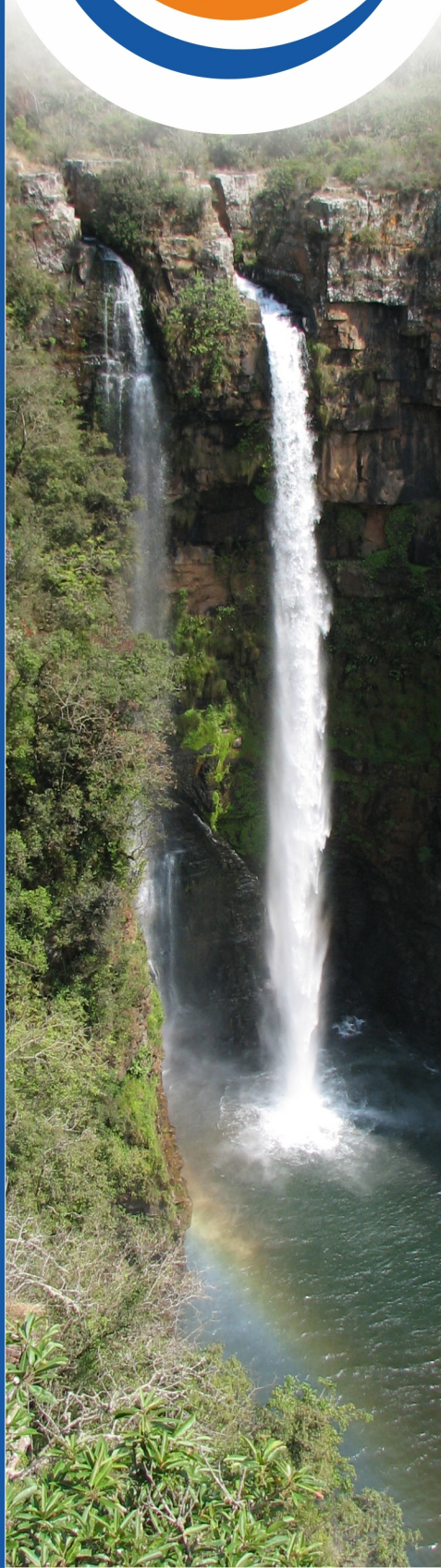




- hydrogeologie
- ochrana a sanace podzemních vod
- matematické modelování
- konzultační činnost



PPO Lužec nad Vltavou **Hydraulický numerický model**

konečná verze
15.zář 2020

Objednatel
AZ GEO, s.r.o.

PPO Lužec nad Vltavou

Hydraulický numerický model


Konečná verze

15. září 2020

Pro



Za firmu **Groundwater Consulting Services s.r.o.** zpracoval(i):

Jméno	Podpis
Ing. Jiří Beránek <i>autor</i>	

OBSAH

1.	Úvod	4
2.	Charakteristika zájmové oblasti	4
2.1.	Geomorfologické poměry	4
2.2.	Klimatické poměry	5
2.3.	Hydrografické a hydrologické poměry	5
2.4.	Geologie zájmové oblasti a blízkého okolí	5
2.5.	Hydrogeologické poměry	7
2.6.	Další charakteristiky	8
3.	Koncepční model	9
3.1.	Vymezení modelových vrstev	11
3.2.	Okrajové podmínky modelu	14
3.3.	Zdroje a propady hydraulického modelu	14
4.	Numerický model	15
4.1.	Model MODFLOW	18
4.2.	Modelový grid konečných rozdílů	19
4.3.	Kalibrace hydraulického modelu	19
4.3.1.	Kalibrace v ustáleném režimu proudění podzemních vod (stacionární kalibrace)	20
4.3.2.	Bilance stacionárního modelu	22
4.3.3.	Kalibrace v neustáleném režimu proudění podzemních vod (transientní kalibrace)	25
4.3.4.	Bilance transientního modelu	29
4.4.	Prediktivní simulace	30
4.4.1.	Simulování vlivu navržené hloubky založení PPO na průsaky podzemních vod do chráněného prostoru během povodňové vlny	31
4.4.2.	Simulování změn proudového pole v reakci na různou hloubku založení PPO	48
5.	Závěr	60
6.	Literatura	63

SEZNAM OBRÁZKŮ V TEXTU

Obrázek 2.1: Výřez geologické mapy 1 : 50 000 s vyznačením pozice zájmové oblasti.....	6
Obrázek 2.2: Mapa náchylnosti svahů k sesouvání.....	9
Obrázek 3.1: Koncepční model.....	10
Obrázek 3.2: Báze nivních sedimentů a antropogenních navážek v nastavení numerického modelu...	12
Obrázek 3.3: Báze štěrkového kolektoru v nastavení numerického modelu.....	13
Obrázek 4.1: Reprezentativní elementární objem	16
Obrázek 4.2: Kalibrační cíle – stacionární hydraulický model	22
Obrázek 4.3: Simulované hladiny podzemních vod stacionárního modelu, štěrkový kolektor	24
Obrázek 4.4: Kalibrační cíle – transientní hydraulický model.....	26
Obrázek 4.5: Srovnání pozorovaných s modelovanými hladinami p.v. – objekt St-45	27
Obrázek 4.6: Srovnání pozorovaných s modelovanými hladinami p.v. – objekt G1 V-121	27
Obrázek 4.7: Srovnání pozorovaných s modelovanými hladinami p.v. – objekt J3	28
Obrázek 4.8: Srovnání pozorovaných s modelovanými hladinami p.v. – objekt H10	28
Obrázek 4.9: Srovnání pozorovaných s modelovanými hladinami p.v. – objekt St-51	29
Obrázek 4.10: Schéma pro nastavení hloubek založení PPO pro scénáře #1 až #4	33
Obrázek 4.11: Schéma pro nastavení hloubek založení PPO pro scénář #5	34
Obrázek 4.12: Maxima hladin podzemních vod (m pod terénem): Scénář #1	38
Obrázek 4.13: Maxima hladin podzemních vod (m pod terénem): Scénář #2	39
Obrázek 4.14: Maxima hladin podzemních vod (m pod terénem): Scénář #3	40
Obrázek 4.15: Maxima hladin podzemních vod (m pod terénem): Scénář #4	41
Obrázek 4.16: Maxima hladin podzemních vod (m pod terénem): Scénář #5	42
Obrázek 4.17: Rychlost proudění podzemních vod štěrkového kolektoru během povodňové vlny: Scénář #1	43
Obrázek 4.18: Rychlost proudění podzemních vod štěrkového kolektoru během povodňové vlny: Scénář #2	44
Obrázek 4.19: Rychlost proudění podzemních vod štěrkového kolektoru během povodňové vlny: Scénář #3	45
Obrázek 4.20: Rychlost proudění podzemních vod štěrkového kolektoru během povodňové vlny: Scénář #4	46
Obrázek 4.21: Rychlost proudění podzemních vod štěrkového kolektoru během povodňové vlny: Scénář #5	47
Obrázek 4.22: Vliv hloubky založení PPO na režim podzemních vod: Scénář #1	49
Obrázek 4.23: Vliv hloubky založení PPO na režim podzemních vod: Scénář #2	50
Obrázek 4.24: Vliv hloubky založení PPO na režim podzemních vod: Scénář #3	51
Obrázek 4.25: Vliv hloubky založení PPO na režim podzemních vod: Scénář #4	52
Obrázek 4.26: Vliv hloubky založení PPO na režim podzemních vod: Scénář #5	53
Obrázek 4.27: Rychlost proudění podzemních vod štěrkového kolektoru za normálního režimu podzemních vod: Scénář #1	55
Obrázek 4.28: Rychlost proudění podzemních vod štěrkového kolektoru za normálního režimu podzemních vod: Scénář #2	56
Obrázek 4.29: Rychlost proudění podzemních vod štěrkového kolektoru za normálního režimu podzemních vod: Scénář #3	57

Obrázek 4.30: Rychlost proudění podzemních vod štěrkového kolektoru za normálního režimu podzemních vod: Scénář #4	58
Obrázek 4.31: Rychlost proudění podzemních vod štěrkového kolektoru za normálního režimu podzemních vod: Scénář #5	59

SEZNAM TABULEK V TEXTU

Tabulka 4.1: Vodní bilance kalibrovaného stacionárního hydraulického modelu	23
Tabulka 4.2: Vodní bilance kalibrovaného transientního hydraulického modelu.....	30
Tabulka 4.3: Modelový průběh povodňové vlny (Šindelář, 2017).....	31
Tabulka 4.4: Vypočtené průsaky podzemních vod štěrkového kolektoru zachycené v čerpacích jímkách (l/s)	36

1. Úvod

Firma Groundwater Consulting Services s.r.o. (GCS) byla oslovena firmou AZ GEO, s.r.o. za účelem sestavení numerického modelu proudění podzemních vod pro území obce Lužec nad Vltavou, jehož cílem by mělo být posouzení (1) vlivu navržené hloubky založení protipovodňové ochrany (PPO) na průsaky podzemních vod do chráněného prostoru během povodňové vlny a (2) vlivu hloubky založení PPO na přirozený režim podzemních vod v oblasti. V obou případech bylo předpokládáno, že toto založení bude plnit funkci hydraulické bariéry.

Obec Lužec nad Vltavou je situována na největším vltavském ostrově ohraničeném ze severu Vraňansko-hořínským Laterálním kanálem a z jihu řekou Vltavou (ř.km 7,38 - 9,01). Vltava má v této lokalitě charakter významného vodního toku s dílčími úpravami a ochrannými hrázemi. Obec je ohrožena povodňovými průtoky zejména ve Vltavě, přičemž je nutné zahrnout i vliv zpětného vzduť z Labe. V menší míře se může projevit i vliv povodňových průtoků v Berounce (Jandová, 2018).

Předkládaná zpráva je součástí projektu výstavby PPO Lužce nad Vltavou.

Veškeré mapové podklady jsou v souřadném systému S-JTSK, veškeré výškové kóty uvedené v textu jsou ve výškovém systému Balt po vyrovnání.

2. CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉ OBLASTI

2.1. Geomorfologické poměry

Regionální geomorfologická rajonizace reliéfu (Demek *a kol.*, 1987) zahrnuje zájmovou lokalitu do systému Hercynského, provincie Česká vysočina, subprovincie Česká tabule VI, oblasti Středočeské tabule VIB, celku Středolabská tabule VIB-3, podcelku Mělnická kotlina VIB-3C a okrsku Lužecká kotlina VIB-3C-a (<https://geoportal.gov.cz/web/guest/map>).

Krajina v širším okolí zájmové lokality je modelována erozní a akumulací činností řeky Vltavy a Labe. Zájmová oblast je reprezentována akumulacním typem reliéfu (niva Vltavy). Území má rovinný charakter. Terén je členěn četnými opuštěnými koryty, místy zaplněnými vodou (slepá ramena Vltavy). Morfologii terénu utvářela také antropogenní činnost – násypy hrází, vytěžené pískovny. Nadmořská výška terénu se pohybuje v intervalu 160 – 170 m n.m. Zájmové území generelně upadá k V.

2.2. Klimatické poměry

Klimaticky je zájmové území řazeno dle Atlasu podnebí ČR do oblasti A1 - teplé, suché, s mírnou zimou a s delším slunečním svitem. Podle základních klimatologických charakteristik (Quitt, 1971), se zájmové území nachází v teplé oblasti T2. Oblast T2 je charakterizována krátkým, mírným až mírně teplým jarem. Léto je teplé, suché a dlouhé. Přechodné období podzimu je krátké a teplé až mírně teplé. Zima je krátká, suchá až velmi suchá s poměrně krátkým trváním sněhové pokrývky. Průměrná teplota v lednu činí -2 až -3 °C, v červenci dosahuje průměrná teplota hodnot 18 až 19 °C. Trvání sněhové pokrývky je 40 – 50 dní. Roční suma srážek se pohybuje v rozmezí 550 – 700 mm, z toho 350 – 400 mm ve vegetačním období (Králík, Svárovský, 2020).

2.3. Hydrografické a hydrologické poměry

Hydrologicky náleží zájmové území do povodí Labe, do dílčího povodí 4. řádu toku Vltavy č.1-12-02-0950-0-00 a č.1-12-02-0970-0-00 a toku Vraňansko-hořinského plavebního kanálu č. 1-12-03-0020-0-00. Území je odvodňováno řekou Vltavou – směr toku od Z k V. Na severní hranici zájmové oblasti leží Laterální kanál (Vraňansko-hořinský), spád kanálu je od Z k V. Území je součástí hydrogeologického rajonu svrchní vrstvy č.1172 (Kvartér Labe po Vltavu) a součástí hydrogeologického rajonu základní vrstvy č.4530 (Roudnická křída). Jižní hranice zájmové oblasti kopíruje hranici aktivní zóny záplavového území (<https://heis.vuv.cz/>). Zájmová oblast se částečně nachází v záplavovém území pro Q5, Q20 a Q100 vodního toku Vltava (<https://heis.vuv.cz/>).

Zájmová oblast leží mimo ochranná pásma vodních zdrojů (<https://heis.vuv.cz/>) a není součástí velkoplošného ani maloplošného zvláště chráněného území.

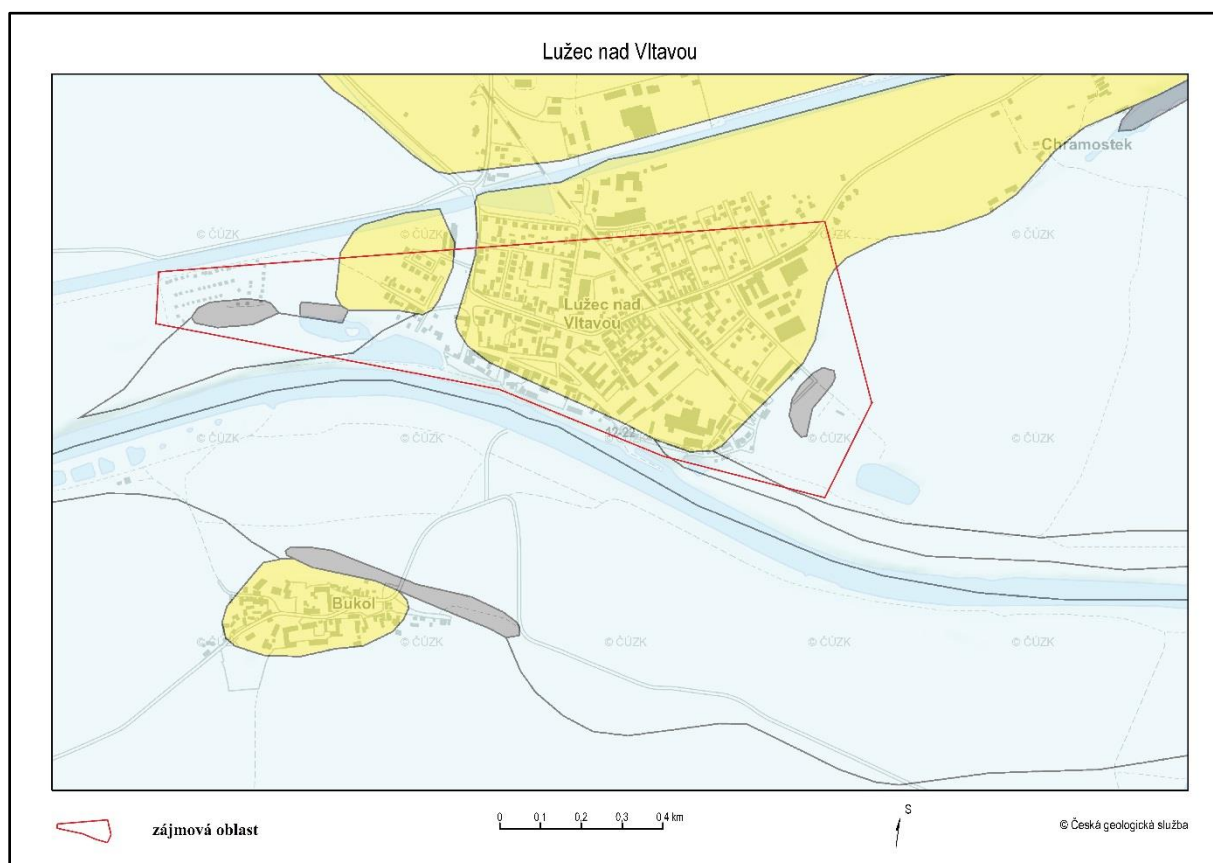
2.4. Geologie zájmové oblasti a blízkého okolí

Z regionálně geologického hlediska se předmětná lokalita nachází na území, které náleží do soustavy Českého masivu, oblasti křídý a regionu česká křídová pánev. Oblast je součástí regionální jednotky označované jako jizerský vývoj (<https://mapy.geology.cz/geocr50>).

Předkvartérní podloží širšího okolí zájmové oblasti je budováno křídovými, turonskými marinními sedimenty jizerského souvrství. Jizerské souvrství je produktem mělkomořské sedimentace (<https://heis.vuv.cz/>). Reprezentují jej vápnité jílovce, slínovce a opuky, v místech s přínosem materiálu se vyskytují středně zrnité, slínité a křemenné pískovce (Vižďa, Oberhelová, 2017). Reliéf povrchu předkvartérního podloží je modelován erozní činností řeky Vltavy. Křídové podloží zájmové oblasti je protnuto tektonickými poruchami převážně směru SZ-JV.

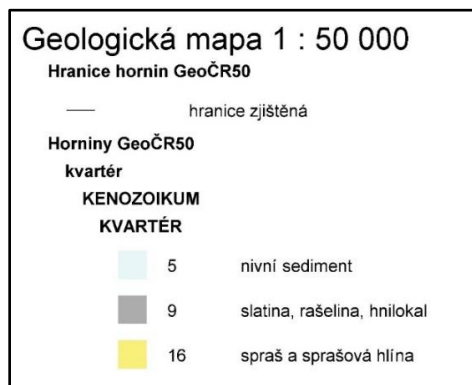
Kvartérní pokryv v zájmovém území dosahuje mocnosti v rozmezí od 5,7 m (V-14) do 15,1 m (V-126). Na tvorbě kvartérního pokryvu se významně podílely přírodní procesy spojené s erozivní a akumulací činností řeky Vltavy, případně Labe.

Kvartérní pokryv je reprezentován fluvialními, organickými, eolickými a antropogenními uloženinami, ojediněle se vyskytují sedimenty vodních nádrží.



Obrázek 2.1: Výřez geologické mapy 1 : 50 000 s vyznačením pozice zájmové oblasti

Legenda ke geologické mapě 1 : 50 000



Na předkvartérní křídové sedimenty v zájmové oblasti nasedají kvartérní, pleistocénní fluviální štěrky a písky. Jedná se o nesoudržné sedimenty. Štěrk má charakter štěrku s příměsí jemnozrnné zeminy, třídy/symbolu G3 G-F, štěrku špatně zrněného (G2 GP), méně štěrku dobře zrněného (G1 GW) a štěrku hlinitého a štěrku jílovitého (G4 GM, resp. G5 GC) (Králík, Svárovský, 2020). Průměrná mocnost štěrků v zájmové oblasti je cca 6,9 m (Králík, Svárovský, 2020). Fluviální středně až hrubozrnné písky jsou převážně charakteru písku s příměsí jemnozrnné zeminy, třídy/symbolu S3 S-F, méně písku špatně zrněného (S2 SP) a výjimečně písku hlinitého (S4 SM) (Králík, Svárovský, 2020). Průměrná mocnost písků v zájmové oblasti je cca 3,9 m (Králík, Svárovský, 2020). Štěrk a písky jsou středně ulehle.

Fluviální štěrky a písky pleistocénního stáří jsou dle geologické mapy, viz obrázek 2.1, místy překryty pleistocénními eolickými sedimenty – sprašemi a sprašovými hlínami (prostor obce Lužec nad Vltavou). Spraše a sprašové hlíny jsou obvykle reprezentovány nízko a středně plastickými jíly třídy/symbolu F6 CL, resp. F6 CI, ojediněle jíly písčitémi, F4 CS.

Kvartérní sedimenty pleistocénního stáří jsou překryty holocénními nivními sedimenty – fluviálními jíly a hlínami. Holocénní fluviální sedimenty se nevyskytují souvisle v celé ploše zájmového území. Jsou zastoupeny jílovitými, hlinitými a jílovito-písčitémi sedimenty o průměrné mocnosti cca 2 m (Králík, Svárovský, 2020). Tyto soudržné uloženiny jsou středně až vysoce plastické. Nivní sedimenty z hlediska zatřídění jsou reprezentovány jíly se střední plasticitou (F6 CI), méně jíly písčitémi (F4 CS), výjimečně hlínami s vysokou plasticitou (F7 MH) a jíly štěrkovitými (F2 CG) (Králík, Svárovský, 2020). Zvláštním typem nivních sedimentů jsou organické sedimenty. Tyto byly popsány v okolí obce Lužec, viz geologická mapa na obrázku 2.1.

Kvartérní komplex je ukončen vrstvou antropogenních navážek proměnlivého plošného rozsahu a charakteru. Antropogenní navážky byly v minulosti použity zpravidla k terénním úpravám a k budování hrází. Z hlediska zatřídění jsou reprezentovány soudržnými zeminami charakteru nízce plastických hlín (F5 Y/ML), štěrkovitých hlín (F1 Y/MG) a podřadně nesoudržnými zeminami charakteru štěrků s příměsí jemnozrnné zeminy (G3 Y/G-F), případně hlinitých štěrků (G4 Y/GM) (Králík, Svárovský, 2020). Navážky jsou překryty zpravidla tenkou vrstvou humózních hlín.

2.5. Hydrogeologické poměry

V zájmovém území jsou vyvinuty dva významné kolektory podzemních vod – puklinovo-průlinový cenomanský kolektor a mělký kvartérní kolektor.

Spodní puklinovo-průlinový cenomanský kolektor korycanských vrstev je vázaný převážně na svrchně křídové pískovce, které v zájmové oblasti dosahují mocnosti 0 až 58 m (Vižďa, Oberhelová, 2017). Tyto pískovce vykazují hodnoty transmisivity $T = 1 \cdot 10^{-5} - 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (Vižďa, Oberhelová, 2017). Směr proudění podzemní vody je k severovýchodu (Vižďa, Oberhelová, 2017). Tento kolektor je od nadložního mělkého kolektoru oddělen zvětralými slínovci a jílovci jizerského souvrství.

Mělký kvartérní hydrogeologický kolektor je vázan na propustné vrstvy štěrků a písků s průlinovou propustností. Mocnost štěrko-písků se v zájmové oblasti pohybuje v rozmezí 5,2 m (V-14) až 14,3 m (V-126). Štěrk dle realizovaných laboratorních analýz a hydrodynamických zkoušek vykazuje silnou

až dosti silnou propustnost v řádech $\times 10^{-2}$ až $\times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, více zahliněné štěrky mírnou až dosti slabou propustnost v řádech $\times 10^{-5}$ až $\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ (Králík, Svárovský, 2020). Fluviální písky dle realizovaných laboratorních analýz a hydrodynamických zkoušek vykazují dosti silnou až dosti slabou propustnost v řádech $\times 10^{-4}$ až $\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$, více zahliněné polohy pak slabou propustnost v řádech $\times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ (Králík, Svárovský, 2020). Tato zvědeň má převážně volnou až mírně napjatou hladinu podzemní vody (Králík, Svárovský, 2020). V některých oblastech bylo vrtů ověřeno více samostatných zvodní v různých hloubkových úrovních vázaných na kvartérní sedimenty (Králík, Svárovský, 2020). Směr proudění podzemní vody je směrem k řece Vltavě, tj. k J až JV (Vižďa, Oberhelová, 2017).

