

# **Modernizace stavidla ve Veselí n. M.**

## **Matematický model proudění podzemní vody v ochranné hrázi a jejím podloží**

Brno, duben 2019

# OBSAH

<b>1.</b>	<b>IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE .....</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>CÍLE A PŘEDMĚT ŘEŠENÍ .....</b>	<b>3</b>
<b>3.</b>	<b>DOSTUPNÉ PODKLADY .....</b>	<b>3</b>
<b>4.</b>	<b>POPIS LOKALITY.....</b>	<b>4</b>
4.1	GEOLOGICKÉ A HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY.....	5
4.2	HYDROLOGICKÉ POMĚRY .....	6
4.3	NÁPUSTNÉ STAVIDLO .....	8
<b>5.</b>	<b>VLASTNÍ ŘEŠENÍ .....</b>	<b>10</b>
5.1	POSTUP ŘEŠENÍ A HODNOCENÉ VARIANTY .....	10
5.2	PŘEDBĚŽNÉ POSOUZENÍ PRŮSAKOVÝCH POMĚRŮ.....	11
5.3	MODELOVÉ ŘEŠENÍ.....	12
5.3.1	Předpoklady použité při řešení .....	12
5.3.2	Numerické řešení.....	12
5.3.3	Vlastní řešení a jeho výsledky .....	13
<b>6.</b>	<b>ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ.....</b>	<b>14</b>
<b>7.</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>15</b>

# 1. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Toto modelové řešení bylo vypracováno na základě objednávky zn. 02\_HuO-131/19 společnosti Vodohospodářský rozvoj a výstavba a. s. ze dne 6. 3. 2019.

Název akce: **Modernizace nápuštného stavidla ve Veselí n. M.**

Název práce: **Matematický model proudění podzemní vody v prostoru nápuštného stavidla.**

Objednatel: Vodohospodářský rozvoj a výstavba a. s.  
Nábřeží 4, 150 56 Praha.

Dodavatel: Prof. Ing. Jaromír Říha, CSc., Pekařská 46, 602 00 Brno.

Spolupracovník: Ing. Tomáš Julínek, Ph.D.

## 2. CÍLE A PŘEDMĚT ŘEŠENÍ

Předmětem práce je modelové zhodnocení průsakových poměrů v prostoru modernizovaného nápuštného stavidla na pravém břehu Baťova kanálu nad plavební komorou ve Veselí nad Moravou.

Práce obsahuje dvojrozměrné (2D) matematické modely proudění podzemní vody v horizontální a vertikální rovině sestavené pro detail nápuštného stavidla. Součástí je posouzení filtrační stability zemin hráze v podloží stavidla.

### Posouzení zahrnuje:

1. Shromáždění, zpracování a rozbor dostupných podkladů.
2. Sestavení modelu proudění podzemní vody - 2D model proudění vody podložím v horizontální rovině; model je stacionární pro zadanou hladinu na návodní a vzdušné straně stavidla, resp. ochranné hráze (OH).
3. Sestavení modelu proudění podzemní vody - 2D model ve vertikální rovině; model bude stacionární pro zadanou hladinu na návodní a vzdušné straně ochranné hráze (OH).
4. Zhodnocení průsakových poměrů, odhad průsakového množství.
5. Posouzení filtrační stability materiálů tělesa hráze a podloží ochranné hráze.
6. Závěry, doporučení na rozsah stavební jímky, resp. na návrh zavazovací ostruhy, popř. těsnicí stěny.

Práce vychází z provedeného inženýrsko-geologického průzkumu [2] a archivních vrtů [3], geodetického zaměření lokality v rámci [1] a dalších podkladů uvedených v kapitole 3. V rámci řešení byly zajištěny další podklady týkající se předmětné lokality.

## 3. DOSTUPNÉ PODKLADY

[1] Dokumentace DÚR. Modernizace nápuštného stavidla Veselí n. M. VRV a.s. Praha. 2018.

[2] Inženýrsko-geologický průzkum pro modernizaci nápuštného stavidla Veselí n. M. Projekce iGEO s.r.o. Brno. Poul, I. 9/2018.

[3] Geofond. Archivní vrty.

[4] MŘ pro vodohospodářskou soustavu na řece Moravě ve Veselí nad Moravou. Povodí Moravy, s. p. Brno. 9/2007.

- [5] MŘ pro vodní cestu řeky Moravy a průplavu Otrokovice – Rohatec – „Baťův Kanál“. Povodí Moravy, s. p. Brno. 10/2009.
- [6] Základní vodohospodářská mapa ČSR, 35-11 Veselí na Moravě, 1:50 000.
- [7] Bear, J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. Elsevier, Amsterdam, 764 p.
- [8] ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže.
- [9] ČSN 73 1000 EN 1997, Eurokód 7. Navrhování geotechnických konstrukcí.
- [10] Kouřil, Z. 1970. Podzemí vody údolí řeky Moravy. ČAV – Geografický ústav Brno.
- [11] Hydrogeologický průzkum Veselí nad Moravou. Geotest. Brno. 1971.
- [12] Souhrnná zpráva o povodňové situaci v povodí Moravy a Dyje v červenci 1997. Povodí Moravy, a.s. Brno, 1997.
- [13] Vyhodnocení povodní v květnu a červnu 2010. Hydrologické vyhodnocení průběhu povodní. ČHMÚ, 2010.
- [14] Říha, J., Špano, M. a kol. Hodnocení bezpečnosti určených vodních děl metodou mezních stavů, VUT FAST v Brně, 3/2016, 154 s.
- [15] Projednání koncepce řešení těsnění stavební jámy a konstrukce stavidla se zadavatelem práce (Ing. Jakoubek), 9. 3. 2019.
- [16] Istomina, V. S. 1957. Filtracionnaja ustojčivost gruntov. Gosstrojizdat, Moskva. 296 s.
- [17] Petrula, L., Hala, M., Říha, J., Uncertainty in Determining the Critical Hydraulic Gradient of Uniform Glass Beads, příspěvek na konferenci Internal Erosion in Earthdams, Dikes and Levees: Proceedings of EWG-IE 26th Annual Meeting 2018, Springer, Švýcarsko, 2018.

