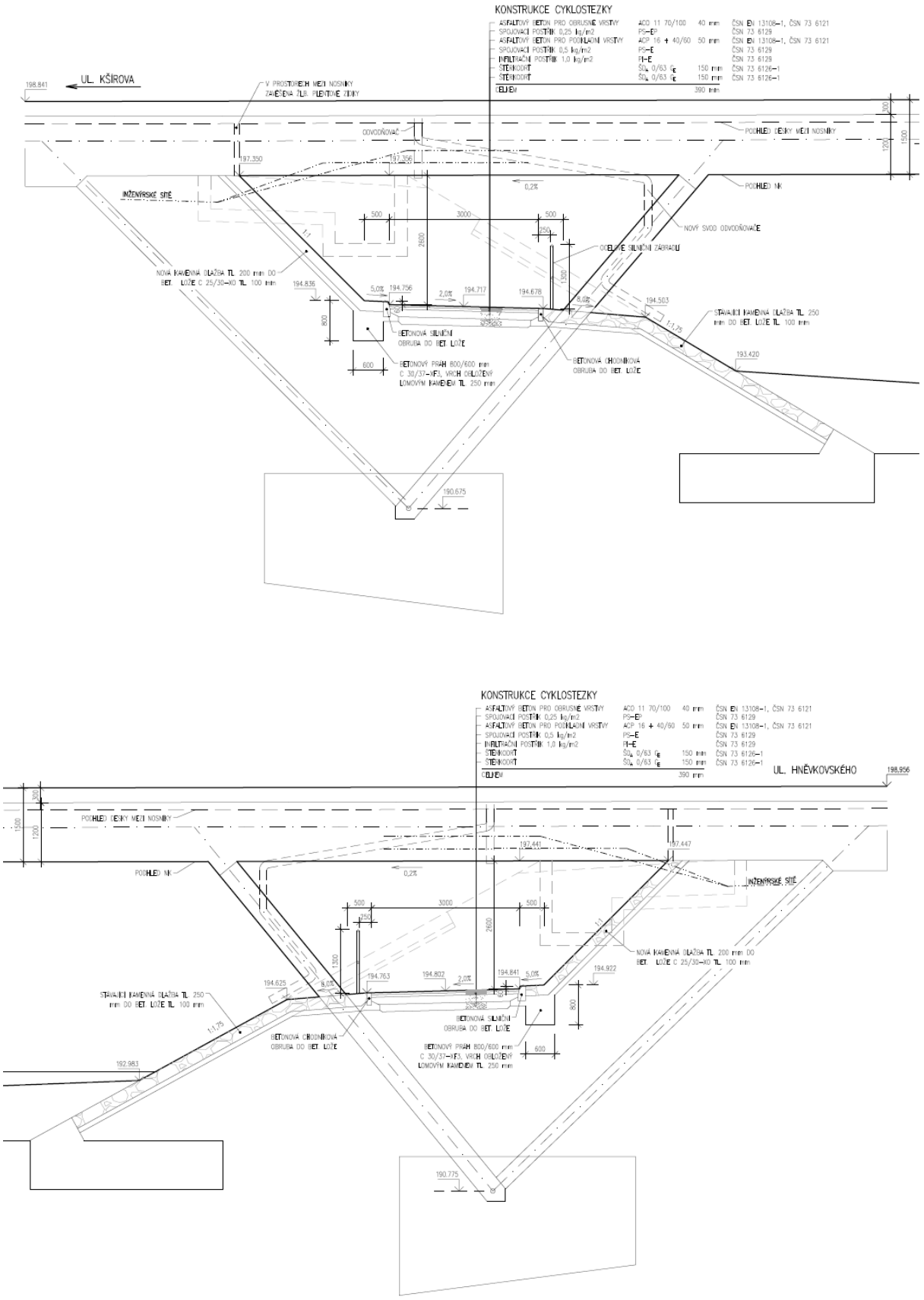
Navrhovaný stav (NS) vystihuje digitální model terénu zobrazený na Obr. 2. Navrhované úpravy mostního profilu při NS jsou na Obr. 3.



Obr. 1 Stávající rozliv (B_PPO_BRNO_1et_PREHLED_Q100_a_Q100_neovl.pdf)



Obr. 2 Navrhované úpravy (SOK-VOM_SIT.dwg)



Obr. 3 Úpravy mostního profilu (PŘÍČNÝ_ŘEZ_POD_MOSTEM.pdf)

3. Podklady

Podkladová data předaná objednatelem:

- Výkresy:
  - Digitální model terénu SS: ACAD-model_stavajici.dwg.
  - Digitální model terénu NS: Sokol_Vomack_model_11_9_2017.dwg.
  - Mapa rozlivů: B_PPO_BRNO_1et_PREHLED_Q100_a_Q100_neovl.pdf.
  - Klad ortofotomap: klad_orto_2.dwg.
  - Katastrální mapa: XREF_Svitava_Svratka_jih.dwg.
  - Podélný profil Svratky: 1PD_SVR.dxf, 2PD_SVR.dxf.
  - Podélný řez mostem Sokolova: PODÉLNÝ_ŘEZ_MOSTEM_Acad 2010.dwg.
  - Podélný řez mostem Sokolova: PŘÍČNÝ_ŘEZ_POD_MOSTEM.pdf.
  - Situace s úpravami: SOK-VOM_SIT.dwg.
  - Situace SS: SITUACE Acad 2010.dwg.
- Tabulková data:
  - Hydrologická data: CHMU_2015_04_15.pdf.
  - Horní okrajové podmínky: Okrajové podmínky_Vomáčkova.docx.
- Rastrová data:
  - Ortofotomapa: Brno 81_wmsORTO.jpg.
  - Ortofotomapa: Brno 82_wmsORTO.jpg.
  - Ortofotomapa: Brno 91_wmsORTO.jpg.
  - Ortofotomapa: Brno 92_wmsORTO.jpg.

Poznámka: V celé práci je použit jednotný výškový systém baltský – po vyrovnání (Bpv).

4. Posuzované stavy

4.1. Tvar terénu

Pro prověření návrhu byly vytvořeny dva tvary terénu SS (ACAD-model_stavajici.dwg), NS (Sokol_Vomack_model_11_9_2017.dwg), při kterých byly provedeny výpočty proudění.

4.2. Hydrologie

Vybraná hydrologická data Svratky v dané lokalitě uvádí Tab. 1.

Tab. 1 Hydrologická data Svratky (CHMU_2015_04_15.pdf)

Profil	Číslo hydrologického pořadí	Q_{50}	Q_{100}	$Q_{100\ neovlivněný}$
Pod Leskavou	4-15-01-1590	257,2 m^3/s	308 m^3/s	
Pod VD Brno	4-15-01-1470	235,9 m^3/s	280 m^3/s	395 m^3/s

N-leté průtoky Leskavy v profilu nad Svratkou (č. h. p. 4-15-01-1580) uvádí Tab. 2.

Tab. 2 N-leté průtoky Leskavy v profilu nad Svratkou (CHMU_2015_04_15.pdf)

N	1	2	5	10	20	50	100
Q_N	2,1 m^3/s	3,0 m^3/s	5,4 m^3/s	8,4 m^3/s	12,9 m^3/s	21,6 m^3/s	31,0 m^3/s

Průtoky použité v modelu vycházejí ze studie Prověření ovlivnění průtoků povodně při realizaci prvních etap protipovodňové ochrany (AQUATIS a.s., Povodí Moravy, s. p., 2016) a jsou specifikovány objednatelem (Okrajové podmínky_Vomáčkova.docx). Měrná křivka v profilu km 33,00 Svratky byla stanovena z hodnot vypočítaných interpolací po délce toku z úrovní hladin v profilech 123 a 310 z 1D síťového modelu zhotoveného Povodím Moravy, s.p. (1PD_SVR.dxf). Z měrné křivky byly odečteny úrovně hladiny pro daný průtok. Posuzované stavy popisuje Tab. 3.

Tab. 3 Posuzované stavy s průtokovými a hladinovými poměry

Stav	Průtok Svratka	Průtok Leskava	Úroveň hladiny v km 33,00
SS	Q_{50} = 233 m^3/s	Q = 21,6 m^3/s	Z_h = 195,40 m n. m.
	Q_{100} = 274 m^3/s	Q = 31 m^3/s	Z_h = 195,54 m n. m.
	$Q_{100\ neovlivněný}$ = 372,5 m^3/s	Q = 31 m^3/s	Z_h = 195,76 m n. m.
NS	Q_{50} = 233 m^3/s	Q = 21,6 m^3/s	Z_h = 195,40 m n. m.
	Q_{100} = 281 m^3/s	Q = 31 m^3/s	Z_h = 195,56 m n. m.
	$Q_{100\ neovlivněný}$ = 397,5 m^3/s	Q = 31 m^3/s	Z_h = 195,80 m n. m.

5. Numerický model

S ohledem na plošný charakter proudění v dané oblasti byl zvolen 2D numerický model, který dokáže dostatečně věrohodně simulovat proudění v dané oblasti a vyhodnotit proudění při všech posuzovaných stavech.

5.1. Teorie a použitý software

Pro řešení byl vybrán software Surface-water Modeling System (SMS) vzhledem k propracovanosti jeho uživatelského prostředí (umožňuje dodatečné výpočty plošných dat) a vzhledem k vhodnému výpočtovému programu.

Jedná se o prostředí, které umožňuje vytvářet vstupní soubory dat pro výpočtové programy. SMS je modulární software, který umožňuje zpracovávat a vyhodnocovat prakticky libovolná plošná a některá prostorová data. Umožňuje pracovat s rastrovými i vektorovými daty.

Z výpočtových 2D programů softwaru SMS byl vybrán Finite Element Surface-water Modeling System (FESWMS) a to z důvodu metody řešení – metoda konečných prvků, která umožňuje libovolné zhuštění sítě při použití trojúhelníkových i čtyřúhelníkových prvků, což v dané lokalitě umožňuje precizně vystihnout geometrii povrchu a tak i proudění. Program umožňuje do 2D sítě vkládat 1D prvky, které mohou představovat hydrotechnické objekty. 1D prvky nebyly použity, všechny objekty byly řešeny 2D.

Možnosti programu FESWMS jsou poměrně široké, mnohé z nich nebyly využity, proto jsou níže uvedeny upravené rovnice, které vyjadřují pouze řešený případ proudění.

Softwarový prostředek využívá pro řešení 2D proudění v ortogonálním souřadném systému *x*, *y* rovnici spojitosti

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \tag{5.1}$$

kde q je specifický průtok.

Dále používá dvě pohybové rovnice (rovnice mělkého proudění)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q_x^{\,2}}{h} + \frac{gh^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q_x q_y}{h}\right) + \frac{1}{\rho}\left[\tau_{dx} - \frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y}\right] = 0, \tag{5.2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q_x q_y}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q_y^{\,2}}{h} + \frac{gh^2}{2}\right) + \frac{1}{\rho}\left[\tau_{dy} - \frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} - \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y}\right] = 0, \tag{5.3}$$

kde h je hloubka, ρ je hustota a g je tíhové zrychlení.

Složky smykového napětí na dně jsou určeny rovnicemi

$$\tau_{dx} = \rho \frac{gn^2}{h^{1/3}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_d}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_d}{\partial y}\right)^2} \, \frac{q_x \sqrt{q_x^{\,2} + q_y^{\,2}}}{h^2}, \tag{5.4}$$

$$\tau_{dy} = \rho \frac{gn^2}{h^{1/3}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_d}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_d}{\partial y}\right)^2} \, \frac{q_y \sqrt{q_x^{\,2} + q_y^{\,2}}}{h^2}, \tag{5.5}$$

kde n je součinitel drsnosti a Z_d je úroveň dna.

Složky smykového napětí v kapalině se stanoví za předpokladu izotropní turbulence zavedením turbulentní viskozity υ_t

$$\tau_{xx} = \rho\upsilon_t\left(2\frac{\partial v_x}{\partial x}\right), \tag{5.6}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \rho\upsilon_t\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}\right), \tag{5.7}$$

$$\tau_{yy} = \rho\upsilon_t\left(2\frac{\partial v_y}{\partial x}\right), \tag{5.8}$$

kde turbulentní viskozita je určena rovnicí skládající se ze tří algebraických modelů turbulence (jednotlivé členy v rovnici)

$$\upsilon_t = \upsilon_{t0} + c_1 v_* h + c_2 |J| \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}\right)^2}, \tag{5.9}$$

kde každý model turbulence vyjadřuje jinou příčinu vzniku viskozity (molekulární, vertikální tření, horizontální tření). V rovnici (5.9) jsou c příslušné součinitele, u_* je třecí rychlost a J je Jakobián prvku.

5.2. Rozsah modelu

Podélný rozsah modelu byl volen tak, aby v profilu železniční trati Přerovská a v profilu přítoku Leskavy došlo k správnému rozdělení průtoku mostními objekty a územím. Tedy cca 500 m nad železničním mostem Přerovská a cca 400 m pod přítokem Leskavy.

S přetokem vody mezi inundačním územím Svratky a Svitavy nebylo uvažováno, jejich hranice (levostranný rozsah modelu) byla stanovena s ohledem na dřívější 2D výpočty proudění (Zachoval, 2015) do nejvyššího místa území, což přibližně reprezentuje ulice Hněvkovského. Rozsah pravostranného rozlivu z dřívějších výpočtů určoval pravostrannou hranici rozsahu modelu.

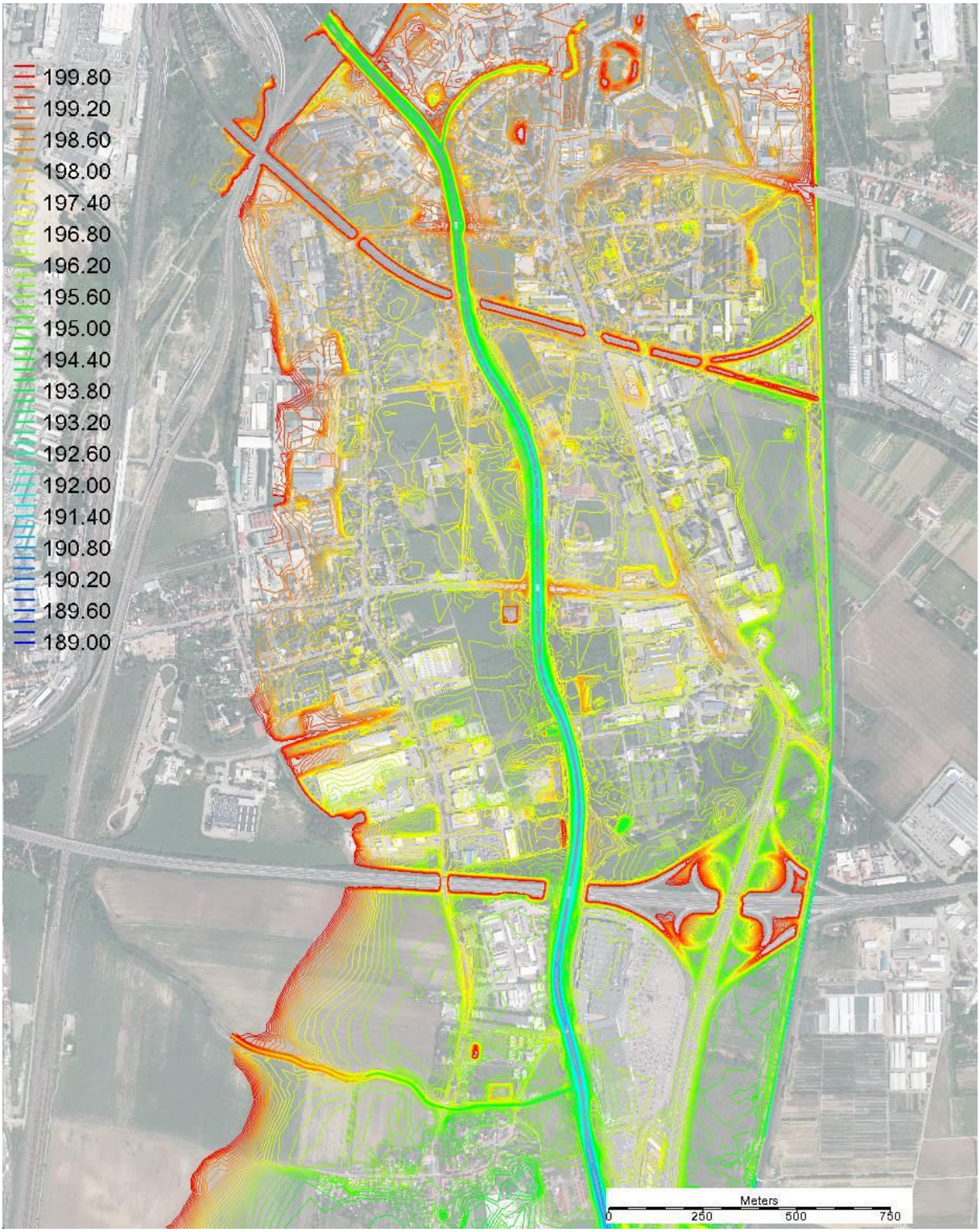
Výše uvedený rozsah modelu umožňuje vyhodnotit změny v proudění v rozsahu přibližně od železniční trati Přerovská až po přítok Leskavy (zájmové území), mimo uvedené území je nereprezentativní.

5.3. Zhotovení modelu

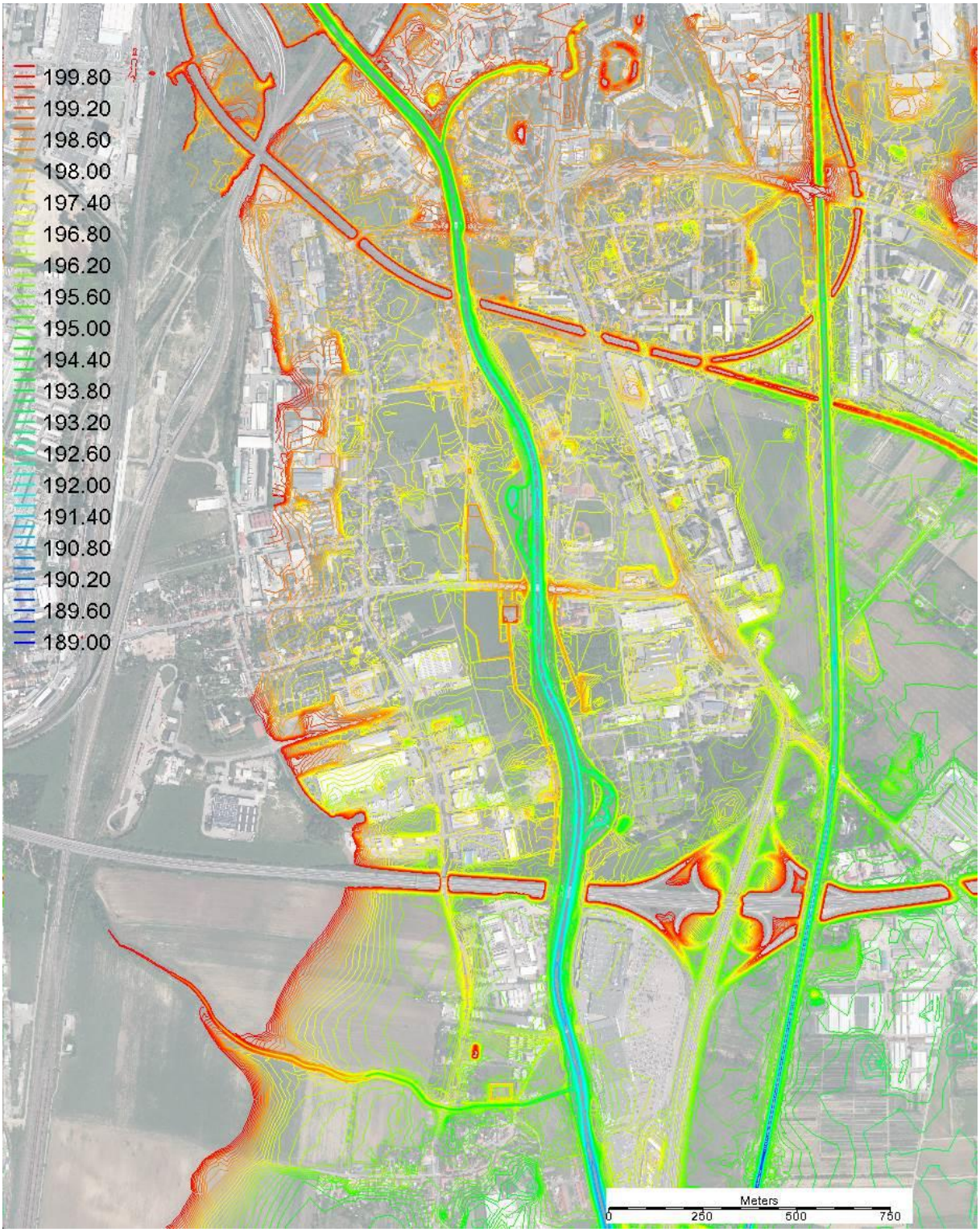
5.3.1. Tvar terénu zájmové oblasti

Tvar terénu zájmové oblasti byl vytvořen pro každý jeho řešený stav zvlášť.

