



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**OPATŘENÍ PRO ZVÝŠENÍ TRANSFORMAČNÍ
SCHOPNOSTI INUNDAČNÍHO ÚZEMÍ SVITAVY V
ÚSEKU HOLÁSKY – CHRVICE**

MEASURES TO INCREASE THE TRANSFORMATION CAPACITY OF THE SVITAVA
INUNDATION AREA IN THE HOLÁSKY - CHRVICE SECTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Havran

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|-------------------------|---|
| Studijní program | N3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby |
| Pracoviště | Ústav vodních staveb |

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | |
|-----------------|---|
| Student | Bc. David Havran |
| Název | Opatření pro zvýšení transformační schopnosti inundačního území Svitavy v úseku Holásky – Chrlice |
| Vedoucí práce | doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D. |
| Datum zadání | 31.3.2020 |
| Datum odevzdání | 14.1.2021 |

V Brně dne 31.3.2020

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

AQUAVEO, 2018. SMS 13.0 Tutorial.

Lai, Y. G., 2010. Guide on unsteady flow modeling with SRH-2D. Denver: USBR.

Lai, Y. G., 2016. Modeling In-Stream Structures and Internal Features with SRH-2D. Technical Report: SRH-2016-09. Denver: USBR.

Geometrická data povrchu terénu a objektů v úseku toku.

Hydrologická data Svatky, Svitavy a Ivanovického potoka.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Na území města Brna je relativně málo ploch v inundačním území Svitavy, které by se daly využít pro transformaci povodňových vln. Jedno z posledních nezastavěných míst leží na území městských částí Holásky a Chrlice. Student provede posouzení stávajícího stavu a návrh opatření, které zvýší transformační schopnost tohoto území. Posouzení a návrh bude proveden na základě simulace PV100 na Svitavě dvourozměrným numerickým modelem. Výsledkem bude kvantifikace změny transformační schopnosti území.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi využití levého inundačního území Svitavy pro účely transformace povodňové vlny PV_{100} ve Svitavě. Zájmové území se nachází na území městských částí Holásky a Chrlice. Pro simulaci proudění za stávajícího stavu a variantních řešení navrhovaného stavu bylo využito softwaru SMS s hydraulickým dvojrozměrným simulačním modelem SRH. Na základě výsledků proudění za stávajícího stavu byly navrženy a simulovány dvě variantní řešení navrhovaného stavu. Výsledkem této práce je kvantifikace změny transformačních schopností zájmového území v obou navržených variantách a následné doporučení.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the possibilities of using the left inundation area of Svitava river for purposes of transformation of the 100-years flood wave in Svitava. The area of interest is located on the territory of the Holásky and Chrlice city districts. SMS software with a hydraulic two-dimensional simulation model SRH was used to simulate the flow in the current state and variant solutions of the proposed state. Based on the results of the flow in the current state, two variant solutions of the proposed state were designed and simulated. The result of this work is the quantification of the change in the transformation capabilities of the area of interest in both proposed variants and followed by a recommendation.

KLÍČOVÁ SLOVA

městská čtvrť Chrlice, městská část Holásky, SMS-SRH, suchá nádrž, řeka Svitava, povodňová vlna, transformace povodňové vlny, 2D

KEYWORDS

Chrlice city district, Holásky city district, SMS-SRH, detention basin, Svitava river, flood wave, transformation of flood wave, 2D

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. David Havran Opatření pro zvýšení transformační schopnosti inundačního území Svitavy v úseku Holásky – Chrlice. Brno, 2021. 78 s., 10 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Opatření pro zvýšení transformační schopnosti inundačního území Svitavy v úseku Holásky – Chrlice* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 14.1.2021

Bc. David Havran
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Opatření pro zvýšení transformační schopnosti inundačního území Svitavy v úseku Holásky – Chrlice* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 14.1.2021

Bc. David Havran
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval mé rodině, která mě podporovala v průběhu celého studia jak finančně, tak emocionálně. Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Zbyňku Zachovalovi, Ph.D. za odborné vedení a nesmírnou trpělivost při konzultacích. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem lektorům, kteří v průběhu let mého studia vynaložili veliké úsilí předat nám studentům kousek svých znalostí.

OBSAH

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD | 10 |
| 1.1 | Popis zájmového území..... | 11 |
| 1.2 | Hydrologické údaje | 13 |
| 1.3 | Transformace povodňových vln | 15 |
| 1.4 | Suchá nádrž..... | 17 |
| 2 | CÍL PRÁCE A METODA ŘEŠENÍ | 19 |
| 2.1 | Cíl práce..... | 19 |
| 2.2 | Podklady..... | 19 |
| 3 | NUMERICKÝ MODEL | 20 |
| 3.1 | Software | 20 |
| 3.2 | Přijatá zjednodušení..... | 20 |
| 3.3 | Řídicí rovnice | 21 |
| 3.4 | Model terénu | 22 |
| 3.5 | Výpočtová oblast a její diskretizace | 22 |
| 3.6 | Drsnost povrchu..... | 23 |
| 3.7 | Podmínky jednoznačnosti | 25 |
| 3.7.1 | Počáteční podmínky | 25 |
| 3.7.2 | Okrajové podmínky..... | 25 |
| 3.8 | Parametry simulace | 26 |
| 3.9 | Kalibrace..... | 27 |
| 3.10 | Stanovení průtoků | 27 |
| 4 | STÁVAJÍCÍ STAV | 29 |
| 4.1 | Popis řešeného stavu..... | 29 |
| 4.2 | Výsledky..... | 29 |
| 4.3 | Zhodnocení | 37 |
| 5 | NAVRHOVANÝ STAV – VARIANTA 1 | 40 |
| 5.1 | Popis varianty 1 | 40 |
| 5.2 | Výsledky..... | 41 |
| 5.3 | Zhodnocení | 53 |
| 6 | NAVRHOVANÝ STAV – VARIANTA 2 | 54 |
| 6.1 | Popis varianty 2 | 54 |
| 6.2 | Výsledky..... | 56 |
| 6.3 | Zhodnocení | 68 |
| 7 | SOUHRNNÉ GRAFY | 69 |
| 8 | ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ | 72 |
| 8.1 | Závěr | 72 |

| | | |
|------|-------------------------|-----------|
| 8.2 | Zhodnocení | 72 |
| 9 | LITERATURA | 73 |
| 10 | SEZNAMY | 75 |
| 10.1 | Veličin..... | 75 |
| 10.2 | Zkratek..... | 75 |
| 10.3 | Obrázků..... | 76 |
| 10.4 | Tabulek..... | 77 |
| 11 | PŘÍLOHY | 78 |
| 11.1 | Výkresová část | 78 |

1 Úvod

V posledních letech naši krajinu postihují časté povodně, za zmínku stojí roky 1997, 2002 a 2006. Příčinou těchto povodní jsou extrémní hydrometeorologické situace v kombinaci s nedostatečnými protipovodňovými opatřeními a nevhodnými úpravami koryt toků, které byly napřimovány a zužovány kvůli progresivní zástavbě údolí a jejich obhospodařování v poválečných letech. Tudíž přicházely o své zaplavované inundační oblasti. Uvedené se projevilo ztrátou transformačních schopností dřívějších inundačních území, kterou byla snaha kompenzovat příčnými stavbami (jezy a přehradami). V případě jejich nezřízení dochází ke zvětšení hodnoty kulminačního průtoku níže po toku, což vede ke zhoršení ohrožení území a nutnosti zřízení nákladnějších protipovodňových opatření.

Progresivní zástavba byla prováděna i ve městě Brně v inundačním území stoletého průtoku Svitavy. Koryto bylo napřimeno a zúženo do jednoduchého lichoběžníku se strmými svahy. Stoletý průtok zde může stále přinést škody na majetku, životech a přírodě. Je tedy nutné navrhnout řešení těchto negativních dopadů. [1]

Řešení byla snaha najít v rámci Generelu města Brna, kde se plánuje ochrana západní oblasti městské části Chrlice pomocí suché nádrže, zvýšení mostů a lávek, které vzdouvají hladinu povodňových průtoků. Dále se plánuje vybudování protipovodňových zdí, a to v případě, kdy je tok prostorově omezen. V případě neomezeného prostoru, je v plánu využití rozlivu povodňové vlny do prostoru bermy a vybudování oddálených hrází. Bermy je poté tendence využívat pro rekreační, sportovní či jiné účely. Snížení pevných částí jezů o 1 m a jejich doplnění o pohyblivé hradicí konstrukce (klapkové a vakové uzávěry) a využití pravobřežního inundačního území Svatky pod soutokem Svatky se Svitavou v kombinaci s oddálenými protipovodňovými hrázemi. [2]

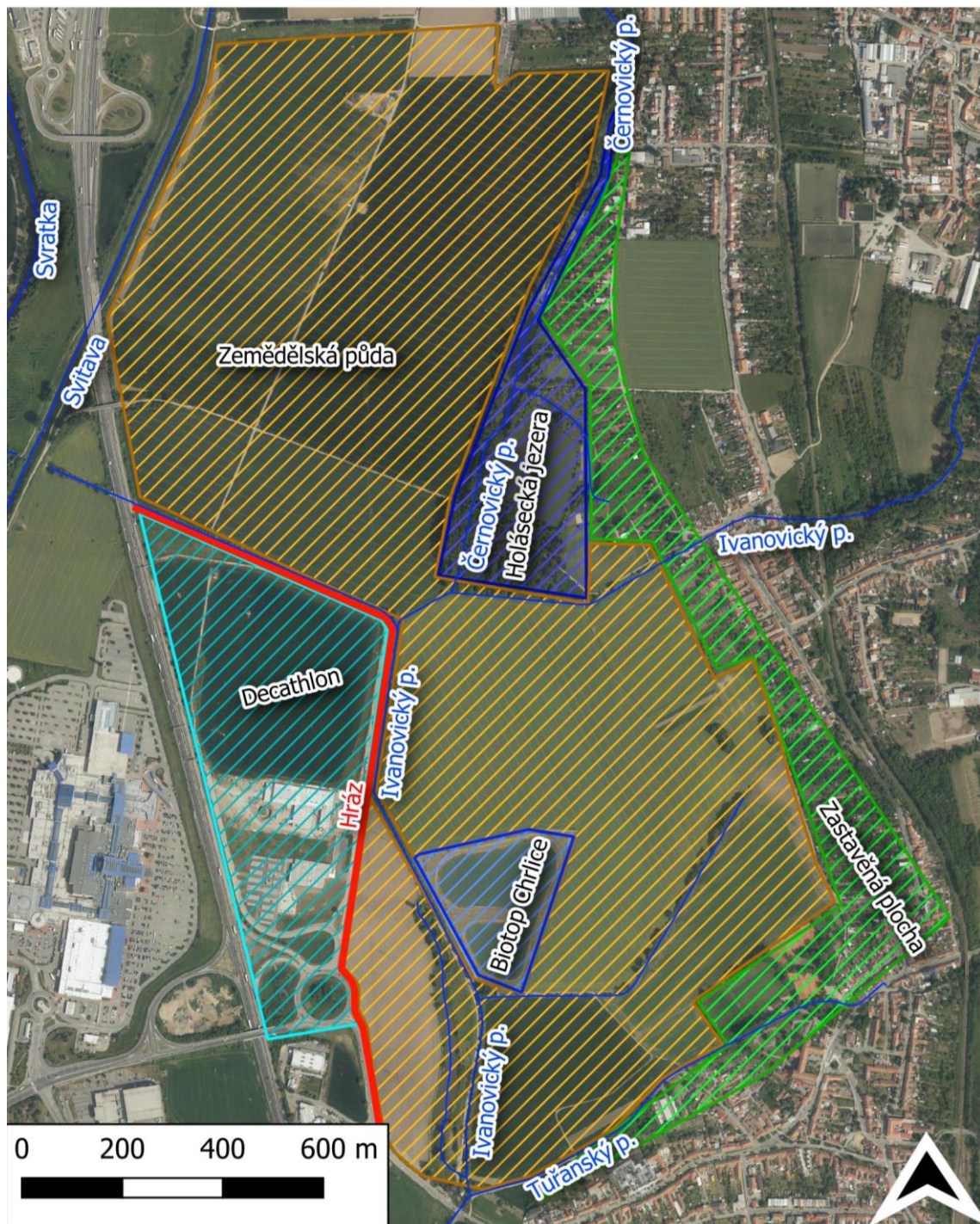
Důležité především pro obce ležící pod Brnem je využití inundačního území k obnovení původní transformační schopnosti oblasti Brna, tedy zmenšení hodnoty kulminačního průtoku stoleté povodně a jeho oddálení v čase. Uvedeného lze dosáhnout například vybudováním suché nádrže, která se bude nárazově zaplavovat v extrémních povodňových situacích.

Tato diplomová práce se zabývá vypracováním možnosti využití levobřežního inundačního území toku Svitavy k účelu transformace povodňové vlny PV₁₀₀ Svitavy.

1.1 Popis zájmového území

Zájmové území se nachází v Jihomoravském kraji v okrese Brno město pod správou státního podniku Povodí Moravy, s.p. Přesněji na katastrálním území Brněnské Ivanovice (612227), Holásky (612243), Chrlice (654132) a Modřice (697931). Zájmové území je vymezené ze západu tokem Svitavy a dálnicí D2 a z východní strany zástavbou městských částí Holásky a Chrlice. Ze severu je zájmové území vymezené zemědělskými stavbami AGRO Brno – Tuřany, a.s. a z jihu zástavbou Chrlic. [3]

Oblast je z větší části zemědělsky využita. Na východní straně oblasti se nacházejí Holásecká jezera a za nimi začíná městská část Holásky. Oblastí protéká Černovický potok, který protéká Holáseckými jezery. Městskou částí Holásky protéká Ivanovický potok, do kterého se vlévá pravobřežně Černovický potok. Ivanovický potok dále pokračuje podél ohrazovaného areálu Decathlonu (DECASPORT s.r.o.) a biotopu Chrlice (Obr. 1).



Obr. 1 Popis oblasti [4]

1.2 Hydrologické údaje

Do oblasti vtékají 2 významné toky, a to Svitava a Svatka. Průtoky jsou získány z hlásných profilů jejichž poloha je vyznačena na Obr. 2.

| | |
|------------------------|------------------------|
| Tok: | Svitava |
| Název stanice: | Bílovice nad Svitavou |
| Kategorie: | A |
| Povodí II. řádu: | 4-15-02 Svitava |
| Průměrný roční stav: | 97 cm |
| Průměrný roční průtok: | 5,22 m ³ /s |

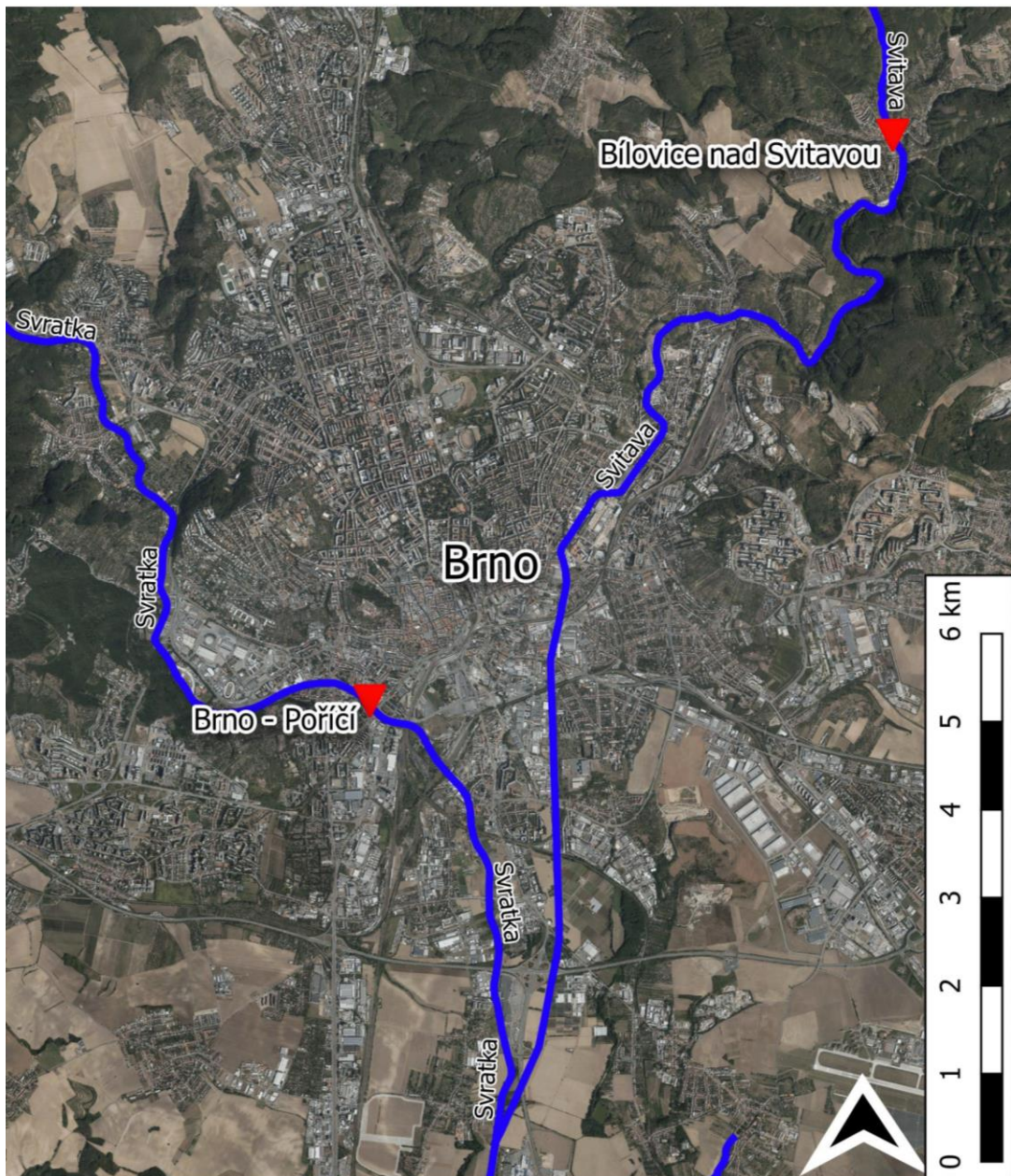
Tab. 1 N-leté průtoky Svitava [5]

| N-letost | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|----------------------------|------|------|------|-------|-------|
| Průtok [m ³ /s] | 37,0 | 61,0 | 79,0 | 140,0 | 180,0 |

| | |
|------------------------|---------------------------|
| Tok: | Svatka |
| Název stanice: | Brno – Poříčí |
| Kategorie: | A |
| Povodí III. řádu: | 4-15-01 Svatka po Svitavu |
| Průměrný roční stav: | 54 cm |
| Průměrný roční průtok: | 7,76 m ³ /s |

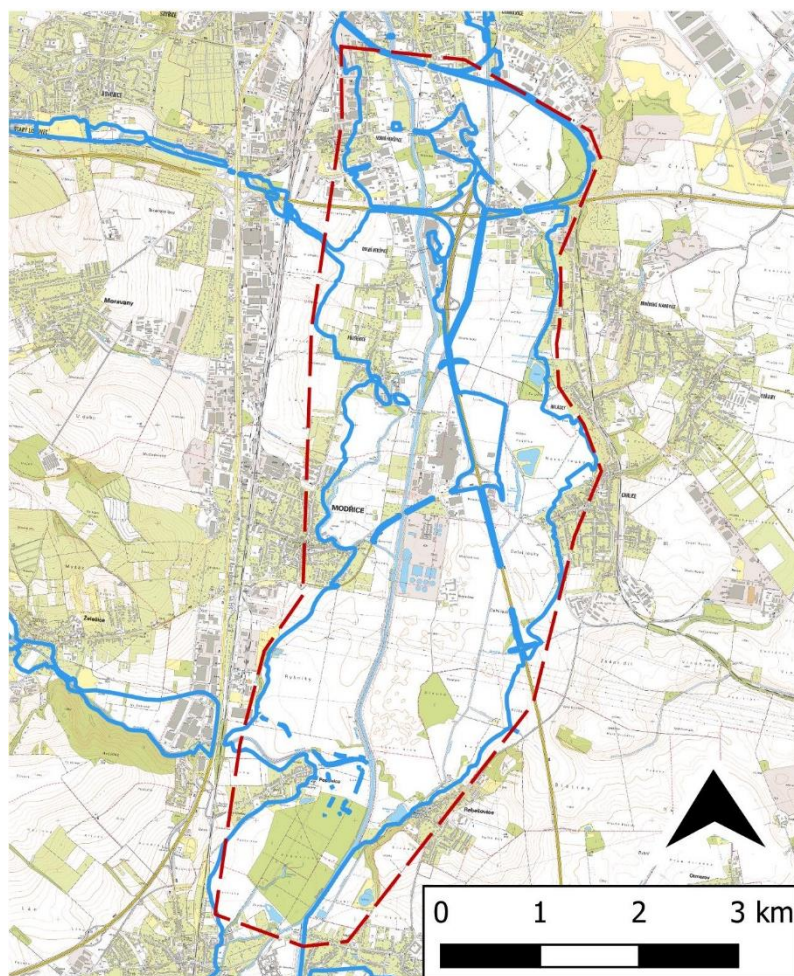
Tab. 2 N-leté průtoky Svatka [6]

| N-letost | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 |
|----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Průtok [m ³ /s] | 53,0 | 115,0 | 150,0 | 240,0 | 280,0 |



Obr. 2 Poloha hlásných profilů [4]

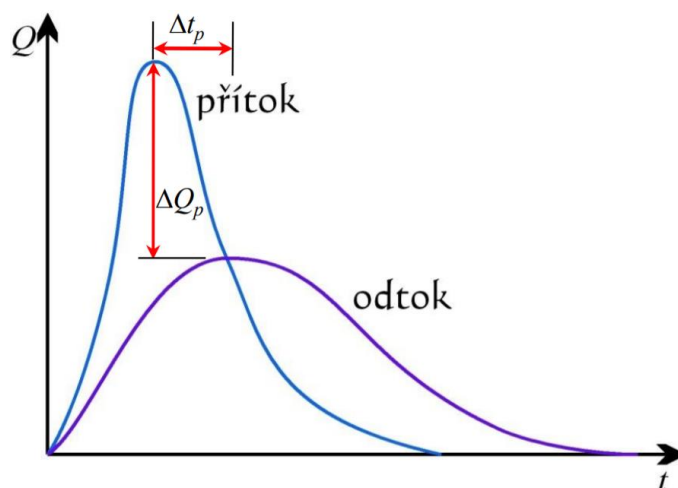
Rozliv v oblasti při průtoku Q_{100} zasahuje většinu plochy až na dálnici D1 a D2 a ohrazovaný areál Decathlonu, viz Obr. 3.



