

# HYDRAULICKÉ POSOUZENÍ PROPUSTKŮ

**Ing. Pavel Balvín**

**Doc. Ing. Aleš Havlík CSc.**

**Bc. Petra Jurečková**

**Ing. Tomáš Pícek Ph.D.**

**Ing. Michael Trnka CSc.**

## I) Cíl metodiky

Cílem metodiky je usnadnit návrh propustků, jejichž účelem je převádění vody přes tělesa silničních a železničních staveb. Hlavním důvodem je předložení přístupu, který umožní vyhovující popis hydraulické funkce propustků pro různé režimy proudění a v důsledku povede k racionálnímu návrh rozměrů a technického řešení.

## II) Popis metodiky

Proudění propustky je po hydraulické stránce velmi komplikované, lze se setkat s řadou zcela odlišných průběhů hladin. Pro proudění propustky jsou důležité 3 jevy: ztráta mechanické energie na vtoku do propustku, kde dochází k zúžení proudu, ztráta mechanické energie při nerovnoměrném proudění v propustku s případnou další ztrátou mechanické energie při vzniku vodního skoku a nakonec místní ztráta energie rozšířením proudu na výtoku.

Ve vstupním profilu se setkáváme s volným nebo zatopeným čelem. Proudění ve vlastním propustku může být tlakové nebo s volnou hladinou, jeho průběh zpravidla ovlivňuje proudění ve vtokové části. Tlakové proudění se může vyskytovat v celé délce propustku nebo jen v části, při proudění s volnou hladinou může být proudění v říčním nebo bystřinném režimu. Pokud se vyskytnou oba režimy, je třeba počítat s jevy, které změnu režimu doprovázejí, tedy výskyt buď kritické hloubky, nebo vodního skoku. Na výtoku z propustku se při tlakovém proudění objevuje zatopené nebo nezatopené dolní čelo propustku, při proudění s volnou hladinou zaleží na průběhu a charakteru proudění v korytě pod propustkem. Z tohoto výčtu vyplývá, že může vzniknout celá řada zcela odlišných scénářů.

## III) Nové poznatky oproti starším metodikám a výpočetním postupům

Stávající postupy a metodiky řešili jednotlivé problémy samostatnými výpočetními postupy. Tyto postupy v některých případech na sebe nenavazovaly. Důsledkem byla často nespojitá řešení, kdy při přechodu z jednoho režimu do druhého přinášely výsledky řešení skokové změny průběhu vzduté hladiny před vtokem do propustku.

Stávající výpočetní postupy pracovaly s některými hodnotami, které nebyly odvozeny či změřeny speciálně pro objekty propustku. Jednalo se například o součinitel místní ztráty na vtoku do propustku, kde byly doposud mechanicky přejímány hodnoty součinitele místní ztráty na vtoku z tabulek pro vtok z volné nádrže do potrubí bez posouzení toho, zda se v propustku jedná o proudění s volnou hladinou nebo tlakové, i toho, že dno propustku leží zpravidla ve stejné úrovni jako dno přítokového koryta.

Tato nová metodika si klade za cíl navrhnout nové výpočetní postupy tak, aby výsledkem řešení byl spojitý průběh závislosti vzduté hladiny před propustkem na průtoku, což je zpravidla zásadní závislost potřebná pro návrh konstrukce objektu křížení s komunikacemi tak, aby byly splněny náležitosti jiných norem a právních předpisů.

Kromě matematického popisu podstaty fyzikálních jevů prezentuje metodika hodnoty potřebných koeficientů, zejména součinitelů místních ztrát, které byly odvozeny na základě fyzikálního a matematického modelování provedeného speciálně pro potřeby hydraulické

funkce propustků v rámci řešení projektu TA04030373 Zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti propustků s ohledem převádění povodňových průtoků.

Metodika se rovněž zabývá problematikou bezpečné funkce propustků zejména za povodňových situací, kdy může být vodním proudem unášeno velké množství splavenin a spláví, které mohou způsobit částečné nebo úplné zanesení vstupního profilu a v důsledku i vážné poškození objektu propustku i tělesa příslušné komunikace. Součástí jsou proto návrhy technických řešení, která by měla zabránit tomuto negativnímu jevu.

#### **IV) Popis uplatnění certifikované metodiky, informace pro koho je určena a jakým způsobem bude uplatněna**

Metodika je určena projektantům, kteří se zabývají výstavbou a rekonstrukcemi silnic a dálnic nebo železničních tratí a infrastruktury. Nabízí velký potenciál uplatnění zejména v souvislosti s významně zvýšeným výskytem extrémních povodní v posledních 20 letech, které jsou pravděpodobně již důsledkem uvažovaných klimatických změn. Významné povodňové škody se vyskytovaly právě na objektech křížení vodních toků s různými komunikacemi.

Tento materiál umožní navrhování propustků, které zabezpečí bezpečné převedení vody v souladu s aktuálními předpisy, především normou ČSN 73 6201.

Zúčastněným nabídne vzorové komplexní řešení hydraulické funkce pro různé scénáře průběhu hladiny na vyřešených příkladech.

#### **V) Ekonomické aspekty - vyčíslení nákladů na zavedení postupů uvedených v metodice a vyčíslení ekonomického přínosu pro uživatele**

Metodika není závazná, nedává nikomu povinnost se uvedenými postupy striktně řídit. Postupy návrhu propustku a jeho hydraulické posouzení mohou být využity v procesu přípravy realizace stavby, a to především v období projektové přípravy. Metodika slouží především projektantům, kterým předkládá nově získané poznatky z pohledu bezpečného převedení povodňových průtoků propustky, za předpokladu použití ověřeného výpočetního postupu.

Náklady na zavedení postupů v metodice uvedených nepřevyšují přímé ekonomické přínosy pro uživatele. Jedním z prostředků ekonomického přínosu metodiky je využití inovativního postupu výpočtu.

Přímé vyčíslení nákladů na zavedení metodiky není přímo možné a ani relevantní, protože je určena pro širší spektrum aplikací a její ekonomická efektivnost je odvislá od místních poměrů. Propustky jsou svými náklady v poměru s celkovými náklady na např. 1 km pozemní komunikace nebo železnice zanedbatelné. Nicméně, nevhodně provedený návrh propustku, jehož náklady jsou relativně nízké, pak v konečném důsledku může způsobit škody mnohonásobně vyšší pohybující se v desítkách až stovkách mil. korun.

## **VI) Seznam použité literatury**

ČSN 73 6201 *Projektování mostních objektů*, ČNI, 2008.

TP 232 *Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích*, VÚV, 2009.

TP 204 *Propustky a mosty malých rozpětí*, Divyp Brno, VÚV, 2012.

Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C.: *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*, SNTL Praha, 1968.

Čábelka, J., Gabriel, P.: *Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice – výzkum na hydraulických modelech a ve skutečnosti, díl I.*, Academia, Praha, 1987.

Šulc, J., Jandora, J.: *Hydraulika, Modul 01*, AN CERM, 2006.

U. S. Army Corps of Engineers (USACE): *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels*, 1983.

U. S. Army Corps of Engineers (USACE): *Hydraulic Design of Highway Culverts*, 1985.

Havlík, V., Marešová, I.: *Hydraulika - Příklady*, skripta ČVUT, Praha, 1997.

Kunštátský, J.: *Hydraulické výpočty propustků a mostů*, SNTL, Praha, 1956.

## **VII) Seznam publikací, které předcházely metodice a byly publikovány**

TP 232 *Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích*, VÚV, 2009

TP 204 *Propustky a mosty malých rozpětí*, Divyp Brno, VÚV, 2012

Picek, T., Havlík, A., Mattas, D., Mareš, K. (2007). *Hydraulic Calculation of Bridges at High Water Stages. Journal of Hydraulic Research* 45(3), 400-406 (IF 1,762)

Picek, T., Havlík, A. (2008). *Calculation of discharge above entirely submerged bridge deck - Application of weir equation. Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 56(2), 82-87 (IF 1,486)

Balvín, P. (2011). *Navrhování převedení povodňových průtoků*, Časopis stavebnictví, 2011, s. 50-53, ISSN 1802-2030

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>8</b>
1.1	CÍLE A PŘEDMĚT METODIKY	8
1.2	HYDRAULICKÁ FUNKCE PROPUSTKŮ	8
<b>2</b>	<b>ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ TYPY PROPUSTKŮ</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>NÁVRHOVÝ PRŮTOK A ZPŮSOB JEHO STANOVENÍ</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>VÝPOČET PROUDĚNÍ PROPUSTKEM</b>	<b>13</b>
4.1	VÝPOČET VZDUTÉ HLOUBKY PŘED PROPUSTKEM	14
4.2	PODMÍNKA ZATOPENÍ VTOKU DO PROPUSTKU	16
4.3	MÍSTNÍ ZTRÁTA NA VTOKU	17
	HODNOTY SOUČiniteLE CELKOVÉ MÍSTNÍ ZTRÁTY NA VTOKU V TABULCE 4.4 ODPOVÍDAJÍ POMĚRU $yH/H=2,5$ , COŽ JE U ČTVERCOVÉHO A OBDĚLNÍKOVÉHO PRŮŘEZU MOŽNO POVAŽOVAT ZA DOSTATEČNOU MÍRU ZATOPENÍ.	21
4.4	ANALÝZA PROUDĚNÍ ZA VTOKEM DO PROPUSTKU PŘI PROUDĚNÍ S VOLNOU HLADINOU	22
4.4.1	KRUHOVÉ PROPUSTKY	22
4.4.2	ČTVERCOVÉ A OBDĚLNÍKOVÉ PROPUSTKY	31
4.5	NEROVNOMĚRNÉ USTÁLENÉ PROUDĚNÍ V PROPUSTKU S VOLNOU HLADINOU	35
4.6	STANOVENÍ POLOHY VODNÍHO SKOKU V PROPUSTKU	39
4.7	ZTRÁTY TŘENÍM PŘI TLAKOVÉM PROUDĚNÍ V PROPUSTKU	40
4.8	PODMÍNKA ZATOPENÍ DOLNÍHO ČELA PROPUSTKU	42
4.9	MÍSTNÍ ZTRÁTA NA VÝTOKU Z PROPUSTKU	44
4.10	PODMÍNKY TLAKOVÉHO PROUDĚNÍ	46
<b>5</b>	<b>DŮLEŽITÉ POZNATKY Z VÝZKUMU</b>	<b>47</b>
5.1	VÝPOČET PRŮBĚHU HLADIN V PROPUSTKU METODOU PO ÚSECÍCH	47
5.2	KOLÍSÁNÍ A ZMĚNA REŽIMŮ PROUDĚNÍ V PODÉLNÉM PROFILU PROPUSTKU	47
5.3	STANOVENÍ SOUČiniteLE MÍSTNÍ ZTRÁTY NA VTOKU PRO VÍCENÁSOBNÉ PROPUSTKY	48
5.4	STANOVENÍ SOUČiniteLE MÍSTNÍ ZTRÁTY NA VTOKU PRO PROPUSTKY S PŘÍTOKEM VODY POD OSTRÝM ÚHLEM	49
5.5	OMEZENÍ PRO VYUŽITÍ PŘEDSAZENÉHO VTOKU DO PROPUSTKU	50
5.6	VYUŽITÍ OPATŘENÍ PRO ZACHYTÁVÁNÍ SPLÁVÍ	51
<b>6</b>	<b>VZOROVÉ PŘÍKLADY</b>	<b>52</b>
6.1	KRUHOVÝ PROPUSTEK S KOLMÝM ČELEM PŘI PROUDĚNÍ S VOLNOU HLADINOU	52
6.2	KRUHOVÝ PROPUSTEK S HYDRAULICKY ROZŠÍŘENÝM NÁTOKEM PŘI PROUDĚNÍ S VOLNOU HLADINOU	54
6.3	KRUHOVÝ PROPUSTEK S TLAKOVÝM REŽIMEM SE ZATOPENÝM VÝTOKEM	56
<b>7</b>	<b>TLUMENÍ KINETICKÉ ENERGIE POD PROPUSTKEM</b>	<b>59</b>
7.1	TLUMENÍ ENERGIE NA VÝTOKU POMOCÍ VÝVARU	61
7.2	TLUMENÍ ENERGIE NA VÝTOKU POMOCÍ STUPNĚ VE DNĚ	64
<b>8</b>	<b>OPATŘENÍ K ZAMEZENÍ UCPÁNÍ VTOKU DO PROPUSTKU SPLÁVÍM</b>	<b>65</b>

<b>10 PŘÍLOHY</b>	<b>69</b>
<b>10.1 PŘÍLOHA A - NÁSTROJ PRO NÁVRH PROPUSTKU</b>	<b>69</b>
10.1.1 PŘÍLOHA A1 - NÁVRHOVÉ VELIČINY	69
10.1.2 PŘÍLOHA A2 - VÝPOČET HLADIN	74

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- OBR. 2.1 PROPUSTEK S ROVNÝM ČELEM A PŘEDSAZENÝM VTOKEM
- OBR. 2.2 PROPUSTEK S ŠIKMÝM ČELEM A HYDRAULICKY ROZŠÍŘENÝM NÁTOKEM
- OBR. 4.1 NÁZVY A UMÍSTĚNÍ PŘÍČNÝCH PROFILŮ V PODÉLNÉM ŘEZU PROPUSTKEM
- OBR. 4.2 PRŮBĚHY HLADIN NA VTOKU DO PROPUSTKU V PŘÍPADĚ PROUDĚNÍ V PROPUSTKU S VOLNOU HLADINOU
- OBR. 4.3 PRŮBĚHY HLADIN V PŘÍPADĚ ZAHLCENÉHO A NEZAHLCENÉHO VTOKU DO PROPUSTKU
- OBR. 4.4 ZÚŽENÍ A ROZŠÍŘENÍ PROUDU PŘI VTOKU DO PROPUSTKU PŘI TLAKOVÉM PROUDĚNÍ
- OBR. 4.5 ZÚŽENÍ PROUDU ZA VTOKEM DO PROPUSTKU V PŘÍPADĚ PROUDĚNÍ V PROPUSTKU S VOLNOU HLADINOU
- OBR. 4.6 VIZUALIZACE PROSTOROVÉHO PRŮBĚHU HLADINY [MM] ZA VTOKEM DO PROPUSTKU
- OBR. 4.7 PRŮBĚHY HLADIN [MM] V JEDNOM Z PROFILŮ ZA VTOKEM PRO VYBRANÉ PRŮTOKY
- OBR. 4.8 GRAF PRO STANOVENÍ ZÚŽENÉ HLOUBKY YC ZA VTOKEM DO KRUHOVÉHO PROPUSTKU S KOLMÝM ČELEM V ZÁVISLOSTI NA PRŮTOKU Q A PRŮMĚRU PROPUSTKU D
- OBR. 4.9 GRAF PRO STANOVENÍ ZÚŽENÉ HLOUBKY YC ZA VTOKEM DO KRUHOVÉHO PROPUSTKU S HYDRAULICKY ROZŠÍŘENÝM NÁTOKEM V ZÁVISLOSTI NA PRŮTOKU Q A PRŮMĚRU PROPUSTKU D
- OBR. 4.10 GRAF PRO STANOVENÍ ZÚŽENÉ HLOUBKY YC ZA VTOKEM DO KRUHOVÉHO PROPUSTKU S ŠIKMÝM ČELEM V ZÁVISLOSTI NA PRŮTOKU Q A PRŮMĚRU PROPUSTKU D
- OBR. 4.11 GRAF PRO STANOVENÍ ZÚŽENÉ HLOUBKY YC ZA VTOKEM DO KRUHOVÉHO PROPUSTKU S PŘEDSAZENÝM VTOKEM V ZÁVISLOSTI NA PRŮTOKU Q A PRŮMĚRU PROPUSTKU D
- OBR. 4.12 GRAF ZÁVISLOSTI POMĚRŮ VZÁJEMNÝCH HLOUBEK VODNÍHO SKOKU Y1/Y2 NA PRŮTOKU Q A PRŮMĚRU POTRUBÍ D PRO KRUHOVÝ PROFIL
- OBR. 4.13 GRAF PRO STANOVENÍ DRUHÉ VZÁJEMNÉ HLOUBKY VODNÍHO SKOKU Y2 V KRUHOVÉM PROPUSTKU S KOLMÝM ČELEM V ZÁVISLOSTI NA PRVNÍ VZÁJEMNÉ HLOUBCE Y1
- OBR. 4.14 GRAF PRO STANOVENÍ DRUHÉ VZÁJEMNÉ HLOUBKY VODNÍHO SKOKU Y2 V KRUHOVÉM PROPUSTKU S HYDRAULICKY ROZŠÍŘENÝM NÁTOKEM V ZÁVISLOSTI NA PRVNÍ VZÁJEMNÉ HLOUBCE Y1
- OBR. 4.15 GRAF PRO STANOVENÍ DRUHÉ VZÁJEMNÉ HLOUBKY VODNÍHO SKOKU Y2 V KRUHOVÉM PROPUSTKU S ŠIKMÝM ČELEM V ZÁVISLOSTI NA PRVNÍ VZÁJEMNÉ HLOUBCE Y1
- OBR. 4.16 GRAF PRO STANOVENÍ DRUHÉ VZÁJEMNÉ HLOUBKY VODNÍHO SKOKU Y2 KRUHOVÉHO PROPUSTKU S PŘEDSAZENÝM VTOKEM V ZÁVISLOSTI NA PRVNÍ VZÁJEMNÉ HLOUBCE Y1
- OBR. 4.17 GRAF PRO STANOVENÍ HLOUBKY YB ZA VTOKEM DO PROPUSTKU PRO KRUHOVÝ PROPUSTEK S ROVNÝM ČELEM V PŘÍPADĚ OVLIVNĚNÍ PROUDĚNÍ DOLNÍ VODOU V PROPUSTKU
- OBR. 4.18 GRAF PRO STANOVENÍ HLOUBKY YB ZA VTOKEM DO PROPUSTKU PRO KRUHOVÝ PROPUSTEK S HYDRAULICKY ROZŠÍŘENÝM NÁTOKEM PŘÍPADĚ OVLIVNĚNÍ PROUDĚNÍ DOLNÍ VODOU V PROPUSTKU
- OBR. 4.19 GRAF PRO STANOVENÍ HLOUBKY YB ZA VTOKEM DO PROPUSTKU PRO KRUHOVÝ PROPUSTEK S ŠIKMÝM ČELEM V PŘÍPADĚ OVLIVNĚNÍ PROUDĚNÍ DOLNÍ VODOU V PROPUSTKU

- OBR. 4.20 GRAF PRO STANOVENÍ HLOUBKY YB ZA VTOKEM DO PROPUSTKU PRO KRUHOVÝ PROPUSTEK S PŘEDSAZENÝM VTOKEM V PŘÍPADĚ OVLIVNĚNÍ PROUDĚNÍ DOLNÍ VODOU V PROPUSTKU
- OBR. 4.21 GRAF ZÁVISLOSTI ZÚŽENÉ HLOUBKY YC NA MĚRNÉM PRŮTOKU Q PRO KONSTRUKČNÍ TYP PŘEDSAZENÝ VTOK
- OBR. 4.22 GRAF ZÁVISLOSTI ZÚŽENÉ HLOUBKY YC NA MĚRNÉM PRŮTOKU Q PRO KONSTRUKČNÍ TYP HYDRAULICKY ROZŠÍŘENÝ NÁTOK
- OBR. 4.23 GRAF ZÁVISLOSTI ZÚŽENÉ HLOUBKY YC NA MĚRNÉM PRŮTOKU Q PRO KONSTRUKČNÍ TYP ŠIKMÉ ČELO NÁTOKU
- OBR. 4.24 PODÉLNÝ PROFIL DNA, HLADINY A ČÁRY ENERGIE MEZI 2 SOUSEDNÍMI PROFILY PRO USTÁLENÉ NEROVNOMĚRNÉ PROUDĚNÍ
- OBR. 4.25 MOODYHO DIAGRAM
- OBR. 4.26 PROPUSTE S VÝTOKEM NEZATOPENÝM DOLNÍ VODOU
- OBR. 4.27 PROPUSTEK S VÝTOKEM ZATOPENÝM DOLNÍ VODOU
- OBR. 4.28 UKÁZKA PRŮTOČNÝCH PLOCH KORYTA ZA DANÉ HLOUBKY YD
- OBR. 4.29 ZÁVISLOST VÝTOKOVÉHO SOUČINITELE NA POMĚRU PRŮTOČNÝCH PLOCH
- OBR. 5.1 VÍCENÁSOBNÉ PROPUSTKY NA POZEMNÍ A ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ KOMUNIKACI
- OBR. 5.2 FYZIKÁLNÍ MODEL PROPUSTKU TVOŘENÉHO 2 PARALELNÍMI ROURAMI
- OBR. 5.3 KOLMÝ NÁTOK DO PROPUSTKU
- OBR. 5.4 PROSTOROVÝ PRŮBĚH HLOUBEK VODY PŘI NÁROKU DO PROPUSTKU V OBLOUKU
- OBR. 5.5 PROSTOROVÝ PRŮBĚH SVISLICOVÝCH RYCHLOSTÍ PŘI NÁTOKU DO PROPUSTKU V OBLOUKU
- OBR. 5.6 PŘEDSAZENÝ NÁTOK DO PROPUSTKU VÝZKUMU NA HYDRAULICKÉM MODELU
- OBR. 7.1 ZPŮSOBY OPEVNĚNÍ KORYTA ZA VÝTOKEM Z PROPUSTKU
- OBR. 7.2 TLUMENÍ KINETICKÉ ENERGIE VODNÍHO PROUDU ZA VÝTOKEM Z PROPUSTKU VÝVAREM
- OBR. 7.3 MOŽNÁ USPOŘÁDÁNÍ NEZAHLOUBENÉHO VÝVARU
- OBR. 7.4 TLUMENÍ ENERGIE STUPNĚM VE DNĚ
- OBR. 8.1 KOLMÉ ČELO S ČESLEMI
- OBR. 8.2 ŠIKMÉ ČELO S PŘEDSAZENÝMI ČESLEMI
- OBR. 8.3 ŠIKMÉ ČELO S PŘEDSAZENÝMI ČESLEMI A ODSAZENÍM  $\frac{1}{2} D$  ODE DNA
- OBR. 8.4 ŠIKMÉ ČELO S PŘEDSAZENÝMI ČESLEMI A ODSAZENÍM  $\frac{1}{4} D$  ODE DNA
- OBR. 10.1 KATEGORIE KOMUNIKACÍ

## SEZNAM TABULEK

- TAB. 3.1 STŘEDNÍ KVADRATICKÉ CHYBY PRO N-LETÉ PRŮTOKY
- TAB. 4.1 HODNOTY SOUČINITELŮ MÍSTNÍ ZTRÁTY ZÚŽENÍM PROUDU NA VTOKU DO PROPUSTKU PRO RŮZNÁ KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ VTOKU V PŘÍPADĚ PROUDĚNÍ S VOLNOU HLADINOU V KRUHOVÉM PROPUSTKU
- TAB. 4.2 HODNOTY SOUČINITELŮ CELKOVÉ MÍSTNÍ ZTRÁTY NA VTOKU DO PROPUSTKU PRO RŮZNÁ KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ VTOKU V PŘÍPADĚ TLAKOVÉHO PROUDĚNÍ V KRUHOVÉM PROPUSTKU
- TAB. 4.3 HODNOTY SOUČINITELŮ CELKOVÉ MÍSTNÍ ZTRÁTY NA VTOKU DO PROPUSTKU PRO RŮZNÁ KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ VTOKU V PŘÍPADĚ TLAKOVÉHO PROUDĚNÍ VE ČTVERCOVÉM/OBDÉLNÍKOVÉM PROPUSTKU
- TAB. 4.4 HODNOTY HYDRAULICKÉ DRSNOSTI BETONOVÉHO POTRUBÍ  $n$  V ZÁVISLOSTI NA CHARAKTERU VNITŘNÍHO POVRCHU POTRUBÍ
- TAB. 7.1 MEZNÍ VYMÍLACÍ RYCHLOSTI VS PRO JEDNOTLIVÉ DRUHY ZEMINY A OPEVNĚNÍ
- TAB. 9.1 VÝPOČET ODTOKOVÉHO SOUČINITELE PRO RŮZNÉ TYPY PLOCH
- TAB. 9.2 TABULKA N-LETÝCH PRŮTOKŮ
- TAB. 9.3 TABULKA PRO VÝBĚR VARIČNÍHO ROZPĚTÍ DLE KATEGORIE KOMUNIKACE
- TAB. 9.4 ITERAČNÍ POSTUP PRO VÝPOČET  $Y_D$

# 1 ÚVOD

## 1.1 CÍLE A PŘEDMĚT METODIKY

Základní funkcí propustků je bezpečné převedení návrhového průtoku skrz těleso náspu silnice či železnice tak, aby nedošlo k ohrožení jeho stability. Na rozdíl od mostních objektů se dle platných předpisů připouští tlakové proudění v propustku a zatopení jeho horního čela.

Tato metodika se proto zabývá výpočetními postupy, které umožní dostatečně přesně popsat průběhy hladin a hodnoty potřebných hydraulických veličin v celém propustku a jeho okolí pro všechny možné scénáře průběhu hladin, které se mohou vyskytnout.

Vzhledem k malým rozměrům otvoru propustku má pro jeho funkci zejména za průchodu povodňových průtoků zásadní význam to, zda může dojít k zanesení a ucpání horního čela objektu. V takovém případě by byla hydraulická funkce propustku ohrožena. Součástí metodiky jsou proto návrhy, jak vhodně konstrukčně vyřešit oblast před vtokem do propustku tak, aby se tyto škodlivé jevy omezily na minimum.

## 1.2 HYDRAULICKÁ FUNKCE PROPUSKŮ

Na základě rozsáhlého výzkumu s využitím jak fyzikálních, tak i matematických modelů byla v průběhu řešení projektu TA04030373 Zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti propustků s ohledem převádění povodňových průtoků věnována zvýšená pozornost zejména hydraulickým jevům ve vtokové a výtokové oblasti, kde doposud používané metody a postupy nepřinášely zcela přesvědčivé výsledky.

Metodika se podrobně zabývá těmito jevy:

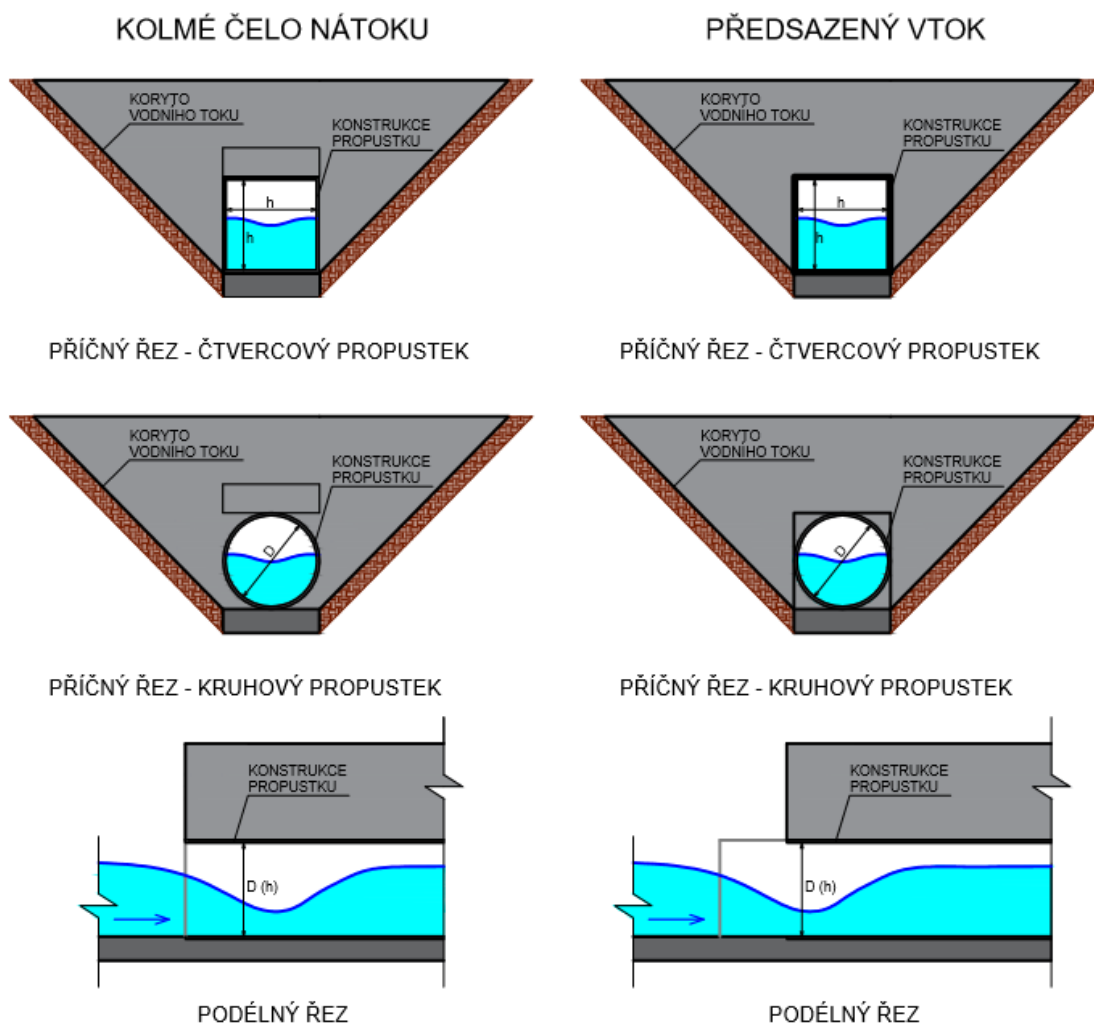
- popis proudění na vtoku do propustku se zaměřením na stanovení ztráty mechanické energie na vtoku do propustku,
- analýza hloubky vody za vtokem při proudění propustkem s volnou hladinou,
- popis proudění po délce propustku,
- analýza proudění na výtoku z propustku,
- výpočet vzduté úrovně hladiny před vtokem do propustku.

Uplatnění předložených výpočetních postupů pro praktické navrhování propustků je podpořeno řadou vyřešených vzorových úloh, přičemž hlavním cílem je stanovení **vzduté úrovně hladiny před vtokem do propustku**.



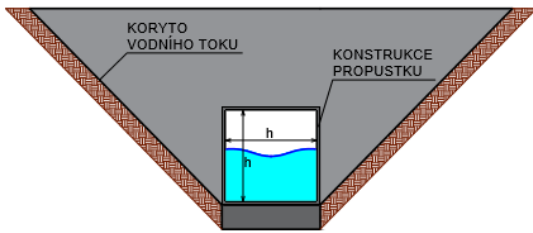
## 2 ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ TYPY PROPUSTKŮ

Konstrukční řešení vtoku do propustku a výtoku z něj může mít mnoho podob. Na obrázcích Obr. 2.1 a Obr. 2.2 je možno vidět příčné a podélné řezy čtyř základních konstrukčních typů propustků. Jedná se o propustek s rovným čelem, s předsazeným vtokem, se šikmým čelem a s hydraulicky rozšířeným nátokem. Čela tedy mohou být rovná nebo šikmá, jež jsou výhodnější hned z několika důvodů. Mají nižší investiční náklady, netvoří tak nebezpečnou překážku jako čela rovná a navíc zapadnou lépe do krajiny. Účelem hydraulicky rozšířeného nátoku do propustku je redukovat zúžení proudu a tím snižovat místní ztrátu na vtoku a zvýšit tak průtočnou kapacitu propustku. Pro výběr vhodného konstrukčního uspořádání jsou rozhodující nejen hydraulické výpočty a stabilita konstrukce, ale také estetický dojem.