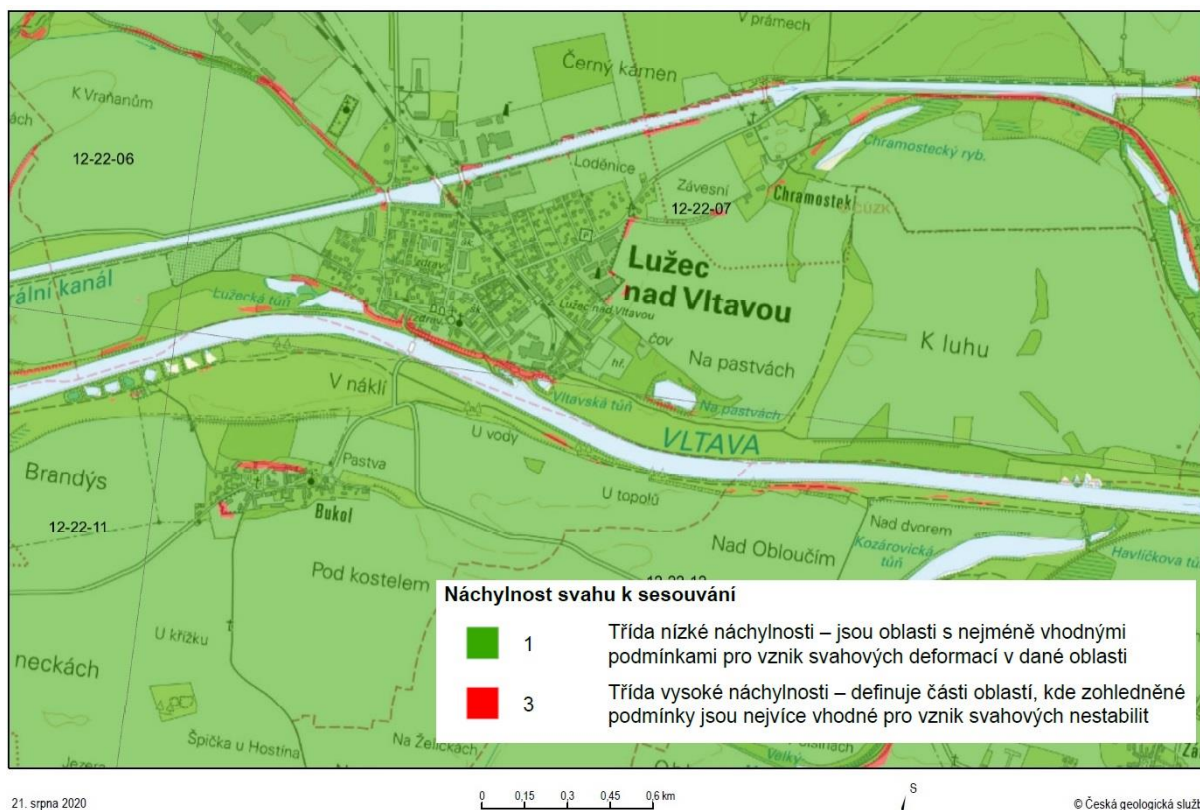
Nadložní (stropní) izolátor až poloizolátor mělké kvartérní zvodně je tvořen nivními, případně eolickými a antropogenními soudržnými zeminami. Dle realizovaných průzkumných prací průměrná mocnost nivních sedimentů je cca 2 m (Králík, Svárovský, 2020). Propustnost nivních sedimentů na základě laboratorních rozborů je v řádech $\times 10^{-7}$ až $\times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$ (Králík, Svárovský, 2020), dle Jetelovy klasifikace 1973, velmi slabá až nepatrná propustnost.

2.6. Další charakteristiky

Z hlediska výskytu svahových nestabilit (dle údajů ČGS – Geofondu ČR) nebyla v oblasti zjištěna žádná sesuvná území. Dle mapy náchylností svahu k sesouvání (viz obrázek 2.2) spadá převážná část území do 1. třídy náchylnosti, jedná se tedy o oblast s nejméně vhodnými podmínkami pro vznik svahových deformací. Levý nárazový břeh Vltavy lemuje úzká protáhlá oblast 3. třídy vysoké náchylnosti, tedy oblast, kde zohledněné podmínky jsou nejvíce vhodné pro vznik svahových nestabilit. Oblasti s 3. třídou vysoké náchylnosti svahů k sesouvání nalezneme také v prostoru východního okraje průmyslové zóny mezi ulicemi Tovární a U Křížku (oblast plánované výstavby PPO).

Vliv poddolování (dle údajů ČGS – Geofondu ČR) - zájmový prostor se nenachází v poddolovaném území.

Z hlediska seismicity ve vztahu k ČSN EN 1998-1, změna Z4 je referenční zrychlení podloží v okrese Mělník $a_{gR} < 0,03 \text{ g}$.

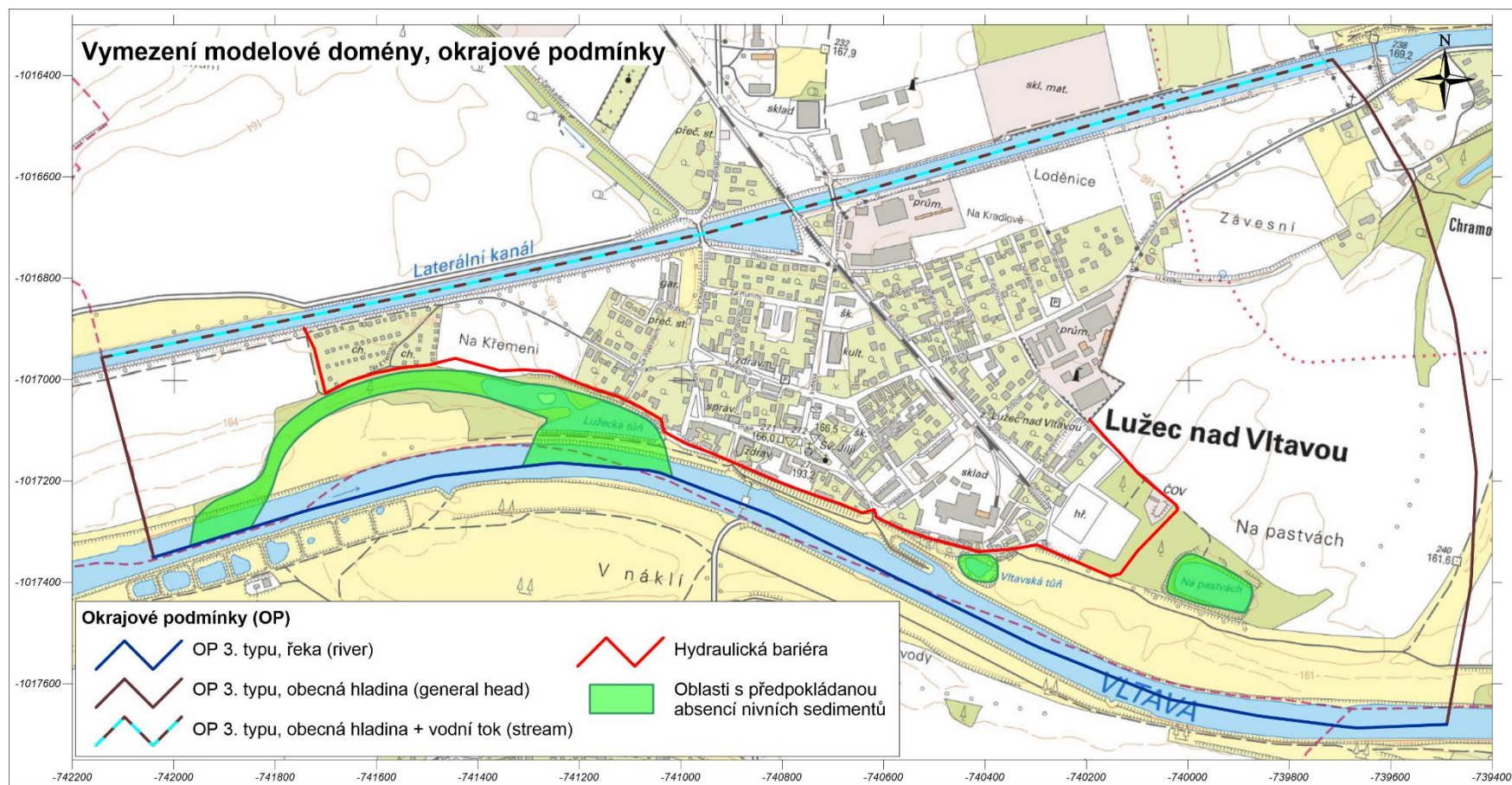


Obrázek 2.2: Mapa náchylnosti svahů k sesouvání

3. KONCEPČNÍ MODEL

V rámci koncepčního modelu je nutno vymezit zájmové území – rozsah modelované domény a její okrajové podmínky. Cílem je zvolit v maximální míře přirozené hydrogeologické podmínky, i když je zjevné, že z podstaty zadání se jedná o lokální hydraulický model, který většinou vyžaduje volbu kombinace přirozených a umělých hydraulických okrajových podmínek.

Modelované území je ze severu omezeno Laterálním kanálem Vraňany – Hořín, z východu a západu umělými okrajovými podmínkami vedenými v dostatečné vzdálenosti od zájmového území tak, aby neovlivnily simulace vlivu PPO na režim podzemních vod. Jižní ohraničení modelové domény pak bylo ztotožněno s řekou Vltavou. Rozloha modelovaného území, které je prezentováno na obrázku 3.1, byla přibližně 1,9 km².



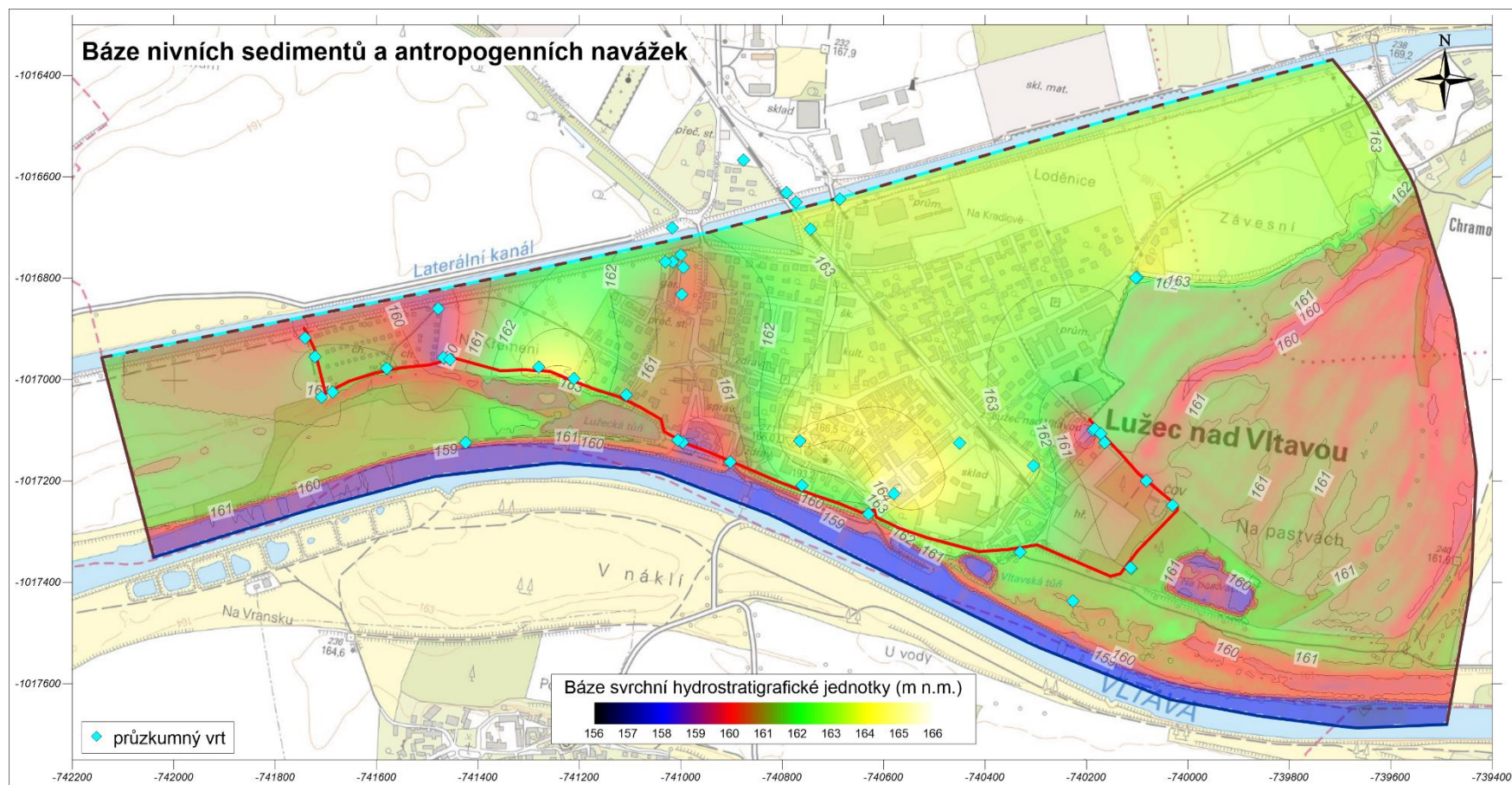
Obrázek 3.1: Konceptní model

3.1. Vymezení modelových vrstev

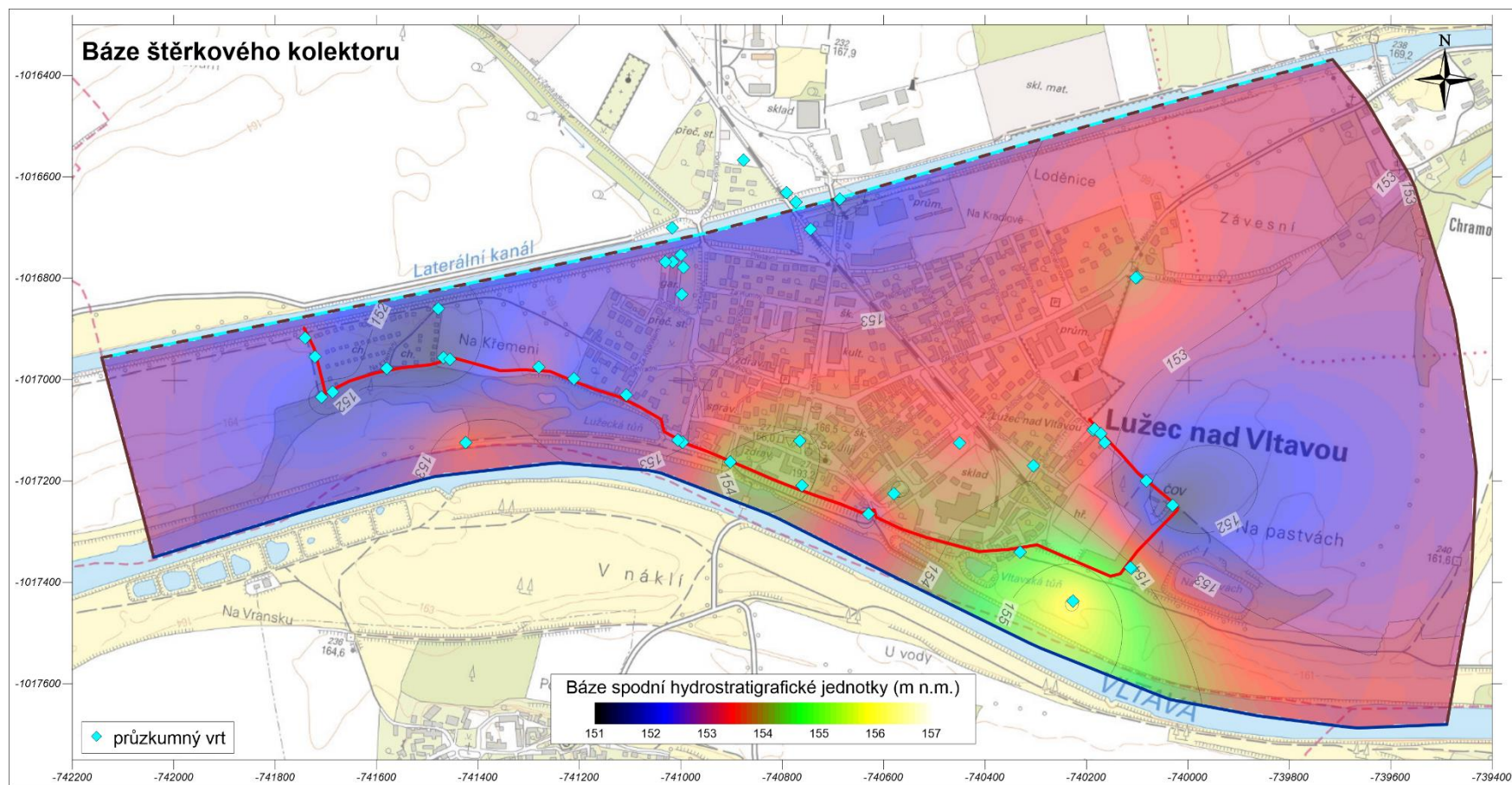
Z hlediska hydrogeologických poměrů byly definovány dvě hydrostratigrafické jednotky (shora dolů): 1. vrstva nivních sedimentů, která je místy doplněna, případně zcela alterována antropogenními navážkami (poloizolátor), a 2. vrstva průlinově propustných fluvialních sedimentů charakteru písčočterků až šterkopísků (kolektor). Pro krycí vrstvu nivních sedimentů a antropogenních navážek byla vyčleněna jedna modelová vrstva. Z hlediska plošného rozšíření bylo předpokládáno, že tento horizont není vyvinut v celé modelové doměně a byl buď denudován, a to podél slepého ramene Vltavy v západní části modelu, anebo odtěžen (či jinak odstraněn) v prostoru vodní plochy. Na pastvách jihovýchodně od obce. V těchto místech byly modelové vrstvě reprezentující nivní sedimenty přiřazeny hydraulické charakteristiky odpovídající podložnímu kolektoru.

Druhá hydrostratigrafická jednotka fluvialních sedimentů byla rozčleněna do dvou modelových vrstev. Rozhraní mezi těmito dvěma vrstvami v naprosté většině modelové doměny půlilo celkovou mocnost šterkového kolektoru, pouze v bezprostřední blízkosti PPO bylo toto rozhraní posouváno v závislosti na simulované hloubce založení PPO.

Všechny tři modelové vrstvy byly simulovány v podmínkách přechodné hladiny, kdy model sám v průběhu výpočtu rozhodoval, zda byla hladina podzemních vod volná či napjatá. Mocnosti obou hydrostratigrafických jednotek byly definovány na základě archivních dat i aktuálního inženýrsko-geologického průzkumu (IGP). Na obrázcích 3.2 a 3.3 jsou dokumentovány báze jednotlivých hydrostratigrafických jednotek.



Obrázek 3.2: Báze nivních sedimentů a antropogenních navážek v nastavení numerického modelu



Obrázek 3.3: Báze štěrkového kolektoru v nastavení numerického modelu

3.2. Okrajové podmínky modelu

Z hlediska koncepce modelového řešení bylo nutné v maximální možné míře vyhovět dvěma (často protichůdným) základním požadavkům:

- modelovaná oblast by měla být ohraničena přirozenými geologickými a hydrogeologickými hranicemi, tedy pokud možno zahrnovat celou hydrogeologickou strukturu, a
- modelový grid musí odpovídat požadované úrovni detailu z hlediska řešeného problému.

Generelní směr proudění podzemních vod v modelované hydrogeologické struktuře je přibližně ve směru SSZ-JJV. Okrajové podmínky (OP) modelu byly nastaveny následovně:

- Západní a východní OP byla pro 1. modelovou vrstvu (hydrostratigrafická jednotka nivních sedimentů a antropogenních navážek) nastavena jako OP 2. typu, kde $Q = 0$. Pro 2. a 3. modelovou vrstvu (hydrostratigrafická jednotka štěrkového kolektoru) byla použita OP 3. typu $Q = f(H)$ v nastavení MODFLOW obecná hladina GHB.
- Laterální kanál, který ohraničuje území ze severu, byl simulován OP 3. typu v nastavení obecného vodního toku, což v modifikaci pro MODFLOW představuje „stream“ SFR2, kdy model kontroluje výměnu vody mezi povrchovým tokem a podzemní vodou. To umožnilo simulovat vypuštění a opětovné napuštění Laterálního kanálu, ke kterému došlo na jaře 2020. V rámci modelové domény je Laterální kanál zhruba do první třetiny založen v nivních sedimentech, ve zbylém úseku pak ve štěrkopísčitých horninách fluvialního kolektoru (Plecitý, 2014). Okrajová podmínka SFR2 byla proto použita pro 1. nebo 2. modelovou vrstvu tak, aby její nasazení odpovídalo tomuto popisu.
- Severní OP byla ve 3. modelové vrstvě nastavena jako OP 3. typu v nastavení obecná hladina.
- Řeka Vltava, vymezující modelové území z jihu, byla simulována ve 2. a 3. modelové vrstvě OP 3. typu v nastavení řeka, což v MODFLOW představuje balíček (package) „river“ RIV.

3.3. Zdroje a propady hydraulického modelu

Hlavními zdroji byly infiltrace ze srážek a přetok podzemních vod přes okrajové podmínky modelu. Parametr infiltrace ze srážek byl parametrem kalibrovaným, přičemž území modelu bylo rozděleno do 2 zón: (1) extravilán obce na západním a východním okraji modelové domény s převažujícím půdním pokryvem charakterizovaným jako louky, pastviny a pole a (2) intravilán obce v centrální části modelové domény. Výchozí hodnota infiltrace byla nastavena tak, aby specifický základní odtok modelu odpovídal přibližně 2 l/s/km^2 .

Přetoky podzemních vod přes okrajové podmínky modelu byly součástí kalibrace. Jako počáteční odhad sloužily výpočty zohledňující rozsah a geologické složení infiltračního zázemí dané okrajové podmínky.

Dalším, byť menším zdrojem, byla břehová infiltrace Laterálního kanálu. Hydraulická vodivost dnových sedimentů, resp. hydraulické bariéry ve dně kanálu, byla kalibrovaným parametrem.

Evapotranspirace nebyla, vzhledem k charakteru modelovaného území, kde převládá intravilán obce, případně travnatý porost či polní plodiny, do modelu implementována přímo, ale skrze redukovanou infiltraci ze srážek, tzv. efektivní infiltraci. Hladina podzemních vod se v zájmovém území nachází vesměs v hloubkách větších než 5 m pod terénem, výška kapilární tržně lze vzhledem k charakteru hornin kolektoru (prakticky čisté písčokopřesky až štěrkopřesky) odhadovat na první desítky centimetrů nad hladinou podzemních vod, zcela jistě však <1 m. To jsou hloubky pro běžné traviny či polní plodiny kořenovým systémem nedosažitelné. Hlavním zdrojem vody pro rostliny tak jsou atmosférické srážky, které jsou zachyceny v přípořehové zóně zvodnění a které ještě nedosáhly hladiny pozemních vod. Pro účely této studie tak bylo možno zjednodušit vliv vegetačního krytu na vodní bilanci modelovaného území na snížení hodnot infiltrace ve vegetačním období.

Nejvýznamnějším propadem byla drenáž podzemních vod do řeky Vltavy. Hladiny na této OP byly nastaveny v souladu s pozorováními ČHMÚ na vodoměrném profilu Vltava-Vraňany. Konduktance OP byla opět kalibrovaným parametrem.

V modelu byly pomínuty neregistrované lokální odběry z domovních studní. Z bilančního hlediska se jedná o zanedbatelnou chybu z důvodu malých čerpaných množství na jedné straně (vesměs <0,1 l/s) a velkých transmisivit štěrkového kolektoru na straně druhé.

4. NUMERICKÝ MODEL

Odvození řídicích rovnic hydrogeologických procesů je založeno na principech zachování hmoty, hybnosti a energie. Základním principem je, že rozdíl hmoty, hybnosti nebo energie vstupující do a vystupující z elementárního objemu kolektoru v daném časovém intervalu je roven změně zásob této veličiny v daném objemu.

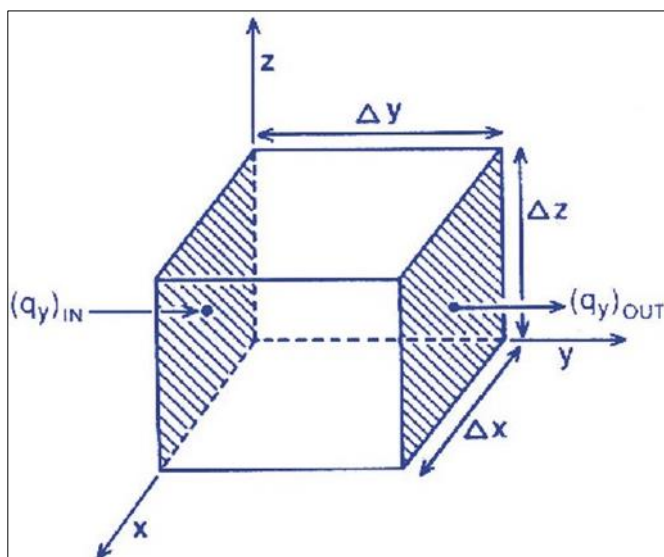
Odvození jednotlivých rovnic kontinuity spočívá ve vyjádření rovnováhy formou matematických rovnic. Jakmile je rovnice kontinuity vyjádřena matematicky, je nutno ještě specifikovat další vztahy mezi proměnnými tak, aby rovnice byla řešitelná. Může jít např. o termodynamické vztahy (vliv tlaku a teploty na hustotu tekutiny). Výsledkem odvození je zpravidla soustava parciálních diferenciálních rovnic v trojrozměrném kartézském souřadnicovém systému.

V této kapitole budou prezentovány základní principy odvození rovnice proudění podzemní vody v saturované zóně. Je nutno zdůraznit, že tato rovnice byla odvozena na základě určitých předpokladů a mohla by být uvedena v obecnější (komplexnější) formě. Uváděné řídicí rovnice jsou ovšem nejběžněji užívané.

Proudění podzemní vody v saturované zóně v průlinovém prostředí je možno popsat následující diferenciální rovnicí (Anderson, Woessner, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm R^* \quad (1)$$

Rovnice (1) je matematicky odvozena kombinací rovnice kontinuity (water mass balance) s Darcyho zákonem, jež je vyjádřením zachování hybnosti. Odvození je vztaženo k elementu pórovitého materiálu (obrázek 4.1), který je dostatečně velký, aby byl reprezentativní z hlediska vlastností pórovitého prostředí a dostatečně malý, aby změna hladiny v rámci daného objemu byla zanedbatelná. Tento element pórovitého materiálu je označován jako reprezentativní elementární objem REV (Representative Elementary Volume).



Obrázek 4.1: Reprezentativní elementární objem

Rovnici kontinuity (zákon zachování hmoty) je možno koncepčně vyjádřit jako

PŘÍTOK – ODTOK = ZMĚNA ZÁSOB.