Obr. 3 Rozliv při Q_{100} (modře), rozsah modelu (červeně) [4, 7]

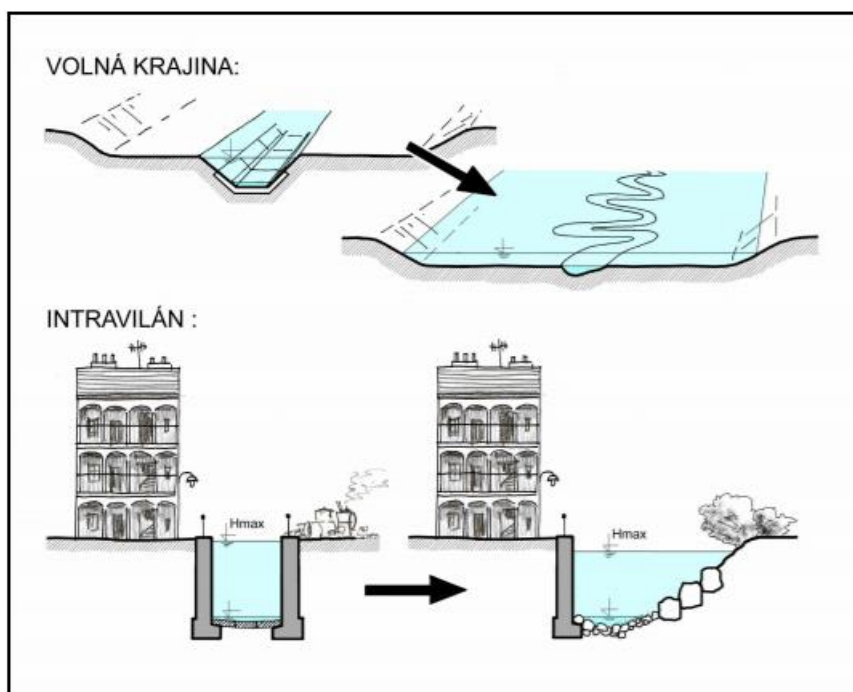
1.3 Transformace povodňových vln

Z hlediska ochrany před nepříznivými účinky povodně je důležité především zmenšení kulminačního průtoku a zpoždění kulminace povodně. Doba zpoždění kulminace Δt_p je důležitá z hlediska přípravy ochrany území níže po toku. Obyvatelé oblastí mají delší dobu na spuštění krizových plánů. Zmenšení velikosti kulminačního průtoku ΔQ_p způsobí, že povodeň nemá v kulminaci tak destruktivní účinek. Výše uvedené je znázorněno na Obr. 4.



Obr. 4 Transformace povodňové vlny [8]

K tomuto účelu slouží transformační schopnosti vodohospodářských objektů jako jsou např. suché nádrže, jezové zdrže, vodní nádrže, ale také vhodně zvolený tvar koryta s širokými bermami (Obr. 5).



Obr. 5 Efektivní a přírodě blízké úpravy koryta k transformaci povodňových průtoků [9]

Zmíněné retenční prostory se plní, či prázdní dle bilanční rovnice

$$dV = [Q_{in} - Q_{out}] dt, \quad (1)$$

$$V = V_0 + dV, \quad (2)$$

kde dV je zvětšení (zmenšení) stávajícího objemu V_0 , dále Q_{in} je průtok přitékající a Q_{out} je průtok odtékající z retenčního prostoru. Celkový retenční objem V je následně reprezentován součtem V_0 a dV .

1.4 Suchá nádrž

Pro ochranu měst a obcí, popř. dalších významných objektů, může být vhodným řešením vybudování tzv. suchých nádrží umístěných v povodí nad chráněným územím. Rozmach v budování suchých nádrží lze v České republice zaznamenat zejména v posledních desetiletích. Suchá nádrž svým transformačním účinkem zajistí změnu parametrů povodní.

Suché nádrže svými parametry (výška hráze, objem nádrže) obvykle odpovídají malým vodním nádržím. Suché nádrže jsou konstrukčně a funkčně specifická vodní díla, která jsou zatěžována nahodile při povodňových událostech. Suchá nádrž je navrhována buďto přímo na toku anebo v údolnici. Transformační schopnost tkví v naplnění retenčního prostoru. Při nedostatečné hltnosti spodních výpustí průtok převádí bezpečnostní přeliv. [10, 11]

„V podstatě se jedná o výběr vhodné lokality, stanovení velikosti ovladatelného a neovladatelného ochranného (retenčního) objemu nádrže v závislosti na požadovaném stupni ochrany zájmového území a určení kapacity výpustí a bezpečnostních přelivů. Základním úkolem při stanovení rozsahu snížení povodňových průtoků nádrží je nalezení vztahu mezi povodňovým průtokem, objemem retenčních prostorů nádrže a sníženým tzv. neškodným průtokem.“ [12]

Z již realizovaných objektů může být zmíněn například poldr Loděnice, suchá nádrž Bulhary nebo suchá nádrž Jičina (Obr. 6).



Obr. 6 Suchá nádrž Jičina, vizualizace [13]

2 Cíl práce a metoda řešení

2.1 Cíl práce

Cílem práce je posouzení stávajícího stavu a návrh opatření, které zvýší transformační schopnost zájmové oblasti Holásky – Chrlice. Posouzení a návrh bude proveden na základě simulace PV₁₀₀ na Svitavě dvourozměrným numerickým modelem. Výsledkem bude kvantifikace změny transformační schopnosti území.

2.2 Podklady

Podklady použité v práci byly:

- Záplavové území Q_{100} [7].
- Jednorozměrný (1D) model toků Svitava a Svratka [2].
- Geometrická data povrchu terénu a objektů v úseku toku [4].
- Geodetické zaměření mostů [2].
- Ortofotomapa oblasti [4].
- Hydrologické údaje toků:
 - Svitava (Hlásný profil Bílovice nad Svitavou) [5].
 - Svratka (Hlásný profil Poříčí) [6].
 - Svitava (PV₁₀₀) [14].
 - Svratka (Doplněk) [14].

3 Numerický model

3.1 Software

Pro řešení byl vybrán software SMS (Surface-Water Modeling Systém) s využitím hydraulického modelu SRH-2D. Software nabízí možnost simulace proudění v korytech toků a v inundačních územích ve 2D. Velkou předností tohoto modelu je možnost využití modelace terénu s použitím trojúhelníkové, čtyřúhelníkové anebo hybridní (kombinované) sítě v jednotlivých polygonech. Toto zajišťuje dokonalé vystižení topografie. Software využívá metodu konečných objemů. Výstupy ze simulace zahrnují hloubku vody, úroveň hladiny, svislicovou rychlost, Froudovo číslo a smykové napětí. [15]

3.2 Přijatá zjednodušení

Kvůli objemu dat, se kterým se v této práci manipuluje, bylo nutné přijmout určité zjednodušující předpoklady:

- Drsnost povrchů byla zprůměrována v jednotlivých typových oblastech jako pole, cesty, lesy atd., viz kapitolu 3.6 Drsnost povrchu.
- Proudění má v celé ploše relativně malou hloubku, z tohoto důvodu lze zanedbat vertikální rychlosti.
- Nezapočítává se zde vliv podzemních vod.
- Náhradní oblast byla vytvořena z trojúhelníkových a čtyřúhelníkových elementů, viz kapitolu 3.4 Model terénu.
- V tomto modelu se uvažuje jako médium voda s neměnnými vlastnostmi na celé oblasti.

3.3 Řídicí rovnice

Proudění v inundačním území lze obvykle považovat za proudění vody o malé hloubce. Z tohoto důvodu lze z trojrozměrných Navier-Stokesových rovnic získat vertikálně zprůměrované dvě pohybové rovnice popisující dvojrozměrné proudění

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hUU}{\partial x} + \frac{\partial hVU}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hVV}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho}. \quad (4)$$

Doplněním o rovnici kontinuity

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

se získají 3 rovnice, s kterými je možné vyřešit 3 neznáme funkce.

Neznámé jsou funkce složek vektoru svislicové rychlosti $U(x, y, t)$, $V(x, y, t)$ a funkce hloubky vody $h(x, y, t)$.

Ve výše uvedených rovnicích je t čas, x a y jsou horizontální kartézské souřadnice, h je hloubka vody, U a V jsou složky svislicové rychlosti, g je tíhové zrychlení a T_{xx} , T_{xy} a T_{yy} jsou složky smykového napětí od turbulence. Dále $z = z_b + h$ je úroveň hladiny, z_b je úroveň povrchu, ρ je hustota kapaliny a τ_{bx} , τ_{by} jsou smyková napětí od tření o povrch. Tření je počítáno s použitím Manningovy rovnice [15]

$$\tau_{bx} = \rho \frac{gn^2}{h^{1/3}} U \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (6)$$

$$\tau_{by} = \rho \frac{gn^2}{h^{1/3}} V \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (7)$$

kde n je Manningův drsnostní součinitel.

Výpočet smykového napětí od turbulence je založeno na Boussinesquově principu

$$T_{xx} = 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (8)$$

$$T_{xy} = 2(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad (9)$$

$$T_{yy} = 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial V}{\partial y}, \quad (10)$$

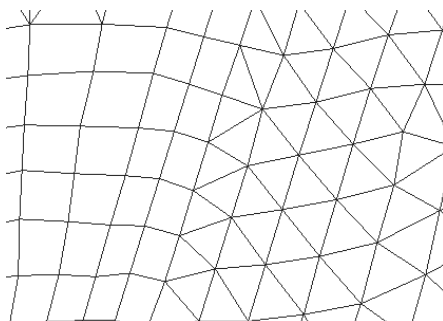
kde ν je molekulární viskozita a ν_t je turbulentní viskozita. [15]

3.4 Model terénu

Model terénu se skládá z modelových zón neboli polygonů. Každé zóně lze přiřadit součinitel drsnosti. Zóny jsou obvykle charakterizovány na základě reálných přírodních charakteristik, jako je topografie, vegetace a drsnost povrchu. [15]

3.5 Výpočtová oblast a její diskretizace

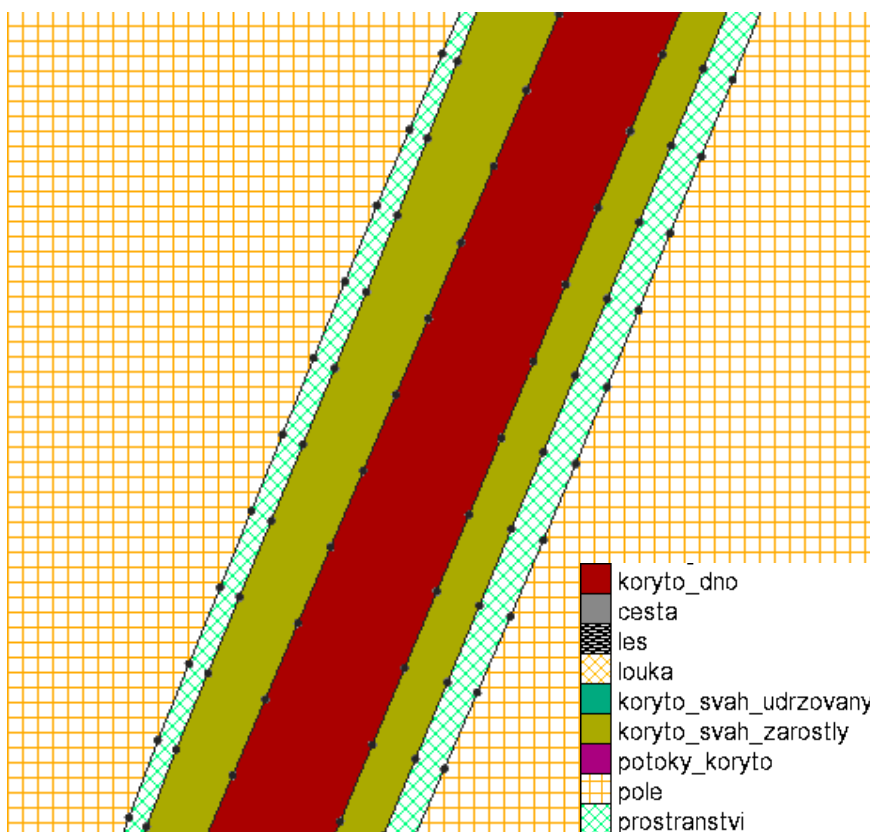
Hydraulický model SHR-2D umožňuje použití hybridní sítě, která je založena na metodě libovolně tvarovaných lineárních prvků pro reprezentaci geometrie. Tato nestrukturovaná hybridní síť usnadňuje implementaci konceptu zonálního modelování. SRH-2D umožňuje použití také dalších metod diskretizace, jako je síť čtyřúhelníková anebo konvenční síť složená z trojúhelníků, viz Obr. 7. Přesnost výsledku simulace se odvíjí od výstižnosti popisu vlastností povrchu sítí [15].



Obr. 7 Síť

3.6 Drsnost povrchu

Součinitele drsnosti povrchu byly stanoveny na základě odborného odhadu, rekognoskace terénu a kalibrace. V Tab. 3 jsou zobrazeny počáteční hodnoty pro simulaci a následně hodnoty stanovené kalibrací. Tyto hodnoty byly přiřazeny k polygonům reprezentujícím jednotlivé typy povrchů (Obr. 8).



Obr. 8 Polygony reprezentující typy povrchů Svitavy

Tab. 3 Součinitele drsnosti

| Typ povrchu (označení povrchu) | Manningovy drsnostní součinitele n [16] | Zvolené Manningovy drsnostní součinitele n |
|---|---|---|
| Hustší porost z větších stromů, málo malých stromů a podrostů, hladina dosahuje větví (Les) | 0,100-0,160 | 0,120 |
| Cesta | 0,035-0,040 | 0,035 |
| Pravidelný profil bez balvanů a keřů (Koryto dno) | 0,025-0,060 | 0,043 |
| Zemědělsky obhospodařované plochy, dozrálé řadové osevy (Pole) | 0,025-0,045 | $h = (0, 0,3) \Rightarrow 0,1-0,05 *$ $h = (0,3, 5) \Rightarrow 0,05$ |
| Vegetační opevnění (Svah koryta udržovaného) | 0,030-0,500 | 0,055 |
| Vegetační opevnění (Svah koryta zarostlého) | 0,030-0,500 | 0,060 |
| Koryto s přítomností kamenů a plevele s tůněmi a peřejemi (Potok koryto) | 0,035-0,050 | 0,050 |
| Pastviny s vysokou trávou (Prostranství) | 0,030-0,050 | $h = (0, 0,5) \Rightarrow 0,15-0,075 *$ $h = (0,5, 5) \Rightarrow 0,075$ |

* lineární interpolace

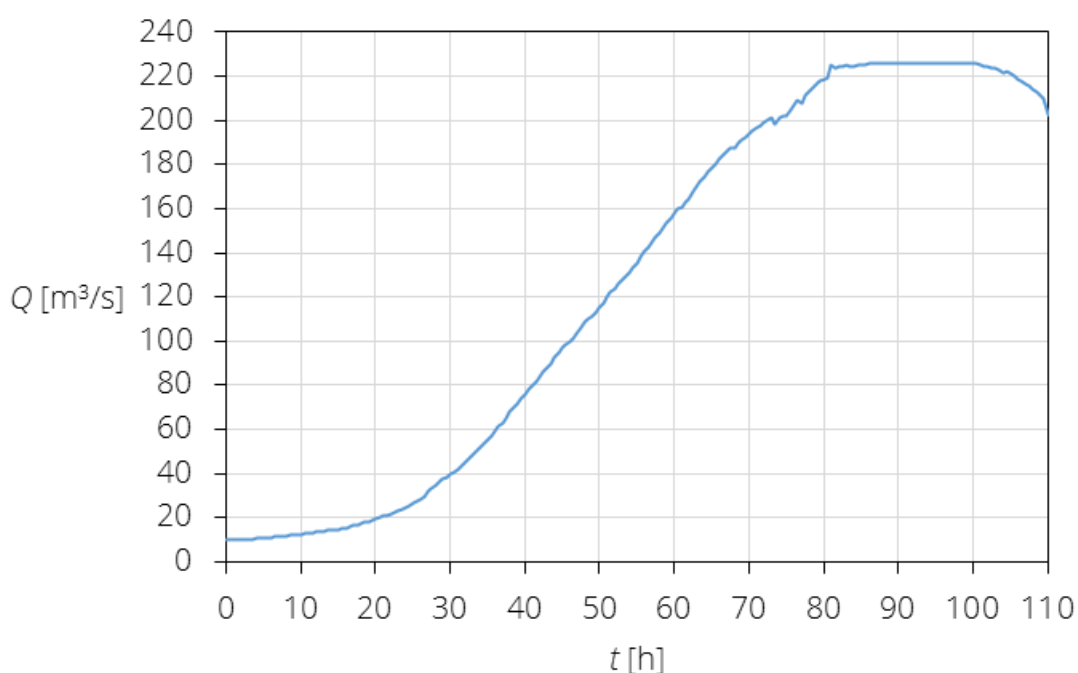
3.7 Podmínky jednoznačnosti

3.7.1 Počáteční podmínky

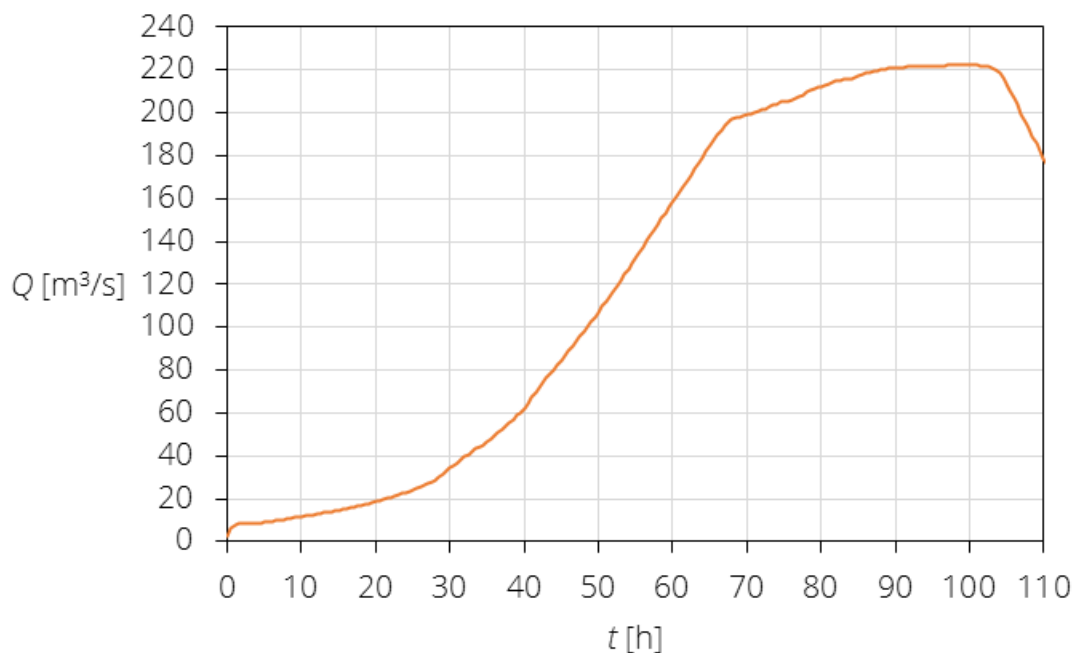
Počáteční podmínkou byla suchá oblast. Tato podmínka určuje, že na začátku simulace jsou známé funkce $U_0(x, y)$, $V_0(x, y)$ a $h_0(x, y)$ rovny nule ve všech bodech modelu v čase $t = 0$ h.

3.7.2 Okrajové podmínky

Byly zvoleny horní a dolní okrajové podmínky. Horní okrajové podmínky byly definovány jako podkritický přítok Q . Tedy známá funkce $Q(t)$ v definovaných profilech. Tato podmínka byla implementována pro toky Svitava (Obr. 9) v profilu křížení s Přerovskou tratí a Svatka (Obr. 10) také v profilu křížení s Přerovskou tratí. Toky Leskava, Bobrava, Moravanský potok a Ponávka nebyly zohledněny, protože nemají přímý vliv na levé inundační území. Dále přítoky do oblasti modelu jako např. Ivanovický potok, Tuřanský potok a Černovický potok, nebyly zapracovány z důvodu chybějících informací o průtokových vlnách při PV₁₀₀ ve Svitavě.



Obr. 9 Svitava PV₁₀₀ [14]



Obr. 10 Svratka doplněk [14]

Dolní okrajové podmínky byly stanoveny jako úroveň hladiny Z . Tedy jako známá funkce $Z_0(t)$ v profilu koryta Svratky pod Rajhradským jezem (187,00 m n. m.). Tato výška dolní okrajové podmínky byla zvolena jako výška koruny jezu, jakožto přibližná hladina předpokládaného odtoku. Dále v levobřežním inundačním území (188,00 m n. m.) a pravobřežním inundačním území ve stejném profilu (189,00 m n. m.). Výšky byly voleny s ohledem na předpokládanou výšku hladiny odtoku. Tento předpoklad byl založen na již vypracovaném rozlivu zobrazeném na Obr. 3.