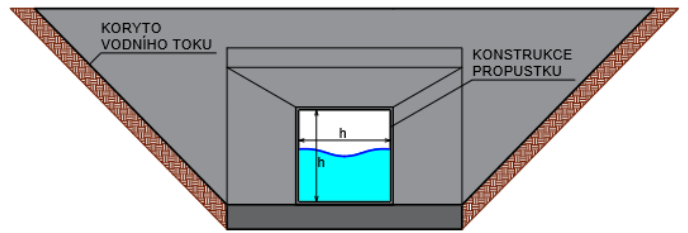
Obr. 2.1 Propustek s rovným čelem a předsazeným vtokem

### ŠIKMÉ ČELO NÁTOKU

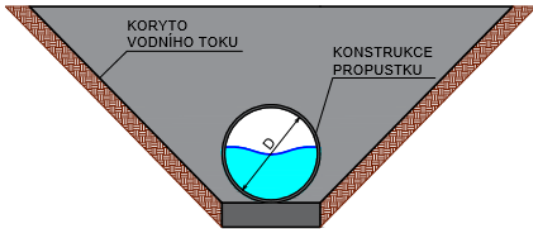


PŘÍČNÝ ŘEZ - ČTVERCOVÝ PROPUSTEK

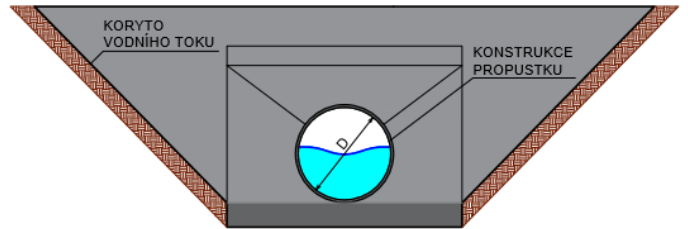
### HYDRAULICKY ROZŠÍŘENÝ NÁTOK



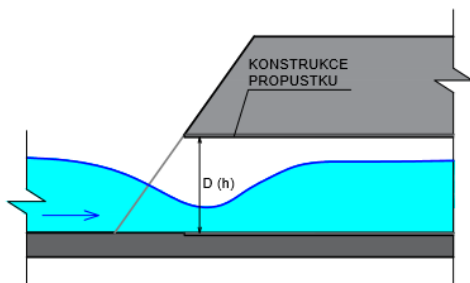
PŘÍČNÝ ŘEZ - ČTVERCOVÝ PROPUSTEK



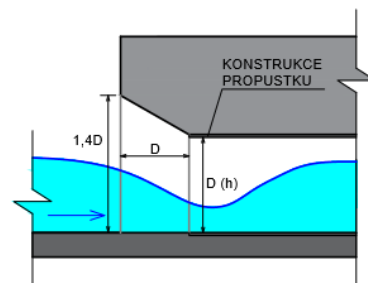
PŘÍČNÝ ŘEZ - KRUHOVÝ PROPUSTEK



PŘÍČNÝ ŘEZ - KRUHOVÝ PROPUSTEK



PODÉLNÝ ŘEZ



PODÉLNÝ ŘEZ

Obr. 2.2 Propustek s šikmým čelem a hydraulicky rozšířeným nátokem

### 3 NÁVRHOVÝ PRŮTOK A ZPŮSOB JEHO STANOVENÍ

Při posouzení návrhových parametrů propustku je jedním ze základních vstupních údajů návrhový průtok. Návrhový průtok se nejčastěji určuje hodnotou tzv. N-letých průtoků (ČSN 73 6201).

Hodnoty N-letých průtoků určí ČHMÚ, a to vždy pokud se propustek nachází na trvalé vodoteči. Jejich hodnoty se stanovují ve čtyřech třídách přesnosti, a proto je třeba mít na paměti, že hodnoty jsou stanoveny vždy s určitou kvadratickou chybou a není možné k nim přistupovat jako k dogmaticky přesným hodnotám.

Hodnoty střední kvadratické chyby v % pro jednotlivé třídy přesnosti jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 3.1:

Třída	Orientační Charakteristika	Orientační hodnoty střední kvadratické* chyby (%)	
		$Q_1 - Q_{10}$	$Q_{20} - Q_{100}$
1	Hydrologické údaje zpracované z hodnot dlouhodobě kvalitně pozorovaných v daném profilu nebo v jiném velmi blízkém profilu na témže toku.	10	15
2	Hydrologické údaje odvozené pro jiný profil na témže toku, pokud to připouští charakter odvozované veličiny, charakter vodního toku, délka a kvalita pozorování.	20	30
3	Hydrologické údaje odvozené pozorovaných profilů pro profil na témže toku, pokud nejsou splněny požadavky na pro zařazení do třídy II, nebo odvozené pro profil na jiném blízkém toku s obdobnými fyzickogeografickými poměry a obdobným hydrologickým režimem.	30	40
4	Hydrologické údaje odvozené z pozorovaných hodnot do profilu mimo pozorovaný vodní tok nebo mimo jeho povodí pokud je nelze zařadit do třídy III. Charakteristiky maximálních průtoků odvozené ze srážek.	40	60

Tab. 3.1 Střední kvadratické chyby pro N-leté průtoky

\* Termínem střední kvadratická chyba se rozumí směrodatná odchylka relativních chyb příslušného hydrologického údaje. Orientační hodnoty středních kvadratických chyb hydrologických údajů nejsou většinou výsledky statistických studií přesnosti, ale pouze odborné odhady. V závislosti na hydrologických poměrech konkrétních případů mohou tyto chyby proto nabývat menších, ale i větších hodnot.

V praxi se vyskytnou případy, kdy nebudou data ČHMÚ projektantovi dostupná. Takový případ může nastat za situace, kdy se navrhovaný propustek nevyskytuje na trvalé vodoteči a bude sloužit například k odvodnění svahu nebo části povodí, kde je možno očekávat výskyt soustředěného odtoku.

Za této situace je nutno návrhový průtok spočítat pomocí některé z dostupných hydrologických metod založených na principu výpočtu z velikosti povodí, intenzity dešťové srážky a odtokových charakteristik povodí. Některé z metod jsou dále uvedeny:

## 1. Racionální metoda výpočtu návrhového průtoku

Průtok je možno spočítat dle rovnice:

$$Q = c i A \quad (3.1)$$

Q [m <sup>3</sup> /s]	průtok
c [-]	odtokový součinitel
i [m/s]	intenzita návrhového deště (standardně se poskytuje v mm/hod)
A [m <sup>2</sup> ]	plocha odvodňovaného povodí

Hodnota odtokového součinitele je závislá na charakteru povodí z hlediska rychlosti odtoku. Čím více je povodí tvořeno zpevněnými plochami usnadňující povrchový odtok, tím je odtokový součinitel vyšší. Maximálně však může dosáhnout hodnoty 1. Velikost odtokového součinitele pro jednotlivé typy pokryvu je nutno vyhledat v odborné literatuře např. v Hrádek a kol.- Hydrologie 1988.

Z výše uvedené rovnice je patrné, že zásadními vstupy bude odtokový součinitel a intenzita návrhového deště. Proto je nutno těmto parametrům věnovat zvýšenou pozornost. Existují samozřejmě přesnější a komplexnější postupy založené na větším souboru vstupních dat. Například výpočetní metoda pomocí CN křivek a doby koncentrace nebo např. pomocí vzorce Sokolovského viz níže.

## 2. Výpočet podle Sokolovského

$$Q_N = \frac{0,28 \cdot H_{s,N} \cdot \varphi \cdot A}{t_K} \cdot f \quad (3.2)$$

0.28 [-]	rozměrová konstanta pro uvedené jednotky veličin
Q <sub>N</sub> [m <sup>3</sup> /s]	návrhový průtok
H <sub>s,N</sub> [mm]	úhrn srážek návrhového deště po dobu jeho trvání
φ [-]	součinitel odtoku
A [m <sup>2</sup> ]	plocha povodí
t <sub>K</sub> [hod]	doba koncentrace
f [-]	součinitel tvaru hydrogramu

Více informací k jednotlivým vstupním parametrům a výpočtu je uvedeno např. v Hrádek a kol.- Hydrologie 1988.

Jak bylo zmíněno výše, existuje celá řada hydrologických metod pro stanovení kulminačního průtoku pro odtok z povodí. Výše uvedené postupy jsou jedny z možných, které lze použít v případě, že nejsou k dispozici data ČHMÚ.

Při práci s poskytnutými hydrologickými podklady ve formě N-letých průtoků, je nutno pracovat s určitým nadhledem a vědomím existujících nejistot.

## 4 VÝPOČET PROUDĚNÍ PROPUSTKEM

V této kapitole je popsáno, jak postupovat při návrhu propustku. Jelikož tato kapitola obsahuje množství rovnic, nerovnic a jiných matematických formulací, je nutné definovat, kde se které veličiny nacházejí. Jejich polohu definuje Obr. 4.1, který ukazuje názvy a polohy profilů v podélném řezu propustkem. V následujícím textu jsou již veličiny, jako jsou hloubky, rychlosti, atd. označeny dolním indexem s příslušným písmenem podle názvu profilu.

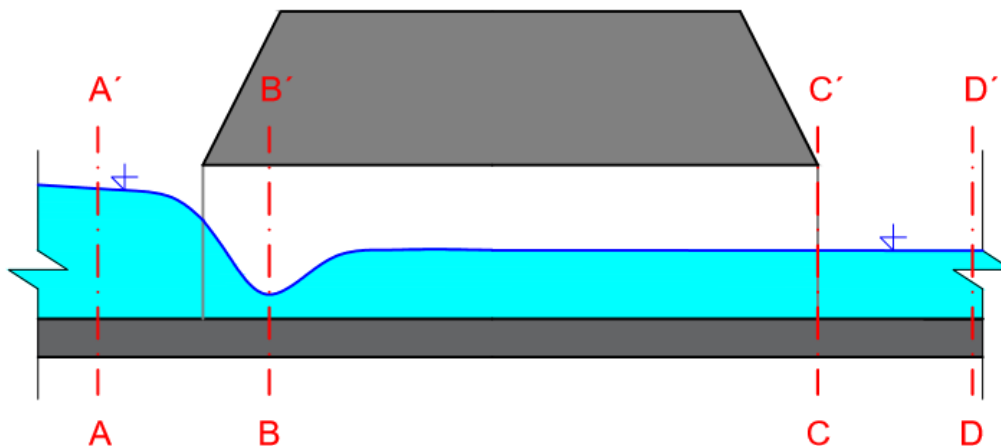
Jsou zde však některé výjimky:

**Profil A** - vzhledem k poloze profilu A, jež se nachází před vtokem do propustku v tzv. horní vodě, jsou značeny veličiny dolním indexem h (např.  $y_h$ ,  $v_h$ , atd.).

**Profil B** - poloha profilu B se nachází za vtokem do propustku, kde mohou nastat dvě situace. Jestliže hladina není ovlivněna dolní vodou, vytvoří se v profilu B zúžená hloubka, která je označována  $y_c$ . Pokud dojde k ovlivnění dolní vodou, vytvoří se v profilu B zatopená hloubka, která je označena dle názvu profilu, a to  $y_B$ .

**Profil C** - v profilu C, jež se nachází na výtoku z propustku, se mohou vyskytnout dvě situace. Buď je zde proudění o volné hladině, nebo proudění tlakové. V případě proudění o volné hladině jsou veličiny pojmenovány indexy dle názvu profilu (např.  $y_c$ ). V případě tlakového proudění, kdy voda vyplňuje celý příčný profil propustku, se za hloubku bere hodnota průměru (D) či výšky (H) propustku.

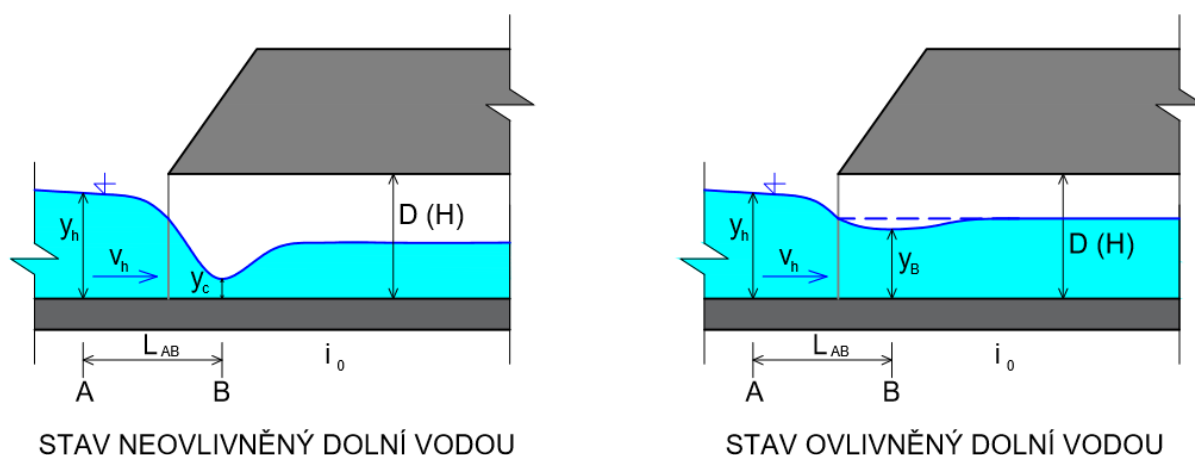
**Profil D** - vzhledem k poloze profilu D, jež se nachází za výtokem z propustku v tzv. dolní vodě, jsou značeny veličiny s indexem d (např.  $y_d$ ,  $v_d$ , atd.).



Obr. 4.1 Názvy a umístění příčných profilů v podélném řezu propustkem

## 4.1 VÝPOČET VZDUTÉ HLOUBKY PŘED PROPUSTKEM

V případě proudění propustkem s volnou hladinou se vzdutá hloubka  $y_h$  vypočítá dle rovnice (4.1). Tato rovnice je sestavená pro profil před propustkem (A) a profil za vtokem (B) v případě proudění ovlivněného dolní vodou a je aplikací Bernoulliho rovnice vyjadřující zákon zachování mechanické energie. V případě neovlivnění dolní vodou se v rovnici (4.1) zamění  $y_B$  za  $y_c$ . Typické průběhy hladin ve vtokové části propustku při proudění s volnou hladinou jsou vykresleny na Obr. 4.2. Na nich lze vidět rozdíl mezi úrovní hladiny za vtokem do propustku v profilu B pokud je či není proudění ovlivněno dolní vodou.



Obr. 4.2 Průběhy hladin na vtoku do propustku v případě proudění v propustku s volnou hladinou

$$y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = y_B + \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2 \cdot g} + Z_{VTZ} - i_0 \cdot L_{AB} \quad (4.1)$$

- $y_h$  [m] vzdutá hloubka v profilu před vtokem do propustku,
- $v_h$  [m·s<sup>-1</sup>] průřezová rychlost v profilu před vtokem do propustku,
- $y_B$  [m] hloubka vody za vtokem do propustku,
- $\alpha$  [-] Corioilisovo číslo, (převážně se uvažuje hodnota 1.0),
- $v_c$  [m·s<sup>-1</sup>] střední rychlost zúženého proudu za vtokem do propustku protékajícího průtočnou plochou  $S_c$ ,
- $Z_{VTZ}$  [m] místní ztráta zúžením proudu na vtoku do propustku,
- $i_0$  [-] sklon dna propustku, přítokového a odtokového koryta,
- $L_{AB}$  [m] vzdálenost mezi profily.

Vzhledem k velmi malé vzdálenosti  $L_{AB}$  se často poslední člen rovnice zanedbává. Po vyjádření místní ztráty na vtoku rychlostní výškou, po zavedení rychlostního součinitele a po aplikaci rovnice spojitosti má rovnice (4.1) tvar

$$y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = y_B + \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2 \cdot g} + Z_{VTZ} = y_B + (\alpha + \xi_{VTZ}) \cdot \frac{v_c^2}{2 \cdot g} = y_B + \frac{Q^2}{\varphi^2 \cdot 2 \cdot g \cdot S_c^2} \quad (4.2)$$

- $\xi_{VTZ}$  [-] součinitel místní ztráty zúžením proudu na vtoku do propustku
- $\varphi$  [-] rychlostní součinitel

**Q** [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>] průtok  
**S<sub>c</sub>** [-] průtočná plocha zúženého proudu za vtokem

Stanovením potřebných veličin uvedených v rovnici (4.1) stejně jako podmínek zatopení horního čela propustku se podrobně zabývají kapitoly 4.2 až 4.4.

U tlakového proudění se v případě volného výtoku z propustku řeší výpočet pomocí rovnice (4.3a) respektive (4.3b) sestavné pro profil A a výtokový profil z propustku C. Za hloubku vody v profilu C se dosazuje průměr propustku D nebo jeho výška H.

$$y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = D + Z_{VTC} + Z_t + \frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g} - i_o \cdot L_{AD} \quad (4.3a)$$

$$y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = H + Z_{VTC} + Z_t + \frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g} - i_o \cdot L_{AD} \quad (4.3b)$$

**D** [m] průměr propustku,  
**H** [m] výška propustku,  
**L<sub>AC</sub>** [m] vzdálenost mezi profily A a C,  
**Z<sub>VTC</sub>** [m] celková místní ztráta na vtoku do propustku,  
**Z<sub>t</sub>** [m] ztráta třením při tlakovém proudění v propustku,  
**i<sub>o</sub>** [-] sklon dna propustku

Pro zatopený výtok je obdobná rovnice pro profily A a D

$$y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = y_d + Z_{VTC} + Z_t + Z_{VY} + \frac{\alpha \cdot v_d^2}{2 \cdot g} - i_o \cdot L_{AD} \quad (4.4)$$

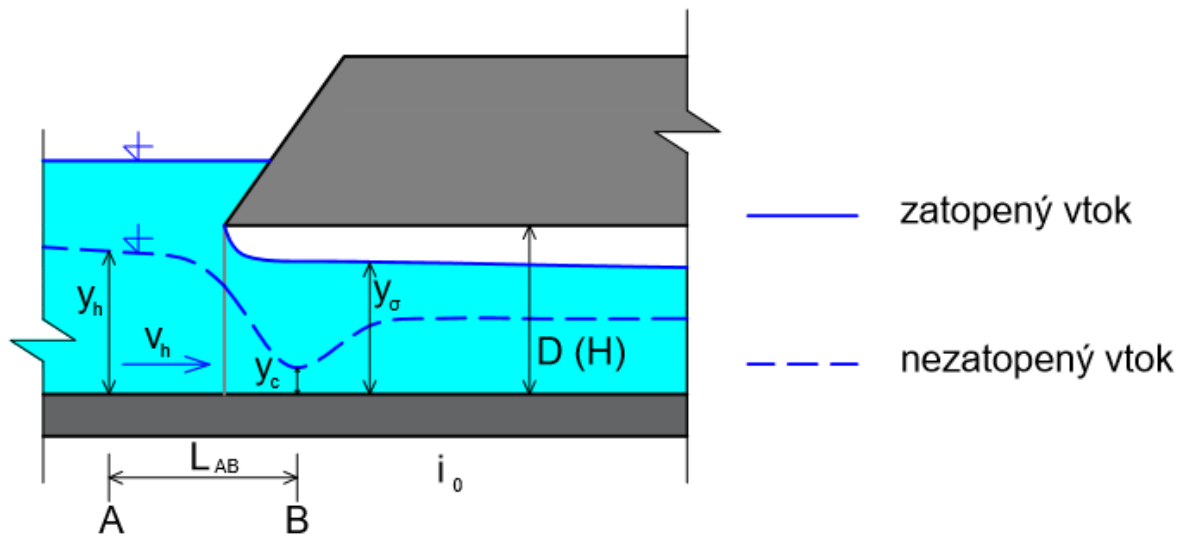
**y<sub>d</sub>** [m] hloubka vody v otevřeném korytě za propustkem v profilu D  
**Z<sub>VY</sub>** [m] místní ztráta na výtoku z propustku  
**L<sub>AD</sub>** [m] vzdálenost mezi profily A a D.

Stanovením místní ztráty na vtoku se zabývá kapitola 4.3, výpočtem ztrát třením v propustku kapitola 4.7, podmínkou zatopení dolního čela kapitola 4.8 a stanovením ztráty na výtoku z propustku kapitola 4.9.

Vzhledem k tomu, že průtočná plocha v profilu A před propustkem bývá výrazně větší než průtočná plocha v propustku, je vliv přítokové rychlosti na úroveň energetické čáry v profilu A velmi malý. Druhý člen na levé straně rovnic (4.1) až (4.4), který vyjadřuje přítokovou rychlostní výšku, se tudíž zpravidla zanedbává.

## 4.2 PODMÍNKA ZATOPENÍ VTOKU DO PROPUSTKU

K zatopení vtoku do propustku dochází v případě, že proudění v propustku s volnou hladinou (viz Obr. 4.3) dosáhne stavu, kdy úroveň hladiny vody nad propustkem začne mírně převyšovat horní hranu otvoru. V případě tlakového proudění v propustku lze prakticky výhradně očekávat zahlcený vtok.



Obr. 4.3 Průběhy hladin v případě zahlceného a nezahlceného vtoku do propustku

Podmínku, že nastane zahlcení vtoku do propustku, lze matematicky snadno naformulovat pomocí nerovnic:

$$y_h > \beta \cdot D \quad y_h > \beta \cdot H \quad (4.5)$$

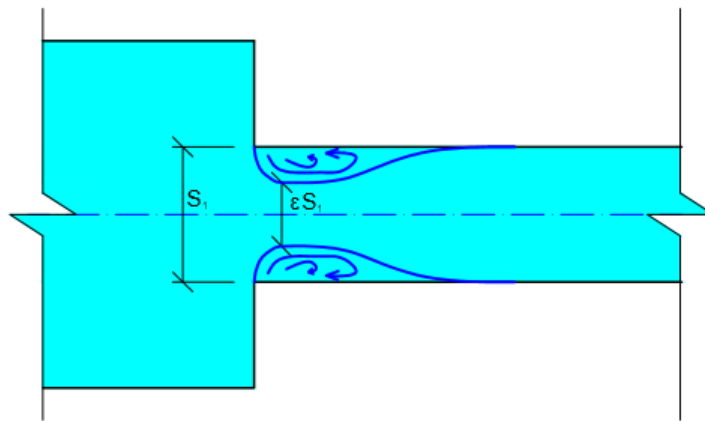
$y_h$  [m] hloubka vody nad propustkem,  
 $\beta$  [-] součinitel zatopení vtoku,  
 $D, H$  [m] průměr nebo výška propustku.



### 4.3 MÍSTNÍ ZTRÁTA NA VTOKU

Na vtoku do propustku dochází vždy ke zmenšení průtočné plochy. Při proudění vody zde proto musí docházet k významné deformaci rychlostního pole a ztrátě mechanické energie. Po hydraulické stránce je nutné se dívat na tento jev odlišně v případě proudění v propustku s volnou hladinou a v případě tlakového proudění.

Pro tlakové proudění je charakteristické počáteční zúžení proudu, jeho odtržení od vnitřního povrchu propustku a vytvoření úplavu a následné rozšíření proudu (viz Obr. 4.4). Na rozdíl od vtoku do potrubí z velké nádrže, kdy je zúžení proudu u dna zanedbatelné a toto zúžení se vytváří převážně v horní a obou bočních částech vtoku do propustku. To je způsobeno tím, že dno přívodního koryta zpravidla navazuje na dno propustku. Celková místní ztráta na vtoku v tomto případě reprezentuje jak místní ztrátu zúžením, tak i následným rozšířením proudu.



Obr. 4.4 Zúžení a rozšíření proudu při vtoku do propustku při tlakovém proudění

$S_1$  [m<sup>2</sup>] průtočná plocha na vtoku do propustku,

$\epsilon$  [-] součinitel zúžení

V případě tlakového proudění propustkem se místní ztráta na vtoku spočítá z rovnic

$$Z_{VTC} = \xi_{VTC} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4.6)$$

$$\xi_{VTC} = \xi_{VTZ} + \xi_{VTR} \quad (4.7)$$

$Z_{VTC}$  [m] celková místní ztráta na vtoku do propustku,

$v$  [m·s<sup>-1</sup>] rychlost proudění v propustku,

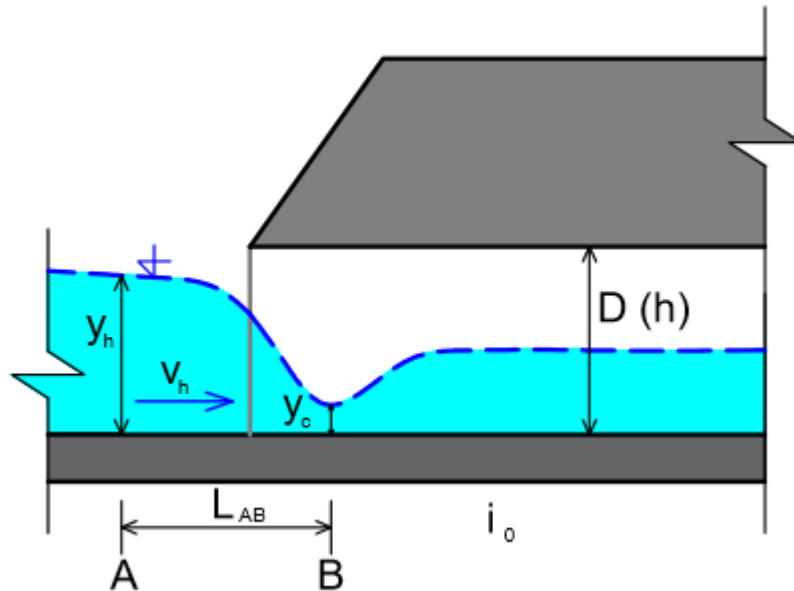
$\xi_{VTC}$  [-] součinitel celkové místní ztráty na vtoku do propustku,

$\xi_{VTZ}$  [-] součinitel místní ztráty zúžením proudu na vtoku do propustku,

$\xi_{VTR}$  [-] součinitel místní ztráty rozšířením proudu na vtoku do propustku.

Zde je důležité upozornit, že dominantní část hodnoty součinitele celkové místní ztráty na vtoku do propustku je tvořena součinitelem místní ztráty rozšířením proudu.

V případě proudění v propustku s volnou hladinou dochází ke snížení hloubky vody buď na zúženou hloubku  $y_c$  v případě, že proudění v propustku není ovlivněno dolní vodou v propustku (zúžená hloubka proudu  $y_c$  není zatopená), nebo na hloubku  $y_B$  při ovlivnění dolní vodou v propustku (v případě, že zatopená je - viz Obr. 4.2).



Obr. 4.5 Zúžení proudu za vtokem do propustku v případě proudění v propustku s volnou hladinou

Případné opětovné zvětšení průtočné plochy zvětšením hloubky se již řeší výpočtem nerovnoměrného proudění případně vodního skoku, pokud bezprostředně za místem zúžené hloubky následuje změna režimu z bystřinného na říční. Místní ztráta na vtoku do propustku při proudění s volnou hladinou tak reprezentuje jen místní ztrátu vyvolanou zúžením proudu a spočítá se z rovnice

$$Z_{VTZ} = \xi_{VTZ} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4.8)$$

Stávající výpočetní postupy tuto skutečnost neuvažovaly a pro výpočet místní ztráty na vtoku doporučovaly používat bez ohledu na režim proudění hodnotu součinitele místní ztráty v rozsahu 0.4 až 0.5.

Novému stanovení hodnot součinitelů místní ztráty na vtoku do propustku se věnoval rozsáhlý modelový výzkum v hydraulických laboratořích Fakulty stavební ČVUT a Výzkumného ústavu vodohospodářského TGM.

V případě laboratoře Fakulty stavební byl fyzikální výzkum realizován ve stávajících skleněných žlabech šířek 1.0 a 0.5 m, ve kterých byly propustky modelovány plexisklovými troubami o průměrech 10.8 a 8.4 cm. Jednotlivé modely se lišily provedením čelního profilu (kolmé čelo, šikmé čelo, kónické provedení nátoky, předsazený vtok do propustku, paralelní vedení více propustků vedle sebe). Ukázka jednoho z modelů je zobrazena fotografií Foto 4.1.



*Foto 4.1 Pohled na proudění v propustku s kolmým čelem při proudění s volnou hladinou a zatopeným vtokem*

Nově stanovené hodnoty součinitelů místní ztráty na vtoku pro různá konstrukční provedení vtoku do propustku jsou uvedeny v tabulkách Tab. 4.1 a Tab. 4.2.

Konstrukční provedení čela propustku	$\xi_{VTZ}$ $y_H/D=0.7$	$\xi_{VTZ}$ $y_H/D=0.9$	$\xi_{VTZ}$ $y_H/D=1.4$
Kruhový propustek s kolmým čelem	0.05	0.10	0.15
Kruhový propustek s šikmým čelem	0.12	0.20	0.30
Předsazený vtok kruhového propustku	0.10	0.12	0.15
Hydraulicky rozšířený nátok	0.05	0.10	0.15
Paralelní kruhové propustky s kolmým čelem	0.05	0.10	0.15

*Tab. 4.1 Hodnoty součinitelů místní ztráty zúžením proudu na vtoku do propustku pro různá konstrukční provedení vtoku v případě proudění s volnou hladinou v kruhovém propustku*

Konstrukční provedení čela propustku	$\xi_{VTC}$ $y_H/D=1.5$	$\xi_{VTC}$ $y_H/D=2.5$	$\xi_{VTC}$ $y_H/D=3.5$
Kruhový propustek s rovným čelem	0.40	0.45	0.45
Kruhový propustek s šikmým čelem	0.65	0.75	0.80
Předsazený vtok kruhového propustku	0.50	0.55	0.55
Hydraulicky rozšířený nátok	0.25	0.30	0.30
Paralelní kruhové propustky s kolmým čelem	0.40	0.45	0.45

Tab. 4.2 Hodnoty součinitelů celkové místní ztráty na vtoku do propustku pro různá konstrukční provedení vtoku v případě tlakového proudění v kruhovém propustku

V laboratoři Výzkumného ústavu vodohospodářského TGM, v. v. i. byl prováděn výzkum na čtvercovém propustku s rozměry 20 cm x 20 cm. Zkoumané modely se lišily rozdílnými typy nátoků a sklonem, který se pohyboval v rozsahu 0,5, 2 a 5 %. Pro jednotlivé typy nátoků viz Tab. 4. byly stanoveny hodnoty součinitele místní ztráty na vtoku do propustku. Prezentované závěry je možno aplikovat nejen na čtvercové propustky, ale i na propustky obdélníkového tvaru, u nichž se však poměr šířky a výšky otvoru B/H nebude značně lišit od 1. Variabilita sklonových poměrů sloužila především pro stanovení výtokových rychlostí a posouzení možnosti tlumení energie na výtoku.

Konstrukční provedení čela propustku	$\xi_{\zeta TZ}$ $y_H/H=0.7$	$\xi_{\zeta TZ}$ $y_H/H=0.9$	$\xi_{\zeta TZ}$ $y_H/H=1.4$
Čtvercový propustek s kolmým čelem	0.05	0.05	0.10
Čtvercový propustek s šikmým čelem	0.05	0.10	0.10
Předsazený vtok čtvercového propustku	*	*	*
Hydraulicky rozšířený nátok	0.05	0.05	0.10

Tab. 4.3 Hodnoty součinitelů celkové místní ztráty na vtoku do propustku pro různá konstrukční provedení vtoku v případě tlakového proudění ve čtvercovém/obdélníkovém propustku

\*Pro předsazený vtok čtvercového průřezu byla s volnou hladinou pozorována značná nestabilita hladiny v okolí vtoku. Použití tohoto typu vtokové úpravy se pro netlakový režim proudění nedoporučuje. Podrobnosti kapitola č. 5.

Konstrukční provedení čela propustku	$\xi_{VTC}$
Čtvercový propustek s rovným čelem	0.45
Čtvercový propustek s předsazeným vtokem	0.55
Čtvercový propustek s šikmým čelem	0.60
Hydraulicky rozšířený nátok	0.2

*Tab. 4.4 Hodnoty součinitelů celkové místní ztráty na vtoku do propustku pro různá konstrukční provedení vtoku v případě tlakového proudění ve čtvercovém/obdélníkovém propustku*

Hodnoty součinitele celkové místní ztráty na vtoku v tabulce 4.4 odpovídají poměru  $y_h/H=2,5$ , což je u čtvercového a obdélníkového průřezu možno považovat za dostatečnou míru zatopení.

## 4.4 ANALÝZA PROUDĚNÍ ZA VTOKEM DO PROPUSTKU PŘI PROUDĚNÍ S VOLNOU HLADINOU

Pokud není proudění propustkem s volnou hladinou za vtokem ovlivněno dolní vodou v propustku, vytváří se těsně za vtokovým profilem zúžená hloubka  $y_c$ . Dle stávajících výpočetních postupů se stanovovala pro nezatopený vtok zúžená hloubka jako funkce hloubky kritické  $y_k$ , pro zatopený vtok již konstantní hodnotou, která respektovala názor, že velikost průtočného průřezu  $S_c$  v místě zúžené hloubky je 62 % celkové vnitřní plochy propustku  $S$ . Na přechodu mezi prouděním s volným vtokem a zatopeným vtokem tak docházelo ke skokové změně hloubky  $y_c$  a nespojitému průběhu výpočtu vzduté hladiny nad propustkem.