Vyjádříme-li její jednotlivé členy specifickým průtokem \mathbf{q} (objemový průtok přes plochu), dostaneme rovnici (2):

$$\frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial z} + \rho R^* = \frac{\partial(n\rho)}{\partial t} \quad (2)$$

Hustota vody ρ se mění v závislosti na teplotě, množství rozpuštěných látek a vcelku nepatrně na tlaku (voda je velmi nízko stlačitelnou tekutinou). Nemění-li se v hydrodynamickém systému výrazně teplota ani obsah rozpuštěných látek, jsou hustotní změny velmi malé. Za této podmínky jsou parciální derivace

hustoty na levé straně rovnice zanedbatelné, zatímco derivace podle času na pravé straně může být vztažena k piezometrické úrovni. Výsledná rovnice potom je:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm R^* \quad (3)$$

Tato rovnice je ovšem prakticky obtížně použitelná, neboť \mathbf{q} není možno přímo měřit. Darcyho zákon definuje vztah mezi \mathbf{q} a \mathbf{h} , přičemž hladina \mathbf{h} je již přímo měřitelná proměnná. Darcyho zákon je možno ve třech směrech zapsat takto:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (4)$$

Po dosazení rovnic (4) do rovnice (3) získáme výše uvedenou diferenciální rovnici proudění podzemní vody (1).

Odvození této rovnice je založeno na předpokladu, že hlavní komponenty tensoru koeficientu filtrace jsou rovnoběžné s osami souřadného systému (tj. osy souřadného systému odpovídají hlavním směrům anizotropie). Pouze v tomto případě jsou složky tensoru mimo hlavní diagonálu nulové. V obecnějších případech by výše uvedené rovnice měly namísto tří složek devět.

Tensor koeficientu filtrace je možno obecně zapsat:

$$\begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

V případě orientace souřadného systému ve směru hlavních směrů anizotropie se tensor redukuje na třísložkový, neboť $K_{yx}=K_{xy}=0$, $K_{zx}=K_{xz}=0$ a $K_{zy}=K_{yz}=0$:

$$\begin{bmatrix} K_{xx} \\ K_{yy} \\ K_{zz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Následující text popisuje problematiku sestavování koncepčních modelů, a to především s ohledem na jejich následné využití pro numerické modely.

4.1. Model MODFLOW

MODFLOW je modulární hydrologický model vyvinutý USGS (U.S. Geological Survey). MODFLOW je považován za mezinárodní standard pro simulaci a předpovídání podmínek podzemních vod a interakcí podzemních a povrchových vod.

Původně vyvinutý a uvolněný výhradně jako kód simulace toku podzemních vod, byl poprvé publikován v roce 1984. Modulární struktura modulu MODFLOW poskytla robustní rámec pro integraci dalších simulačních funkcí, které vycházejí z jeho původního rozsahu a rozšiřují jej. Řada programů souvisejících s MODFLOW nyní zahrnuje schopnosti simulovat integrované systémy podzemní vody – povrchové vody, transport rozpuštěných látek, transport látek s proměnnou hustotou na bázi množství rozpuštěných solí (včetně solanek a slaných vod obecně), zhutňování zvodněných systémů v důsledků poklesů půdy, automatizovaný odhad hodnot vstupních parametrů modelu a obecně management podzemních vod.

MODFLOW je numerický model, který simuluje 3D proudění podzemních vod průlinovým prostředím nasycené zóny s využitím numerické metody konečných rozdílů. Numerický model je sestaven z tzv. balíčků, které řeší dílčí aspekty proudění podzemních vod horninovým prostředím. Modulární přístup umožnil kontinuální rozvoj modelu do současnosti. Skupiny balíčků lze vyčlenit takto:

- Balíčky sloužící pro kontrolu komunikace modelu;
- Balíčky pro diskretizaci modelu;
- Balíčky pro výpočet proudění uvnitř modelu. S různými verzemi modelu byl rozšiřován počet metod. Konkrétní druh zvoleného balíčku má vliv na možné volby konceptuálního modelu, a proto jsou zde uvedeny jejich názvy. V rámci hydrogeologického modelu může být použit jen jeden z nich. Nejstarší je BCF (Block-Centred Flow), pak následuje HUF (The Hydrogeologic Unit Flow), LPF (Layer Property Flow) a NWT (Newton), poslední pak GWF (pro USG);
- Balíčky pro definici okrajových podmínek, u kterých je průtok vody přes hranici funkcí hladiny podzemní vody na této hranici. Zde patří například balíčky simulující jezera, vodní toky, evapotranspiraci nebo drény. Obecně jde o různé typy okrajové podmínky III. typu;
- Balíčky pro definici okrajových podmínek I. a II. typu. Zde patří například čerpání ze studny (vrtů) nebo infiltrace ze srážek;
- Balíčky tzv. řešičů (solverů), které realizují různé varianty numerických metod řešení soustav algebraických rovnic modelu při daných okrajových a počátečních podmínkách;
- Balíčky určené pro kalibraci modelu;
- Další pomocné balíčky.

Numerický model je volně ke stažení na stránkách USGS, včetně zdrojových kódů a zkompilovaných kódů pro operační systémy Windows, UNIX, či Linux. MODFLOW je jedním z mnoha modelů vyvinutých USGS nebo pro USGS a je zároveň základem pro jiné numerické modely, jako je například MODPATH (Particle tracking) nebo MT3DMS (transportní model).

Vstupy modelu mohou tvořit formátované ASCII soubory nebo binární soubory. Výstupem simulace hydrogeologického modelu, postaveného v numerickém modelu MODFLOW, jsou ASCII soubory s těmito informacemi:

- vypočítané hladiny podzemních vod,
- poklesy hladin,
- změna zásob v modelové buňce,
- přetoky mezi modelovanými buňkami.

Na základě těchto výstupů je možno stanovit vodní bilance pro celý model, jeho části, okrajové podmínky či stanovené průřezy.

Hydraulický numerický model byl zpracován jako trojdimenzionální na bázi numerické metody konečných rozdílů verifikovaným softwarem MODFLOW-NWT (Niswonger *et al.*, 2011) v prostředí GMS 10.x (Groundwater Modeling System).

MODFLOW-NWT je jedna z verzí MODFLOW kódu, která představuje Newton-Raphsonovu formulaci MODFLOW-2005 a která zlepšuje numerické řešení v prostředí s volnou hladinou podzemních vod, zejména pak nelinearit vyplývajících z periodického vysychání a opětovného zavodňování elementů/buněk modelu (<https://www.usgs.gov/software/modflow-nwt-a-newton-formulation-modflow-2005>).

4.2. Modelový grid konečných rozdílů

Celá modelovaná oblast byla diskretizována pravoúhlou sítí bloků, jejichž půdorysná velikost bloků byla zvolena 5 x 5 m a byla jednotná v celé modelové doméně. Grid byl rotován s ohledem na tvar oblasti, generelní směr proudění podzemních vod a s cílem snížení počtu neaktivních bloků. Modelovaná oblast pokrývá území cca 2,6 x 1,4 km. Velikost gridu je 524 x 272 buněk, tj. 427 584 buněk ve všech modelových vrstvách celkem. Z tohoto množství bylo 232 140 buněk aktivních.

4.3. Kalibrace hydraulického modelu

Hydraulický model byl kalibrován ve dvou krocích: v prvním kroku byl model zkalibrován v ustáleném režimu proudění podzemních vod (stacionární kalibrace) na pozorování hladin podzemních vod v březnu 2019. Druhý krok sestával z kalibrace v neustáleném režimu proudění podzemních vod (transientní kalibrace) na pozorování hladin podzemních vod v období od března 2019 do června 2020.

4.3.1. Kalibrace v ustáleném režimu proudění podzemních vod (stacionární kalibrace)

Kalibrovaný hydraulický model v ustáleném režimu proudění podzemních vod sloužil jako výchozí simulace modelu v režimu neustáleném. Pro tento typ kalibrace byly jako kalibrační cíle použity hladiny podzemních vod zaměřené v březnu 2019 ve 14 objektech. Zaměřený hydrologický stav bylo nutno vzhledem k časovému horizontu řešení úkolu přijmout jako kvazistacionární.

Kalibrovanými parametry byly hydraulická vodivost horninového prostředí jak horizontální K_{xy} , tak i vertikální K_z , efektivní infiltrace srážkových vod¹, hydraulická vodivost dnových sedimentů vodních toků a konduktance okrajových podmínek III. typu na vnějších hranicích modelu. Parametr efektivní infiltrace byl kalibrován ve dvou výše zmiňovaných zónách, uvnitř kterých byl považován jako konstantní, hydraulické vodivosti horninového prostředí byly kalibrovány pro svrchní hydrostratigrafickou jednotku zonálně a pro spodní hydrostratigrafickou jednotku za pomoci metody tzv. „pilot points“. Parametry hydraulické vodivosti dnových sedimentů a konduktance vnějších okrajových podmínek (OP) byly kalibrovány po úsecích s konstantní hodnotou dané veličiny.

Model byl velmi citlivý i na malé změny všech výše uvedených parametrů. Citlivá reakce na změny parametru infiltrace ze srážek je typická zejména pro oblasti s mělkými hladinami podzemních vod důsledkem faktu, že i malá změna je vzhledem k rozsahu území bilančně velmi významná.

Další soubor nejistot pramenil z nerovnoměrného plošného rozložení kalibračních bodů, což ve svém důsledku implikuje i nerovnoměrnost míry nejistoty kalibrace. Další nejistoty řešení vycházejí principiálně také z faktu, že nejsme schopni spolehlivě definovat ustálený stav, který je v podstatě teoretickou fikcí.

V průběhu kalibrace byly laděny hodnoty K_{xy} a K_z , které se v jednotlivých modelových vrstvách pohybovaly:

- K_{xy} u první modelové vrstvy nivních sedimentů a antropogenních navážek v řádech od $x \cdot 10^{-5}$ do $x \cdot 10^{-6}$ m/s, K_z pak v řádech od $x \cdot 10^{-6}$ do $x \cdot 10^{-7}$ m/s.
- K_{xy} u druhé modelové vrstvy šterkového kolektoru v řádech mezi $x \cdot 10^{-5}$ a $x \cdot 10^{-3}$ m/s. Průměrná hodnota K_{xy} (parametr hydraulické vodivosti vykazoval normální rozdělení) pro celé území pak dosahovala hodnoty $1,0 \cdot 10^{-3}$ m/s, K_z pak v řádech $x \cdot 10^{-6}$ až $x \cdot 10^{-4}$ m/s, s průměrnou hodnotou $3,0 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Konduktance okrajové podmínky na přetoku z a do modelu (general head boundary) se na území modelu pohybovala v řádech od $x \cdot 10^{-5}$ do $x \cdot 10^{-4}$ m²/s/m. Hydraulická vodivost dnových sedimentů Laterálního kanálu (stream boundary) se pohybovala v řádu od $x \cdot 10^{-9}$ do $x \cdot 10^{-3}$ m/s. Konduktance okrajové podmínky řeky Vltavy pak byla v celé modelové doméně $9,0 \cdot 10^{-5}$ m/s.

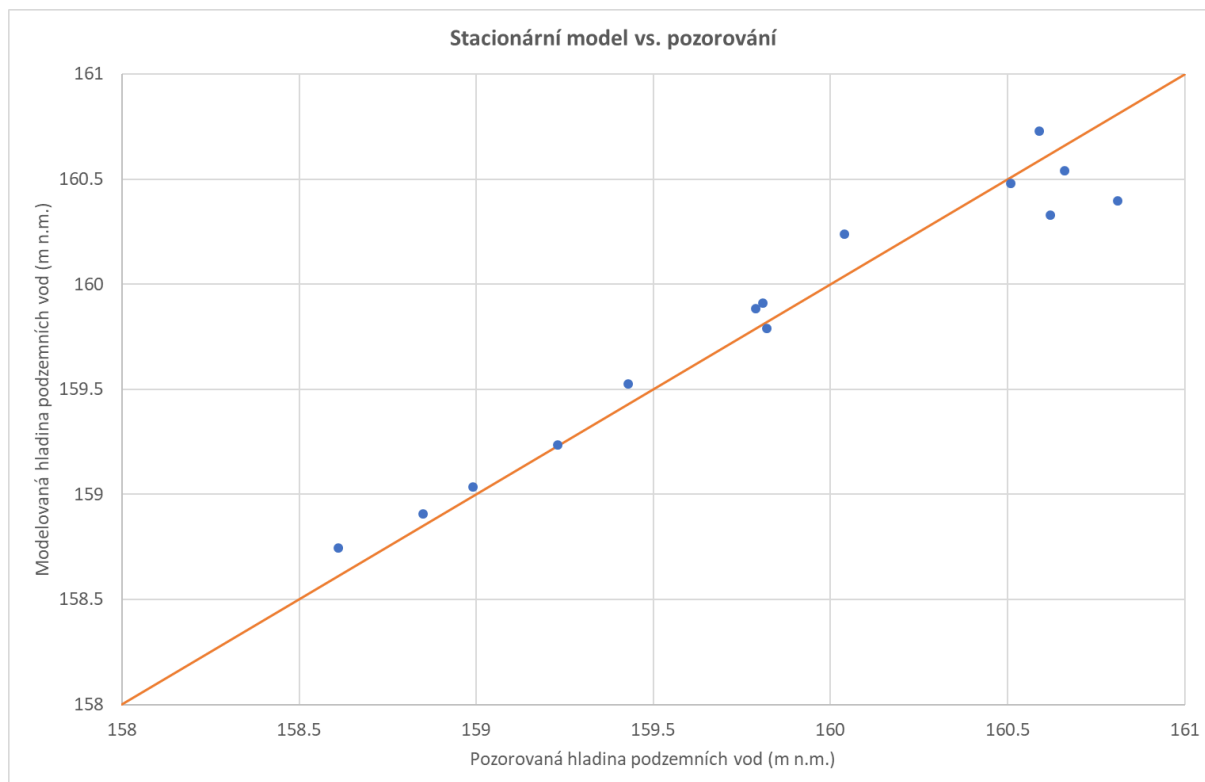
¹ Efektivní infiltrace = Infiltrace – Evapotranspirace. V popisovaném hydraulickém modelu byla evapotranspirace zahrnuta do parametru efektivní infiltrace.

Kalibrovaný stacionární model musel při simulaci reagovat v souladu s realitou. Shoda byla hodnocena na základě srovnání simulovaných hladin s hladinami podzemních vod zaměřenými ve všech vybraných objektech. Úspěšnost kalibrace se hodnotí prostřednictvím následujících statistických veličin:

- průměrná odchylka $ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i$,
- průměrná absolutní odchylka $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_m - h_s|_i$,
- kvadratický průměr chyby $RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2}$,
- normalizovaný RMS $RN = \frac{RMS}{H_{\max} - H_{\min}}$,

kde h_m je měřená hladina v pozorovacím objektu, h_s je hladina simulovaná v témže objektu, n je celkový počet měření/analýz, H_{\max} a H_{\min} jsou maximální a minimální měřená hladina v celém souboru dat z monitoringu.

Kalibrace byla ukončena s průměrnou odchylkou $ME = <1$ mm, průměrnou absolutní odchylkou $MAE = 13$ cm, kvadratickým průměrem chyby $RMS = 17$ cm a s normalizovanou RMS RN 7,5 %. Graf na obrázku 4.2 ukazuje vztah simulovaných a měřených hladin pro jednotlivé pozorovací vrty. Při absolutní shodě body vytváří přímkou. Z obrázku je vidět, že úroveň shody je dostatečná.



Obrázek 4.2: Kalibrační cíle – stacionární hydraulický model

4.3.2. Bilance stacionárního modelu

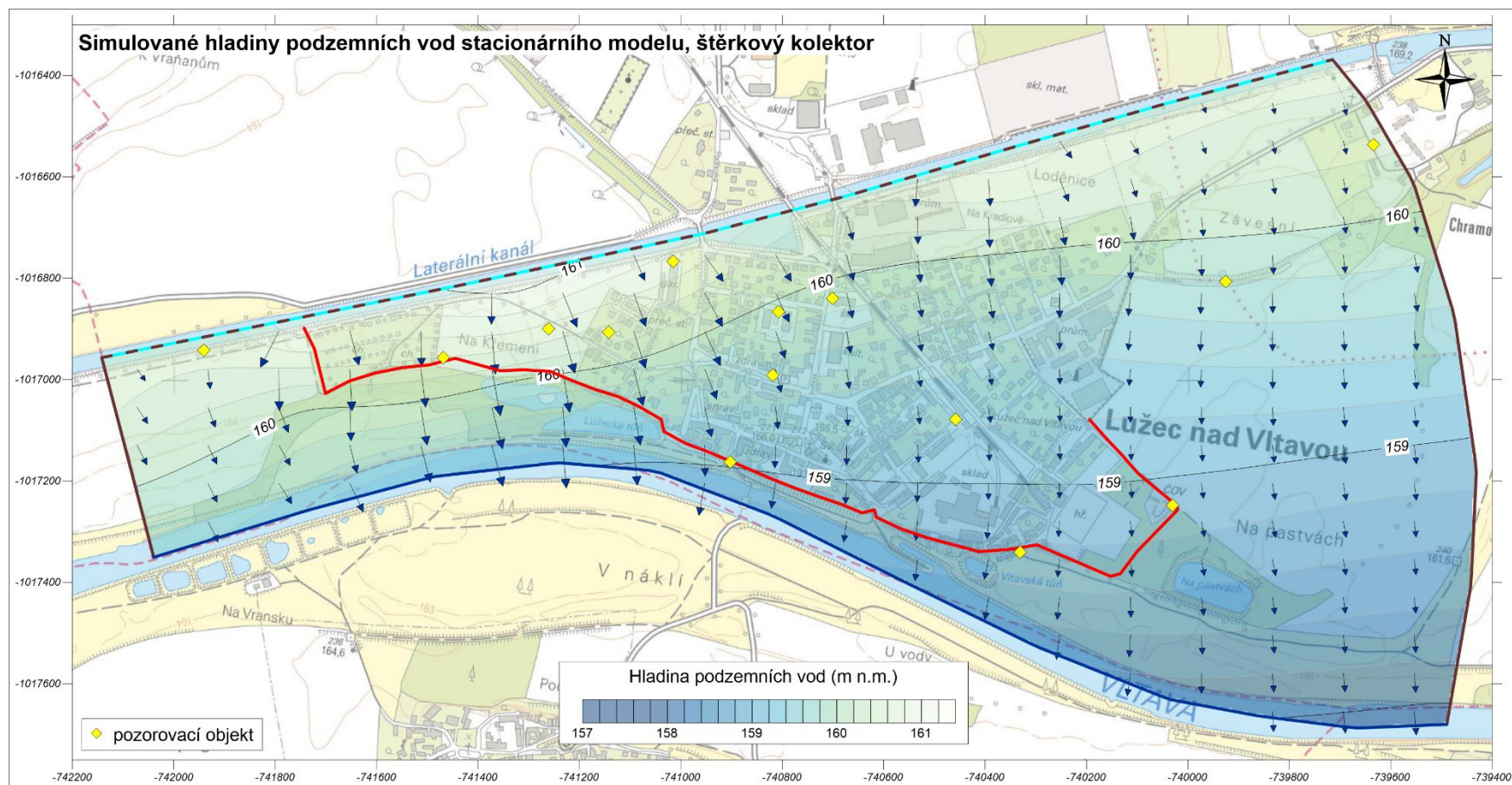
Komentáře k vodní bilanci stacionárního hydraulického modelu, která je prezentována v souhrnné tabulce 4.1, lze shrnout do následujících bodů:

- Celkové zdroje modelu včetně indukovaných, tj. efektivní infiltrace ze srážek (rozdíl mezi infiltrací a evapotranspirací) + přetoky přes okrajové podmínky + břehová infiltrace Laterálního kanálu, byly vypočteny na 45 l/s.
- Největší přítoky do modelu přes vnější hranice byly situovány na severní hranici modelované oblasti.
- Drenáž podzemních vod do Vltavy představovala největší odtok z modelu, přičemž tento propad byl modelem vyčíslen na 43 l/s, tj. >95% jeho celkové hodnoty 45 l/s.
- Břehová infiltrace z Laterálního kanálu dosahovala hodnot přibližně 10 l/s.
- Celková infiltrace ze srážek je cca 11 l/s, což při rozloze modelovaného území 1,9 km² odpovídá specifickému základnímu odtoku 5,8 l/s/km². Tuto hodnotu je nutno chápat v kontextu, v jakém byla získána, tj. stacionárním modelem kalibrovaným na hladiny z března 2019. Jedná se o teoretickou hodnotu odpovídající teoretickému konstruktivnímu ustálenému proudění podzemních vod. S jistou mírou zjednodušení lze říct, že hodnota specifického základního odtoku 5,8 l/s/km² by byla dosažena, pokud by klimatické podmínky března 2019 trvaly dlouhodobě.

Modelované hladiny podzemních vod pro jednotlivé kolektory jsou prezentovány obrázku 4.3.

Tabulka 4.1: Vodní bilance kalibrovaného stacionárního hydraulického modelu

Zdroje (l/s)	45
Infiltrace srážkových vod	11
Břehová infiltrace Laterálního kanálu	9,9
Přítoky přes vnější OP	24
Propady (l/s)	-45
Drenáž Vltavy	-43
Odtoky přes vnější OP	-1,8



Obrázek 4.3: Simulované hladiny podzemních vod stacionárního modelu, šterkový kolektor

4.3.3. Kalibrace v neustáleném režimu proudění podzemních vod (transientní kalibrace)

Transientní hydraulický model byl sestaven a kalibrován pro období od března 2019 do června 2020 včetně s měsíčním krokem pro změnu parametrů modelu, tj. v 16 jednotlivých časových úsecích, tzv. „stress periods“, přičemž uvnitř každého z nich byly hodnoty všech parametrů modelu považovány za konstantní. Těmito parametry byly infiltrace, konduktance vnějších okrajových podmínek, hydraulická vodivost dnových sedimentů vodních toků, průtok v Laterálním kanálu a hladiny podzemních vod v pozorovacích objektech.

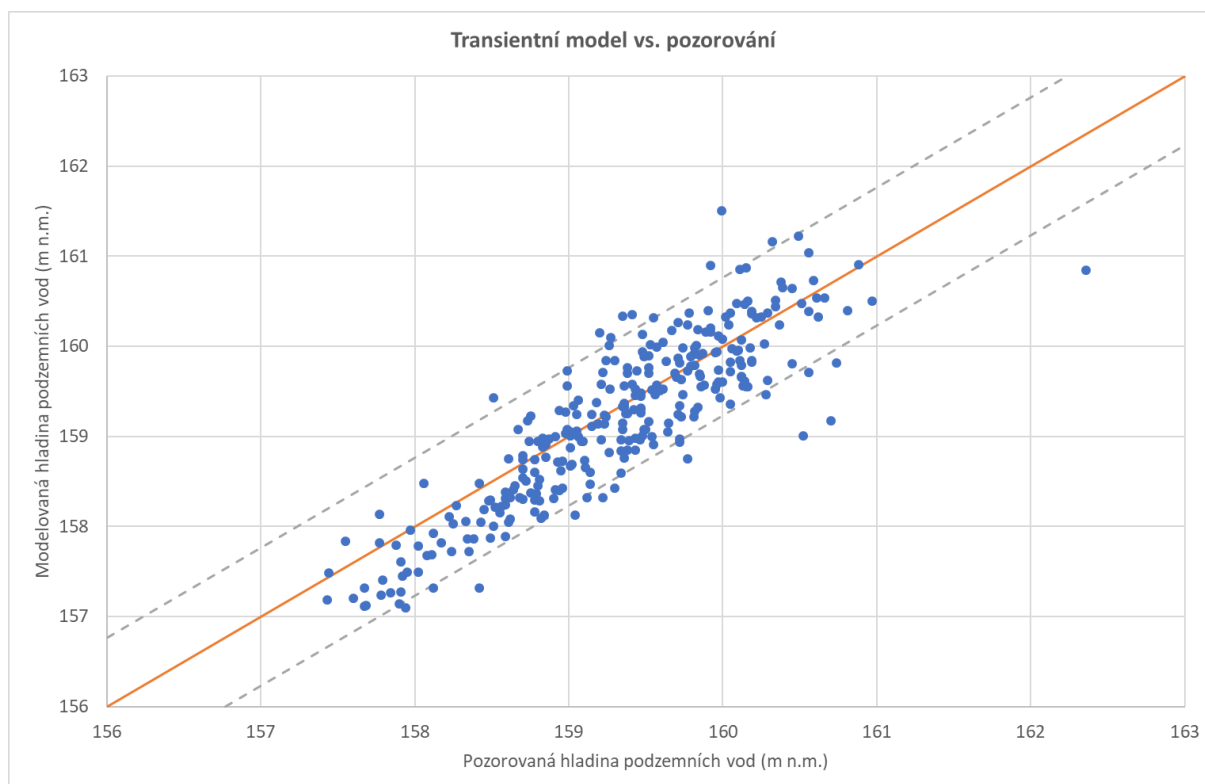
Pro kalibraci v neustáleném režimu bylo použito 78 monitorovaných objektů, kde byly sledovány hladiny podzemních vod.

Kalibrovanými parametry byly volná a pružná zásobnost, efektivní infiltrace a konduktance okrajových podmínek. Všechny jmenované parametry byly kalibrovány podle zón. Měsíční hodnoty všech zmiňovaných parametrů musely být lokálně upravovány pro dosažení lepší shody měřených a simulovaných hladin.