3.8 Parametry simulace

Parametry simulace jsou důležitým prvkem pro správnost a přesnost provedení výpočtu. Zadávat lze počáteční čas simulace, časový krok výpočtu a konečný čas simulace. Počáteční a konečný čas simulace udává čas počátku a konce výpočtu. Časový krok udává, jak dlouhý bude krok výpočtu a určuje se v závislosti na velikosti elementů

$$dt = l_{el}/g^{1/2} \quad (11)$$

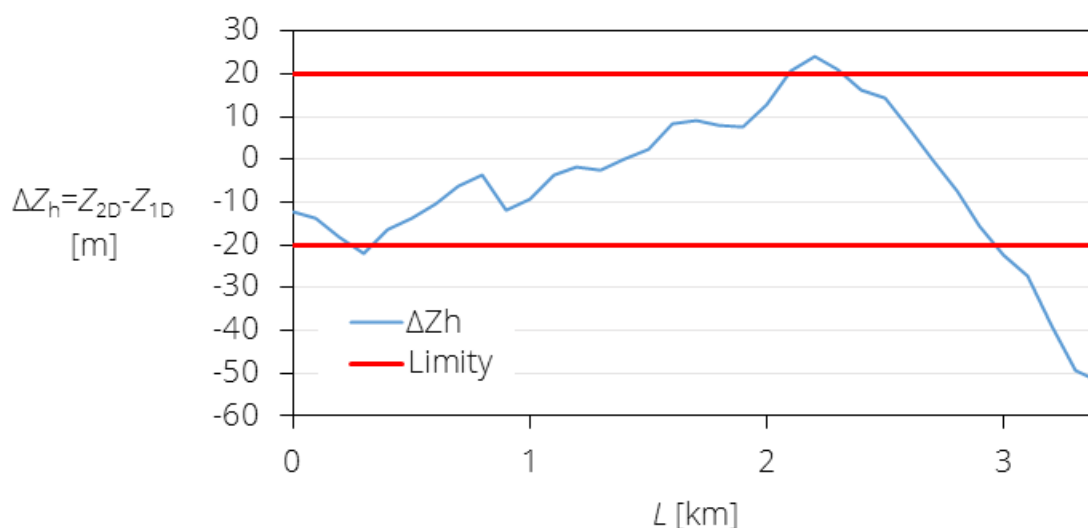
kde dt je časový krok a l_{el} je lineární velikost elementu. Pro stabilitu výpočtu je toto důležitý parametr. [15]

3.9 Kalibrace

Kalibrování probíhalo postupnou úpravou součinitelů drsnosti vypracovávaného numerického modelu. Snahou při kalibraci je dosáhnout co nejlepší možné shody mezi výsledky výpočtů provedených kalibrovaným numerickým modelem a podklady. Podkladem může být přímé měření za stejných povodňových scénářů nebo výsledky z dříve použitého kalibrovaného modelu.

V tomto případě kalibrování probíhalo pomocí porovnání s vypracovaným 1D modelem Povodí Moravy, s.p. Porovnávána byla úroveň hladiny v ose koryta Svitavy. Snahou bylo dosáhnout rozdílu úrovní hladin do $\pm 0,2$ m (Obr. 11). Větší rozdíl úrovně hladin byl pravděpodobně způsoben zahrnutím větší plochy inundačního území v případě 2D modelu do simulace.

V procesu kalibrace byly měněny hodnoty drsnostních součinitelů a tvar geometrie oblasti.



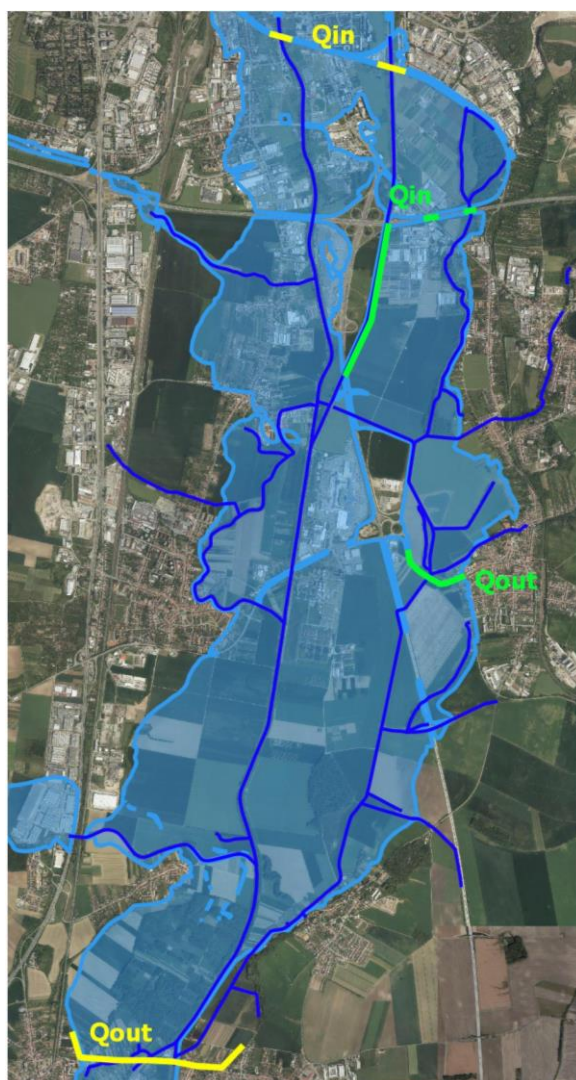
Obr. 11 Odchyly v kalibraci 2D modelu oproti 1D modelu

3.10 Stanovení průtoků

Stanovení průtoku v bylo provedeno aplikací křivky stanovující průtok do vybraných příčných profilů. Výstupem byl záznam průtoku v čase v textovém souboru.

Data hydrogramu pro celou oblast modelu byla získána pro přítok (Q_{in}) z profilů křížení Svatky a Svitavy s Přerovskou tratí, respektive jako součet horních okrajových podmínek. Data na odtoku (Q_{out}) byla odečtena z profilů nad levým a pravým inundačním územím a v prostoru koryta Svatky pod Rajhradským jezem. Uvedené profily jsou vyznačeny na Obr. 12 žlutou linií.

Data hydrogramu pro zájmové území byla získána pro přítok (Q_{in}) ze součtu profilu levobřežní hráze Svitavy mezi mosty dálnic D1, D2, propustku pod dálnicí D1 (Černovický potok) a pod mostem Kaštanová. Data odtoku (Q_{out}) byla odečtena z profilu vedoucího od dálnice D2 až po intravilán městské části Chrlice (místní komunikace Zámecká). Uvedené profily jsou vyznačeny na Obr. 12 zelenou linií.



Obr. 12 Rozliv při Q_{100} (modře), měrné profily oblasti modelu (žlutě), zájmové území (zeleně) [4, 7]

4 Stávající stav

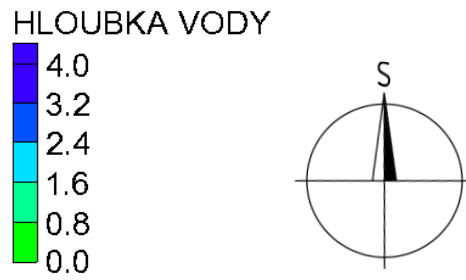
4.1 Popis řešeného stavu

Jedná se o stav odpovídající stavu pořízení podkladů se zahrnutím změn až do současnosti. Pro tento stav byl zvolen průtokový scénář PV₁₀₀ na řece Svitavě s doplňkem na Svatce, viz kapitolu 3.7.1 Počáteční podmínky.

4.2 Výsledky

Do zájmové oblasti voda přitéká ze dvou směrů. Ze severu, kde se voda nejprve začne levobřežně přelévat v oblasti mezi Přerovskou tratí a dálnicí D1 (cca 3 ř. km, v čase simulace 22 h), viz Obr. 14, a pokračuje levým inundačním územím, které zahrnuje zemědělsky využívané budovy, pole, lesy a hypermarket Makro. Tato oblast ohraničená na jihu dálnicí D1 funguje jako retenční nádrž s kulminací v čase simulace 101 h (Obr. 15). Do zájmové oblasti přitéká voda na východní straně propustkem (Černovický potok) pod dálnicí D1 na západní straně pod mostem Kaštanová (Obr. 16). Dále se oba proudy spojí a zaplaví většinu oblasti zástavby, zemědělské stavby AGRO Brno – Tuřany, a.s. a přírodní památku Holásecká jezera (Obr. 18). V oblasti Holáseckých jezer se spojí severní přítok se západním, který se nedřívě vylévá přes hráze Svitavy v oblasti mezi dálnicí D1 a D2 (cca 1 ř. km, v čase simulace 57 h), zaplavuje zemědělsky využívanou oblast a spolu se severním přítokem pokračují směrem na jih (Obr. 17). Zde voda ohrožuje západní stranu městské části Holásky a na západní straně území voda obtéká ohrazovaný areál Decathlon. Dále pokračuje přes zemědělsky využívanou plochu a biotop Chrlice až k západní straně městské části Chrlice (Obr. 19, v čase simulace 62 h). V oblasti Chrlic dojde ke kulminačnímu průtoku v čase simulace 101 h s průměrnou hloubkou vody v oblasti 1 m. Dále se voda přelévá přes místní komunikaci Zámecká a teče směrem na jih, kde působí retenčním účinkem dálnice D2 a způsobuje zpětné vzduť do Chrlic (Obr. 21, v čase simulace 102 h). Voda se přelévá přes dálnici D2 a pokračuje dále inundačním územím.

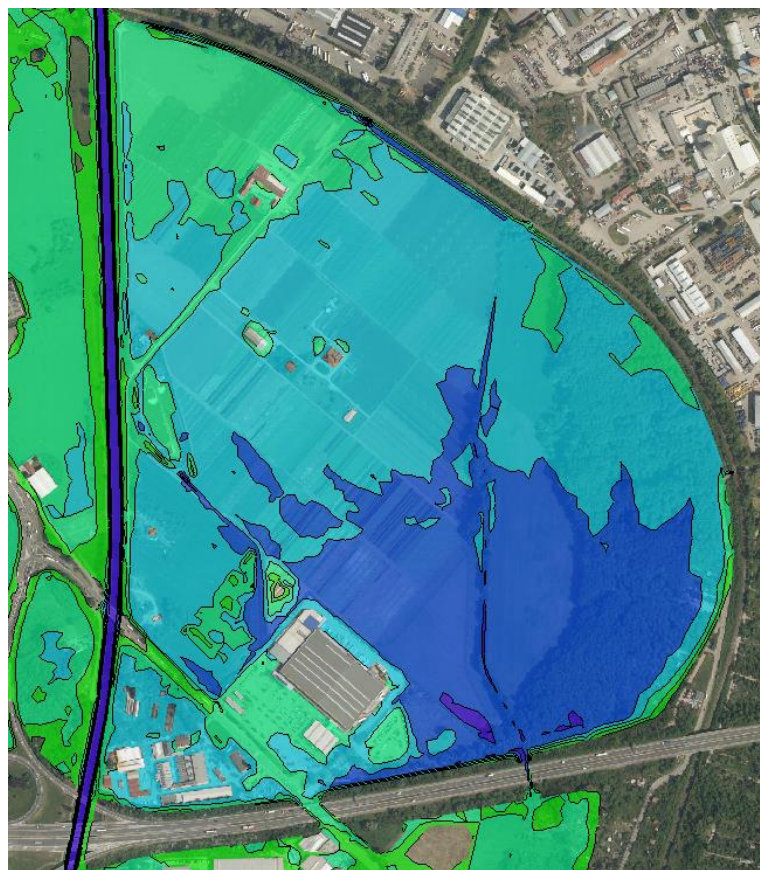
Hloubku vody a orientaci severu (S) lze v jednotlivých obrázcích odečíst za pomocí Obr. 13.



Obr. 13 Legenda – Stávající stav



Obr. 14 Vybočení proudu na 3 ř. km, 22. h



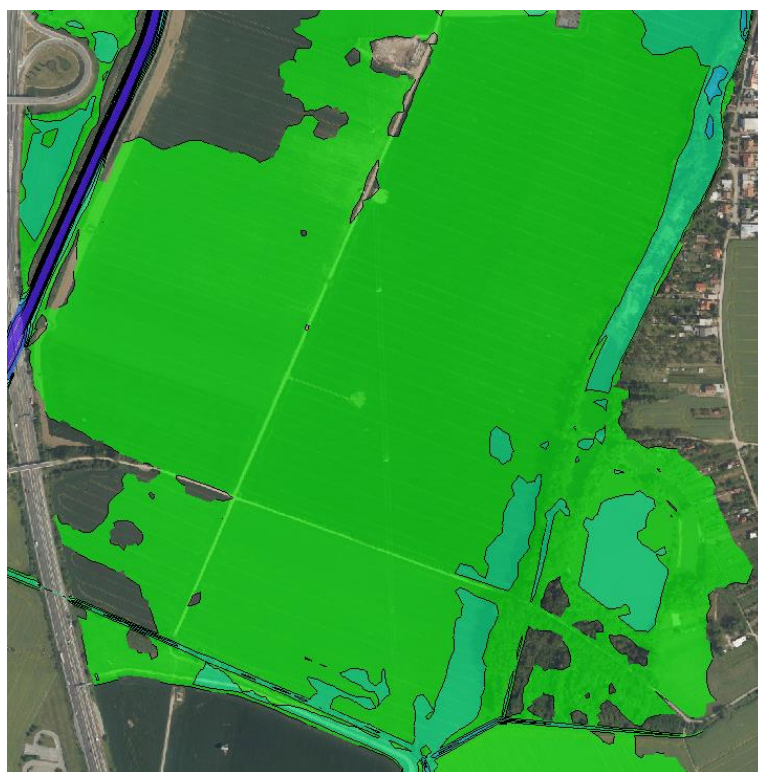
Obr. 15 Kulminace, 101. h



Obr. 16 Přítok do zájmového území, 57. h



Obr. 17 Vybočení proudu mezi dálnicemi D1 a D2, 57. h



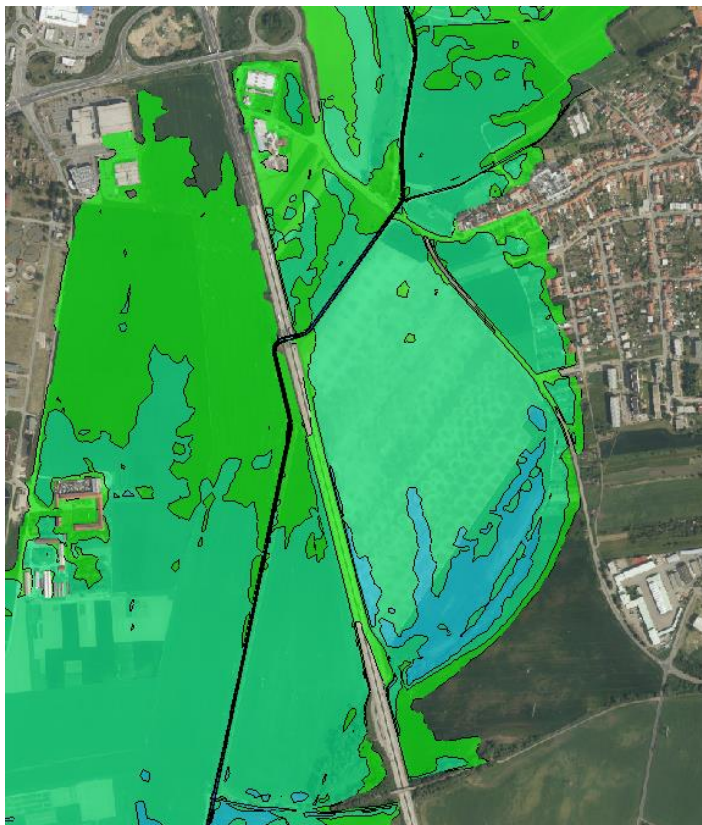
Obr. 18 Kulminace v oblasti, 102. h



Obr. 19 Přítok PV do městské části Chrlice, 62. h



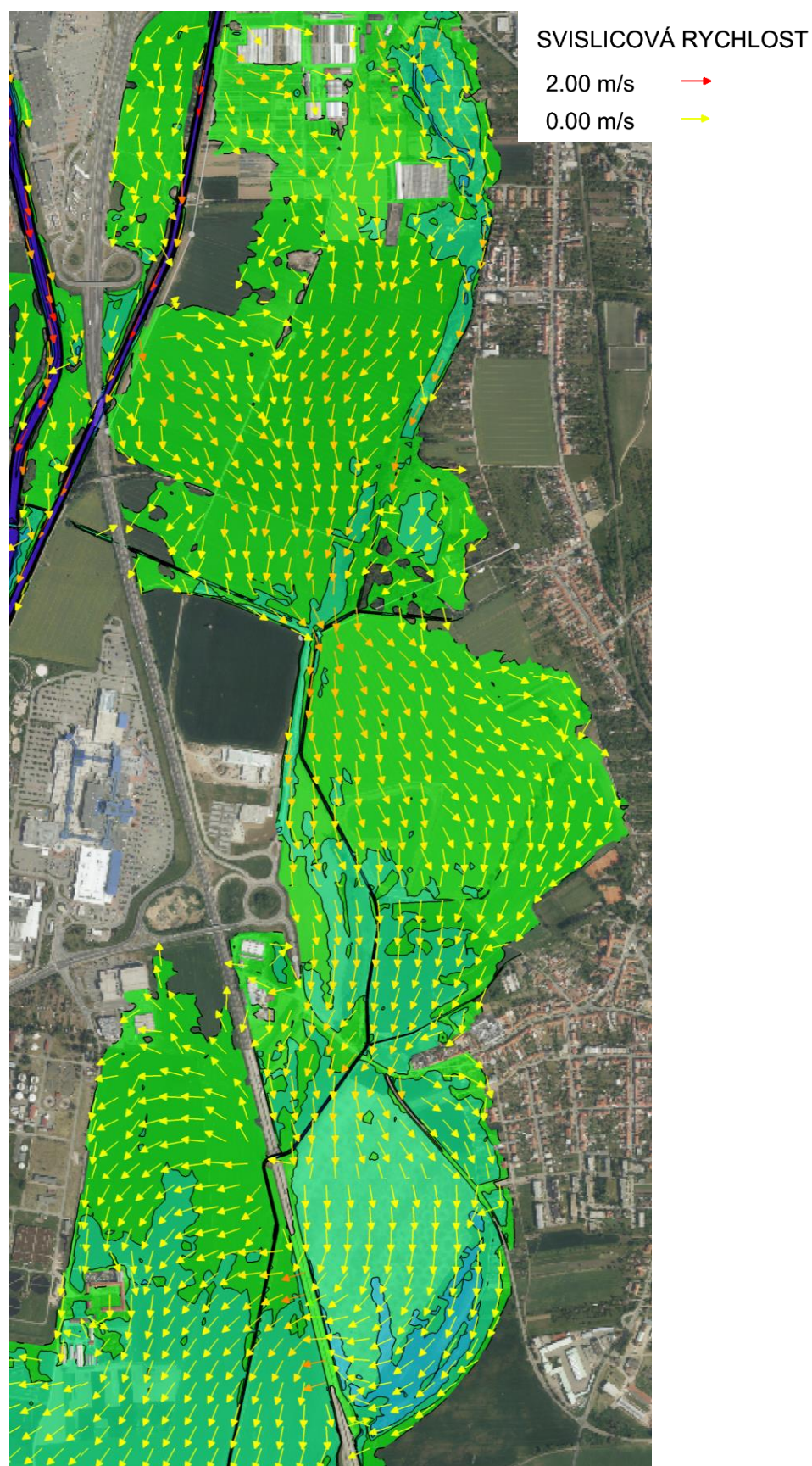
Obr. 20 Kulminace u městské části Chrlice, 102. h



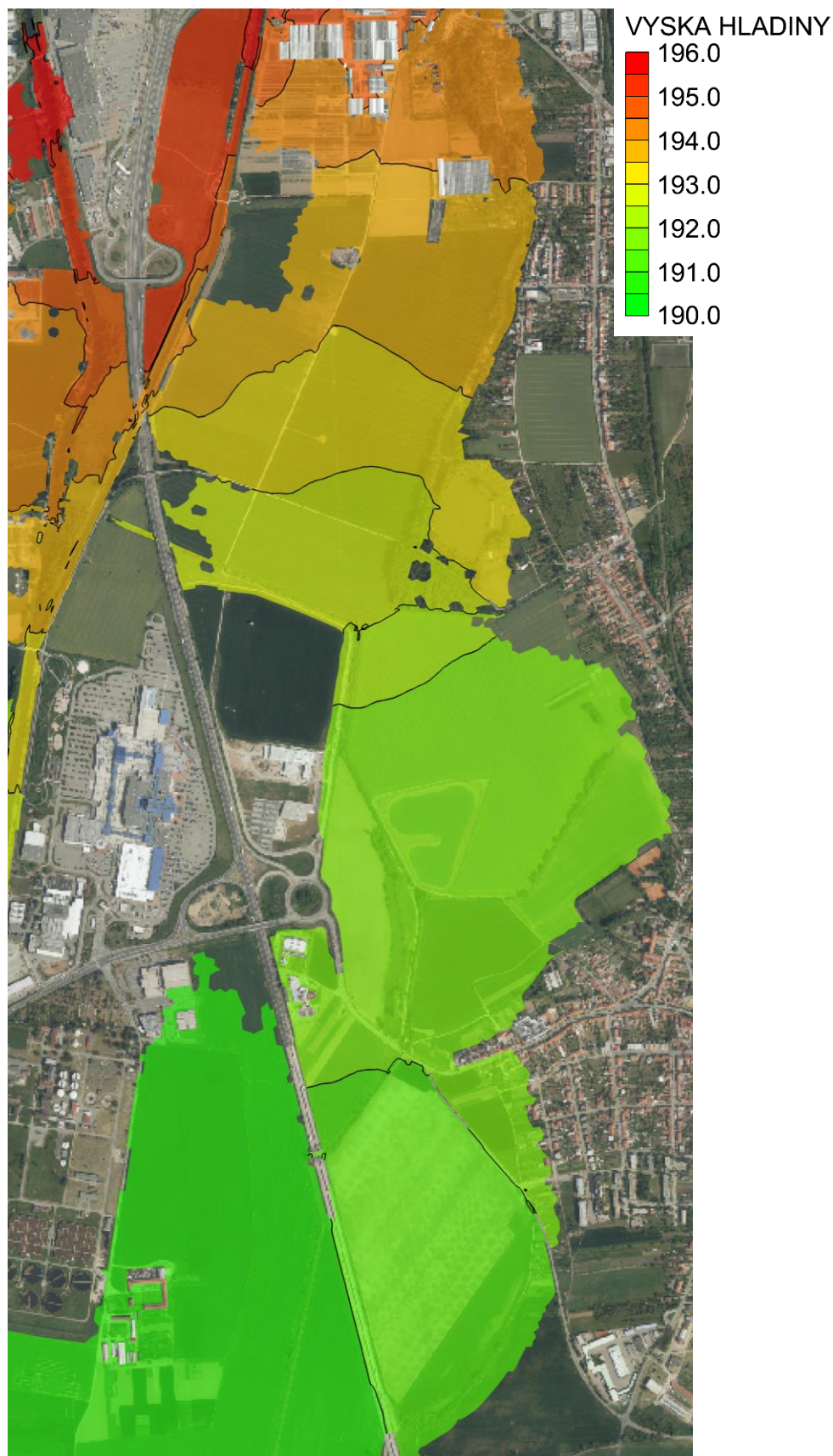
Obr. 21 Odtok PV ze zájmového území, 102. h

Na Obr. 22 lze pozorovat přítoky do oblasti na severu a přes hráz Svitavy. Proudění přes zájmovou oblast až po přepad vody přes násyp dálnice D2. Hloubka vody dosahuje maxima okolo 2 m a to v oblasti protiproudě od násypu dálnice D2. Svislicová rychlost v oblasti se průměrně pohybuje ve velmi nízkých hodnotách okolo 0,5 m/s. Toto však neplatí v profilu mezi ohrazovaným areálem Decathlon a městskou částí Holásky a dále pod násypem dálnice D2, kde svislicová rychlost skokově narůstá na cca 1 m/s.