## 4. POPIS LOKALITY

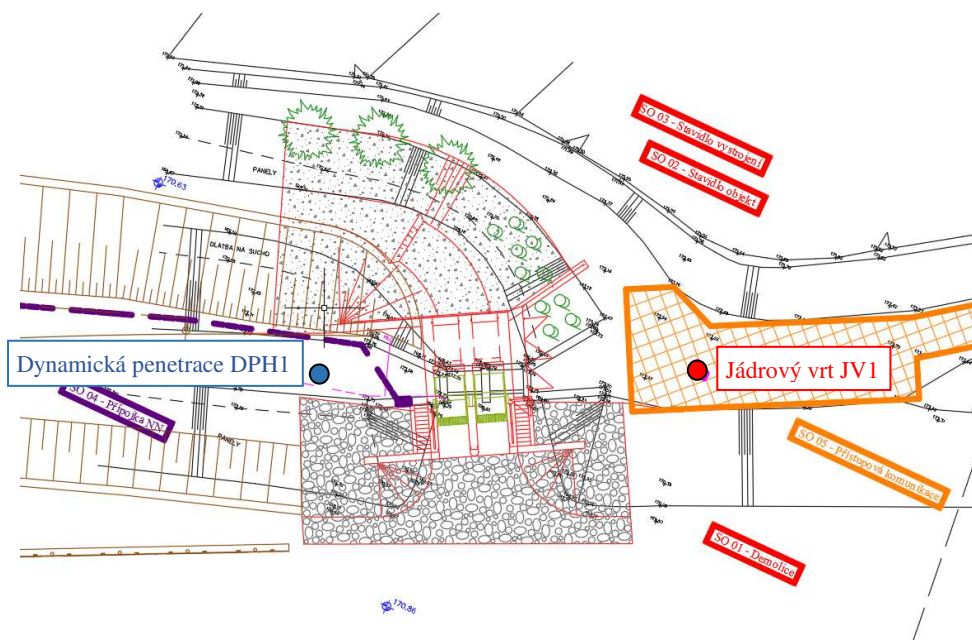
Zájmová lokalita se nachází v Jihomoravském kraji, v okrese Hodonín, v katastrálním území Veselí nad Moravou na pravém břehu (PB) Baťova kanálu. Stavební pozemek se nachází v nezastavěném území. Modernizace stavidla bude realizována v prostoru stávajícího stavidla umístěného na začátku plavebního a závlahového kanálu, nazývaného Baťův kanál. Plochy pro stavbu jsou oploceny, jde o uzavřený prostor nacházející se na pozemcích Povodí Moravy, s. p. Stavba se nachází v nadmořské výšce cca. 175,0 m n. m.



**Obr. 1 Umístění lokality**

## 4.1 Geologické a hydrogeologické poměry

Podrobněji jsou geomorfologické, geologické a hydrogeologické poměry popsány ve zprávě z průzkumu [2] a také archivními vrty [3]. Průzkum [2] mimo jiné spočíval ve zřízení průzkumných objektů JV1 (jádrový vrt a odběr poloporušených vzorků) a DPH1 (těžká dynamická penetrace), viz obr. 2..



**Obr. 2 Situace s umístěním průzkumných objektů dle [2]**

V této kapitole jsou stručně uvedeny geologické a hydrogeologické poměry týkající se předmětné lokality. V širším měřítku popisují zájmovou lokalitu také práce [10] a [11].

Zájmové území náleží podle geomorfologického členění k soustavě Vnitrokarpatké sníženiny, podsoustavě Vídeňské pánvi, celku Dolnomoravský úval. Jedná se o pruh zřetelně nižšího reliéfu s charakterem nížinného plochého reliéfu vytvořeného na souvrstvích mořských neogenních a kvartérních fluviálních uloženin. Reliéf akumulární výrazně převládá nad reliéfem erozně – denudačním. Z hydrogeologického hlediska lokalita spadá do hydrogeologického rajonu 1651 (Kvartér Dolnomoravského úvalu).

Z regionálně-geologického hlediska se zkoumaná oblast nachází v severním výběžku Vídeňské pánve, která je v zájmovém území vyplněna neogenními sedimenty, dosahujícími značných mocností a vyznačujícími se výraznou faciální proměnlivostí. Na neogenní mořské prachovité jíly (ČSN 75 2410 – F8 CH, F7 MH), písky, místy štěrky nasedají kvartérní fluviální sedimenty, které jsou zastoupeny především písčítými štěrky (ČSN 75 2410 – G1 GW až G3 G-F), štěrkovitými písky a povodňovými písčítými jíly (ČSN 75 2410 – F8 CH, F6 CI). V zanesených slepých ramenech se mohou vyskytovat slatiny, rašeliny a hnílokalý. Nadložní vrstvy fluviálních sedimentů jsou zastoupeny hlavně sprašemi, sprašovými hlínami a antropogenními navážkami. Navážky vznikly v této oblasti především v důsledku úprav koryta řeky Moravy, výstavby Baťova kanálu a zásahů do dalších vodotečí.

**Navážky** mají v zájmové oblasti lehce proměnlivý charakter. Svrchní vrstva cca 0,3 m je tvořena prachovitou hlinou s organickou příměsí. Těleso hráze v okolí stavidlového objektu tvoří rovněž antropogenní navážky zastoupené jílovitými typy zemin (ČSN EN 14688-2 – CI, siCI,

ČSN 75 2410 F6 CI) s pevnou konzistencí pevnou až velmi pevnou. Celková mocnost navážek se pohybuje okolo 3,3 m.

**Fluviální jíly** byly potvrzeny průzkumem v hloubkách 3,3 – 5,3 m pod korunou hráze. Jsou tvořeny jemnozrnnými fluviálními sedimenty (ČSN EN ISO 14688- c1), písčité jíl měkké, místy tuhé konzistence.

**Fluviální štěrky** o mocnosti cca 4,4 (ve vrtu JV1 byla zjištěna mocnosti 2,2 m po bázi vrtu) jsou tvořeny hrubozrnnými a jemnozrnnými štěrky, písky a písčitojílovitými zeminami. Zatříděny byly dle ČSN 75 2410 jako G3 G-F. Štěrky jsou proměnlivě ulehle s malou stlačitelností a vysokou únosností.

Podložní vrstvu tvoří **neogenní jíl**, tuhé až pevné konzistence s nízkou únosností. Polohy neogenních jílu se v zájmovém území nacházejí v hloubkách okolo 9,7 m pod korunou hráze s mocností nad 10 m. Dle [10] je možné, že báze hydrogeologického kolektoru i stropního izolátoru upadá mírně k východu

Hladina podzemní vody je vázána na průlinově propustné písčité štěrky a byla zastižena ustálená v hloubce 2,9 m pod korunou hráze. Hladina podzemní vody je v přímé hydraulické spojitosti s vodou ve vodním toku. Hladina podzemní vody byla zastižena průzkumným jádrovým vrtem JV1, naražená byla v hloubce 5,3 m pod korunou hráze a ustálila se v hloubce 2,9 m. Hladinu podzemní vody v zájmové lokalitě lze hodnotit jako mírně napjatou vázanou na okamžitý vodní stav v Moravě, resp. Baťově kanálu.

