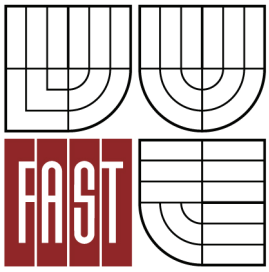


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

METODY STANOVENÍ HYDRAULICKÝCH PARAMETRŮ RÁZOVÝCH VLN V SOUVISLOSTI S PROVOZEM MVE

ESTIMATION OF HYDRAULIC PARAMETERS OF SURGE WAVES CAUSED BY THE SMALL HYDROPOWER PLANTS OPERATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — BC. JAN BRŮŽEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. ALEŠ DRÁB, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Jan Brůžek
Název	Metody stanovení hydraulických parametrů rázových vln v souvislosti s provozem MVE
Vedoucí diplomové práce	doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	16. 1. 2015

V Brně dne 31. 3. 2014

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ fakulta stavební DĚKANÁT -1-

.....	.....
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu	Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

[1] Gabriel, P. 1961. Rázové vlny v derivačných kanáloch vodných elektrární. Práce a studie VÚVH, č.14. Bratislava.
[2] Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C. 1968. Hydraulika pro vodohospodářské stavby. SNTL. Praha.
[3] Broža, V., Gabriel, P., Čihák, F., Kučerová, J., Procházka, A. 1990. Využití vodní energie. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Praha.
[4] Holata, M. 2002. Malé vodní elektrárny - projektování a provoz. ACADEMIA. Praha.
[5] Podklady související se zvolenou pilotní lokalitou s již realizovanou MVE.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Náhlé podstatné změny průtoku vody turbínami malých vodních elektráren (MVE) mají za následek vznik rázových vln v přivaděčích a odpadech těchto vodních děl. Řešení uvedených jevů je i v současnosti náročným problémem hydrauliky. Hlavním cílem zkoumání uvedených jevů je především stanovení základních hydraulických parametrů rázových vln, které zahrnují výšku čela vlny a jeho postupové rychlosti. K danému účelu lze v zásadě použít metody fyzikálního modelování (experimentální výzkum), matematického modelování popř. měření in situ.
Diplomová práce bude sestávat ze dvou částí. V první teoretické části provede diplomant rešerši dostupných podkladů v oblasti metod pro stanovení hydraulických parametrů rázových vln, které vznikají v souvislosti s výskytem havarijních stavů během provozu malých vodních elektráren (MVE). V navazující praktické části bude provedeno srovnání výsledků dvou vybraných metod na konkrétní lokalitě s již realizovanou MVE.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....

doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt: Cílem diplomové práce je ověřit zvolenou metodiku stanovení parametrů rázových vln a porovnat možnost užívání softwaru při posuzování rázových vln při manipulaci na MVE. Práce se dělí na několik částí, které zahrnují odvození analytického řešení, popis numerického řešení, verifikaci zvolených metodik a využití na reálném příkladu.

Klíčová slova: neustálené proudění, rázové vlny, střední výška vlny, doba doběhu

Abstract: The objective of this thesis is verifying estimation of hydraulic parameters of surge waves and compare the possibility to use software in assesing the surge waves caused by small hydropower plants operation. The study is divided to several parts which includederivation of analytic solution, description of numerical solution, verification of selected estimations and aplication on real example.

Keywords: unsteady flow, surge waves, medium high wave, deceleration time

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Jan Brůžek *Metody stanovení hydraulických parametrů rázových vln v souvislosti s provozem MVE*. Brno, 2015. 62 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Aleš Dráb, Ph.D

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16.1.2015

……

podpis autora

Bc. Jan Brůžek

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Aleši Drábovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za odborné vedení, cenné připomínky, rady a vstřícnou spolupráci. Poděkování patří i panu Ing. Aleši Makovskému, který ochotně poskytl podklady MVE Železný Brod. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.