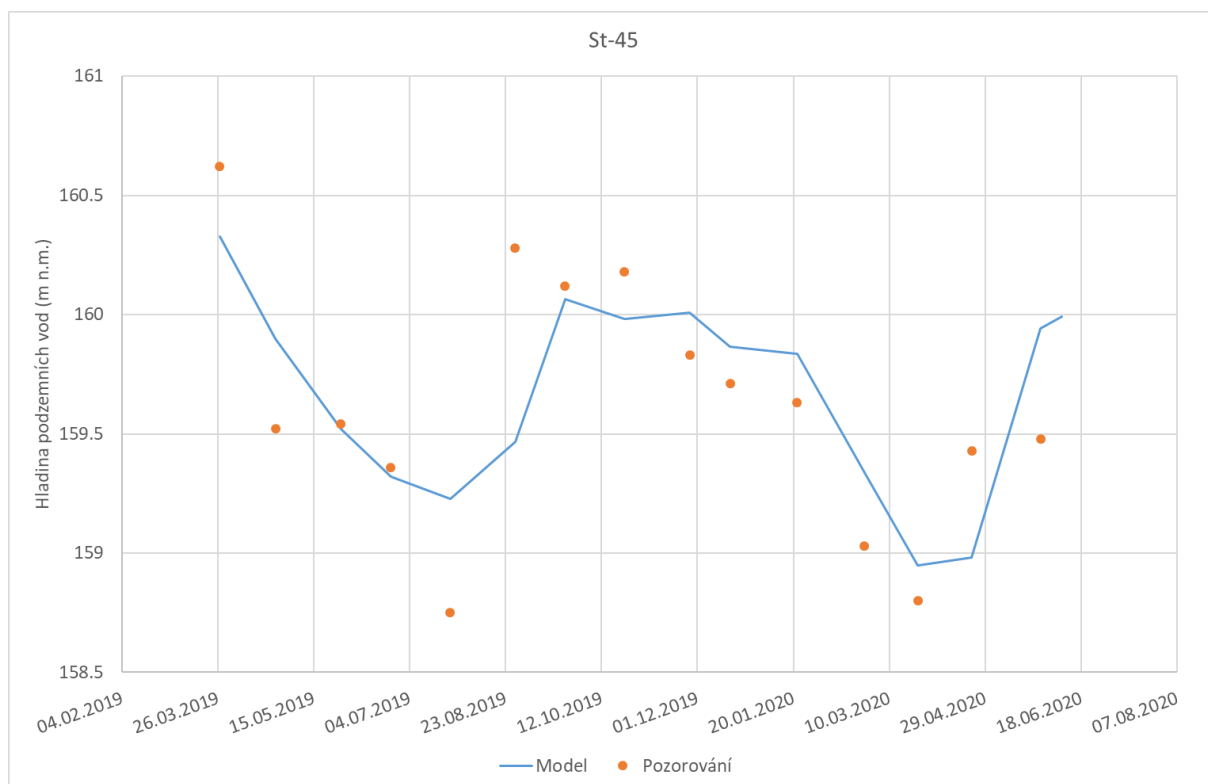
V průběhu kalibrace modelu byly vedle kapacitních parametrů kolektorů doladována i hydraulická konduktivita kolektoru (tento parametr opět za použití tzv. „pilot points“). Ná vaznost stacionárního modelu na model transientní byla zajištěna zavedením nulté periody, která byla simulována ve stacionární formě proudění. Důsledkem tohoto nezbytného zásahu do parametrů modelu bylo velmi mírné (a tedy stále plně akceptovatelné) zvýšení chyby stacionárního modelu, avšak za cenu podchycení dlouhodobých trendů v režimu podzemních vod.

Kalibrované hodnoty kapacitního parametru volné zásobnosti se pohybovaly v intervalu od 0,1 (hydrostratigrafická jednotka nivních sedimentů a antropogenních navážek) po 0,3 (štěrkový kolektor). Parametr pružné zásobnosti byl udržován v celém rozsahu modelu konstantní a byl nastaven na hodnotu 10^{-5} m^{-1} .

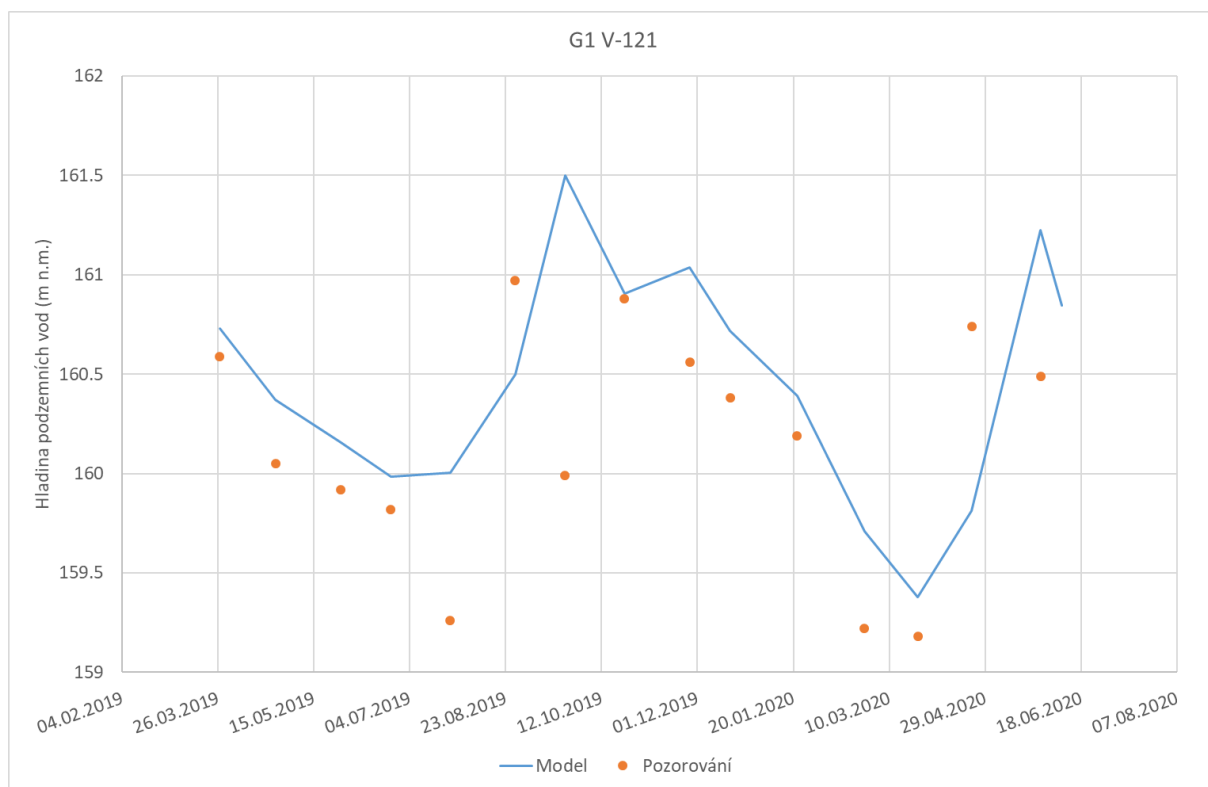
Kalibrace byla ukončena s průměrnou odchylkou $ME = 13 \text{ cm}$, průměrnou absolutní odchylkou $MAE = 36 \text{ cm}$, kvadratickým průměrem chyby $RMS = 46 \text{ cm}$ a s normalizovanou $RMS\ RN = 9,3 \%$. Graf na obrázku 4.4 ukazuje vztah simulovaných a měřených hladin pro jednotlivé pozorovací vrty. Z obrázku je vidět, že úroveň shody je uspokojivá. Grafy na obrázcích 4.5 až 4.10 ilustrují míru shody mezi modelem a pozorováním pro vybrané pozorovací objekty hladin podzemních vod.



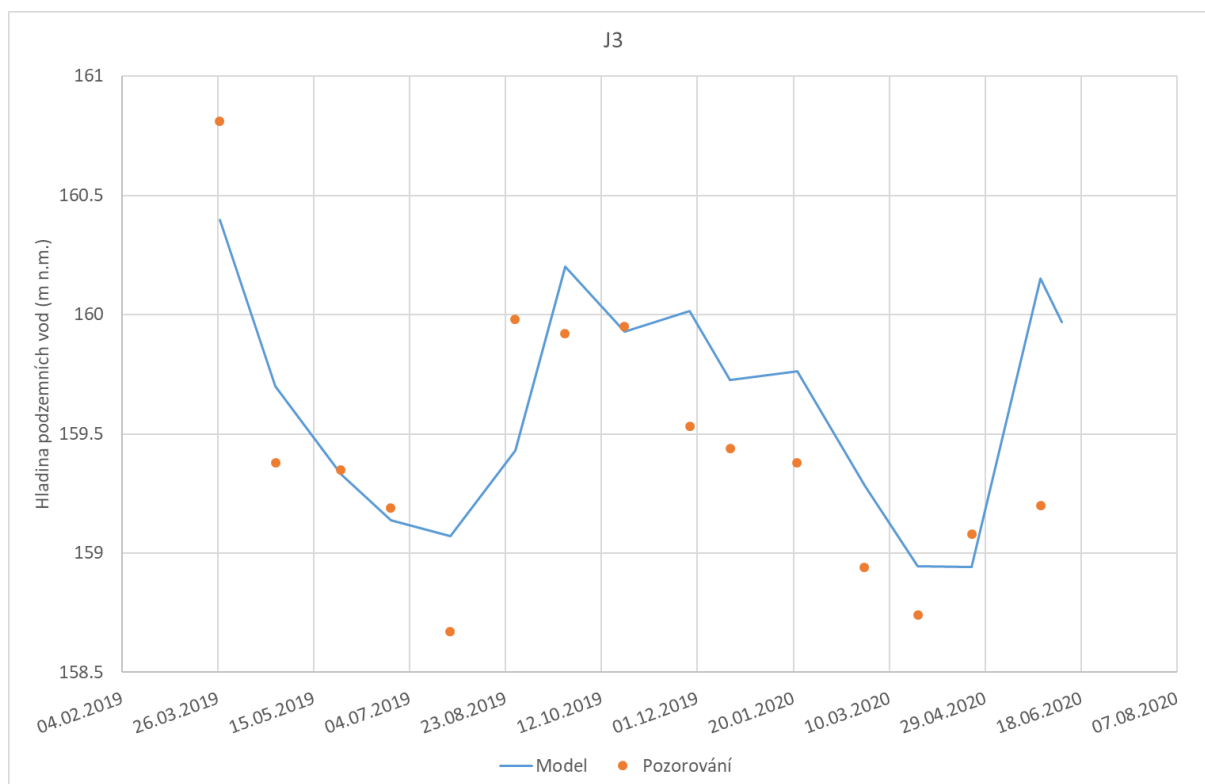
Obrázek 4.4: Kalibrační cíle – transientní hydraulický model



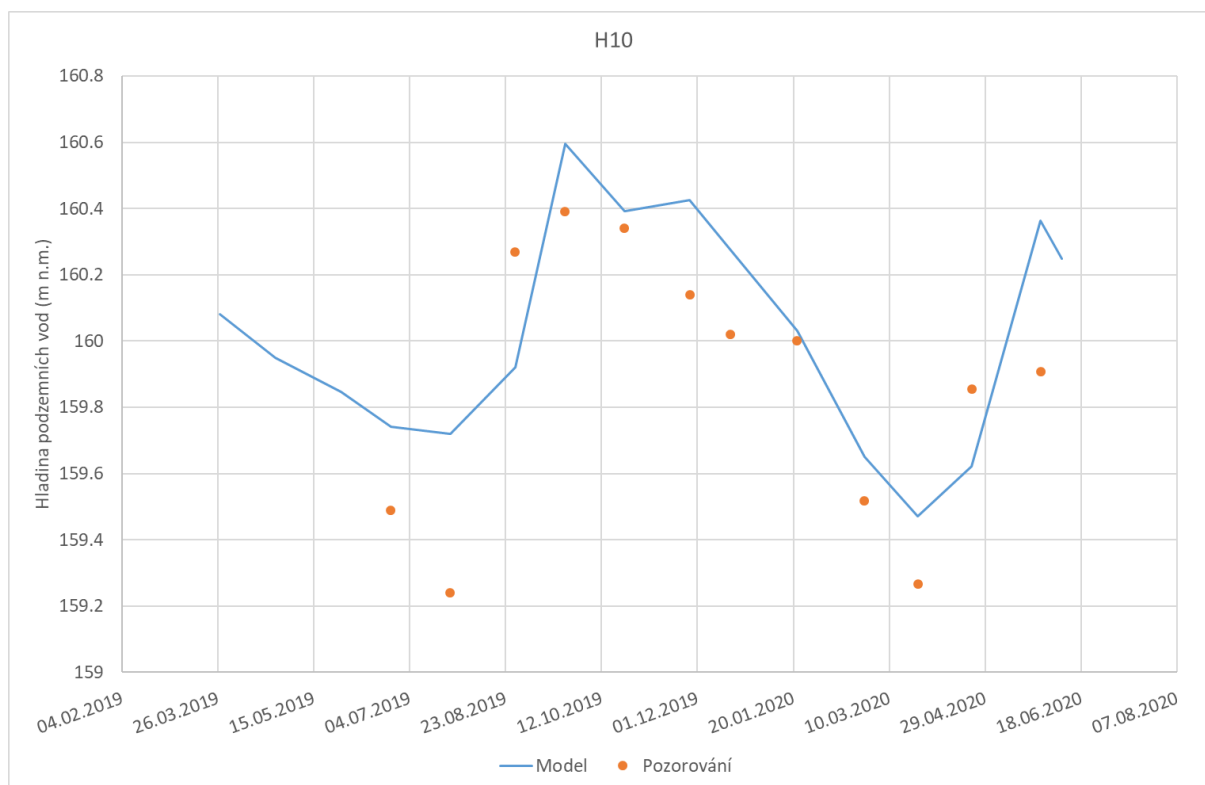
Obrázek 4.5: Srovnání pozorovaných s modelovanými hladinami p.v. – objekt St-45



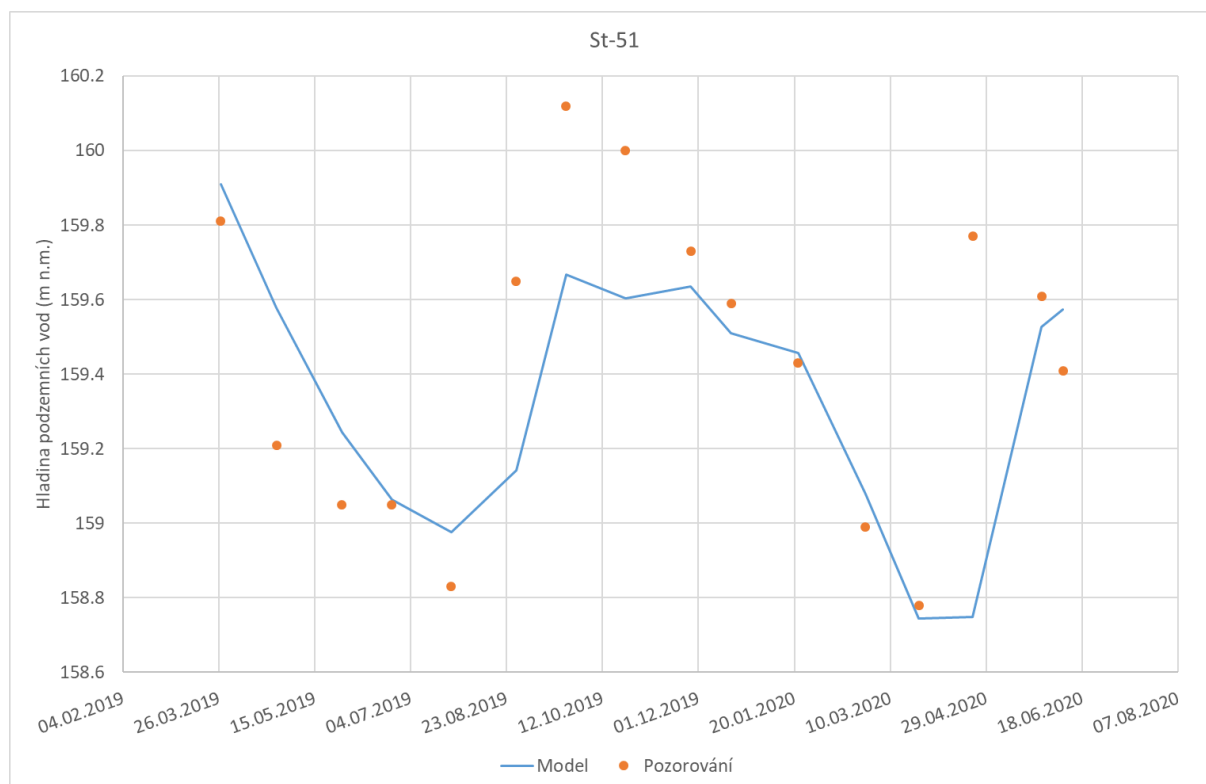
Obrázek 4.6: Srovnání pozorovaných s modelovanými hladinami p.v. – objekt G1 V-121



Obrázek 4.7: Srovnání pozorovaných s modelovanými hladinami p.v. – objekt J3



Obrázek 4.8: Srovnání pozorovaných s modelovanými hladinami p.v. – objekt H10



Obrázek 4.9: Srovnání pozorovaných s modelovanými hladinami p.v. – objekt St-51

Z obrázků je patrné, že úroveň shody na různých objektech je poměrně značně variabilní. Nejobtížnější bývá dosažení shody v případě rychlých změn hladin, typicky červenec 2019 vs. srpen 2019. Příčina tohoto chování, stejně jako jeho podchycení modelem by si zasloužilo podrobnější zpracování, které je ovšem nad časový rámec této studie. Do hodnocení shody modelu s pozorováním navíc vstupují nejistoty v podobě ovlivnění pozorovaných hladin podzemních vod neregistrovanými odběry v domovních studnách. Nicméně převážná většina reziduálních hladin² se pohybuje v rámci směrodatné odchylky pozorovaných hladin (v grafu na obrázku 4.4 vymezeno přerušovanými čarami). Z tohoto důvodu považujeme model za dostatečně věrohodný a použitelný pro účel, za jakým byl sestaven, tj. predikce vlivu hloubky založení PPO na režim podzemních vod v oblasti, resp. vlivu hloubky založení PPO na průsaky podzemních vod do chráněné oblasti během povodňové vlny.

4.3.4. Bilance transientního modelu

Bilance transientního modelu je prezentována v tabulce 4.2. Komentáře k vodní bilanci transientního hydraulického modelu jsou následující:

² reziduální hladina = pozorovaná hladina – modelem vypočítaná hladina

- Celkové zdroje modelu, které byly vypočteny na cca 90 l/s, byly představovány efektivní infiltrací atmosférických srážek, břehovou infiltrací Laterálního kanálu a přítoky přes vnější okrajové podmínky modelu.
- Největší přítoky do modelu přes vnější hranice byly situovány na severní hranici modelované oblasti. Jejich hodnotu odhadujeme na cca 40 l/s, což představuje bezmála polovinu celkových zdrojů modelu.
- Břehová infiltrace Laterálního kanálu dosahovala hodnot přibližně 7 l/s.
- Naprostou většinu propadů (> 80%) představovala drenáž řeky Vltavy.
- Bilance zásob podzemních vod byla v průběhu kalibrační periody transientního modelu zřetelně záporná, tj. došlo ke snížení zásob podzemních vod. Nárůst zásob nabývá z hlediska bilance modelu záporné hodnoty, kdežto úbytek zásob nabývá hodnoty kladné.
- Specifický základní odtok z celého území modelu zprůměrovaný pro celé období kalibrační periody transientního modelu byl 1,9 l/s/km². Tato hodnota odpovídá srážkové dotaci 60 mm/rok.

Tabulka 4.2: Vodní bilance kalibrovaného transientního hydraulického modelu

Zdroje (l/s)	90
Efektivní infiltrace srážkových vod	3,6
Břehová infiltrace Laterálního kanálu	7,1
Přítoky přes vnější OP	54
Změna zásob	25
Propady (l/s)	-90
Drenáž Vltavy	-76
Odtoky přes vnější OP	-0,12
Změna zásob	-14

4.4. Prediktivní simulace

Na zkalibrovaném hydraulickém modelu byly sestaveny prediktivní simulace, které se soustředily na dva základní okruhy řešených problémů:

1. simulování vlivu navržené hloubky založení PPO na průsaky podzemních vod šterkového kolektoru do chráněného prostoru během povodňové vlny;
2. simulování změn proudového pole šterkového kolektoru za normálního stavu hladin podzemních i povrchových vod v reakci na různou hloubku založení PPO.

4.4.1. Simulování vlivu navržené hloubky založení PPO na průsaky podzemních vod do chráněného prostoru během povodňové vlny

Základní nastavení tohoto okruhu prediktivních simulací bylo:

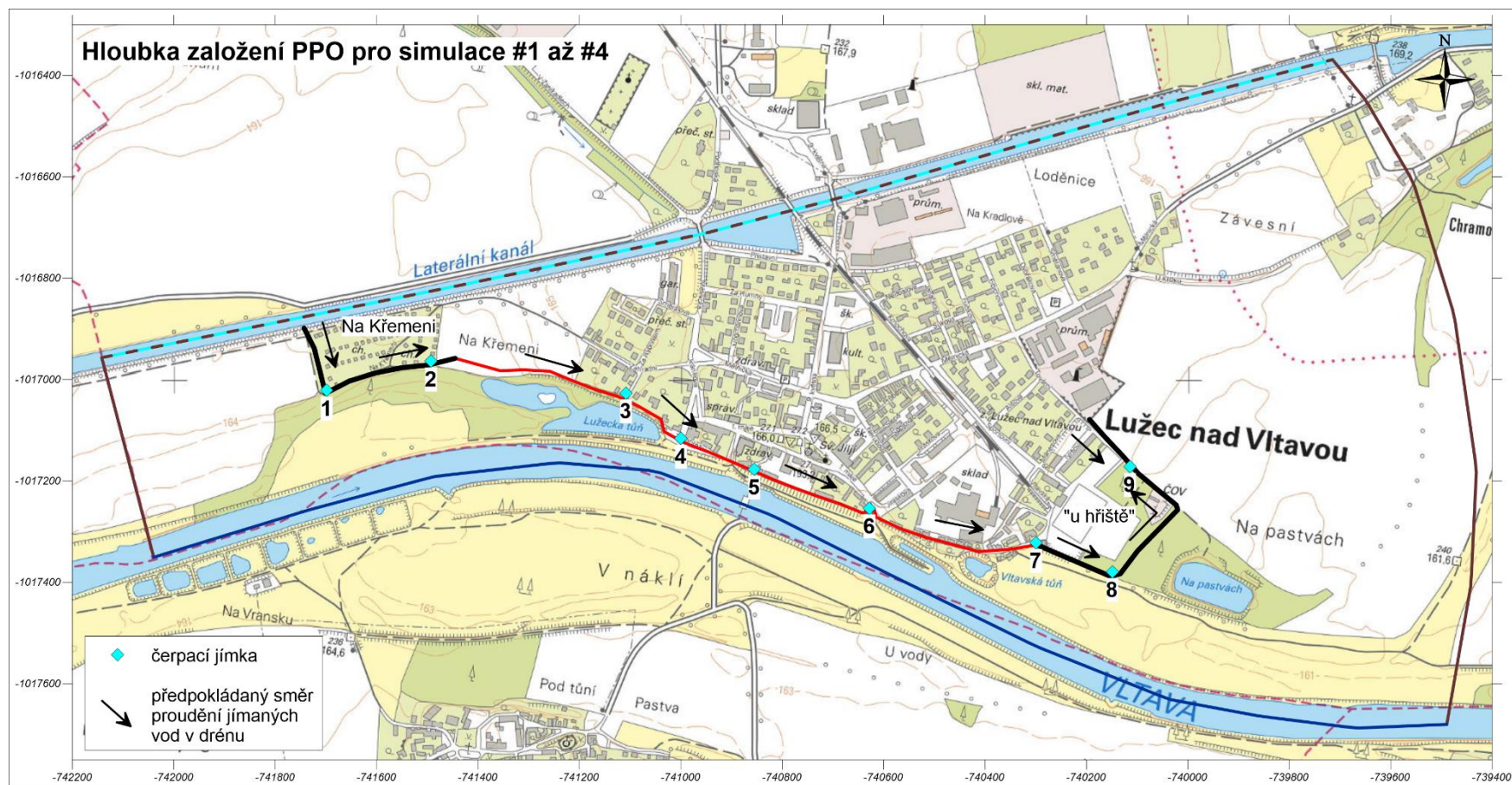
- Simulace byly sestavovány v neustáleném režimu proudění podzemních vod v délce 14 dní.
- Tvar povodňové vlny s dvoudenní kulminací byl převzat ze zprávy Šindelář (2017) – viz tabulka 4.3.
- Výška kulminace odpovídala Q100 na Vltavě i Labi.
- V rámci efektivní infiltrace byl simulován intenzivní 3-denní déšť s celkovým úhrnem 250 mm. Bylo předpokládáno, že z tohoto množství 30% zasáhne do podzemních vod. V rámci simulace co možná nejneprůzračnějších podmínek maximum srážek koincidovalo s kulminací povodňové vlny.
- Na vnějších okrajových podmínkách byly simulovány zvýšené hladiny podzemních vod o 2 m.
- Z uvedeného je zřejmé, že z pohledu hydrologických podmínek prediktivní simulace byly zaměřeny na velmi nepříznivý scénář.
- Bylo sledováno množství drénem odváděných vod prosakujících skrz šterkový kolektor do chráněného prostoru. Modelovaná pozice drénu byla podél celé projektované PPO. Prosakující vody byly sváděny do 9 čerpacích jímek. Spád jednotlivých drenážních žebor, a tedy i bilanční úsek každé z jímek, byl definován na základě analýzy výškových poměrů stávajícího terénu. Simulovaná hloubka založení drenážních žebor byla 1 m pod stávající úrovní terénu.