Podle práce [10] proudí podzemní voda za nižších vodních stavů v prostoru mezi Moravou a Baťovým kanálem přibližně jižním směrem, v pravobřežním prostoru se proud stáčí jihozápadně k Nové Moravě (Odlehčovacímu kanálu). Při vyšších vodních stavech převažuje proudění od řeky Moravy jihozápadním směrem. Studie [11] uvádí hydraulickou vodivost fluviálních štěrků stanovenou na základě čerpacích zkoušek v šesti hydrogeologických vrtech umístěných v prostoru mezi Baťovým kanálem a Novou Moravou (vzdálenost od zájmové lokality cca 1,0 km). Stanovené hodnoty hydraulické vodivosti jsou v rozmezí  $1,3 \cdot 10^{-3}$  až  $1,5 \cdot 10^{-4}$  m/s. Hodnoty hydraulické vodivosti antropogenních navážek ani neogenních jílových vrstev nebyly v dostupných podkladech k dispozici.

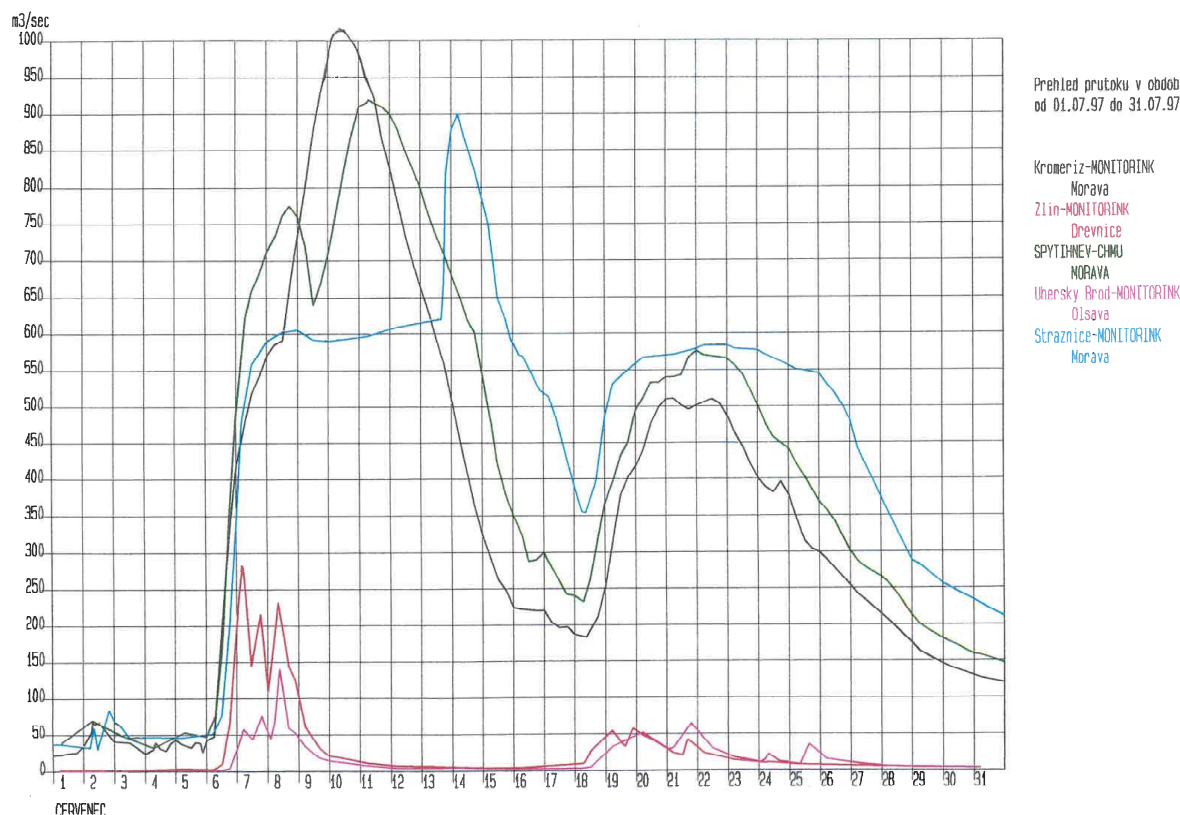
Pro modelové výpočty byly uvažovány následující hodnoty hydraulické vodivosti  $k$ :

- Navážky, nadložní vrstva – vzhledem k popisům materiálů uvedeným v [2] byla s mírnou rezervou uvažována hodnota hydraulické vodivosti  $k = 1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s. S ohledem na řádově nižší propustnost oproti kolektorským štěrkopískům byly tyto materiály považovány za stropní izolátor.
- Pro zvodněné vrstvy fluviálních štěrků byla použita hodnota  $k = 1,5 \cdot 10^{-3}$  m/s.
- Pro neogenní jíly se předpokládá  $k = 1,0 \cdot 10^{-8}$  m/s. Vzhledem k výraznému rozdílu vodivostí zvodně a neogenních vrstev, byla tato považována za nepropustné podloží.