Mapa nadmořských výšek (Obr. 23) slouží pro porovnání s návrhovými variantami, zda nedochází ke zpětnému vzduť.



Obr. 22 Souhrnná mapa svislicových rychlostí a hloubky vody, kulminace



Obr. 23 Mapa výšky hladiny, kulminace

4.3 Zhodnocení

Komentář k Obr. 24.

Přítok do oblasti začíná v čase simulace 55 h. V dalších hodinách simulace je na hydrogramu jako *Q_{in}* zobrazen postupný nárůst průtoku až po kulminaci v čase simulace 101,5 h.

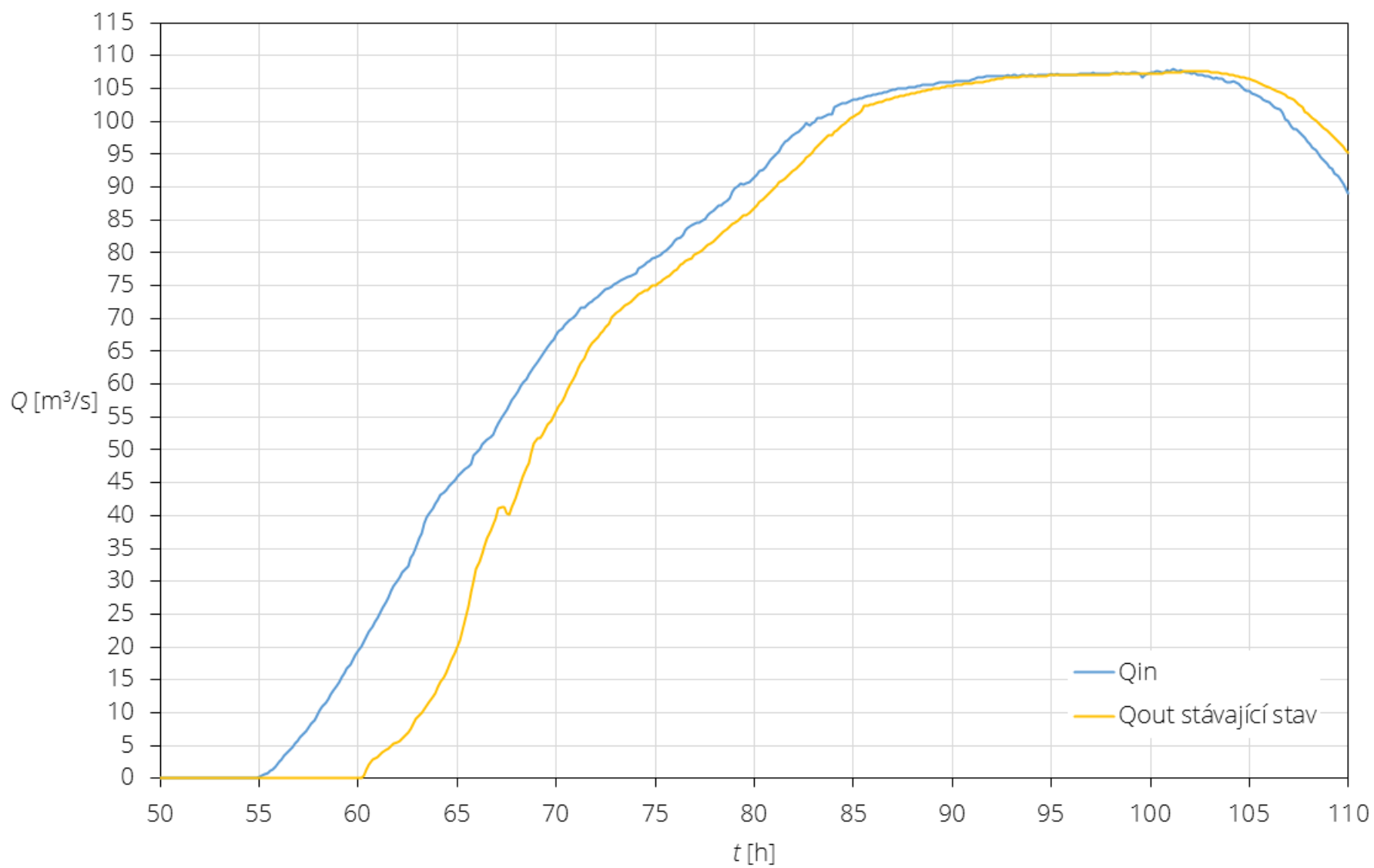
Odtok z oblasti začíná v čase simulace 60 h. Od 60. h až po 66. h je vzestupná větev hydrogramu s malým nárůstem. Toto je způsobeno rozlivem v zájmovém území, který tím snižuje odtok. Po zaplavení celé plochy inundace je evidentní nárůst odtoku. Dále od cca 66. h po 72. h je výkyv křivky způsoben zpětným vzduťím o dálnici D2. V 72. h hladina vody dosáhne úrovně dálnice D2 a začne přepadat. Tím je celá oblast zatopená a odtok probíhá s malými výkyvy až ke kulminaci na přítoku v čase simulace 101,5 h a na odtoku v čase simulace 102,5 h. Pokles hodnoty průtoku při kulminaci je minimální.

Komentář k Obr. 25.

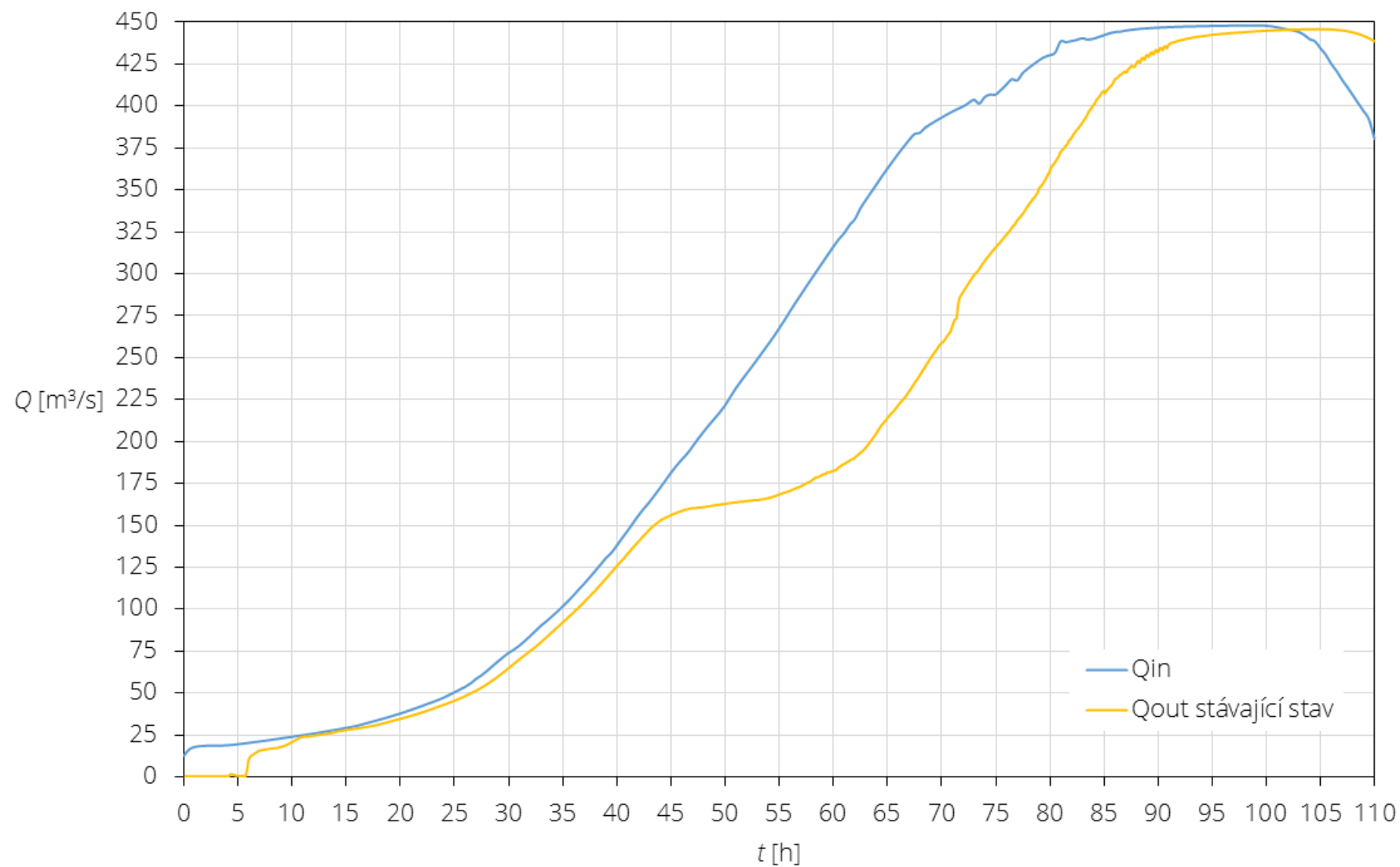
Přítok do oblasti začíná v čase simulace 0 h přítokem do oblasti modelu, kdy k odtoku z oblasti modelu doteče začátek PV v čase simulace cca 6 h. Od 6. h simulace nastává nárůst průtoku. Viditelné je jen malé vybočení proudy v levém inundačním území Svratky v profilu nad Rajhradským jezem, což se minimálně projevuje poklesem na hydrogramu odtoku v čase simulace cca 7,5 h. Začátkem 48. h simulace vznikne horizontální posun na vzestupné větvi odtoku z povodí. Toto je způsobeno vybočením proudy do inundačního území v modelu a také do zájmového území. Po zaplavení celé kapacity inundačního území se odtok v čase simulace cca 60 h opět navyšuje.

Kulminační průtok nastává na hydrogramu přítoku v čase simulace 99 h a na odtoku v čase simulace 105 h. Zpoždění průtoku 345 m³/s od přítoku po odtok v oblasti modelu činí 15,5 h. Snížení průtoku kulminace je jen minimální. V tomto případě z 448,39 m³/s na přítoku na 445,85 m³/s na odtoku. Jedná se tedy o rozdíl 2,54 m³/s.

Data zobrazená na Obr. 24 a Obr. 25 budou dále využita pro kvantifikaci účinnosti navrženého opatření.



Obr. 24 Transformační schopnost zájmového území, stávající stav



Obr. 25 Transformační schopnost oblasti modelu, stávající stav

5 Navrhovaný stav – varianta 1

5.1 Popis varianty 1

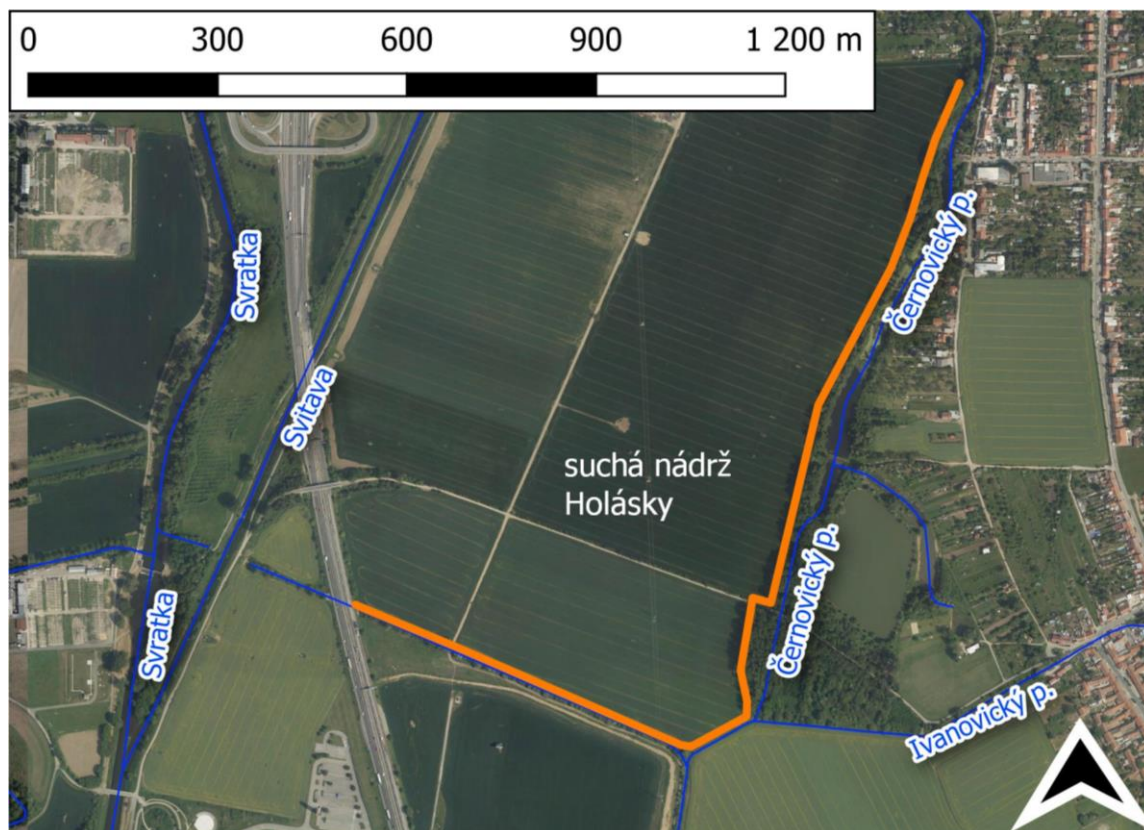
Varianta 1 využívá k retenci plochu zemědělské půdy o výměře 0,61 mil. m², na které se uvažuje vytvoření suché nádrže Holásky.

Hráze jsou navrženy nepojízdné lichoběžníkové s návodním a povodním lícem o sklonu 1:2 a šířkou koruny 3 m. Povrchová úprava zemních hrází je navržena ohumusováním a zatravněním. Bezpečnostní přelivy jsou navrženy se sklonem na návodním líci 1:2 a na povodním líci 1:6, kde dále následuje 10 m dlouhý nezahlobený vývar. Povrchová úprava koruny, povodního líce a nezahlobeného vývaru v místě přelivu je navržena jako kamenná dlažba do betonového lože v mocnosti 30 cm. Spodní výpusti jsou navrženy jako betonové potrubí DN300.

Hráz suché nádrže Holásky se napojuje na násyp dálnice D2 a levobřežně pokračuje podél závlahového kanálu Svratky až k soutoku s Ivanovickým potokem. Zde se nachází spodní výpust směřující do Ivanovického potoka a bezpečnostní přeliv s korunou 193,28 m n. m. Dále hráz pokračuje severně podél přírodní památky Holásecká jezera, kde na cca 0,87 km kříží místní komunikaci vedoucí do městské části Holásky. Toto křížení je vyřešeno nájezdovými zemními rampami o sklonu 17 %, detail je vyhotoven v příloze č. 2. Hráz dále pokračuje podél přírodní památky Holásecká jezera až k zemědělskému areálu AGRO Brno – Tuřany, a.s. Úroveň koruny bezpečnostního přelivu byla zvolena s přihlédnutím k výšce levobřežní hráže Svitavy, přes kterou se voda bočně přelévá do prostoru nádrže, aby nedocházelo ke zpětnému vzduť vody v korytě toku. Hráz má celkovou délku 1,79 km o niveletě koruny 193,80 m n. m. Průměrná výška hráže činí 1,3 m.

Zvolený způsob využití inundačního území varianty 1 je kompromisem mezi finanční náročností projektu, z důvodu menších objemů zemních prací, a účinností transformačních schopností řešení. Z důvodu případné kolize s Ministerstvem životního prostředí nebylo možné zahrnout do retenčního prostoru Holásecká jezera, kde je velký potenciál obtékání nádrže částí povodňového průtoku.

Tato varianta je výkresově zpracována v příloze č. 1 Situace – Varianta 1 a příloze č. 2 Příčné řezy PF1, PF2.

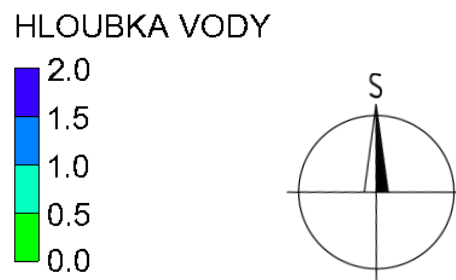


Obr. 26 Situace hráze suché nádrže Holásky, varianta 1 (oranžová linie) [4]

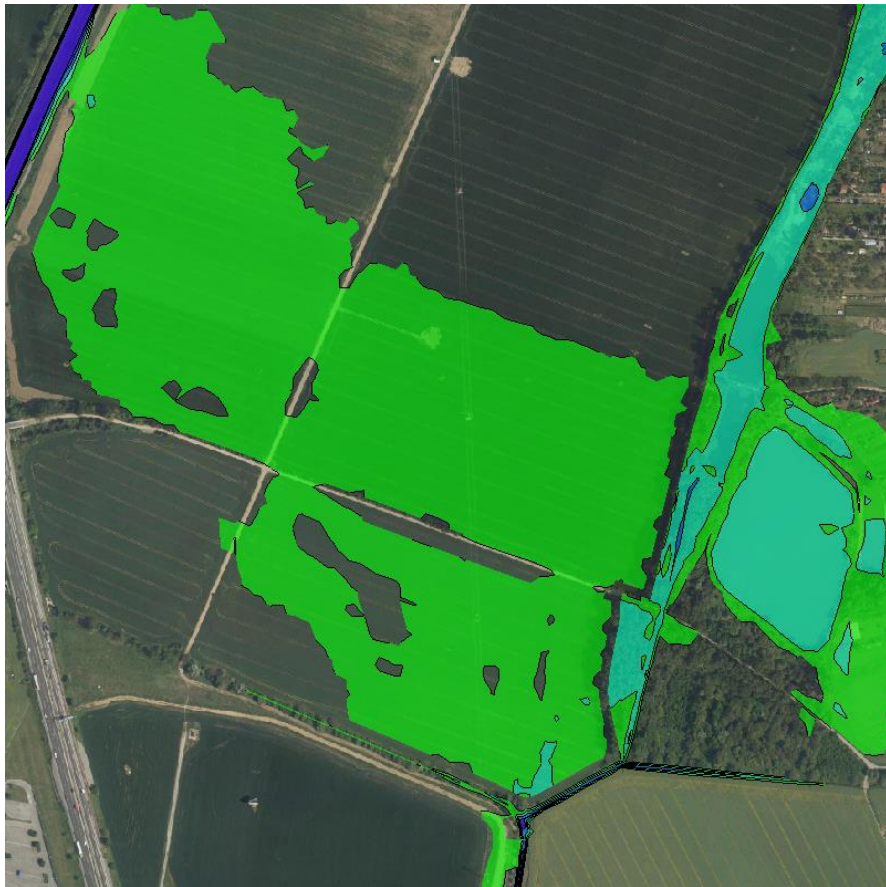
5.2 Výsledky

Povodňová vlna přitéká do řešené oblasti stejným způsobem jako v případě stávajícího stavu. Změna nastává při přítoku PV do prostoru suché nádrže Holásky (Obr. 28). V této chvíli nádrž zachytává průtok a zároveň pouští průtok jen spodní výpustí. Při dosažení hladiny úrovně koruny bezpečnostního přelivu, se začne voda přelévat do Ivanovického potoka (Obr. 29). Oblast zemědělských ploch na jihu od suché nádrže Holásky je v tento moment již zatopená z důvodu přítoku ze směru Holáseckých jezer. Povodňová vlna pokračuje přes místní komunikaci Zámecká vedoucí do Chrlic a dále inundačním územím přes dálnici D2 (Obr. 31).

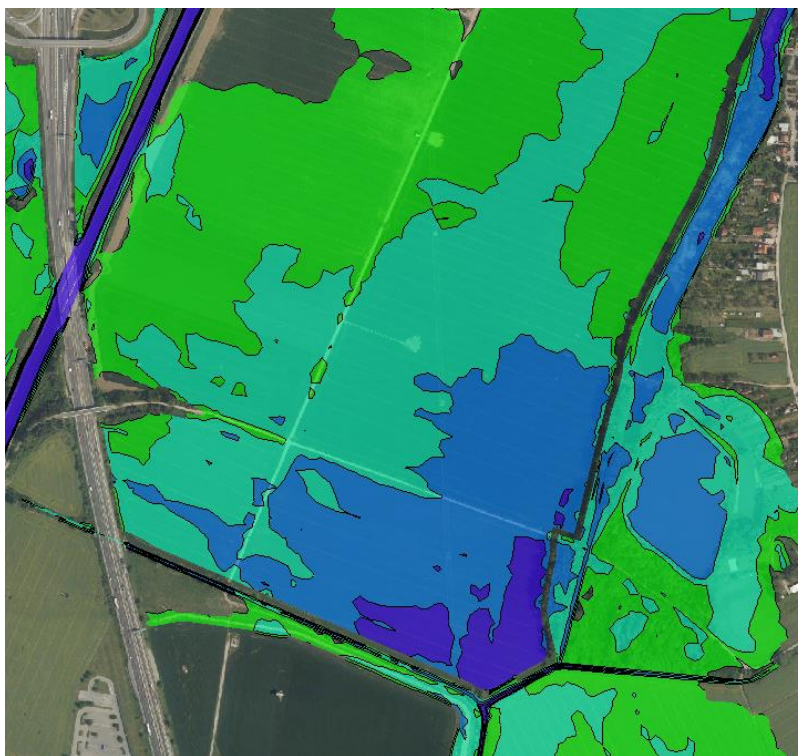
Hloubku vody a orientaci severu (S) lze v jednotlivých obrázcích odečíst za pomocí Obr. 27.