Obsah:

1. Úvod..... 9

2. Cíle práce..... 10

3. Výchozí podklady..... 10

3.1 Seznam podkladů..... 10

3.2 Zhodnocení výchozích podkladů..... 11

4. Metoda a nástroje řešení..... 12

5. Současné metody řešení rázových vln..... 12

5.1 Analytické řešení průběhu rázových vln..... 14

5.1.1 Matematická formulace problému..... 14

5.1.2 Zhodnocení faktorů ovlivňujících průběh rázové vlny..... 18

5.1.3 Kladná zpětná vlna – částešné uzavření průtoku..... 20

5.1.4 Kladná zpětná vlna – úplné uzavření průtoku..... 25

5.2 Numerické řešení průběhu rázových vln..... 30

6. Posouzení využitých metod na vzorových příkladech..... 31

6.1 Fyzikální model..... 33

6.2 Analytické řešení..... 33

6.3 Numerické řešení..... 34

6.4 Verifikace výsledků..... 35

6.4.1 Částečné uzavření průtoku z 90 l/s na 60 l/s..... 37

6.4.2 Úplné uzavření průtoku 60 l/s..... 40

6.4.3 Částečné uzavření průtoku z 90 l/s na 30 l/s..... 46

6.4.4 Úplné uzavření průtoku 90 l/s..... 46

6.4.5 Závěr verifikace zvolných metod..... 49

7. Praktická aplikace v lokalitě Železný Brod..... 49

7.1 Popis zvolené lokality..... 49

7.2 Posuzované provozní stavy..... 52

7.3 Analytické řešení..... 54

7.4 Numerické řešení..... 55

7.5 Výsledky řešení..... 55

7.6 Zhodnocení aplikovaných metod..... 59

8. Závěr a diskuse..... 60

9. Seznam tabulek..... 60

10. Seznam obrázků..... 60

1. Úvod

Vliv člověka na životní prostředí se v posledních letech má stále větší společenský význam v hodnocení států a s tím souvisí větší důraz na využití obnovitelných zdrojů energie. V souvislosti s tímto trendem narostl počet malých vodních elektráren (dále jen MVE). Výstavba energetických staveb v blízkosti toku přináší i problémy, které mohou nastat při jejich budování či provozu. Jedním ze zmíněných problémů je výskyt rázových vln při manipulaci na MVE a určování jejich charakteristik. Tématem diplomové práce jsou metody stanovení hydraulických parametrů rázových vln v souvislosti s provozem MVE. Rázové vlny jsou extrémním případem neustáleného proudění, kdy dochází k náhlé změně průtoku v přivaděči popř. odpadu MVE způsobené náhlou odstávkou nebo spuštěním do provozu.

Diplomová práce je zaměřena na aplikaci metod určování hydraulických parametrů rázových a metody určování kladné zpětné vlny, která je z hlediska možných nepříznivých dopadů nejzávažnější z rázových vln. Při spouštění MVE je zvětšování odběru vody pozvolné a plynulé na základě manipulačního (popř. provozního) řádu. Tím dochází k omezení rázových vln na přípustné hodnoty. Narozdíl od náhlého uzavření průtoku MVE, který vyvolá vlnu pohybující se přivaděčem ve směru proti proudu toku (kladná zpětná vlna). Vznik samotné vlny nelze příliš předvídat, neboť je ve většině případů způsobena náhlým uzavřením soustrojí elektrárny, které není plánované a vychází z krizových situací. Z toho důvodu charakteristiky probíhajícího jevu nabývají extrémních hodnot, jelikož průběh rázových vln je zásadně ovlivněn časovým intervalem uzavření resp. otevření.

Výpočet velikosti a průběhu rázových vln vzniklých v derivačních kanálech je nezbytný zejména pro určení parametrů souvisejících s návrhem těchto kanálů, jako např. výšky kanálů popř. hrází, opevnění a těsnění svahů. Kolísání hladin v důsledku rázového jevu může mít negativní vliv např. na plavbu.

Rázové vlny představují poměrně složitý hydraulický jev. Jeho průběh lze určit analytickým řešením nebo využitím numerických metod.

2. Cíle práce

Náhlé podstatné změny průtoku vody turbínami MVE mají za následek vznik rázových vln v přivaděčích a odpadních kanálech těchto vodních děl. Řešení uvedených jevů je i v současnosti náročným problémem hydrauliky. Hlavním cílem zkoumání uvedených jevů je především stanovení základních hydraulických parametrů rázových vln, které zahrnují výšku čela vlny a jeho postupové rychlosti. K danému účelu lze v zásadě použít metody fyzikálního modelování (experimentální výzkum), matematického modelování popř. měření in situ.