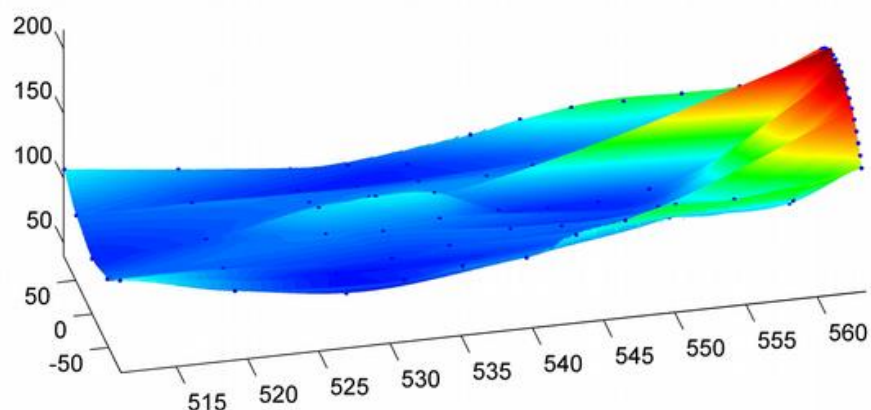
### 4.4.1 KRUHOVÉ PROPUSTKY

Výzkum provedený v rámci řešení projektu TA04030373 Zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti propustků s ohledem převádění povodňových průtoků si proto kladl za cíl nalezení správného určení zúžené hloubky  $y_c$  za vtokem.

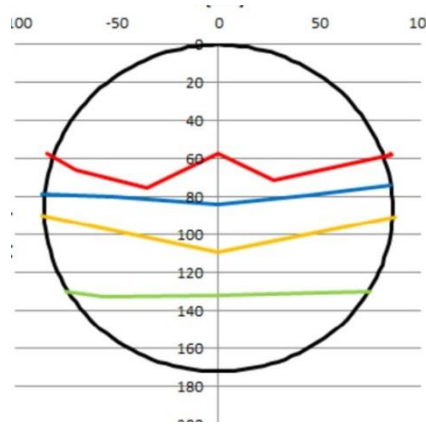
Hned první pokusy na hydraulickém modelu ukázaly, že proudění za vtokem do propustku je při proudění s volnou hladinou velmi komplikované s prostorovým vývojem výrazných příčných vln.

Na základě této skutečnosti bylo nutné přizpůsobit fyzikální modely tak, aby bylo možné proměřit průběh hladiny nejen v ose potrubí, ale v celém příčném profilu. K určení minimální zúžené hloubky za vtokem do propustku  $y_c$  byl použit následující postup. Nejprve byl nalezen profil s nejmenší průtočnou plochou (profil B), průtočná plocha byla následně převedena na kruhovou úseč s vodorovnou hladinou. Za hledanou hloubku  $y_c$  byla považována vzdálenost od dna v ose symetrie profilu po tuto hladinu.

Vizualizace prostorového průběhu hladiny za vtokem je zobrazena na Obr. 4.6 a průběhy hladin pro vybrané průtoky ve zvoleném profilu jsou vykresleny na Obr. 4.7. Z něj je názorně patrné, jak se se změnou průtoku mění chování příčných vln.



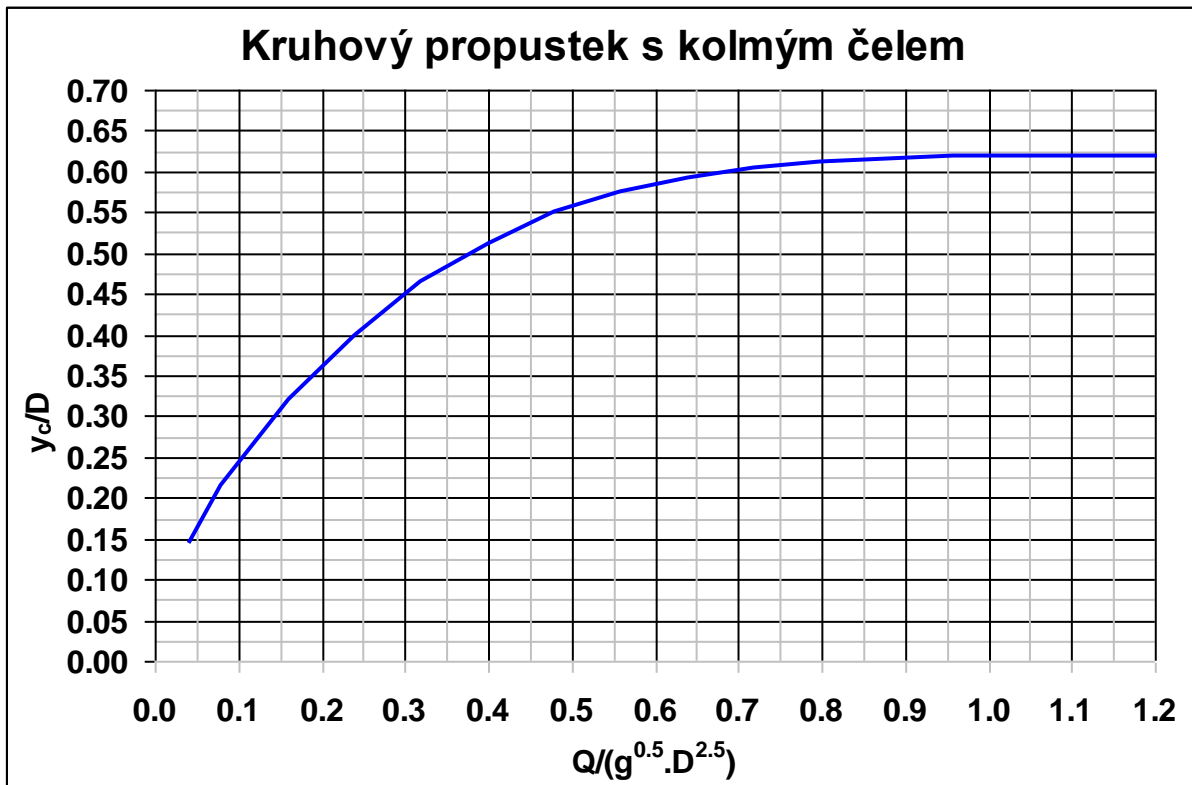
Obr. 4.6 Vizualizace prostorového průběhu hladiny [mm] za vtokem do propustku



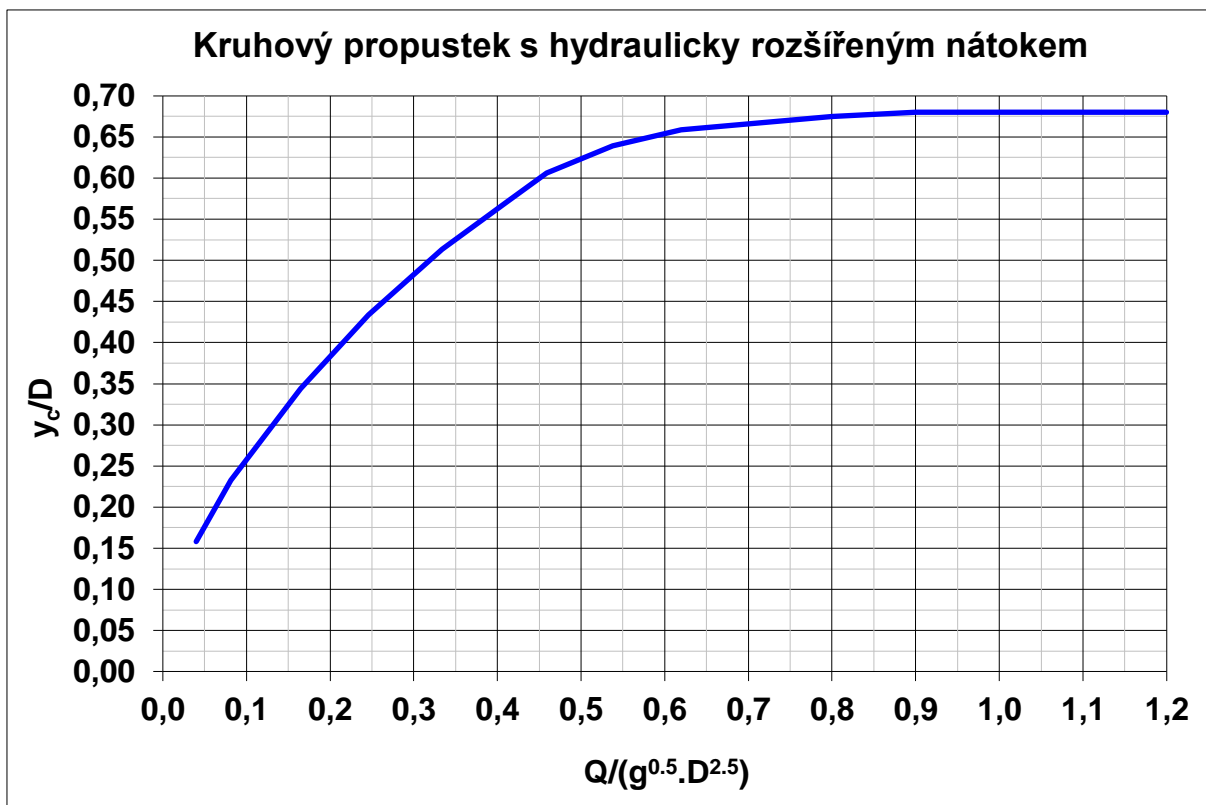
Obr. 4.7 Průběhy hladin [mm] v jednom z profilů za vtokem pro vybrané průtoky

Výsledky fyzikálního a matematického modelu ukázaly, že při proudění v propustku s volnou hladinou s nárůstem průtoku dochází k plynulému nárůstu zúžené hloubky za vtokem. Změna režimu při přechodu z volného čela na zatopené čelo se neprojevuje skokovým nárůstem. Teprve při vysokém stupni zatopení horního čela propustku již hloubka  $y_c$  neroste a blíží se hodnotě  $0.62 \cdot D$ , respektive  $0.62 \cdot H$ .

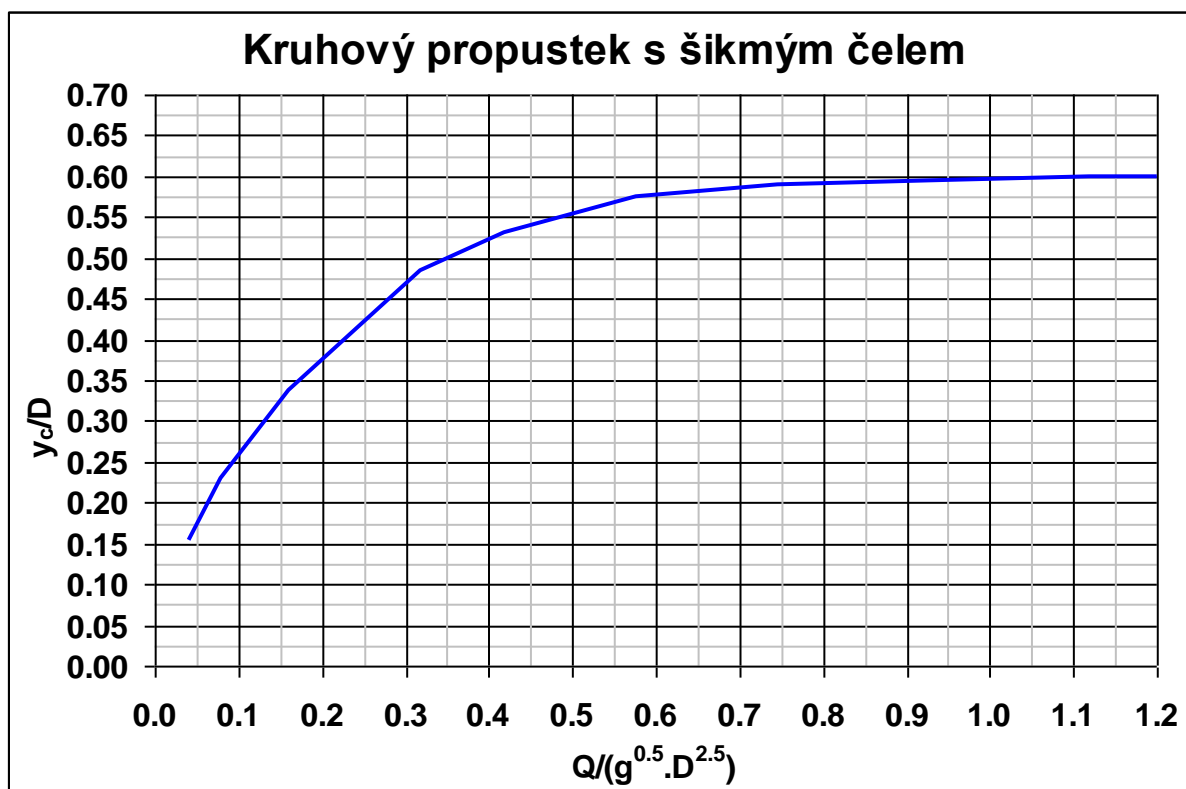
Graf, který umožňuje stanovit zúženou hloubku za vtokem  $y_c$  do kruhového propustku v závislosti na průtoku  $Q$  a průměru potrubí  $D$  je uveden pro jednotlivé konstrukční typy vtoků do propustků na Obr. 4.8 až Obr. 4.11.



Obr. 4.8 Graf pro stanovení zúžené hloubky  $y_c$  za vtokem do kruhového propustku s kolmým čelem v závislosti na průtoku  $Q$  a průměru propustku  $D$

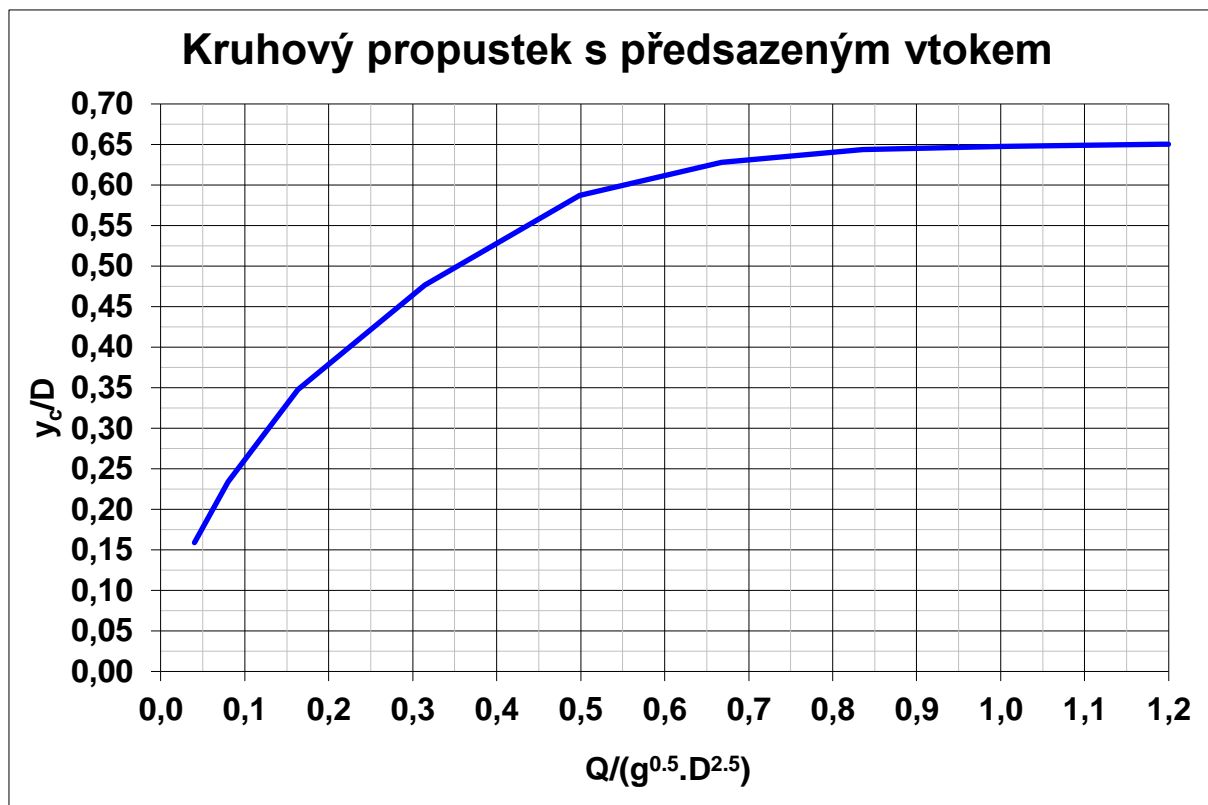


Obr. 4.9 Graf pro stanovení zúžené hloubky  $y_c$  za vtokem do kruhového propustku s hydraulicky rozšířeným nátokem v závislosti na průtoku  $Q$  a průměru propustku  $D$



Obr. 4.10 Graf pro stanovení zúžené hloubky  $y_c$  za vtokem do kruhového propustku s šikmým čelem v závislosti na průtoku  $Q$  a průměru propustku  $D$





Obr. 4.11 Graf pro stanovení zúžené hloubky  $y_c$  za vtokem do kruhového propustku s předsazeným vtokem v závislosti na průtoku  $Q$  a průměru propustku  $D$

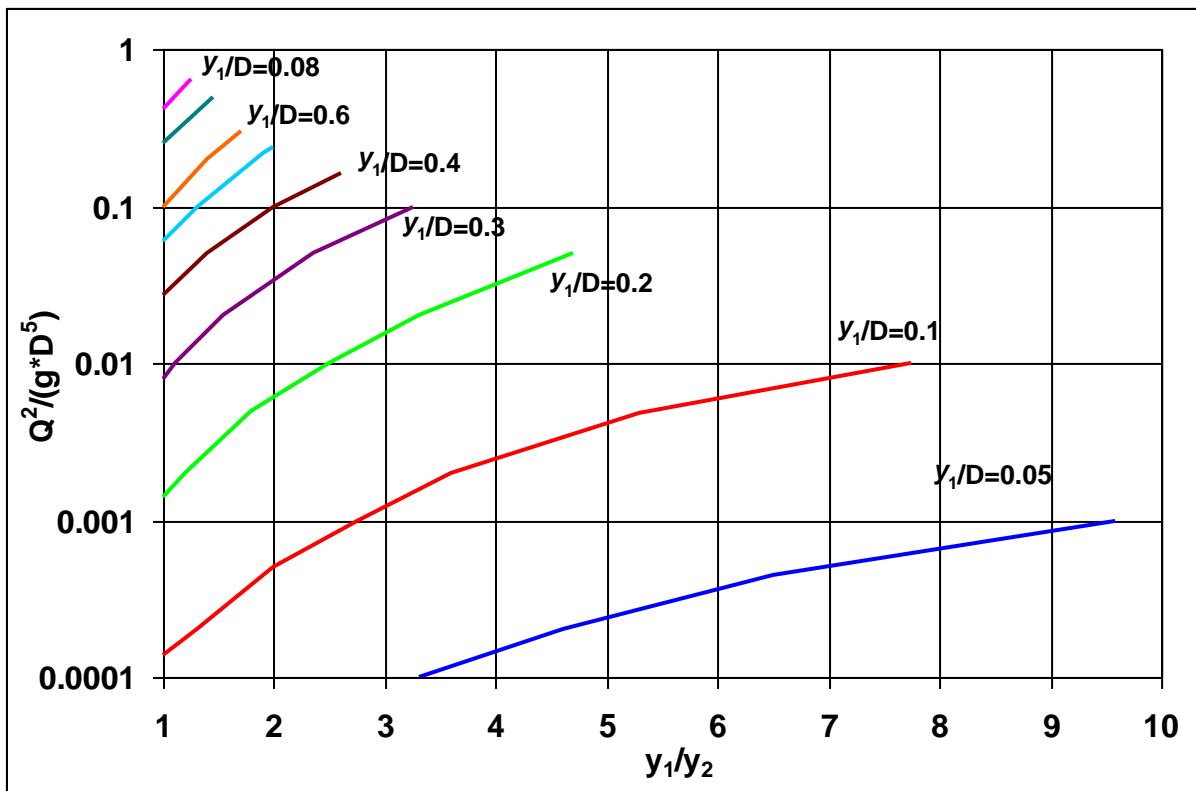
Stanovením hodnoty  $y_c$  však analýza průběhu hladiny za vtokem do propustku nekončí. Zbývá ještě posoudit, zda tato zúžená hloubka může být zatopena dolní vodou v propustku. K tomu může dojít tehdy, pokud za vtokem do propustku bude voda proudit v říčním režimu. Vzhledem k tomu, že zúžená hloubka  $y_c$  vychází vždy menší než hloubka kritická  $y_k$ , musí se posoudit, zda nedojde k vzduťi případného vodního skoku dolní vodou v propustku.

Vodní skok je charakterizován první vzájemnou hloubkou  $y_1$  v profilu, kde poproudě končí ryze bystřinné proudění, a druhou vzájemnou hloubkou  $y_2$  v profilu, od kterého je již proudění říční. V úseku mezi oběma uvedenými profilech dochází ke vzniku vodního skoku. Po fyzikální stránce je možné parametry vodního skoku vyjádřit pomocí věty o hybnosti

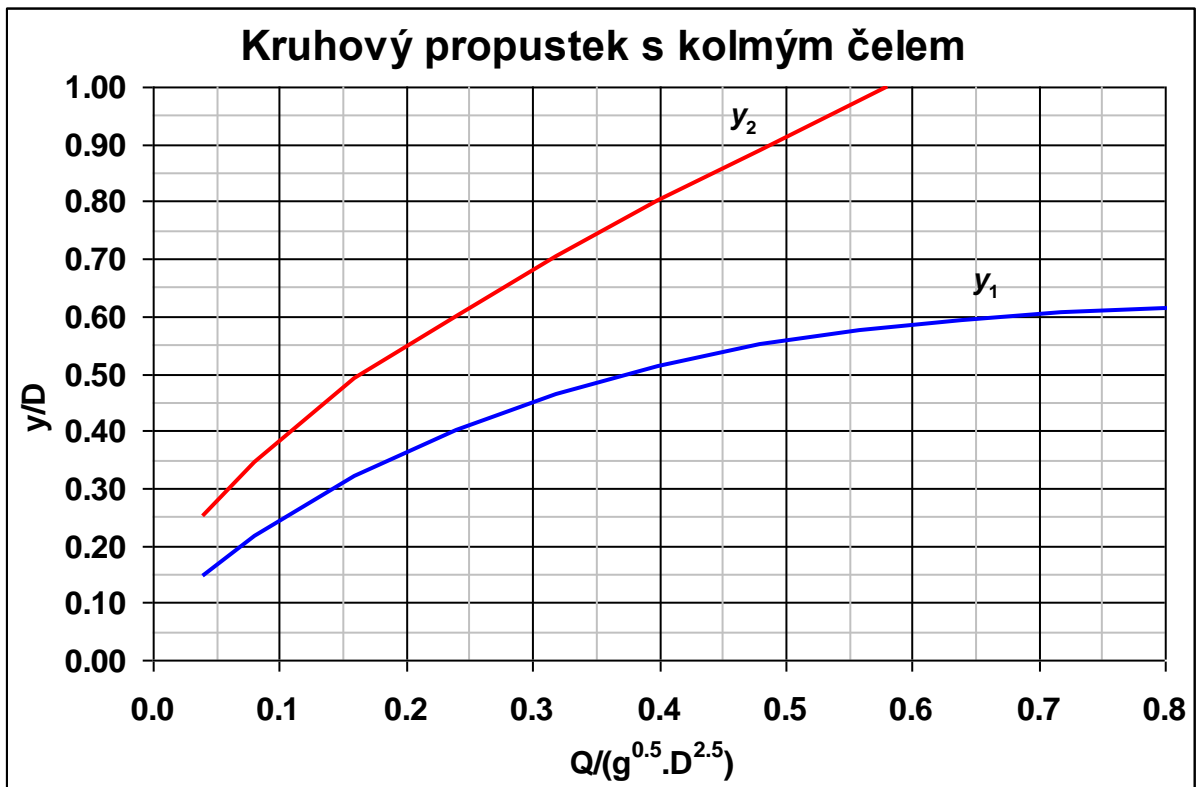
$$\rho \cdot g \cdot S_1 \cdot z_{t1} + \rho \cdot Q \cdot v_1 = \rho \cdot g \cdot S_2 \cdot z_{t2} + \rho \cdot Q \cdot v_2 \quad (4.9)$$

$S_1, S_2$  [m]      průtočné plochy kruhového propustku v profilech 1 a 2,  
 $z_{t1}, z_{t2}$  [m]      vzdálenosti těžišť průtočných ploch  $S_1$  a  $S_2$  od hladiny,  
 $v_1, v_2$  [m·s<sup>-1</sup>]      průřezové rychlosti proudění v profilech 1 a 2.

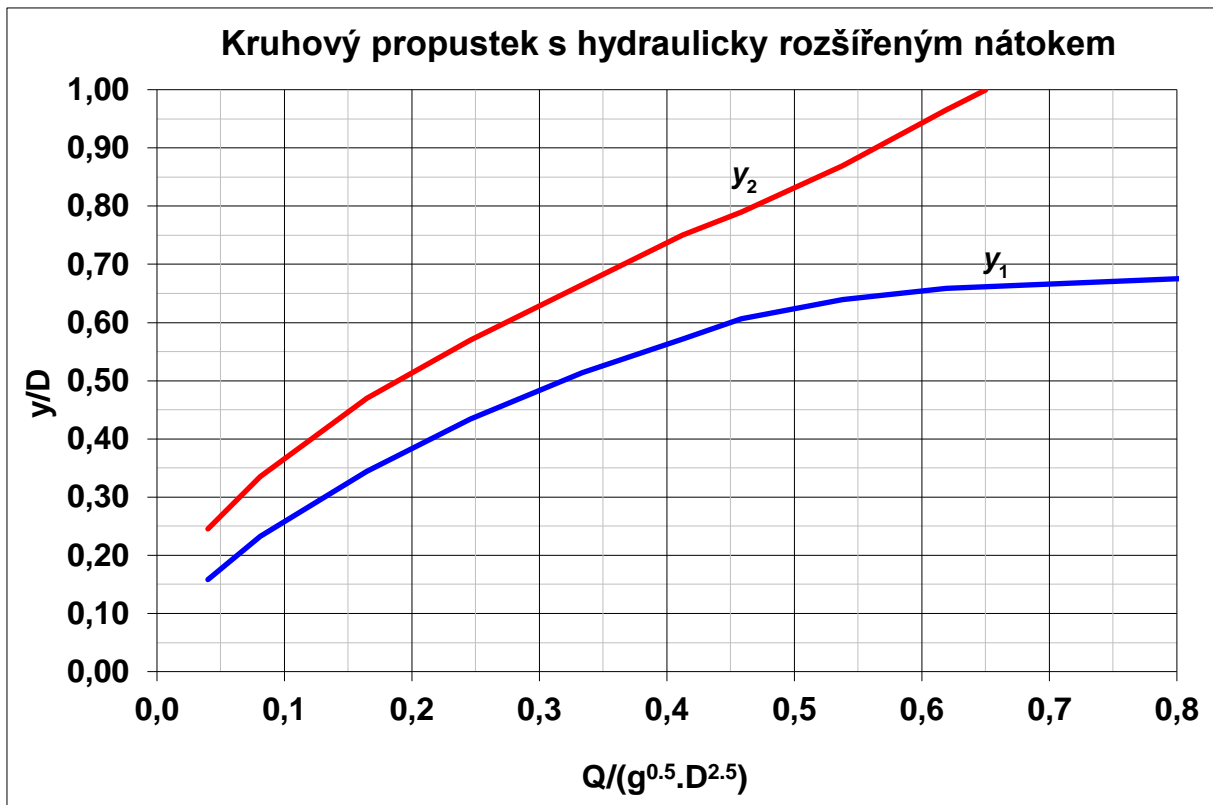
Vzhledem k tomu, že nelze z rovnice exaktně vyjádřit  $y_2$  v závislosti na  $y_1$  a opačně, pro určení vzájemných hloubek vodního skoku v kruhovém potrubí se často používá graf (viz Obr. 4.12). Pokud se bude uvažovat zúžená hloubka  $y_c$  za vtokem do kruhového propustku dle grafů na Obr. 4.8 až Obr. 4.11 za první vzájemnou hloubku vodního skoku, pak druhá vzájemná hloubka se může odečíst z grafů na Obr. 4.13 až Obr. 4.16.



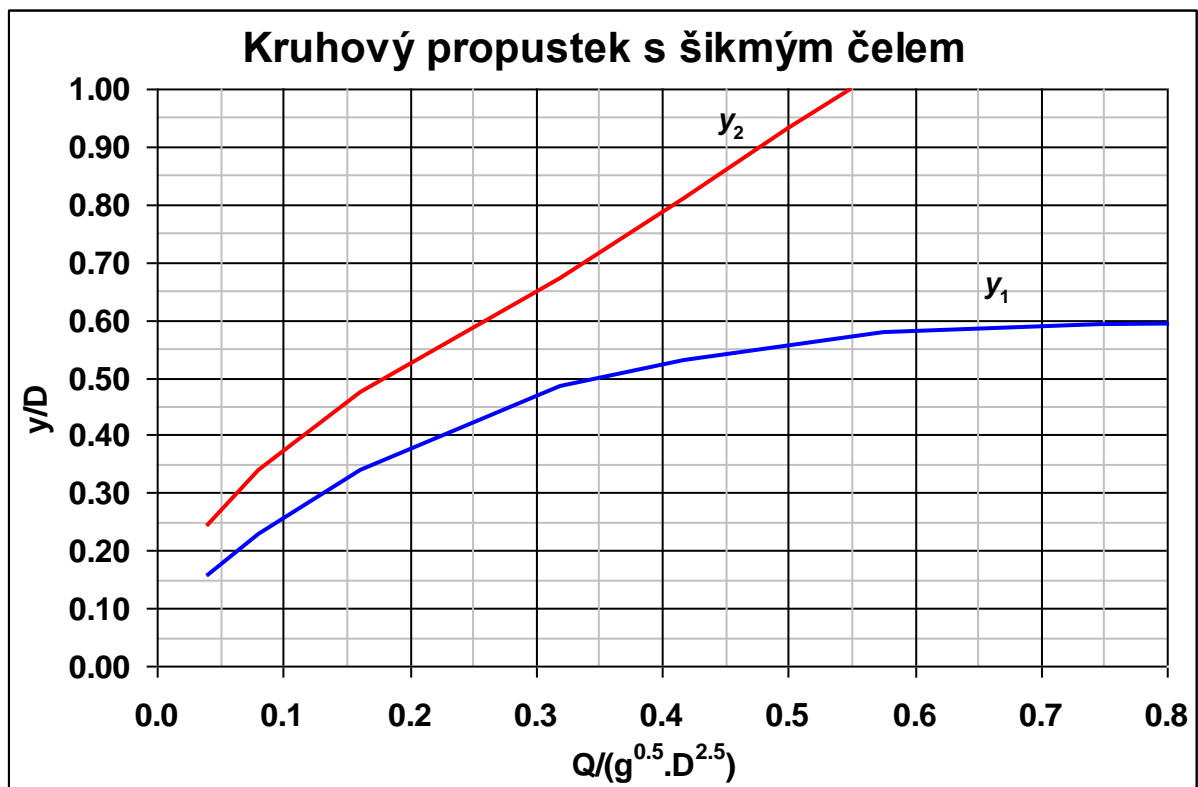
Obr. 4.12 Graf závislosti poměrů vzájemných hloubek vodního skoku  $y_1/y_2$  na průtoku  $Q$  a průměru potrubí  $D$  pro kruhový profil



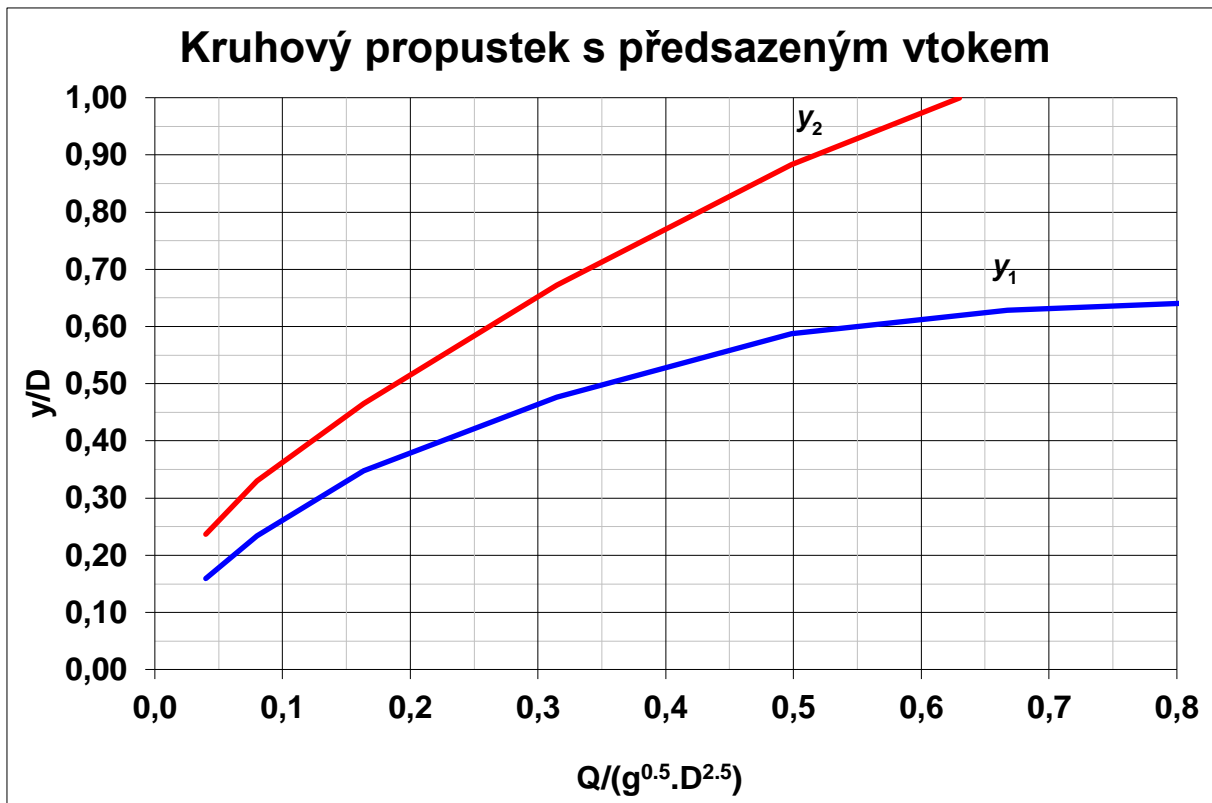
Obr. 4.13 Graf pro stanovení druhé vzájemné hloubky vodního skoku  $y_2$  v kruhovém propustku s kolmým čelem v závislosti na první vzájemné hloubce  $y_1$



Obr. 4.14 Graf pro stanovení druhé vzájemné hloubky vodního skoku  $y_2$  v kruhovém propustku s hydraulicky rozšířeným nátokem v závislosti na první vzájemné hloubce  $y_1$



Obr. 4.15 Graf pro stanovení druhé vzájemné hloubky vodního skoku  $y_2$  v kruhovém propustku s šikmým čelem v závislosti na první vzájemné hloubce  $y_1$



Obr. 4.16 Graf pro stanovení druhé vzájemné hloubky vodního skoku  $y_2$  kruhového propustku s předsazeným vtokem v závislosti na první vzájemné hloubce  $y_1$

Z grafů na Obr. 4.13 až Obr. 4.16 vyplývá, že v případě  $Q/(g^{0.5} \cdot D^{2.5}) > \text{cca } 0.6$  by druhá vzájemná hloubka nabývala větších hodnot, než je průměr potrubí, došlo by k zahlcení profilu a přechodu režimu proudění s volnou hladinou na režim tlakový.