Tabulka 4.3: Modelový průběh povodňové vlny (Šindelář, 2017)

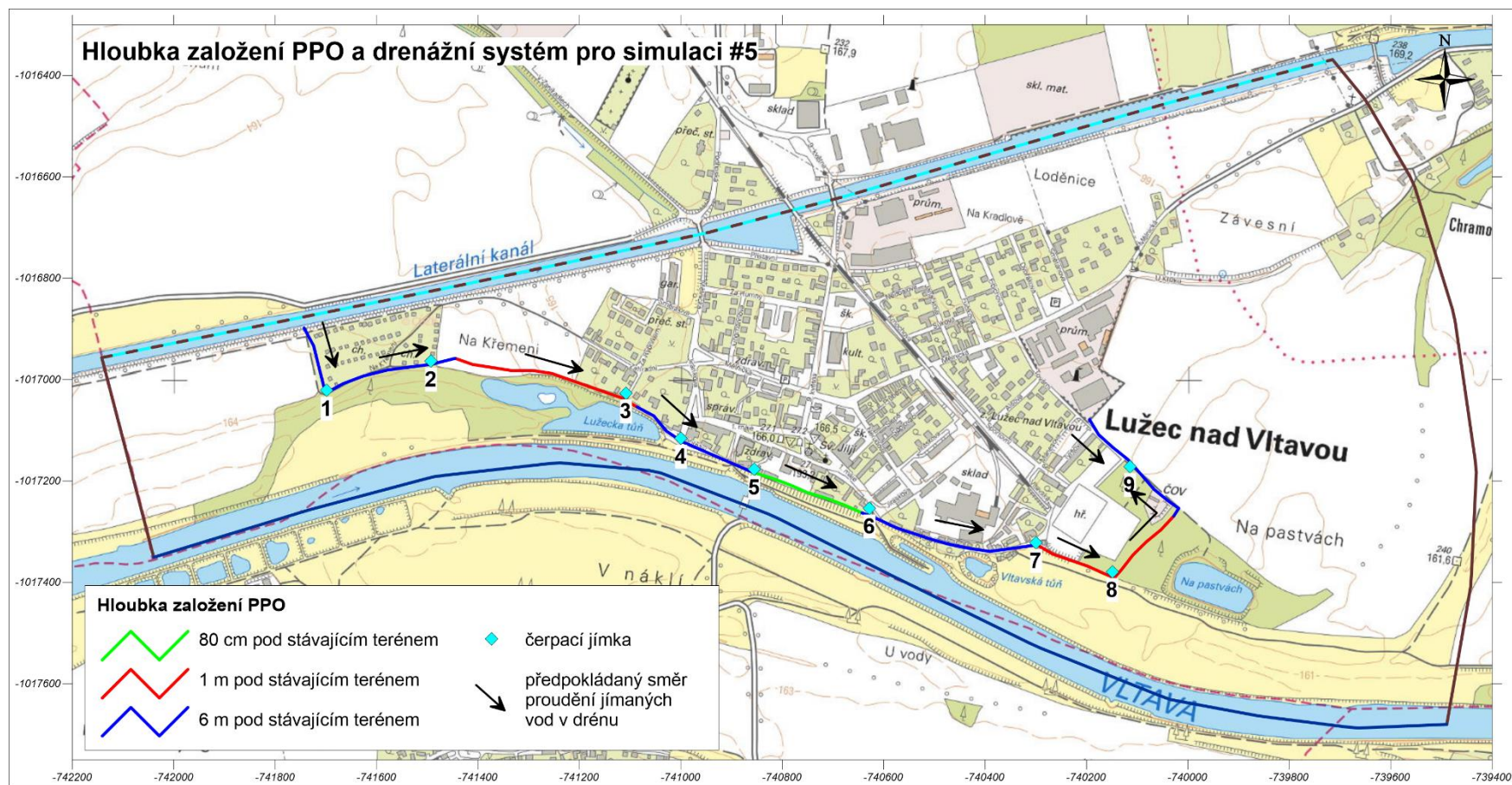
Čas (dny)	Hodnota H na hranici oblasti přiléhající k Vltavě (m n. m.)
1	H (x) podle stacionární úlohy
2	161
3	163
4	165,3
5	165,3
6	164,5
7	164
8	162
9	161
10	160
11	159
12	158
13	157
14	156,7

Byla realizována řada prediktivních simulací s různou hloubkou založení PPO, z nichž jsou prezentovány následující:

1. PPO v celé délce založena do hloubky 5,5 m,
2. PPO v celé délce založena do hloubky 6,0 m,
3. PPO v lokalitě Na Křemeni na z. okraji a v lokalitě „u hřiště“ na jv. okraji založena do hloubky 8 m pod terénem, všude jinde pak do hloubky 5,5 m (viz obrázek 4.10),
4. PPO v lokalitě Na Křemeni na z. okraji a v lokalitě „u hřiště“ na jv. okraji založena 1 m nad bázi štěrkového kolektoru, tzn. že hloubka založení v těchto dvou lokalitách kolísala mezi 6,5 až 12 m pod terénem, všude jinde pak do hloubky 5,5 m (viz obrázek 4.10),
5. Hloubka založení PPO byla závislá na typu projektované PPO a pohybovala se v intervalu od 0,8 m po 6 m pod úrovní stávajícího terénu (viz obrázek 4.11).



Obrázek 4.10: Schéma pro nastavení hloubek založení PPO pro scénáře #1 až #4



Obrázek 4.11: Schéma pro nastavení hloubek založení PPO pro scénář #5

Výsledky prediktivních simulací jsou shrnuty v tabulce 4.4, kde je uvedeno množství drénem odváděných podzemních vod **prosakujících skrz šterkový kolektor** pro jednotlivé variantní simulace. **Podtrhujeme, že hydraulický model neřešil průsaky skrz tělesa hráze.** Tabelované hodnoty odpovídají dennímu průměru v průběhu kulminace. Dále je nutno zdůraznit, že **reálná čerpaná množství v jímkách budou záviset na skutečné hloubce založení, způsobu provedení a skutečném vyspádování jednotlivých drenážních žeber. Reálná čerpání budou také vyšší o další složky hydrologické bilance, zejména o hypodermický a povrchový odtok**, které nebyly (a ani nemohly být) předmětem této studie a u kterých lze v případě intenzivních srážek očekávat výrazné zvýšení přítoků do drénu. Další poznatky jsou shrnuty do následujících bodů:

- V lokalitách Na Křemeni i „u hřiště“ byly ve všech pěti simulacích zaznamenány plošné průsaky podzemních vod nad úroveň terénu navzdory přítomnosti drénu podél PPO. Je zřejmé, že tyto vody díky vyspádování terénu k Vltavě (a tedy i k PPO) dotečou k drénu a stanou se tak součástí jeho bilance. S tímto stékáním průsakových vod k drénu bylo v modelu počítáno způsobem, který umožňoval použitý modelovací software, tj. místům, kde byly zaznamenány tyto průsaky, byla v modelu přiřazena okrajová podmínka simulující plošný drén s bází v úrovni terénu. Vody, které byly z tohoto plošného drénu „vyčerpány“, byly přiřazeny k příslušným čerpacím jímkám na základě analýzy sklonu terénu.
- K výrazným průsakům podzemních vod do chráněného prostoru docházelo přibližně 1 den od začátku kulminace. Maximálních hodnot pak tyto průsaky dosahovaly na konci dvoudenní kulminace. Výjimkou v tomto směru byl scénář #4, kdy začátek průsaků i jejich kulminace byl zhruba o den opožděn.
- V případě povodňové vlny s kulminací 2 dny nebylo, kromě dvou již zmiňovaných lokalit, identifikováno žádné další území, kde by mělo docházet k významným průsakům podzemních vod šterkového kolektoru **nad úroveň terénu** přes krycí vrstvu antropogenních navážek a nivních sedimentů. Z tabulky 4.4 je patrné, že hodnoty těchto průsaků navzdory poměrně rozdílným scénářům z hlediska hloubky založení PPO se od sebe zásadně (s výjimkou scénáře #4) neliší.
- Ve scénářích #1, 2, 3 a 5 byla maxima čerpaných průsakových vod v jímkách v lokalitě „u hřiště“ (čísla 8 a 9). U scénáře #4 byla tato lokalita hydraulickou bariérou utěsněna natolik, že průsaky zde byly prakticky eliminovány.
- Velmi malé rozdíly byly v maximech dosažených hladin podzemních vod, která byla počítána jako maxima hladin v průběhu celého simulovaného období bez ohledu na to, kdy daného maxima bylo v rámci modelové periody 14 dní dosaženo (viz obrázky 4.12 až 4.16). Naprostá většina intravilánu chráněného území vykazovala hladinu podzemních vod v hloubkách větších než 3 m pod terénem (m p.t.). Výjimku tvořila území v těsné blízkosti PPO (zejména v západní části obce) a pak již zmiňované lokality Na Křemeni a „u hřiště“, kde hladiny podzemních vod v průběhu kulminace dostupovaly i nad úroveň terénu. Na zmiňovaných obrázcích jsou oblasti, kde místy docházelo k zatápění, ohraničeny izolinií 1 m p.t., což je důsledek použité metodiky.
- Na základě provedených simulací výsledků lze konstatovat, že množství průsakových vod šterkového kolektoru bylo, kromě vlastních parametrů PPO, velmi výrazně ovlivněno:
 - výškou a délkou kulminace povodňové vlny,
 - hydraulickou vodivostí krycích nivních sedimentů a antropogenních navážek,
 - intenzitou srážek a jejich koincidencí s kulminací povodňové vlny,

- výškou hladin podzemních vod v čase nástupu povodňové vlny.
- Realizované predikce v tomto ohledu simulovaly velmi nepříznivý, i když stále pravděpodobný scénář.
- Dle výsledků modelu je také možno dovodit, že pokud v minulosti docházelo k významnému zatápění prostor nad rámec modelem vypočítaných rozsahů a objemů, pak tomu mohlo nastat buď v důsledku nepříznivějších podmínek, než jaké byly simulovány (větší intenzita srážek, delší kulminace, vyšší počáteční hladina podzemních vod aj.), anebo – to daleko pravděpodobněji – z jiné příčiny: např. povrchovým či hypodermickým odtokem.
- Pro úplnost dodáváme, že žádný ze scénářů nepočítal s kolapsem uzávěry Laterálního kanálu. Jinými slovy, hladina vody v kanálu byla po celou dobu stálá, odpovídající příslušnému manipulačnímu řádu.

Tabulka 4.4: Vypočtené průsaky podzemních vod štěrkového kolektoru zachycené v čerpacích jímkách (l/s)

Čerpací jímka	Simulace				
	1	2	3	4	5
1	10	10	8	5	10
2	20	20	18	10	25
3	5	5	10	5	5
4	0	0	3	0	0
5	0	0	5	0	0
6	0	0	1	0	0
7	2	2	6	0	2
8	50	50	45	1	55
9	100	100	100	6	120
Celkem	~200	~200	~200	~30	~250

Jeden z výstupů hydraulického modelu jsou rychlosti proudění podzemních vod, které jsou počítány pro jednotlivé buňky gridu a pro jednotlivé směry i, j, k podle rovnic:

$$Rychlost_i = \frac{Tok_i}{Saturovaná\ plocha_i} \cdot Pórovitost$$

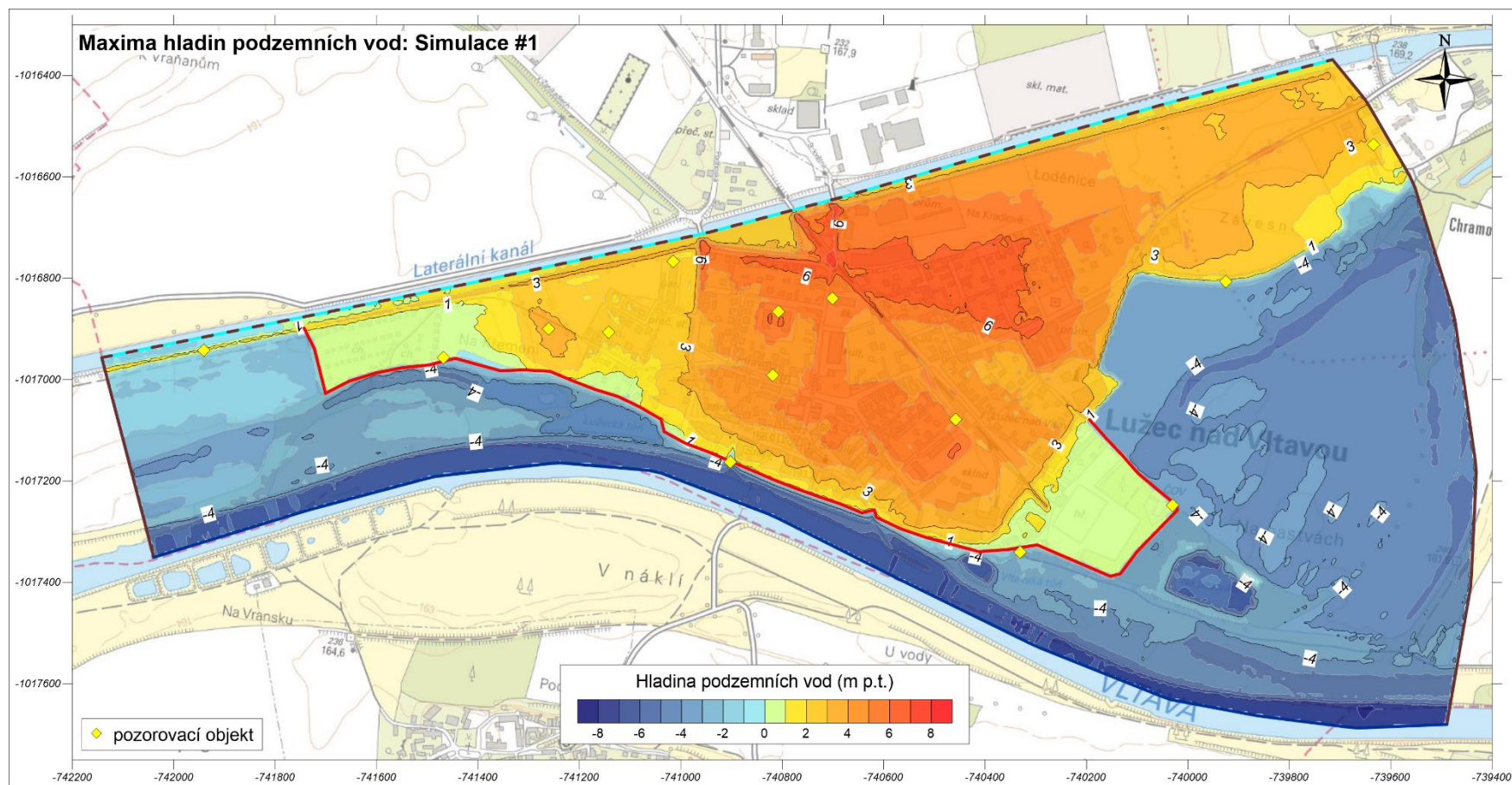
$$Rychlost_j = \frac{Tok_j}{Saturovaná\ plocha_j} \cdot Pórovitost$$

$$Rychlost_k = \frac{Tok_k}{Plocha_k} \cdot Pórovitost$$

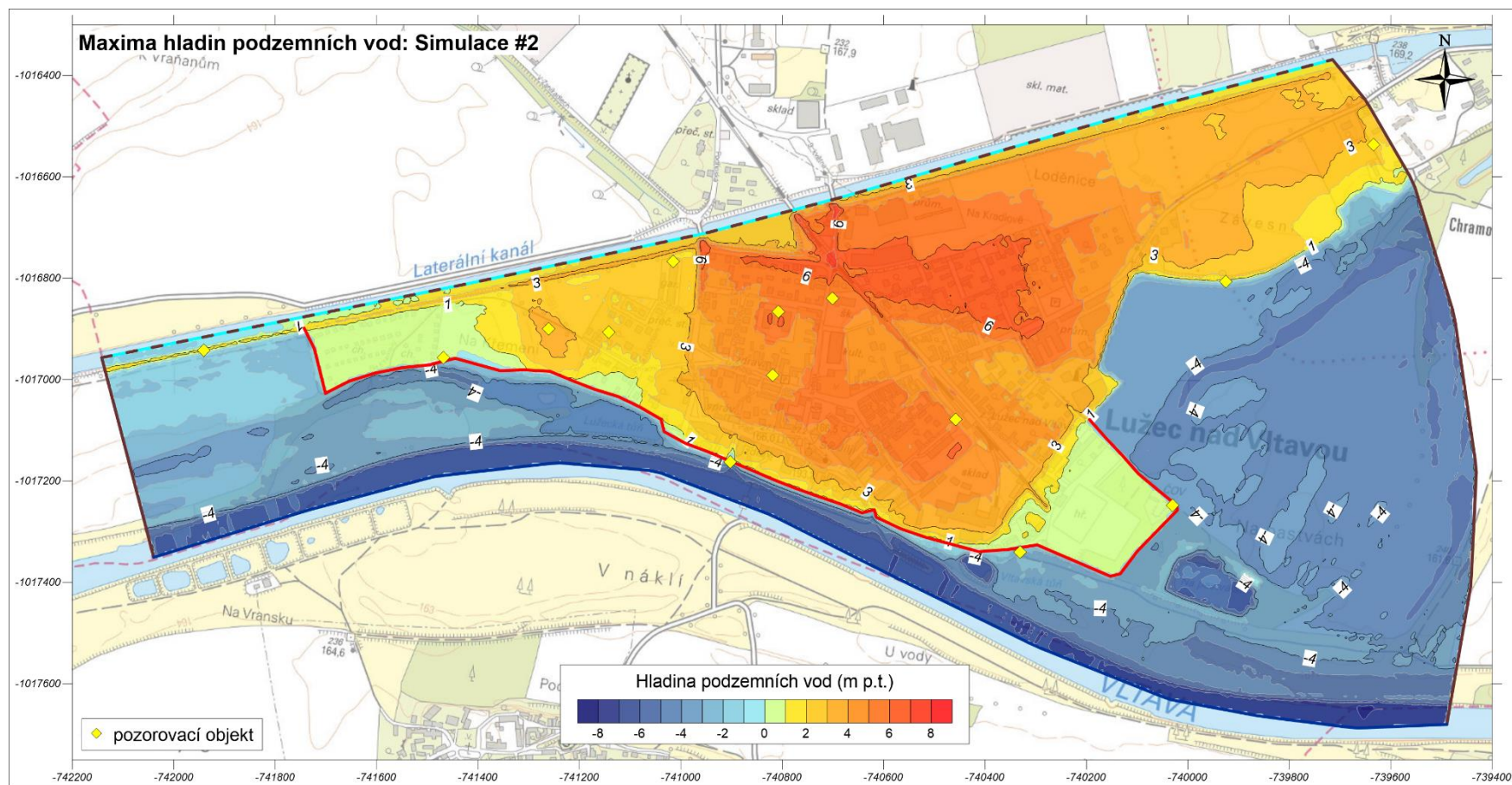
Z uvedených rovnic je patrné, že výsledná rychlost proudění je závislá mj. i na velikosti buněk gridu, která je v případě tohoto konkrétního modelu 5 x 5 m. S jistým zjednodušením tak lze říct, že vypočtené rychlosti jsou zprůměrovány v rámci elementárního objemu modelové buňky.

Modelem vypočtené rychlosti proudění podzemních vod ve štěrkovém kolektoru během povodňové vlny jsou doloženy na obrázcích 4.17 až 4.21. Rychlosti představují maxima, kterých bylo dosaženo v průběhu celé modelované periody 14 dní. Nejdůležitější poznatky:

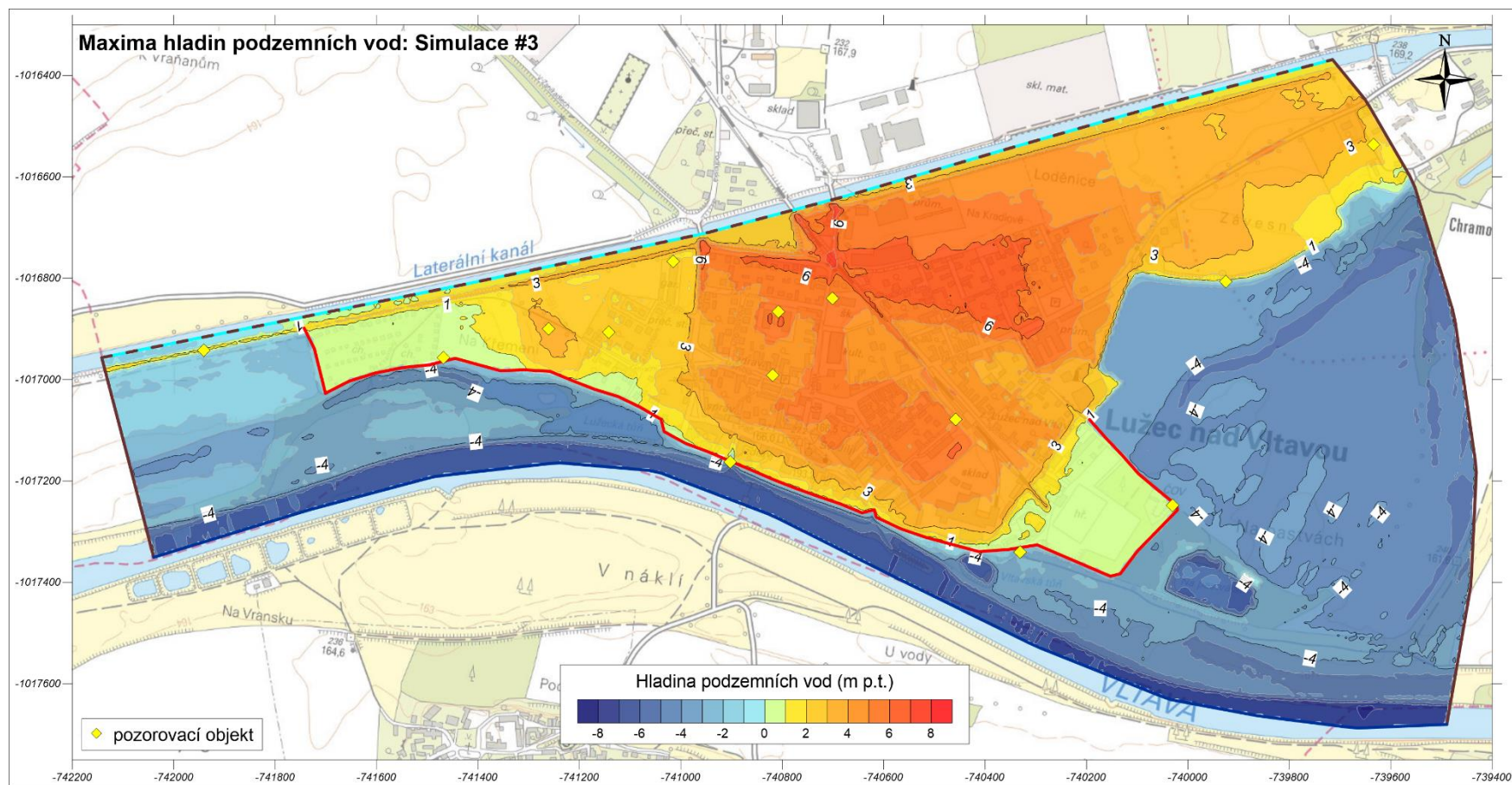
- Vliv hydraulické bariéry na rychlost proudění podzemních vod pod PPO byl zřejmý ve všech scénářích. Rozdíl byl v míře: zatímco u scénářů #1, 2, 3 a 5 zrychlení odpovídalo přibližně dvojnásobku hodnot běžných v okolním kolektoru, u scénáře #4 byl tento rozdíl násobný až řádový.
- Ve všech scénářích se toto zrychlení týkalo východního úseku PPO, zejména pak lokality „u hřiště“.
- Zvýšené až vysoké hodnoty rychlostí proudění se týkaly úseků PPO, kde byla: (1) spodní hrana navrhované hydraulické bariéry blízko báze kolektoru, tj. mocnost kolektoru, kterým může proudit podzemní voda zůstala nízká, a/nebo (2) hydraulická vodivost byla v dané části štěrkového kolektoru malá. Oba případy vedly ke snížené průtočnosti (transmisivitě) kolektoru.
- Relativně nejmenší změny v rychlostech vykazoval scénář #5. Úseky se zvýšenými rychlostmi byly poměrně krátké a lokalizované (viz tmavě oranžové až červené oblasti na obrázku 4.21). To umožňuje pro tento scénář uvažovat se založením hydraulické bariéry daných částí PPO až do báze kolektoru (vrstva podložních zvětralých slínovců), což by v těchto úsecích významně eliminovalo riziko sufoze. Lze předpokládat, že vliv takového postupu na normální režim proudění podzemních vod by byl malý až zanedbatelný, a to z těchto důvodů:
 - úseky jsou vesměs velmi krátké;
 - lze předpokládat, že hydraulická vodivost štěrkopísků v prostoru vymezeném ulicí Vltavská u tzv. Vltavské tůně je snižena – viz výsledky hydrodynamických zkoušek v přilehlém vrtu V-14 (Králík, Svárovský, 2020);
 - směr proudění podzemních vod štěrkového kolektoru v prostoru ulice Tovární je za normálních podmínek orientován vůči navrhované PPO v poměrně ostrém úhlu.