Obr. 27 Legenda, varianta 1



Obr. 28 Přítok do suché nádrže Holásky, 61. h



Obr. 29 Kulminace, suchá nádrž Holásky, 102. h



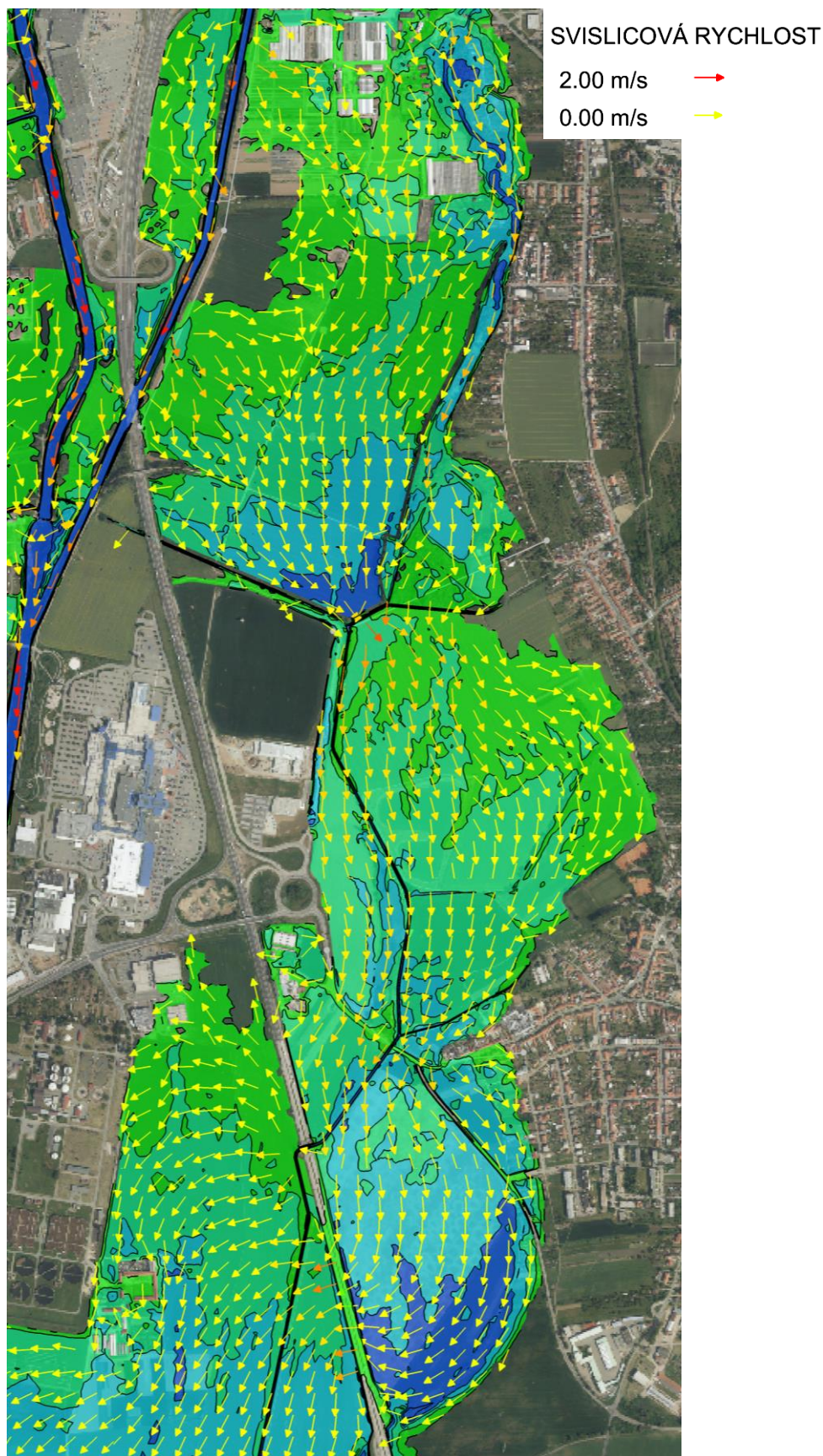
Obr. 30 Přítok PV do Chrlic, 64. h



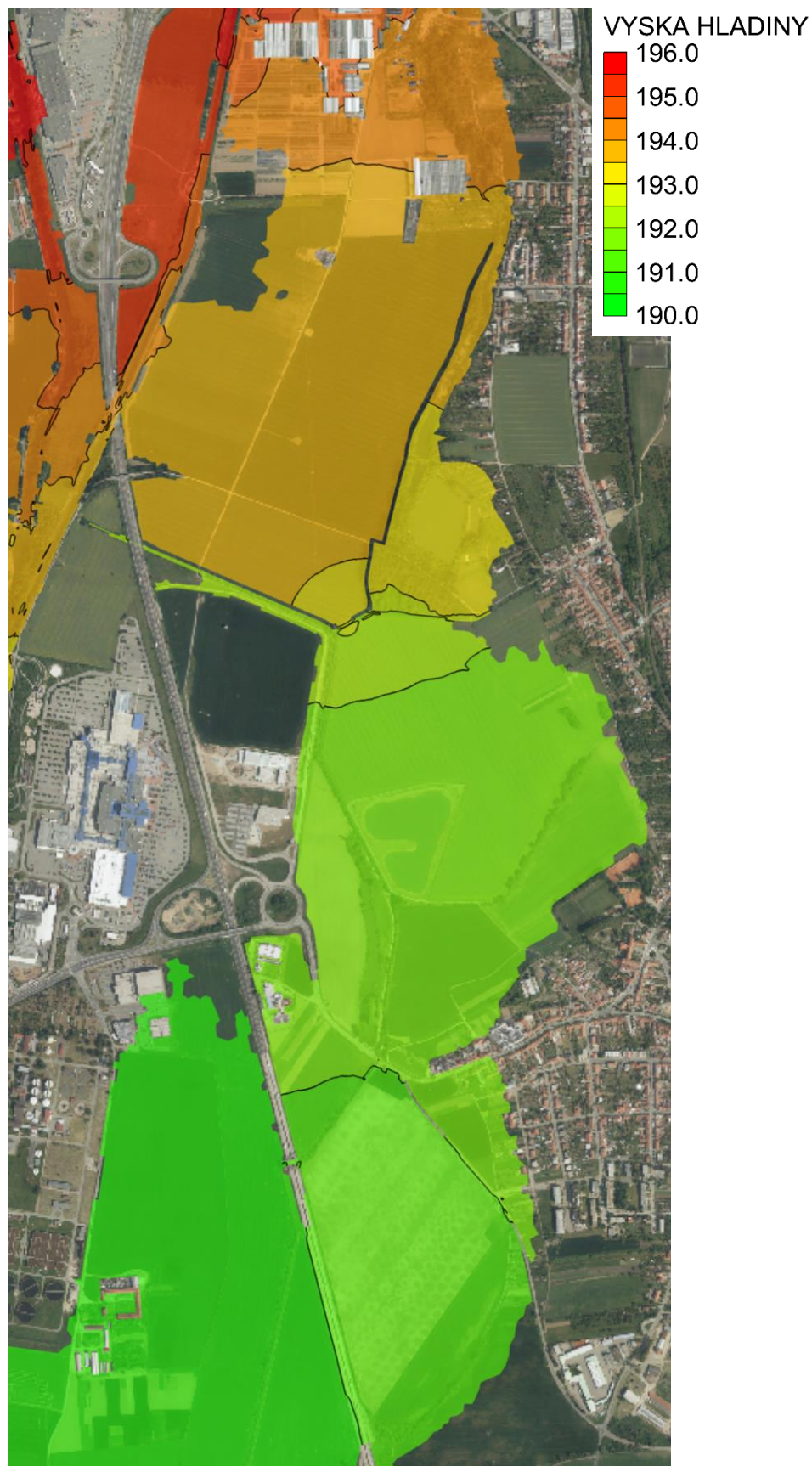
Obr. 31 Kulminace, Chrlice, 107. h

Na Obr. 32 zobrazující hloubky vody se oproti stávajícímu stavu (Obr. 22) změnily jen v oblasti suché nádrže Holásky, kde hladina dosáhla 1,5 m. Změnil se také průběh svislicových rychlostí. Pod bezpečnostním přelivem se skokově navýšila, tato skutečnost byla zohledněna při návrhu opevnění vývaru.

Na Obr. 33 je možné porovnat linii zobrazující průběh výšky hladiny 194 m n. m. v případě varianty 1 a stávajícího stavu (Obr. 23), lze prohlásit že nedochází ke zpětnému vzduť ani u zemědělského areálu AGRO Brno – Tuřany a u řeky Svitavy.



Obr. 32 Souhrnná mapa svislicových rychlostí a hloubky vody, kulminace



Obr. 33 Mapa výšky hladiny, kulminace

Z rozdílu dat zobrazených na Obr. 34 byla vypracována rozdílová křivka (Obr. 35) znázorňující průtokové změny v jednotlivých časech simulace.

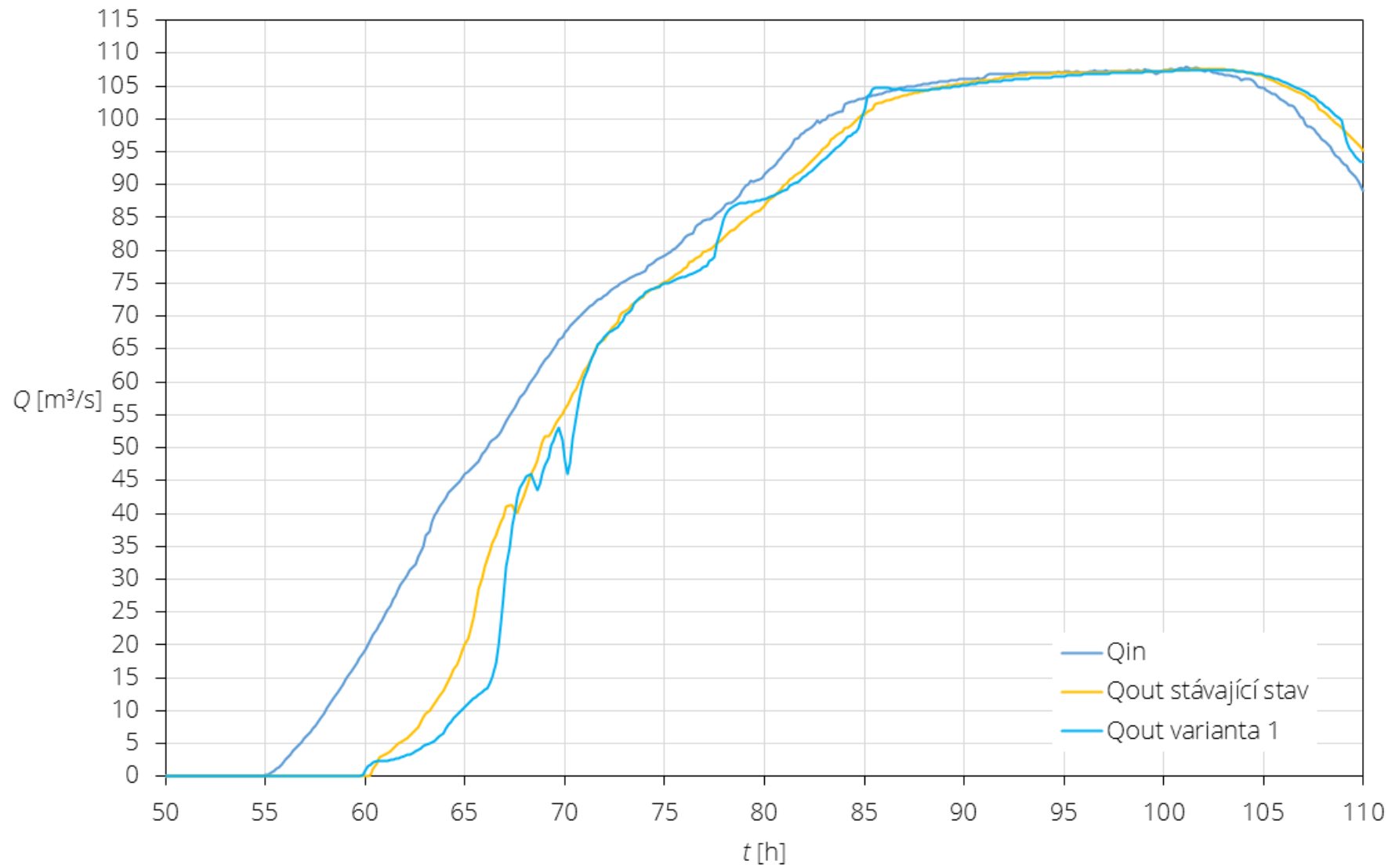
Na Obr. 35 lze v 60. hodině pozorovat výrazný nárůst retenčních schopností zájmového území, kdy rozdíl v průtoku oproti stávajícímu stavu činí $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Toto je důsledkem zapojení suché nádrže Holásky do její funkce.

Dále v čase simulace 67 h hladina v suché nádrži dosáhne úrovně bezpečnostního přelivu a tím způsobí nárůst průtoku. V grafu projeveno sestupným trendem rozdílové křivky.

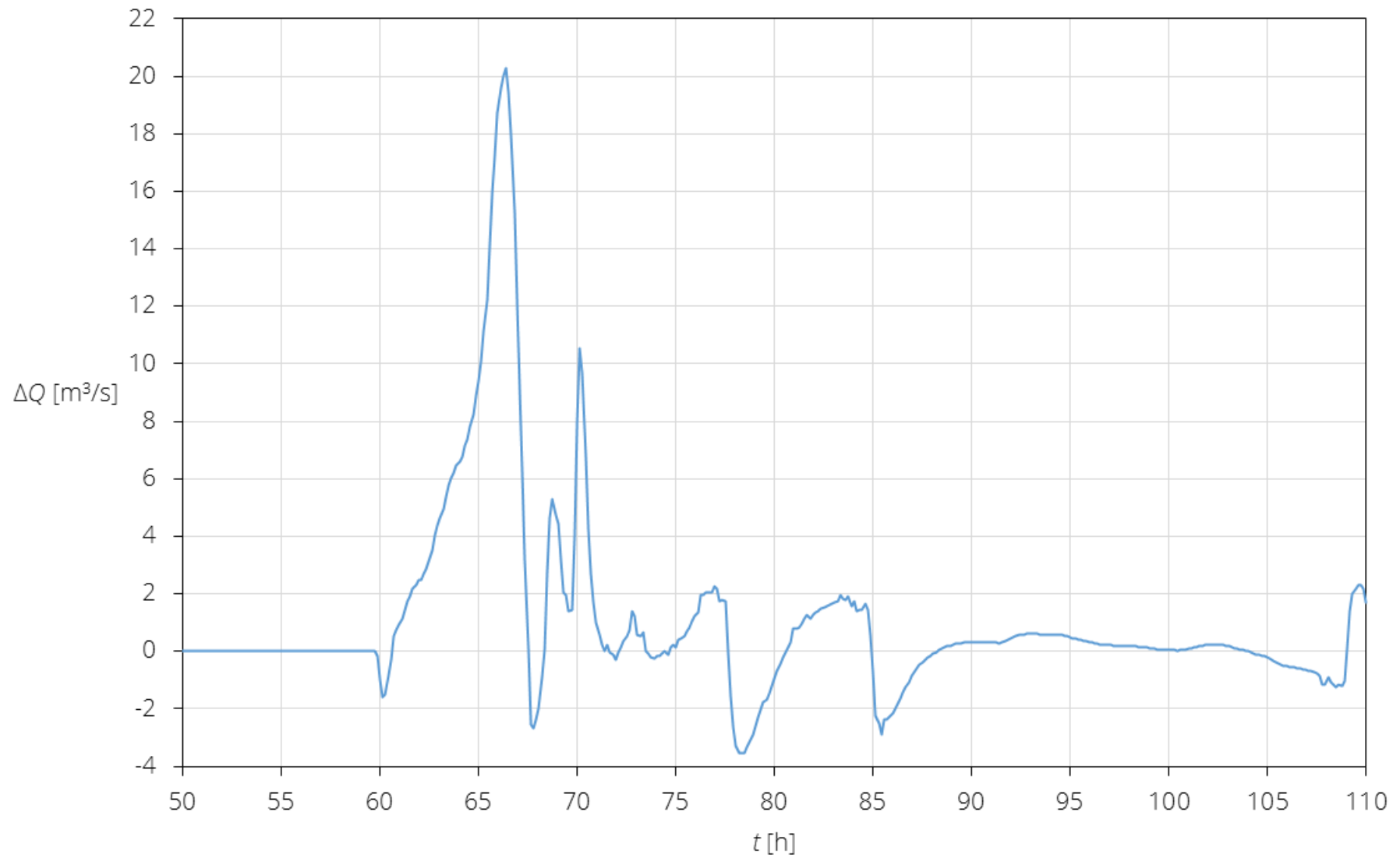
Další průběh křivky je výkyv hodnot způsobený zpožděným zpětným vzduťím v oblasti nad dálnicí D2 a následný návrat k původním hodnotám stávajícího stavu.

Ze součtu objemů pod křivkou bylo zjištěno, že suchá nádrž Holásky disponuje retenčním objemem $236\,198 \text{ m}^3$. Data byla získána z Obr. 35.

Tato varianta nenabízí časové zpoždění začátku odtoku ze zájmového území, z důvodu nezachyceného průtoku Holáseckými jezery. Maximální zpoždění nastává při průtoku $13,8 \text{ m}^3/\text{s}$, a to o 2 h oproti stávajícímu stavu.



Obr. 34 Transformační schopnost zájmového území, (varianta 1, stávající stav)

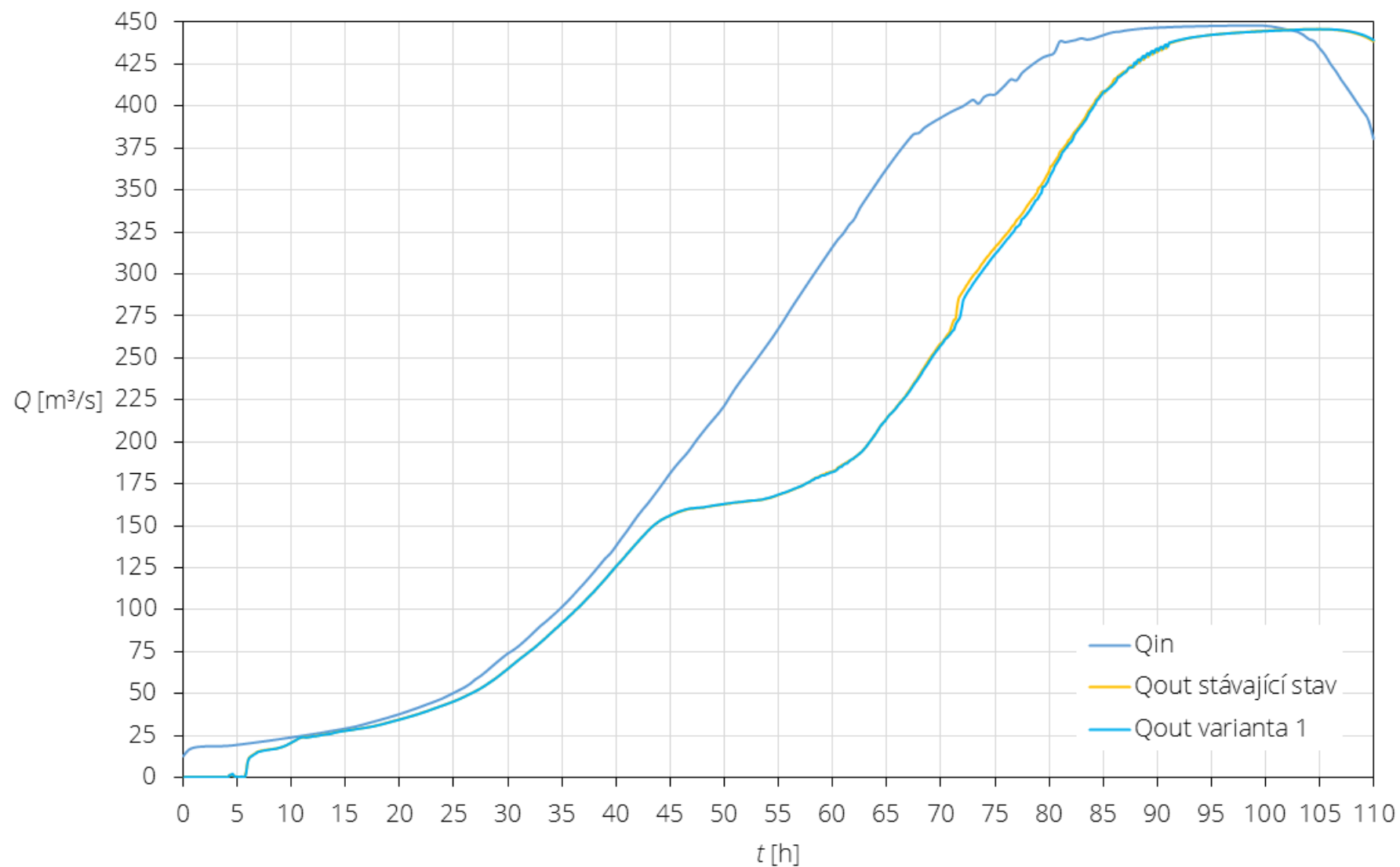


Obr. 35 Rozdílová křivka průtoků v zájmové oblasti (varianta 1, stávající stav)