K ovlivnění proudění dolní vodou v oblasti za vtokem do propustku dojde, pokud platí nerovnice

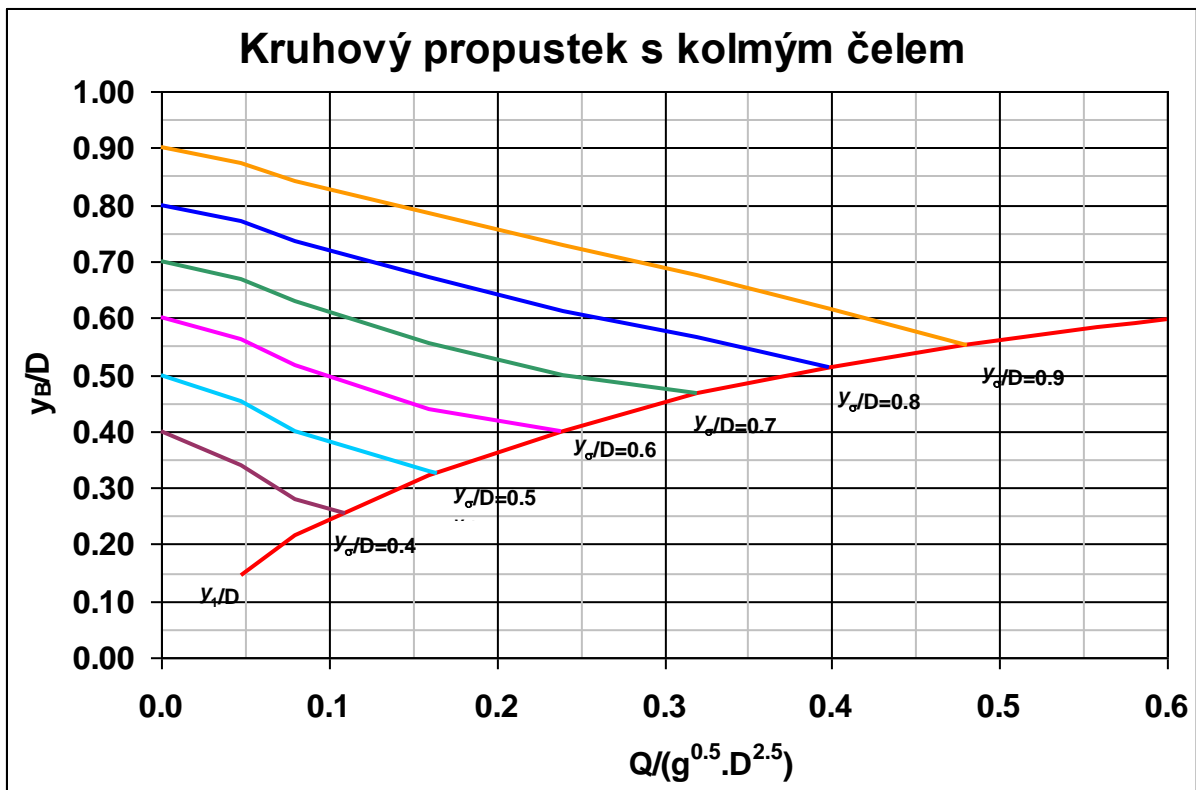
$$y_{\sigma} > y_2 \quad (4.10)$$

$y_{\sigma}$  [m] hloubka nerovnoměrného proudění za vtokem do propustku při proudění s volnou hladinou.

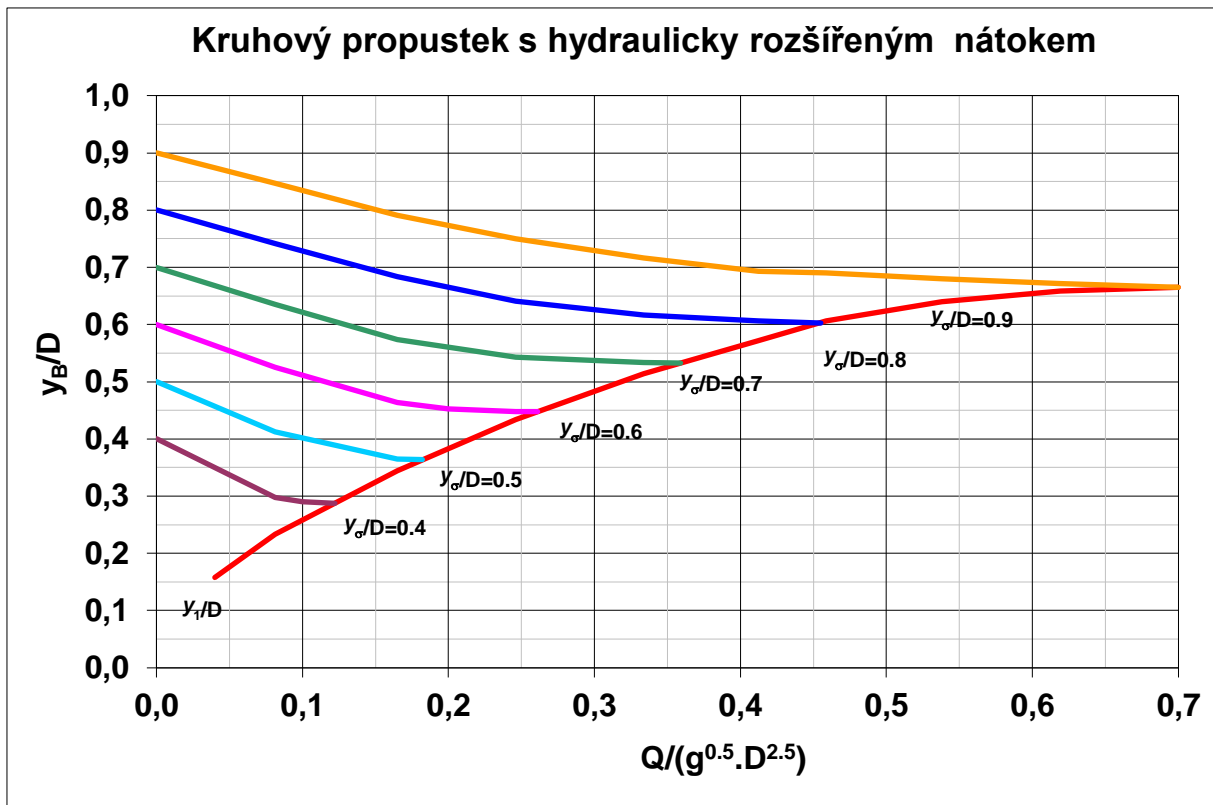
Hloubku  $y_{\sigma}$  (Obr. 4.3) se vypočítá např. metodou po úsecích pro nerovnoměrné proudění s volnou hladinou v propustku. Druhá vzájemná hloubka vodního skoku  $y_2$  se určí z grafů na Obr. 4.13 až Obr. 4.16 (kruhový propustek) pro případ, že  $y_1 = y_{\sigma}$ .

V případě, že nebude splněna nerovnost (4.10), bude hloubka za vtokem do propustku (profil B) rovna hloubce  $y_{\sigma}$  a průtok bude protékat zúženou průtočnou plochou  $S_{\sigma}$  o hloubce  $y_{\sigma}$ . Za situace, kdy nerovnost (4.10) splněna bude, bude průtok propustkem protékat částí průtočné plochy  $S_{\sigma}$  s výškou proudu  $y_{\sigma}$ , z důvodu ovlivnění dolní vodou v propustku a platnosti věty o hybnosti bude za vtokem hloubka  $y_B$ .

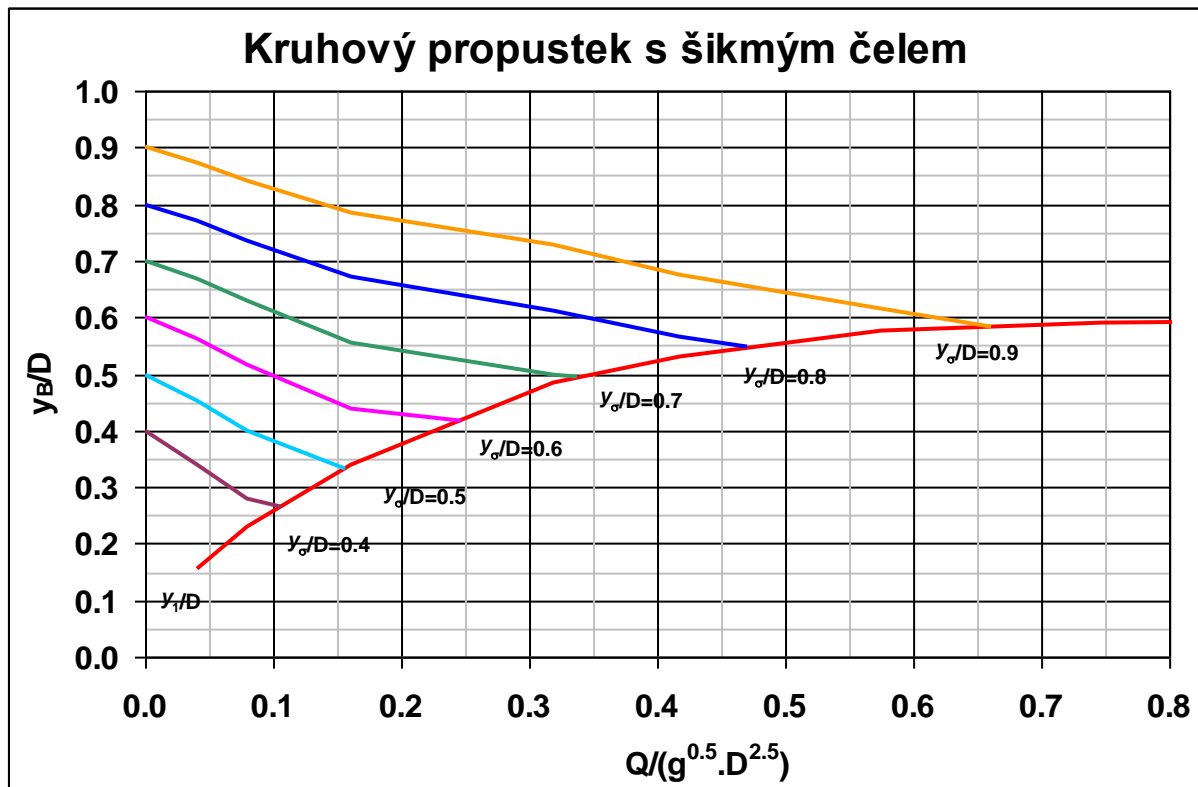
V tomto případě se pro kruhové propustky hloubka vody za vtokem do propustku  $y_B$  stanoví v závislosti na průtoku  $Q$ , průměru  $D$ , a hloubce dolní vody v propustku  $y_\sigma$  pro různá konstrukční provedení horního čela propustku z grafů na Obr. 4.17 až Obr. 4.20.



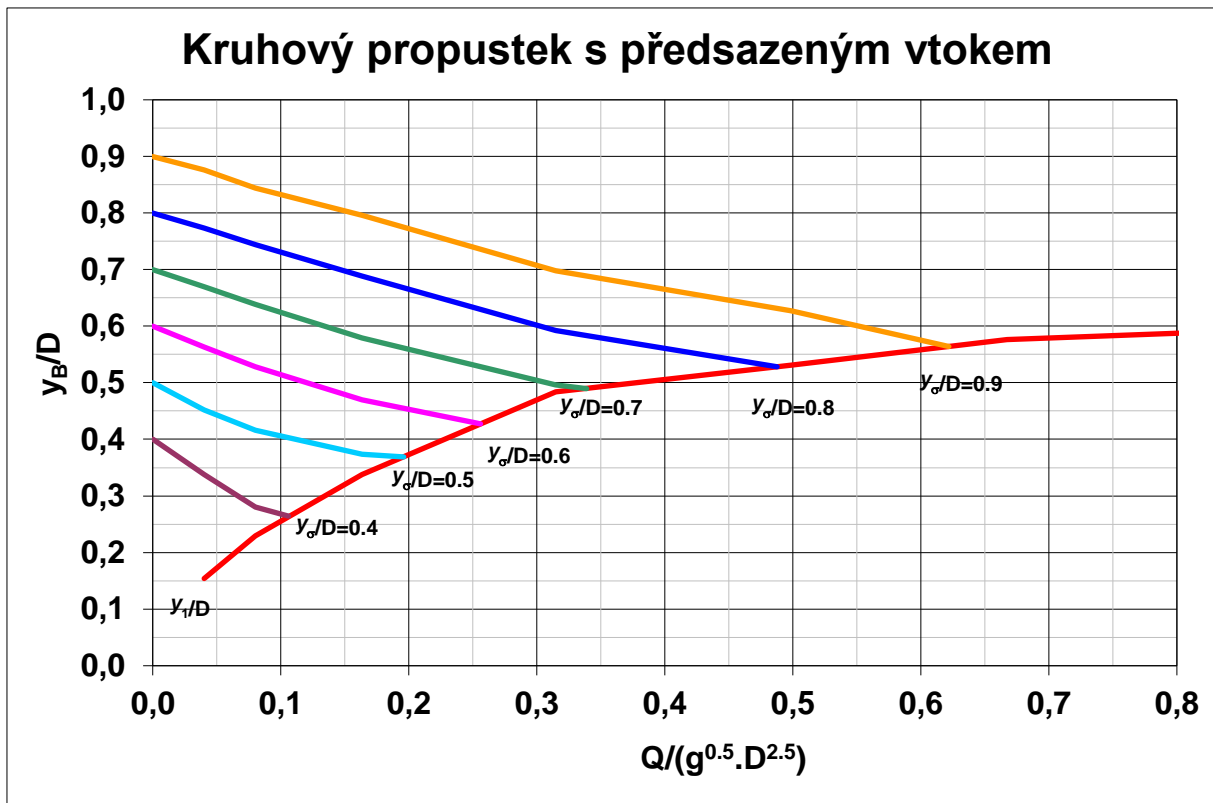
Obr. 4.17 Graf pro stanovení hloubky  $y_B$  za vtokem do propustku pro kruhový propustek s rovným čelem v případě ovlivnění proudění dolní vodou v propustku



Obr. 4.18 Graf pro stanovení hloubky  $y_B$  za vtokem do propustku pro kruhový propustek s hydraulicky rozšířeným nátokem případě ovlivnění proudění dolní vodou v propustku



Obr. 4.19 Graf pro stanovení hloubky  $y_B$  za vtokem do propustku pro kruhový propustek s šikmým čelem v případě ovlivnění proudění dolní vodou v propustku

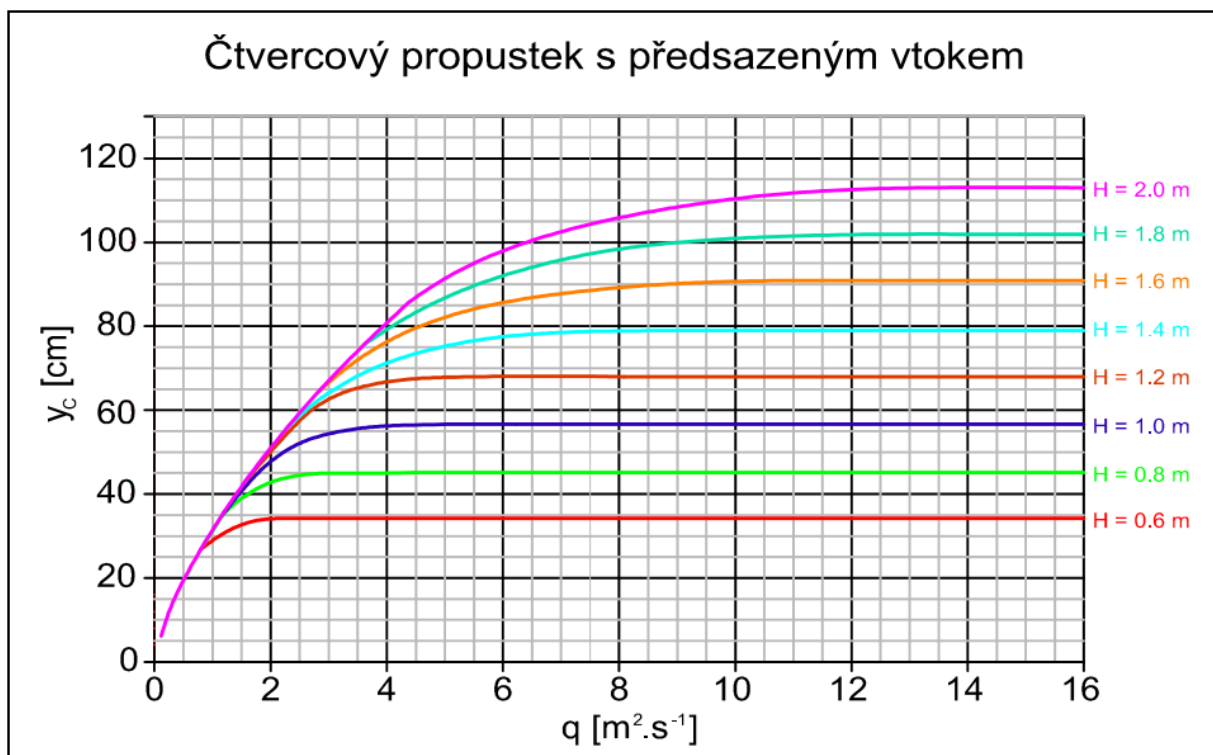


Obr. 4.20 Graf pro stanovení hloubky  $y_B$  za vtokem do propustku pro kruhový propustek s předsazeným vtokem v případě ovlivnění proudění dolní vodou v propustku

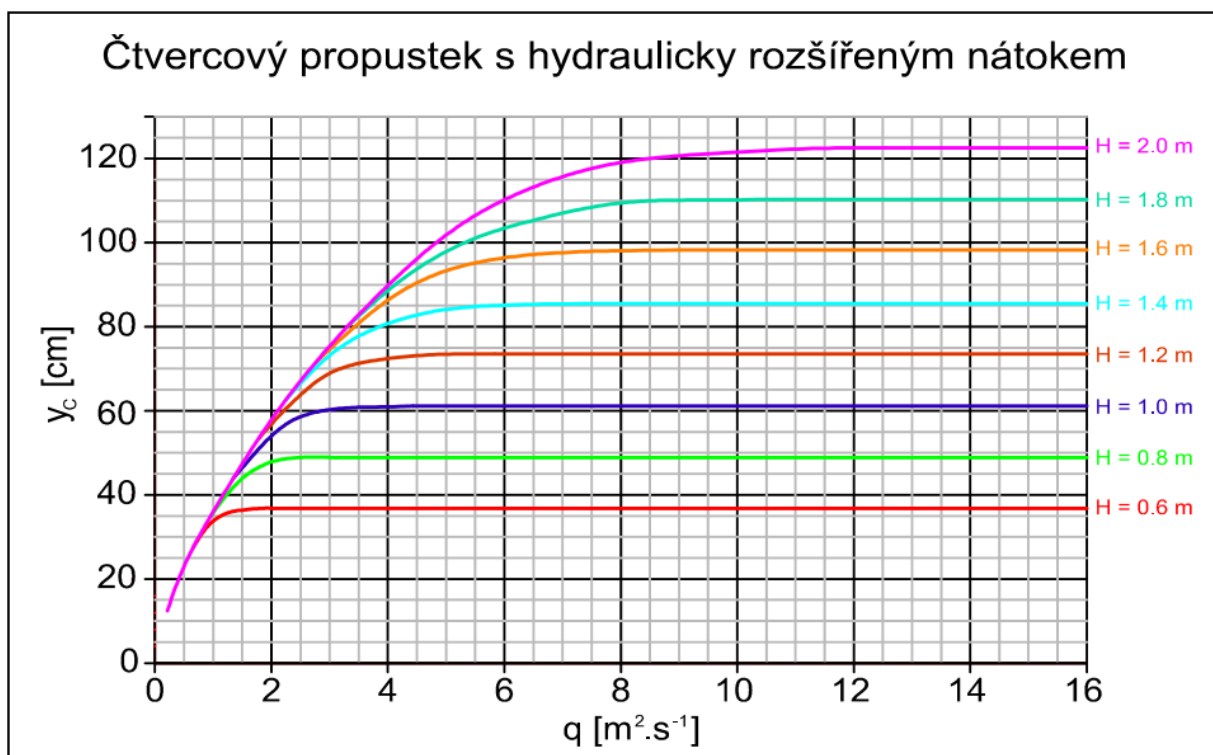
#### 4.4.2 ČTVERCOVÉ A OBDÉLNÍKOVÉ PROPUSTKY

Modelový výzkum provedený ve Výzkumném ústavu vodohospodářském TGM byl prováděn na čtvercovém propustku. Čtvercový propustek s rozměry příčného průřezu 20 cm x 20 cm byl zkoumán v několika variantách. Varianty se lišily konstrukčním uspořádáním vtoku do propustku, kdy byly zkoumány tři typy: předsazený vtok, hydraulicky rozšířený nátok a šikmé čelo nátoky. Výstupem tohoto výzkumu jsou tři grafy závislosti zúžené hloubky  $y_c$  na měrném průtoku  $q$ , které jsou v grafech na Obr. 4.21 až Obr. 4.23. Měrný průtok  $q$  je spočten jako podíl průtoku  $Q$  a šířky propustku  $B$ .

Výsledky fyzikálního modelu ukázaly, že při proudění v propustku s volnou hladinou s nárůstem průtoku dochází k plynulému nárůstu zúžené hloubky za vtokem. Tento nárůst však pokračuje pouze do určité hodnoty měrného průtoku. Po přesažení této hodnoty už je hloubka  $y_c$  konstantní, blízká se dříve používané hodnotě  $0.62 \cdot H$ . Grafy, které umožňují stanovit zúženou hloubku za vtokem  $y_c$  do čtvercového propustku v závislosti na měrném průtoku  $q$  jsou na následujících obrázcích. Výběr grafu podléhá volbě konstrukčního typu vtoku a volba křivky v jednotlivých grafech je závislá na výšce příčného průřezu daného propustku. Prezentované závěry je možno aplikovat nejen na čtvercové propustky, ale i na propustky obdélníkového tvaru, u nichž se však poměr šířky a výšky otvoru  $B/H$  nebude značně lišit od 1.

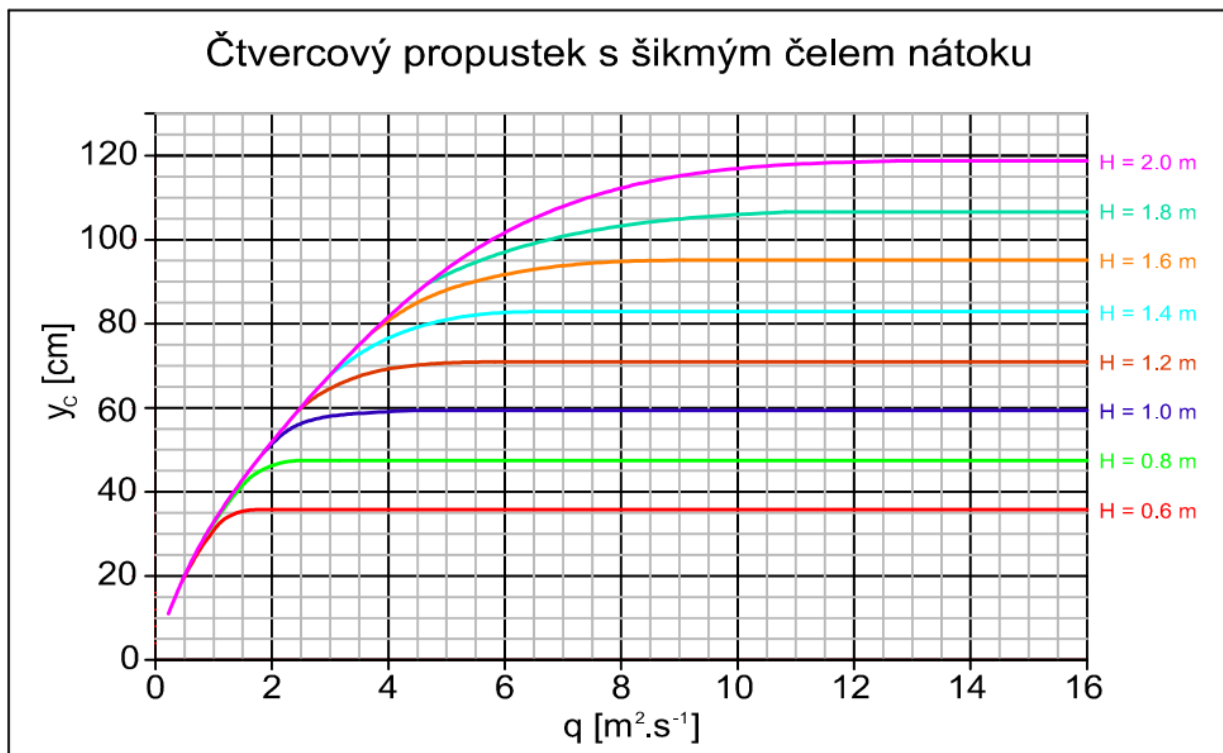


Obr. 4.21 Graf závislosti zúžené hloubky  $y_c$  na měrném průtoku  $q$  pro konstrukční typ předsazený vtok



Obr. 4.22 Graf závislosti zúžené hloubky  $y_c$  na měrném průtoku  $q$  pro konstrukční typ hydraulicky rozšířený nátok





Obr. 4.23 Graf závislosti zúžené hloubky  $y_c$  na měrném průtoku  $q$  pro konstrukční typ šikmé čelo nátoku

Podobně jako u kruhových propustků je nezbytné posoudit, zda nedojde k ovlivnění proudění ve vtokové části dolní vodou v propustku. Hloubka  $y_c$  se vypočítá např. metodou po úsecích pro nerovnoměrné proudění s volnou hladinou v propustku. Pro čtvercové (obdélníkové) profily je možné ke stanovení vzájemných hloubek vodního skoku  $y_1$  a  $y_2$  použít rovnici

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{8 \cdot q^2}{g \cdot y_1^3} - 1} \right) \quad (4.11)$$

- $y_1$  [m] první vzájemná hloubka vodního skoku,
- $y_2$  [m] druhá vzájemná hloubka vodního skoku,
- $q$  [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>] měrný průtok (průtok na jednotku šířky koryta),
- $g$  [m.s<sup>-2</sup>] tíhové zrychlení.

Druhá vzájemná hloubka vodního skoku  $y_2$  se vypočítá z rovnice (4.11) pro případ, že  $y_1 = y_c$ .

V případě, že nebude splněna nerovnost (4.10), bude hloubka za vtokem do propustku rovna hloubce  $y_c$  a průtok bude protékat zúženou průtočnou plochou  $S_c$  a hloubce  $y_c$ . Proudění za vtokem do propustku nebude v tomto případě ovlivněno dolní vodou v propustku.

Za situace, kdy nerovnost (4.10) splněna bude, bude průtok propustkem protékat částí průtočné plochy  $S_c$  a výšce proudu  $y_c$ , z důvodu ovlivnění dolní vodou v propustku a platnosti věty o hybnosti bude v profilu za vtokem zvýšená hloubka  $y_B$ .

Pro obdélníkové propustky se hloubka  $y_B$  stanoví z rovnice hybnosti

$$y_B = \sqrt{y_\sigma^2 + \frac{2 \cdot q^2}{g} \cdot \left( \frac{1}{y_\sigma^2} - \frac{1}{y_c^2} \right)} \quad (4.12)$$

## 4.5 NEROVNOMĚRNÉ USTÁLENÉ PROUDĚNÍ V PROPUSTKU S VOLNOU HLADINOU

Pro průběh hladiny nerovnoměrného ustáleného proudění je důležité, zda se proudění nachází v říčním nebo bystřinném režimu. V případě říčního režimu je průběh hladiny ovlivňován proti směru proudění, u bystřinného režimu je tomu naopak. Režim proudění se stanoví buď porovnáním hloubky proudění s hloubkou kritickou nebo pomocí bezrozměrného Froudova čísla.

Pro říční proudění platí

$$Fr < 1 \quad y > y_k \quad (4.13)$$

a opačně pro bystřinné

$$Fr > 1 \quad y < y_k \quad (4.14)$$

Froudovo číslo se spočítá dle rovnice

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y_s}} \quad (4.15)$$

$$y_s = \frac{S}{B} \quad (4.16)$$

**Fr** [-] Froudovo číslo,  
**y<sub>s</sub>** [m] střední hloubka proudění,  
**S** [m<sup>2</sup>] průtočná plocha,  
**B** [m] šířka hladiny.