V softwaru SMS byl načten digitální model terénu (DMT). DMT byl upraven tak, aby byly odstraněny chyby při transformaci. Dále byl zmenšen na rozsah předpokládaného rozlivu. Spojení bodů bylo upraveno tak, aby byly dodrženy povinné hrany ze zaměření. V místech, kde povinné hrany ze zaměření nebyly k dispozici, byl DMT upraven tak, aby tvar terénu co nejblíže odpovídal realitě. DMT byl v částech s mosty Kšírova a Havránkova upraven dle měření v ortofotomapě a s ohledem na jednotný sklon dolní křížené komunikace. Upravený tvar terénu při SS zobrazuje Obr. 4. Upravený tvar terénu při NS zobrazuje Obr. 5.



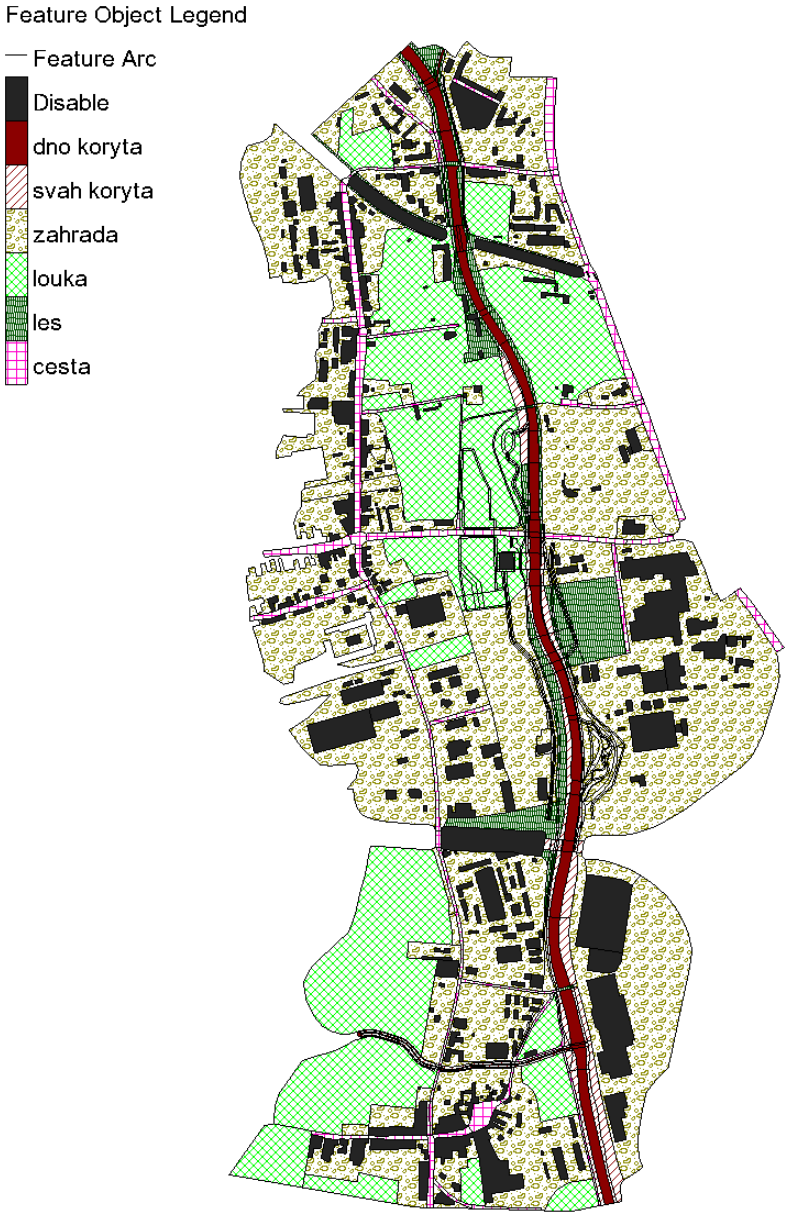
Obr. 4 SS terénu



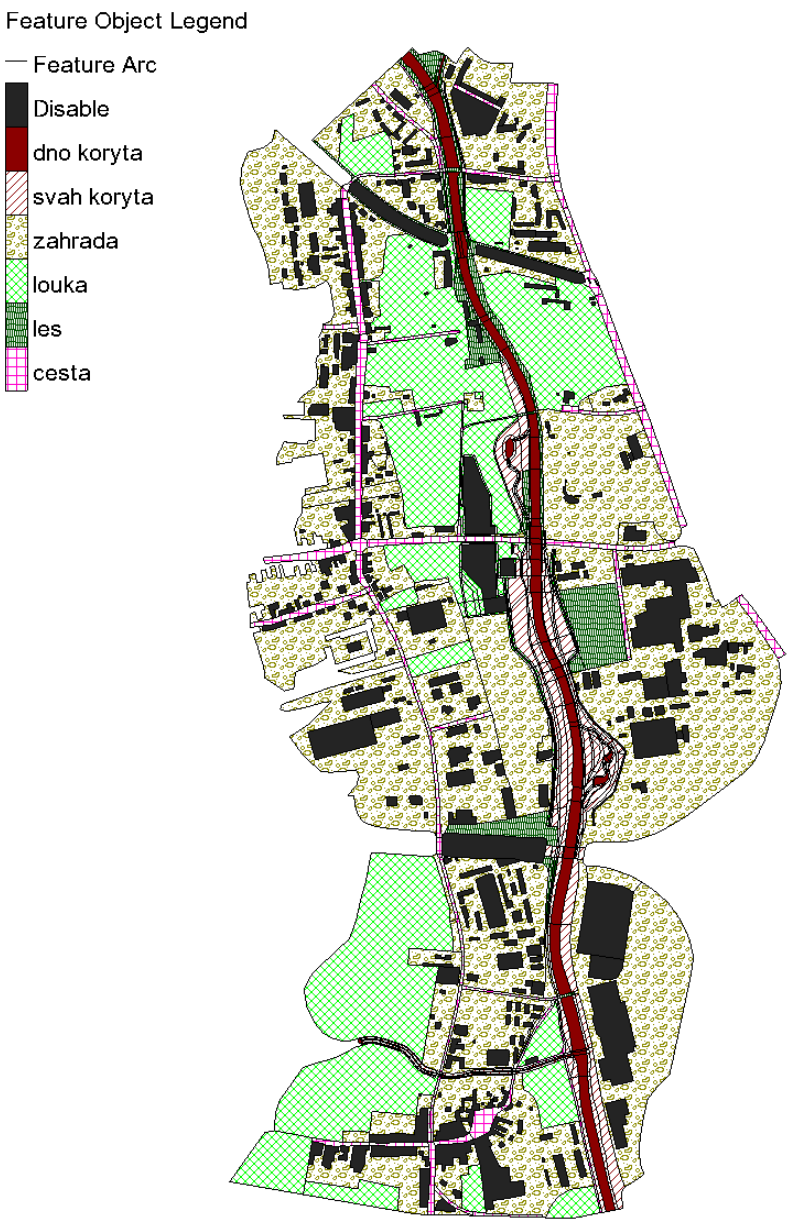
Obr. 5 NS terénu

5.3.2. Drsnost povrchu oblasti

Pro stanovení hranic s různou drsností povrchu byla použita katastrální mapa. Hranice budov a pozemků byly načteny do Mapového modulu, upraveny (uzavření, odstranění zdvojených čar a bodů) a převedeny na polygonovou mapu složenou z jednotlivých ploch polygonů. Ke specifikaci hranic s různou drsností povrchu sloužily rovněž ortofotomapy, které byly po georeferencování načteny do GIS modulu. Neprůtočné plochy byly označeny za neprůtočné nebo průtočné dle aktuálního stavu. Ostatní plochy byly označeny za průtočné se specifikací typu drsnosti povrchu. Specifikace typu drsnosti povrchu pro SS je uvedena na Obr. 6, pro NS je na Obr. 7.



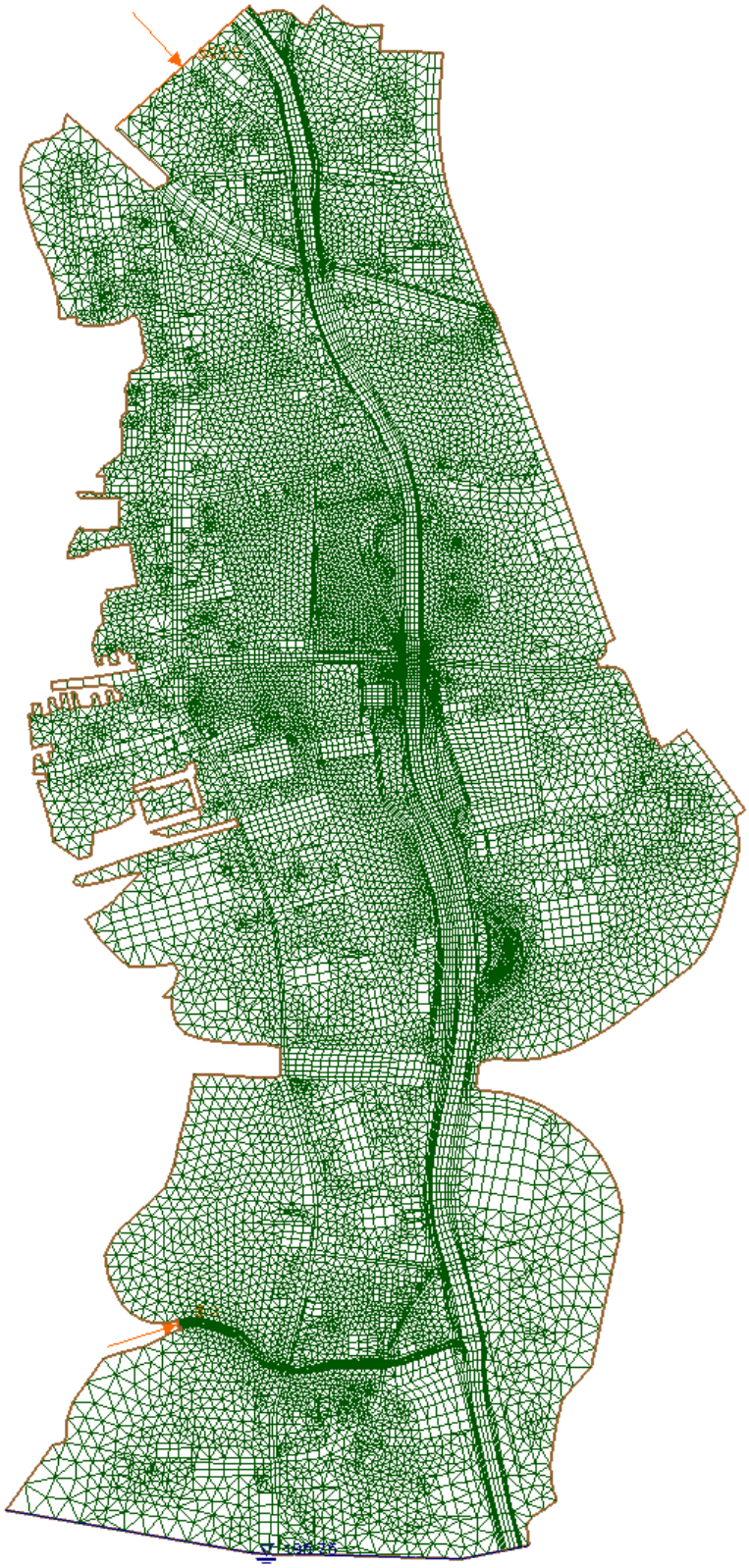
Obr. 6 Specifikace typu drsnosti povrchu při SS



Obr. 7 Specifikace typu drsnosti povrchu při NS

5.3.3. Výpočtová síť

Hranám polygonů bylo přiřazeno dělení a polygonům typ sítě a její parametry. Pro koryto toku a objekty byla přednostně zvolena strukturovaná síť, v ostatních případech byla použita síť nestrukturovaná. Hustota sítě byla volena s ohledem na očekávané gradienty veličin (úroveň hladiny a svislicová rychlost). Síť byla upravována tak, aby se v ní vyskytovalo minimum výpočtově nevhodných prvků. Z důvodu přímého porovnání bylo nutné použít jednotnou síť pro všechny stavy (SS, NS), proto byl její tvar uzpůsoben tak, aby bylo možné popsat změnu stavu změnou vlastností prvků. Pokud by uvedené nebylo provedeno, bylo by nutné použít interpolaci, která by mohla do výsledků vnést nezanedbatelnou chybu.
Vygenerovaná síť měla 27 755 trojúhelníkových a čtyřúhelníkových kvadratických prvků. Výpočtová síť je vyobrazena na Obr. 8.



Obr. 8 Výpočtová síť

5.3.4. Podmínky jednoznačnosti

Horní okrajové podmínky (HOP) byly zadávány na hranicích přítoků vody ze Svratky a z Leskavy do výpočtové oblasti (Obr. 8) v podobě průtoků (Tab. 3). Dolní okrajová podmínka (DOP) byla zadávána na hranici odtoku vody z výpočtové oblasti (Obr. 8) v podobě úrovně hladiny (Tab. 3).

Počáteční podmínka byla volena tak, aby všechny prvky byly zatopeny (úroveň hladiny byla výše než nejvýše položený bod výpočtové oblasti) a rychlost proudění byla nulová.

5.3.5. Výpočet

V zadání parametrů výpočtu byl specifikován způsob výpočtu, vlastnosti hranic, vstupní soubory dat, konvergenční kritéria, výstupní soubory dat, zavodnění prvků atd. Výpočet byl prováděn postupným snižováním úrovně hladiny v místě DOP až na požadovanou úroveň, důvodem byla změna mokrých elementů za suché, při které dochází ke změně charakteru proudění, které může způsobovat oscilaci a divergenci výpočtu. Postupným snižováním hladiny se uvedený vliv minimalizuje. Výpočet byl ukončen po splnění konvergenčního kritéria (změna polohy hladiny ve vybraných místech oblasti je menší než 0,001 m).

5.4. Kalibrace modelu

Kalibrace modelu měla za úkol nastavit na modelu takové součinitele drsnosti a součinitele turbulentního modelu, aby proudění na modelu odpovídalo co nejpřiléhavěji úrovni hladiny stanovené 1D síťovým modelem (1PD_SVR.dxf, 2PD_SVR.dxf). Kalibrační stav prakticky odpovídá SS. Drsnosti byly měněny v závislosti na hloubce (h_1 a h_2) (Tab. 4). Pro kalibraci bylo použito sedm profilů na řece Svratce. Dosažené hodnoty pro Q_{50} zobrazuje Tab. 6, pro Q_{100} Tab. 7 a pro $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ Tab. 8. Zvýšený důraz byl kladen na úroveň hladiny protiproudně nad mosty při větších průtocích. Rozdíly lze považovat z hlediska věcné přesnosti a vzhledem k jiné dimenzi modelu za vyhovující.

Tab. 4 Součinitel drsnosti povrchu

Typ povrchu (označení typu povrchu)	n_1	n_2	h_1 [m]	h_2 [m]
Cesta, silnice, dálnice (cesta)	0,040	0,030	0,3	0,5
Dno koryta toku (dno koryta)	0,039	0,039	1,0	2,0
Travnaté svahy koryt toků (svah koryta)	0,12	0,08	0,3	0,6
Zahrada, průmyslový areál (zahrada)	0,14	0,07	0,5	1,0
Zatravněné plochy, pole (louka)	0,12	0,06	0,3	0,6
Les (les)	0,12	0,10	1,0	2,0

Tab. 5 Použité průtoky při kalibraci

Označení průtoku Svratkou	Přítok Svratkou [m^3/s]	Přítok Leskavou [m^3/s]	Úroveň hladiny v km 33,00 [m n. m.]
Q_{50}	233	4	195,35
Q_{100}	280	5	195,49
$Q_{100\ \text{neovlivněný}}$	395	5	195,75

Tab. 6 Rozdíly vypočítané úrovně hladiny od požadované při Q_{50}

Profil	Vypočítaná Z_h [m n. m.]	Požadovaná Z_h [m n. m.]	Rozdíl ΔZ_h [m]
Nad železničním mostem Přerovská	198,14	198,06	0,08
Pod železničním mostem Přerovská	198,05	198,03	0,02
Nad silničním mostem Sokolova	197,30	197,33	-0,03
Pod silničním mostem Sokolova	197,27	197,30	-0,03
Nad dálničním mostem D1	196,53	196,62	-0,09
Pod dálničním mostem D1	196,45	196,57	-0,12
Přítok Leskavy	195,98	195,95	0,03

Tab. 7 Rozdíly vypočítané úrovně hladiny od požadované při Q_{100}

Profil	Vypočítaná Z_h [m n. m.]	Požadovaná Z_h [m n. m.]	Rozdíl ΔZ_h [m]
Nad železničním mostem Přerovská	198,40	198,30	0,10
Pod železničním mostem Přerovská	198,29	198,27	0,02
Nad silničním mostem Sokolova	197,63	197,59	0,04
Pod silničním mostem Sokolova	197,60	197,55	0,05
Nad dálničním mostem D1	196,82	196,89	-0,07
Pod dálničním mostem D1	196,69	196,82	-0,13
Přítok Leskavy	196,18	196,16	0,02

Tab. 8 Rozdíly vypočítané úrovně hladiny od požadované při $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$

Profil	Vypočítaná Z_h [m n. m.]	Požadovaná Z_h [m n. m.]	Rozdíl ΔZ_h [m]
Nad železničním mostem Přerovská	198,81	198,77	0,04
Pod železničním mostem Přerovská	198,66	198,72	-0,06
Nad silničním mostem Sokolova	198,09	198,05	0,04
Pod silničním mostem Sokolova	198,07	197,99	0,08
Nad dálničním mostem D1	197,38	197,36	0,02
Pod dálničním mostem D1	197,24	197,28	-0,04
Přítok Leskavy	196,56	196,48	0,08

5.5. Simulace požadovaných stavů

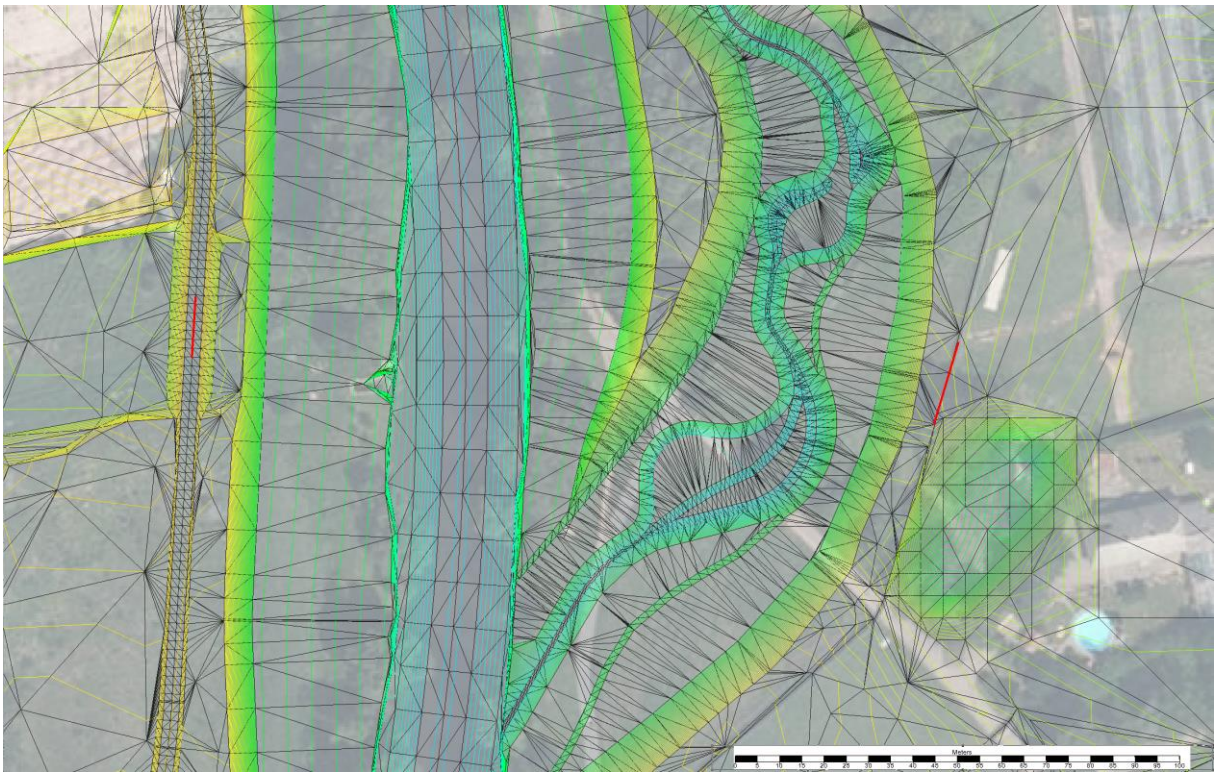
Simulovány byly stavy s průtokovými a hladinovými poměry popsanými v Tab. 3.