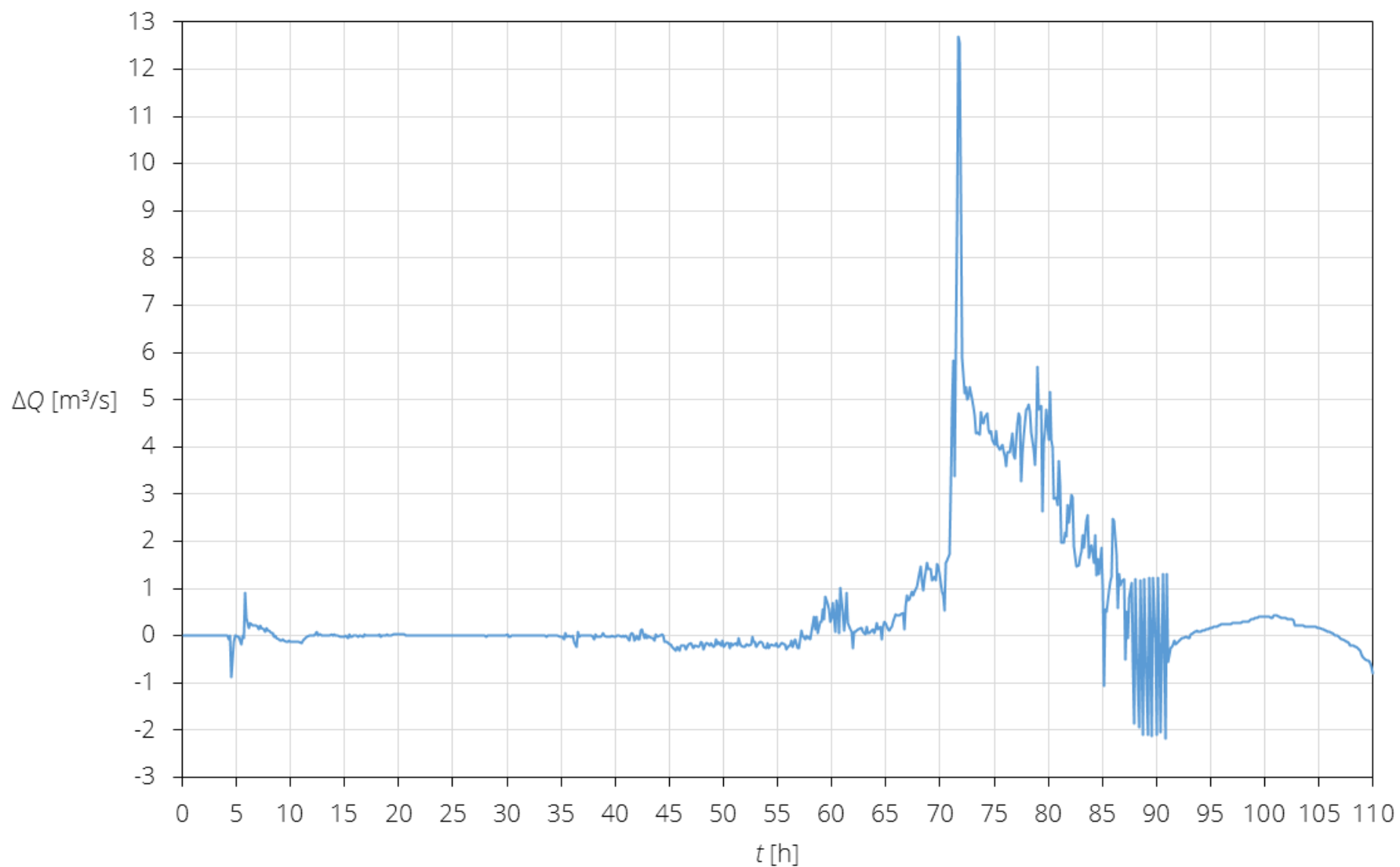
Z rozdílu dat zobrazených na Obr. 36 byla vypracovaná rozdílová křivka (Obr. 37) znázorňující průtokové změny v jednotlivých časech simulace.

V Obr. 37 lze pozorovat prudký nárůst retenčních vlastností území ve variantě 1 v čase simulace cca 72 h. V tuto chvíli rozdíl průtoků varianty 1 oproti stávajícímu stavu dosáhne téměř $13 \text{ m}^3/\text{s}$. Dále následuje postupné přibližování k hodnotám průtoků stávajícího stavu.

Maximální časové zpoždění v tomto případě je v průtoce $280 \text{ m}^3/\text{s}$. Tento průtok nastává o 0,5 h později než při simulaci stávajícího stavu přesněji tedy z 78,5. h na 79,0. h simulace. Kulminační průtok není oproti stávajícímu stavu nijak zpožděn.



Obr. 36 Transformační schopnost oblasti modelu, (varianta 1, stávající stav)



Obr. 37 Rozdílová křivka průtoků v oblasti modelu, (varianta 1, stávající stav)

5.3 Zhodnocení

V případě varianty 1 není v suché nádrži Holásky transformován průtok protékající Holáseckými jezery.

Tato varianta nedokáže zachytit celkové množství povodňového průtoku a převést jej na bezpečný odtok, ale na vzestupné větvi hydrogramu poskytuje významné snížení průtoku pro zájmové území. Malé ale nezanedbatelné snížení průtoku zpoždění nastává i pro celou oblast modelu.

6 Navrhovaný stav – varianta 2

6.1 Popis varianty 2

Varianta 2 se skládá ze systému dvou zemních hrází, jež každá z nich disponuje vlastní plochou pro retenci (suchá nádrž Holásky 0,61 mil. m², suchá nádrž Chrlice 0,46 mil m²).

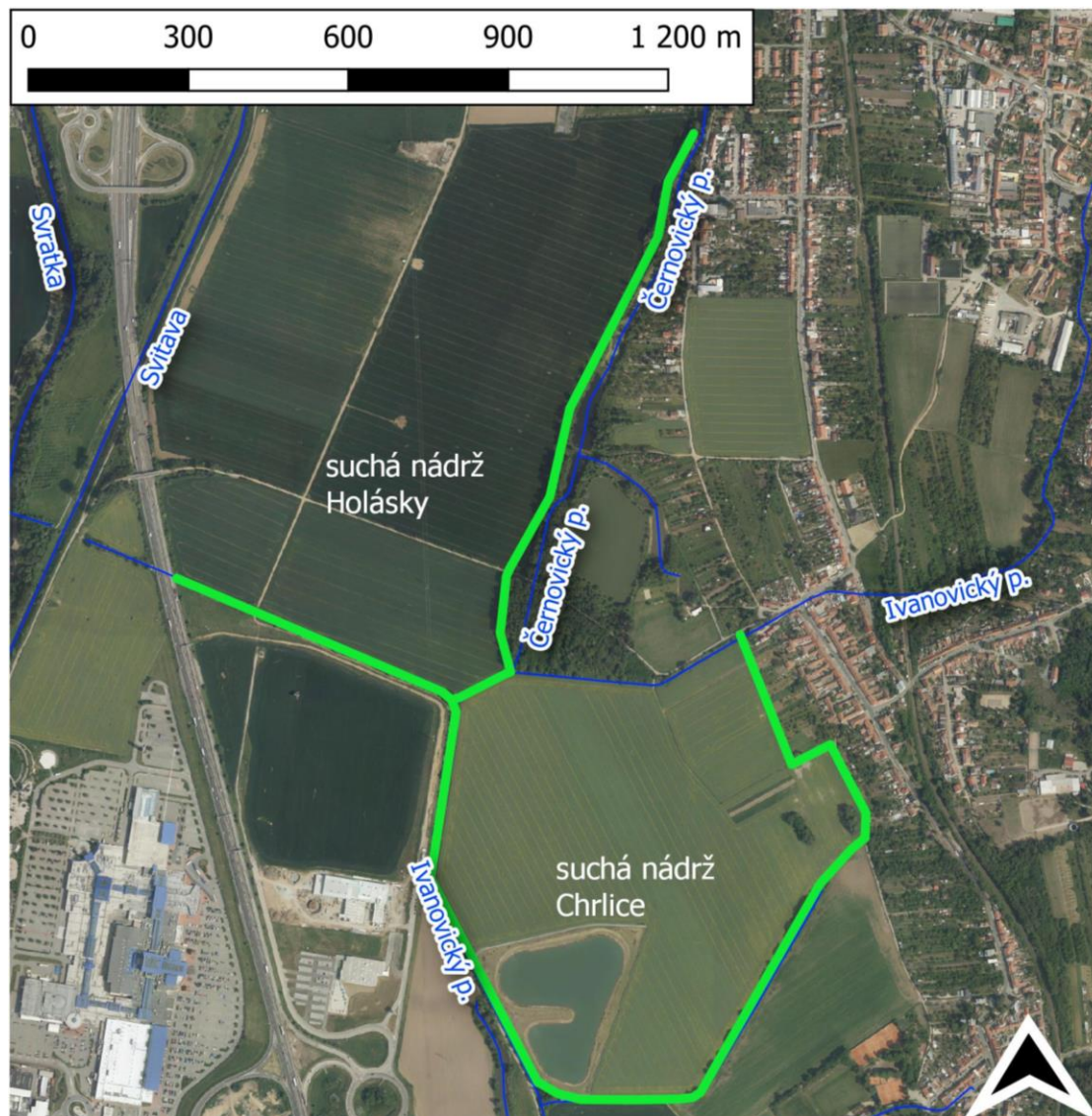
Hráze jsou navrženy ve stejném technickém provedení jako v případě varianty 1, tedy nepojízdné lichoběžníkové s návodním a povodním lícem o sklonu 1:2 a šířkou koruny 3 m. Povrchová úprava zemních hrází je navržena ohumusováním a zatravněním. Bezpečnostní přelivy jsou voleny se sklony návodního líce 1:2 a povodního líce 1:6, kde dále následuje 10 m dlouhý nezahlobený vývar. Povrchová úprava koruny, povodního líce a nezahlobeného vývaru v místě přelivu je navržena jako kamenná dlažba do betonového lože v mocnosti 30 cm. Spodní výpusti jsou navrženy jako betonové potrubí DN300.

Podobně jako v případě varianty 1 nebylo možné zahrnout přírodní památku Holásecká jezera do retenčního prostoru. Toto byla snaha vyřešit ve variantě 2 suchou nádrží Chrlice, která měla za úkol zachytit část povodňového průtoku obtékající suchou nádrží Holásky a zvýšit objem potenciální retence.

Hráz suché nádrže Holásky navazuje na násyp dálnice D2 a dále pokračuje po levém břehu zavlažovacího kanálu Svatky až k soutoku s Ivanovickým potokem. Před soutokem se nachází spodní výpust směřující do Ivanovického potoka. Dále hráz pravobřežně kopíruje Ivanovický potok až do soutoku s Černovickým potokem. V tomto úseku se nachází bezpečnostní přeliv s korunou v úrovni 193,28 m n. m. Na soutoku Ivanovického a Černovického potoka hráz pokračuje severně podél přírodní památky Holásecká jezera, kde se nachází křížení s místní komunikací vedoucí do městské části Holásky. Tento detail je vyřešen nájezdovými zemními rampami o sklonu 17%, detail je vyhotoven v příloze č. 4. Dále hráz pokračuje až k zemědělským stavbám AGRO Brno – Tuřany. Hráz má celkovou délku 1,79 km s korunou v úrovni 193,80 m n. m. Průměrná výška hráze činí 1,3 metrů.

Hráz suché nádrže Chrlice navazuje na hráz suché nádrže Holásky v místě před soutokem ze strany Ivanovického potoka, kde se nachází propustek pro převádění průměrného ročního průtoku. Dále hráz kopíruje levobřežně Ivanovický potok až na jižní stranu Chrlického biotopu. V jižním úseku se ve staničení 1,0 km nachází spodní výpusť a bezpečnostní přeliv s korunou v úrovni 192,25 m n. m. Hráz v tomto místě změni směr a pravobřežně kopíruje meliorační průleh a dále zahrady městské části Holásky až po Ivanovický potok. Hráz má s niveletou koruny 193,00 m n. m. celkovou délku 2,45 km. Průměrná výška hráze činí 1,5 m.

Tato varianta je výkresově zpracována v příloze č. 3 Situace – Varianta 2 a příloze č. 4 Příčné řezy PF1, PF2, PF3.

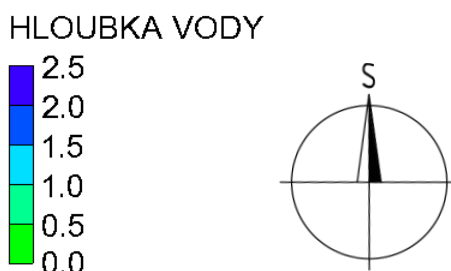


Obr. 38 Situace suché hráze Holásky a Chrlice, varianta 2 (zelená linie) [4]

6.2 Výsledky

Na počátku simulace se přítok ze severu částečně zachytává v retenčním prostoru suché nádrže Holásky a ve stejnou chvíli proudí značné množství vody Holáseckými jezery podél hráze na jih směrem do retenčního prostoru suché nádrže Chrlice (Obr. 40, Obr. 42). Vybočení proudu PV Svitavy mezi dálnicí D1 a D2 se v plné míře zachytává v retenčním prostoru suché nádrže Holásky. Objem suché nádrže Holásky se po dosažení a následném překonání úrovně koruny bezpečnostního přelivu začne přelévat do retenčního prostoru suché nádrže Chrlice (Obr. 41). Suchá nádrž Chrlice se plní přítokem ze severu a bezpečnostním přelivem ze suché nádrže Holásky (Obr. 42). Po dosažení úrovně bezpečnostního přelivu suché nádrže Chrlice dosáhne PV městské části Chrlice v čase simulace 68 h (Obr. 43). Kulminace v tomto místě dosáhne v čase simulace 102 h (Obr. 44).

Hloubku vody a orientaci severu (S) lze v jednotlivých obrázcích odečíst za pomoci Obr. 39.



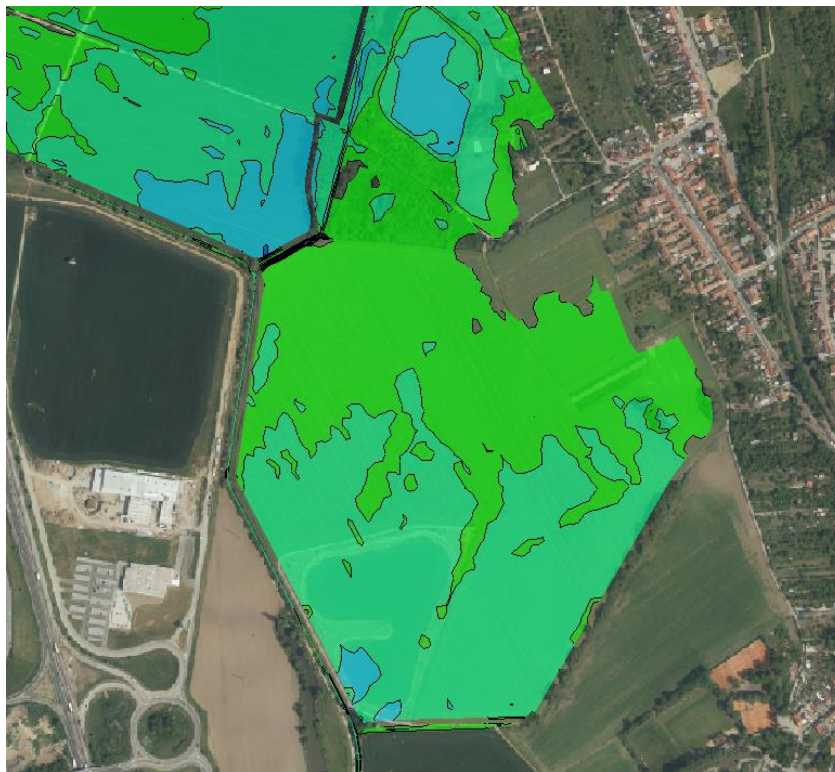
Obr. 39 Legenda, varianta 2



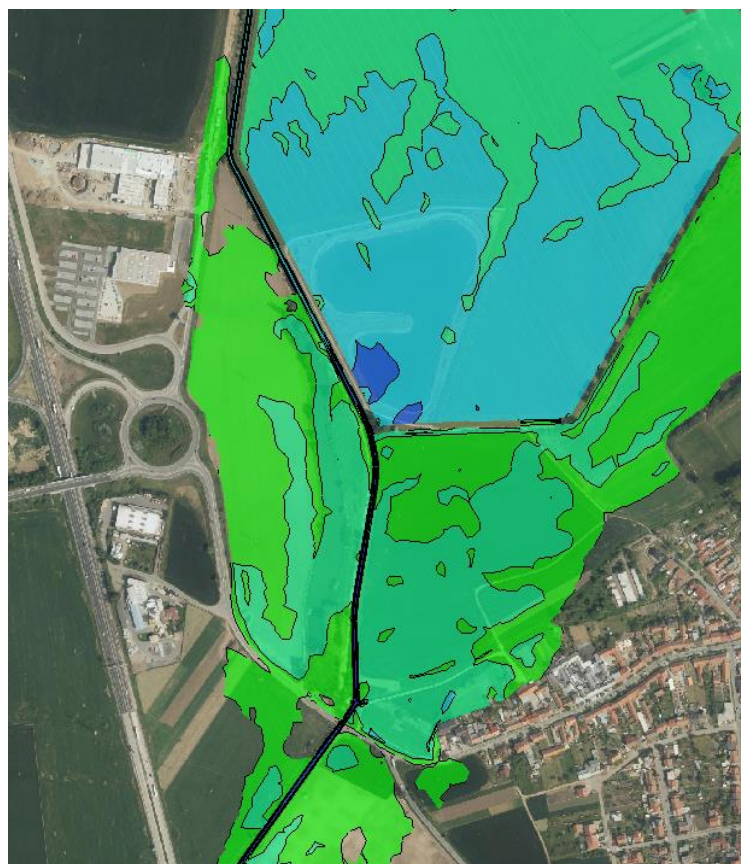
Obr. 40 Přítok PV do suché nádrže Holásky, 60. h



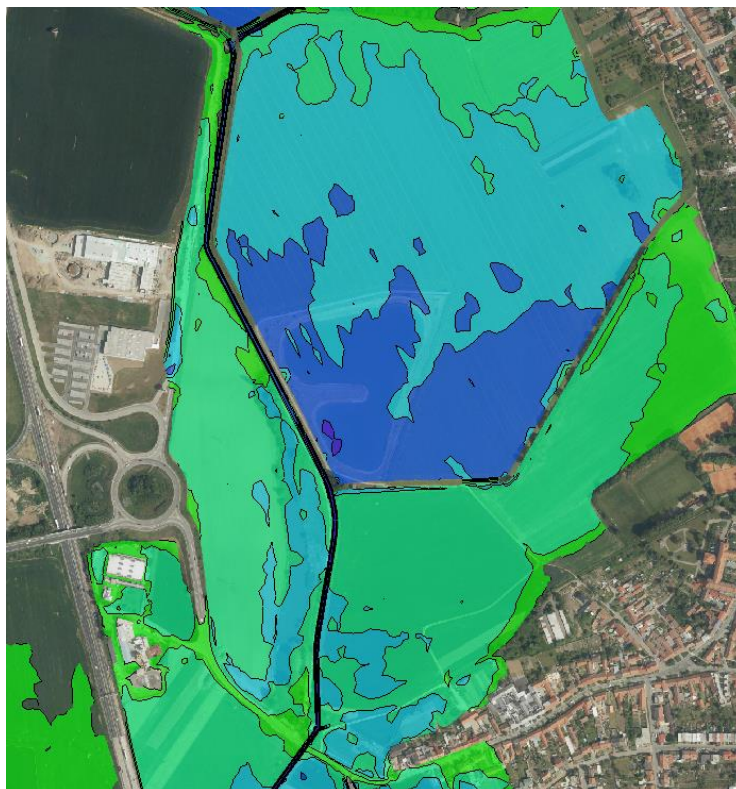
Obr. 41 Kulminace, 102. h



Obr. 42 Přítok PV do suché nádrže Chrlice, 65. h



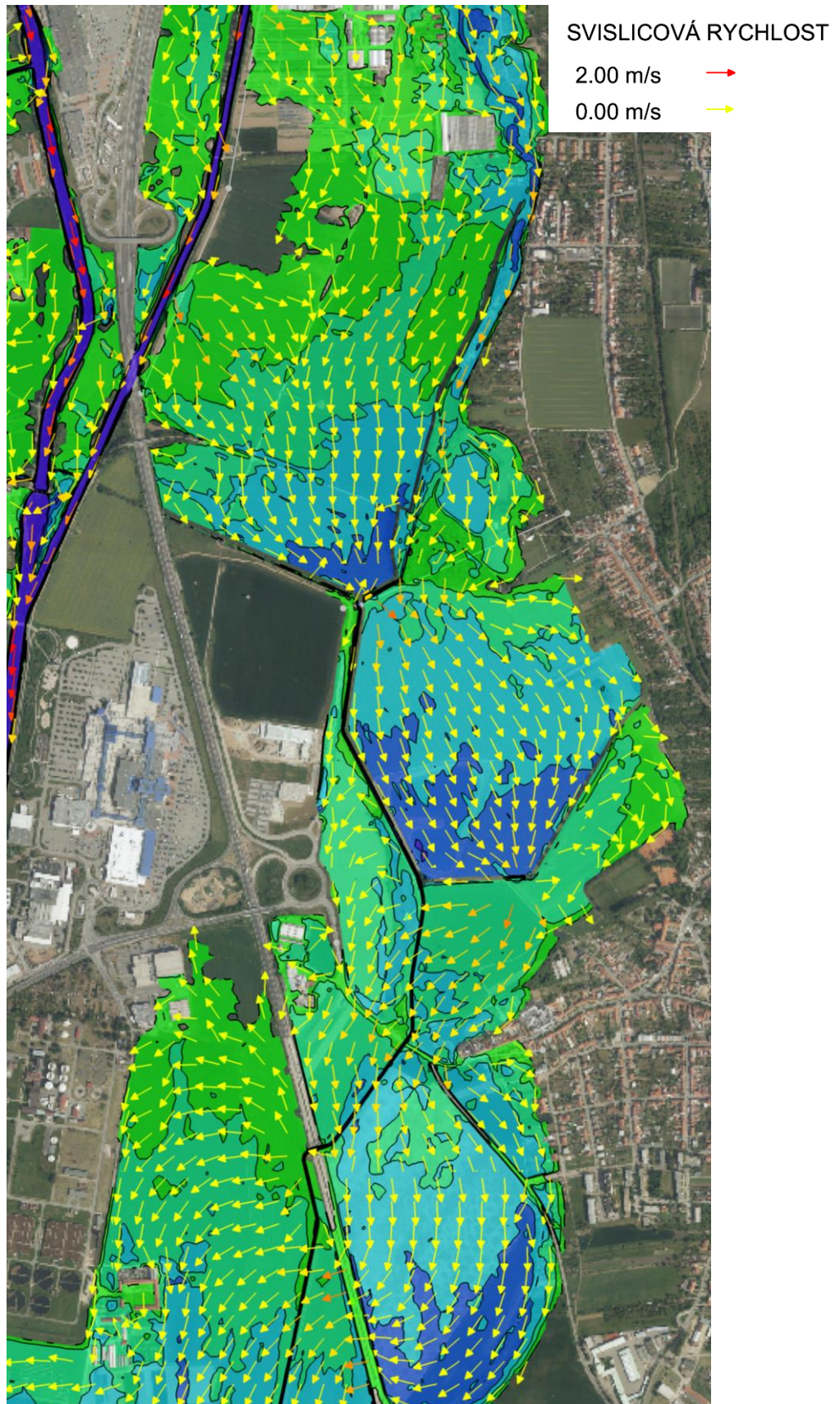
Obr. 43 Přítok PV do městské části Chrlice, 68. h