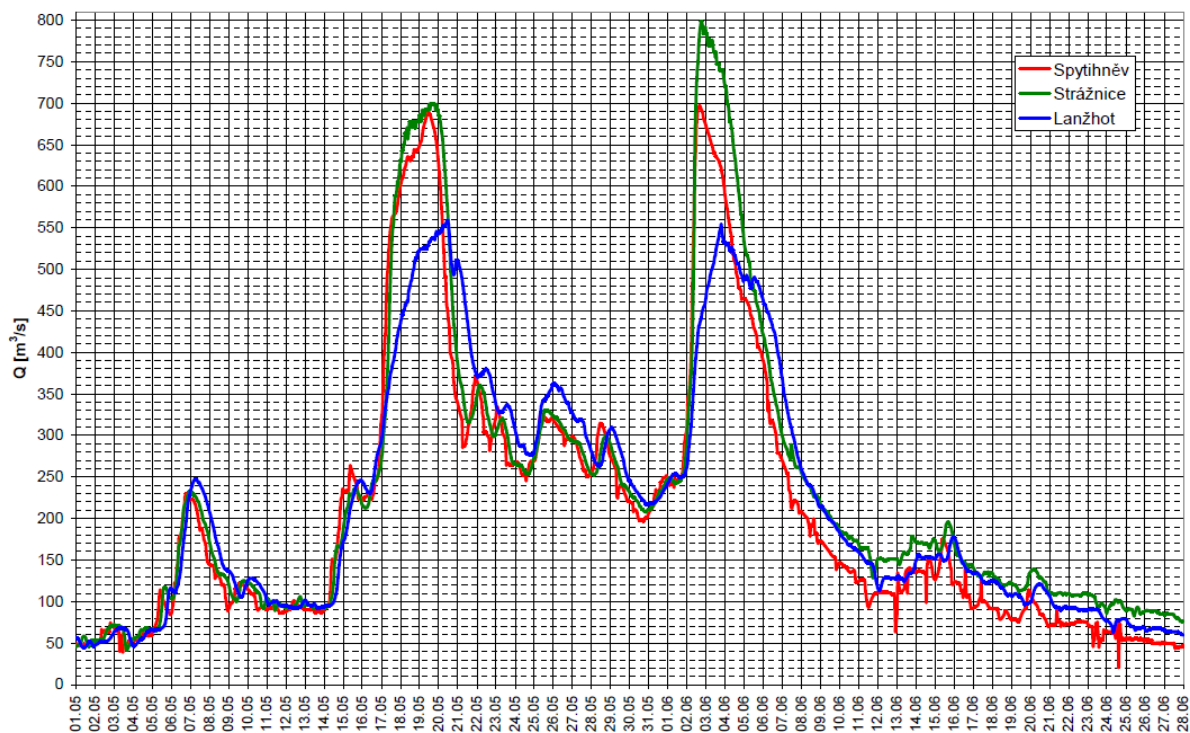
## 4.2 Hydrologické poměry

Zájmové území náleží do povodí Moravy, číslo hydrologického pořadí je 4-13-02-016 dle [6]. Plocha povodí je cca 8958,01 km<sup>2</sup>.

Pro vytvoření představy o průběhu extrémních povodní v řece Moravě jsou na obr. 3 a 4 uvedeny hydrogramy průtoku při povodních v letech 1997 a 2010 dle [12] a [13]. Je vidět, že v předmětné lokalitě trvaly kulminace obou povodňových epizod cca 2 až 4 dny, a to včetně nástupu povodně, kdy začíná sycení hornin v přilehlém hydrogeologického kolektoru.



Obr. 3 Průběh průtoků ve vybraných stanicích na Moravě při povodni v roce 1997 [12]

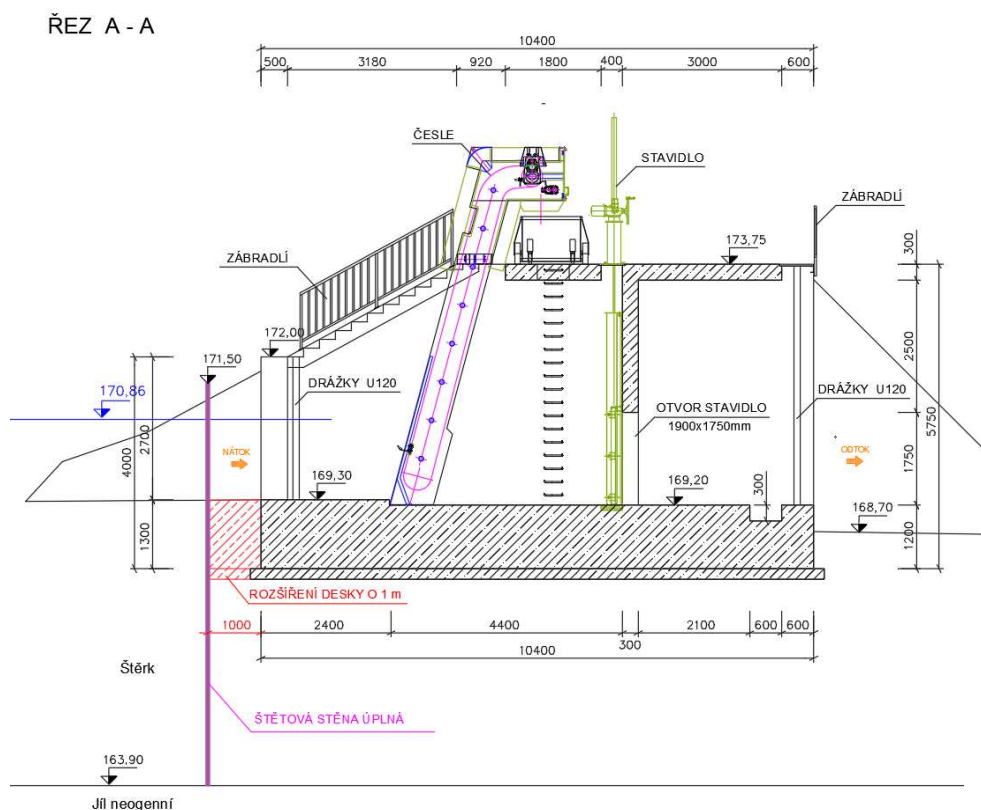


Obr. 4 Průběh průtoků ve vybraných stanicích na Moravě při povodni v roce 2010 [13]



### 4.3 Nápusné stavidlo

Dle [1] je navrženo nápusné stavidlo o dvou samostatných polích se stavidlovými uzávěry a automaticky stíranými česle. Nové stavební konstrukce jsou navrženy jako betonové. Nátokové břehy jsou opevněny kamennou rovnatinou zrna cca 200 kg. Na výtoku je navrženo opevnění svahů kamenným záhozem 120 kg s urovnáním líce a proštěrkováním. Konec nově navrženého opevnění bude navázán na stávající opevnění koryta se stabilizací štětovou stěnou. Výškové poměry respektují původní uspořádání. Objekt bude osazen stavidly s elektropohonem, česlemi strojně stíranými a kontejnery pro uložení shrabků. Řez stavidlem dle [1] je uveden na obr. 5.