Při NS byl proveden výpočet dle geometrie dodané objednatelem. Výsledkem byl značný pokles úrovně hladiny v prostoru za hrázemi způsobený zkapacitněním koryta Svratky, zkapacitněním mostního profilu Sokolova a vedením hrází s navrženými otvory. Ukázalo se, že otvory v ohrazování je třeba umístit níže po toku, aby nedocházelo k významnému zmenšení objemu vody v zájmovém území. Hledala se taková varianta při průtocích Q_{100}

a $Q_{100\ neovlivněný}$, která bude mít minimální vliv na změnu úrovně hladiny. Cílem bylo výrazně nezhoršit odtokové poměry níže po toku. Požadavky na řešení byly dva. První, aby v zastavěných oblastech nedošlo ke zvýšení úrovně hladiny nad 0,05 m a druhý, aby došlo k minimální změně objemu vody v zájmovém území. Otvory byly proto postupně přemísťovány níže po toku do míst se sníženým terénem, aby se v inundačním území nevyskytovala bezodtoká místa a byla měněna jejich šířka, která dominantně ovlivňuje jejich kapacitu. Vyhodnocena byla pouze výsledná varianta, která splňovala výše uvedené požadavky.

Ve výsledné variantě jsou otvory hrází posunuty do pozice, kterou zobrazuje Obr. 9 (červené čáry). Šířka otvoru v pravobřežní hrázi je 14 m a v levobřežní zídce 20 m.

Při NS a Q_{50} bylo požadováno, aby byla provedena snadno proveditelná protipovodňová opatření, která by minimalizovala rozliv. Z uvedeného důvodu byly spolu s objednatelem vybrány profily, ve kterých se aplikovala mobilní protipovodňová hrazení (MPH). Jejich rozmístění dokumentuje Obr. 22.



Obr. 9 Otvory v hrázích (červené čáry)

6. Vyhodnocení

Vypočítány byly: hloubka vody *h*, svislicová rychlost *v* a úroveň hladiny Z_h pro každý stav uvedený v Tab. 3.

6.1. Stávající stav

6.1.1. Průtok Q_{50}

Hloubka vody *h* při SS a Q_{50} je na Obr. 10. Svislicová rychlost *v* při SS a Q_{50} je na Obr. 11. Úroveň hladiny Z_h při SS a Q_{50} je vyobrazena na Obr. 12.

Nad násypem železniční tratě Přerovská se voda rozlévá do levého i pravého inundačního území. V prostoru od železniční trati až po dálnici D1 se rovněž rozlévá do levého i pravého inundačního území. V levém inundačním území nepřepadá přes násep ulice Sokolova. Pod dálnicí se rozlévá pouze do průmyslového areálu v pravém inundačním území.

6.1.2. Průtok Q_{100}

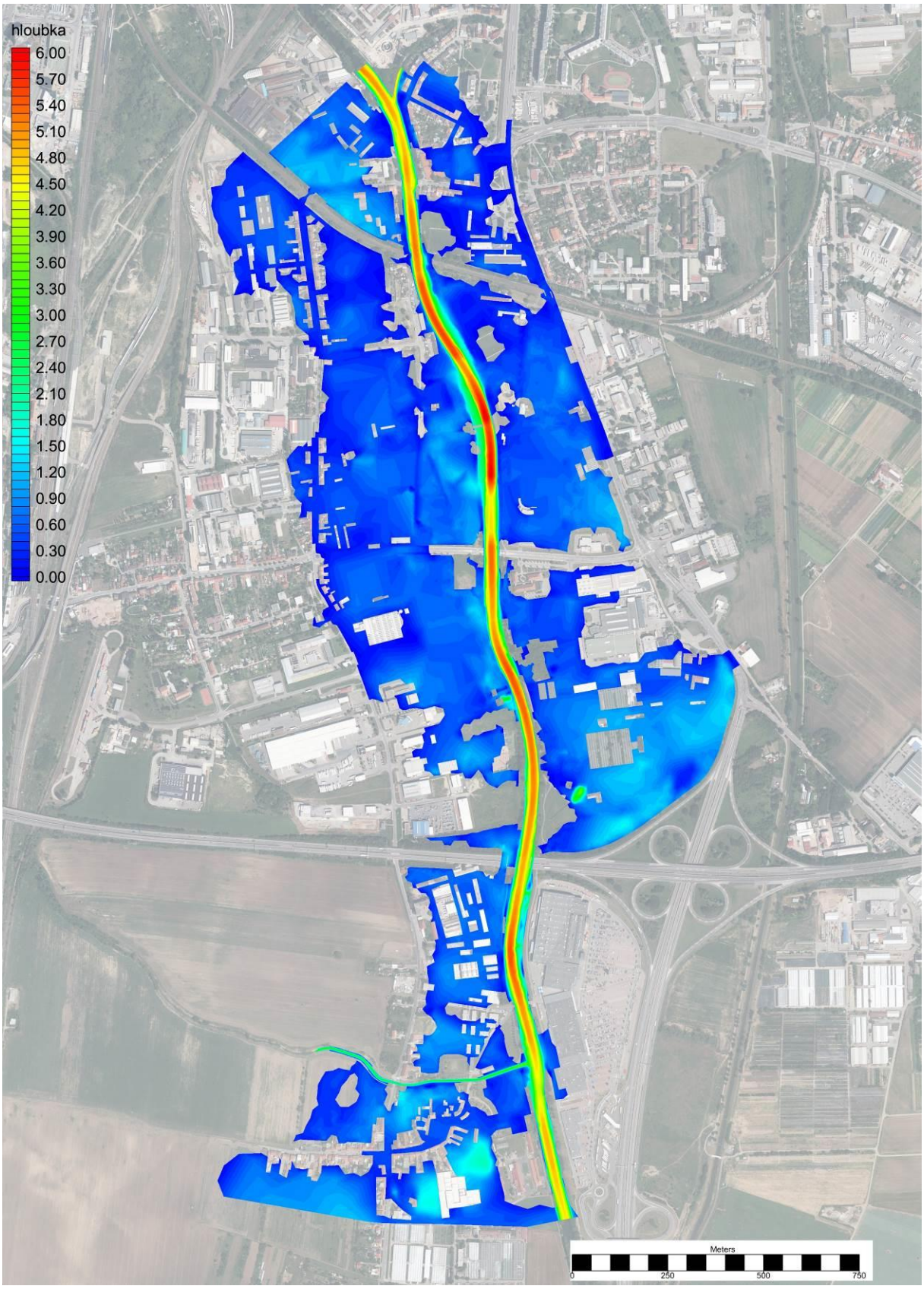
Hloubka vody *h* při SS a Q_{100} je na Obr. 13. Svislicová rychlost *v* při SS a Q_{100} je na Obr. 14. Úroveň hladiny Z_h při SS a Q_{100} je vyobrazena na Obr. 15.

Rozliv nad dálnicí D1 je podobný s rozlivem stanoveným Povodím Moravy, s.p. (Obr. 1) až na to, že voda v levostranném inundačním území přepadá přes ulici Sokolova. Mezi mostem D1 a přítokem Leskavy je rozliv jiný. Voda v levostranném inundačním území na základě 2D modelu proudí areálem AVION Shopping park Brno (hloubka cca 0,2 m). Vzhledem k poměrně podrobně změřené úrovni terénu, nižší úrovni hladiny u 2D modelu při kalibraci a absenci protipovodňových prvků je rozliv stanovený 2D modelem pravděpodobnější, než rozliv stanovený 1D síťovým modelem.

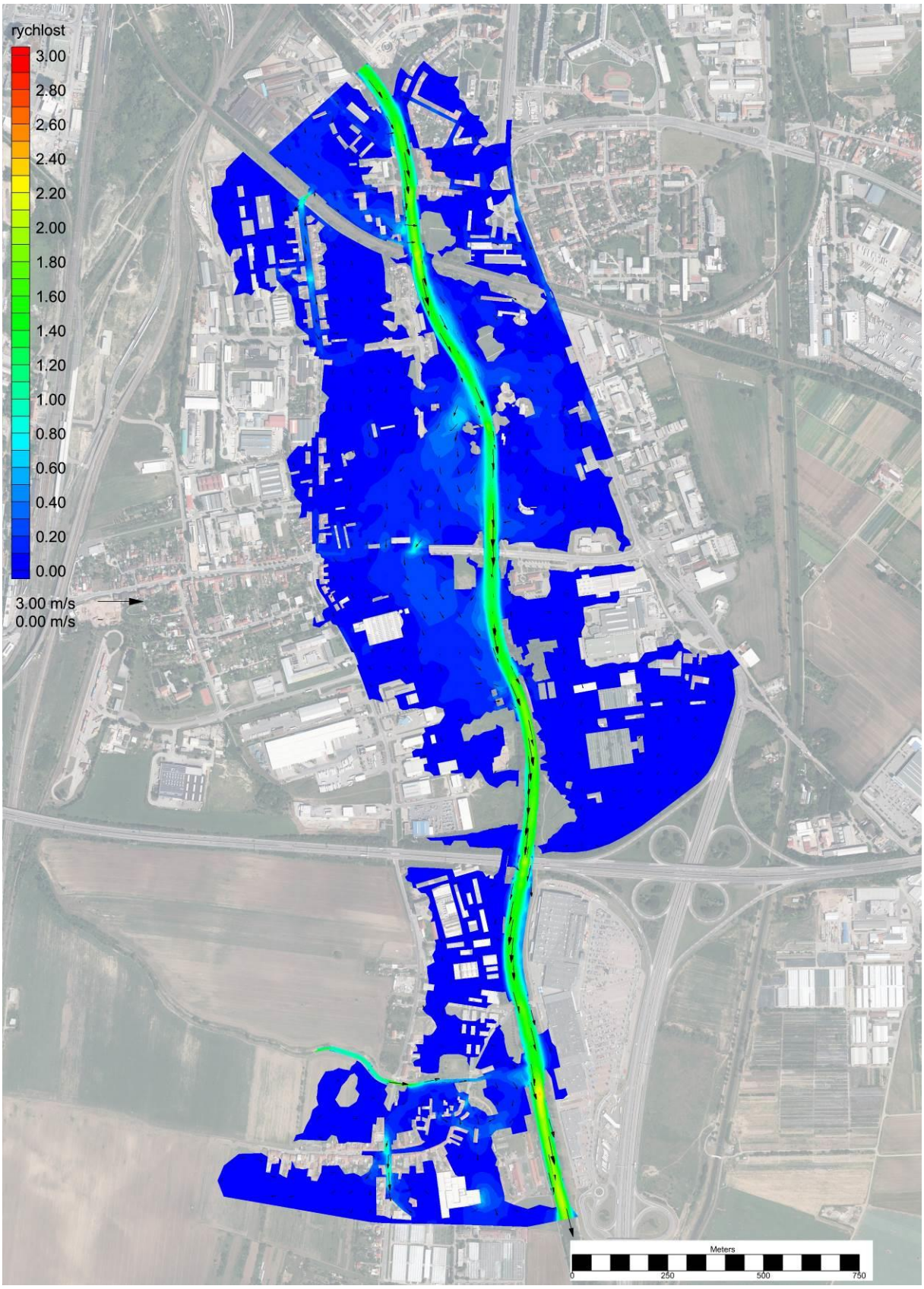
6.1.3. Průtok $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$

Hloubka vody *h* při SS a $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ je na Obr. 16. Svislicová rychlost *v* při SS a $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ je na Obr. 17. Úroveň hladiny Z_h při SS a $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ je vyobrazena na Obr. 18.

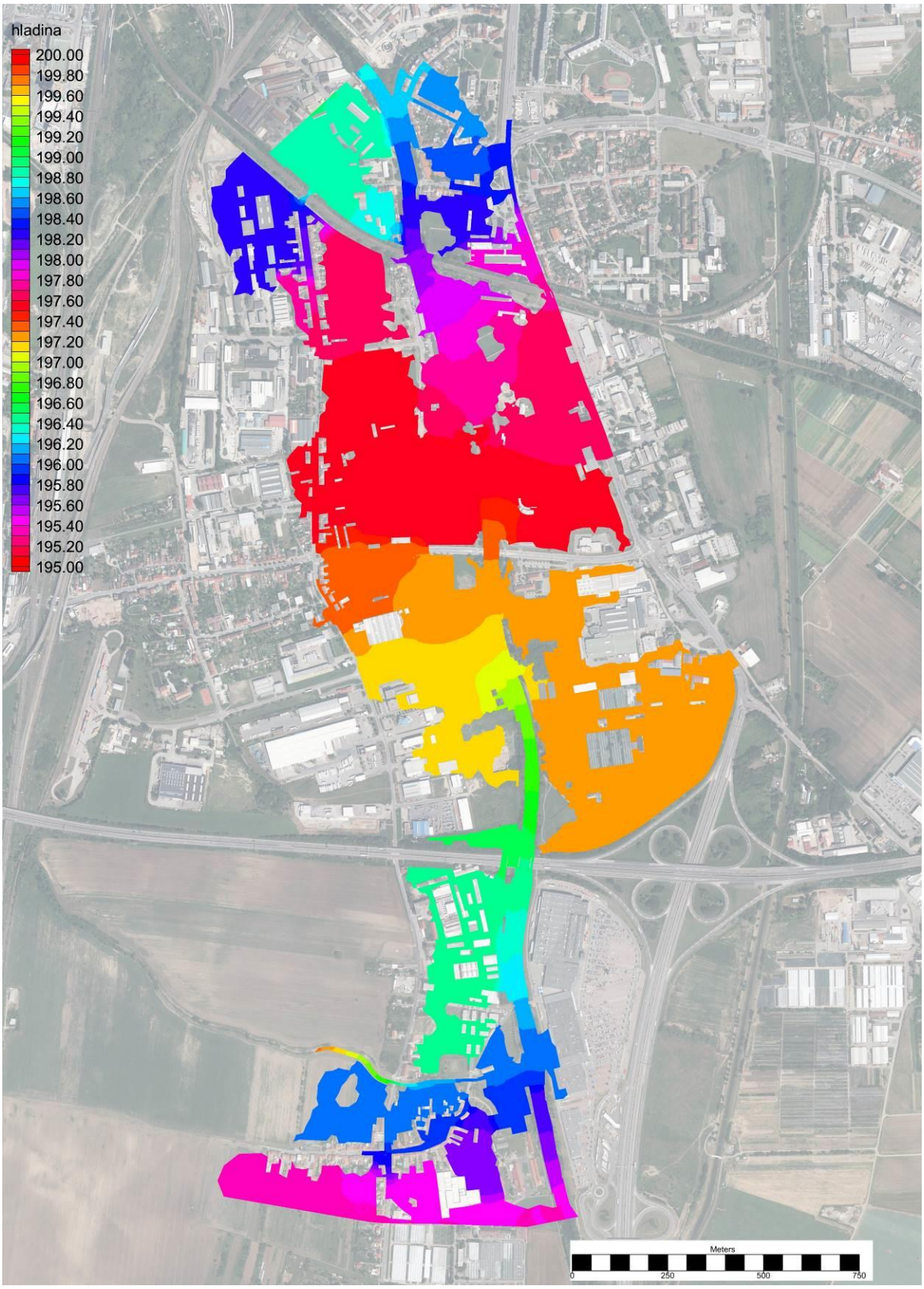
Rozliv je podobný s rozlivem stanoveným Povodím Moravy, s.p., změny jsou opět v zaplavení areálu AVION Shopping park Brno a v přepadu přes silnici ulice Sokolova v levém inundačním území.