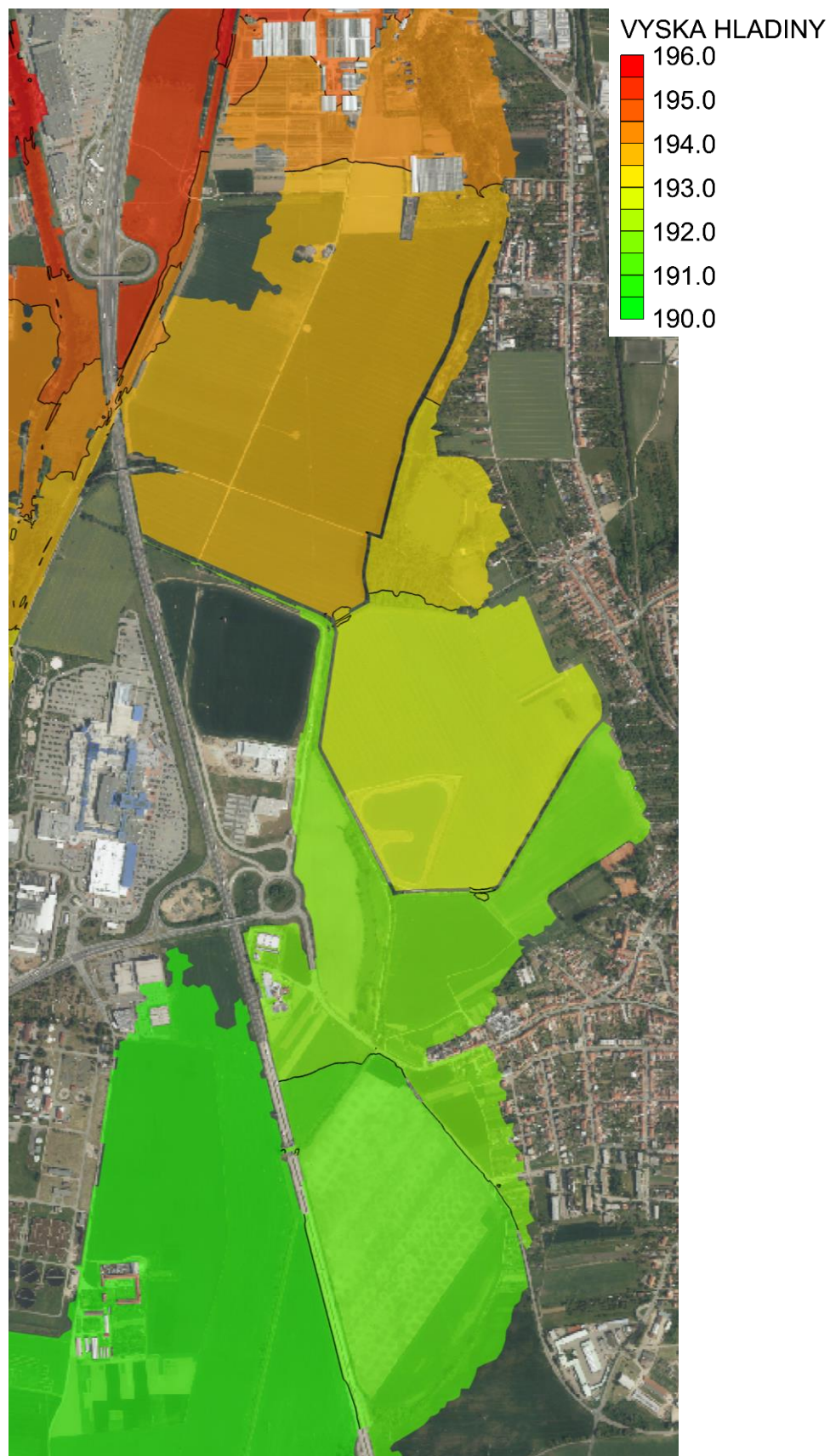
Obr. 44 Kulminace, 102. h

Na Obr. 45 lze pozorovat, že hloubky vody se oproti stávajícímu stavu (Obr. 22) změnily jen v oblasti suché nádrže Holásky, kde hladina dosáhla cca 1,5 metru a v oblasti suché nádrže Chrlice, kde hladina dosáhla cca 2,5 metru. Lze také pozorovat malou změnu ve svislicových rychlostech v oblasti pod bezpečnostními přelivy, na těchto místech rychlost prudce narůstá. Tato skutečnost byla zohledněna při návrhu opevnění vývarů.

Při porovnání linie na Obr. 46 zobrazující průběh výšky hladiny 194 m n. m. v případě varianty 1 a stávajícího stavu (Obr. 23) lze prohlásit, že nedochází ke zpětnému vzduť ani u zemědělského areálu AGRO Brno – Tuřany a u řeky Svitavy. Při návrhu této varianty muselo být zohledněno i nebezpečí zpětného vzduť vody do oblasti přírodní památky Holáseckých jezer a do městské části Holásky.



Obr. 45 Souhrnná mapa svislicových rychlostí a hloubky vody, kulminace



Obr. 46 Mapa výšky hladiny, kulminace

Z rozdílu dat zobrazených na Obr. 47 byla vypracována rozdílová křivka (Obr. 48) znázorňující průtokové změny v jednotlivých časech simulace.

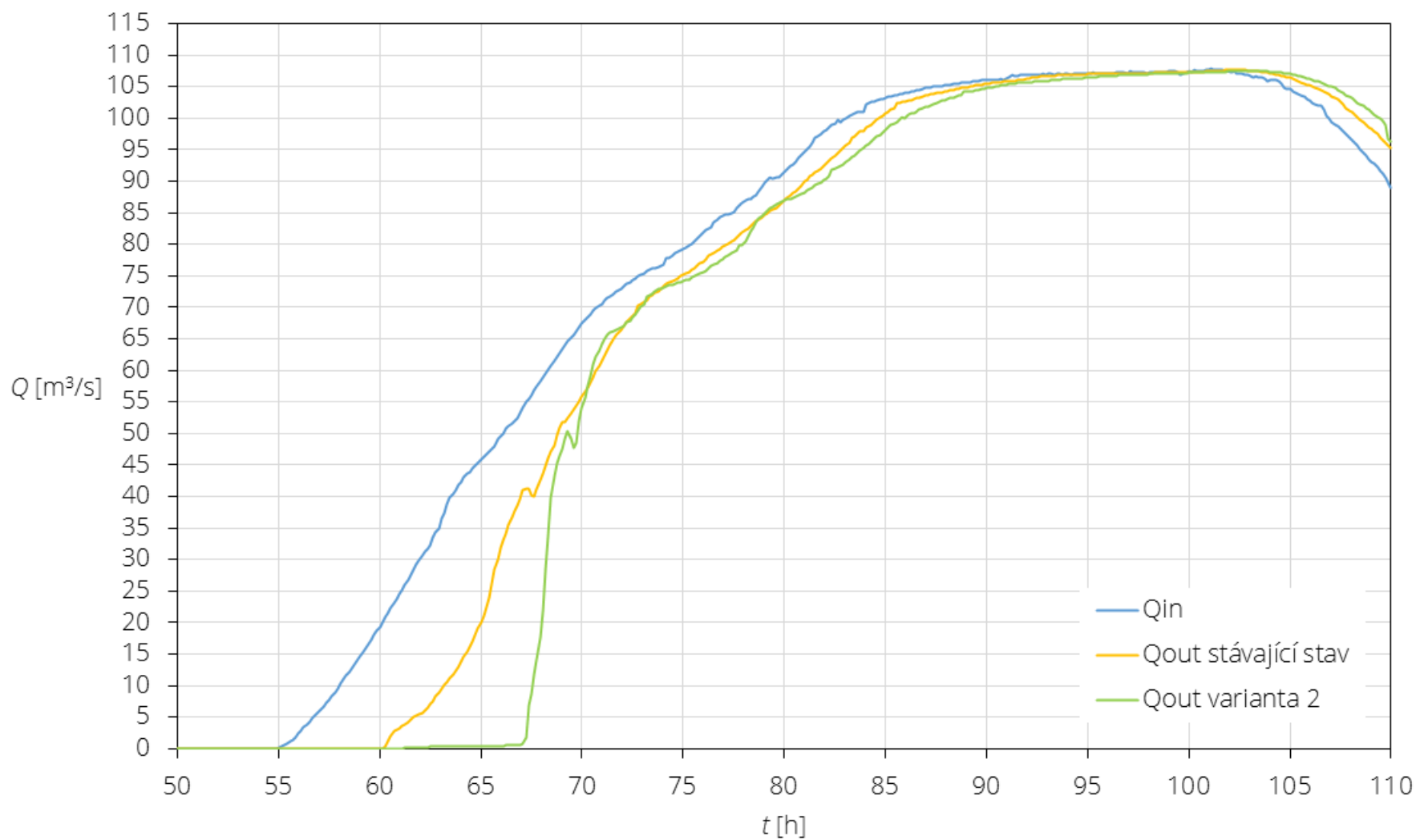
V 60. hodině lze pozorovat výrazný nárůst retenčních vlastností zájmového území, kdy rozdíl v průtoku oproti stávajícímu stavu činí cca 40 m³/s. Toto je důsledkem zapojení suché nádrže Holásky a suché nádrže Chrlice do její funkce.

Dále v 67. hodině hladina v nádrži dosáhne úrovně bezpečnostního přelivu a tím způsobí nárůst průtoku. V grafu projevono sestupným trendem rozdílové křivky.

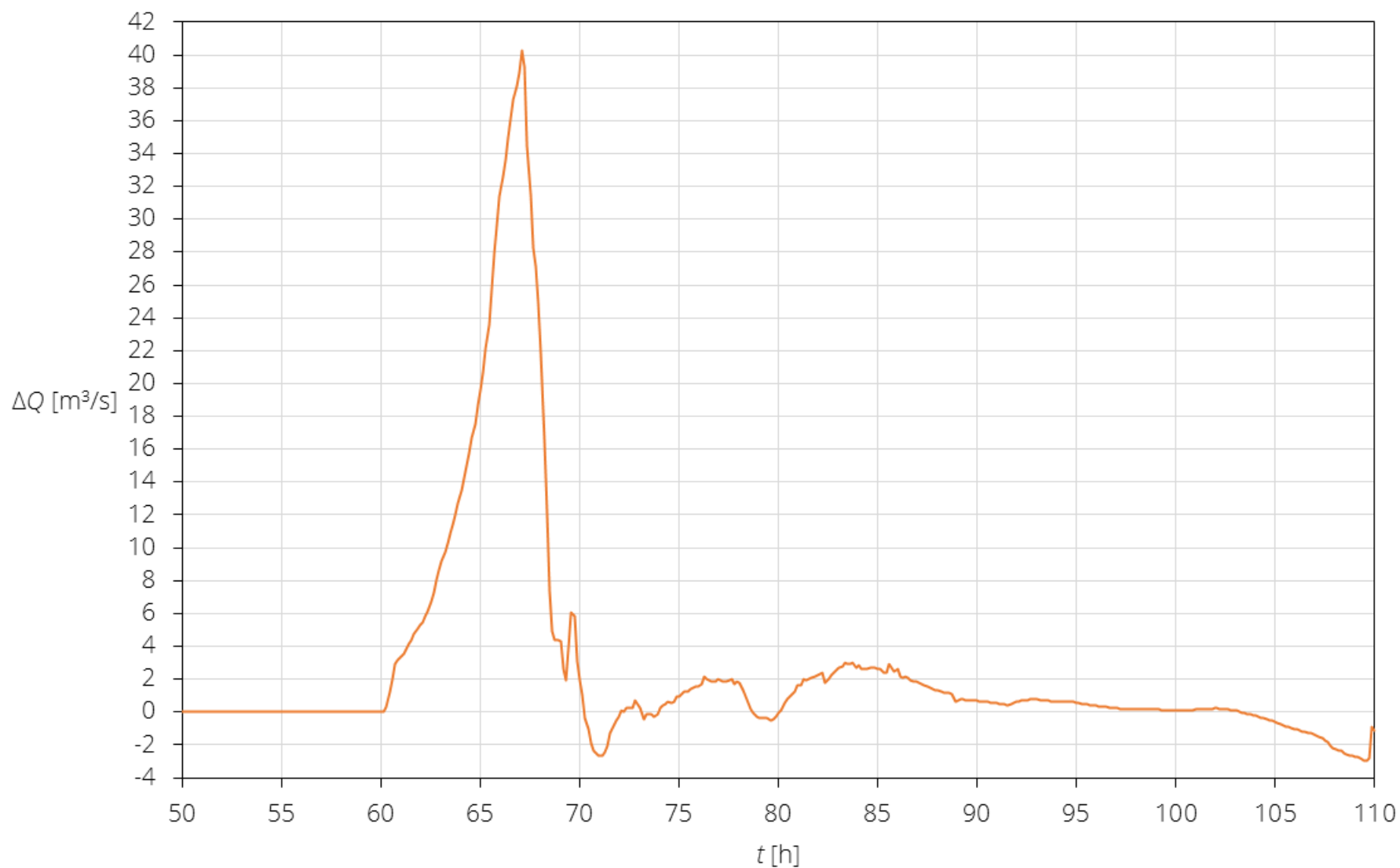
Další průběh křivky je výkyvem hodnot v záporných i kladných hodnotách a následný návrat k původním hodnotám stávajícího stavu.

Ze součtu objemů pod křivkou bylo zjištěno, že suchá nádrž Holásky a suchá nádrž Chrlice společně disponuje retenčním objemem 593 011 m³. Data byla získána z Obr. 48.

Tato varianta zajišťuje zpoždění na začátku hydrogramu oproti stávajícímu stavu o 6,5 hodiny, toto reprezentuje zpoždění zaplavení městské části Chrlice. V průběhu povodně ve velikosti průtoku 13,8 m³/s je zpoždění o velikosti 3,5 hodiny oproti stávajícímu stavu.



Obr. 47 Transformační schopnost zájmového území, (varianta 2, stávající stav)

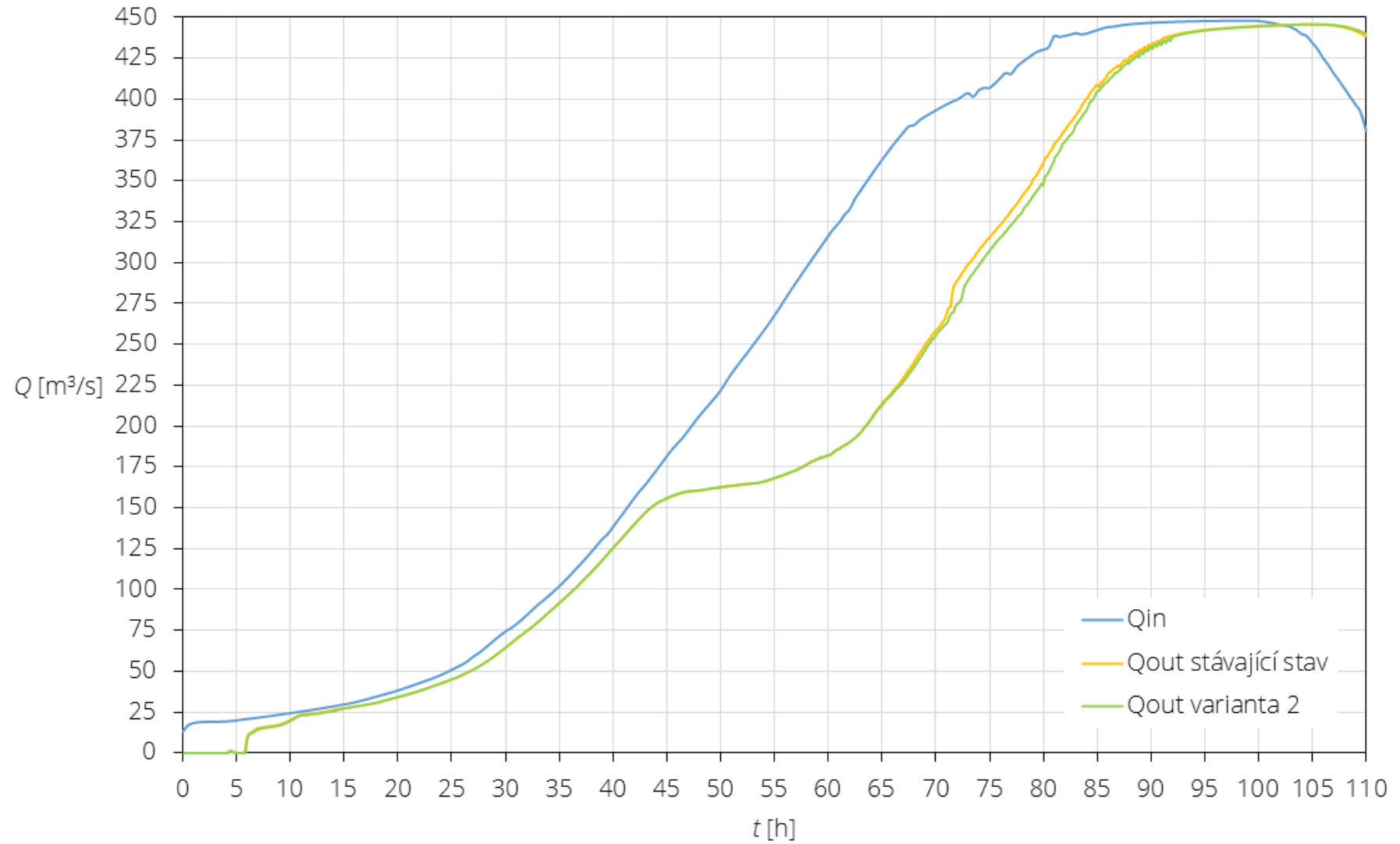


Obr. 48 Rozdílová křivka průtoků v zájmové oblasti, (varianta 2, stávající stav)

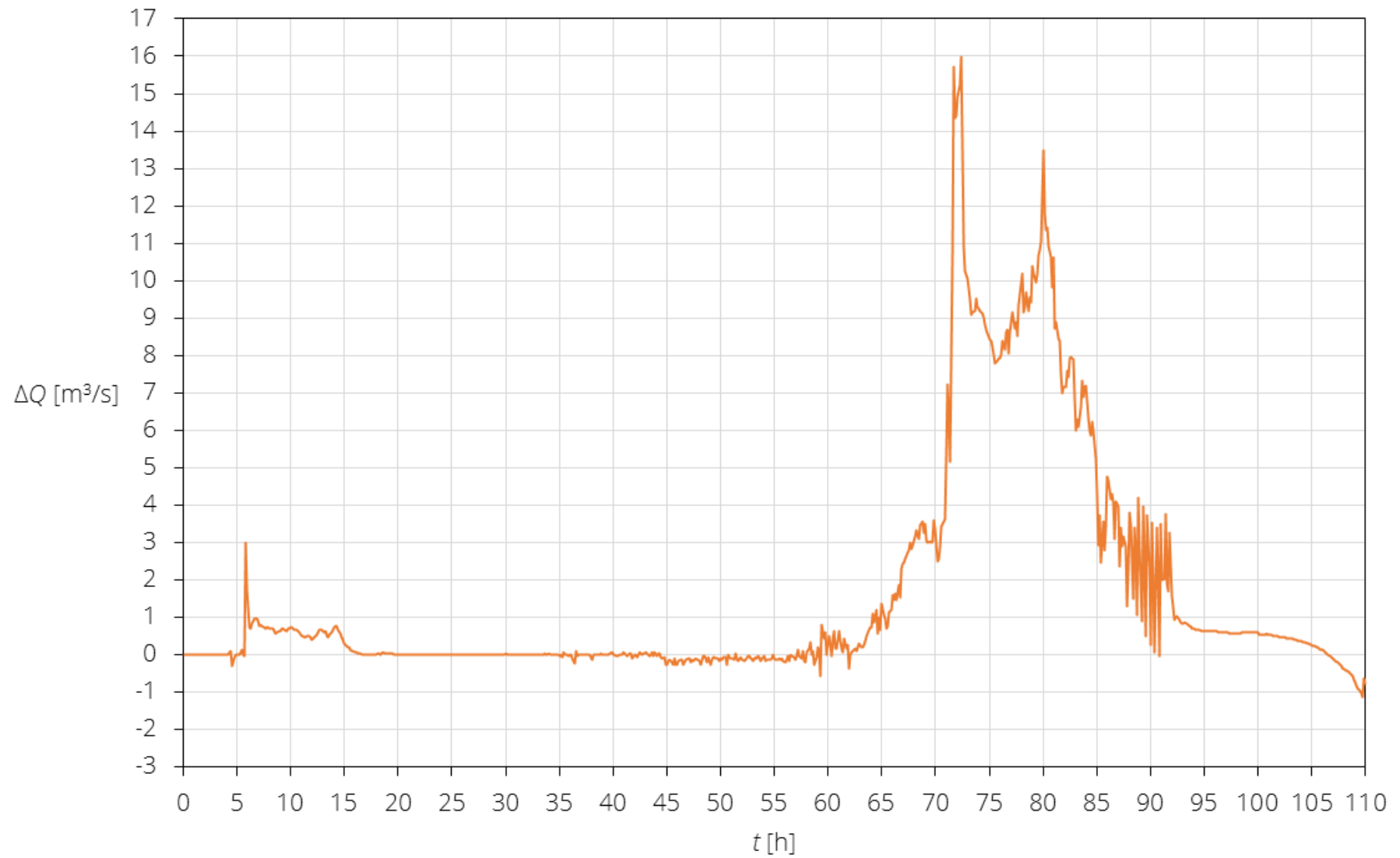
Z dat znázorněných na Obr. 49 byla vypracována rozdílová křivka (Obr. 50) znázorňující průtokové změny v jednotlivých časech simulace.