**Obr. 5 Podélný řez stavidlem s červeně vyznačenými dohodnutými úpravami [14]**

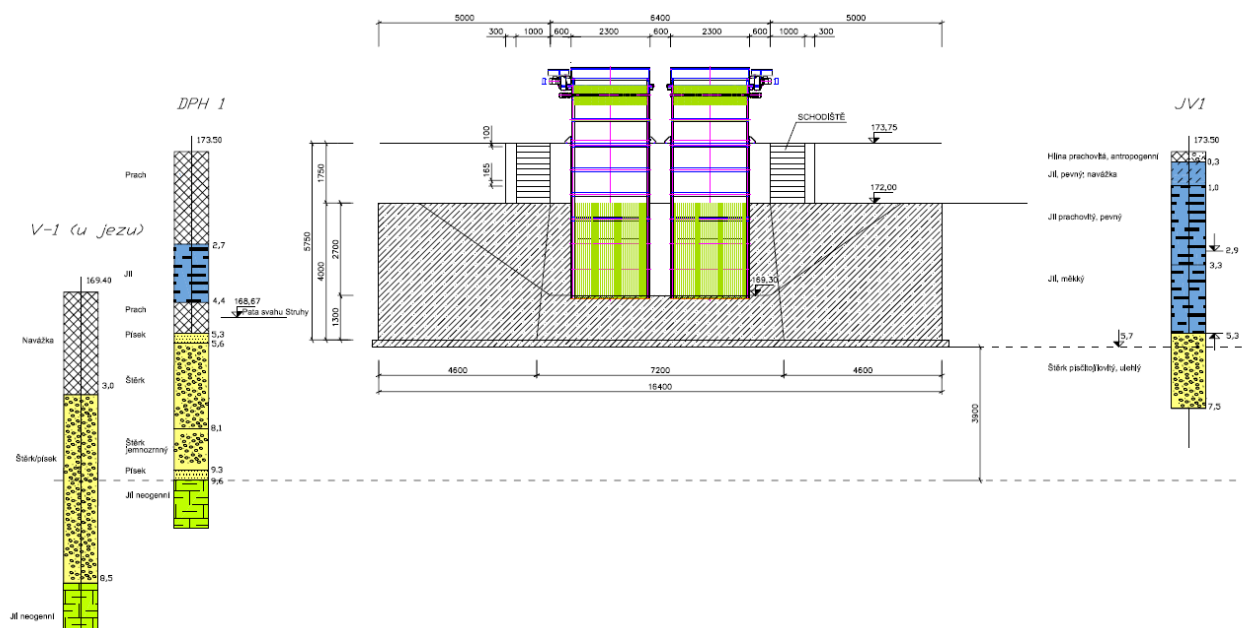
Výškové řešení konstrukce stavidla naznačuje, že bude stavidlo založeno do vysoce propustných štěrkopísků (obr. 6). Je také pravděpodobné, že jak koryto Moravy, Baťova kanálu a také Struhy prořezává stropní izolátor, zejména v místech opevnění záhozem). Hladina v těchto tocích tak tvoří okrajovou podmínku proudění podzemní vody. Tyto skutečnosti vedou k návrhu ochranné stavební jímky.

Nejprve bude pod ochranou stavební jímky (rozsah je předmětem tohoto posouzení) provedeno odstranění stávajícího stavidla včetně česlic a dvou tabulových uzávěrů, které byly vybudovány jako součást plavebního a závlahového kanálu v roce 1942. Stavidlo je o půdorysných rozměrech 10,4 x 7,55 m s průtočným profilem 2 x 1,9 x 1,75 m.

Jímky budou vytvořeny pomocí štětových stěn. Předběžné upřesnění umístění a rozměrů jímek bylo projednáno se zadavatelem práce (Ing. Jakoubek) dne 9. 3. 2019. Na návodní straně bude základová deska stavidlového objektu rozšířena (předsazena) o 1 m (viz obr. 5). Podél jejího vnějšího líce bude vedena štětová stěna, která bude v průběhu výstavby sloužit jako jímka



a také jako ztracené bednění (horní hrana štětovnice bude cca na kótě 171,50 m n. m.). Štětová stěna bude podél navrženého návodního opevnění zatažena do tělesa hráze. Štětovnice na nátokové i výtokové straně objektu budou po skončení výstavby dle potřeby zaříznuty na úroveň povrchu hráze a budou tvořit opěru pro kamenný zához.



**Obr. 5 Objekt stavidla ve srovnání s geologickými podmínkami v lokalitě**

Průsaky do stavební jámy se budou odčerpávat (odhad množství je předmětem této práce). Čerpací jámka se předpokládá v prostoru vývaru za stavidlem. Alternativou je systém čerpaných vrtů snižujících hladinu podzemní vody. Po ukončení výstavby bude jámka odstraněna a místo bude doplněno kamenným záhozem. Výkop stavební jámy pro stavidlo se předběžně předpokládá se sklony svahů 2 : 1.

V průběhu výstavby je nutné zajistit možnost převedení vody do kanálu pod stavidlovým objektem až do průtoku 1 m<sup>3</sup>/s. To má být zajištěno potrubím min. DN900 délky cca 38 m s uzavěry na obou koncích potrubí. Potrubí bude procházet štětovnicovou stěnou a má být vedeno v prostoru jednoho pole stavidlového uzavěru. V případě potřeby lze pomocí manipulace na jezu Veselí nad Moravou dočasně snížit hladinu až o cca 1,0 m.

Výstavba vlastního stavidlového nátoku bude provedena pod ochranou stavební jámy. Po provedení výstavby bude štětová stěna zaříznuta na úroveň upraveného povrchu opevnění hráze a koryta Struhy pod stavidlem. Návodní svah Baťova kanálu v bezprostřední blízkosti stavidla bude po zaříznutí štětové stěny opevněn kamennou rovinou o tloušťce 1,0 m – s provedením pod vodou. V prostoru rejdy na pravém břehu Baťova kanálu bude ponecháno betonové opevnění svahu, v případě poškození výstavbou bude doplněno. Na výtoku od stavidla je navrženo opevnění svahů a dna kamenným záhozem s urovnáním líce a poštěrkováním v tl. 0,8 m. Ve dně bude vytvořen konstrukční vývar hloubky 0,5 m v délce 5 m. Konec nově navrženého opevnění bude navázán na stávající opevnění koryta Struhy.

Zpětný zásyp v prostoru odtěžené části hráze bude proveden po vrstvách max. 0,3 m před zhutněním. Pro hutnění musí být dodržena optimální vlhkost použité zeminy.

Posouzení rozsahu, dispozičního řešení a úrovně založení štětových stěn bylo provedeno pro dva stavy definované zadavatelem. Jednalo se o povodňový stav s hladinou vody v Moravě na úrovni koruny hráze 173,75 m n. m. a s hladinou na odtokové straně stavidla na kótě 170,86 m n. m. Dále bylo provedeno posouzení umístění a hloubky zaražení štětovnic, které budou součástí stavební jámky zajišťující požadovanou ochranu po dobu výstavby. Předpokládá se shodná úroveň hladin z obou stran objektu na kótě 170,86 m n. m. a požadavek na snížení hladiny ve stavební jámě na úroveň 167,50 až 167,30 m n. m., to je 0,3 až 0,5 m pod úroveň základové spáry.