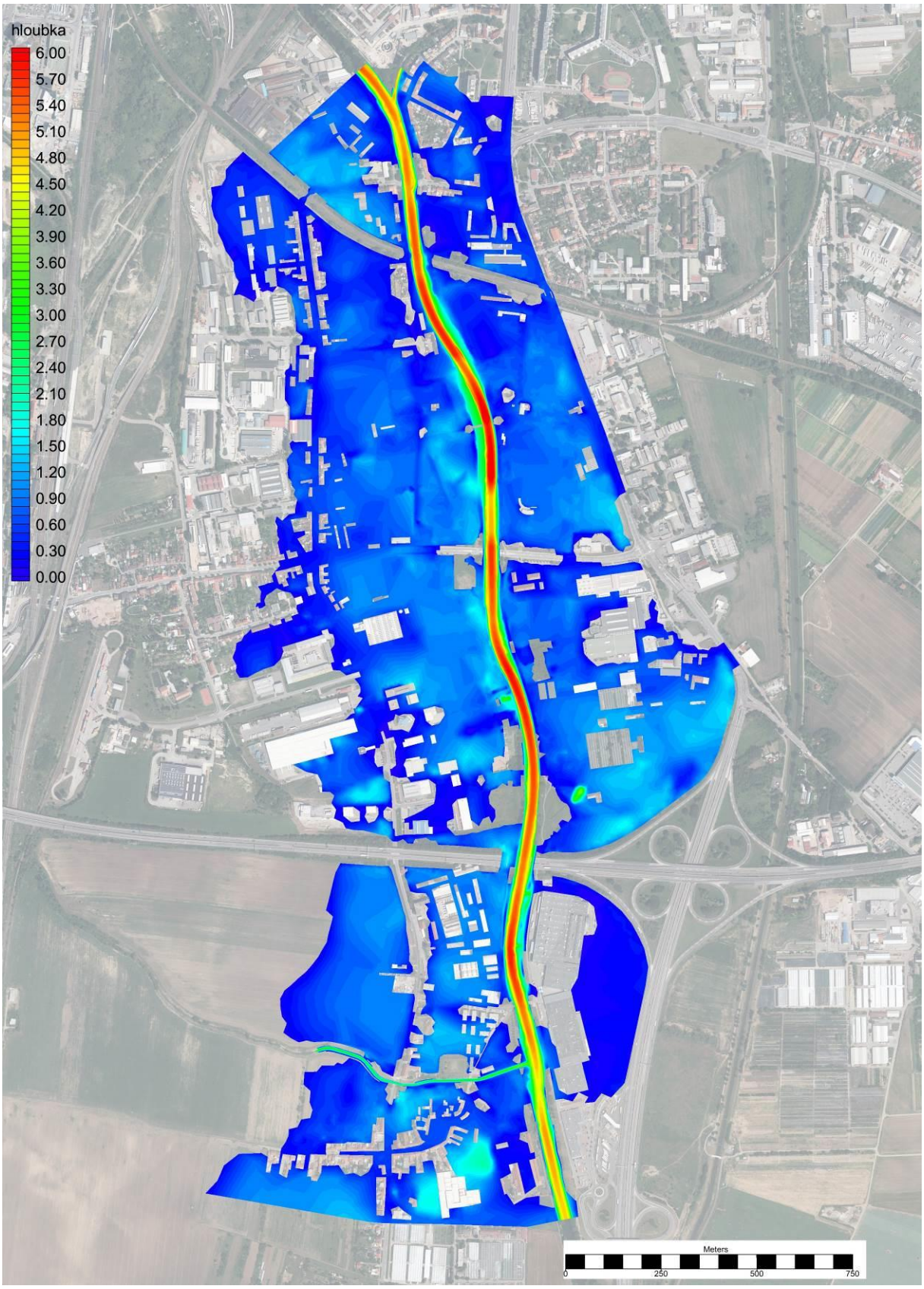
Obr. 10 SS, Q_{50}, hloubka h [m]



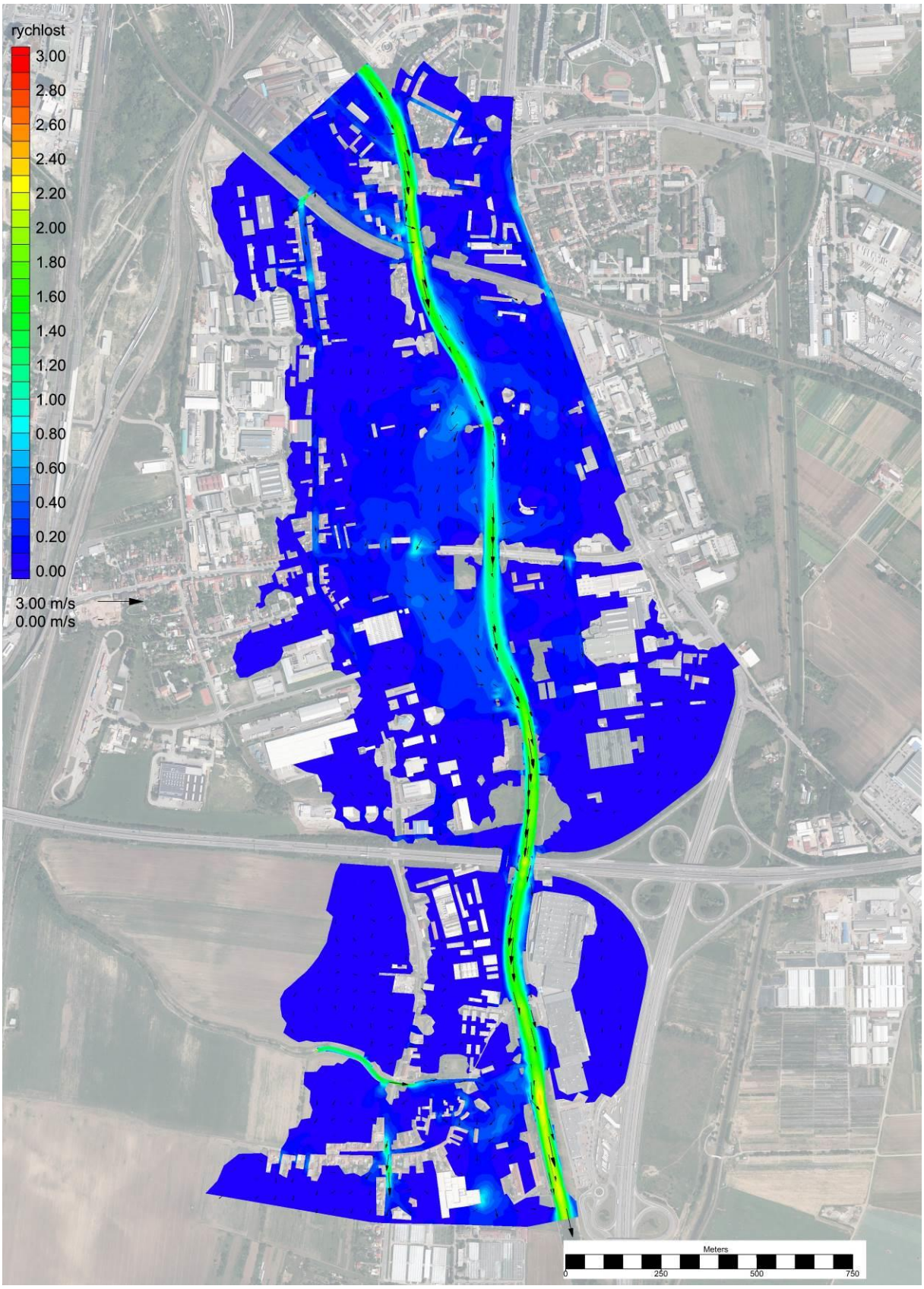
Obr. 11 SS, Q_{50}, svislicová rychlost v [m/s]



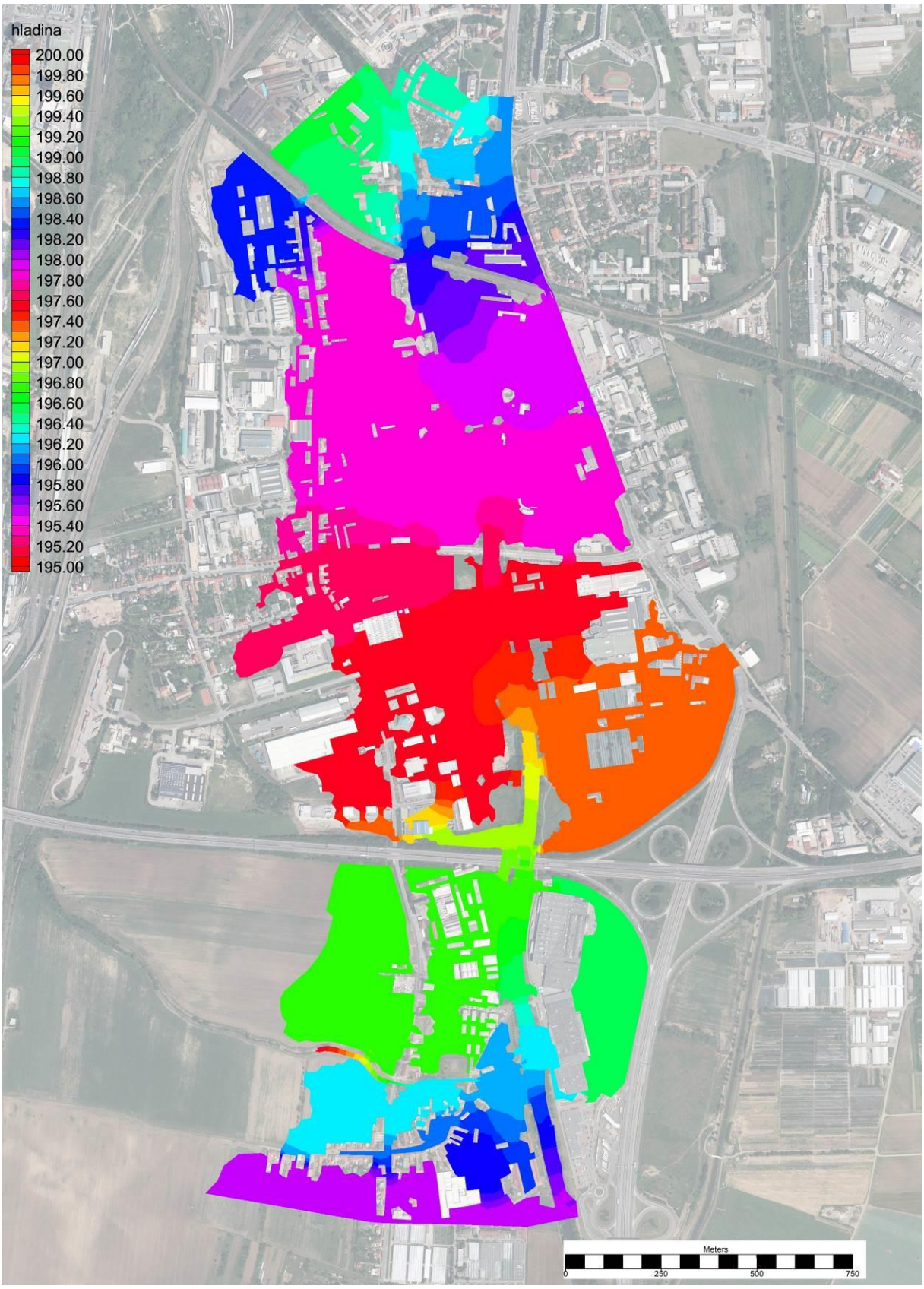
Obr. 12 SS, Q_{50}, úroveň hladiny Z_h [m n. m.]



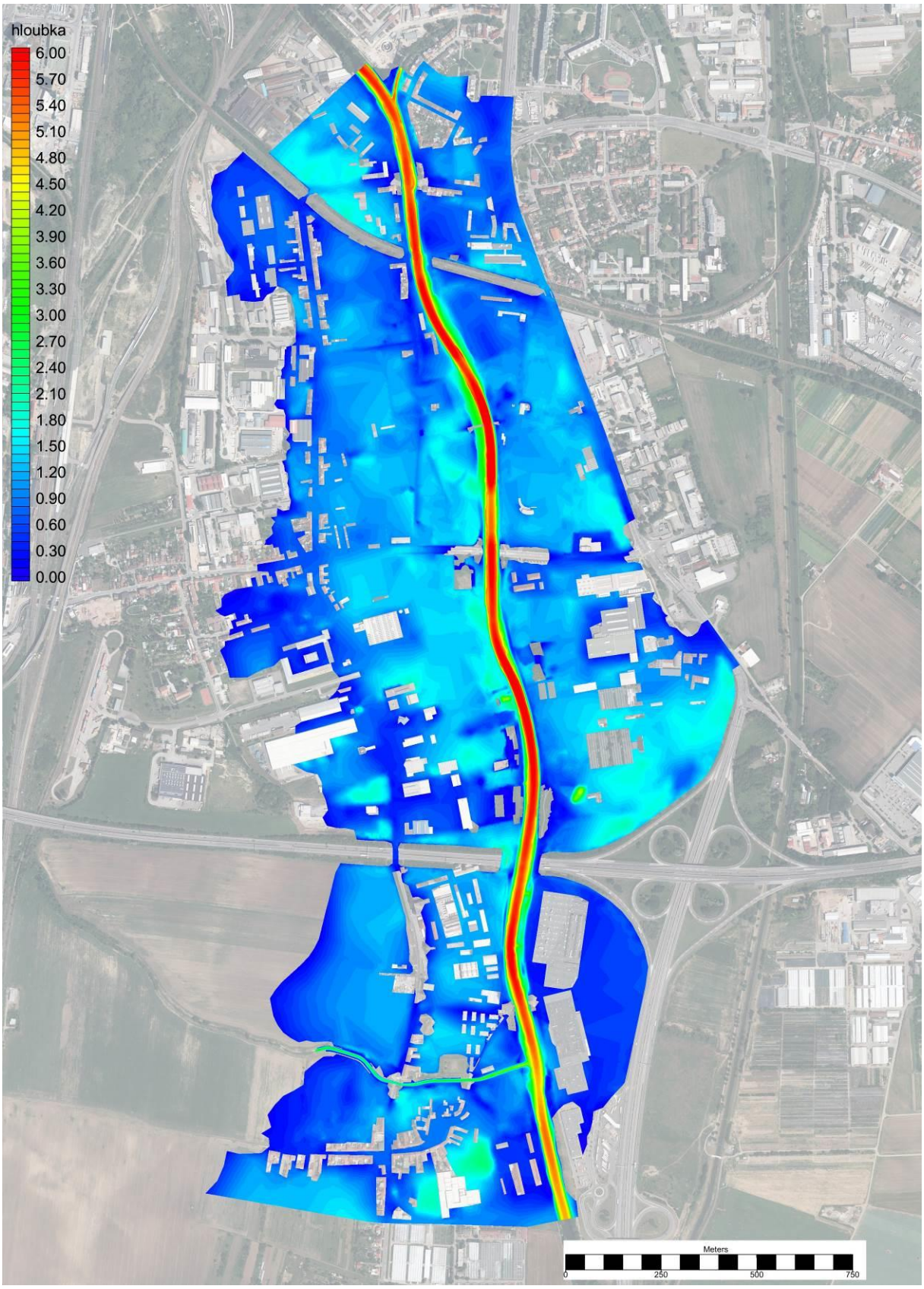
Obr. 13 SS, Q_{100}, hloubka h [m]



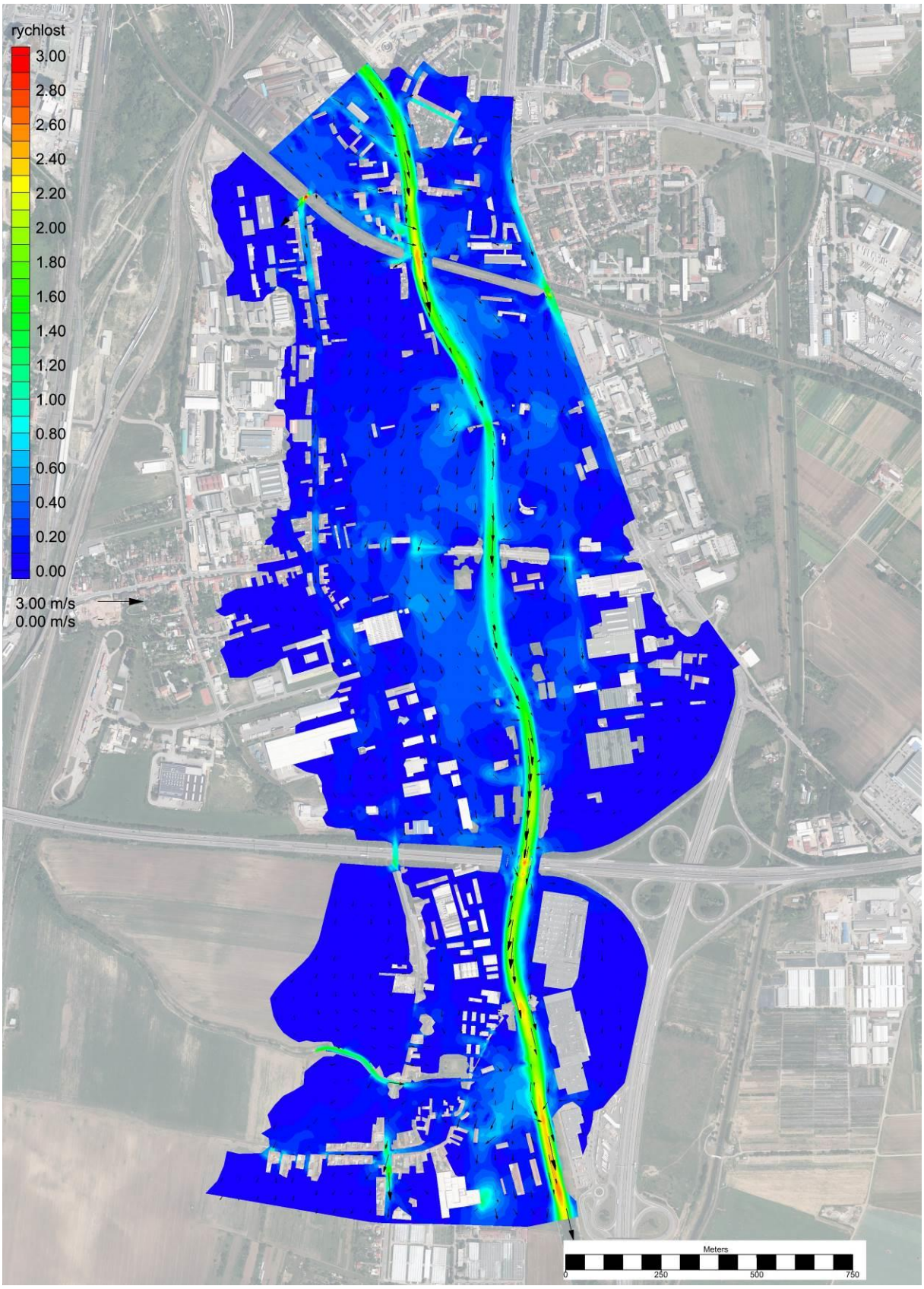
Obr. 14 SS, Q_{100}, svislicová rychlost v [m/s]



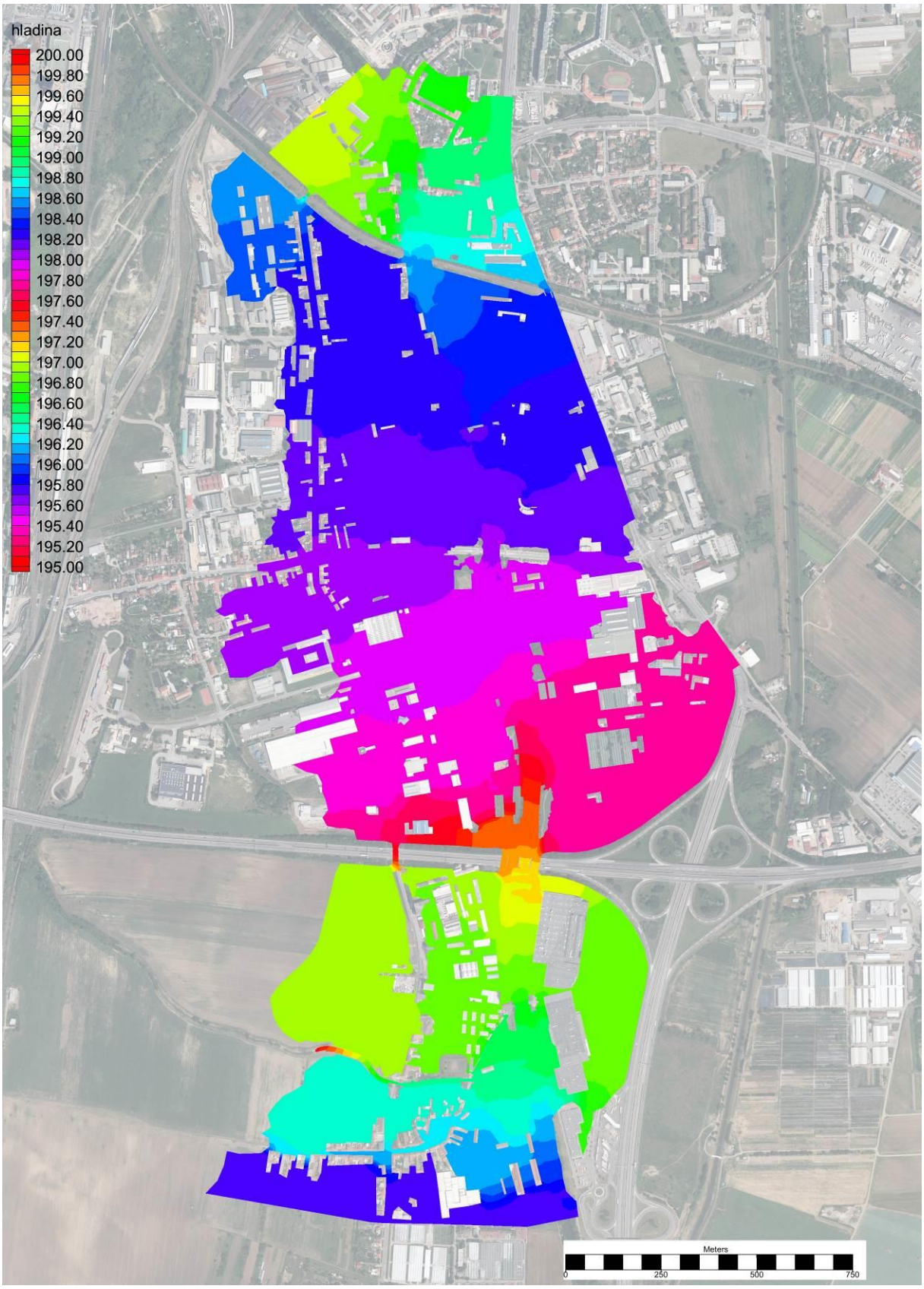
Obr. 15 SS, Q_{100}, úroveň hladiny Z_h [m n. m.]