Pro obdélníkový profil se kritická hloubka stanoví po úpravě z obecné podmínky kritického proudění

$$y_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot b^2}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot q^2}{g}} \quad (4.17)$$

**B** [m] šířka obdélníkového koryta.

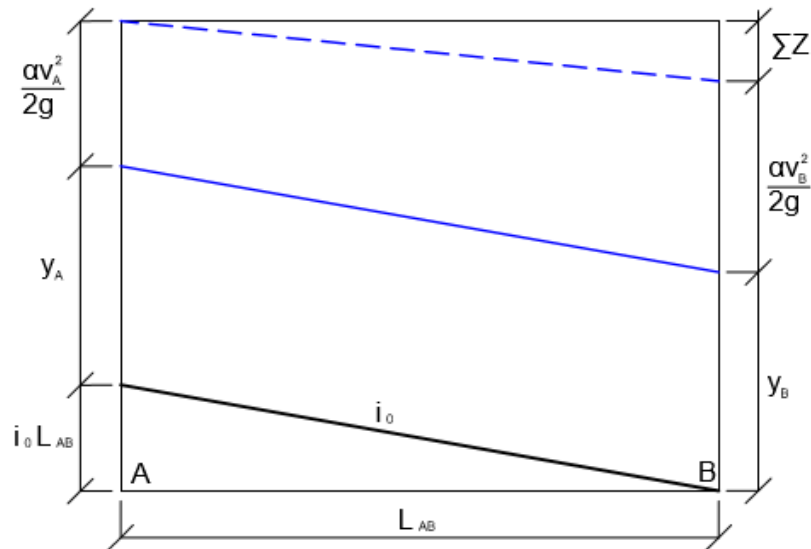
Pro kruhové profily je vhodné použít například empirickou rovnici Diskina (4.18) nebo Abbota (4.19)

$$y_k = D \cdot \left( \frac{\alpha \cdot Q}{\sqrt{g \cdot D^5}} \right) \quad (4.18)$$

$$y_k = \frac{\sqrt{0.32 \cdot Q}}{\sqrt[4]{D}} \quad (4.19)$$

**D** [m] průměr potrubí.

Výpočet průběhu hladiny u nerovnoměrného ustáleného proudění se provádí pomocí metody po úsecích, která je založena na aplikaci Bernoulliho rovnice pro 2 sousední profily. Podélný profil průběhu dna, hladiny i úrovně čáry energie je pro nekonečně malý úsek  $dL$  zobrazen na Obr. 4.24.



Obr. 4.24 Podélný profil dna, hladiny a čáry energie mezi 2 sousedními profily pro ustálené nerovnoměrné proudění

Bernoulliho rovnice má v diferenční podobě tvar

$$i_0 \cdot \Delta L + y_1 + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = y_2 + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \Sigma Z \quad (4.20)$$

- $i_0$  [-] sklon dna propustku,
- $L_{AB}$  [m] vzdálenost mezi profily,
- $y_A, y_B$  [m] hloubky v profilech A a B,
- $v_A, v_B$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] průřezové rychlosti v profilech A a B,
- $\Sigma Z$  [m] součet ztrát mechanické energie mezi profily A a B.

Obecně jsou ztráty mechanické energie při proudění vody tvořeny ztrátami třením a místními ztrátami. U propustků se změna příčného průřezu v podélném profilu nepřipouští, v celé délce se tak jedná o prizmatický profil. V tomto případě se místní ztráta nemusí uvažovat. Celkovou ztrátu je pak možné vyjádřit jako ztrátu třením mezi dvěma sousedními profily za zjednodušujícího předpokladu, že je skutečná ztráta třením blízká ztrátě, která by se vytvořila v případě rovnoměrného proudění ve zprůměrovaném profilu.

$$\Sigma Z = i_E \cdot \Delta L = \frac{Q^2}{K_p^2} \cdot \Delta L \quad (4.21)$$

- $i_E$  [-] sklon čáry energie,
- $K_p$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] průměrná hodnota modulu průtoku v úseku mezi profily 1 a 2.

Průměrný modul průtoku se vypočte z následující rovnice:

$$K_p = \frac{K_1 + K_2}{2} \quad (4.22a)$$

$K_1$  [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>] hodnota modulu průtoku pro profil 1

$K_2$  [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>] hodnota modulu průtoku pro profil 2

Modul průtoku se počítá úpravou z rozšířené rovnice Chezyho

$$K = C \cdot S \cdot \sqrt{R} \quad (4.22)$$

$C$  [m<sup>0.5</sup>·s<sup>-1</sup>] Chézyho rychlostní součinitel,

$S$  [m<sup>2</sup>] průtočná plocha,

$R$  [m] hydraulický poloměr.

Ke stanovení součinitele  $C$  se nejčastěji používá rovnice Manninga

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (4.23)$$

$n$  [s·m<sup>-1/3</sup>] Manningův součinitel drsnosti.

Jak již bylo uvedeno na začátku této kapitoly, při aplikaci rovnice (4.20) je třeba znát charakter proudění v úseku. Pokud má proudění **říční charakter**, výchozí hloubkou je v tomto případě hloubka v dolním profilu  $y_2$ . V případě, že má proudění **charakter bystřinný**, výchozí hloubkou je v tomto případě hloubka v horním profilu  $y_1$ .

Rovnici (4.20) je pro prizmatický profil propustku možné řešit dvěma způsoby. Dle první metody se hledá vzdálenost  $\Delta L$ , kdy dojde ke změně hloubky z dané hloubky  $y_2$  na zvolenou  $y_1$  u říčního proudění nebo z dané hloubky  $y_1$  na zvolenou  $y_2$  u bystřinného proudění dle rovnice (4.24)

$$\Delta L = \frac{\left( y_2 + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} \right) - \left( y_1 + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \right)}{(i_0 - i_E)} \quad (4.24)$$

Druhá metoda spočívá v případě říčního proudění v nalezení hloubky v horním profilu  $y_1$  ve zvolené vzdálenosti  $\Delta L$  od dolního profilu s danou hloubkou  $y_2$ , respektive v nalezení hloubky v dolním profilu  $y_2$  ve zvolené vzdálenosti  $\Delta L$  od horního profilu s danou hloubkou  $y_1$  pro bystřinné proudění. Pro rozdíl úrovní hladin mezi dvěma profily  $\Delta L$  musí platit

$$\Delta E = E_1 - E_2 = i_0 \cdot \Delta L + y_1 - y_2 = \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + i_E \cdot \Delta L - \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \quad (4.25)$$

$E_1, E_2$  [m] energetická výška v profilu 1 a 2

Zatímco první metoda vede k přímému výpočtu, v případě druhé metody je potřeba použít iterační postup. Důvodem je skutečnost, že hodnota sklonu čáry energie dle rovnice (4.21) je funkcí počítané hloubky.

Pro výpočet průběhu hladiny ustáleného nerovnoměrného proudění je k dispozici řada komerčně dostupných softwarů, které jsou vesměs založeny na aplikaci metody po úsecích založených na iteračním postupu řešení rovnice (4.25). Tyto produkty však zpravidla obtížně řeší nerovnoměrné proudění uzavřenými profily. Pro ruční výpočet průběhu hladin vede rychleji k cíli metoda vycházející z řešení rovnice (4.24).

Pro usnadnění výpočtu v kruhovém potrubí je možné použít následující rovnice pro vyčíslení potřebných geometrických rozměrů pro částečně vyplněný kruhový profil s hloubkou vody  $y$ .

Nejprve je potřeba vyčíslit velikost středového úhlu  $\alpha$  [°]

$$\text{pro } y \leq r \quad \alpha = 2 \cdot \arccos\left(\frac{r-y}{r}\right) \quad \text{pro } y > r \quad \alpha = 2 \cdot \arccos\left(\frac{y-r}{r}\right) \quad (4.26)$$

Omočený obvod  $O$  se spočítá dle rovnice

$$\text{pro } y \leq r \quad O = \pi \cdot D \cdot \frac{\alpha}{360} \quad \text{pro } y > r \quad O = \pi \cdot D \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{360}\right) \quad (4.27)$$

Průtočná plocha  $S$

$$\text{pro } y \leq r \quad S = \pi \cdot r^2 \left(\frac{\alpha}{360} - \sin \alpha\right) \quad \text{pro } y > r \quad S = \pi \cdot r^2 \left(1 - \frac{\alpha}{360} + \sin \alpha\right) \quad (4.28)$$

$r$  [m] poloměr kruhového propustku

## 4.6 STANOVENÍ POLOHY VODNÍHO SKOKU V PROPUSTKU

Vodní skok se při proudění s volnou hladinou v propustku vyskytne tehdy, pokud bude mít proudění v části propustku říční charakter a nebude splněna nerovnost (4.10). V takovém případě se vytvoří bezprostředně za vtokem zúžená hloubka  $y_c$ , která bude vždy menší než kritická, proudění tedy bude v tomto místě bystřinné. Přechod z bystřinného na říční režim se realizuje ve vodním skoku, který je charakterizován dvěma vzájemnými hloubkami  $y_1$  a  $y_2$  a délkou skoku  $L_s$ .

Speciální případ nastane, pokud platí

$$y_2 = y_\sigma \quad (4.29)$$

Hodnota  $y_2$  se stanoví pro obdélníkový profil z rovnice (4.11) pro  $y_1 = y_c$ , kde  $y_c$  se stanoví z grafů na Obr. 4.21 až Obr. 4.23.

V případě kruhového propustku se ke stanovení druhé vzájemné hloubky vodního skoku použije závislost z Obr. 4.13 až Obr. 4.16. Hloubka  $y_\sigma$  se vypočítá např. metodou po úsecích pro nerovnoměrné proudění v říčním režimu od výtokového profilu směrem proti proudu až k profilu s druhou vzájemnou hloubkou.

Častější ovšem bude případ, kdy

$$y_2 > y_\sigma \quad (4.30)$$

V tomto případě se poloha vodního skoku objeví někde ve střední části propustku. K nalezení polohy vodního skoku je potřeba vyřešit průběh hladiny nerovnoměrného proudění v bystřinném režimu od místa zúžené hloubky za vtokem  $y_c$  ve směru proudění. K nalezení místa vodního skoku je potřeba najít profil na křivce nerovnoměrného proudění v bystřinném režimu s takovou hloubkou proudění, že pokud se označí  $y_1$  a dopočítá se pro ni podle postupů uvedených na začátku této kapitoly druhá vzájemná hloubka  $y_2$ , bude tato hloubka shodná s hloubkou vody v místě vzdáleném o délku vodního skoku  $L_s$  ve směru toku vypočítanou pro průběh hladiny nerovnoměrného proudění v říčním režimu. Délku vodního skoku je možné stanovit například dle empirické rovnice Smetany. Pro praktické výpočty není nutné polohu vodního skoku vyčíslovat.

$$L_s = 6 \cdot (y_2 - y_1) \quad (4.31)$$

## 4.7 ZTRÁTY TŘENÍM PŘI TLAKOVÉM PROUDĚNÍ V PROPUSTKU

Ztráty třením při tlakovém proudění v propustku se řeší pomocí Darcy-Weisbachovy rovnice

$$Z_t = \frac{\lambda \cdot L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4.32)$$

- $\lambda$  [-] součinitel tření,  
 $L$  [m] délka úseku s tlakovým prouděním,  
 $D$  [m] vnitřní průměr propustku,  
 $v$  [m·s<sup>-1</sup>] průřezová rychlost vody v propustku při tlakovém proudění.

Součinitel tření  $\lambda$  závisí obecně na relativní drsnosti a Reynoldsově číslu dle následující rovnice

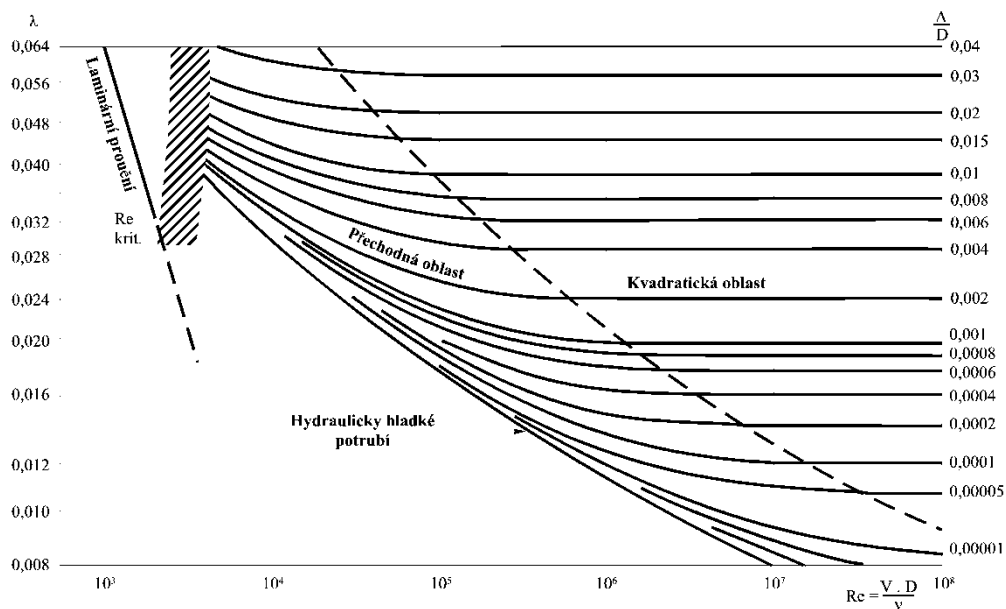
$$\lambda = \text{fce} \left( \frac{\Delta}{D}; \text{Re} \right) \quad (4.33)$$

$$\text{Re} = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (4.34)$$

- $\Delta$  [m] hydraulická drsnost,  
 $\text{Re}$  [-] Reynoldsovo číslo,  
 $\nu$  [m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>] kinematická viskozita.

Reynoldsovo číslo umožňuje stanovit, zda proudění probíhá v laminárním ( $\text{Re} < \text{Re}_k \approx 2320$ ) nebo turbulentním režimu ( $\text{Re} > \text{Re}_k \approx 2320$ ). Oblast turbulentního proudění se dále člení na hydraulicky hladké potrubí ( $\lambda = \text{fce}(\text{Re})$ ), kvadratickou oblast turbulentního proudění ( $\lambda = \text{fce}(\Delta/D)$ ), pouze v přechodné oblasti turbulentního proudění závisí součinitel tření  $\lambda$  na obou parametrech dle rovnice (4.33). Ke stanovení režimu proudění lze výhodně využít známý Moodyho diagram (viz Obr. 4.25).





Obr. 4.25 Moodyho diagram

Uvedený graf je možné použít rovněž ke stanovení hodnoty  $\lambda$ , k tomu dále slouží i řada empirických rovnic platných pro uvedené oblasti charakteru proudění. V případě tlakového proudění propustky se zejména za povodňových průtoků bude vyskytovat turbulentní proudění v kvadratické nebo přechodné oblasti. Pro výpočet součinitele tření lze použít rovnici Frenkela, jejíž platnost pokrývá obě zmíněné oblasti proudění.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left( \left( \frac{6.81}{Re} \right)^{0.9} + \frac{\Delta}{3.7 \cdot D} \right) \quad (4.35)$$

$\Delta$  [m] hydraulická drsnost

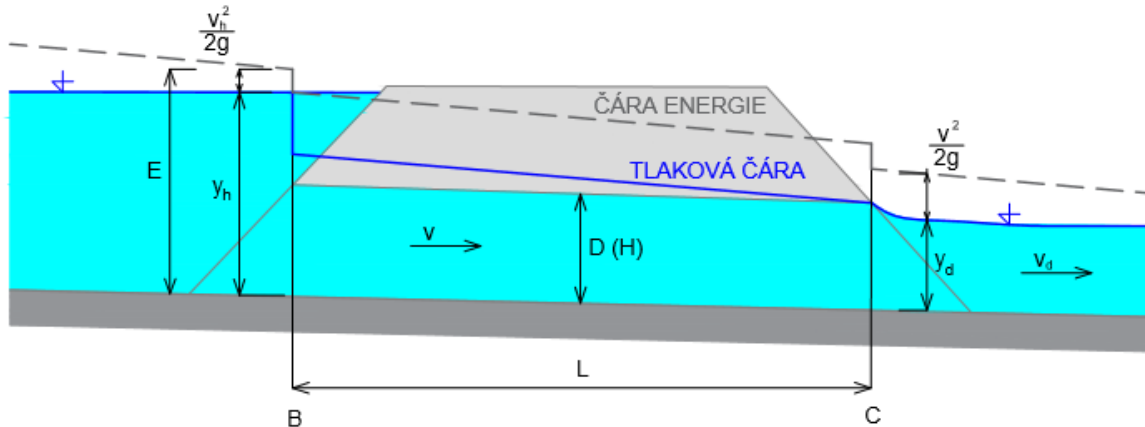
Hodnoty hydraulické drsnosti betonového potrubí je možné odhadnout s využitím následující Tab. 4.4.

Charakter vnitřního povrchu potrubí	$\Delta$ [m]
Hladké betonové potrubí	$\leq 0.001$
Betonové potrubí s drsným povrchem	$\geq 0.003$

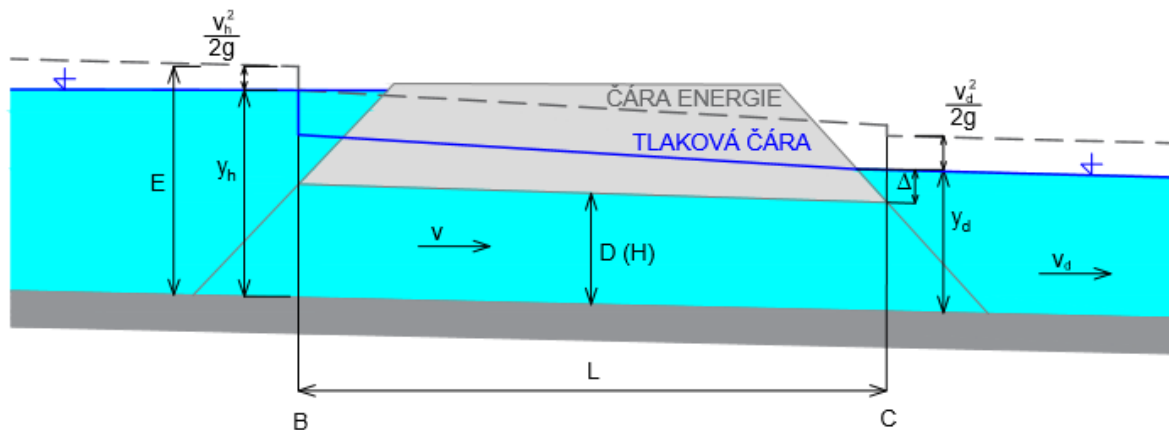
Tab. 4.4 Hodnoty hydraulické drsnosti betonového potrubí v závislosti na charakteru vnitřního povrchu potrubí

## 4.8 PODMÍNKA ZATOPENÍ DOLNÍHO ČELA PROPUSTKU

U propustků v tlakovém režimu proudění na celé délce se může vyskytovat výtok zatopený či nezatopený. Pro pochopení problematiky je nutné si objasnit pojem strop propustku, který lze definovat jako vnitřní horní hranu příčného průřezu propustku. Na obrázku Obr. 4.26 je vyobrazen propustek nezatopený dolní vodou a je možné sledovat pokles hladiny těsně za výtokem z propustku. Naproti tomu obrázek Obr. 4.27 znázorňuje propustek zatopený dolní vodou a je z něj patrné, že úroveň hladiny dolní vody je výš než strop propustku.



Obr. 4.26 Propustek s výtokem nezatopeným dolní vodou



Obr. 4.27 Propustek s výtokem zatopeným dolní vodou

Zda se jedná o výtok zatopený nebo nezatopený dolní vodou je možno určit pomocí rovnice vyjadřující minimální převýšení úrovně dolní vody nad stropem propustku:

$$\Delta_{min} = \frac{v_d(v - v_d)}{g} \quad (4.36)$$

$v_d$  [m·s<sup>-1</sup>] průřezová rychlost proudění v korytě za výtokem z propustku,

$v$  [m·s<sup>-1</sup>] průřezová rychlost proudění v propustku.

Pokud je skutečné převýšení úrovně hladiny dolní vody nad stropem propustku větší než minimální ( $\Delta > \Delta_{min}$ ), jedná se o výtok zatopený dolní vodou. Pokud je naopak reálné převýšení menší než minimální ( $\Delta < \Delta_{min}$ ), je výtok dolní vodou nezatopený.

V případě zatopeného výtoku propustku je převýšení hladiny dolní vody nad stropem propustku dáno vztahy

pro obdélníkový propustek:  $\Delta = y_d - H$  (4.37)

pro kruhový propustek:  $\Delta = y_d - D$  (4.38)

$y_d$  [m] hloubka vody za výtokem z propustku.

## 4.9 MÍSTNÍ ZTRÁTA NA VÝTOKU Z PROPUSTKU

Pro výpočet místní ztráty na výtoku z propustku bylo doposud používáno několik přístupů. Jeden je založen na aplikaci metody řešící místní ztrátu náhlým rozšířením průměru potrubí při tlakovém proudění. Rovnice pro výpočet ztrátové výšky byla odvozena na základě využití rovnice Bernoulliho a věty o hybnosti a je známá jako Bordova ztráta

$$Z_{VY} = \frac{(v - v_d)^2}{2 \cdot g} \quad (4.39)$$

$Z_{VY}$  [m] místní ztráta na výtoku z propustku,

$v_d$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] průřezová rychlost proudění v korytě za výtokem z propustku.

$v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] průřezová rychlost proudění v propustku.

V případě, že by byl výtok umístěn do prostoru s minimální rychlostí proudění, bylo možné využít výraz počítající ztrátu stejně jako při výtoku z potrubí do velké nádrže

$$Z_{VY} = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4.40)$$

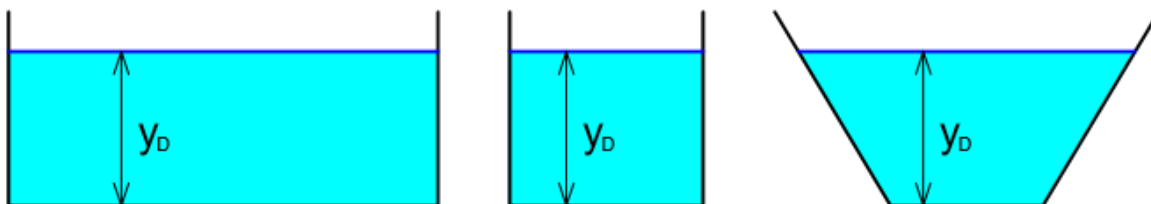
Posledním přístup je založen na užití výpočtu místní ztráty náhlým rozšířením průřezu při výpočtu průběhu hladiny nerovnoměrného proudění s volnou hladinou.

$$Z_{VY} = \frac{\xi_{VY} \cdot (v^2 - v_d^2)}{2 \cdot g} \quad (4.41)$$

$\xi_{VY}$  [-] součinitel místní ztráty na výtoku z propustku (běžně 1.0 nebo 0.75).

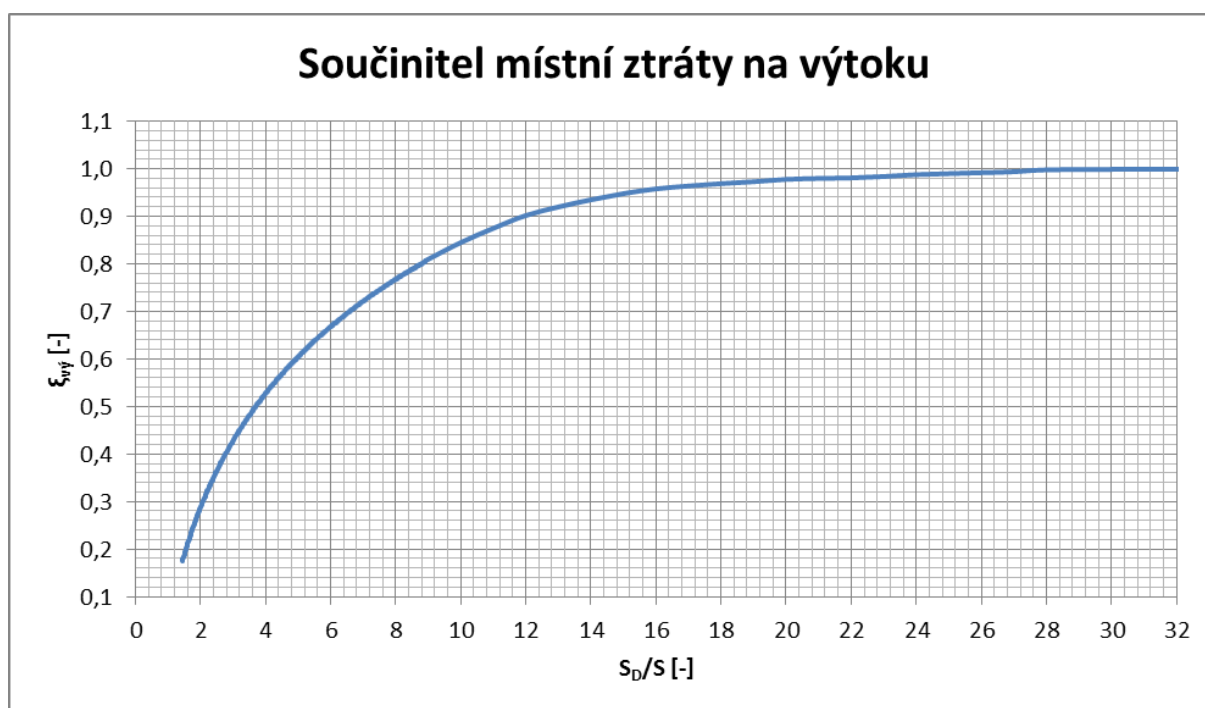
Za účelem zjistit, který z uvedených tří přístupů by se měl pro výpočet ztráty použít, byly provedeny experimenty na fyzikálním modelu. Z provedených experimentů byl učiněn závěr, že nejpřesněji je místní ztráta na výtoku spočtena pomocí Bordova výrazu, rovnice (4.39).

Bordův výraz však není aplikován v současně používaných výpočetních programech, které pro výpočet využívají rovnici (4.41). Do softwaru je tedy nutno zadat jako vstupní parametr konkrétní hodnotu součinitele místní ztráty na výtoku  $\xi_{VY}$ . Je tedy třeba rozhodnout a dát doporučení, kterou z hodnot  $\xi_{VY} = 1.0$  nebo  $\xi_{VY} = 0.75$  je vhodné používat. Výzkumem bylo dokázáno, že ani jedna z hodnot neodpovídá libovolné situaci. Lze stanovit, že tato hodnota dokonce není konstantní, nýbrž se v závislosti na ostatních podmínkách mění. Byla zjištěna logaritmická závislost hodnoty součinitele místní ztráty na výtoku na poměru průtočných ploch. Na Obr. 4.29 lze sledovat graf, kde na vodorovné ose je vyneseno poměr průtočné plochy koryta ( $S_D$ ) k průtočné ploše propustku ( $S$ ). Ať už se jedná o koryto čtvercové, obdélníkové či lichoběžníkové, průtočná plocha se spočte jako obsah tohoto obrazce omezeného danou hloubkou  $y_d$  jak lze vidět na Obr. 4.28. Průtočná plocha propustku se při tlakovém proudění spočte jako obsah kruhu, čtverce či obdélníka v závislosti na tvaru profilu propustku. Na svislé ose je naopak vyneseno součinitel místní ztráty na výtoku, který se poté použije do výpočtu.



Obr. 4.28 Ukázka průtočných ploch koryta za dané hloubky  $y_D$

Výzkumem bylo zjištěno, že součinitel není příliš závislý na průtoku, ale především na míře zatopení, což je v tomto případě vyjádřeno poměrem průtočných ploch. Jak lze vidět na grafu, při poměru průtočných ploch větším než 25 už se jedná o tzv. velkou nádrž, takže je součinitel místní ztráty na výtoku roven jedné. Při výtoku do velké nádrže se používá rovnice (4.40), která je obdobou rovnice (4.41) s tím rozdílem, že pro velkou nádrž je hodnota  $v_D = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a hodnota součinitele  $\xi_{vy} = 1.0$ .



Obr. 4.29 Závislost výtokového součinitele na poměru průtočných ploch

#### 4.10 PODMÍNKY TLAKOVÉHO PROUDĚNÍ

Podmínku, zda bude proudění v propustku tlakové nebo s volnou hladinou je možné velmi přibližně stanovit s pomocí rozšířené Chezyho rovnice za předpokladu, kdy je omočený obvod  $O$  roven obvodu kruhu a průřezová plocha  $S$  rovna ploše kruhu. Pro betonový propustek s uvažování hodnoty Manningova součinitele drsnosti  $n = 0.013$  pak vychází „kapacitní“ průtok na přechodu mezi prouděním s volnou hladinou a tlakovým režimem

$$Q_D = 24 \cdot D^{8/3} \cdot i_0^{1/2} \quad (4.42)$$

V případě dlouhých propustků je možné považovat proudění za tlakové v celém profilu, pokud budou platit dvě podmínky a to, že hloubka vody v korytě za propustkem bude větší než průměr (výška) propustku  $y_D > D$  ( $y_D > H$ ) a současně návrhový průtok bude větší než kapacitní  $Q_N > Q_D$ .

## 5 DŮLEŽITÉ POZNATKY Z VÝZKUMU

Cílem výzkumu bylo přispět k bezpečnějšímu převedení povodňových průtoků, k čemuž sloužil rozsáhlý výzkum na fyzikálních a matematických modelech. Jako první cíl si výzkum stanovil ověření parametrů vstupujících do výpočtů a předpokladů, které byly až dosud do výpočtu zaváděny. Zvýšená pozornost byla věnována zejména hydraulickým jevům v oblasti vtokové a výtokové, kde doposud používané metody a postupy nepřinášely zcela uspokojivé výsledky. Ověřované předpoklady, parametry a postupy jsou popsány v kapitole 1.2. Ověření výpočetních postupů pro praktické navrhování propustků bylo zaměřeno na stanovení vzduté úrovně hladiny před vtokem do propustku, která by měla být pro projektanty cílovým návrhovým parametrem. Následující podkapitoly se budou podrobně zabývat jednotlivými poznatky, které vzešly z provedeného výzkumu.

### 5.1 VÝPOČET PRŮBĚHU HLADIN V PROPUSTKU METODOU PO ÚSECÍCH

Problematikou stanovení vzduté hladiny před propustkem se podrobně zabývají kapitola 4 a kapitola 6. V průběhu zpracování vzorových příkladů došli zpracovatelé k potřebě řešit výpočet vzduté hladiny nad propustkem i metodou nerovnoměrného proudění (metodou po úsecích). Tato metoda může činit projektantů bez specializace ve vodním hospodářství problémy, ale její použití bylo vyhodnoceno jako nezbytné, jelikož přílišné zjednodušení by mohlo vést k chybnému výpočtu vzduté hladiny nad propustkem.

### 5.2 KOLÍSÁNÍ A ZMĚNA REŽIMŮ PROUDĚNÍ V PODÉLNÉM PROFILU PROPUSTKU

Jak je zmíněno v úvodu metodiky, propustky jsou z hydraulického hlediska jedny z nejkomplicovanějších objektů, kde existuje cca sedmdesát režimů proudění, které mohou při převádění průtoků nastat. Může dojít ke kombinaci jednotlivých režimů, kdy např. část propustku bude v režimu tlakovém a část v režimu s volnou hladinou. Rovněž v rámci tlakového proudění může docházet ke střídání podtlakového a přetlakového režimu, což samozřejmě ovlivňuje kapacitu propustku. Podtlakový režim kapacitu propustku zvětšuje, přetlakový naopak snižuje. Negativním dopadem podtlakového režimu je však porušování spojovacího materiálu ve spárách.

Metodikou ani výzkumem nelze všechny režimy detailně postihnout a tak k nim dodat podrobný návod v podobě výpočetního manuálu. Při návrhu je nutno použít inženýrský způsob myšlení spolu se znalostí hydrauliky, která je založena na předpokladech a následně jejich ověření. Znamená to, že k výsledku se často dostaneme postupnou iterací, kdy si například metodou po úsecích ověříme průběh hladin a zjistíme režim proudění.

Z hlediska navrhování propustků se projektantům jednoznačně doporučuje vyhnout se v rámci návrhu kombinaci režimů proudění, které představují nežádoucí dynamické kolísání hladiny a nestabilitu. Pokud tedy dojde při návrhu ke zjištění, že v části propustku bude režim o volné hladině a v části tlakový režim, doporučuje se takovému stavu předejít tím, že bude navržen větší příčný profil propustku, což zvýší jeho kapacitu a bude se v něm vyskytovat pouze režim o volné hladině. (viz diagram Příloha A2).

### 5.3 STANOVENÍ SOUČINITELE MÍSTNÍ ZTRÁTY NA VTOKU PRO VÍCENÁSOBNÉ PROPUSTKY

Kromě ověření standartních postupů, parametrů a vstupů se výzkum zaměřil na běžně se vyskytující způsoby řešení propustků. Jedním takovým klasickým případem jsou tzv. vícenásobné propustky (viz Obr. 5.1), které jsou aplikovány v případě, kdy nelze z výškových a konstrukčních důvodů realizovat pouze jeden průtočný profil s větší světlostí. Otázkou bylo, zda může být pro toto řešení použit stejný součinitel místní ztráty na vtoku jako pro jeden průtočný profil.