## 5. VLASTNÍ ŘEŠENÍ

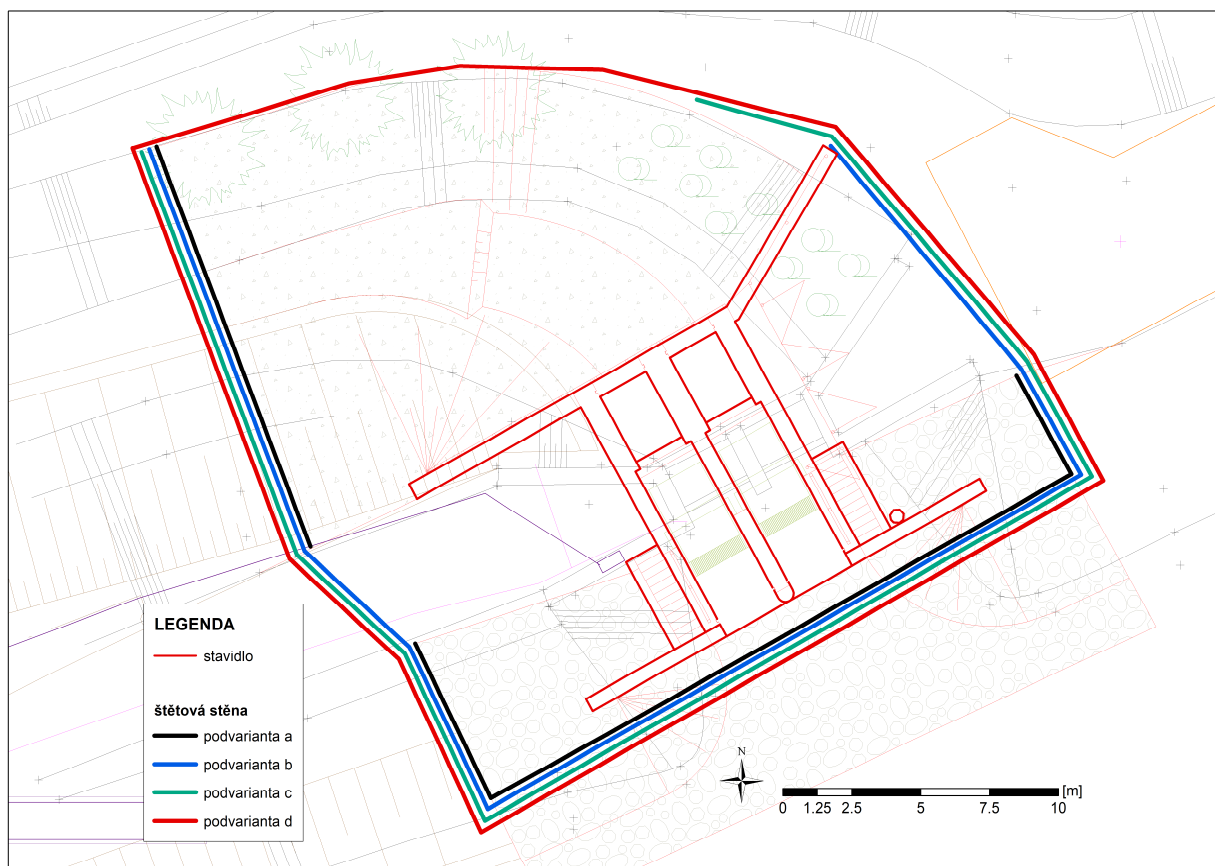
### 5.1 *Postup řešení a hodnocené varianty*

Vlastní řešení spočívalo v hodnocení průsakových poměrů v podloží stavidla, ochranné hráze a bezprostředního okolí. Řešení představovalo:

- předběžné posouzení průsakových poměrů,
- výpočet filtračního proudění 2D modelem v horizontální rovině pro varianty:
  - V1 – stav v průběhu provádění rekonstrukce - hladina v Moravě (Baťově kanálu) na kótě 170,86 m n. m. (koruna OH), v toku Struha za štětovou stěnou na odtokové straně stavidla hladina na kótě 170,86 m n. m., snížení hladiny ve stavební jámě se požaduje na úroveň 167,50 až 167,30 m n. m.
  - V2 - stav v průběhu povodně v řece Moravě - hladina v Moravě (Baťově kanálu) na kótě 173,75 m n. m. (koruna OH), hladina na odtokové straně stavidla na kótě 170,86 m n. m.,
- výpočet filtračního proudění 2D modelem ve vertikální rovině pro nejnepříznivější variantu zjištěnou modelem horizontálního proudění, a to podél jihozápadní strany štětové stěny.

Každá z variant řešení v horizontální rovině obsahuje několik „mezivariant“, které zohledňují různý rozsah těsnicí štětovnicové stěny (obr. 7):

- a.** Štětová stěna na návodní straně konstrukce stavidla bude vedena cca 1 m před původně uvažovaným betonovým nátokem (obr. 5) v kombinaci s původně uvažovanou (dle [1]) štětovou stěnou na Struze na povodní straně stavidla. Stěny nejsou vzájemně navázány.
- b.** Štětová stěna na návodní straně stavidla bude vedena cca 1 m před původně uvažovaným betonovým nátokem. Na levé straně stavidla bude návodní štětová stěna souvisle navazovat na původně uvažovanou štětovou stěnu na Struze na povodní straně stavidla. Na pravé straně stavidla je štětová stěna ukončena na úrovni pravého povodního zavazovacího křídla stavidla
- c.** Štětová stěna na návodní straně stavidla bude vedena cca 1 m před původně uvažovaným betonovým nátokem. Na levé straně stavidla bude návodní štětová stěna souvisle navazovat na původně uvažovanou štětovou stěnu na Struze na povodní straně stavidla. Na pravé straně stavidla je štětová stěna prodloužena cca 4 m za povodní zavazovací křídlo stavidla.
- d.** Štětová stěna je vedena po celém obvodu stavební jámy – souvisle ji uzavírá.



**Obr. 7 Situace stavidla s vyznačenými podvariantami rozsahu štětové stěny**

Grafické výstupy jsou uvedeny v přílohách 2 až 7. Přitom varianty V1a a V1d nejsou přiloženy. U varianty V1a se nepodařilo díky značným přítokům do stavební jámy rozumným způsobem snížit hladinu podzemní vody na požadovanou úroveň, u varianty V2d čerpané množství závisí na propustnosti štětové stěny, kterou nelze spolehlivěji modelově hodnotit.

## **5.2 Předběžné posouzení průsakových poměrů**

Předběžné posouzení průsakových poměrů bylo provedeno na základě vyhodnocení archivních a průzkumných prací a také rozboru doby trvání povodňových stavů (kapitola 4.2).

Hydrogeologický kolektor je v daném území tvořen vrstvy propustných fluvialních štěrků mocností kolem 5 m [2], [3], [10], [11]. Ty jsou na dolní straně omezeny bazálním izolátorem (neogenní jíly), shora pak na většině plochy stropním izolátorem tvořeným relativně nepropustným souborem holocénních hlín a navážek (těleso hráze). Řeka Morava, plavební kanál i meliorační kanály stropní izolátor ve většině případů prořezávají, podzemní vody v hydrogeologickém kolektoru tak přímo komunikují s vodou v povrchových tocích.