Na Obr. 50 lze pozorovat prudký nárůst retenčních vlastností území v cca 72. hodině. V tuto chvíli rozdíl průtoku varianty 2 oproti stávajícímu stavu dosáhne téměř $16 \text{ m}^3/\text{s}$. Dále následuje pokles a následný nižší objem retence o velikosti $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Následuje sestupný trend, který značí návrat k průběhu velikosti průtoků stávajícího stavu.

Maximální časové zpoždění v tomto případě nastává v průtoce $280 \text{ m}^3/\text{s}$. Zpoždění oproti simulaci stávajícího stavu je 1,0 h, přesněji tedy z 78,5. h na 79,5. h simulace. Kulminační průtok není oproti stávajícímu stavu nijak zpožděn.



Obr. 49 Transformační schopnost oblasti modelu, (varianta 2, stávající stav)



Obr. 50 Rozdílová křivka průtoků v oblasti modelu, (varianta 2, stávající stav)

6.3 Zhodnocení

Úpravou inundačního území ve variantě 2 se podařilo zachytit i část povodňového průtoku, který protékal přes Holásecká jezera.

Tato varianta je nedostačující pro úplné zachycení celého objemu PV protékající zájmovým územím a jejího bezpečného převedení. Vzhledem k morfologii území, ale nebylo možné navrhnout opatření s větším retenčním objemem, které by nezpůsobovalo větší rozliv PV.

Na druhou stranu se podařilo výrazně snížit průtok na vzestupné větvi hydrogramu jak zájmového území, tak i celé oblasti modelu.

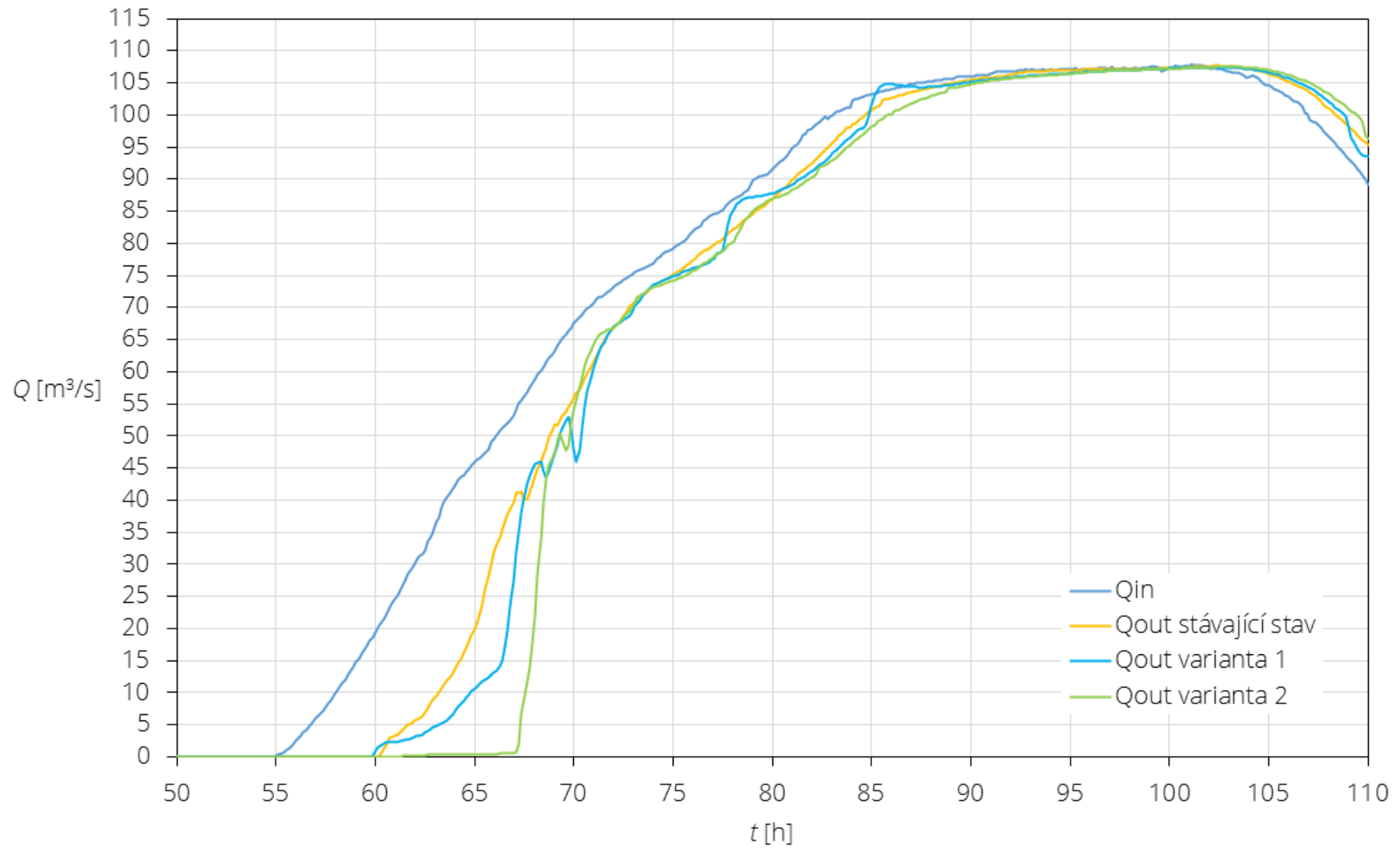
7 Souhrnné grafy

Významné změny nastávají v jednotlivých variantách na počátku vzestupné větve hydrogramu. Toto je velmi důležité pro volbu výsledného řešení.

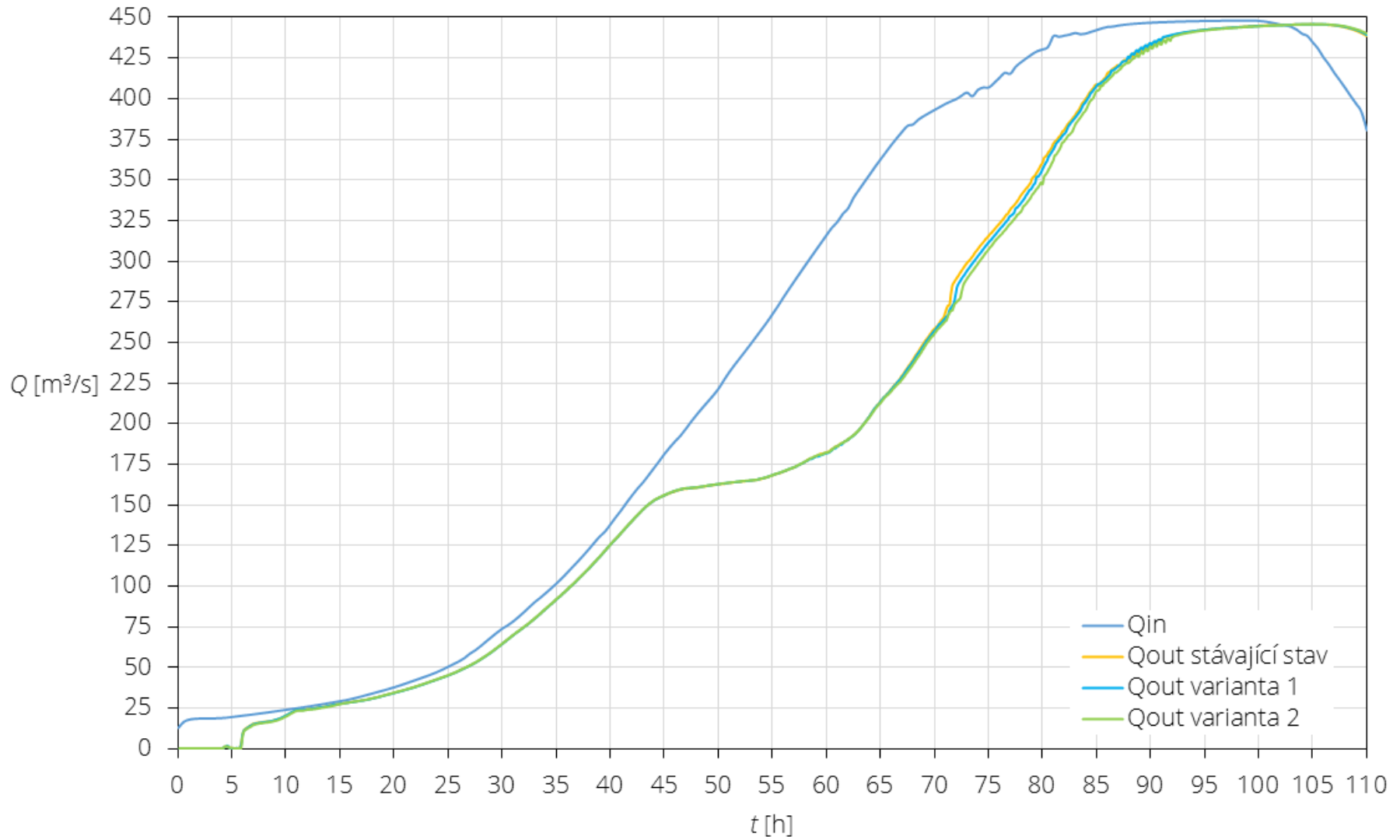
Na Obr. 51 lze pozorovat průběh hydrogramu odtoku všech variant a tím určit jejich efektivnost v zájmovém území. Průtok $13,8 \text{ m}^3/\text{s}$ je při variantě 1 opožděn o 2 h a v případě varianty 2 o 3,5 h. Maximální snížení průtoku při variantě 1 nastává v čase simulace 66,5 h o $20 \text{ m}^3/\text{s}$ a v případě varianty 2 v čase simulace 67 h o $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na Obr. 52 lze pozorovat průběh hydrogramu odtoku všech variant v oblasti celého modelu (od Přerovské trati až po Rajhradský jez). Průtok o velikosti $280 \text{ m}^3/\text{s}$ nastává v případě varianty 1 o 0,5 h později a varianta 2 zajišťuje zpoždění o 1 h. Maximální snížení průtoku při variantě 1 nastává v čase simulace 72 h o $12,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a v případě varianty 2 v čase simulace 72,5 h o $16 \text{ m}^3/\text{s}$.

Uvedené hodnoty jsou vztaženy k hodnotám odtoku stávajícího stavu.



Obr. 51 Transformační schopnost zájmového území



Obr. 52 Transformační schopnost oblasti modelu

8 Závěr a zhodnocení

8.1 Závěr

V úvodu diplomové práce byla stručně představena situace transformačních schopností mnoha řek protékajících intravilánem v České republice a následný popis plánovaného opatření města Brna.

Práce se v praktické části zabývala posouzením transformační schopnosti stávajícího stavu levého inundačního území Svitavy nad soutokem se Svratkou a následným navržením variantních opatření. Vyhodnocení navržených opatření probíhalo za využití softwaru SMS SRH-2D. Tento software byl popsán v samostatné kapitole, která se zaměřuje na jeho výhody, zjednodušující předpoklady a řídicí rovnice. Celá oblast byla vymodelována, model kalibrován a využit pro simulaci povodňového průtoku.

V případě stávajícího stavu byl popsán postup PV a vykreslení hydrogramu průběhu PV zájmovým územím a celým povodím. Totéž bylo provedeno pro variantu 1 a 2 s doplněním o rozdílové křivky průtoků oproti stávajícímu stavu. varianta 1 se věnovala implementování retenčního objemu suché nádrže Holásky a varianta 2 využívala retenčních prostorů suché nádrže Holásky a suché nádrže Chrlice.

8.2 Zhodnocení

Tato práce nabízí zpracování dvou variantních řešení na úrovni studie. Doporučenou variantou je varianta 2, jejichž transformační vlastnosti jsou takřka dvojnásobné oproti variantě 1. V tomto posouzení se ale nezohledňují finanční náklady, či majetkoprávní stránka projektu.

V případě dalšího šetření oblasti lze uvažovat možnost rozšíření suché nádrže Chrlice až po Tuřanský potok na jihu a dále možnost zahrnutí nádrží Malé a Velké Splavisko do retenčního prostoru.

9 Literatura

- [1] KUČA, Karel. Brno: vývoj města, předměstí a připojených vesnic. Praha: Baset, 2000. ISBN 80-86223-11-6.
- [2] PRYL, Karel (2010), *Generel odvodnění města Brna - průvodce projektem*, Brno.
- [3] Český úřad zeměměřičský a katastrální: Katastr nemovitostí [online]. 2012. [cit. 2020-10-10]. Dostupné z WWW: <www.cuzk.cz>.
- [4] Český úřad zeměměřičský a katastrální, „Prohlížeč služba WMS,“ [Online]. Available: <https://1url.cz/tz9ih>. [Přístup získán 11 09 2020].
- [5] Evidenční list hlásného profilu č. 380. Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 2020-10-24]. Dostupné z: https://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=306989.
- [6] Evidenční list hlásného profilu č. 375. Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 2020-10-24]. Dostupné z: https://hydro.chmi.cz/hpps/hpps_prfbk_detail.php?seq=307205.
- [7] Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka, *D03 - Záplavová území stoleté vody*, 2020.
- [8] VÁVRA, David, „Projekt 1 - malé vodní nádrže: 6. cvičení,“ 10 11 2012. [Online]. Available: <http://storm.fsv.cvut.cz/>.
- [9] JUST, Tomáš. Přírodě blízké úpravy vodních toků v intravilánech a jejich význam v ochraně před povodněmi: revitalizace sídelního prostředí vodními prvky. Praha: Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, 2010. ISBN 978-80-87457-03-0.
- [10] ŘÍHA, Jaromír. Návrh a realizace suchých nádrží z pohledu technickobezpečnostního dohledu. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2014. ISBN 978-80-7212-600-2.
- [11] ČSN ISO 75 2410 (2011). Malé vodní nádrže. Praha: Český normalizační institut.

- [12] Suché ochranné nádrže v projektech pozemkových úprav: sborník přednášek ze semináře konaného dne 27. dubna 2000. Brno: Vysoké učení technické, 2000.
- [13] Neznámý, „Povodí Odry, s.p.“ 2018. [Online]. Available: <https://www.pod.cz/>.
- [14] GIMUN, V. Povodňové scénáře Svatky a Svitavy (Přerovská trať), Povodí Moravy s.p.
- [15] Y. G. Lai, SRH-2D version 2: Theory and User's Manual, Denver, Colorado, USA: AQUAVEO, LLC, 2008.
- [16] JANDORA, Jan. Tabulky z hydrauliky. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2007-3.

10 Seznamy

10.1 Veličín

| | | |
|--------------------------|--|----------------------|
| g | tíhové zrychlení | [m/s ²] |
| h | hloubka | [m] |
| h_0 | hloubka v čase $t = 0$ | [m] |
| L | říční kilometr | [km] |
| l_{el} | lineární velikost elementu | [m] |
| n | Manningův součinitel drsnosti | [-] |
| Q | průtok | [m ³ /s] |
| Q_{in} | přítok | [m ³ /s] |
| Q_{out} | odtok | [m ³ /s] |
| t | čas | [h] |
| T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} | složky smykového napětí od turbulence | [Pa] |
| U, V | složky svislicové rychlosti | [m/s] |
| V | objem | [m ³] |
| v_{x0}, v_{y0} | složky rychlosti v prostoru a čase $t = 0$ | [m/s] |
| V_0 | počáteční objem | [m ³] |
| x, y, z | kartézské souřadnice | [m] |
| Z | úroveň | [m n. m.] |
| Z_0 | úroveň hladiny v čase $t = 0$ | [m n. m.] |
| ΔQ | rozdíl průtoků | [m ³ /s] |
| Δt_p | posun kulminačního průtoku v čase | [s] |
| ΔQ_p | snížení kulminačního průtoku | [m ³ /s] |
| ρ | hustota kapaliny | [kg/m ³] |
| τ_{bx}, τ_{by} | smyková napětí od tření o no | [Pa] |
| ν | molekulární viskozita | [m ² /s] |
| ν_t | turbulentní kinematická viskozita kapaliny | [m ² /s] |

10.2 Zkratky

| | |
|-------------------|------------------------|
| PV | povodňová vlna |
| PV ₁₀₀ | stoletá povodňová vlna |

| | |
|--------|---|
| 1D | jednodimenzionální |
| 2D | dvojdimenzionální |
| SRH-2D | Sedimentation and River Hydraulics – 2D |
| SMS | Surface-Water Modelling |

10.3 Obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Popis oblasti [4] | 12 |
| Obr. 2 Poloha hlásných profilů [4]..... | 14 |
| Obr. 3 Rozliv při Q_{100} (modře), rozsah modelu (červeně) [4, 7] | 15 |
| Obr. 4 Transformace povodňové vlny [8]..... | 16 |
| Obr. 5 Efektivní a přírodě blízké úpravy koryta k transformaci povodňových průtoků [9]..... | 16 |
| Obr. 6 Suchá nádrž Jičina, vizualizace [13] | 18 |
| Obr. 7 Síť..... | 22 |
| Obr. 8 Polygony reprezentující typy povrchů Svitavy | 23 |
| Obr. 9 Svitava PV_{100} [14]..... | 25 |
| Obr. 10 Svratka doplněk [14]..... | 26 |
| Obr. 11 Odchytky v kalibraci 2D modelu oproti 1D modelu..... | 27 |
| Obr. 12 Rozliv při Q_{100} (modře), měrné profily oblasti modelu (žlutě), zájmové území (zeleně) [4, 7]..... | 28 |
| Obr. 13 Legenda – Stávající stav | 30 |
| Obr. 14 Vybočení proudu na 3 ř. km, 22. h..... | 30 |
| Obr. 15 Kulminace, 101. h..... | 31 |
| Obr. 16 Přítok do zájmového území, 57. h..... | 31 |
| Obr. 17 Vybočení proudu mezi dálnicemi D1 a D2, 57. h..... | 32 |
| Obr. 18 Kulminace v oblasti, 102. h | 32 |
| Obr. 19 Přítok PV do městské části Chrlice, 62. h..... | 33 |
| Obr. 20 Kulminace u městské části Chrlice, 102. h | 33 |
| Obr. 21 Odtok PV ze zájmového území, 102. h..... | 34 |
| Obr. 22 Souhrnná mapa svislicových rychlostí a hloubky vody, kulminace | 35 |
| Obr. 23 Mapa výšky hladiny, kulminace | 36 |
| Obr. 24 Transformační schopnost zájmového území, stávající stav | 38 |
| Obr. 25 Transformační schopnost oblasti modelu, stávající stav | 39 |
| Obr. 26 Situace hráze suché nádrže Holásky, varianta 1 (oranžová linie) [4] | 41 |
| Obr. 27 Legenda, varianta 1 | 42 |
| Obr. 28 Přítok do suché nádrže Holásky, 61. h..... | 42 |
| Obr. 29 Kulminace, suchá nádrž Holásky, 102. h | 43 |
| Obr. 30 Přítok PV do Chrlic, 64. h | 43 |

| | |
|--|----|
| Obr. 31 Kulminace, Chrlice, 107. h | 44 |
| Obr. 32 Souhrnná mapa svislicových rychlostí a hloubky vody, kulminace | 45 |
| Obr. 33 Mapa výšky hladiny, kulminace | 46 |
| Obr. 34 Transformační schopnost zájmového území, (varianta 1, stávající stav) | 48 |
| Obr. 35 Rozdílová křivka průtoků v zájmové oblasti (varianta 1, stávající stav).. | 49 |
| Obr. 36 Transformační schopnost oblasti modelu, (varianta 1, stávající stav).. | 51 |
| Obr. 37 Rozdílová křivka průtoků v oblasti modelu, (varianta 1, stávající stav).. | 52 |
| Obr. 38 Situace suché hráze Holásky a Chrlice, varianta 2 (zelená linie) [4] | 55 |
| Obr. 39 Legenda, varianta 2 | 56 |
| Obr. 40 Přítok PV do suché nádrže Holásky, 60. h | 57 |
| Obr. 41 Kulminace, 102. h | 57 |
| Obr. 42 Přítok PV do suché nádrže Chrlice, 65. h | 58 |
| Obr. 43 Přítok PV do městské části Chrlice, 68. h | 58 |
| Obr. 44 Kulminace, 102. h | 59 |
| Obr. 45 Souhrnná mapa svislicových rychlostí a hloubky vody, kulminace | 60 |
| Obr. 46 Mapa výšky hladiny, kulminace | 61 |
| Obr. 47 Transformační schopnost zájmového území, (varianta 2, stávající stav) | 63 |
| Obr. 48 Rozdílová křivka průtoků v zájmové oblasti, (varianta 2, stávající stav).. | 64 |
| Obr. 49 Transformační schopnost oblasti modelu, (varianta 2, stávající stav).. | 66 |
| Obr. 50 Rozdílová křivka průtoků v oblasti modelu, (varianta 2, stávající stav).. | 67 |
| Obr. 51 Transformační schopnost zájmového území | 70 |
| Obr. 52 Transformační schopnost oblasti modelu | 71 |

10.4 Tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1 N-leté průtoky Svitava [5] | 13 |
| Tab. 2 N-leté průtoky Svratka [6] | 13 |
| Tab. 3 Součinitele drsnosti | 24 |

11 PŘÍLOHY

11.1 Výkresová část

1. VARIANTA 1 - SITUACE
2. VARIANTA 1 – PŘÍČNÉ PROFILY PF1, PF2
3. VARIANTA 2 – SITUACE
4. VARIANTA 2 – PŘÍČNÉ PROFILY PF1, PF2, PF3