Obr. 16 SS, $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$, hloubka h [m]



Obr. 17 SS, $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$, svislicová rychlost v [m/s]



Obr. 18 SS, $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$, úroveň hladiny Z_h [m n. m.]

6.2. Navrhovaný stav

6.2.1. Průtok Q_{50}

Hloubka vody *h* při NS a Q_{50} je na Obr. 19. Svislicová rychlost *v* při NS a Q_{50} je na Obr. 20. Úroveň hladiny Z_h při NS a Q_{50} je vyobrazena na Obr. 21.

Nad Přerovskou tratí se voda rozlévá do pravého i levého inundačního území. Nad ulicí Sokolova se rozlévá do obou inundačních území rovněž, ale rozliv je menší, než v případě SS. Pod ulicí Sokolova je rozliv pouze v pravém inundačním území. Pod dálnicí D1 je rozliv pouze v průmyslovém areálu v pravém inundačním území.

6.2.1. Průtok Q_{50} s mobilními protipovodňovými hrazeními

Hloubka vody *h* při NS s MPH a Q_{50} je na Obr. 22. Svislicová rychlost *v* při NS s MPH a Q_{50} je na Obr. 23. Úroveň hladiny Z_h při NS s MPH a Q_{50} je vyobrazena na Obr. 24.

Voda se v celém zájmovém úseku nerozlévá, čemuž zabraňují MPH. MPH_L1 hradí hloubku až 0,41 m, MPH_L2 hloubku 0,19 m a MPH_P1 hloubku 0,07 m. U MPH_L3 a MPH_P2 nelze určit hloubku s dostatečnou přesností, protože hradí vodu mimo rozsah platnosti modelu. Vlivem zahrazení mostního profilu na straně ulice Násepní MPH_P2 dojde ke vzdutí hladiny vody nad železniční tratí. Hloubka vzduté vody na modelu je 1,8 m. V místě MPH_L3 je na modelu hloubka 0,4 m. V obou případech se však jedná o odhad skutečnosti, protože není dostatečně přesně znám přítok do oblasti.

6.2.2. Průtok Q_{100}

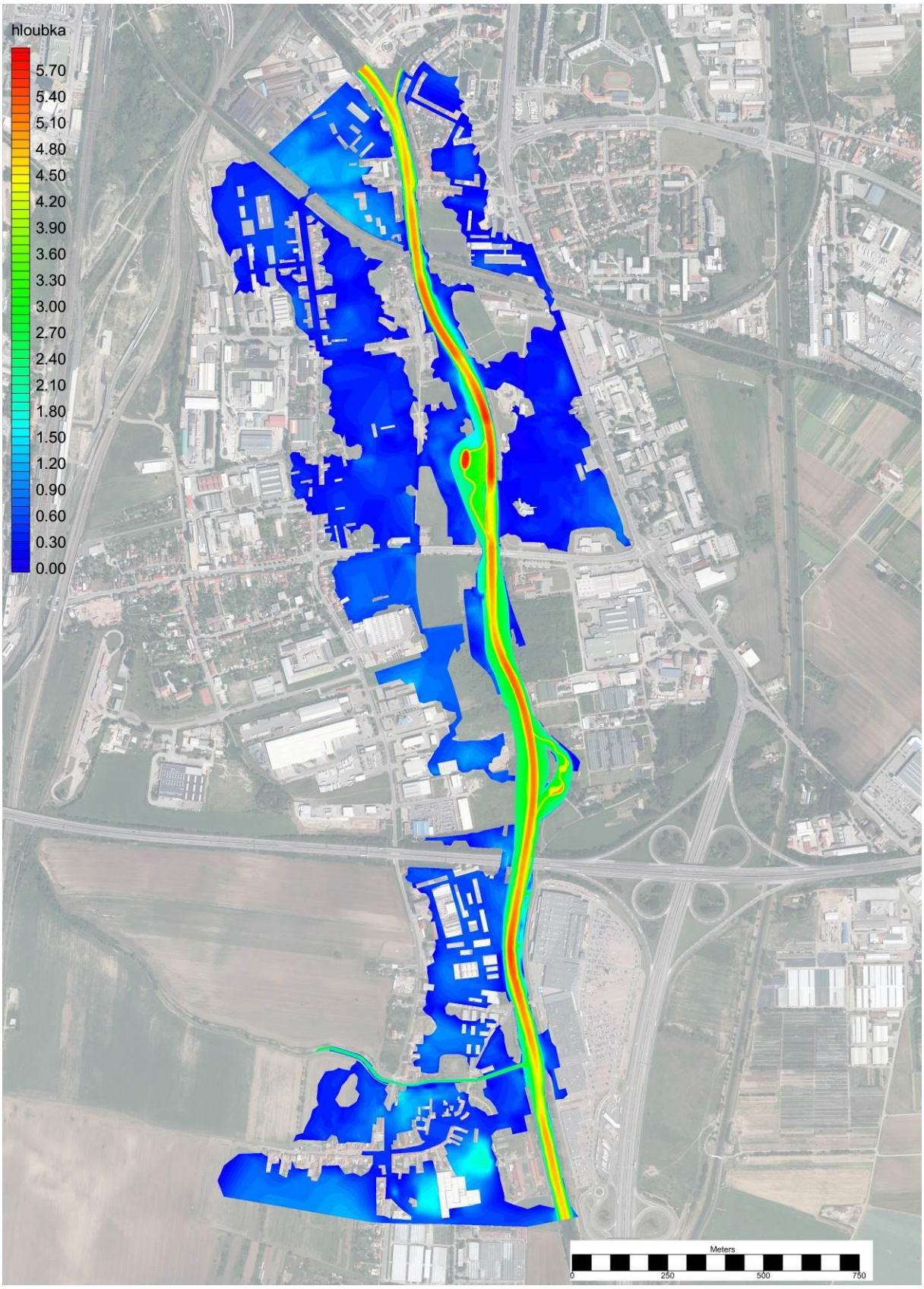
Hloubka vody *h* při NS a Q_{100} je na Obr. 25. Svislicová rychlost *v* při NS a Q_{100} je na Obr. 26. Úroveň hladiny Z_h při NS a Q_{100} je vyobrazena na Obr. 27.

Proudění v oblasti je ovlivněno navrženými úpravami relativně málo. Rozsah rozlivu je prakticky stejný, jako při SS. Rozšířeným korytem Svratky o bermy proudí větší průtok, inundačním územím menší. Je třeba upozornit, že přítok do zájmové oblasti je větší o 7 m^3/s.

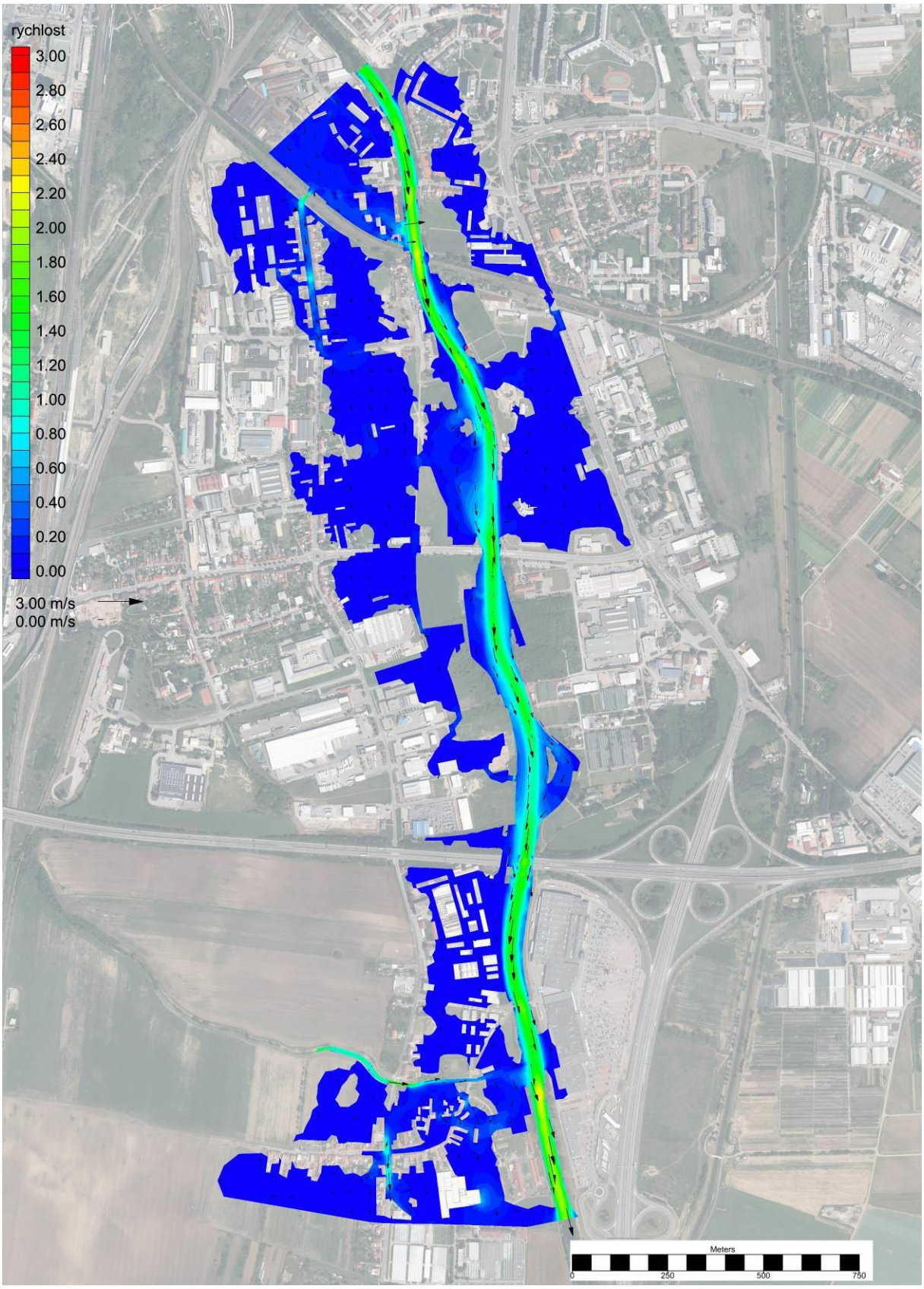
6.2.3. Průtok $Q_{100\ neovlivněný}$

Hloubka vody *h* při NS a $Q_{100\ neovlivněný}$ je na Obr. 28. Svislicová rychlost *v* při NS a $Q_{100\ neovlivněný}$ je na Obr. 29. Úroveň hladiny Z_h při NS a $Q_{100\ neovlivněný}$ je vyobrazena na Obr. 30.

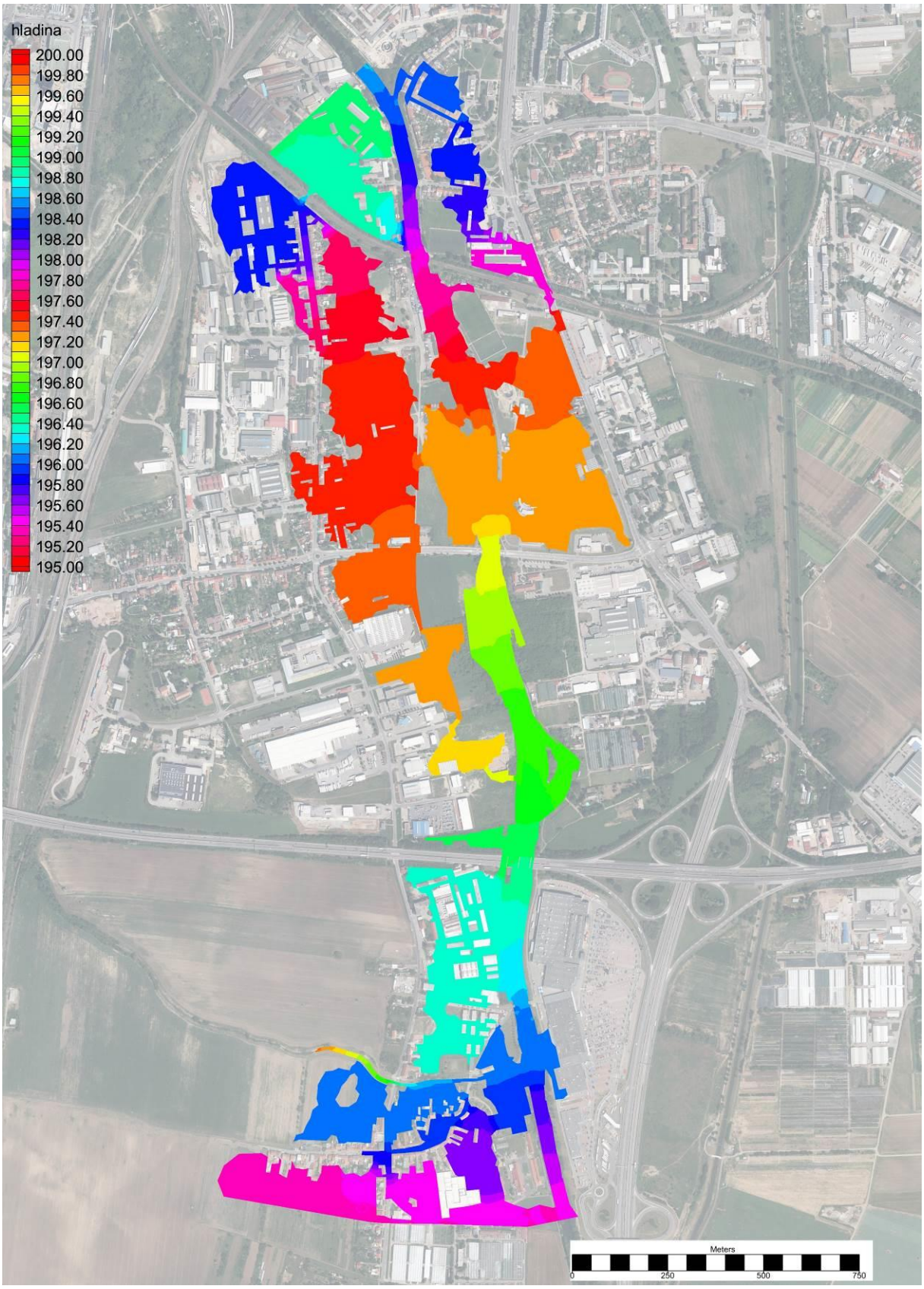
Proudění v oblasti je rovněž ovlivněno navrženými úpravami relativně málo. Rozsah rozlivu je prakticky stejný, jako při SS. Rozšířeným korytem Svratky o bermy proudí větší průtok, inundačním územím menší. Je třeba upozornit, že přítok do zájmové oblasti je větší o 25 m^3/s.



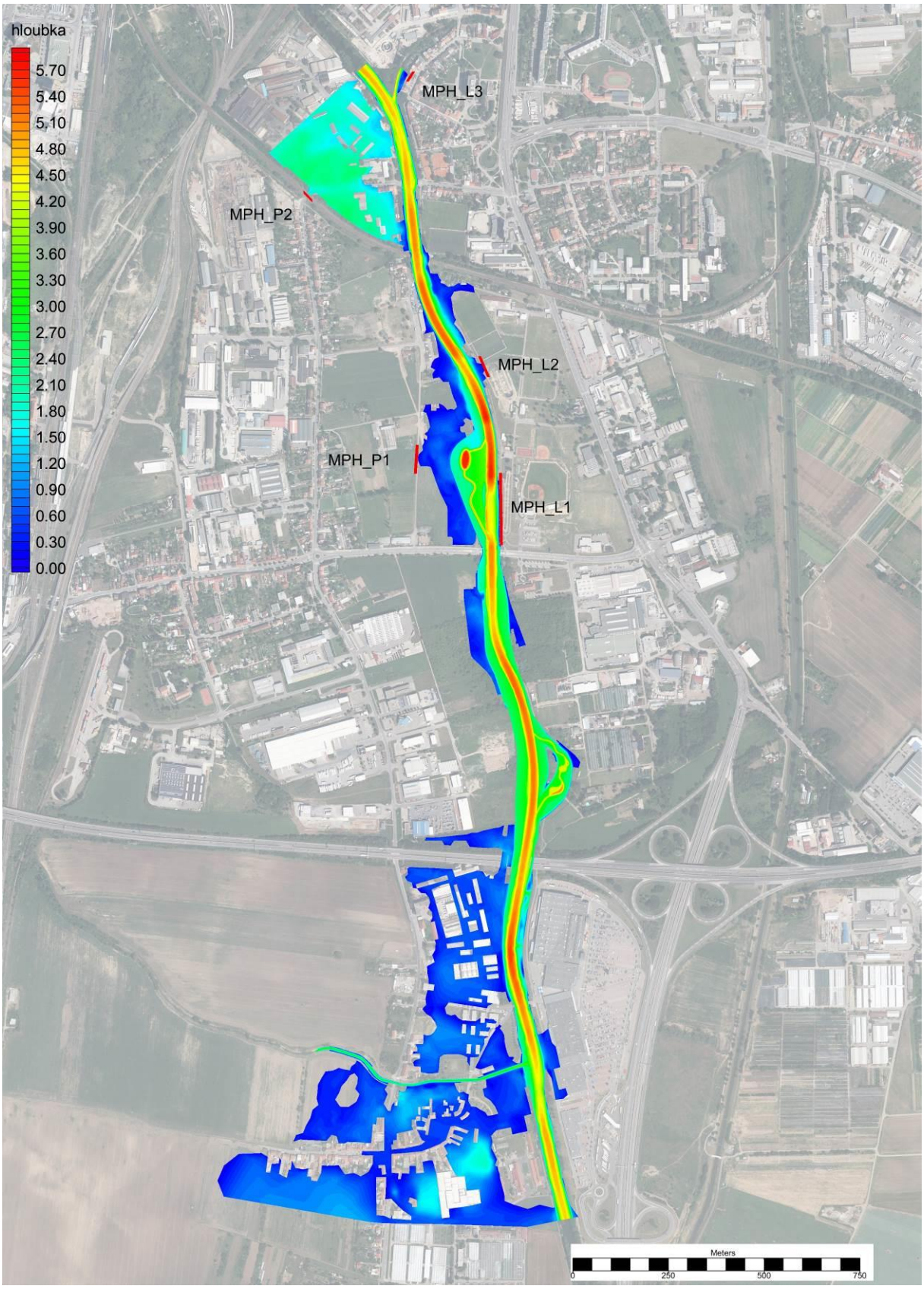
Obr. 19 NS, Q_{50}, hloubka h [m]