Při zvýšených vodních v Moravě v průběhu povodňových epizod dochází k intenzivnějšímu proudění podzemní vody směrem od Bařova kanálu do Struhy, resp. do vzdálenější Dlouhé řeky, které částečně drénují napjatou zvědeň. Tento předpoklad posouvá výsledky řešení mírně na bezpečnou stranu.

Rychlost propagace zvýšené hladiny v toku do hydrogeologického kolektoru je vzhledem k vysoké propustnosti materiálu a napjatému režimu značná. Při tomto stavu je základová spára

objektu stavidla vystavena přetlaku vody v hydrogeologickém kolektoru s hrozbou ztráty celkové stability objektu. Současně může dojít v důsledku zvýšených piezometrických výšek v propustném podloží k vysakování vody v prostoru za stavidlem.

Za zmínku stojí, že dle dostupné dokumentace [4], [5] jsou přilehlé objekty (jez, plavební komora) opatřeny po svém obvodu štětovými stěnami.

## 5.3 Modelové řešení

### 5.3.1 Předpoklady použité při řešení

Při řešení byly použity tyto další předpoklady:

- Problém byl nejprve řešen za předpokladu 2D horizontálního proudění podzemní vody v souřadné soustavě  $(x, y)$  [7].
- Náhradní oblast je na jihovýchodní straně vymezena dnem koryta Baťova kanálu, na jihozápadní straně pak linií ve směru průsaku vedenou kolmo na osu ochranné hráze mezi Baťovým kanálem a Struhou ve vzdálenosti cca 50 m od osy stavidla. Severovýchodní a severní okraj náhradní oblasti je veden cca 40 až 60 m od stavidla ve směru proudění vody z Baťova kanálu, resp. Moravy směrem ke Struze a výustní trati Dlouhé řeky do Struhy.
- Podloží ochranné hráze a objektu stavidla je uvažováno jako homogenní s hydraulickou vodivostí  $k = 1,5 \cdot 10^{-3}$  m/s.
- Pro zajištění stavební jámy při rekonstrukci a pro zajištění filtrační stability podloží i samotné konstrukce při povodních v Moravě je navrženo prostor stavidla zajímkovat štětovými stěnami. Všechny štětové stěny budou provedeny jako **dokonalé – budou sahat až na relativně nepropustný neogenní jílovitý bazální izolátor**. Variantně uvažovaný rozsah štětové stěny je uveden v kapitole 5.1 (obr. 7).
- V místě štětových stěn byla uvažována velmi malá hydraulická vodivost uvažovaná hodnotou  $k = 10^{-8}$  m/s.
- Okrajové podmínky
  - 1. druhu (Dirichletovy) byly uvažovány následovně:
    - V1 (výstavba) – hladina v Moravě a ve Struze za povodní štětovou stěnou je na kótě 170,86 m n. m.,
    - V2 (stav v průběhu povodně) – hladina v Moravě na kótě 173,75 m n. m. (koruna OH), kóta na odtokové straně stavidla na kótě 170,86 m n. m.,
  - V obou variantách byla na JZ a SV (S) hranici uvažována okrajová podmínka 2. druhu (Neumannova) [7].
- Pro povodňový stav (V2) byl kolmo na osu hráze podél levé (JZ) štětové stěny proveden výpočet modelem vertikálního proudění v souřadné soustavě  $(x, z)$  [7].

### 5.3.2 Numerické řešení

Numerické řešení bylo provedeno metodou konečných prvků s využitím čtyřbodových izoparametrických prvků s bilineární interpolací piezometrické výšky po prvcích dělení.

Výsledky řešení jsou ve formě izolinií piezometrické výšky pro jednotlivé varianty zobrazeny v přílohách 2 až 8.

### 5.3.3 Vlastní řešení a jeho výsledky

Pro variantu V1 (provádění stavby) bylo na povodní straně stavidlového objektu v prostoru nad štětovicovou jímkou umístěno místo čerpání vod prosáklých do stavební jámy. Čerpané množství bylo hledáno zkusmo s cílem snížit hladinu podzemní vody v místě založení základové desky stavidla pod úroveň 167,50 až 167,30 m n. m. tak, aby bylo umožněno zakládání „v suchu“. Řešení ukázalo, že z hlediska uspořádání a rozsahu stavební jímky je tato varianta kritická. V případě rozsahu štětové stěny dle varianty V1a (kapitola 5.2) se čerpáním v prostoru pod stavidlem nepodařilo snížit hladinu podzemní vody na požadovanou úroveň. Rovněž ve variantě V1b výpočet ukázal, že by čerpání muselo být provedeno ze 4 vrtů umístěných rovnoměrně ve stavební jámě (příloha 2), resp. po jejím obvodě, čerpané množství je v řádu cca 60 l/s. Uspořádání V1c pak vykazuje příznivější stav, čerpání by probíhalo opět ze 4 míst (jímky, obvodové vrtu) s tím, že čerpané množství dosáhne cca 50 až 55 l/s podle konkrétního umístění čerpaných míst. I v příznivější variantě V1c byla **překročena kritéria filtrační stability** v místech čerpání:

- Množství čerpané z jedné studny – až 15 l/s.
- Uvažovaný průměr vrtu – 0,2 m.
- Průtočná plocha – cca 2 m<sup>3</sup>.
- Skutečný specifický průsak – 0,0075 m<sup>2</sup>/s.
- Přípustný specifický průsak (mírnější požadavek pro dočasná zařízení dle Sichardta) – 0,0025 m<sup>2</sup>/s.

#### **Uvedený závěr vede k doporučení uzavřené štětové stěny po celém obvodě stavební jámy**

Pro variantu V2 (povodňový stav) byly řešeny všechny podvarianty dle kapitoly 5.1. Předmětem hodnocení bylo jednak stanovení tlaků podzemní vody na základovou spáru, jednak hydraulických gradientů v místě vysakování vody na povodní straně stavidla.

Piezometrické úrovně odpovídající jednotlivým rozsahům štětové stěny jsou patrné z příloh 4 až 7. V případě variant V2a, resp. V2b vychází tlaky na základovou spáru, které odpovídají úrovním až 172,2 m n. m., resp. 171,20 m n. m., tj. tlak odpovídající 44, resp. 34 kPa. Tyto vztlaky budou nicméně při povodňových stavech kompenzovány tlakem vody na návodní straně stavidla.