Obr. 5.1 Vícenásobné propustky na pozemní a železniční dopravní komunikaci

Hydraulické vlastnosti propustků tvořených paralelními rourami byly zkoumány na hydraulickém modelu, jehož ukázka je zdokumentována na obrázku 5.2. Vyhodnocení experimentů nepřineslo žádné významné rozdíly jak v hodnotách ztrátových součinitelů, tak i v závislostech pro vývoj zúžených hloubek za vtokem yc oproti případům s jedním potrubím.



Obr. 5.2 Fyzikální model propustku tvořeného 2 paralelními rourami

Konstrukční řešení bylo ověřeno na fyzikálním modelu s výsledkem, že hodnota součinitele místní ztráty na vtoku je pro vícenásobné propustky stejná jako v případě jednoho průtočného profilu. Stále však platí, že se součinitel místní ztráty na vtoku musí řídit odpovídajícím konstrukčním typem vtoku do propustku viz tabulka 4.1 a 4.2.



## 5.4 STANOVENÍ SOUČINITELE MÍSTNÍ ZTRÁTY NA VTOKU PRO PROPUSTKY S PŘÍTOKEM VODY POD OSTRÝM ÚHLEM

Dalším případem, který se v praxi často vyskytuje, je případ svedení průtoku do propustku pod velice ostrým úhlem, který často činí  $90^\circ$  (viz Obr. 5.3). Tento případ se většinou vyskytuje při odvodnění silničních a dálničních těles, kdy je průtok veden svodem podél komunikace a pak je náhle pod úhlem cca  $90^\circ$  zaústěn do propustku, který je kolmý na komunikaci.

V tomto případě byl jako modelový nástroj použit 3D matematický model, který simuloval nátok do propustku s kolmým čelem. Úhel nátoku byl  $90^\circ$  a cílem bylo odpovědět na otázku, zda je za těchto podmínek možno ve výpočtu použít stejnou hodnotu součinitele místní ztráty na vtoku jako v případě propustků se souběžným nátokem. Pomocí simulace můžeme konstatovat, že hodnota součinitele místní ztráty je stejná jako pro souběžný nátok, ale je zde nutno uvažovat s příčným sklonem hladiny a tudíž i nutností opevnění zatěžované strany břehu proti dynamickým účinkům vod.



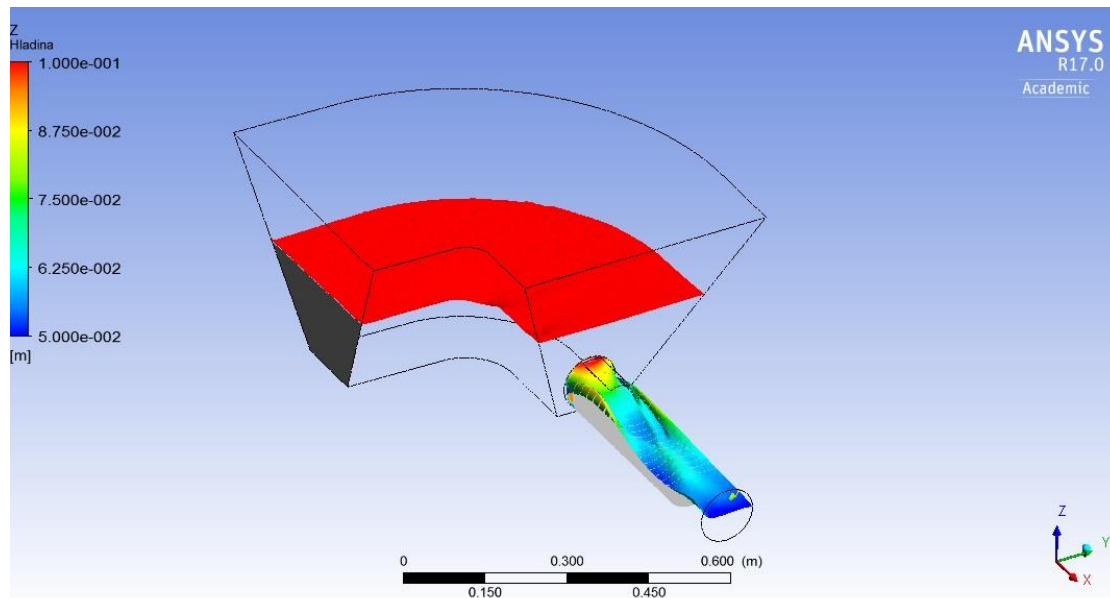
Obr. 5.3 Kolmý nátok do propustku

Problematika nátoku do takových propustků byla řešena na 3D matematickém modelu ANSYS. Výsledky prostorového průběhu hloubek a svislicových rychlostí jsou vykresleny na obrázcích 5.4 a 5.5.

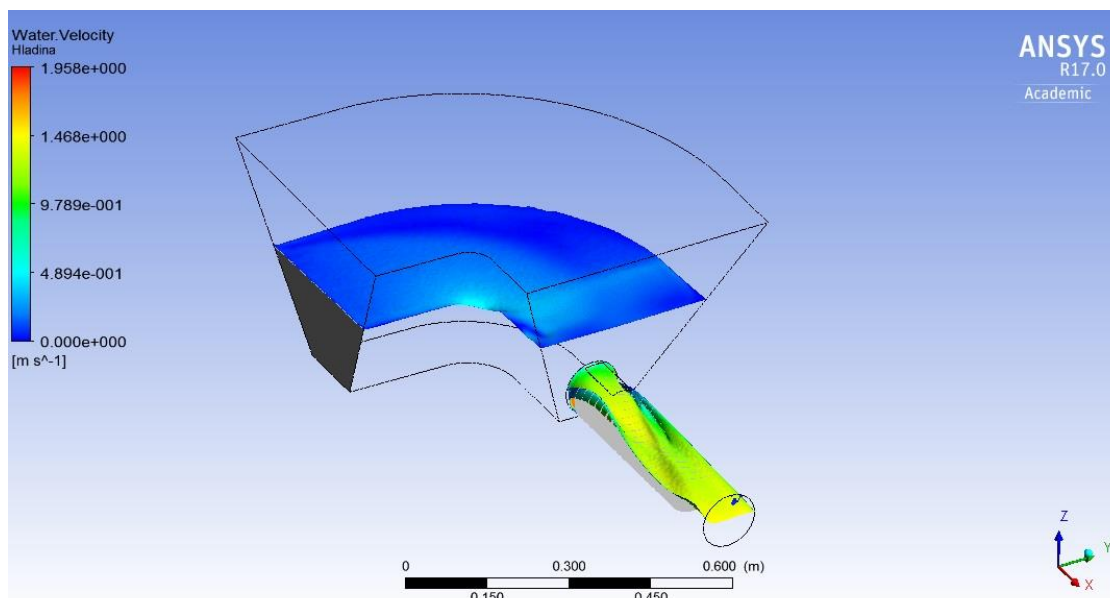
Výsledky simulací je možné shrnout do těchto závěrů:

- před vtokem do propustku se vytváří příčný sklon hladiny s hloubkami většími u vnějšího (konkávního) břehu
- k asymetrickému rozdělení dochází i u svislicových rychlostí, maxima se naopak objevují u vnitřního (konvexního) břehu
- výsledky výzkumu neukázaly na ovlivnění hodnot součinitelů místní ztráty na vtoku v porovnání s přímým nátokem.

Při návrhu nátoku do propustku pod ostrým úhlem se proto doporučuje s příčným sklonem hladiny zejména ve vrcholu oblouku uvažovat a vnější břeh navrhnout jako převýšený. U nátoku v oblouku je zvýšenou měrou potřebné se zabývat případnými opatřeními k zamezení ucpání vtoku do propustku splávním, které může hrozit více než u přímého nátoku.



Obr. 5.4 Prostorový průběh hloubek vody při nároku do propustku v oblouku



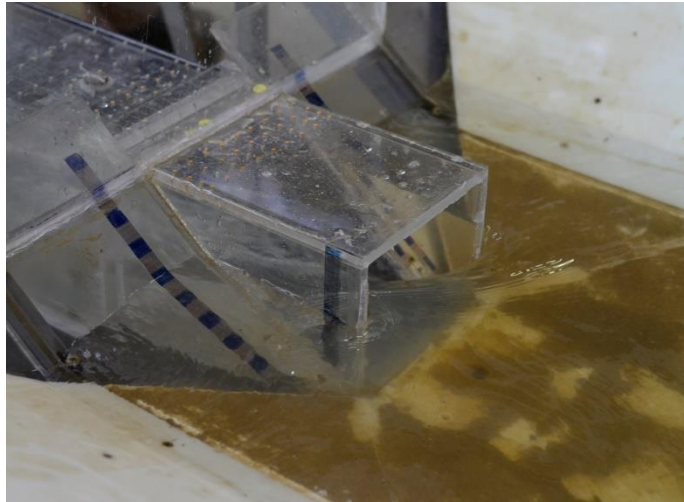
Obr. 5.5 Prostorový průběh vřicových rychlostí při nároku do propustku v oblouku

## 5.5 OMEZENÍ PRO VYUŽITÍ PŘEDSAZENÉHO VTOKU DO PROPUSTKU

V průběhu výzkumu došlo i ke znepokojivým zjištěním, kterým je třeba se v projekční praxi vyvarovat. Při ověřování součinitele místní ztráty pro tzv. předsazený nátok (Obr. 2.1) bylo zjištěno, že dochází ke značné nestabilitě hladin na obou stranách nátok. Tato nestabilita hladin se projevuje především při proudění s volnou hladinou, kdy nejnejpříznivější situace vznikala při realizaci šikmého svahu komunikace za nátokem. (Obr. 5.6). Nestabilita hladin u nátok způsobovala i nestabilitu proudění v samotném propustku. Při režimu se zahlceným vtokem a tlakovým prouděním se nestabilita hladin neprojevuje.

Příčinou nestability byla z hydraulického hlediska především kombinace přímého nátoku do propustku z koryta toku a šikmý náběh svahu komunikace vedle předsazeného nátoku.

Na základě těchto výsledků nedoporučujeme realizovat předsazený vtok propustku do míst, kde lze očekávat koncentraci průtoku přímo z koryta toku. Nicméně, předsazený vtok je možno realizovat jako inundační propustek, kde lze předpokládat široké rozlivy s malou přítokovou rychlostí.



*Obr. 5.6 Předsazený nátok do propustku výzkumu na hydraulickém modelu*

## 5.6 VYUŽITÍ OPATŘENÍ PRO ZACHYTÁVÁNÍ SPLÁVÍ

Kapitola 5.6 se zabývá možností zachytávání spláví na vtoku, nebo ještě lépe před vtokem do propustku, formou česlí. Jak je zmíněno v samotné kapitole 8, cílem konstrukce česlí je umožnit průchod jemného spláví a zachycení by mělo dojít pouze spláví větších rozměrů u nichž by hrozilo, že zablokují vtok propustku nebo uvíznou v samotném propustku.

Samostatnou otázkou byla hodnota ztráty, kterou konstrukce česlí způsobuje. Z výzkumu vyplynulo, že vzhledem tomu, že rozteč česlic byla navržena v intervalu 10 - 20 cm byla ztráta způsobená konstrukcí česlic zanedbatelná.

## 6 VZOROVÉ PŘÍKLADY

### 6.1 KRUHOVÝ PROPUSTEK S KOLMÝM ČELEM PŘI PROUDĚNÍ S VOLNOU HLADINOU

Stanovte vzdutí hladiny betonovým kruhovým propustkem o průměru  $D = 0.9 \text{ m}$  v případě proudění návrhového průtoku  $Q_{100} = 0.76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Propustek je dlouhý  $22 \text{ m}$  a sklon dna je  $i_0 = 0.002$ . Úroveň hladiny v korytě za propustkem je  $y_d = 0.85 \text{ m}$ .

#### Posouzení charakteru proudění ve výtokovém profilu propustku

Nejprve je třeba posoudit, zda bude proudění v propustku s volnou hladinou nebo tlakové. Hloubka vody ve výtokovém profilu propustku bude rovna hloubce vody za výtokem  $y_d$ . Pro stanovení kritické hloubky v propustku je možné použít například rovnici (4.19)

$$y_k = \frac{\sqrt{0.32 \cdot Q}}{\sqrt[4]{D}} = \frac{\sqrt{0.32 \cdot 0.76}}{\sqrt[4]{0.9}} = 0.51 \text{ m}$$

Vzhledem k tomu, že je  $y_d > y_k$ , a zároveň  $y_d < D$  bude se na výtoku z propustku jednat o proudění s volnou hladinou v říčním režimu.

#### Výpočet nerovnoměrného proudění v propustku

Výpočet bude proveden tabelárně dle rovnice (4.24), výpočet ztráty třením dle rovnice (4.21). Nejprve byla stanovena vzdálenost, kdy dojde ke změně hloubky z  $0.850 \text{ m}$  na  $0.825 \text{ m}$ , v dalším kroku z hloubky  $0.825$  na  $0.805 \text{ m}$ .

y	S	O	R	C	K	v	v <sup>2</sup> /2g	K <sub>p</sub>	i <sub>e</sub>	L	ΣL
0.850	0.622	2.396	1.490	82.20	62.39	1.22	0.076				0.00
0.825	0.611	2.299	1.404	81.39	58.88	1.24	0.079	60.63	0.000157	12.0	12.0
0.805	0.600	2.230	1.338	80.75	56.04	1.27	0.082	57.46	0.000175	9.4	21.4

Hloubka vody nerovnoměrného proudění za vtokem do propustku vychází  $y_\sigma = 0.805 \text{ m}$ . V celé délce propustku se bude jednat o proudění s volnou hladinou, protože  $y_j < D$ .

#### Analýza proudění za vtokem do propustku

Ke stanovení potřebných parametrů proudění za vtokem do propustku je potřeba vyčíslit bezrozměrný průtok

$$\frac{Q}{g^{0.5} \cdot D^{2.5}} = \frac{0.76}{9.81^{0.5} \cdot 0.9^{2.5}} = 0.316$$

Pro tuto hodnotu byly z grafu Obr. 4.13 odečteny hodnoty  $y_1/D = 0.460$  m a  $y_2/D = 0.69$  m. Pro průměr  $D = 0.9$  m se obdrží  $y_1 = y_c = 0.41$  m a  $y_2 = 0.62$  m. Vzhledem k tomu, že  $y_\sigma > y_2$ , dojde k zavzdutí vodního skoku dolní vodou v propustku. Relativní hloubka proudění v profilu **B** za vtokem  $y_B/D = 0.68$  m byla proto potom stanovena z grafu Obr. 4.17 pro poměr  $y_d/D = 0,805/0,9 = 0.89$ . Hloubka  $y_B$  pak vychází **0.61** m.

### Výpočet vzduté hloubky nad propustkem

Pro výpočet vzduté hloubky proudění v profilu A před vtokem do propustku  $y_A = y_h$  je potřeba v tomto případě použít Bernoulliho rovnici (4.2) sestavenou pro profily **A** a **B**. Součinitel místní ztráty zúžením proudu na vtoku do propustku  $\xi_{VTZ} = 0.10$  byl převzat z tabulky Tab. 4.1, Coriolisovo číslo bylo uvažováno hodnotou  $\alpha = 1.0$ . Z výše provedené analýzy vyplynula výška zúženého proudu za vtokem  $y_c = 0.41$  m a z ní plocha části průřezu  $S_c = 0.282$  m<sup>2</sup> a hloubka vody v tomto profilu  $y_B = 0.608$  m. Výpočet hloubky  $y_h$  je

$$y_h = y_B + (\alpha + \xi_{VTZ}) \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot S_c^2} = 0.61 + (1 + 0.05) \cdot \frac{0.76^2}{19.62 \cdot 0.282^2} = 1.02 \text{ m}$$

Vzdutá hloubka vody  $y_h$  je **1.02** m.

## 6.2 KRUHOVÝ PROPUSTEK S HYDRAULICKY ROZŠÍŘENÝM NÁTOKEM PŘI PROUDĚNÍ S VOLNOU HLADINOU

Křížení potoka se silnicí je realizováno betonovým propustkem s kónickým provedením vtoku. Propustek má průměr  $D = 1.2 \text{ m}$ , délku  $L = 10.0 \text{ m}$ , sklon dna je vodorovný. Prizmatické koryto pod propustkem se sklonem dna  $i_0 = 0.001$  má lichoběžníkový tvar s šířkou ve dně  $2 \text{ m}$  a sklonem zatravněných svahů  $1 : 2$ . Určete vzdutou hloubku před vtokem do propustku pro průtok  $Q = 0.68 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

### Výpočet hloubky v korytě za výtokem z propustku

Vzhledem k tomu, že je koryto za propustkem prizmatické, je možné hloubku vypočítat pro rovnoměrné proudění. Parametry rovnoměrného proudění je možné spočítat pomocí Chezyho rovnice

$$Q = S \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i}$$

z ní se bohužel nedá vyjádřit hloubka vody exaktně. Pro stanovení hloubky proudění při daném průtoku se nejčastěji používá konzumpční křivka nebo tabelární výpočet s postupným přibližováním správné hodnotě. Takový přístup je ukázán v následující tabulce, k výpočtu Chezyho rychlostního součinitele byla použita rovnice Manningova (4.23).

$y_d$ [m]	$S_d$ [m <sup>2</sup> ]	$O_d$ [m]	$R_d$ [m]	$C_d$ m <sup>0.5</sup> ·s <sup>-1</sup>	$Q$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
0.45	1.31	4.01	0.33	25.1	0.591
0.48	1.42	4.15	0.34	25.4	0.667
<b>0.485</b>	<b>1.44</b>	<b>4.17</b>	<b>0.35</b>	<b>25.4</b>	<b>0.680</b>
0.49	1.46	4.19	0.35	25.4	0.693
0.50	1.50	4.24	0.35	25.5	0.719

Hloubka proudění vody v korytě při průtoku  $Q = 0.68 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  za výtokem z propustku  $y_d$  bude **0.485 m**.

### Kritická hloubka v propustku

Podobně jako v předchozím případě byla pro výpočet kritické hloubky v propustku užitá empirická rovnice (4.19)

$$y_k = \frac{\sqrt{0.32 \cdot Q}}{\sqrt[4]{D}} = \frac{\sqrt{0.32 \cdot 0.68}}{\sqrt[4]{1.2}} = 0.44 \text{ m}$$

Kritická hloubka v propustku je  $y_k = 0.44 \text{ m}$ , to je méně než hloubka proudění v korytě pod propustkem  $y_d$ . To znamená, že se jedná o říční režim proudění, takže výpočet nerovnoměrného proudění bude postupovat proti proudu.

### Výpočet nerovnoměrného proudění v propustku pro říční režim

Výpočet bude proveden opět tabelárně dle rovnice (4.24), výpočet ztráty třením dle rovnice (4.21). Vzhledem ke krátké délce propustku byl průběh hladiny spočítán pro jediný úsek.

$y$	$S$	$O$	$R$	$C$	$K$	$v$	$v^2/19.62$	$K_p$	$i_e$	$L$	$\Sigma L$
0.485	0.428	1.654	0.708	72.62	26.16	1.59	0.129				<b>0.00</b>
0.495	0.434	1.675	0.728	72.95	27.03	1.57	0.125	26.59	0.000654	9.73	<b>9.73</b>

Hloubka vody nerovnoměrného proudění v případě říčního proudění za vtokem do propustku vychází  $y_\sigma = 0.495$  m.

### Analýza proudění za vtokem do propustku

Ke stanovení potřebných parametrů proudění za vtokem do propustku je potřeba vyčíslit bezrozměrný průtok

$$\frac{Q}{g^{0.5} \cdot D^{2.5}} = \frac{0.68}{9.81^{0.5} \cdot 1.2^{2.5}} = 0.138$$

Pro tuto hodnotu byly z grafu 3.11 odečteny hodnoty relativních hloubek  $y_1/D = 0.32$  m a  $y_2/D = 0.44$  m. Skutečné hloubky se získají po násobení průměrem  $D = 1.2$  m, tedy  $y_1 = y_c = 0.38$  m a  $y_2 = 0.53$  m. Protože platí v tomto případě nerovnost  $y_\sigma < y_2$ , nedojde k zavzdutí vtokové části dolní vodou. Vzhledem k tomu, že je  $y_c < y_k$ , bude se ve vtokové části vyskytovat bystřinné proudění. Vodní skok, kde dojde ke změně režimu proudění z bystřinného na říční, bude oddálený.

### Výpočet vzduté hloubky nad propustkem

Pro výpočet vzduté hloubky proudění v profilu A nad propustkem  $y_A = y_h$  bude opět použita Bernoulliho rovnice (4.2) sestavená pro profily A a B. Součinitel místní ztráty rozšířením proudu na vtoku do propustku  $\xi_{VTZ} = 0.05$  byl převzat z tabulky Tab. 4.1, Coriolisovo číslo bylo uvažováno hodnotou  $\alpha = 1.0$ . Hloubka vody v profilu za vtokem  $y_B$  bude rovna dle předchozí analýzy  $y_c = 0.38$  m a průtočná plocha v tomto profilu  $S_c = 0.282$  m<sup>2</sup>.

$$y_h = y_B + (\alpha + \xi_{VTZ}) \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot S_c^2} = 0.38 + (1 + 0.05) \cdot \frac{0.68^2}{19.62 \cdot 0.190^2} = 1.10 \text{ m}$$

Vzdutá hloubka vody  $y_h$  je 1.10 m.

### 6.3 KRUHOVÝ PROPUSTEK S TLAKOVÝM REŽIMEM SE ZATOPENÝM VÝTOKEM

Betonový propustek kruhového profilu  $D = 1.1 \text{ m}$  má délku  $L = 25 \text{ m}$  a sklon dna  $i_0 = 0.0001$ . Hloubka dolní vody resp. průřezová rychlost byla na potoce stanovena v minulosti na  $y_d = 1.45 \text{ m}$ ,  $S_d = 5.95 \text{ m}^2$  resp.  $v_d = 1.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Propustek má šikmé vtokové čelo.

S ohledem na inundační území byla maximální dovolená úroveň hladiny horní vody při návrhovém průtoku stanovena na kótě **246.40 m n. m.** Kóta dna toku před objektem je **243.86 m n. m.** Je nutné posoudit, zda propustek tomuto limitu vyhoví.

Stejně jako v předchozích případech se musí návrhový (NP) a kontrolní návrhový průtok (KNP) stanovit v souladu s čl. 12 normy ČSN 73 6201, podle tabulky 12.1. Na základě dopravního významu komunikace se stanoví návrhová kategorie. Silnice, která je snadno nahraditelná objížděkami se řadí do kategorie 3.

Jelikož propustek odvodňuje povodí, pro které nejsou záznamy N-letých průtoků k dispozici, je nutné si tyto údaje dopočítat ze zjištěných srážkových intenzit (srážkové mapy, data od ČHMÚ) dotčené oblasti. Pro výpočet kulminačního průtoku se použije racionální metoda (metoda součinitele odtoku), ve které jsou ztráty dešťové vody v povodí zakomponovány do empiricky stanovených hodnot odtokového součinitele. Tento součinitel (C) je poměrem mezi objemem odtoku a srážky za určitý časový interval. Racionální metoda vychází ze vztahu

$$Q = C \cdot i \cdot A$$

Odtokový součinitel je funkcí typu povrchu a jeho hodnoty lze nalézt v hydrologických tabulkách. V tomto příkladu se vyskytuje 5 různých typů povrchu, každý s jiným součinitelem. Jednotlivé povrchy, jim odpovídající odtokové součinitele a příslušné plochy jsou zapsány v následující tabulce.

Povrch	$C_i$ [-]	$A_i$ [%]	$A_i$ [ha]
Les	0.15	35	19.25
Zahrada	0.10	20	11.00
Pole	0.10	25	13.75
Zástavba	0.90	10	5.50
Silnice	0.80	10	5.50
<b>Celkem</b>		100 %	<b>A = 55 ha</b>

(Pozn.: Součinitel pro zástavbu – tašková střecha)

Odtokový součinitel pro celou plochu se stanoví jako vážený průměr z jednotlivých ploch:

$$C = \frac{1}{A} \cdot \sum C_i \cdot A_i = 0.268$$



Použitím rovnice  $Q = C \cdot i_N \cdot A$  lze již dopočítat s pomocí další tabulky N-leté průtoky.

Roky	1	2	5	10	20	50	100
$i_N$ [mm·h <sup>-1</sup> ]	35.17	49.09	55.20	63.74	72.76	80.64	90.85
$Q_N$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	1.44	2.01	2.26	2.61	2.98	3.31	3.72

Z Tab. A. 6 se vypočítá variační rozpětí  $Q_{100}/Q_1$ :

$Q_{100}/Q_1 = 3.72/1.44 = 2.58$ , tzn., že se řadí do variačního rozpětí do 5.

Návrhovým průtokem **NP** je pro kategorii 3  $Q_{50} = 3.31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Kontrolním návrhovým průtokem **KNP** je  $Q_{100} = 3.72 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Parametry propustku (zejména pak jeho velmi malý sklon) a průtoky nasvědčují tomu, že se bude jednat o tlakové proudění. To se ověří výpočtem kapacitního průtoku. Kapacitní průtok (tj. průtok odpovídající rovnoměrnému proudění o volné hladině při plném plnění propustku) se určí pomocí rovnice (4.42):

$$Q_D = 24 \cdot D^{8/3} \cdot i^{1/2} = 24 \cdot 1.1^{8/3} \cdot 0.0001^{1/2} = 0.31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Tento kapacitní průtok se porovná s návrhovým průtokem **NP**  $Q_{50} = 3.31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

$Q_D = 0.31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} < Q_{50} = 3.31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , tudíž se jedná o tlakové proudění.

K posouzení toho, zda bude výtok z propustku zatopený, je nutné stanovit průřezovou rychlost v propustku:

$$v = \frac{Q}{S_D} = \frac{3,31}{\frac{\pi \cdot 1,1^2}{4}} = 3.49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

*Pozn.: rychlost v propustku (v) by neměla překročit hodnotu 5 m·s<sup>-1</sup> (při vyšších rychlostech by mohlo docházet k ohrožení koryta za propustkem)*

a podmínku zatopení (4.36):

$$\Delta_{\min} = \frac{v_D \cdot (v - v_D)}{g} = \frac{1,15 \cdot (3,49 - 1,15)}{9,81} = 0,27 \text{ m}$$

Převýšení hladiny dolní vody nad horní hranou propustku  $\Delta$  se vypočítá podle rovnice (4.38):

$$\Delta = y_d - D = 1,45 - 1,1 = 0,35 \text{ m}$$

Vzhledem k platnosti nerovnosti  $\Delta = 0.35 > \Delta_{\min} = 0.27$  se bude jednat o zatopený výtok.

Energetická výška před propustkem se vypočítá použitím rovnice (4.4):

$$y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = y_d + Z_{VTC} + Z_t + Z_{VY} + \frac{\alpha \cdot v_d^2}{2 \cdot g} - i_o \cdot L_{AD}$$

Hodnota součinitele celkové ztráty na vtoku do propustku  $\xi_{VTC} = 0.70$  byla převzata dle tabulky Tab. 4.2 pro odhad poměru  $y_H/D \approx 2.0$ , součinitel ztráty třením  $\lambda = 0.0195$  byl vypočítán z rovnice 4.35 pro  $\Delta = 1 \text{ mm}$  a součinitel ztráty na výtoku z propustku  $\xi_{VY} = 0.67$  byl převzat z grafu na Obr. 4.29 pro poměr  $S_D/S = 5.95/0.95 \approx 6$ . Při zanedbání přítokové rychlostní výšky vyjde hloubka vody před propustkem

$$1.45 + 0.70 \cdot \frac{3.49^2}{19.62} + 0.0195 \cdot \frac{25}{1.1} \cdot \frac{3.49^2}{19.62} + 0.6 \cdot \frac{(3.49^2 - 1.15^2)}{19.62} + \frac{1.15^2}{19.62} - 0.0001 \cdot 25 = 2.49 \text{ m}$$

Nyní bude ověřen počáteční předpoklad poměru  $y_H/D = 2.49/1.1 = 2.26$ , což přibližně odpovídá původnímu předpokladu  $y_H/D \approx 2.0$ .

Kóta dna před propustkem je 243,86 m n. m. Dopočítaná kóta hladiny pro návrhový průtok ( $H_{NH}$ ) je:

$$H_{NH} = 243,86 + 2,49 = 246.35 \text{ m n. m.}$$

Požadavkem bylo nepřekročení úrovně hladiny  $H_{max} = 246.40$  m n. m. Propustek danému limitu vyhoví neboť:

$$H_{NH} = 246.35 \text{ m n. m} \leq H_{max} = 246.40 \text{ m n. m}$$

## 7 TLUMENÍ KINETICKÉ ENERGIE POD PROPUSTKEM

Častou příčinou poškození koryta pod výtokem z propustku je ve většině případů nevhodný způsob tlumení energie a absence opevnění koryta a břehů. Z těchto důvodů je nutno věnovat pozornost způsobu úpravy koryta pod výtokem z propustku. Propustky se navrhují v různých sklonových poměrech v rozsahu 0.5 – 5 %. Sklonové poměry a režim proudění hrají rozhodující roli pro volbu způsobu tlumení energie za propustkem. Podstatnou roli hrají i sklonové poměry koryta pod propustkem. Čím výše je úroveň hladiny dolní vody v korytě pod propustkem, tím více se omezuje délka úseku na kterou má dopad výtoková rychlost propustku. To znamená, že pokud např. vzniká za propustkem vodní skok, je erozní činnost proudu omezena především v rozsahu délky vodního skoku. V případě, že vodní skok nevzniká, může se negativní vliv výtokové rychlosti propagovat do značné vzdálenosti za propustkem.

Je třeba mít na paměti, že lokální eroze za propustkem je naprosto běžným jevem, který je důsledkem vysokých rychlostí proudění na výtoku. Vliv vysokých rychlostí však dosahuje pouze do určité omezené vzdálenosti za ním, která je závislá na výše uvedených faktorech.

Při posuzování rychlosti na výtoku z propustku je nutné znát nebo stanovit hloubku vody v dolním korytě. Pakliže hloubka dolní vody v korytě neovlivňuje hladinu v propustku, je možno předpokládat, že bude voda v propustku s menším sklonem než kritický u výtoku proudit za kritické hloubky.

Na propustcích s malými a středními sklony (0.5 - 1 %) lze rychlost snížit zvětšením rozměrů propustku. Pokud proud při výtoku dosahuje kritické hloubky, nebude mít změna sklonu (bude-li tento sklon nižší než kritický) propustku ani změna odporu žádný vliv na změnu hloubky vody na výtoku a tím pádem ani na výtokovou rychlost.

Zvětšení propustku má na rychlost malý vliv. Určitého snížení rychlosti na výtoku je možné dosáhnout zdvojením propustku. Zde výzkum prokázal, že zdvojení propustku zásadním způsobem nezvyšuje hodnoty součinitele místní ztráty na vtoku. Při hydraulickém posouzení zdvojených propustků tedy lze použít stávajících hodnot součinitelů místní ztráty. Redukce průtoku v potrubí propustku má při stejném sklonu za následek snížení rychlostí za hloubky rovnoměrného proudění. Snížení rychlosti je též možné zvýšením drsnosti (namísto hladkého potrubí se použije potrubí s vyšší drsností).

Pro návrh vhodné ochrany vodního toku za propustkem je nezbytné zjistit následující charakteristiky koryta:

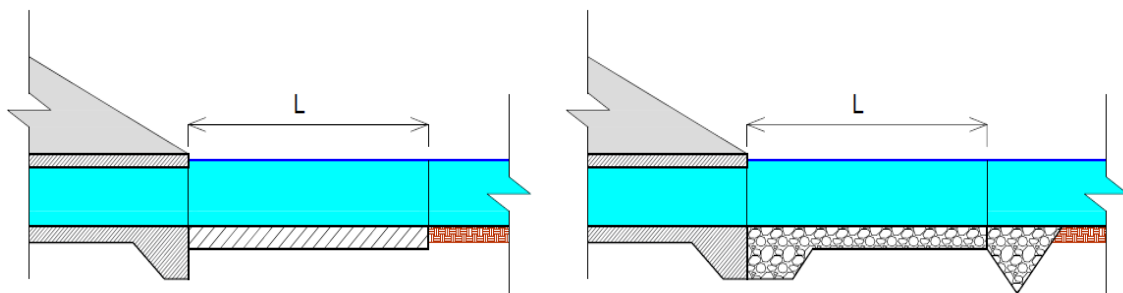
sklon koryta pod propustkem, příčné profily koryta pod propustkem a drsnost povrchu.