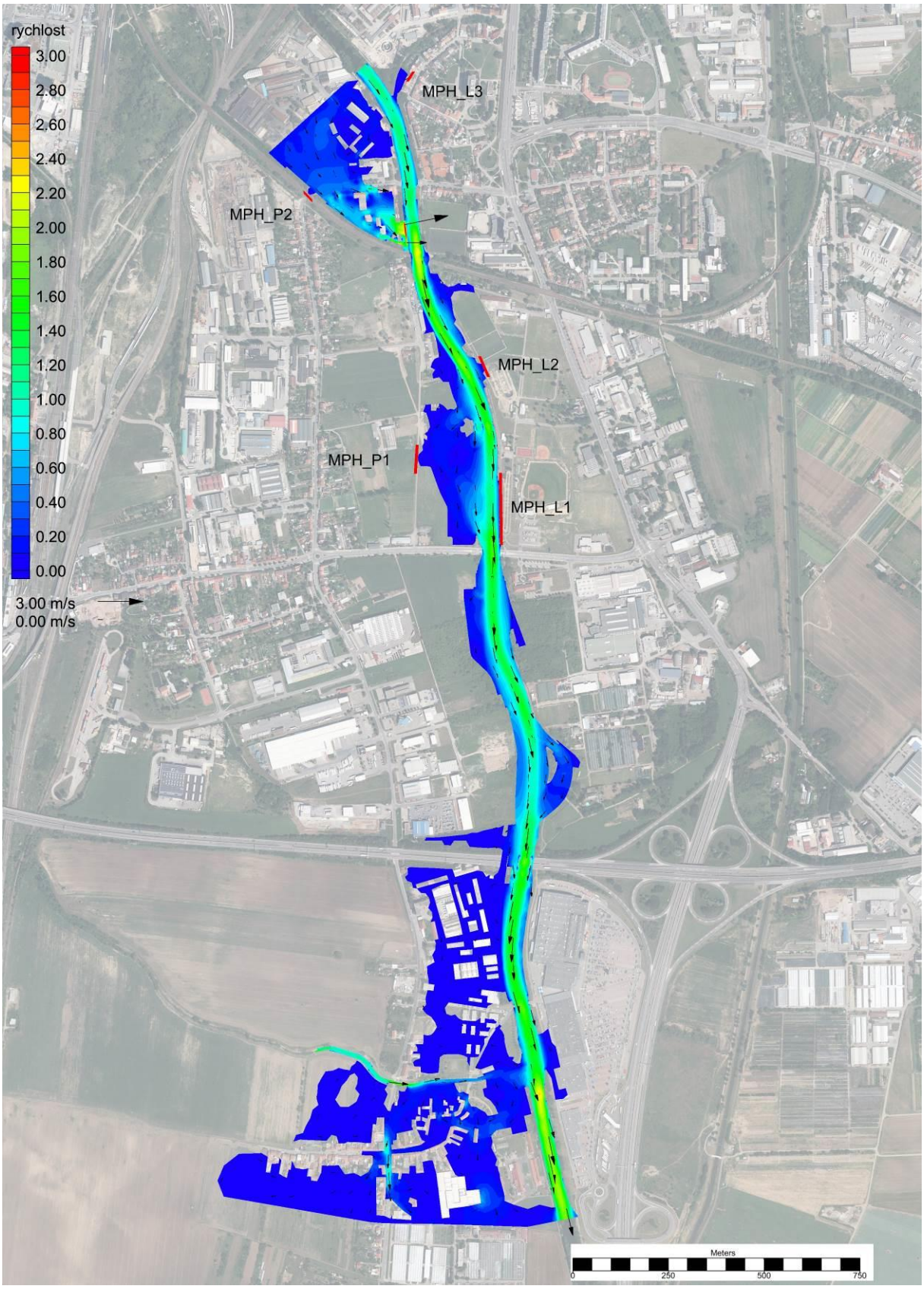
Obr. 20 NS, Q_{50}, svislicová rychlost v [m/s]



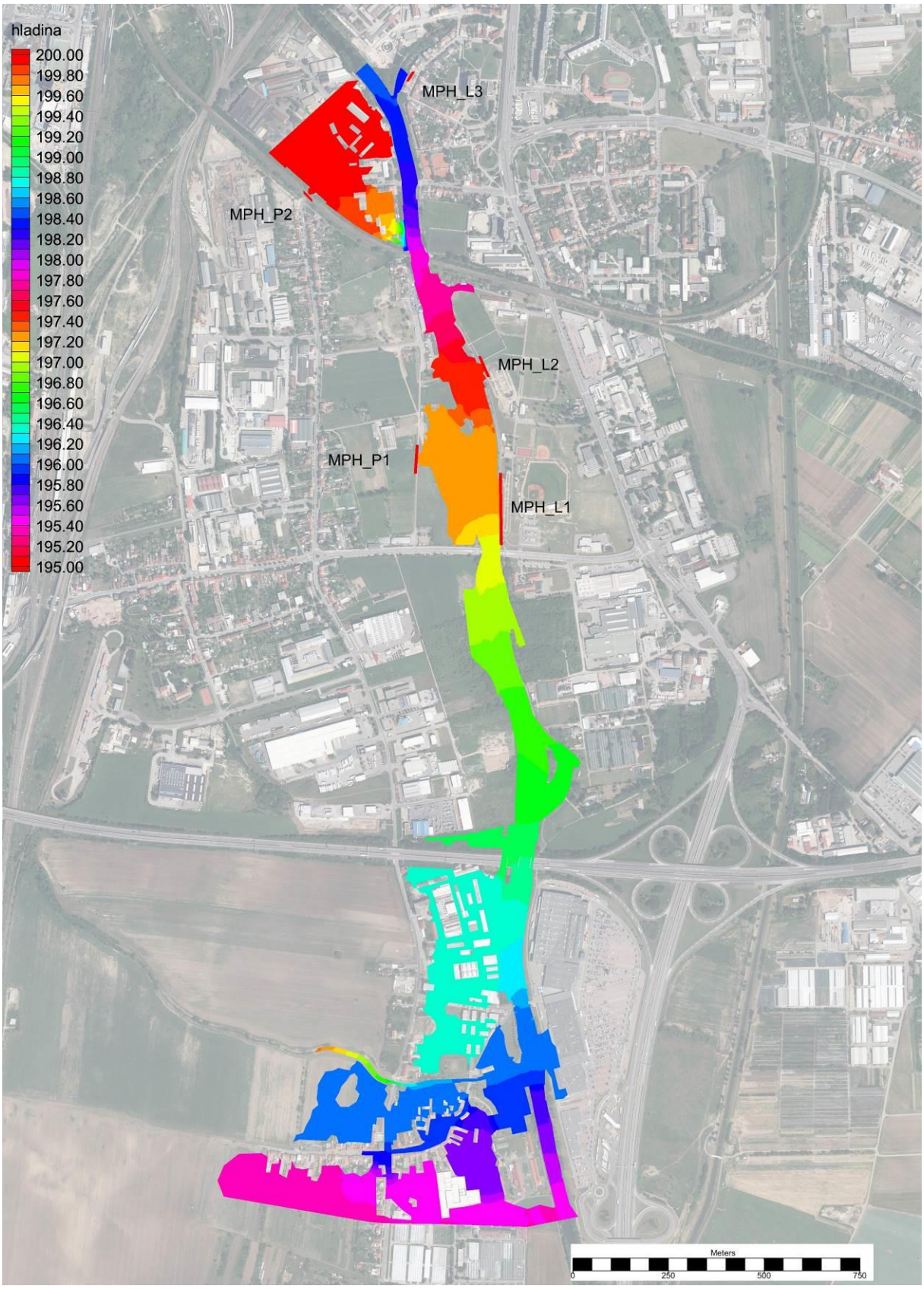
Obr. 21 NS, Q_{50}, úroveň hladiny Z_h [m n. m.]



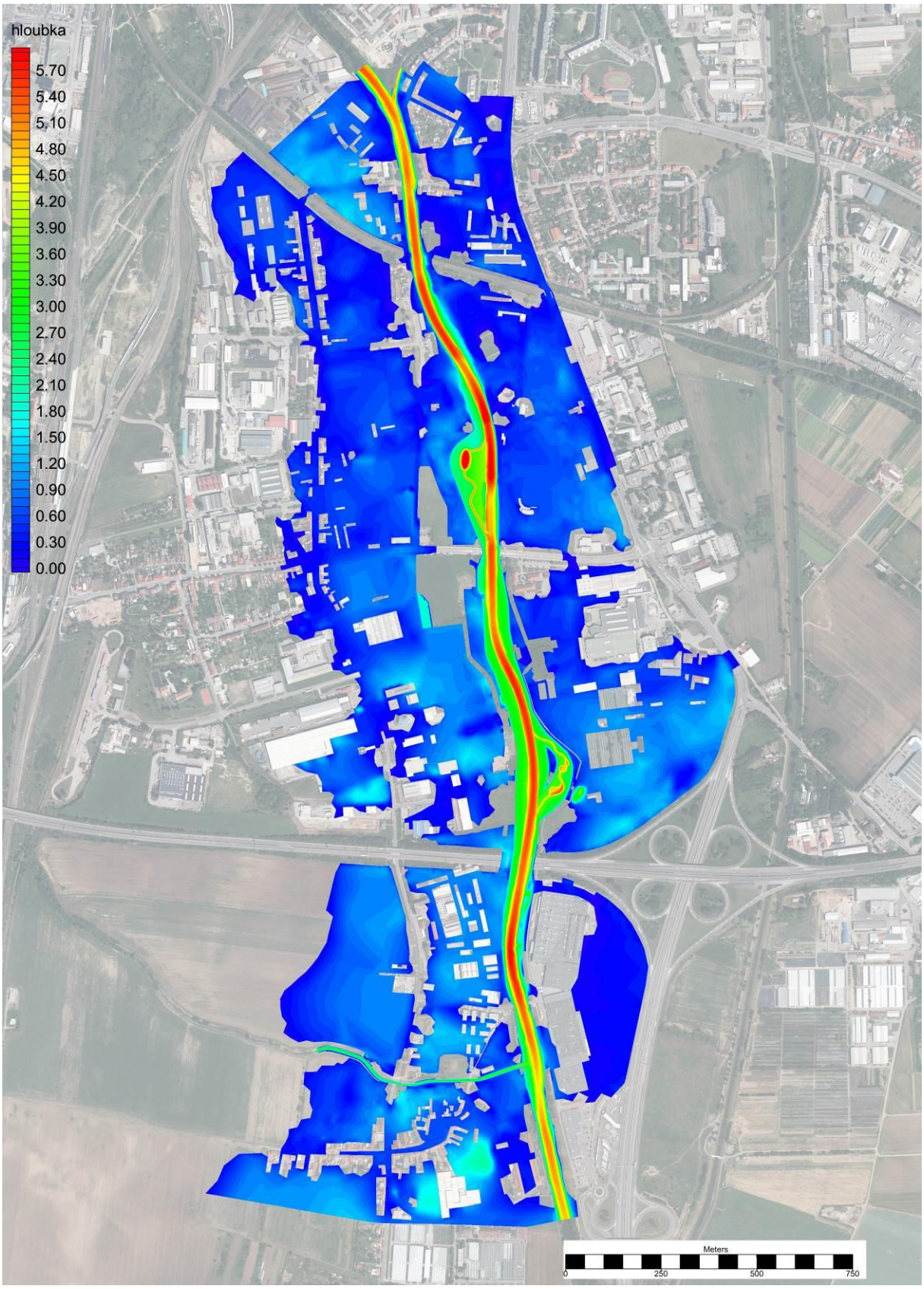
Obr. 22 NS s MPH, Q_{50}, hloubka h [m]



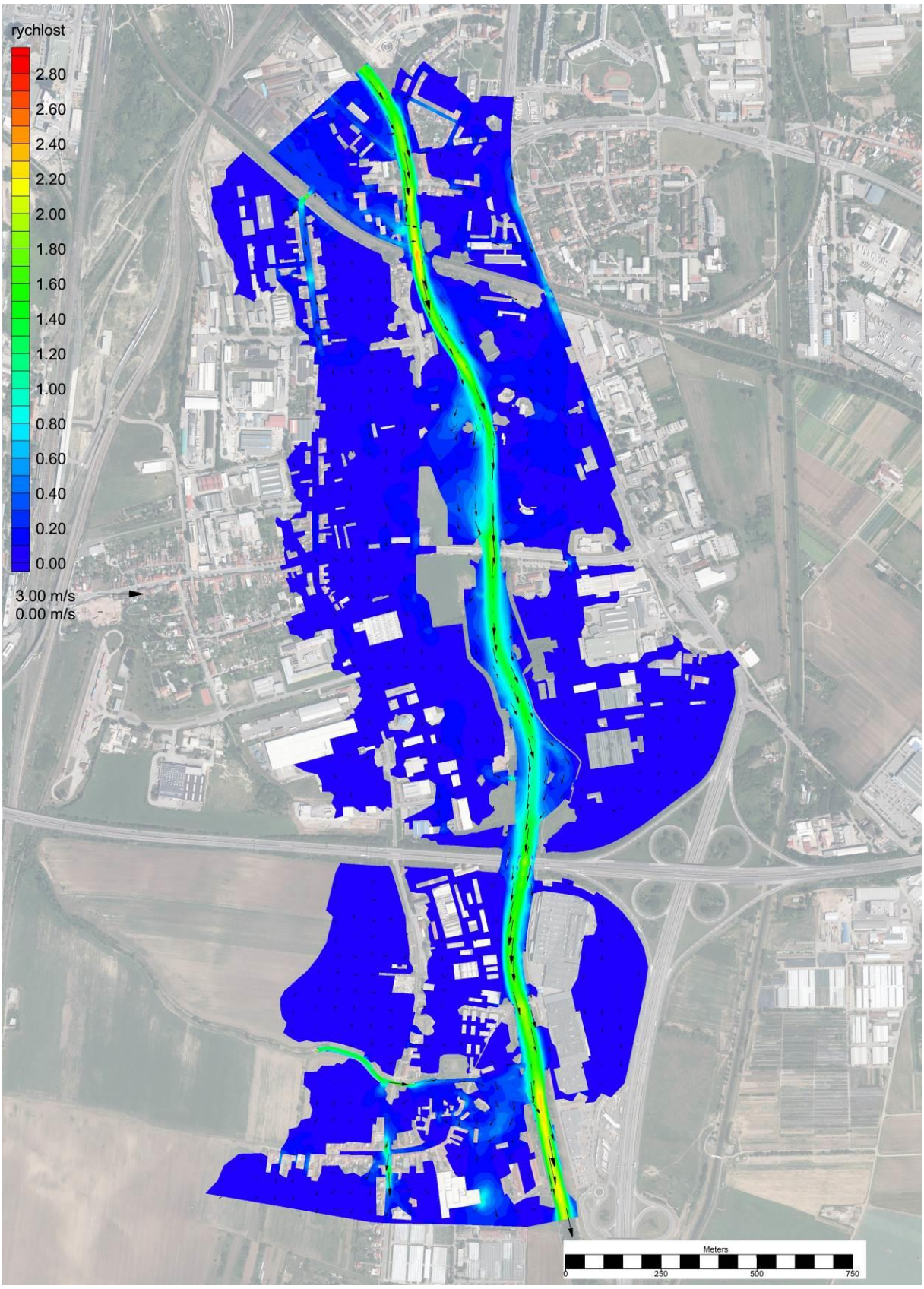
Obr. 23 NS s MPH, Q_{50}, svislicová rychlost v [m/s]



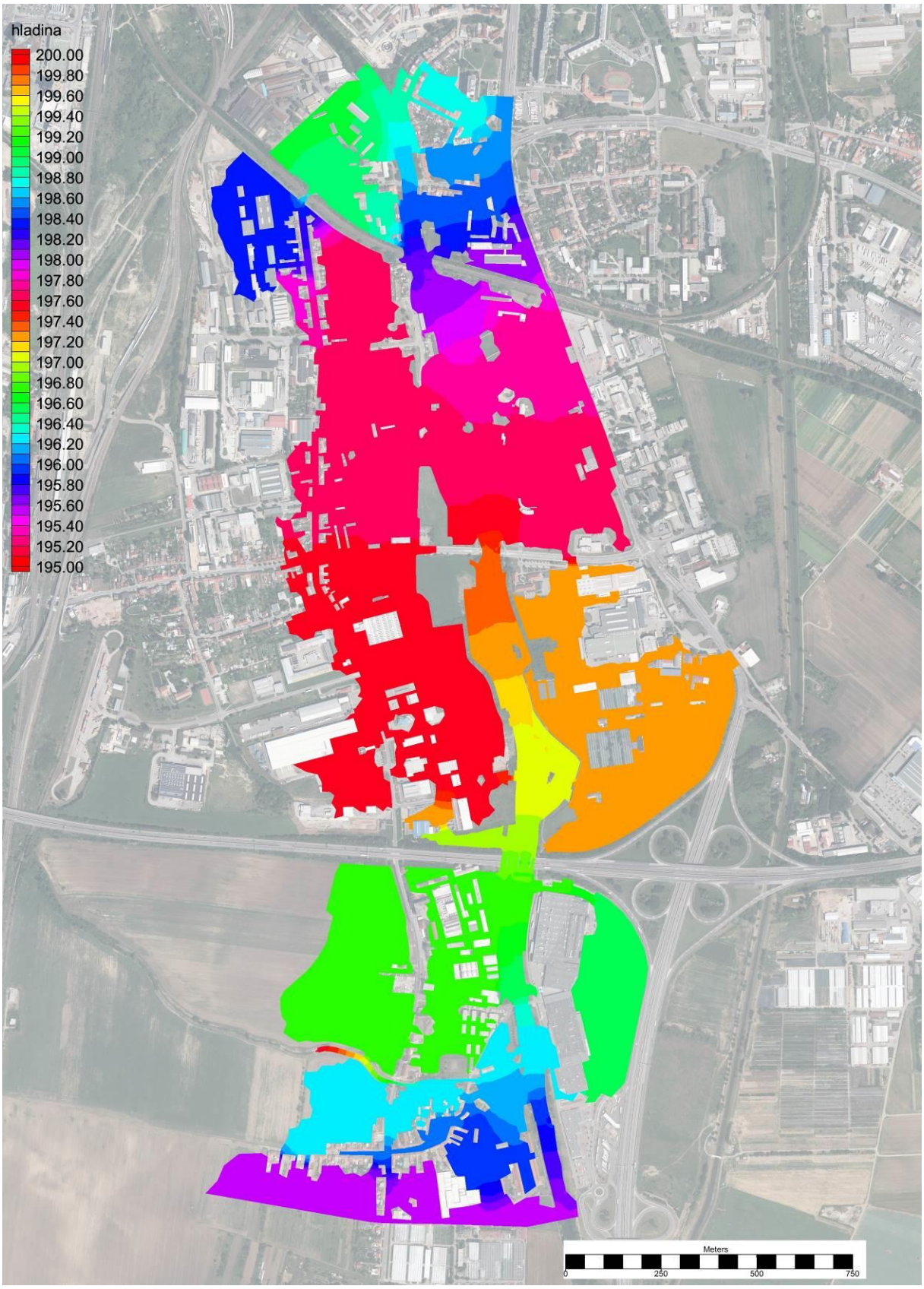
Obr. 24 NS s MPH, Q_{50}, úroveň hladiny Z_h [m n. m.]