Filtrační stabilita byla hodnocena porovnáním dosažených středních a lokálních hydraulických gradientů  $J_k^Q$  s jejich přípustnými hodnotami  $J_{K,k}$ .

- Střední hydraulický gradient dosahuje největší hodnoty podél JV štětové stěny. Celkovou stabilitu konstrukce v tomto místě vůči porušení účinkem průsaků lze hodnotit prostřednictvím středních přípustných hydraulických gradientů [14]:

$$\gamma_1 \gamma_{fJ} J_k^Q \leq \frac{J_{K,k}}{\gamma_{M,J}}, \quad (1)$$

kde  $\gamma_1 = 1,0$  je součinitel významu,  $\gamma_{fJ} = 1,1$  je dílčí součinitel vyjadřující nejistoty při stanovení středního hydraulického gradientu  $J_k^Q$  vyvolaného prouděním vody v zemině,  $\gamma_{M,J} = 1,5$  je dílčí součinitel vyjadřující nejistotu při stanovení kritického hydraulického gradientu  $J_{K,k}$ . Charakteristická hodnota lokálního hydraulického gradientu  $J_k^Q$  se stanovila jako poměr výšky hladiny nad místem vysakování při patě hráze  $H$  a délky  $L$  průsakové cesty  $J_k^Q = H/L = 0,27$ .

Podložním materiálem jsou dle [2] písčité štěrky zatříděné jako štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy G-F (G3, G-F), resp. štěrk jílovitý GC (G5, GC). V souladu s [14] lze charakteristickou hodnotu středního kritického hydraulického gradientu uvažovat hodnotou  $J_{K,k} = 0,48$ . Ze vztahu (1) vyplývá:

$$J_k^Q \leq 0,29. \quad (2)$$

Výše uvedené výsledky ukazují, že **konstrukce ochranné hráze splňuje požadovanou bezpečnost na vznik privilegované průsakové cesty (nicméně bez větší rezervy).**

Lokální hydraulický gradient podél JZ štětové stěny byl odvozen modelem proudění ve vertikální rovině (příloha 8). Pro posouzení byl použit vztah (1), kde  $\gamma_1 = 1,0$  je součinitel významu,  $\gamma_{fj} = 1,1$  je dílčí součinitel vyjadřující nejistoty při stanovení lokálního hydraulického gradientu  $J_k^Q$  vyvolaného prouděním vody v zemině,  $\gamma_{M,J} = 1,5$  je dílčí součinitel vyjadřující nejistotu při stanovení místního kritického hydraulického gradientu  $J_{K,k}$ . Charakteristická hodnota lokálního hydraulického gradientu  $J_k^Q = 0,33$  se stanovila z výsledků modelového výpočtu (příloha 8). S přihlédnutím k [14] a měřením dle [16] doplněných vlastním výzkumem [17] lze charakteristickou hodnotu středního kritického hydraulického gradientu uvažovat hodnotou  $J_{K,k} = 0,60$ . Ze vztahu (1) pak vyplývá:

$$J_k^Q \leq 0,36. \quad (3)$$

Je zřejmé, že **konstrukce ochranné hráze splňuje prakticky bez rezervy požadovanou bezpečnost vůči lokální filtrační deformaci vnější sufozí, resp. ztekucením.**

V obou případech lze očekávat, že bezpečnost mírnělepší očekávaná kolmatace pravého břehu Baťova kanálu, která sníží jak střední, tak lokální hydraulický gradient v ochranné hrázi.

## 6. ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Při hodnocení průsakového režimu při povodňové situaci byla zohledněna možnost relativně dlouhé doby trvání návrhové povodňové vlny. Na základě zkušeností z lokalit s převážně napjatým režimem proudění podzemní vody lze očekávat, že by již při 2denním zvýšení vodních stavů v Moravě došlo k výraznému nastoupení hladiny podzemní vody ve vrstvě propustných štěrků. Při hodnocení vycházíme z filozofie, že hráz nesmí být porušena průsakovou erozí před jejím přelitím. Proto se na návodní straně hráze uvažuje při povodni hladina v Baťově kanálu na úrovni koruny hráze.

Výsledky hydraulických výpočtů vedou k následujícím závěrům a doporučením:

- Kritická je varianta V1 - provádění stavby. Ukazuje se, že v případě neuzavřené jímky lze jen obtížně dosáhnout požadovaného snížení vody ve stavební jámě za cenu značného čerpání. Přitom jsou významně překročena kritéria filtrační stability na plášti odvodňovacích studní. To vede k **doporučení uzavřené stavební jímky s jejím ponecháním i v běžném provozu.** Celkový maximální průsak do stavební jámy při úplném zajímkování odhadujeme na jednotlivé l/s.
- V případě varianty V2 je kritickým průsak v profilu podél jihozápadní štětové stěny, kde je nejkratší průsaková dráha mezi Baťovým kanálem a Struhou. I když se obecně zarážením štětovnic okolní prostředí zhutňuje, existuje obava, že při vibracích v průběhu zarážení (zatlačení) štětovnic může dojít k místnímu porušení struktury okolního materiálu, lokální segregaci materiálu a ke vzniku oslabených zón přispívajících ke vzniku privilegované



průsakové dráhy. Proto doporučujeme **přerušit možnou průsakovou dráhu na jihozápadní straně štětové stěny křídlem délky cca 1,5 m vedeným kolmo ke štětové stěně** (obr. 8). To může být tvořeno štětovnicemi zaraženými v průběhu budování stavební jímky.

- Zkušenost ukazuje, že v případě i minimálního oddělení návodní štětové stěny od předpolí základové desky stavidla (podél jihovýchodní linie štětové stěny) může dojít k nežádoucímu průsaku a nárůstu piezometrické výšky pod základovou spáru. Doporučujeme **propojit návodní štětovou stěnou výztuží s betonovým předpolím betonové desky**.
- Jako námět doporučujeme zvážit napájení Struhy po dobu výstavby zprovozněním Dlouhé řeky – převáděním vody shybkou u jezu na Nové řece v Uherském Ostrohu. Převádění vody do Struhy přes stavební jímku může působit omezení během výstavby a její komplikaci.

V Brně, duben 2019

Prof. Ing. Jaromír Říha, CSc.

## 7. PŘÍLOHY

1. Umístění stavidla s vyznačením konečného návrhu stavební jímky
2. Izolinie piezometrické výšky - Varianta V1b
3. Izolinie piezometrické výšky - Varianta V1c
4. Izolinie piezometrické výšky - Varianta V2a
5. Izolinie piezometrické výšky - Varianta V2b
6. Izolinie piezometrické výšky - Varianta V2c
7. Izolinie piezometrické výšky - Varianta V2d
8. Izolinie piezometrické výšky – svislý řez