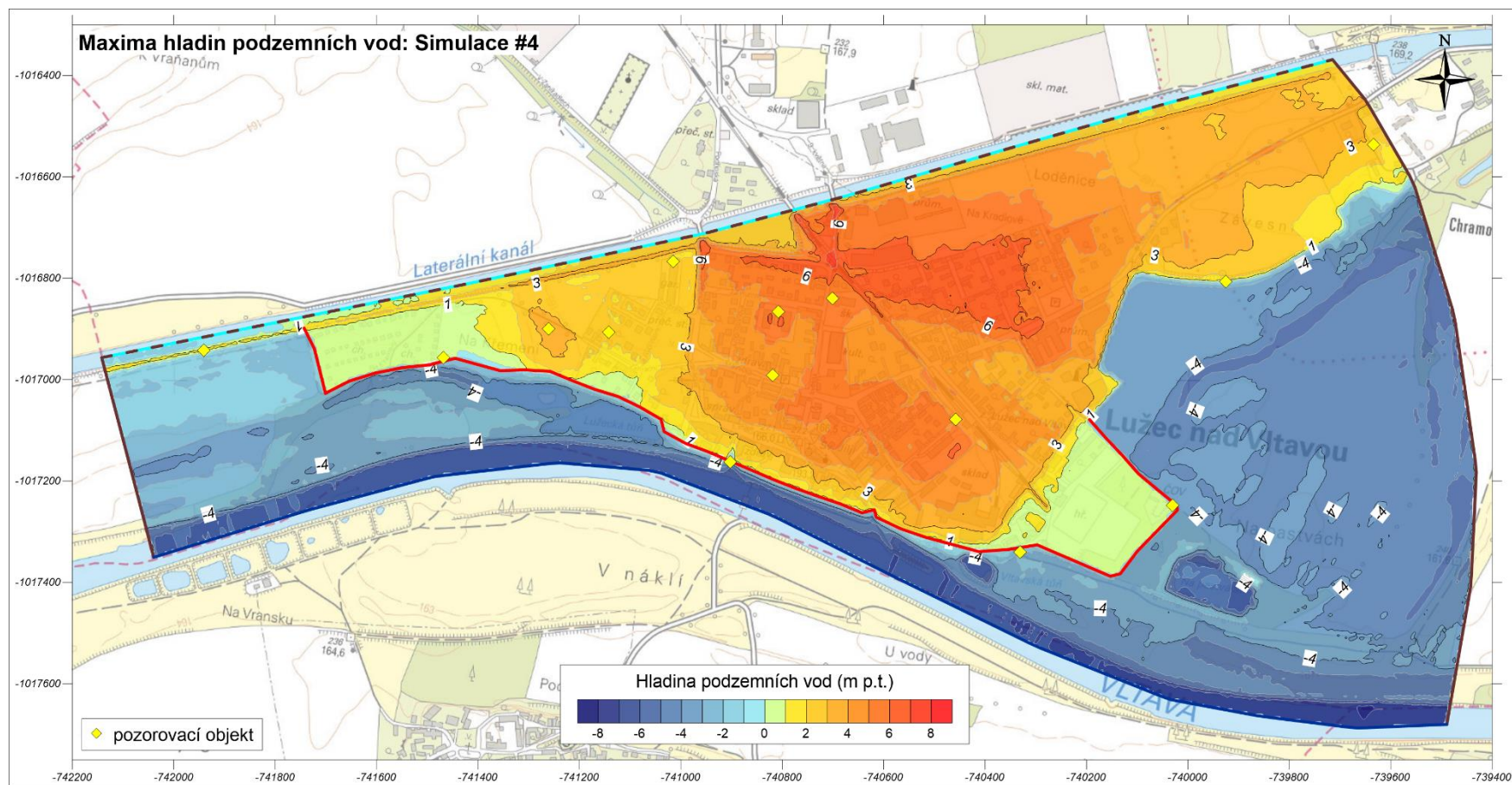
Obrázek 4.12: Maxima hladin podzemních vod (m pod terénem): Scénář #1



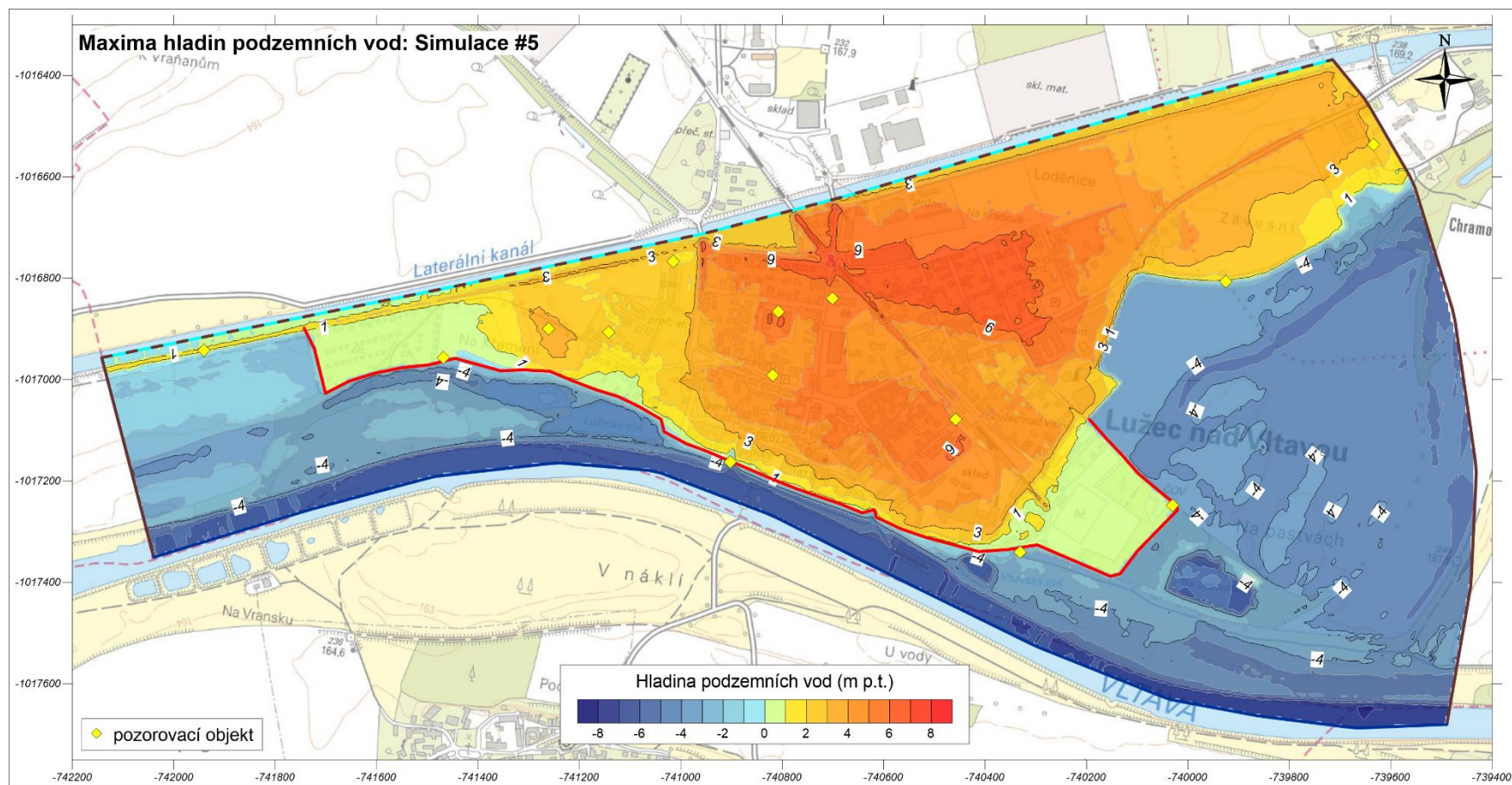
Obrázek 4.13: Maxima hladin podzemních vod (m pod terénem): Scénář #2

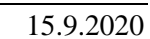


Obrázek 4.14: Maxima hladin podzemních vod (m pod terénem): Scénář #3

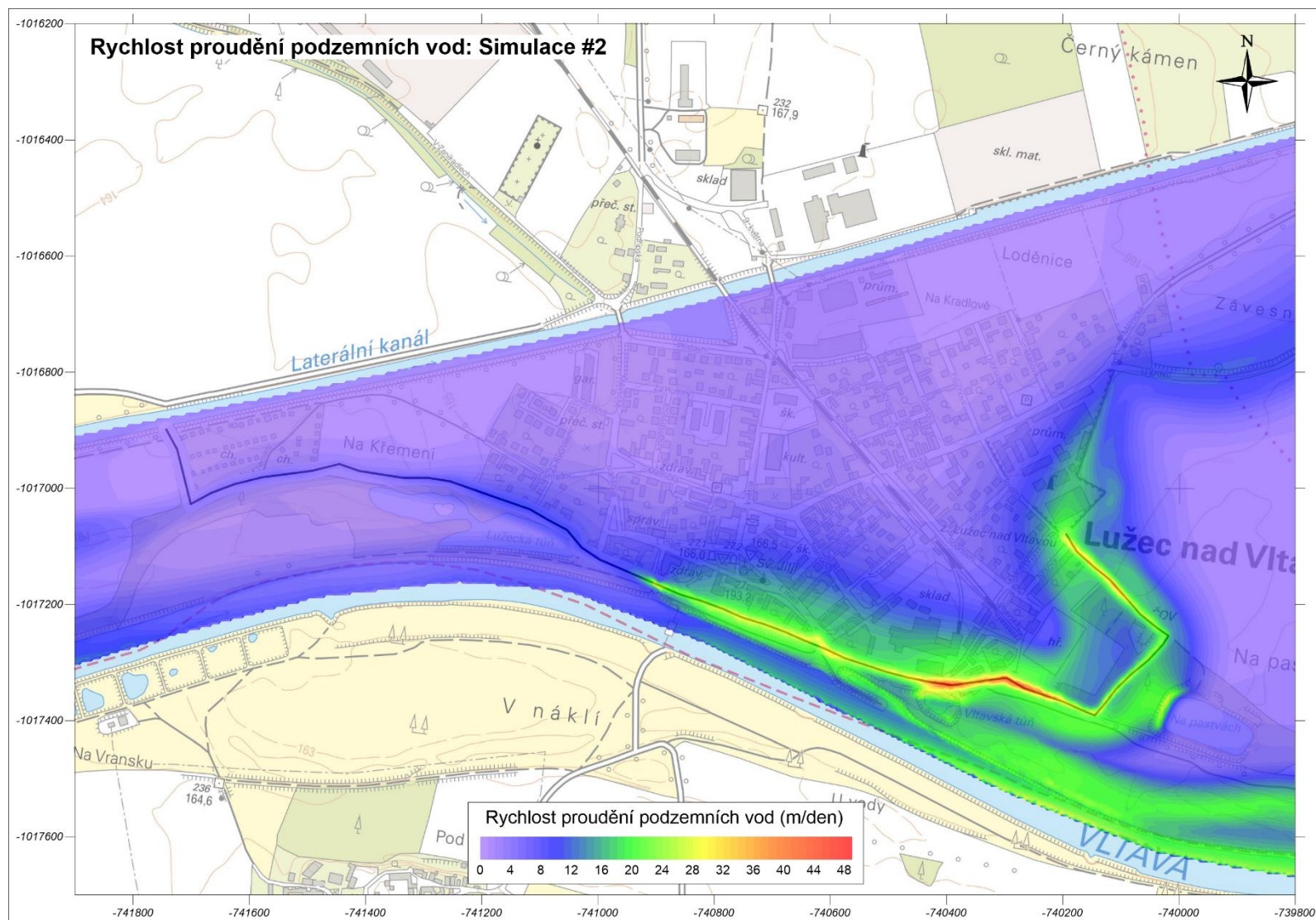


Obrázek 4.15: Maxima hladin podzemních vod (m pod terénem): Scénář #4

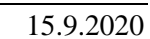




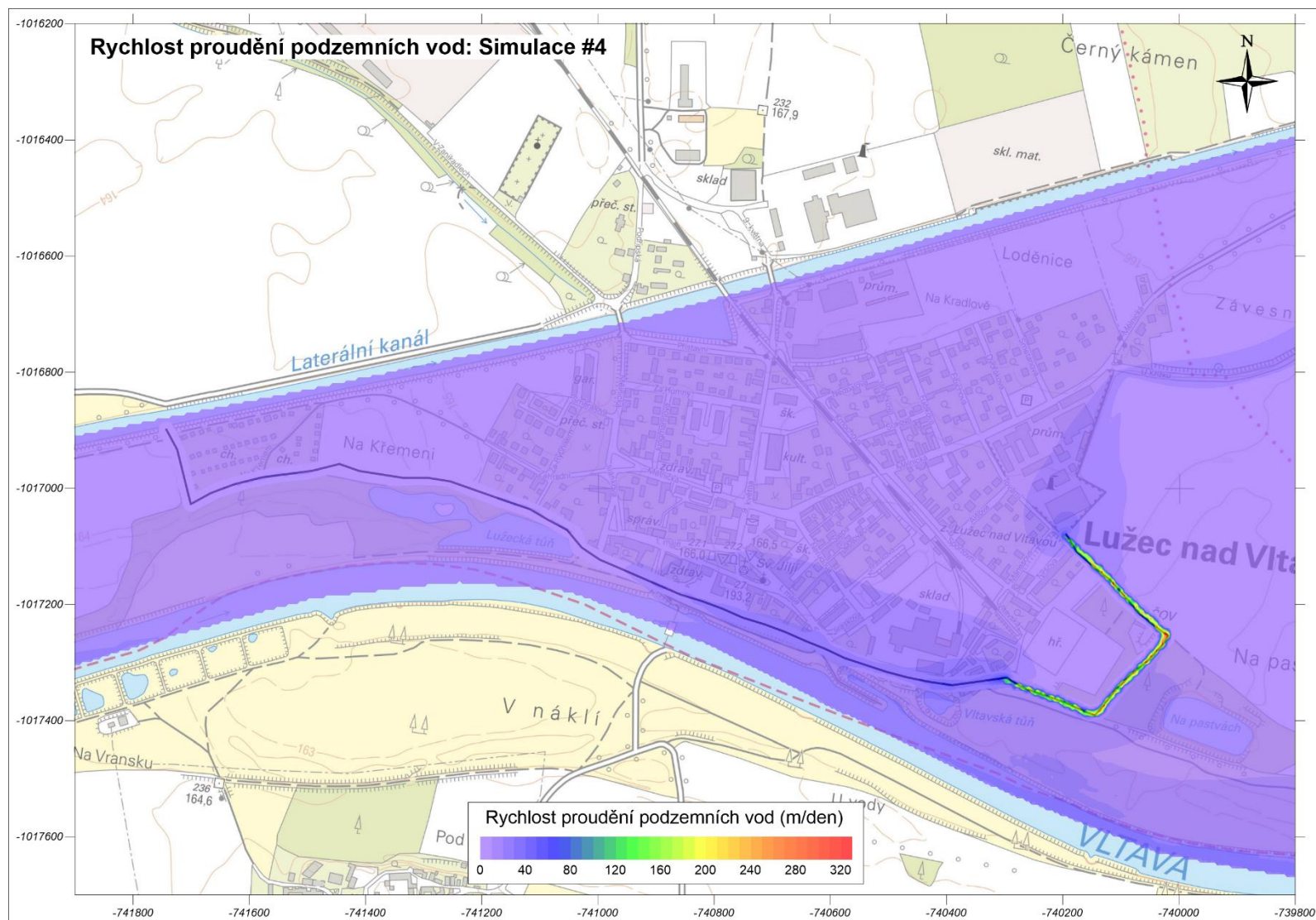
Obrázek 4.17: Rychlost proudění podzemních vod šterkového kolektoru během povodňové vlny: Scénář #1



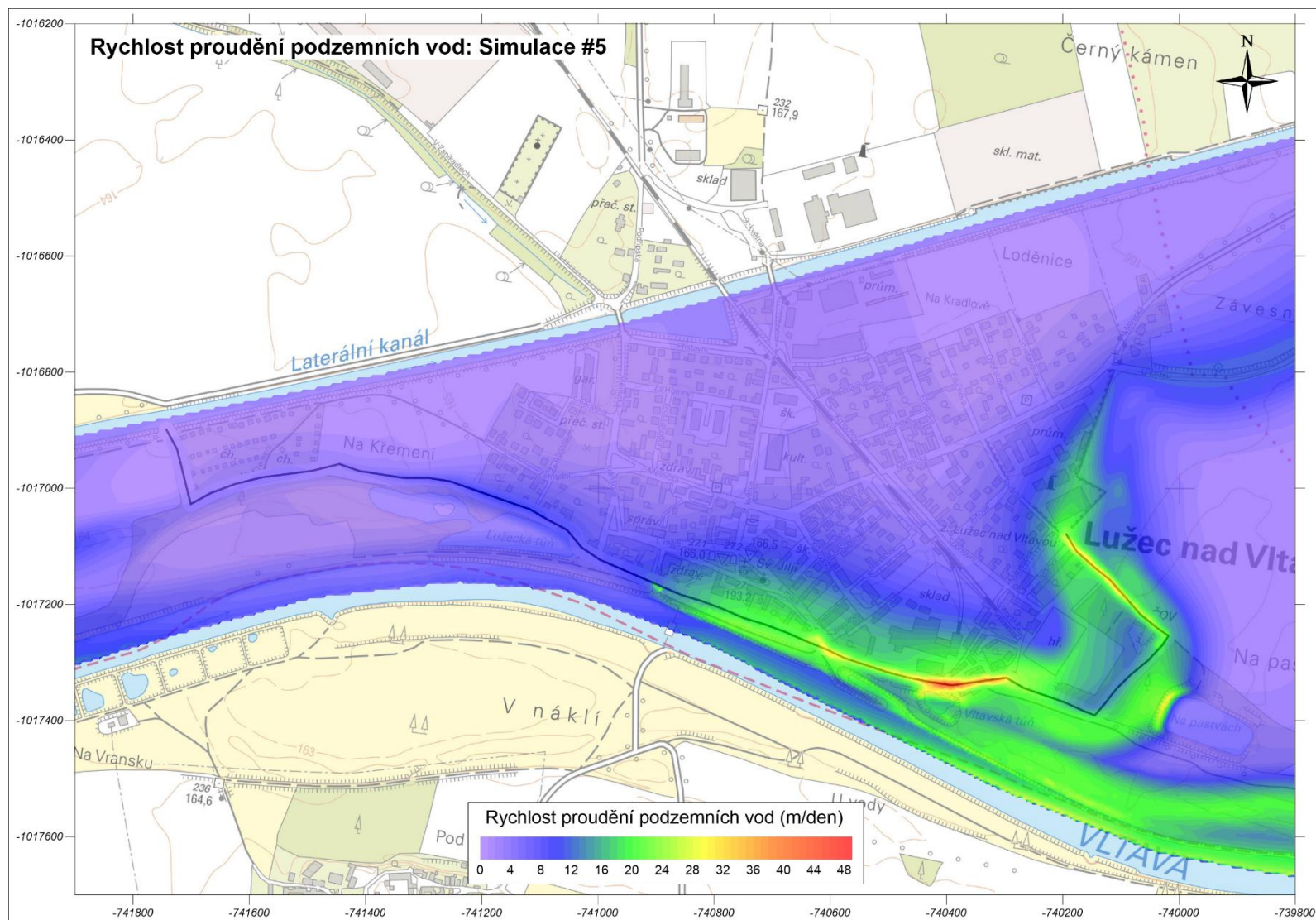
Obrázek 4.18: Rychlost proudění podzemních vod šterkového kolektoru během povodňové vlny: Scénář #2



Obrázek 4.19: Rychlost proudění podzemních vod šterkového kolektoru během povodňové vlny: Scénář #3



Obrázek 4.20: Rychlost proudění podzemních vod šterkového kolektoru během povodňové vlny: Scénář #4



Obrázek 4.21: Rychlost proudění podzemních vod šterkového kolektoru během povodňové vlny: Scénář #5

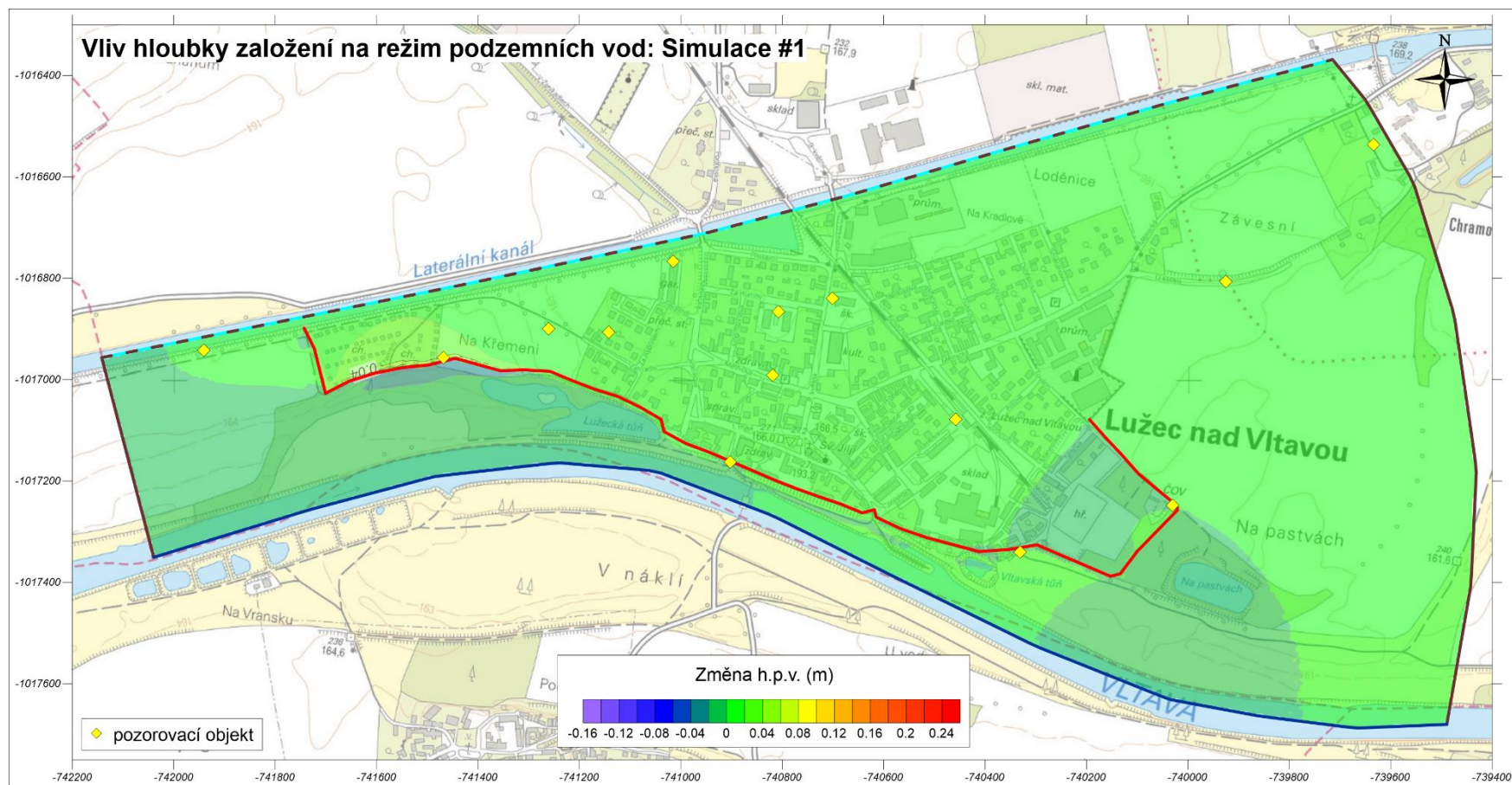
4.4.2. Simulování změn proudového pole v reakci na různou hloubku založení PPO

Základní nastavení tohoto typu prediktivních simulací bylo:

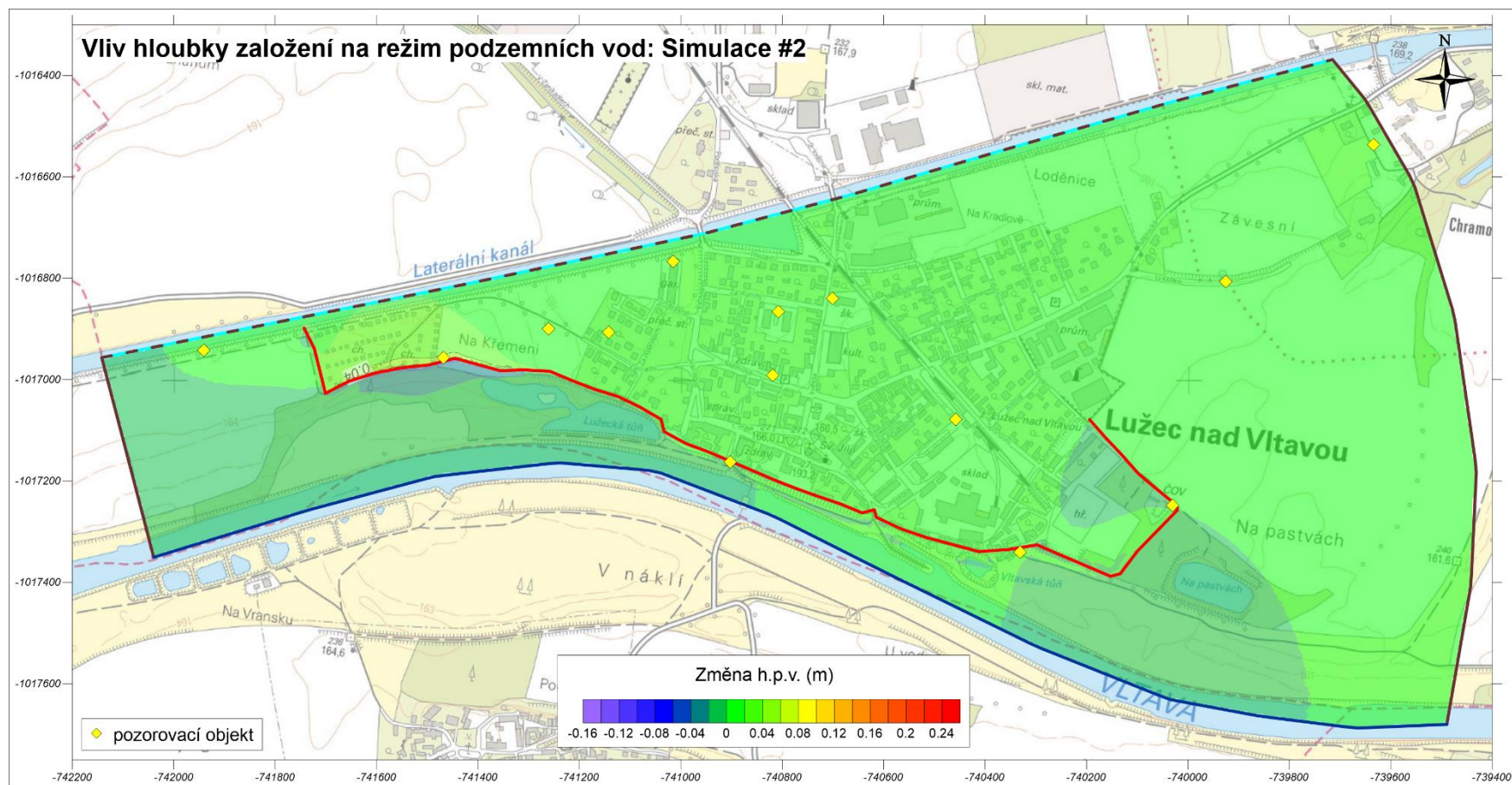
- Simulace byly sestavovány v ustáleném režimu proudění podzemních vod.
- Pro nastavení konduktancí okrajových podmínek a dotací podzemních vod ze srážek byly použity průměrné hodnoty zjištěné v průběhu transientní kalibrace. Vzhledem k faktu, že jak srážky (resp. dotace ze srážek), tak i konduktance okrajových podmínek vykazují log-normální rozdělení, průměrné hodnoty odpovídaly mírně nadnormálnímu režimu podzemních vod, cca 60. až 70. percentilu.
- Hodnota efektivní infiltrace odpovídala průměrné hodnotě zjištěné při kalibraci transientního modelu, tj. cca 60 mm/rok.
- Byly sledovány změny v proudovém poli oproti výsledkům stacionárního modelu simulujícího situaci bez hydraulické bariéry (založení PPO).
- Z hlediska hloubky založení PPO jsou prezentovány prediktivní simulace analogické k simulacím povodňové vlny, tj.:
 1. PPO v celé délce založena do hloubky 5,5 m,
 2. PPO v celé délce založena do hloubky 6,0 m,
 3. PPO v lokalitě Na Křemeni na z. okraji a v lokalitě „u hřiště“ na jv. okraji založena do hloubky 8 m pod terénem, všude jinde pak do hloubky 5,5 m,
 4. PPO v lokalitě Na Křemeni na z. okraji a v lokalitě „u hřiště“ na jv. okraji založena 1 m nad bází štěrkového kolektoru, tzn. že hloubka založení v těchto dvou lokalitách kolísala mezi 6,5 až 12 m pod terénem, všude jinde pak do hloubky 5,5 m,
 5. Hloubka založení PPO byla závislá na typu projektované PPO a pohybovala se v intervalu od 0,8 m po 6 m pod úrovní stávajícího terénu.

Výsledky jsou prezentovány na obrázcích 4.22 až 4.26, kde je zobrazena změna hladin podzemních vod v jednotlivých variantních simulacích oproti výchozí simulaci bez existence hydraulické bariéry. Kladná změna znamená zvýšení hladiny, záporná pak snížení hladiny podzemních vod v příslušné variantní simulaci.

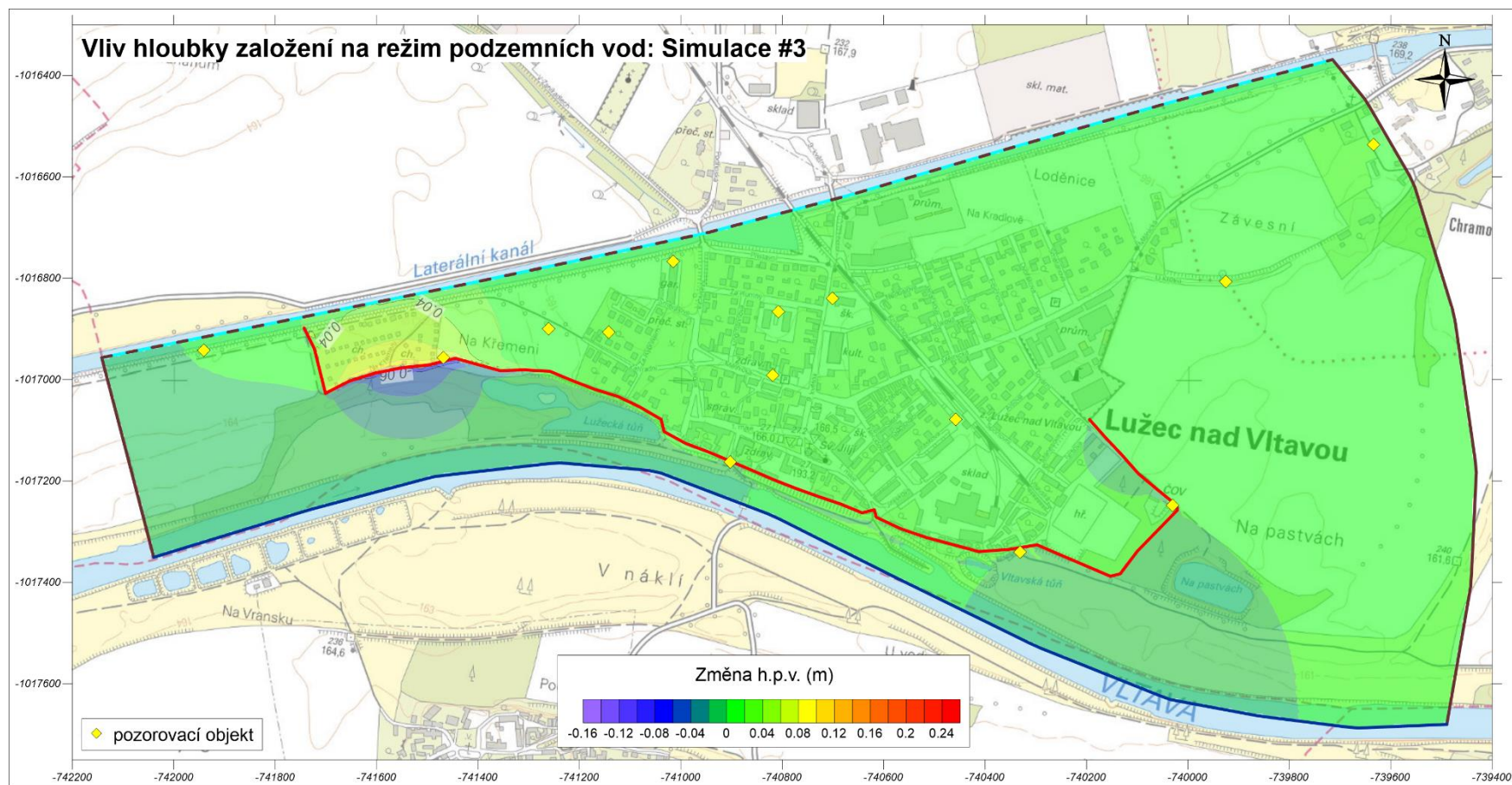
Z obrázků je patrné, že vliv hloubky založení na režim proudění podzemních vod byl velmi lokalizovaný a byl spíše malý, případně zcela zanedbatelný. Největší vliv byl zjištěn u scénáře #4 (Na Křemeni a „u hřiště“ byla PPO založena 1 m nad bází štěrkového kolektoru), kdy v oblasti Na Křemeni na návodní straně došlo ke vzduť hladiny podzemních vod o cca 20 cm. V lokalitě „u hřiště“ bylo vzduť přibližně poloviční. Naopak nejmenší ovlivnění režimu podzemních vod bylo zjištěno u scénáře #5 s variantní hloubkou založení PPO v závislosti na typu PPO, jejíž vliv byl zcela nepatrný.



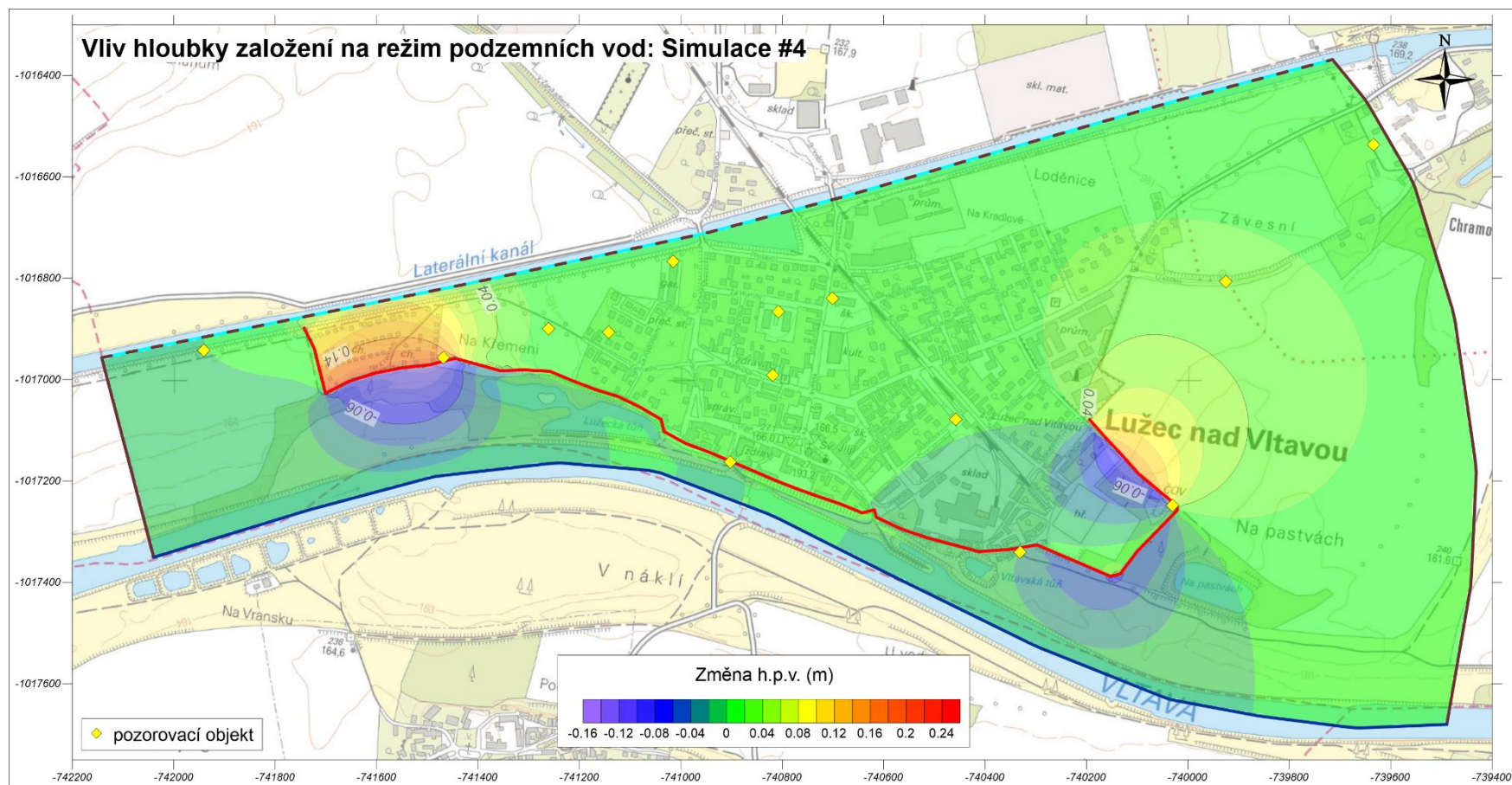
Obrázek 4.22: Vliv hloubky založení PPO na režim podzemních vod: Scénář #1



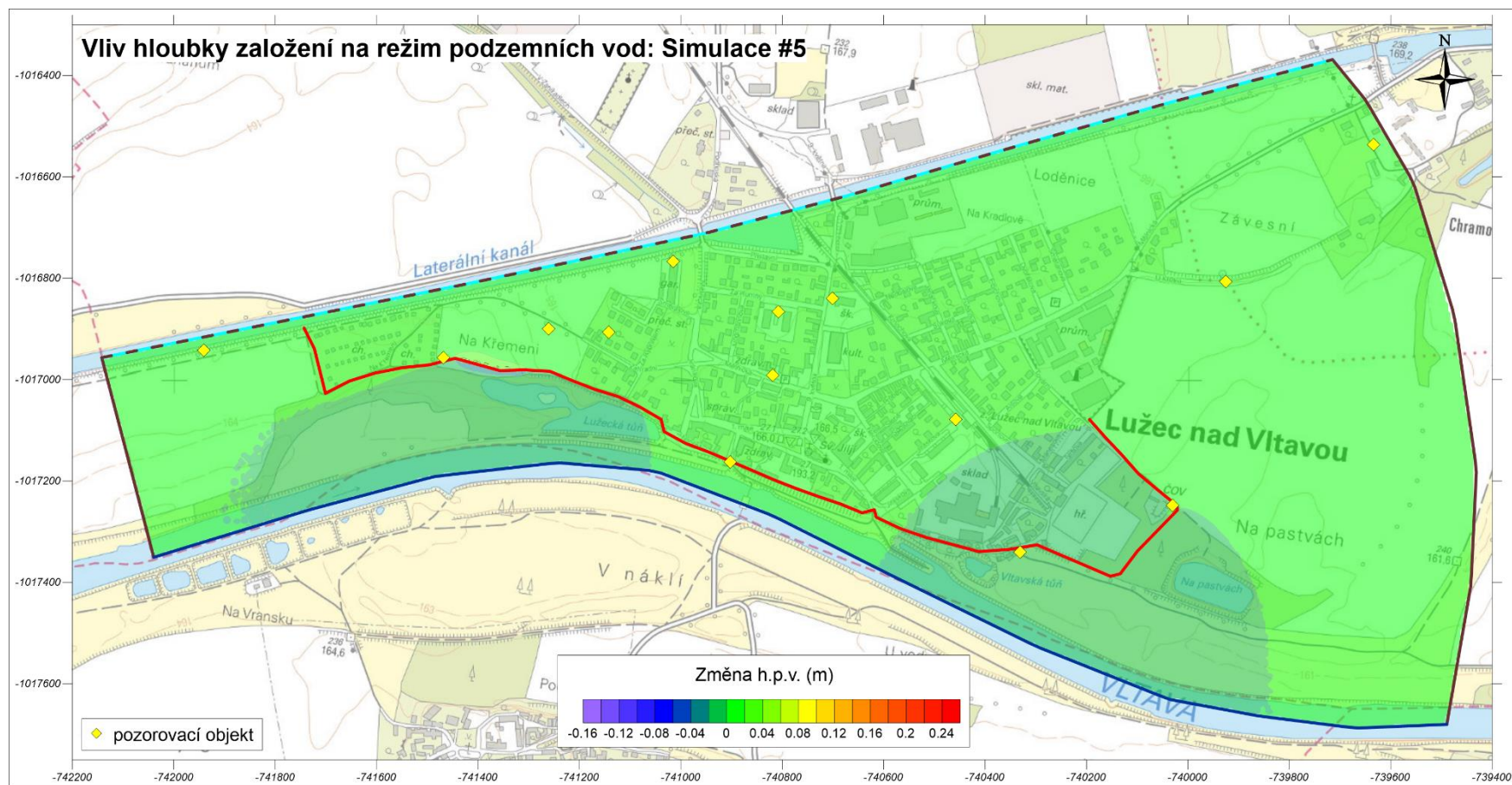
Obrázek 4.23: Vliv hloubky založení PPO na režim podzemních vod: Scénář #2



Obrázek 4.24: Vliv hloubky založení PPO na režim podzemních vod: Scénář #3



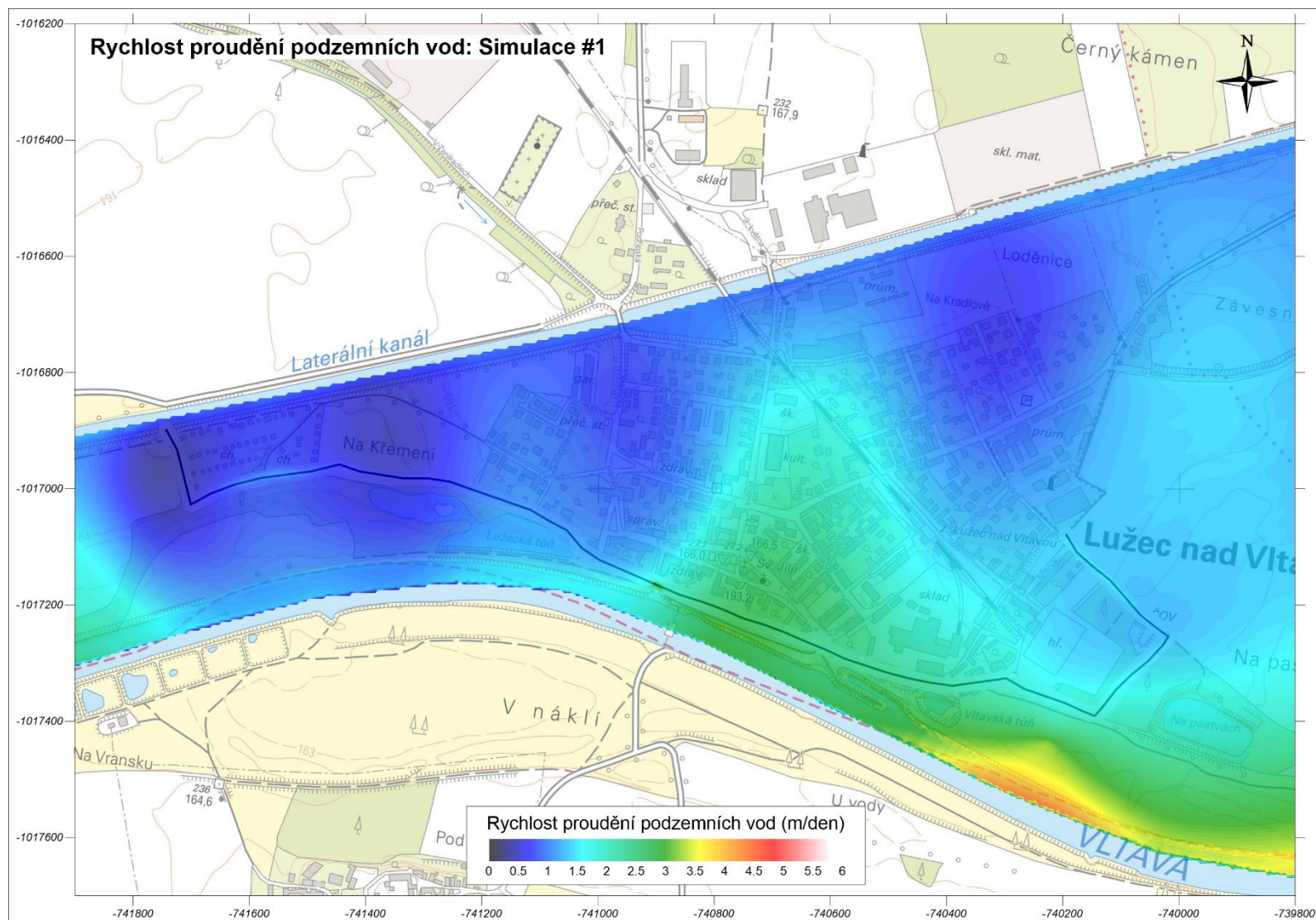
Obrázek 4.25: Vliv hloubky založení PPO na režim podzemních vod: Scénář #4



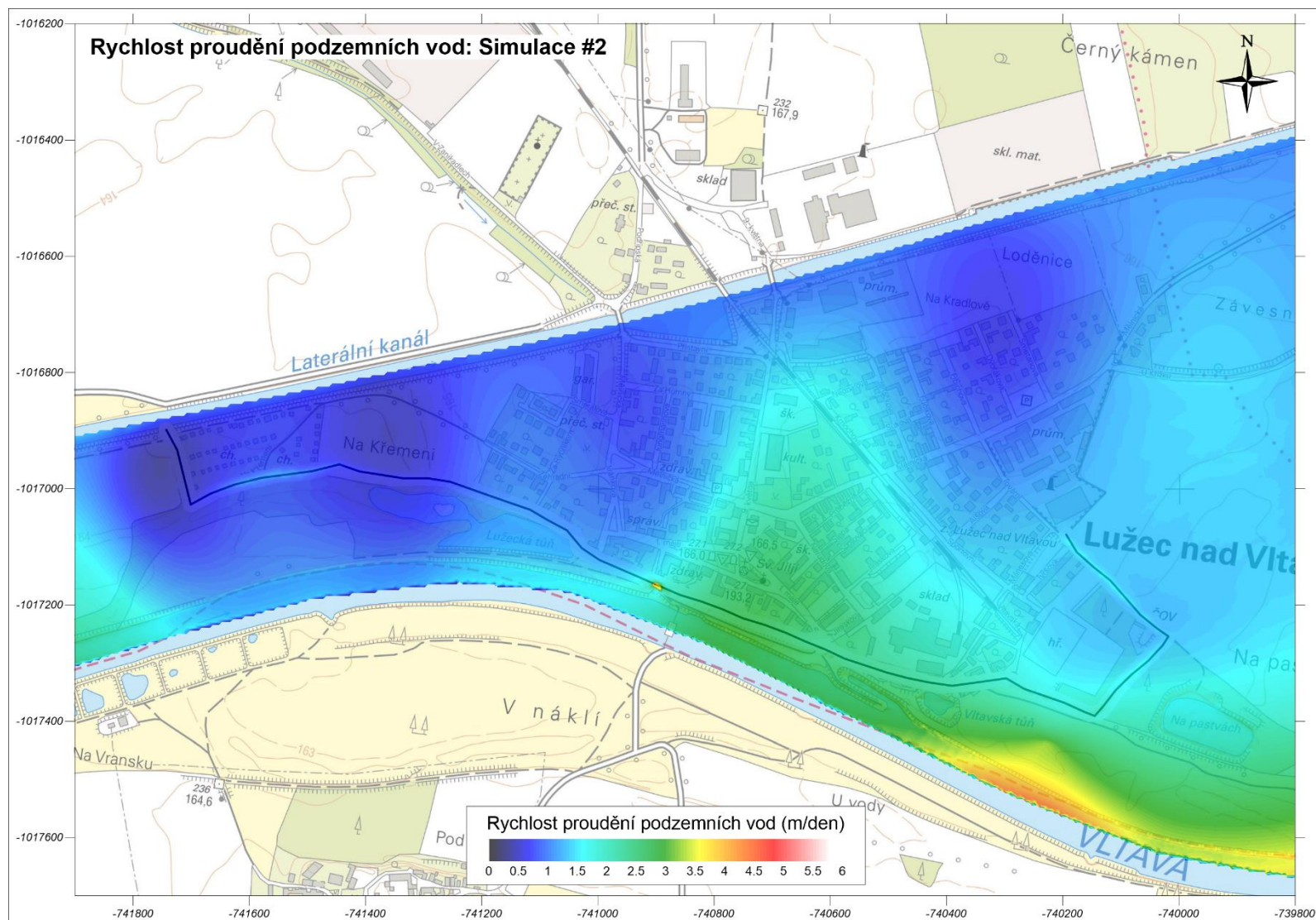
Obrázek 4.26: Vliv hloubky založení PPO na režim podzemních vod: Scénář #5