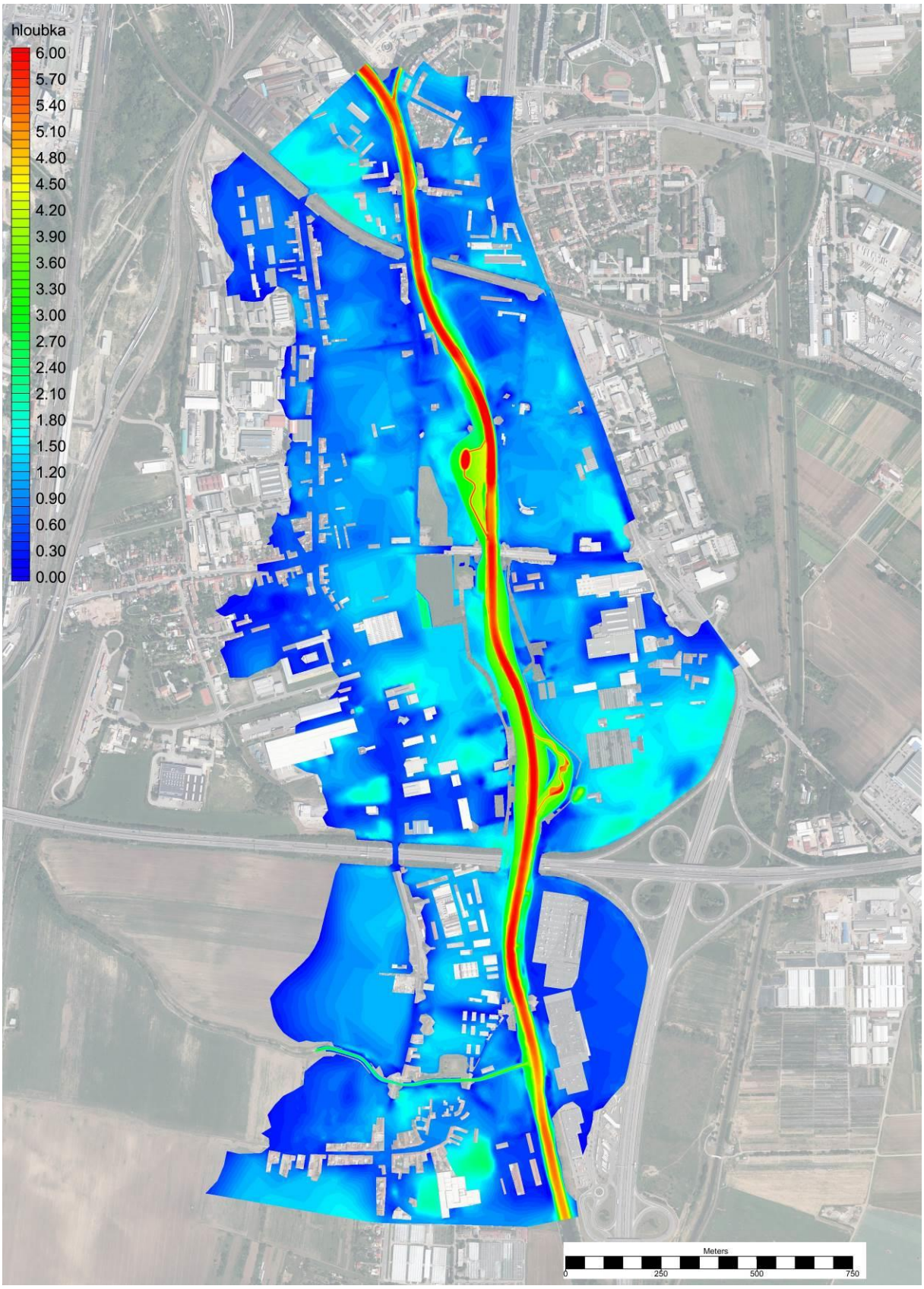
Obr. 25 NS, Q_{100}, hloubka h [m]



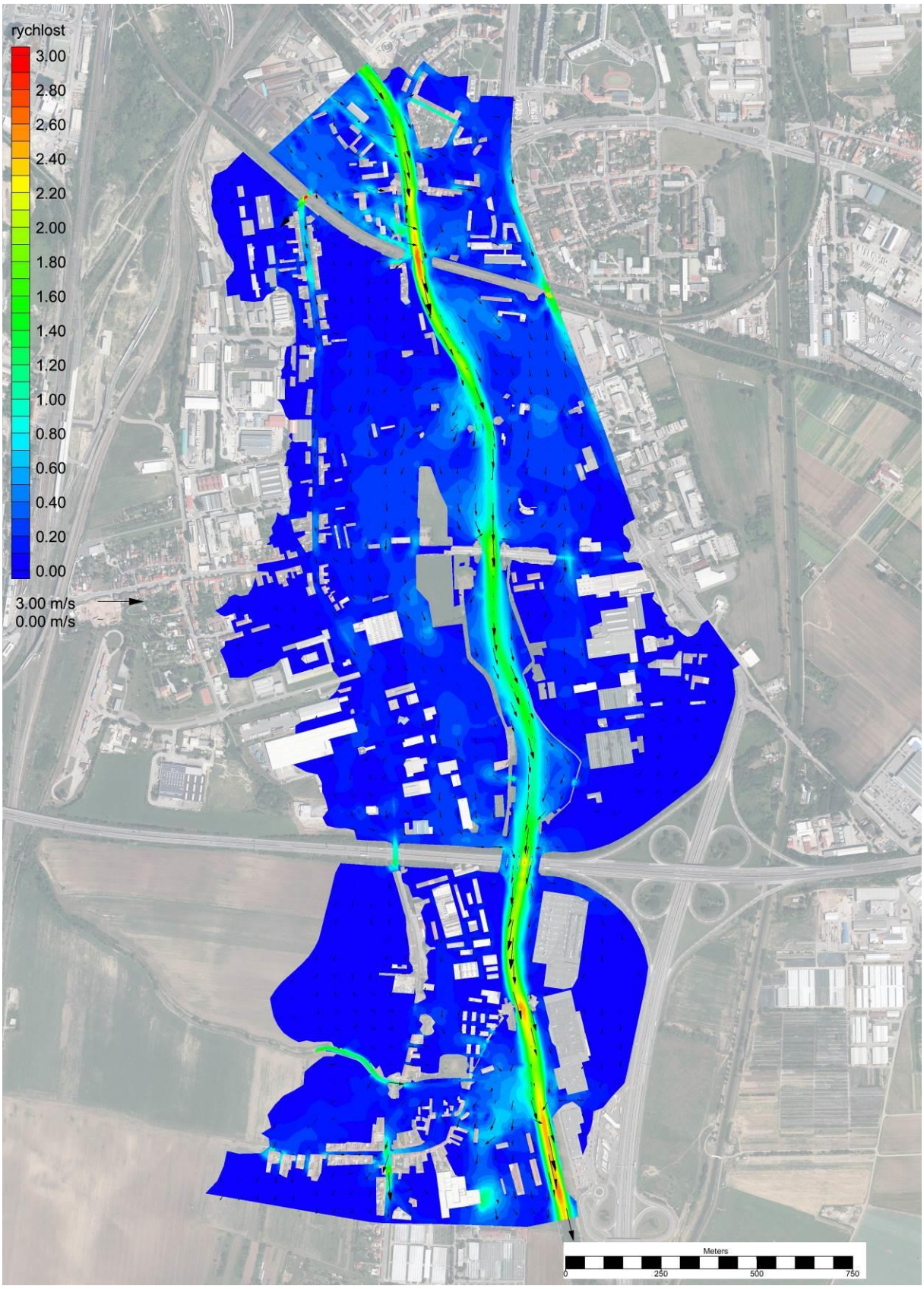
Obr. 26 NS, Q_{100}, svislicová rychlost v [m/s]



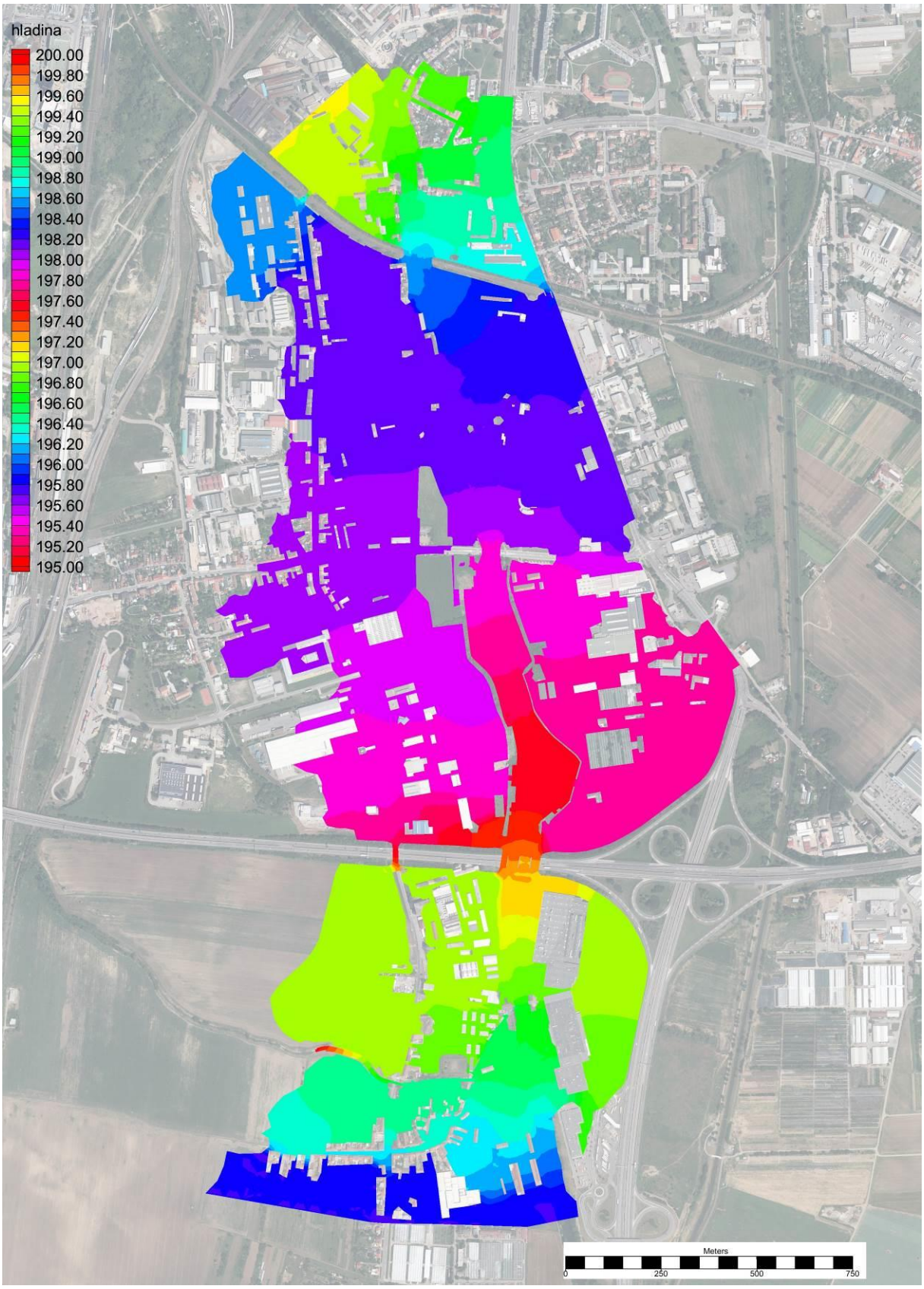
Obr. 27 NS, Q_{100}, úroveň hladiny Z_h [m n. m.]



Obr. 28 NS, $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$, hloubka h [m]



Obr. 29 NS, $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$, svislicová rychlost v [m/s]



Obr. 30 NS, $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$, úroveň hladiny Z_h [m n. m.]

7. Porovnání stavů

Porovnávány byly úrovně hladin a objemy vody v zájmovém území.

7.1. Změna úrovně hladiny při NS

Porovnání je vztaženo ke SS. Tedy pro každý bod výpočtové sítě byl proveden rozdíl úrovně hladiny při NS a úrovně hladiny při SS.

Změna úrovně hladiny při NS s MPH a průtoku Q_{50} je vyobrazena na Obr. 31.

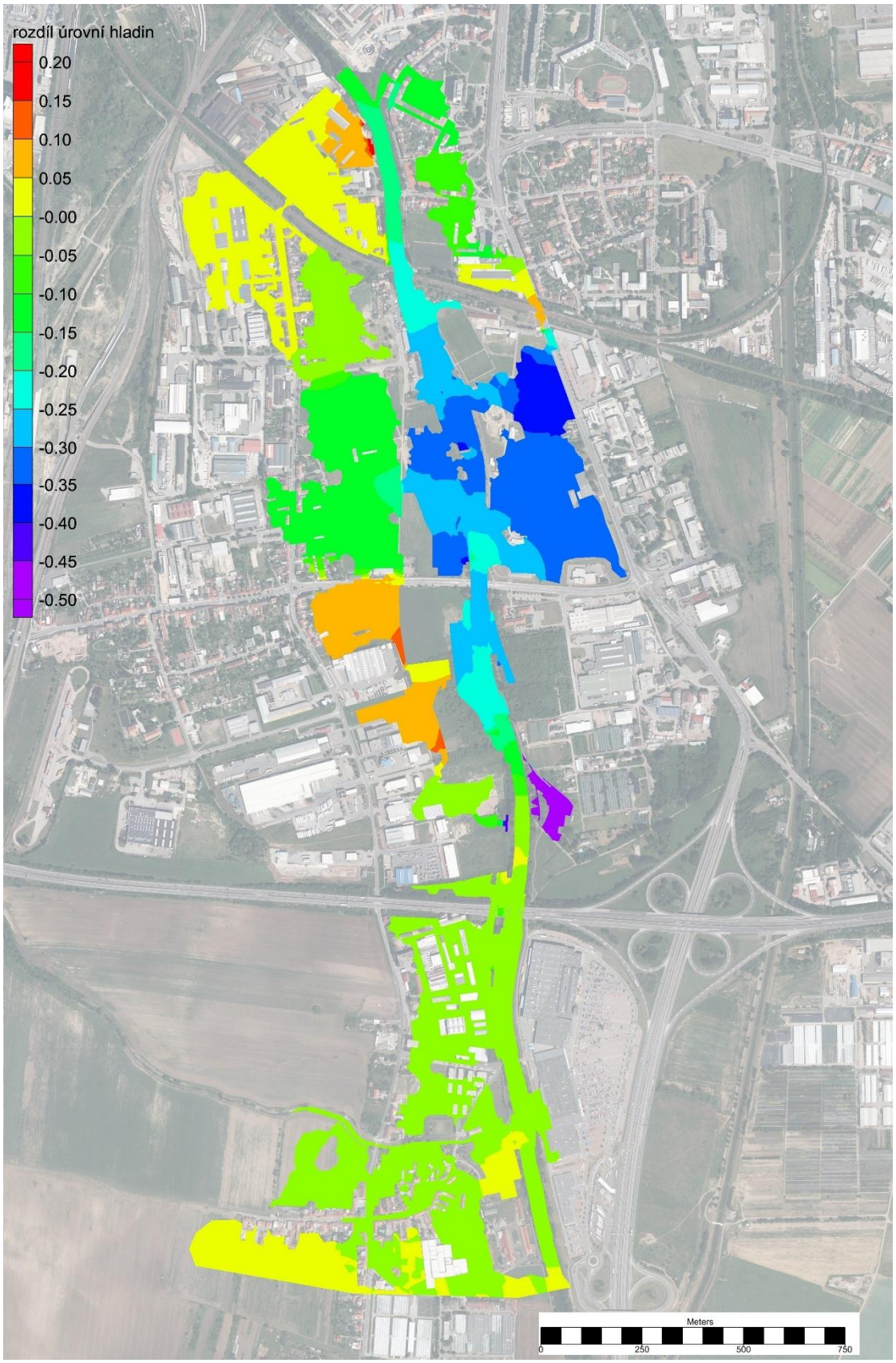
Změna úrovně hladiny při NS a průtoku Q_{100} je vyobrazena na Obr. 32.

Změna úrovně hladiny při NS a průtoku $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ je vyobrazena na Obr. 33.

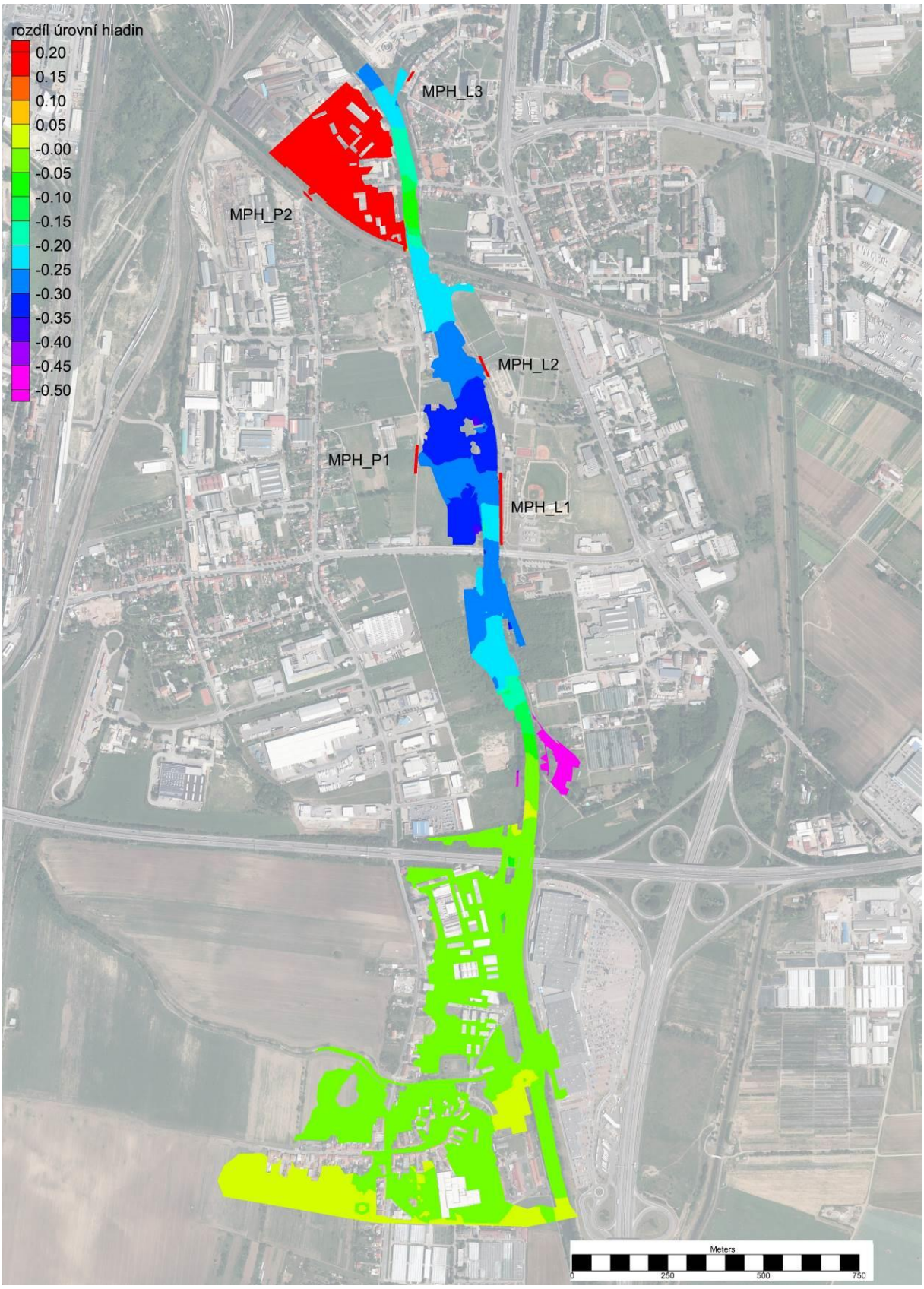
Největší změna rozlivu při NS je při průtoku Q_{50} s MPH, kdy veškerá voda proudí korytem Svratky rozšířeným o bermy a přilehlými plochami ohraničenými násypy, hrázemi a zídkami. Voda se rozlévá pouze pod dálnicí D1 do průmyslového areálu v pravém inundačním území až k ulici Havránkova. Úroveň hladiny pod D1 je prakticky beze změny oproti SS. Je třeba upozornit, že legenda na Obr. 31 vystihuje změnu úrovně hladiny pouze v zájmové oblasti (vně zájmové oblasti není model dostatečně vypovídající).