Z nich se stanoví hloubka proudění pod propustkem a průřezová rychlost.

Návrh způsobu tlumení energie je funkcí průtoku. Stanoví se tedy charakter proudění na výtoku z propustku, na základě kterého se posoudí odolnost materiálu koryta. Pokud odolnost materiálu koryta nevyhoví, je třeba provést opatření s ohledem na náklady na výstavbu a provoz zařízení a charakteristik propustku jako:

- rozsah Froudova čísla pro nejlepší účinnost,
- údržba, provozní problémy nebo problémy s umístěním,
- maximální rozměry,
- limitující charakteristiky jako je sklon propustku, drsnost nebo jeho tvar.

Pokud se na výtoku z propustku vyskytuje říční proudění, použije se opevnění koryta nebo inundačního území bezprostředně za ním, aby se minimalizovaly erozní účinky vytékající vody. Jako opevnění může být použita betonová deska (Obr. 7.1 vlevo) nebo kamenná dlažba (Obr. 7.1vpravo).



Obr. 7.1 Způsoby opevnění koryta za výtokem z propustku

V rámci výzkumu byly prováděny pokusy s cílem stanovit výtokové rychlosti v závislosti na sklonových poměrech propustku a režimech proudění. Zohledňována byla rovněž poloha dolní vody a délka opevnění. Pokusy byly provedeny pro tři vybrané sklonové poměry 0,5, 2 a 5 %, které reprezentují minimální, střední a maximální sklon propustků. Jako opevnění byl použit kamenný zához o velikosti středního zrna 0,5 m, který byl zhutněn a vyskládán až do vzdálenosti 7 m za výtokem z propustku. Výsledné výtokové rychlosti odpovídající modelovému rozměru propustku, který byl 1,4 m, se pohybovaly v rozsahu 1 - 5,3 m s<sup>-1</sup>. Při výzkumu bylo prokázáno, že k porušení záhozu docházelo u výtokových rychlostí od 3 m s<sup>-1</sup> a výše.

Způsobů posouzení stability dna nebo opevnění v korytě toku je několik. Z inženýrského hlediska se nejvíce osvědčila metoda tzv. nevymílacích resp. vymílacích rychlostí, které popsány v tabulce č. 6.1.

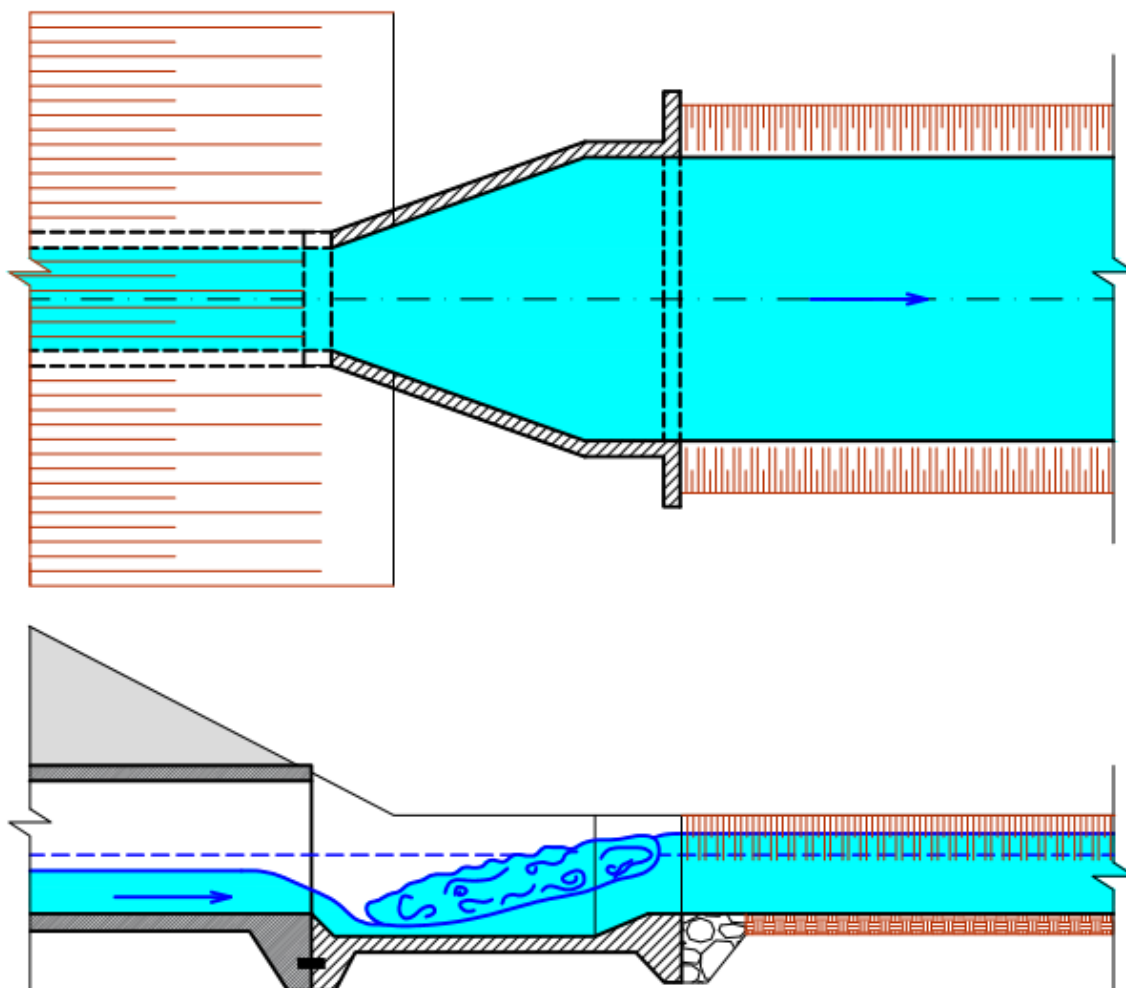
Zemina nebo opevnění	Velikost zrn [mm]	$v_s$ [m.s <sup>-1</sup> ] při průměrné hloubce $y$ [m]			
		0.4	1.0	2.0	3.0 a více
<b>Sypké zeminy:</b>					
Jemnozrný písek	0.05—0.25	0.17—0.27	0.21—0.32	0.24—0.37	0.26—0.4
Střední písek	0.25—1.00	0.27—0.47	0.32—0.57	0.37—0.65	0.40—0.70
Hrubozrný písek	1.00—2.25	0.47—0.53	0.57—0.65	0.65—0.75	0.70—0.80
Drobný jemný štěrk	2.25—5	0.53—0.65	0.65—0.80	0.75—0.90	0.80—0.95
Drobný střední štěrk	5—10	0.65—0.8	0.80—1.00	0.90—1.10	0.95—1.20
Drobný hrubý štěrk	10—15	0.80—0.95	1.00—1.20	1.10—1.30	1.20—1.40
Jemný štěrk	15—25	0.95—1.2	1.20—1.40	1.30—1.60	1.40—1.80
Střední štěrk	25—40	1.2—1.5	1.40—1.80	1.60—2.10	1.80—2.20
Hrubý štěrk	40—75	1.5—2.00	1.80—2.40	2.10—2.80	2.20—3.00
Malé kameny	75—100	2.00—2.30	2.40—2.80	2.80—3.20	3.00—3.40
Střední kameny	100—150	2.30—2.80	2.80—3.40	3.20—3.90	3.40—4.20
Velké kameny	150—200	2.80—3.20	3.40—3.90	3.90—4.50	4.20—4.90
Valouny	nad 200	nad 3.20	nad 3.90	nad 4.50	nad 4.90
Písčité nepřilíš ulehle hlíny		0.33	0.40	0.46	0.50
Písčité středně ulehle hlíny		0.70	0.85	0.95	1.10
Písčité ulehle hlíny		1.00	1.20	1.40	1.50
Písčité silně ulehle hlíny		1.40	1.70	1.90	2.10
<b>Dlažby a opevnění:</b>					
Dřnování na plocho		0.60	0.80	0.90	1.00
Čelné dřnování		1.50	1.80	2.00	2.20
Zpevnění proutím		1.80	2.20	2.50	2.70
Dlažba z kamenů 15 až 20 cm		2.50—2.90	3.00—3.50	3.50—4.00	3.80—4.30
Betonová dlažba		4.20	5.00	5.70	6.20

Tab. 7.1 Mezní vymílací rychlosti vs pro jednotlivé druhy zeminy a opevnění

## 7.1 TLUMENÍ ENERGIE NA VÝTOKU POMOCÍ VÝVARU

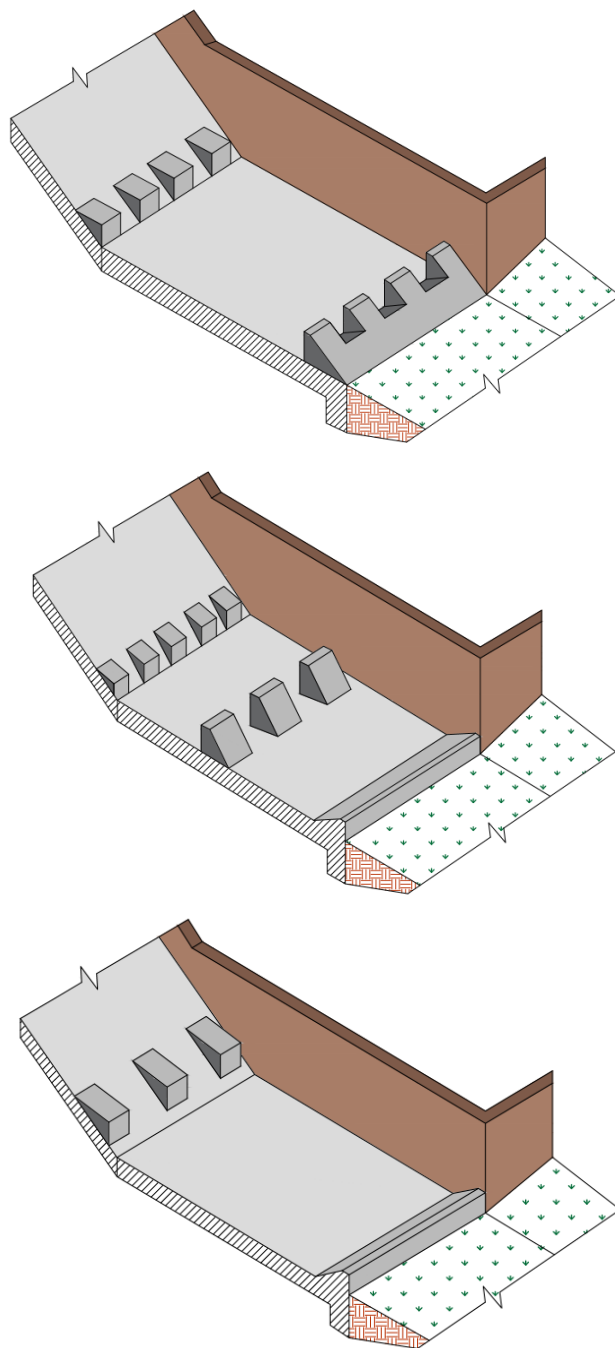
Je-li proudění na výtoku bystřinné, je třeba zvážit, zda pro tlumení kinetické energie použít vývar. Ve vývaru dochází ke změně charakteru proudění z bystřinného na říční ve vodním skoku. Často se používá tzv. divergentní, tedy ve směru proudění se rozšiřující vývar (Obr. 7.2).

K většímu tlumení energie je možné také použít rozrážeče, prahy a další zdrsňující prvky. Tímto se vyvolá větší odpor proudění. Zdrsňující prvky jsou používány pro stabilizaci vodního skoku a zkrácení délky vývaru. Prvky musí být dostatečně ukotvené, aby odolaly odporovým silám.



*Obr. 7.2 Tlumení kinetické energie vodního proudu za výtokem z propustku vývarem*

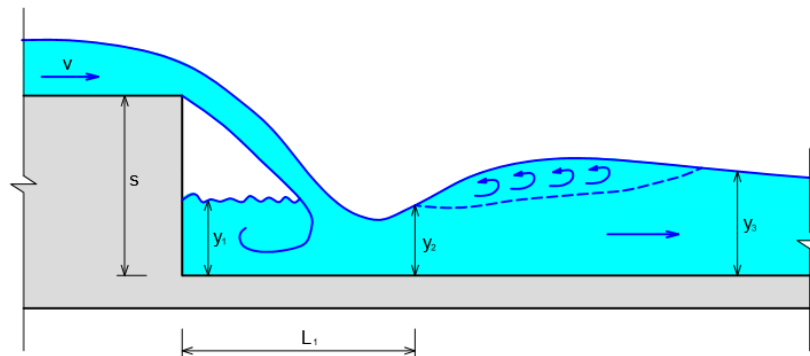
Několik ukázek možného uspořádání nezahlobeného vývaru je na Obr. 7.3:



*Obr. 7.3 Možná uspořádání nezahlobeného vývaru*

## 7.2 TLUMENÍ ENERGIE NA VÝTOKU POMOCÍ STUPNĚ VE DNĚ

Běžně používaným způsobem tlumení energie jsou stupně ve dně, jejichž aplikací lze snížit sklon dna toku. Kontinuální strmý sklon dna se přemění na sérii menších sklonů a svislých stupňů, pomocí čehož dojde ke zpomalení proudění. Poté je nutné tlumit kinetickou energii vody pod stupni, kde voda dopadá na desku nebo do vývaru. Voda dopadající na desku nebo do vývaru mění směr proudění a dochází ke vzniku turbulencí a tím k tlumení energie. Také v tomto případě lze pro podporu tlumení energie použít překážky, které zvýší odpor vůči proudění. Díky těmto konstrukcím lze vývar nebo desku za propustkem zkrátit.



Obr. 7.4 Tlumení energie stupněm ve dně

Geometrie proudění na stupních (Obr. 7.4) může být popsána tzv. číslem snížení, které je definováno jako:

$$N_d = q^2 / gb^3 \quad (6.5)$$

$q$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]    specifický průtok  
 $g$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ]    tíhové zrychlení  
 $s$  [m]            výška stupně

Pro konstrukci stupně platí podle výzkumu propustků U. S. Army Corps of Engineers (USACE) vztahy:

$$L_1 / b = 4,30 \cdot N_d^{0,27} \quad (6.6)$$

$$h_1 / b = 1,00 \cdot N_d^{0,22} \quad (6.7)$$

$$h_2 / b = 0,54 \cdot N_d^{0,425} \quad (6.8)$$

$$h_3 / b = 1,66 \cdot N_d^{0,27} \quad (6.9)$$

$L_1$  [m]            délka stupně, tj. vzdálenost od paty stupně do místa hloubky  $y_2$   
 $y_1$  [m]            hloubka pod stupněm přímo u paty, platí pro zavzdušněný prostor pod paprskem  
 $y_2$  [m]            první vzájemná hloubka vodního skoku  
 $y_3$  [m]            druhá vzájemná hloubka k hloubce  $y_2$

Následně se vypočítaná druhá vzájemná hloubka  $y_3$  porovná s hloubkou vody v korytě  $y_d$ . Pokud je  $y_d > y_3$  pak bude vodní skok zatopený (vodní skok vzduť),  $y_d = y_3$  pak se vodní skok začne tvořit v profilu s hloubkou  $y_2$  (vodní skok přilehlý),  $y_d < y_3$  pak bude vodní skok postupovat po směru toku (vodní skok oddálený), v tomto případě je nezbytné učinit opatření (přidání vyvýšeného prahu nebo rozrážečů u nezahluobeného vývaru, nebo vytvoření zahluobeného vývaru), aby se neoddaloval od místa dopadu paprsku



## 8 OPATŘENÍ K ZAMEZENÍ UCPÁNÍ VTOKU DO PROPUSTKU SPLÁVÍM

Ochrana propustků proti ucpání splávím nebo vniku spláví do propustku je vždy specifická záležitost. Cílem opatření by mělo být zabránění vniku hrubého spláví (kmenů, větví apod.) do propustku, ale na druhou stranu by mělo umožňovat průchod jemného spláví (listů, trávy apod.), které by jinak zbytečně ucpávalo vtok do propustku.

Smyslem výzkumu bylo posoudit a vyhodnotit možné řešení zachytávání spláví před propustkem, a to vždy s ohledem na ovlivnění hladiny vody nad navrženým opatřením.

Jako opatření byly zkoumány způsoby zachytávání spláví pomocí česlí, které byly osazeny dle dispozičních návrhů zobrazených na Obr. 8.1 až Obr. 8.4. Zkoumáno nebylo jenom dispoziční uspořádání česlí vůči vtoku do propustku, ale i rozteč jednotlivých česlic.

Rozteče česlic byly zkoumány ve vzdálenostech od 10, 15 až do 20 cm, přičemž je možné konstatovat, že samotné velikosti roztečí nejsou pro ovlivnění hladiny nad propustkem podstatné a hladinu nad česlemi sami o sobě zásadně neovlivňují. Je tedy na zvážení projektanta jak velké rozteče zvolí s ohledem na:

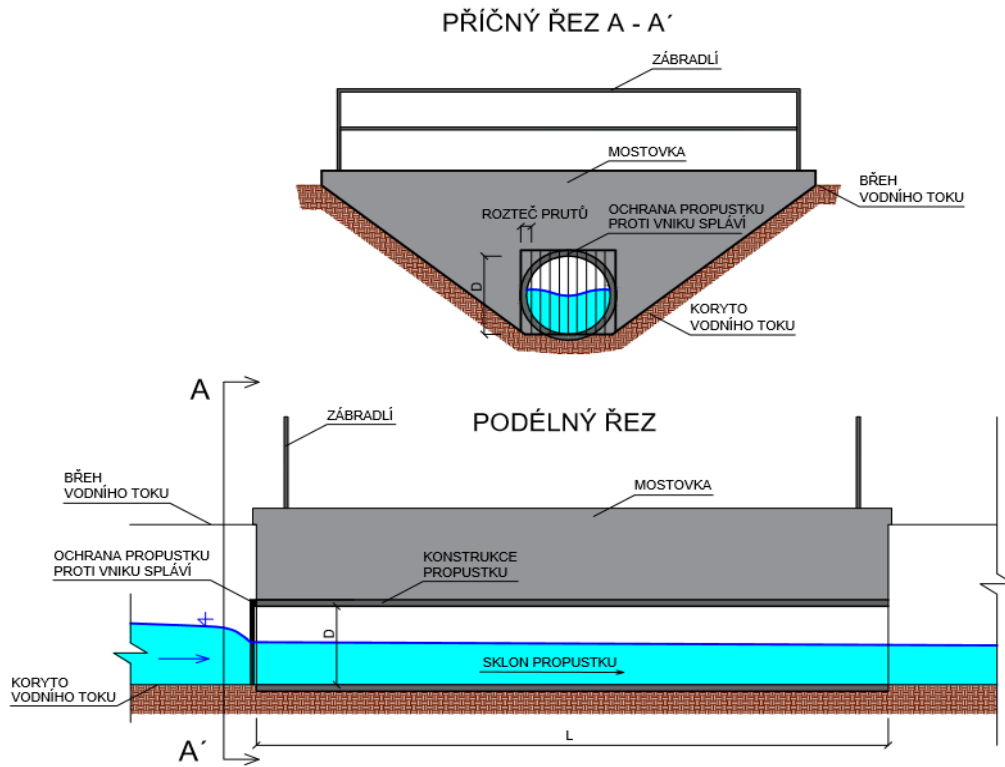
- Umístění propustku (ve volném terénu, v inundačním území, na toku apod.),
- konstrukční typ vtoku do propustku,
- velikost povodí nad propustkem,
- velikost návrhového průtoku,
- předpokládanou velikost spláví,
- možnosti údržby a odstranění spláví,
- vegetaci v povodí.

Co je pro vliv hladiny nad propustkem zásadní, je místo uchycení česlí a úhel pod kterým jsou česle osazeny. Z obrázků 7.1-7.4 je patrné dispoziční upořádání pro něž byly vyhodnocovány dopady vzduuté hladiny při průchodu spláví, které se zachytávalo na česlích.

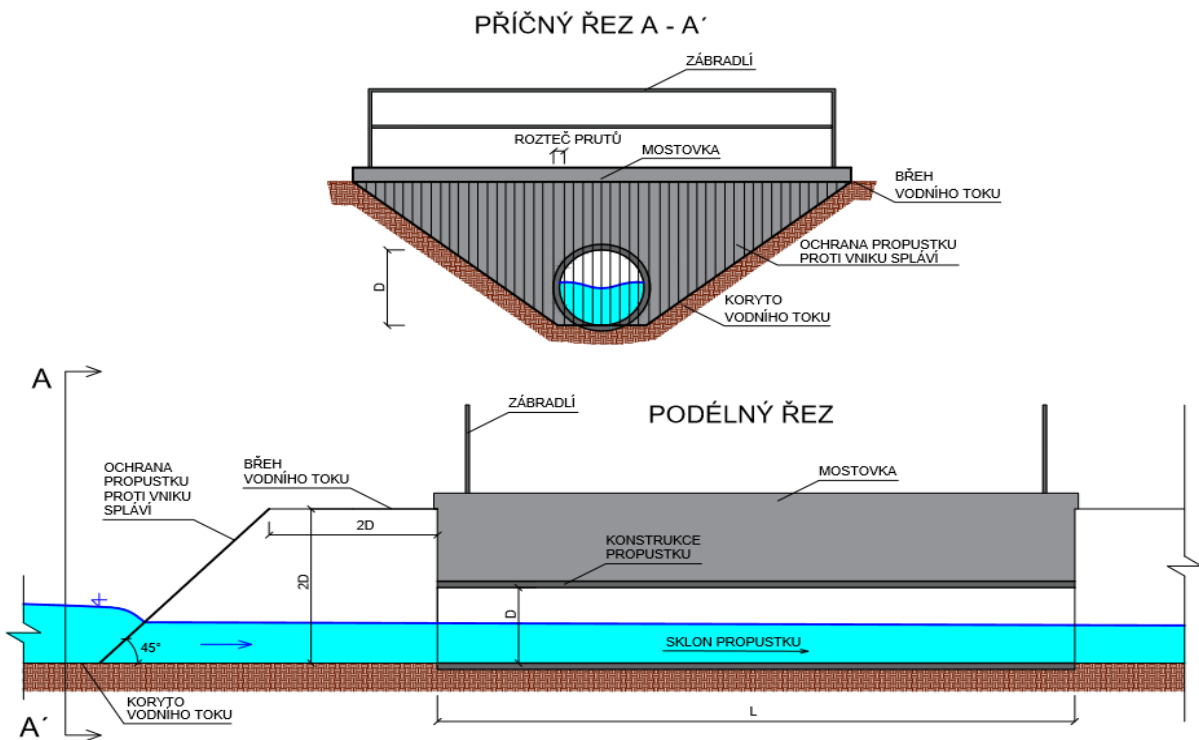
Jako nejméně výhodné z hlediska dispozičního uspořádání a míry vzduutí nad propustkem se projevilo řešení zobrazené na Obr. 8.1. Při vzájemném srovnání s ostatními dispozičními upořádáními na Obr. 8.1 až Obr. 8.4 výsledky jasně prokazovaly, že vzduutá hladina před česlemi byla při variantě (Obr. 8.1) **v průměru o 50% vyšší** než u ostatních variant, kdy byly česle odsazeny před vtok a skloněny pod úhlem 45°. Osazení česlí přímo na vtoku do propustku je možno považovat jako nejméně výhodné z hlediska vlivu na vzduutou hladinu nad propustkem.

Ostatní varianty řešení viz Obr. 8.2 až Obr. 8.4 mezi s sebou nevykazovaly zásadní rozdíly z hlediska vzduuté hladiny před propustkem. Varianty, kdy byla zprůchodněna polovina, nebo čtvrtina profilu propustku viz Obr. 8.3 až Obr. 8.4 nemají zásadní vliv na míru vzduuté hladiny. Přesto mohou tyto varianty hrát důležitou roli při běžných průtocích, kdy netvoří žádnou překážku a rovněž umožňují migraci živočichů.

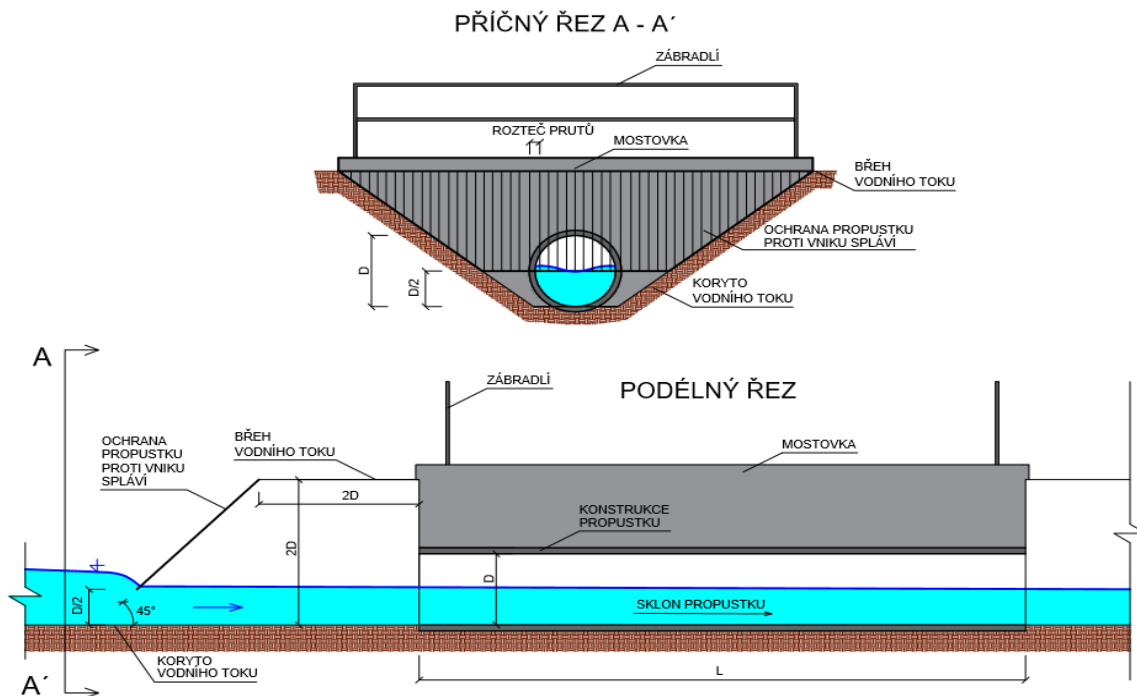
Jak je poznamenáno u úvodu kapitoly, ochrana vtoku proti spláví je vždy specifická záležitost a je nutné zvážit veškeré dopady spojené s její aplikací stejně tak jako s její absencí.



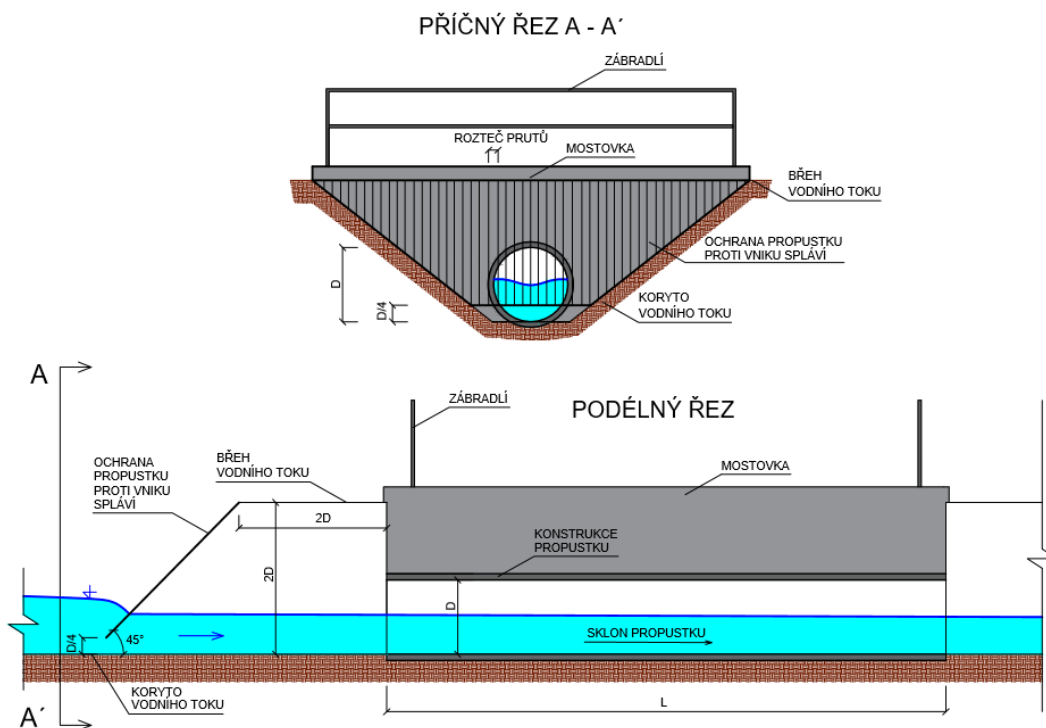
*Obr. 8.1 Kolmé čelo s česlemi*



*Obr. 8.2 Šikmé čelo s předsazenými česlemi*



*Obr. 8.3 Šikmé čelo s předsazenými česlemi a odsazením  $\frac{1}{2} D$  ode dna*



*Obr. 8.4 Šikmé čelo s předsazenými česlemi a odsazením  $\frac{1}{4} D$  ode dna*

## 9 ZÁVĚR

Cílem metodiky je usnadnit návrh propustků, jejichž účelem je převádění průtoků přes tělesa silničních a železničních staveb. Hlavním důvodem zpracování metodiky je předložení přístupu, který umožní správný popis hydraulické funkce propustků pro různé režimy proudění, a to v důsledku povede k racionálnímu návrhu rozměrů a technického řešení propustků.

Podstatná část metodiky je založena na řešení hydraulických problémů spojených s prouděním v propustcích a nalezení optimálního, ale přesto zodpovědného způsobu výpočtu vzduté hladiny před vtokem do propustku. Postupy doporučené v metodice byly získány na základě rozsáhlého výzkumu na fyzikálních a matematických modelech. Metodika ověřila stávající výpočetní postupy a přehodnotila parametry, které do výpočtu vstupují. Byly ověřeny okrajové podmínky v podobě hladiny dolní vody za výtoku z propustku, součinitele místní ztráty na vtoku do propustku a součinitele místní ztráty na výtoku z propustku. Metodika rovněž ukazuje postup pro stanovení zúžené hloubky za vtokem do propustku pro režimy s netlakovým prouděním v propustku, a to v podobě grafů pro jednotlivé konstrukční typy vtoků.

Kromě hydraulické části obsahuje metodika rovněž podstatné technické a konstrukční doporučení, jako například řešení tlumení energie na výtoku z propustku a ochrana vtoku do propustku proti ucpání splávím. V rámci výzkumu byla posuzována i technická řešení propustků, která jsou v praxi běžná, ale z hlediska výzkumu dosud neověřená, jako například vícenásobné propustky, nátoky do propustku pod kolmým úhlem atd. Těmto záležitostem je věnována samostatná kapitola.

Metodika nepopírá, že proudění v propustcích je po hydraulické stránce velmi komplikované a lze se setkat s řadou zcela odlišných průběhů hladin, kdy se kombinují jednotlivé režimy proudění. Tato skutečnost pak může vést ke značně komplikovanému řešení nebo naopak k řešení značně zjednodušenému, které pak vede k chybnému určení vzduté hladiny před vtokem do propustku. Z těchto důvodů je v metodice doporučeno, aby se projektant v případě komplikovaných případů obracel na specialisty z oboru hydrauliky.

Z legislativního hlediska metodika svými výsledky navazuje na současné předpisy MD ČR, na ČSN 73 6201 – projektování mostních objektů, TP 204 – Hydrotechnické posouzení mostních objektů na vodních tocích a TP 232 Propustky a mosty malých rozpětí. V souvislosti s těmito předpisy je nutno zdůraznit, že propustky jako mostní objekty byly v těchto dokumentech po hydraulické stránce řešeny okrajově bez ověření vstupních parametrů a bez revize výpočetních postupů.

Předkládaná metodika posunuje znalosti z hlediska hydraulického řešení propustků směrem k bezpečnějšímu a objektivnějšímu návrhu.