Na obrázcích 4.27 až 4.31 jsou dokumentovány modelem vypočtené rychlosti proudění podzemních vod ve štěrkovém kolektoru za normálního režimu proudění podzemních vod. V následujících bodech jsou shrnuta nejdůležitější zjištění:

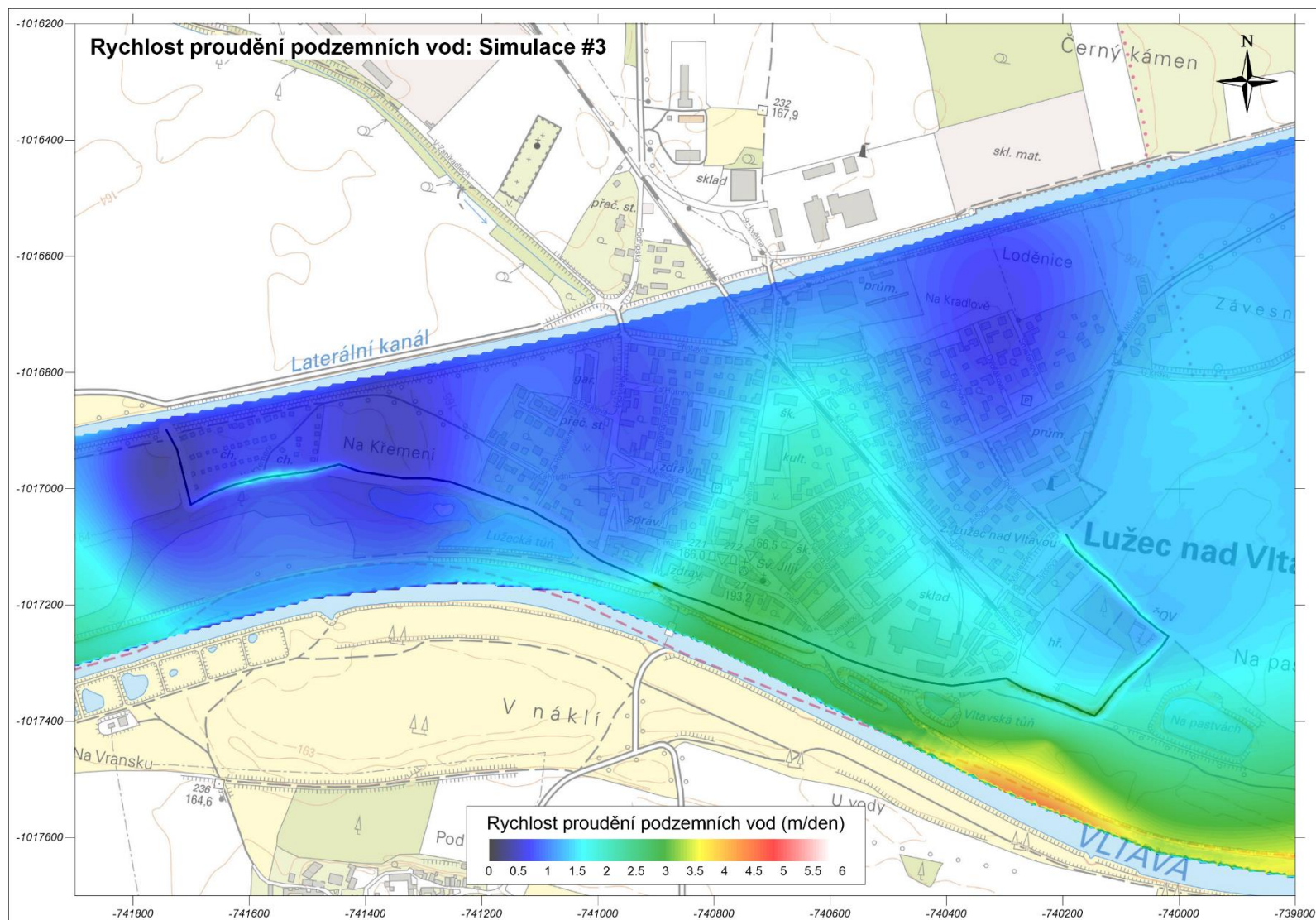
- Ve scénářích #1, 2 a 3 se hydraulická bariéra hloubkového založení PPO projevila ve velmi malé míře. I když lokálně došlo k určitému zrychlení proudění, vyšší rychlosti nijak nevybočovaly z hodnot běžných ve štěrkovém kolektoru.
- Scénář #4 (Na Křemeni a „u hřiště“ bariéra 1 m nad bází štěrkového kolektoru) naopak indikoval násobné až řádové zrychlení proudění, a to zejména pod hydraulickou bariérou v lokalitě „u hřiště“ na jv. okraji obce.
- Zcela zanedbatelný dopad na rychlosti proudění podzemních vod ve štěrkovém kolektoru měl scénář #5 (variantní hloubka založení PPO v závislosti na typu PPO). Bylo to dáno mj. i tím, že hydraulická bariéra projektované PPO byla situována ve své podstatné délce bezpečně nad normální hladinou podzemních vod v zájmové oblasti.



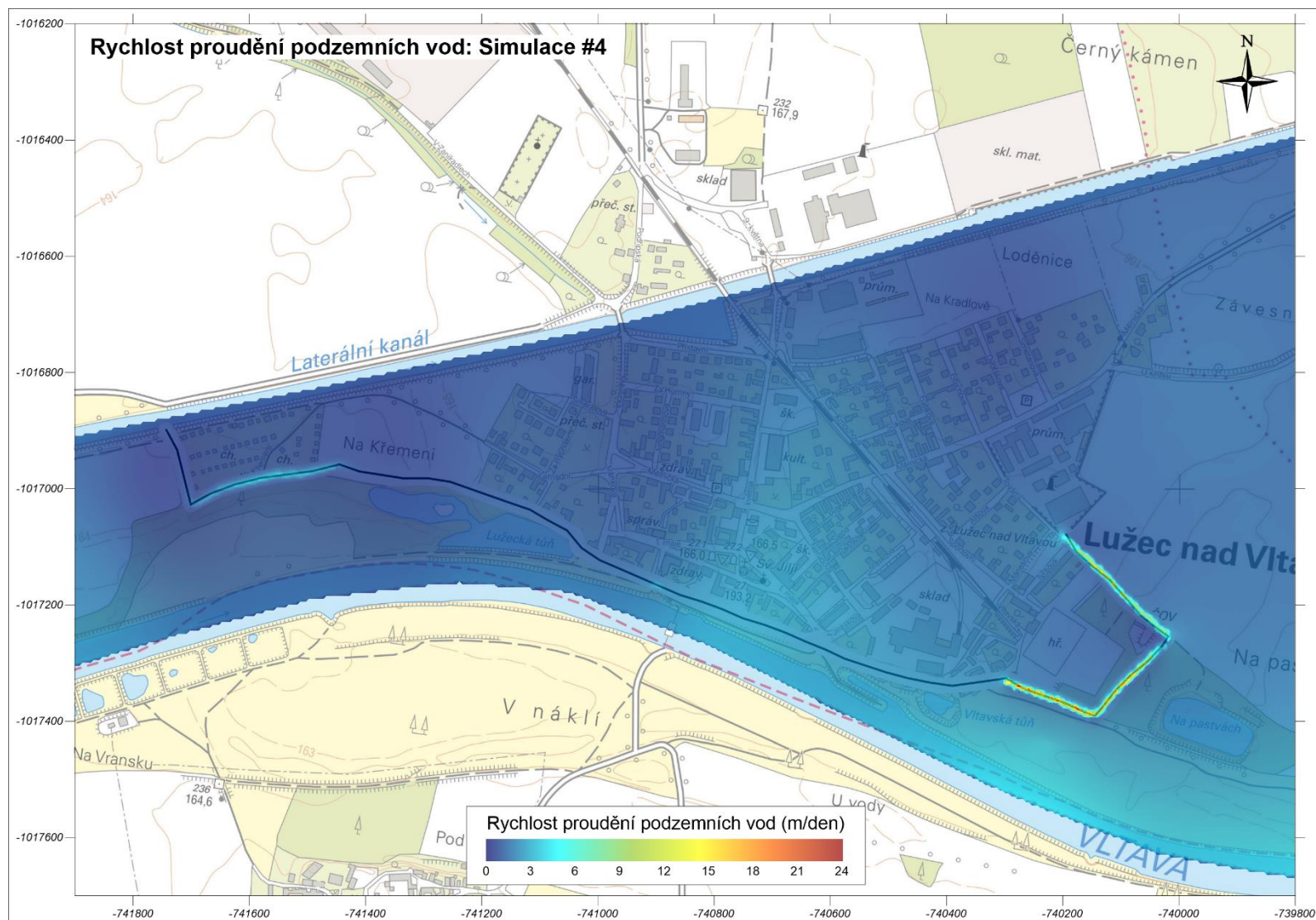
Obrázek 4.27: Rychlost proudění podzemních vod šterkového kolektoru za normálního režimu podzemních vod: Scénář #1



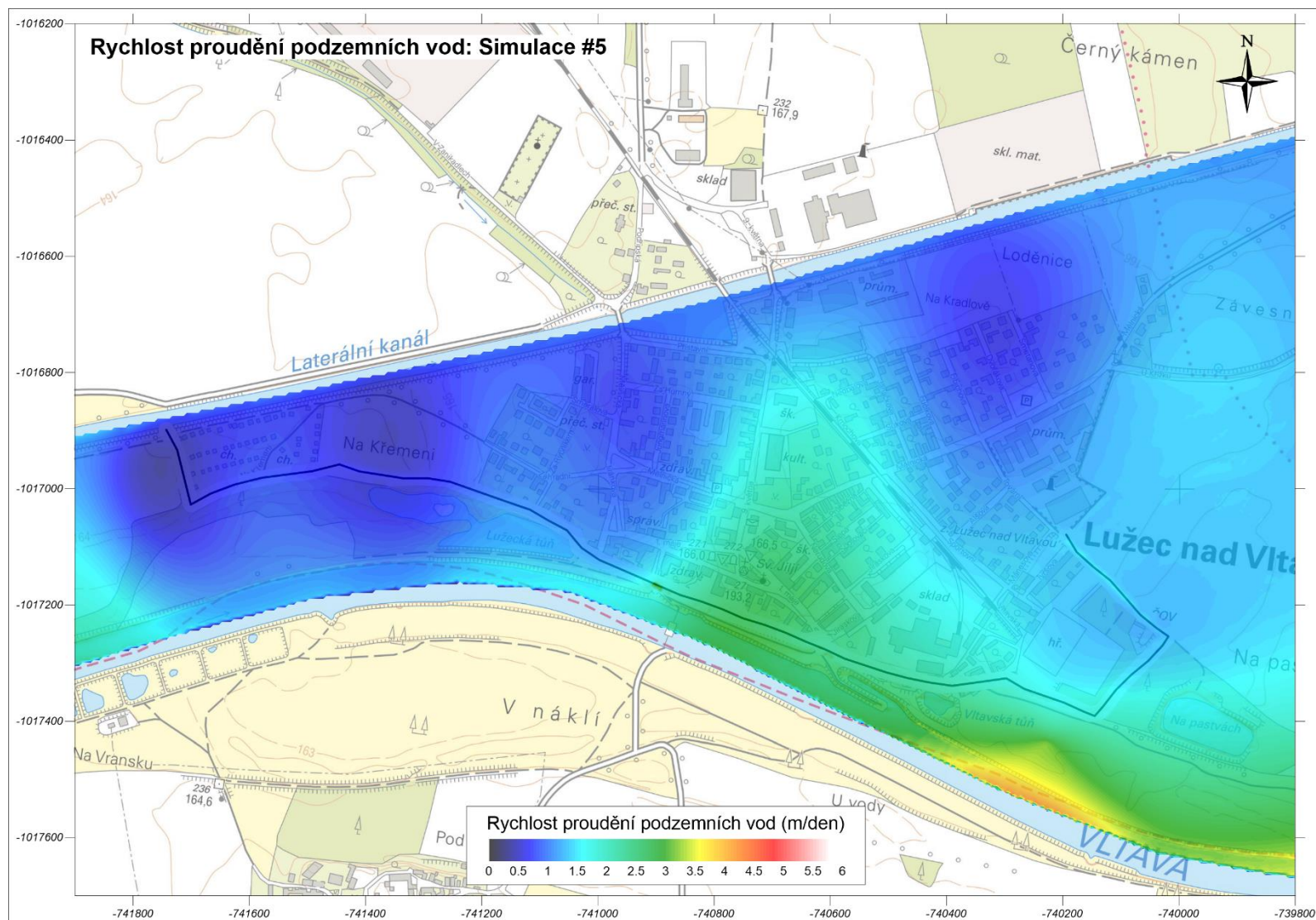
Obrázek 4.28: Rychlost proudění podzemních vod šterkového kolektoru za normálního režimu podzemních vod: Scénář #2



Obrázek 4.29: Rychlost proudění podzemních vod šterkového kolektoru za normálního režimu podzemních vod: Scénář #3



Obrázek 4.30: Rychlost proudění podzemních vod šterkového kolektoru za normálního režimu podzemních vod: Scénář #4



Obrázek 4.31: Rychlost proudění podzemních vod šterkového kolektoru za normálního režimu podzemních vod: Scénář #5

5. ZÁVĚR

Cílem této studie bylo sestavit a zkalibrovat hydraulický numerický model kolektoru kvartérních sedimentů na území obce Lužec nad Vltavou a na takto zpracovaném modelu následně spustit prediktivní simulace zaměřené na posouzení (1) vlivu navržené hloubky založení PPO na průsaky podzemních vod do chráněného prostoru během povodňové vlny a (2) vlivu hloubky založení PPO na přirozený režim podzemních vod v oblasti.

Model byl koncipován jako plně 3D se 3 modelovými vrstvami. První (svrchní) modelová vrstva reprezentovala horizont nivních sedimentů, který je místy doplněn, případně zcela alterován antropogenními navážkami. Zbylé dvě modelové vrstvy byly vyhrazeny hydrostratigrafické jednotce průlinově propustných fluviálních sedimentů charakteru písčotěrků až štěrkopísků reprezentujících hlavní kvartérní kolektor v oblasti. Rozdělení této hydrostratigrafické jednotky do dvou modelových vrstev bylo realizováno s ohledem na nutnost simulovat různou hloubku založení PPO ve variantních scénářích. Všechny tři modelové vrstvy byly simulovány v podmínkách přechodné hladiny, kdy model sám v průběhu výpočtu rozhodoval, zda byla hladina podzemních vod volná či napjatá. Rozloha modelovaného území byla přibližně 1,9 km².

Modelované území je ze severu vymezeno Laterálním kanálem Vraňany – Hořín, z východu a západu umělými okrajovými podmínkami vedenými v dostatečné vzdálenosti od zájmového území tak, aby neovlivnily simulace vlivu PPO na režim podzemních vod. Jižní ohraničení modelové domény pak bylo ztotožněno s řekou Vltavou. Přetoky přes západní, severní a východní hranici modelu v rámci štěrkového kolektoru byly simulovány OP 3. typu v nastavení obecná hladina. Laterální kanál byl simulován OP 3. typu v nastavení obecného vodního toku. Řeka Vltava, vymežující modelové území z jihu, byla OP 3. typu v nastavení řeka.

Hydraulický numerický model byl zpracován jako trojdimenzionální na bázi numerické metody konečných rozdílů verifikovaným softwarem MODFLOW-NWT. Modelová oblast byla diskretizována pravoúhlou sítí bloků, jejichž velikost bloků byla zvolena 5 x 5 m. Grid byl rotován s ohledem na tvar oblasti, generelní směr proudění podzemních vod a s cílem snížení počtu neaktivních bloků.

Hydraulický model byl kalibrován ve dvou krocích: v prvním kroku byl model zkalibrován v ustáleném režimu proudění podzemních vod (stacionární kalibrace) na pozorování hladin podzemních vod v březnu 2019. Druhý krok sestával z kalibrace v neustáleném režimu proudění podzemních vod (transientní kalibrace) na pozorování hladin podzemních vod v období od března 2019 do června 2020 včetně s měsíčním krokem pro změnu parametrů modelu, tj. v 16 jednotlivých časových úsecích.

Stacionární kalibrace byla ukončena s průměrnou odchylkou $ME = <1$ mm, průměrnou absolutní odchylkou $MAE = 13$ cm, kvadratickým průměrem chyby $RMS = 17$ cm a s normalizovanou $RMS RN 7,5$ %. U transientní kalibrace pak dosaženy následující hodnoty $ME = 13$ cm, $MAE = 36$ cm, $RMS = 46$ cm a $RMS RN = 9,3$ %.

Komentáře k vodní bilanci transientního hydraulického modelu jsou následující:

- Celkové zdroje modelu, které byly vypočteny na cca 90 l/s, byly představovány efektivní infiltrací atmosférických srážek, břehovou infiltrací Laterálního kanálu a přítoky přes vnější okrajové podmínky modelu.
- Největší přítoky do modelu přes vnější hranice byly situovány na severní hranici modelované oblasti. Jejich hodnotu odhadujeme na cca 40 l/s, což představuje bezmála polovinu celkových zdrojů modelu.
- Břehová infiltrace Laterálního kanálu dosahovala hodnot přibližně 7 l/s.
- Naprostou většinu propadů (76 z 90 l/s) představovala drenáž řeky Vltavy.
- Bilance zásob podzemních vod byla v průběhu kalibrační periody transientního modelu zřetelně záporná, tj. došlo ke snížení zásob podzemních vod.
- Specifický základní odtok z celého území modelu zprůměrovaný pro celé období kalibrační periody transientního modelu byl 1,9 l/s/km². Tato hodnota odpovídá srážkové dotaci 60 mm/rok.

Na takto sestaveném a zkalibrovaném modelu byly realizovány prediktivní simulace, přičemž byly sledovány reakce modelu na různou hloubku založení PPO:

1. PPO v celé délce založena do hloubky 5,5 m,
2. PPO v celé délce založena do hloubky 6,0 m,
3. PPO v lokalitě Na Křemeni na z. okraji a v lokalitě „u hřiště“ na jv. okraji založena do hloubky 8 m pod terénem, všude jinde pak do hloubky 5,5 m,
4. PPO v lokalitě Na Křemeni na z. okraji a v lokalitě „u hřiště“ na jv. okraji založena 1 m nad bázi štěrkového kolektoru, tzn. že hloubka založení v těchto dvou lokalitách kolísala mezi 6,5 až 12 m pod terénem, všude jinde pak do hloubky 5,5 m,
5. Hloubka založení PPO byla závislá na typu projektované PPO a pohybovala se v intervalu od 0,8 m po 6 m pod úrovní stávajícího terénu.

Celková množství drénem odváděných podzemních vod **prosakujících skrz štěrkový kolektor** se pro jednotlivé variantní simulace pohybovala v rozmezí od cca 30 do 250 l/s. Hodnoty odpovídají dennímu průměru v průběhu kulminace. **Podtrhujeme, že hydraulický model neřešil průsaky skrz tělesa hráze.** Dále je nutno zdůraznit, že **reálná čerpáná množství v jímkách budou záviset na skutečné hloubce založení, způsobu provedení a skutečném vyspádování jednotlivých drenážních žeber. Reálná čerpání budou také vyšší o další složky hydrologické bilance, zejména o hypodermický a povrchový odtok,** které nebyly předmětem této studie a u kterých lze v případě intenzivních srážek očekávat výrazné zvýšení přítoků do drénu. Další poznatky jsou shrnuty do následujících bodů:

- V lokalitách Na Křemeni i „u hřiště“ byly ve všech pěti simulacích zaznamenány plošné průsaky podzemních vod nad úroveň terénu navzdory přítomnosti drénu podél PPO. Je zřejmé, že tyto vody díky vyspádování terénu k Vltavě (a tedy i k PPO) dotečou k drénu a stanou se tak součástí jeho bilance. S tímto stékáním průsakových vod k drénu bylo v modelu počítáno způsobem, který umožňoval použitý modelovací software, tj. místům, kde byly zaznamenány tyto průsaky,

byla v modelu přiřazena okrajová podmínka simulující plošný drén s bází v úrovni terénu. Vody, které byly z tohoto plošného drénu „vyčerpány“, byly přiřazeny k příslušným čerpacím jímčkám na základě analýzy sklonu terénu.

- K výrazným průsakům podzemních vod do chráněného prostoru docházelo přibližně 1 den od začátku kulminace. Maximálních hodnot pak tyto průsaky dosahovaly na konci dvoudenní kulminace. Výjimkou v tomto směru byl scénář #4, kdy začátek průsaků i jejich kulminace byl zhruba o den opožděn.
- V případě povodňové vlny s kulminací 2 dny nebylo, kromě dvou již zmiňovaných lokalit, identifikováno žádné další území, kde by mělo docházet k významným průsakům podzemních vod šterkového kolektoru **nad úroveň terénu** přes krycí vrstvu antropogenních navážek a nivních sedimentů. Hodnoty těchto průsaků se navzdory poměrně rozdílným scénářům z hlediska hloubky založení PPO od sebe zásadně (s výjimkou scénáře #4) neliší.
- Ve scénářích #1, 2, 3 a 5 byla maxima čerpaných průsakových vod v jímkách v lokalitě „u hřiště“ (čísla 8 a 9). U scénáře #4 byla tato lokalita hydraulickou bariérou utěsněna natolik, že průsaky zde byly prakticky eliminovány.
- Velmi malé rozdíly byly v maximech dosažených hladin podzemních vod. Naprostá většina intravilánu chráněného území vykazovala hladinu podzemních vod v hloubkách větších než 3 m pod terénem (m p.t.). Výjimku tvořila území v těsné blízkosti PPO (zejména v západní části obce) a pak již zmiňované lokality Na Křemeni a „u hřiště“, kde hladiny podzemních vod v průběhu kulminace dostupovaly i nad úroveň terénu.
- Na základě provedených simulací výsledků lze konstatovat, že množství průsakových vod bylo, kromě vlastních parametrů PPO, velmi výrazně ovlivněno:
 - výškou a délkou kulminace povodňové vlny,
 - hydraulickou vodivostí krycích nivních sedimentů a antropogenních navážek,
 - intenzitou srážek a jejich koincidencí s kulminací povodňové vlny,
 - výškou hladin podzemních vod v čase nástupu povodňové vlny.
- Realizované predikce v tomto ohledu **simulovaly velmi nepříznivý, i když stále pravděpodobný scénář**.
- Dle výsledků modelu je také možno dovodit, že pokud v minulosti docházelo k významnému zatápění prostor nad rámec modelem vypočítaných rozsahů a objemů, pak tomu mohlo nastat buď v důsledku nepříznivějších podmínek, než jaké byly simulovány (větší intenzita srážek, delší kulminace, vyšší počáteční hladina podzemních vod aj.), anebo – to daleko pravděpodobněji – z jiné příčiny: např. povrchovým či hypodermickým odtokem.
- Pro úplnost dodáváme, že žádný ze scénářů nepočítal s kolapsem uzávěry Laterálního kanálu. Jinými slovy, hladina vody v kanálu byla po celou dobu stálá, odpovídající příslušnému manipulačnímu řádu.
- Vliv hydraulické bariéry na rychlost proudění podzemních vod pod PPO byl zřejmý ve všech scénářích. Rozdíl byl v míře: zatímco u scénářů #1, 2, 3 a 5 zrychlení odpovídalo přibližně dvojnásobku hodnot běžných v okolním kolektoru, u scénáře #4 byl tento rozdíl násobný až řádový. Ve všech scénářích se toto zrychlení týkalo východního úseku PPO, zejména pak lokality „u hřiště“.
- Modelem vypočtené změny v rychlostech proudění pod hydraulickou bariérou za normálního režimu proudění podzemních vod neindikovaly, vyjma scénáře #4, žádná výrazná zrychlení nad rámec hodnot běžných v tomto prostředí. Podobně jako u modelu povodňové vlny, scénář #4

opět vykázal násobné až řádové zrychlení proudění, ke kterému docházelo, stejně jako v přechozím případě, pod hydraulickou bariérou v lokalitě „u hřiště“ na jv. okraji obce.

6. LITERATURA

Anderson, M., P. and Woessner, W., W., 1992, Applied Ground Water Modeling, Academic Press, Inc, San Diego, CA.

Demek, J. a kol., 1987, Zeměpisný lexikon ČSR, Hory a nížiny, Academia, Praha.

Jandová, A., 2018, Protipovodňová ochrana obce Lužec nad Vltavou, Souhrnná technická zpráva, HG partner s.r.o., Úvaly.

Králík, R., Svárovský, M., 2020, Protipovodňová ochrana obce Lužec nad Vltavou – IG, HG průzkum, AZ Geo s.r.o., Ostrava.

Niswonger, R.G., Panday, Sorab, and Ibaraki, Motomu, 2011, MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A37, 44 p.

Plecitý, S., 2014, Laterální kanál Vraňany – Hořín, mimořádná etapová zpráva o TBD za období 6/2013 – 3/2014, VODNÍ DÍLA – TBD a.s., Praha.

Quitt, E., 1971, Klimatické oblasti Československa, Studia Geographica, Brno.

Šindelář, J., 2017, Numerický model proudění podzemní vody pro návrh PPO Lužec nad Vltavou, Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Praha.

Vižďa, P., Oberhelová, J., 2017, PPO Lužec nad Vltavou – předběžný IG a HG průzkum, závěrečná zpráva, GEOTest, a.s., Brno, Praha.