Při průtoku Q_{100} se rozliv změní jen nepatrně, zmenší se v oblasti nad ulicí Sokolova v obou inundačních územích a pod ulicí Sokolova jen v levém inundačním území. Pod dálnicí D1 je mírné zvýšení úrovně hladiny vyvolané zvětšeným průtokem při NS oproti SS (7 m^3/s).

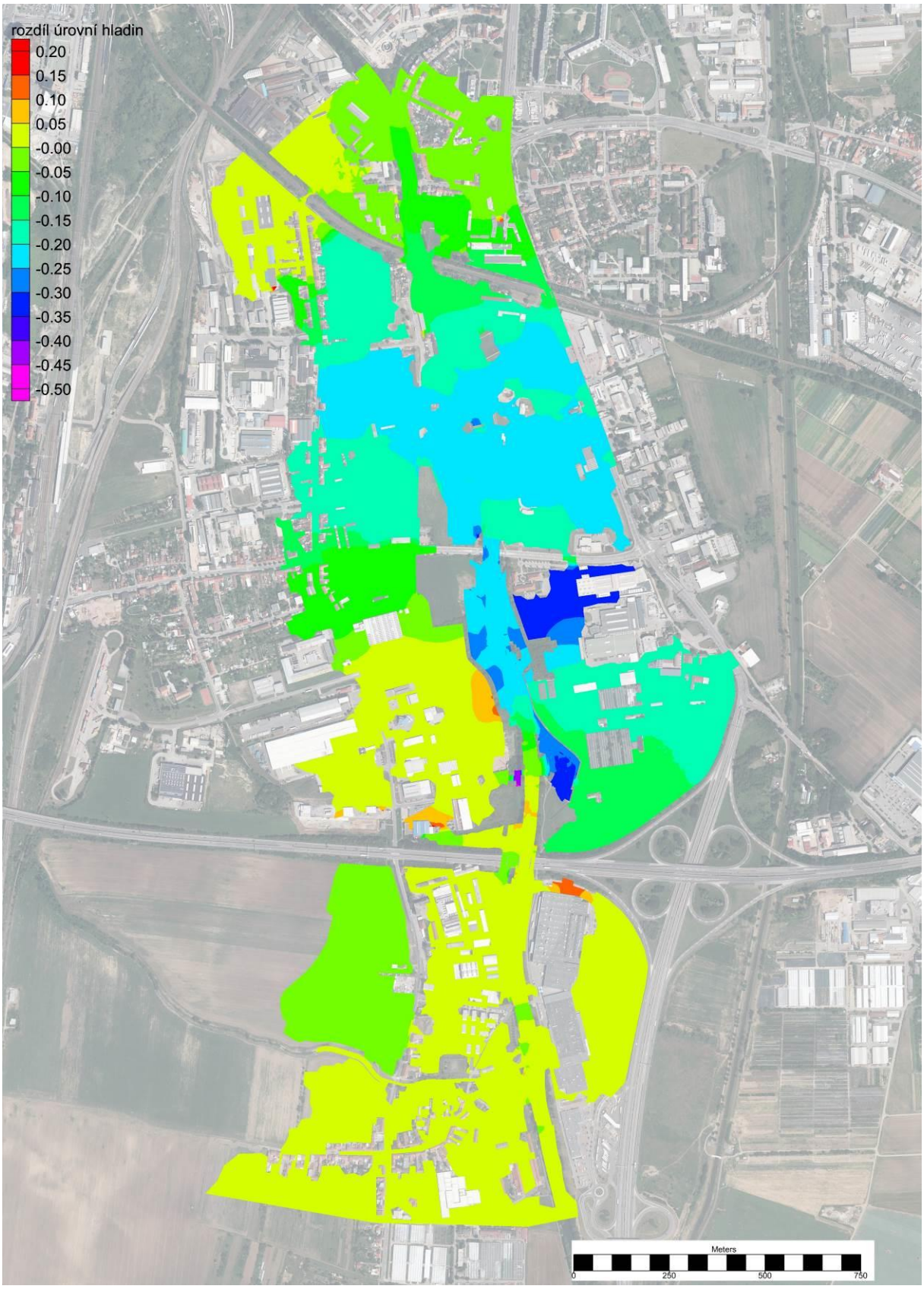
Při průtoku $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ je změna úrovně hladiny prakticky na celém území v rozmezí -0,2 m až 0,1 m. Úroveň hladiny je nad ulicí Sokolova níže. Pod dálnicí D1 a v její blízkosti je hladina vlivem zvětšeného průtoku územím (25 m^3/s) výše. Zvětšený průtok je vyvolán úpravami nad zájmovým úsekem (zde nejsou specifikovány). Významné zvýšení hladiny je pouze nad mostem D1, kde však neohrožuje žádné objekty a nemá vliv na mostní konstrukci.



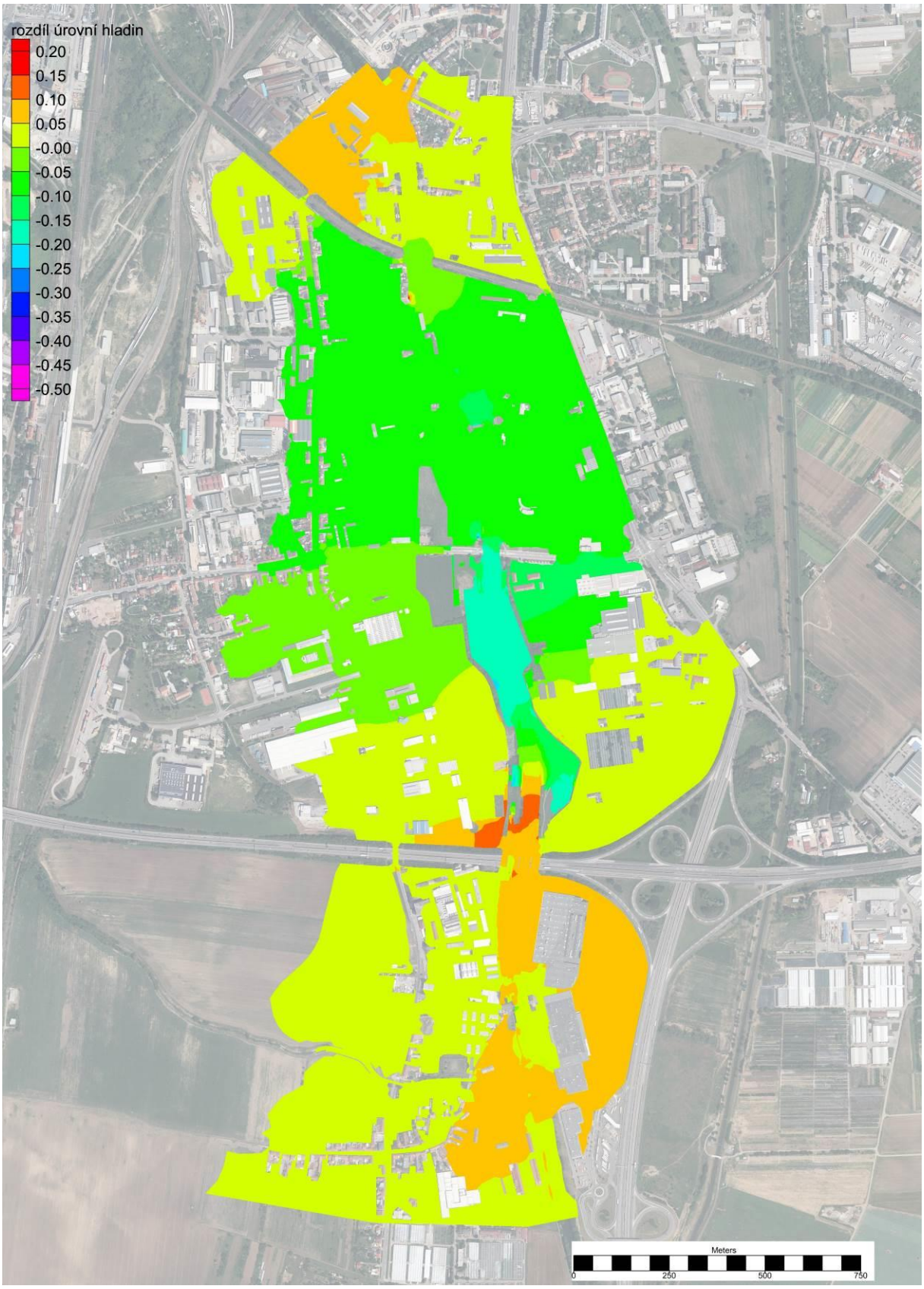
Obr. 31a Rozdíl úrovní hladiny za NS Q_{50} bez MPH oproti SS Q_{50}



Obr. 31 Změna úrovně hladiny v zájmovém území při NS s MPH a při Q_{50}



Obr. 32 Změna úrovně hladiny v zájmovém území při NS a při Q_{100}



Obr. 33 Změna úrovně hladiny v zájmovém území při NS a při $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$

7.2. Změna objemu vody v zájmové oblasti

Pro stanovení objemu vody v zájmové oblasti byl zhotoven rastr čtvercových prvků s jednotnou velikostí plochy S_i = 25 m^2.

U každého z nich byla stanovena hloubka vody h_i v jejich středu. Z hodnot byl vypočítán objem vody v každém prvku

$$V_i = S_i \cdot h_i$$

a celkový objem vody v zájmové oblasti

$$V = \sum_{i=1}^{N} V_i \,,$$

kde N je počet prvků.

Výsledné hodnoty a jejich rozdíly dokumentuje Tab. 9.

Tab. 9 Analýza objemů vody v zájmové oblasti

Označení průtoku Svratkou	Objem vody při SS [m^3]	Objem vody při NS [m^3]	Rozdíl objemu vody [m^3]	Relativní rozdíl [%]
Q_{50}	935 235	751 203 bez MPH	-184 032	-20
		586 491 s MPH	-348 744	-37
Q_{100}	1 415 246	1 349 889	-65 357	-5
$Q_{100\ \text{neovlivněný}}$	1 990 536	2 040 987	50 452	3

Z výsledků je patrné, že při Q_{100} a při $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ došlo pouze k malým změnám objemu vody v zájmovém území, kdežto při Q_{50} je změna zásadní. Je třeba upozornit, že změna odtokových poměrů při Q_{50} se projeví níže po toku, což by mohlo být řešeno vhodným kompenzačním opatřením.

8. Závěr

Numerické simulace a následné výpočty umožnily vyhodnotit proudění při třech průtocích ve Svratce Q_{50}, Q_{100} a $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ za stávajícího stavu a za návrhového stavu. Dále umožnily upravit navrhovaný stav tak, aby došlo k minimální změně úrovně hladiny a objemu vody v zájmovém území při průtocích Q_{100} a $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$.

Charakteristické parametry proudění jsou vyobrazeny v podobě map. Zobrazena je úroveň hladiny, svislicová rychlost a hloubka. Změny v proudění jsou dokumentovány změnou úrovně hladiny a změnou objemu vody v zájmové oblasti.

Při upraveném navrhovaném stavu se významně změní proudění vyvolané navrženými úpravami pouze při Q_{50}, kdy je použito mobilních protipovodňových hrazení. Při průtocích Q_{100} a $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ jsou změny v úrovni hladiny a v objemu vody v zájmovém území minimální.

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
řešitel

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
fakulta stavební
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB
LVV

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
vedoucí Ústavu vodních staveb

V Brně dne 16. 10. 2017

9. Literatura

Froehlich, D. C., 2003. User´s Manual for FESWMS FST2DH. Lexington: University of Kentucky.

Hardy, R., Bates, P., Anderson, M., 1998. The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments. Journal of Hydrology 216. 124-136.

Horritt, M., Bates, P., Mattinson, M., 2006. Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow. Journal of Hydrology 329. 306-314.

Kolář, V., Patočka, C., Bém, J., 1983. Hydraulika. Praha: SNTL.

Soares-Frazao, S., Lhomme, J., Guinot, V., Zech, Y., 2008. Two-dimensional shallow-water model with porosity for urban flood modeling. Journal of Hydraulic Research Vol. 46. No. 1. Pp. 45-64.

Zachoval, Z., 2001a. Vhodnost použití 2D matematických modelů přírodního spádového stupně vzhledem k návrhu tvaru objektu. In Voda a životní prostředí. Pavlov, NOEL 2000. 150 - 154. ISBN 80-86020-35-5.

Zachoval, Z., 2001b. Porovnání výsledků z matematických modelů přírodního spádového stupně "hrušky" s výsledky z modelu fyzikálního. Environmentálne aspekty navrhovania a prevádzky nádrží a priehrad, Vplyv vodohospodárskych stavieb na tvorbu a ochranu životného prostredia. Podbánské, ASCO Bratislava. 351-356. ISBN 80-88820-18-9.

Zachoval, Z., 2003a. Distribution of vertical velocities for different bed roughness measured by UVP Monitor. In XVIII. Symposium on anemometry. Úvaly u Prahy, AV ČR. ISBN 80-239-0644-5.

Zachoval, Z., 2003b. Application of Aquadyn, SMS and CCHE2D for the Description of Water Flow in Local Channal Widening. In International Conference of Water Service Science ICWSS 2003. Úbislav. 96-101. ISBN 80-214-2358-7.

Zachoval, Z., 2015a. 2D numerický model neustáleného proudění ve Svratce km 28,2 až km 47,7 a ve Svitavě km 0,0 až km 11,5

Zachoval, Z., 2015b. 2D numerický model proudění v úseku Svratky km 28,25 až km 33,17 a Svitavy km 0,00 až km 3,80.

10.Seznamy

10.1. Seznam veličin

symbol	název	jednotka
c	součinitel modelu turbulence	
g	tíhové zrychlení	[m/s^2]
h	hloubka	[m]
J	Jakobián matice prvku	[m^2]
n	součinitel (stupeň) drsnosti	
N	letost, počet prvků	
q	specifický průtok	[m^2/s]
Q	průtok (objemový)	[m^3/s]
u_*	třecí rychlost	[m/s]
v	svislicová rychlost	[m/s]
x	souřadnice	[m]
y	souřadnice	[m]
Z	úroveň	[m n. m.]
ρ	hustota	[kg/m^3]
υ	kinematická viskozita	[m^2/s]
τ	napětí	[Pa]
Indexy		
h	hladina	
t	turbulence	
x	směr x pravoúhlého souřadného systému	
y	směr y pravoúhlého souřadného systému	
0	základ, dno, referenční úroveň	

10.2. Seznam zkratek

Zkratka	Název
Bpv	baltský – po vyrovnání
D	dimenze (rozměr)
DMT	digitální model terénu
DOP	dolní okrajová podmínka
FAST	Fakulta stavební
HOP	horní okrajová podmínka
LVV	Laboratoř vodohospodářského výzkumu
MPH	mobilní protipovodňové hrazení
NS	navrhovaný stav
Q_N	N-letý průtok
SS	stávající stav
ÚVST	Ústav vodních staveb
VUT v Brně	Vysoké učení technické v Brně

10.3. Seznam obrázků

Obr. 1 Stávající rozliv (B_PPO_BRNO_1et_PREHLED_Q100_a_Q100_neovl.pdf) 3
Obr. 2 Navrhované úpravy (SOK-VOM_SIT.dwg) 4
Obr. 3 Úpravy mostního profilu (PŘÍČNÝ_ŘEZ_POD_MOSTEM.pdf) 5
Obr. 4 SS terénu 10
Obr. 5 NS terénu 11
Obr. 6 Specifikace typu drsnosti povrchu při SS 12
Obr. 7 Specifikace typu drsnosti povrchu při NS 13
Obr. 8 Výpočtová síť 14
Obr. 9 Otvory v hrázích (červené čáry) 17
Obr. 10 SS, Q_{50}, hloubka h [m] 19
Obr. 11 SS, Q_{50}, svislicová rychlost v [m/s] 20
Obr. 12 SS, Q_{100}, úroveň hladiny Z_h [m n. m.] 21
Obr. 13 SS, Q_{100}, hloubka h [m] 22
Obr. 14 SS, Q_{100}, svislicová rychlost v [m/s] 23
Obr. 15 SS, Q_{100}, úroveň hladiny Z_h [m n. m.] 24
Obr. 16 SS, $Q_{100\ \mathrm{neovlivněný}}$, hloubka h [m] 25
Obr. 17 SS, $Q_{100\ \mathrm{neovlivněný}}$, svislicová rychlost v [m/s] 26
Obr. 18 SS, $Q_{100\ \mathrm{neovlivněný}}$, úroveň hladiny Z_h [m n. m.] 27
Obr. 19 NS, Q_{50}, hloubka h [m] 29
Obr. 20 NS, Q_{50}, svislicová rychlost v [m/s] 30
Obr. 21 NS, Q_{50}, úroveň hladiny Z_h [m n. m.] 31
Obr. 22 NS s MPH, Q_{50}, hloubka h [m] 32
Obr. 23 NS s MPH, Q_{50}, svislicová rychlost v [m/s] 33
Obr. 24 NS s MPH, Q_{50}, úroveň hladiny Z_h [m n. m.] 34
Obr. 25 NS, Q_{100}, hloubka h [m] 35

Obr. 26 NS, Q_{100}, svislicová rychlost v [m/s] 36
Obr. 27 NS, Q_{100}, úroveň hladiny Z_h [m n. m.] 37
Obr. 28 NS, $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$, hloubka h [m] 38
Obr. 29 NS, $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$, svislicová rychlost v [m/s] 39
Obr. 30 NS, $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$, úroveň hladiny Z_h [m n. m.] 40
Obr. 31 Změna úrovně hladiny v zájmovém území při NS s MPH a při Q_{50} 42
Obr. 32 Změna úrovně hladiny v zájmovém území při NS a při Q_{100} 43
Obr. 33 Změna úrovně hladiny v zájmovém území při NS a při $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ 44

10.4. Seznam tabulek

Tab. 1 Hydrologická data Svratky (CHMU_2015_04_15.pdf) 7
Tab. 2 N-leté průtoky Leskavy v profilu nad Svratkou (CHMU_2015_04_15.pdf) 7
Tab. 3 Posuzované stavy s průtokovými a hladinovými poměry 7
Tab. 4 Součinitel drsnosti povrchu 15
Tab. 5 Použité průtoky při kalibraci 15
Tab. 6 Rozdíly vypočítané úrovně hladiny od požadované při Q_{50} 16
Tab. 7 Rozdíly vypočítané úrovně hladiny od požadované při Q_{100} 16
Tab. 8 Rozdíly vypočítané úrovně hladiny od požadované při $Q_{100\ \text{neovlivněný}}$ 16
Tab. 9 Analýza objemů vody v zájmové oblasti 45