# 10 PŘÍLOHY

## 10.1 PŘÍLOHA A - NÁSTROJ PRO NÁVRH PROPUSTKU

Příloha A poskytne projektantům stručný a přehledný nástroj, jak postupovat při návrhu propustku. Je rozdělena do sekce A1, která se věnuje výpočtu návrhových veličin, pokud nejsou známy a do sekce A2, jež se věnuje samotnému výpočtu průběhu hladin v propustku za předpokladu, že jsou návrhové veličiny zadány, nebo vypočtené pomocí sekce A1.

### 10.1.1 PŘÍLOHA A1 - NÁVRHOVÉ VELIČINY

Tato příloha se věnuje výpočtu návrhových veličin, kterými jsou hloubka vody v korytě za výtokem z propustku  $y_D$  a návrhový průtok  $Q_N$ .

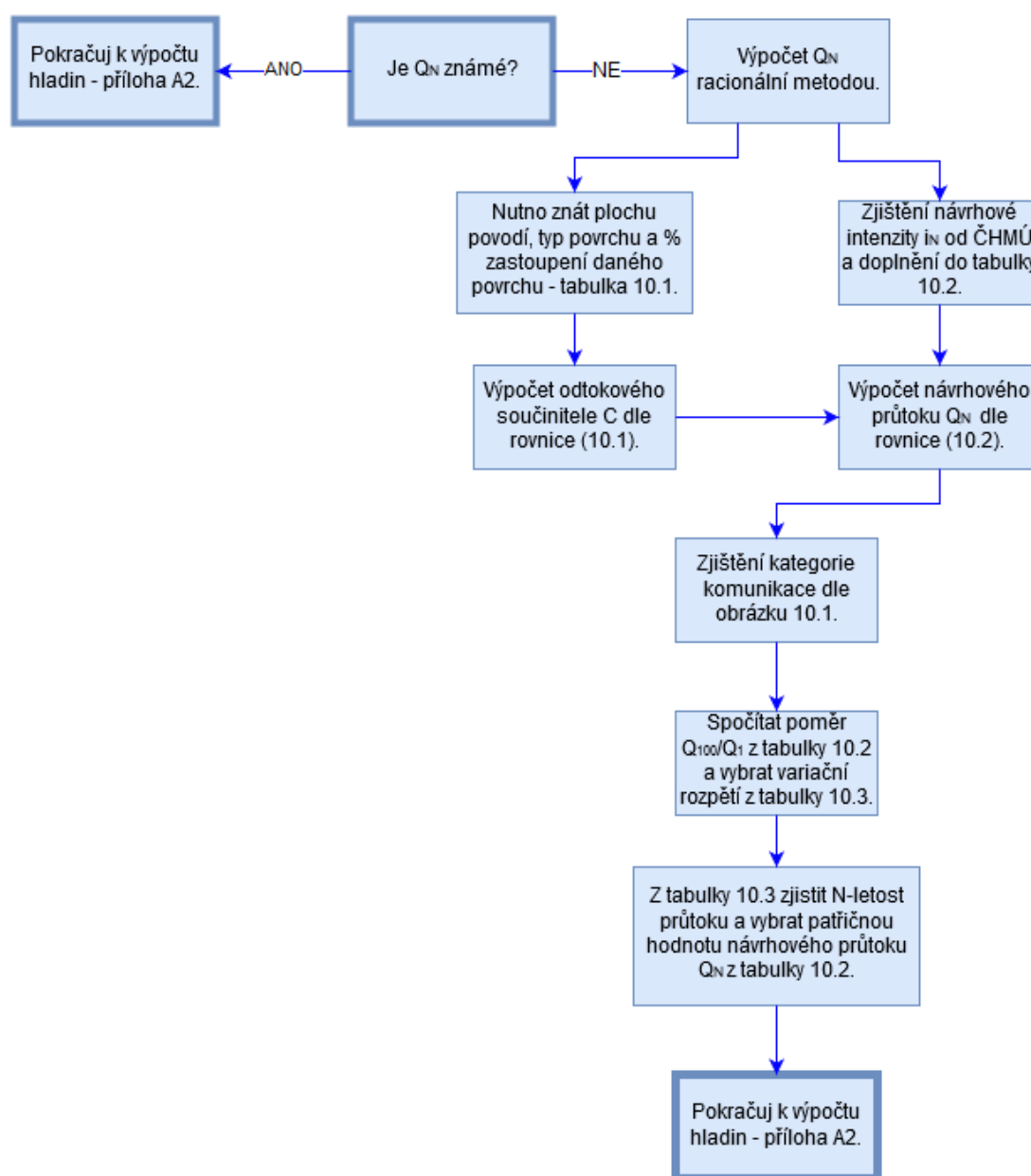


Diagram 10.1 Nástroj pro výpočet průtoku  $Q_N$

Povrch	$C_i$ [-]	$A_i$ [%]	$A_i$ [ha]
Les	0.15	35	19.25
Zástavba	...	...	...
<b>Celkem</b>		100 %	<b>A = 55 ha</b>

Tab. 10.1 Výpočet odtokového součinitele pro různé typy ploch

$C_i$  [-] odtokový součinitel pro jednotlivý typ povrchu  
(Ize nalézt v hydrologických tabulkách)

$$C = \frac{1}{A} \cdot \sum C_i \cdot A_i \quad (10.1)$$

Pro každou dobu opakování  $N = 1, 2, 5, 10, 20, 50$  a 100 let a pro dobu trvání návrhového deště 15 min zažádat o data návrhové intenzity  $i_N$  na ČHMÚ a doplnit je do tabulky.

Roky	1	2	5	10	20	50	100
$i_N$ [mm·hod <sup>-1</sup> ]	Od ČHMÚ	...	...	...	...	...	...
$Q_N$ [m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]							

Tab. 10.2 Tabulka N-letých průtoků

$$Q_{Ni} = C \cdot i_{Ni} \cdot A \quad (10.2)$$

**1. kategorie** - trvalé mostní objekty s požadavkem trvalé průjezdnosti tj. na dálnicích a rychlostních silnicích, na rychlostních a sběrných místních komunikacích, na silnicích I. až III. třídy, na železniční dráze celostátní, na železničních regionálních drahách regionálního významu, na železničních drahách speciálních (metru), na železničních vlečkách s nutným trvalým provozem a na drahách tramvajových a trolejbusových, propojujících místa k nimž je nutný trvalý přístup obyvatel;

**2. kategorie** - trvalé mostní objekty s možností krátkodobého přerušení provozu do 5-ti dnů tj. na silnicích I. až III. třídy s velkou intenzitou provozu, ale snadno nahraditelných objíždkami, na silnicích II. a III. třídy s menší intenzitou provozu, ale obtížně nahraditelných objíždkami, na obslužných místních komunikacích s vysokými požadavky obce na provozuschopnost, na železničních regionálních drahách místního významu, na železničních vlečkách s možností přerušení provozu a na drahách tramvajových a trolejbusových s možností omezit trvalý přístup obyvatel. Patří sem i železniční provizoria, která nahrazují funkci trvalých mostních objektů;

**3. kategorie** - trvalé mostní objekty na silnicích i místních komunikacích nezařazené do 1. nebo 2. kategorie (snadno nahraditelné) a na účelových komunikacích. Patří sem rovněž dlouhodobé zatímní mostní objekty s návrhovou životností delší než 5 roků;

**4. kategorie** - krátkodobé zatímní mostní objekty s návrhovou životností do 5-ti roků. Patří sem rovněž železniční mostní provizoria zajišťující technologicky výstavbu a související provoz.

Obr. 10.1 Kategorie komunikací

Návrhová kategorie podle dopravního významu	Variační rozpětí kříženého vodního toku $Q_{100}/Q_1$	Návrhový průtok (NP)	Kontrolní návrhový průtok (KNP)	Min. volná výška (MVV) nad návrhovou hladinou (NH, KNH)
1	do 5	$Q_{100}$ nebo <sup>a</sup>	$1,15 \cdot Q_{100}$ <sup>b</sup>	1 m nad NH; 0,5 m nad KNH
	5 až 8	$Q_{100}$ nebo <sup>a</sup>	$1,25 \cdot Q_{100}$ <sup>b</sup>	1 m nad NH; 0,5 m nad KNH
	nad 8	$Q_{100}$ nebo <sup>a</sup>	$1,50 \cdot Q_{100}$ <sup>b</sup>	1 m nad NH; 0,5 m nad KNH
2	do 5	$Q_{100}$	<sup>a</sup>	0,5 m nad KNH
	5 až 8	$Q_{100}$	$1,20 \cdot Q_{100}$ <sup>b</sup>	0,5 m nad KNH
	nad 8	$Q_{100}$	$1,40 \cdot Q_{100}$ <sup>b</sup>	1 m nad NH <sup>c</sup> ; 0,5 m nad KNH
3	do 5	$Q_{50}$	$Q_{100}$	0,5 m nad NH; 0,5 m nad KNH <sup>c</sup>
	5 až 8	$Q_{50}$	$Q_{100}$	0,5 m nad NH; 0,5 m nad KNH <sup>d</sup>
	nad 8	$Q_{50}$	$Q_{100}$	0,5 m nad NH; 0,5 m nad KNH <sup>d</sup>
4	do 5	$Q_{10}$	$Q_{20}$	0,5 m nad NH; 0,5 m nad KNH <sup>c</sup>
	5 až 8	$Q_{10}$	$Q_{20}$	0,5 m nad NH; 0,5 m nad KNH <sup>c</sup>
	nad 8	$Q_{10}$	$Q_{20} ; Q_{50}$ <sup>e</sup>	0,5 m nad NH; 0,5 m nad KNH <sup>c</sup>

<sup>a</sup> největší naměřený průtok v místě přemostění vodního toku, pokud je větší než  $Q_{100}$

<sup>b</sup> vodoprávní úřad podle nebezpečí transportu druhu a množství splávek může požadovat posouzení pro nestandardní  $Q_{200}$  s ohledem na to, že uvedené násobky  $Q_{100}$  pouze přibližně nahrazují (reprezentují)  $Q_{200}$

<sup>c</sup> pouze při velkém nebezpečí ucpání mostního otvoru nánosy nebo splávkám

<sup>d</sup> pouze při velkém nebezpečí ucpání mostního otvoru nánosy nebo splávkám; nevztahuje se na zatímní objekty

<sup>e</sup> při ohrožení zastavěného území po ucpání mostního otvoru

Předepsanou hodnotu volné výšky nad hladinou není třeba dodržet u propustků, u kterých je možné připustit zahlcení vtoku a tlakový režim proudění propustkem např. podle 12.2.4.

Nejsou-li splněny podmínky <sup>c</sup> a <sup>d</sup> uváděné pro stanovení volné výšky nad hladinou KNP, volná výška nad touto hladinou se nestanovuje. U některých objektů tak může dojít i k přelévání mostovky (vozovky). Ostatní podmínky uvedené v 12.1.4. však musí být splněny.

Tab. 10.3 Tabulka pro výběr variačního rozpětí dle kategorie komunikace

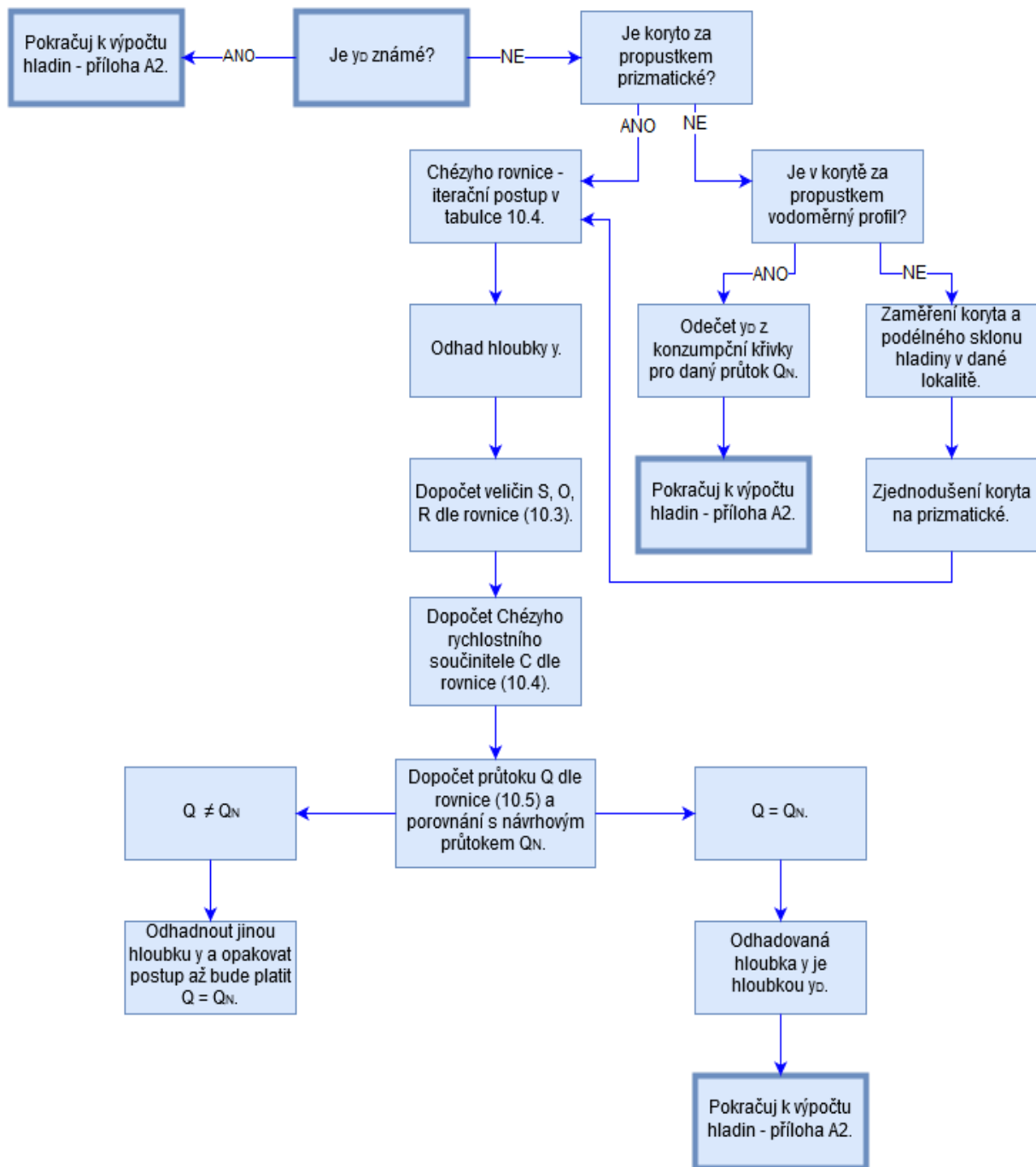


Diagram 10.2 Nástroj pro výpočet hloubky  $y_D$



<b>y</b>	<b>S</b>	<b>O</b>	<b>R</b>	<b>C</b>	<b>Q</b>
[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m]	m <sup>0.5</sup> ·s <sup>-1</sup>	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
0.45	1.31	4.01	0.33	25.1	0.591
...	...	...	...	...	...

Tab. 10.4 Iterační postup pro výpočet  $y_D$

- S** [m<sup>2</sup>] průtočná plocha  
**O** [m] omočený obvod  
**R** [m] hydraulický poloměr  
**C** [m<sup>0.5</sup>·s<sup>-1</sup>] Chézyho rychlostní součinitel

$$R = \frac{S}{O} \quad (10.3)$$

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (10.4)$$

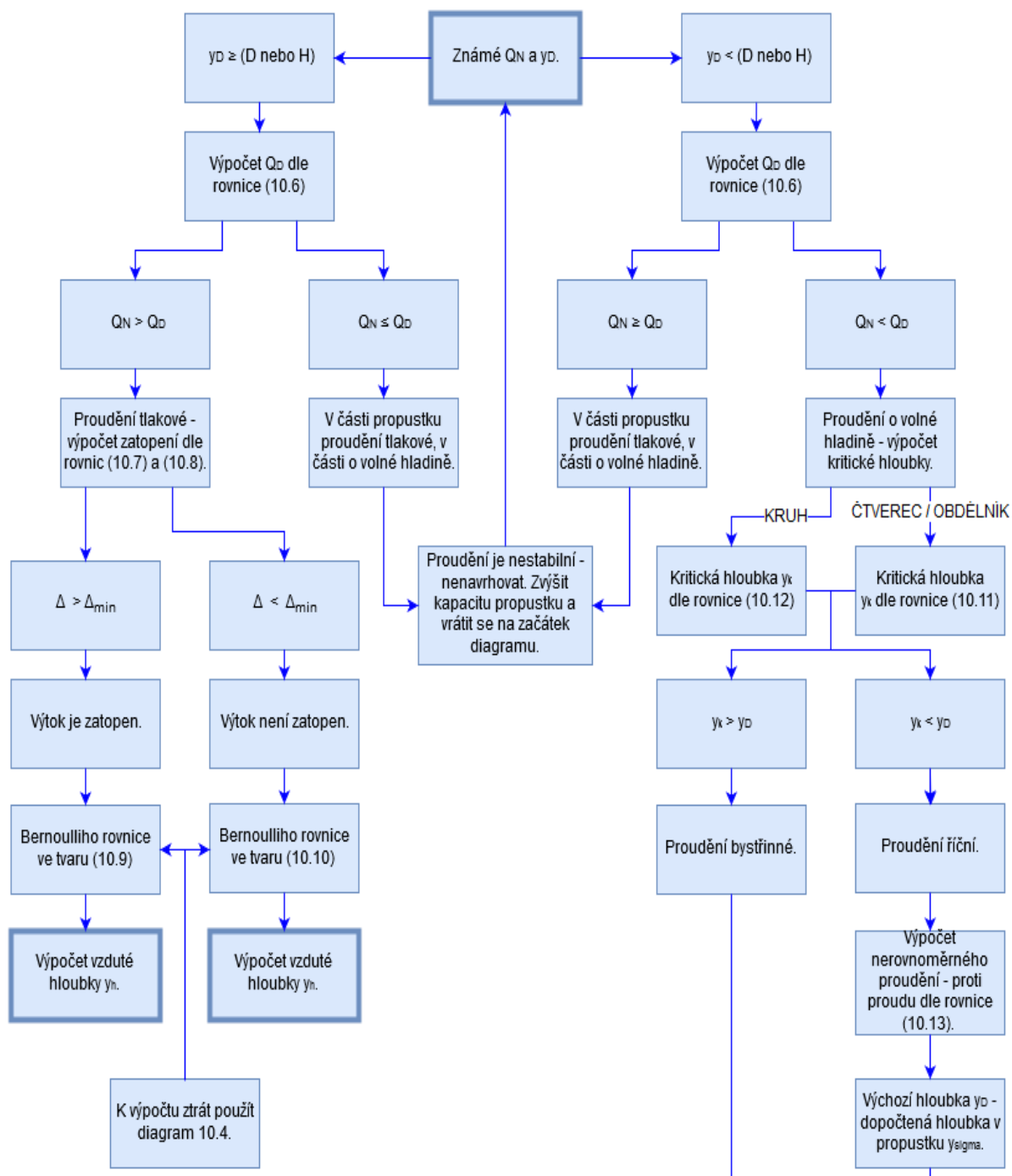
- n** [s·m<sup>-1/3</sup>] Manningův součinitel drsnosti

$$Q = S \cdot C \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad (10.5)$$

- i** [-] sklon čáry energie  
(pro rovnoměrné proudění je roven podélnému sklonu dna koryta)

## 10.1.2 PŘÍLOHA A2 - VÝPOČET HLADIN

Tato příloha se věnuje výpočtu průběhu hladin za různých podmínek. Aby bylo možné tento výpočet provádět, je nutno znát návrhové parametry, kterými je návrhový průtok  $Q_N$  a hloubka vody v korytě za výtokem z propustku  $y_D$ . Výsledkem výpočtů z přílohy A2 je hloubka vzduté vody před vtokem do propustku  $y_h$ .



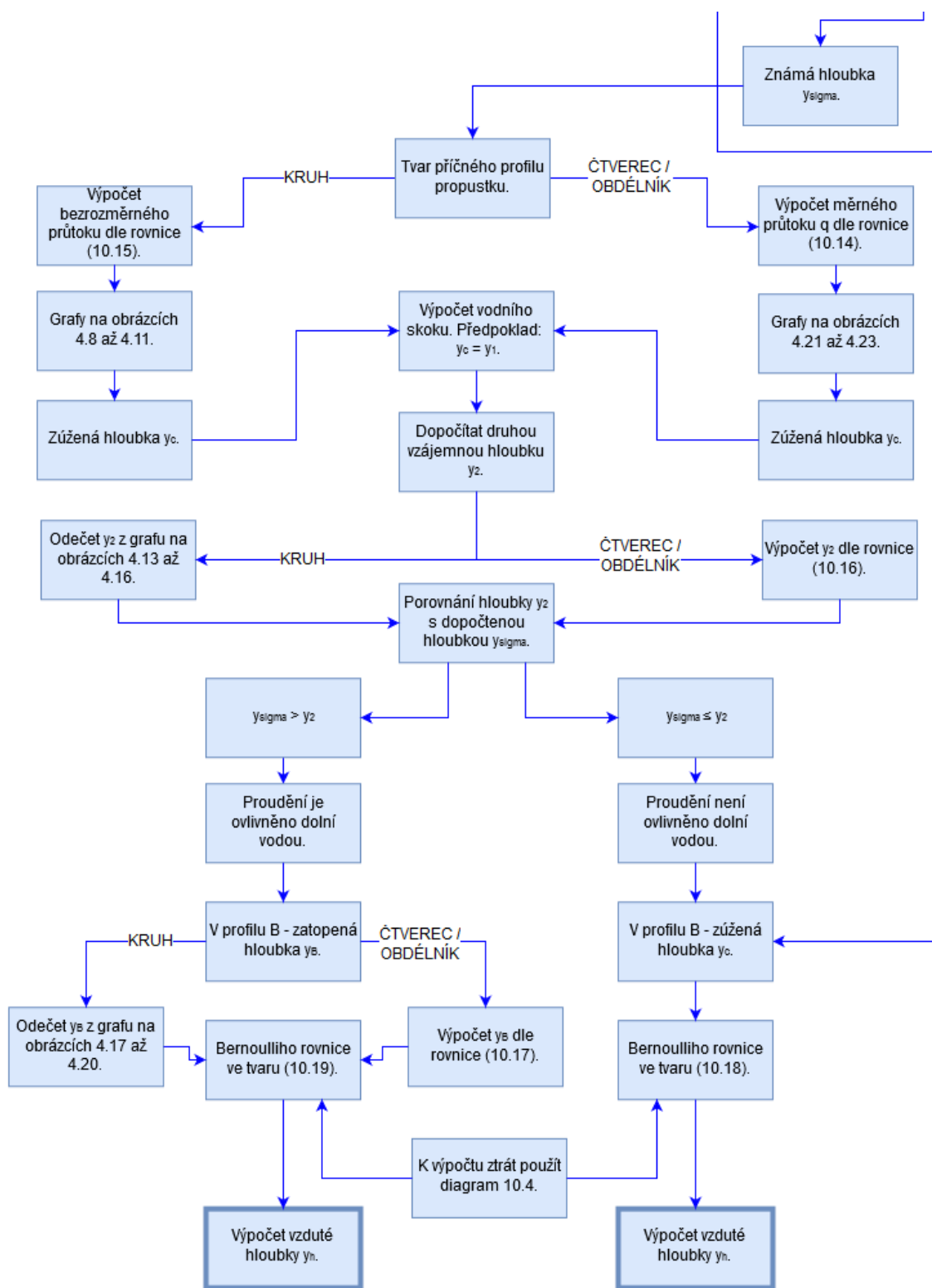


Diagram 10.3 Nástroj pro výpočet průběhu hladiny

$$Q_D = 24 \cdot D^{8/3} \cdot i^{1/2} \quad (10.6)$$

**D** [m] průměr potrubí propustku  
**i** [-] sklon čáry energie  
 (pro rovnoměrné proudění je roven podélnému sklonu dna koryta)

$$\Delta = y_d - D \quad (10.7)$$

$$\Delta_{\min} = \frac{v_D \cdot (v - v_D)}{g} \quad (10.8)$$

**v<sub>d</sub>** [m·s<sup>-1</sup>] střední průřezová rychlost proudění v korytě za výtokem z propustku  
**v** [m·s<sup>-1</sup>] střední průřezová rychlost proudění v propustku

$$y_h + i_o \cdot L = y_d + \frac{\alpha \cdot v_d^2}{2 \cdot g} + Z_{VTC} + Z_t + Z_{VY} \quad (10.9)$$

$$y_h + i_o \cdot L = D + \frac{\alpha \cdot v^2}{2 \cdot g} + Z_{VTC} + Z_t \quad (10.10)$$

**L** [m] délka propustku  
**Z<sub>VTC</sub>** [m] celková místní ztráta na vtoku do propustku  
**Z<sub>t</sub>** [m] ztráta třením při tlakovém proudění v propustku  
**Z<sub>VY</sub>** [m] místní ztráta na výtoku z propustku zúžením proudu

$$y_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot b^2}} \quad (10.11)$$

$$y_k = \frac{\sqrt{0.32 \cdot Q}}{\sqrt[4]{D}} \quad (10.12)$$

**b** [m] šířka obdélníkového propustku  
**D** [m] průměr potrubí

$$\Delta L = \frac{\left( y_2 + \frac{\alpha \cdot v_2^2}{2 \cdot g} \right) - \left( y_1 + \frac{\alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \right)}{(i_0 - i_E)} \quad (10.13)$$

**i<sub>0</sub>** [-] sklon dna propustku  
**ΔL** [m] vzdálenost mezi profily  
**y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub>** [m] hloubka vody v profilech 1 a 2  
**v<sub>1</sub>, v<sub>2</sub>** [m·s<sup>-1</sup>] průřezová rychlost vody v profilech 1 a 2

$\Sigma Z$  [m] součet ztrát mechanické energie mezi profily 1 a 2

$$q = \frac{Q}{B} \quad (10.14)$$

$Q$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] průtok  
 $B$  [m] šířka propustku

$$\frac{Q}{g^{0.5} \cdot D^{2.5}} \quad (10.15)$$

$Q$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] průtok  
 $g$  [ $m \cdot s^{-2}$ ] tíhové zrychlení  
 $D$  [m] průměr propustku

$$y_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot b^2}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha}{g} \cdot q^2} \quad (10.16)$$

$b$  [m] šířka obdélníkového koryta

$$y_B = \sqrt{y_\sigma^2 + \frac{2 \cdot q^2}{g} \cdot \left( \frac{1}{y_\sigma^2} - \frac{1}{y_c^2} \right)} \quad (10.17)$$

$y_\sigma$  [m] dypočtená hloubka v propustku  
 $y_c$  [m] zúžená hloubka  
 $q$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] měrný průtok (průtok na jednotku šířky koryta)  
 $g$  [ $m \cdot s^{-2}$ ] tíhové zrychlení

$$y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = y_c + \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2 \cdot g} + Z_{VTZ} - i_o \cdot L_{AB} \quad (10.18)$$

$$y_h + \frac{\alpha \cdot v_h^2}{2 \cdot g} = y_B + \frac{\alpha \cdot v_c^2}{2 \cdot g} + Z_{VTZ} - i_o \cdot L_{AB} \quad (10.19)$$

$L_{AB}$  [m] délka propustku mezi profily A - A' a B - B'  
 $Z_{VTZ}$  [m] místní ztráta zúžením na vtoku do propustku

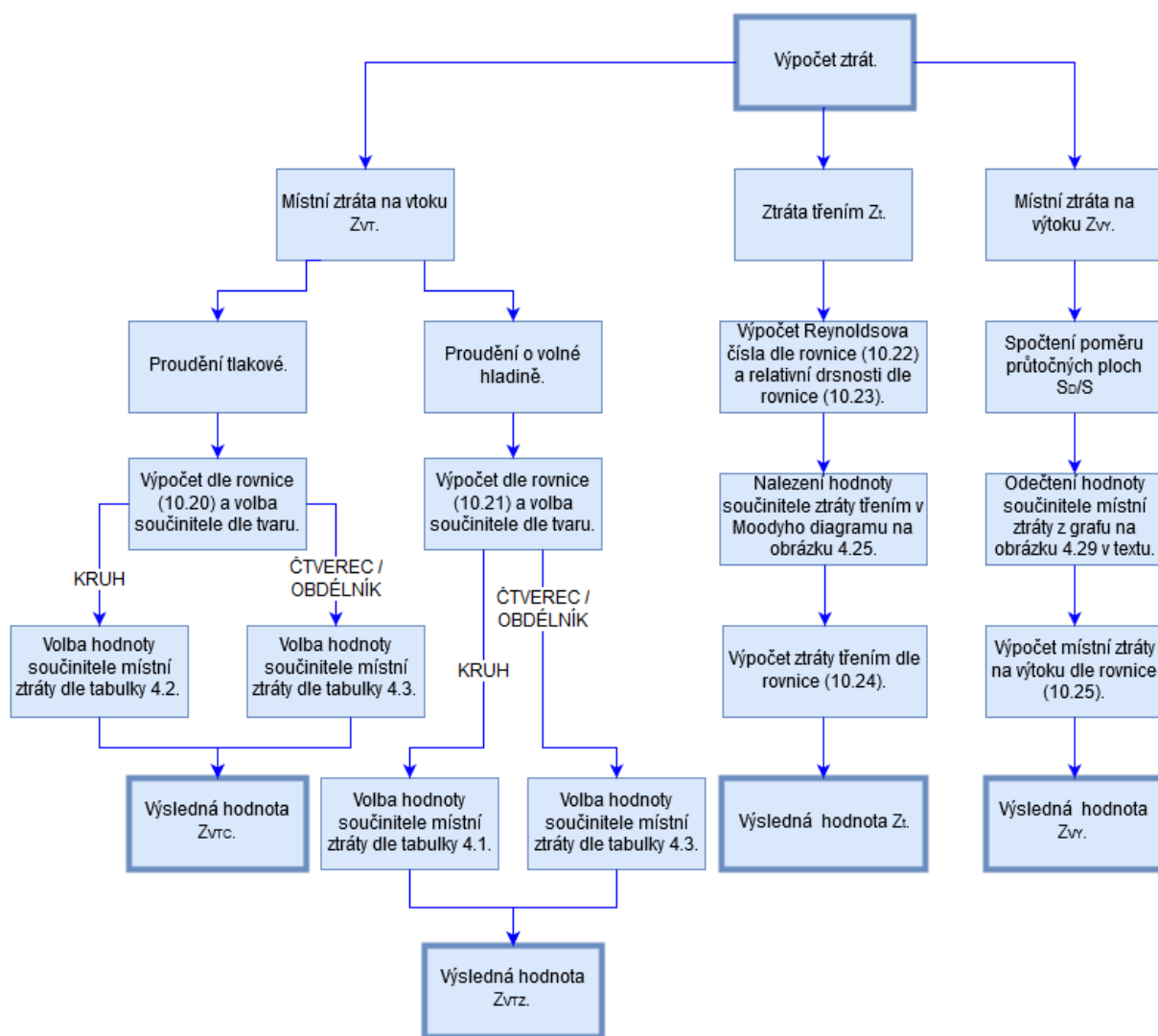


Diagram 10.4 Nástroj pro výpočet ztrát do Bernoulliho rovnice

$$Z_{VTC} = \xi_{VTC} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (10.20)$$

$\xi_{VTC}$  [-] součinitel celkové místní ztráty na vtoku do propustku  
 $v$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] rychlost proudění v propustku

$$Z_{VTZ} = \xi_{VTZ} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (10.21)$$

$\xi_{VTZ}$  [-] součinitel místní ztráty zúžením na vtoku do propustku  
 $v$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] rychlost proudění v propustku

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (10.22)$$

$Re$  [-] Reynoldsovo číslo  
 $\nu$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] kinematická viskozita

$$\frac{\Delta}{D} \quad (10.23)$$

$\Delta/D$  [-] relativní drsnost  
 $\Delta$  [m] hydraulická drsnost

$$Z_t = \frac{\lambda \cdot L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (10.24)$$

$\lambda$  [-] součinitel tření  
 $L$  [m] délka úseku s tlakovým prouděním  
 $D$  [m] vnitřní průměr propustku  
 $v$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] průřezová rychlost vody v propustku při tlakovém proudění

$$Z_{VY} = \frac{\xi_{VY} \cdot (v^2 - v_d^2)}{2 \cdot g} \quad (10.25)$$

$\xi_{VY}$  [-] součinitel místní ztráty na výtoku z propustku