Diplomová práce bude sestávat ze dvou částí. První teoretická část je zaměřena na řešerši dostupných podkladů v oblasti metod pro stanovení hydraulických parametrů rázových vln, které vznikají v souvislosti s výskytem havarijních stavů během provozu MVE. V druhé, navazující praktické části, je provedeno srovnání výsledků vybraných metod. Součástí praktické části je verifikace analytického řešení dle Gabriela [1] a numerického řešení pomocí 1D modelu s experimentálním pokusem na fyzikálním modelu [1]. Po ověření vhodnosti použití jsou metody aplikovány na již realizované MVE Železný Brod.

3. Výchozí podklady

3.1 Seznam podkladů

[1] GABRIEL, Pavel. *Rázové vlny v derivačných kanáloch vodných elektrární*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1961.

[2] PUZANOV, Alexander. *Řešení pohybu rázových vln v otevřených korytech.* Praha: ČSAV. Laboratoř pro vodní hospodářství, 1954.

[3] BOOR, B., KUNŠTÁTSKÝ, J., PATOČKA, C. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby.* SNTL. Praha. 1968.

[4] BARKAU, R.L. *One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels.* Davis, CA, 1996.

[5] ŠULC, J., JANDORA, J. *Hydraulika.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007.

[6] ČABELKA, Jaroslav. *Využití vodní energie I*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1958.

[7] KRATOCHVÍL, Stanislav. *Využití vodní energie I*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1956.

[8] BROŽA, V. a kol. *Využití vodní energie*. Praha: České vysoké učení technické, 1990.

[9] ŠTOLL, Č., KRATOCHVÍL, S.,HOLATA, M. *Využití vodní energie*, Praha: SNTL, 1977.

[10] PŐYRY ENVIRONMENT a.s., Geometrie přivaděče, půdorys stavidlového jezu, výkresová dokumentace MVE Železný Brod, Brno, 2010.

[11] KNAP, J. Manipulační řád MVE Železný Brod, Nová Paka, 2010.

[12] ČERTOUSOV, M.D. *Gidravlika, specialnyj kurz*, Gosenergoizdat, Moskva, 1957.

[13] FORSCHHEIMER, PH. *Wasserschwall und Wassersunk,* Leipzig, 1924.

[14] FAVRE, H. *Étude théorique et experimentale des ondes de translation dans les canaux décourverts,* Dunod, Paris, 1935.

[15] GROVER, P., NAUMOV, A. a KHAYER, Y. Comparison of 1D and 2D models for Dam Break flow: Simulations for Two Different River Systems. *XXth TELEMAC-MASCARET User Conference.* 2013. s. 47-52, ISBN 978-3-939230-07-6.

[16] GOUTAL, N., MAUREL., F., *A Finite Volume Solver for 1D Shallow-Water Equations Applied to an Actual River,* Int. J. Numer. Meth. Fluids 2002; 38:1-19.

[17] SEZNAM. *Mapy.cz.* [online]. 5.1.2015 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: *www.mapy.cz.*

[18] VODNÍ ELEKTRÁRNA ŽELEZNÝ BROD, a.s.. *Malá vodní elektrárna Železný Brod.* [online]. 5.1.2015 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: *http://www.vezb.cz/cz/galerie/historie/#/*

[19] BRŮŽEK, J. *Místní šetření : Fotodokumentace,* Železný Brod, 2015.

[20] CEREMA, *MASCARET v8.0 Note de principe,* Paris, 2014.

[21] REICHSTETTER, *Hydraulic Modelling of Unsteady Open Channel Flow: Physical and Analytical Validation of Numerical Models of Positive and Negative Surges,* Australia: The University of Queensland, 2011.

3.2 Zhodnocení výchozích podkladů

V dostupných materiálech je téma neustáleného proudění směřováno hlavně do odvětví tlakového proudění [5], kde při vzniku rázových jevů vznikají výrazné škody. V domácí literatuře se můžeme setkat se zpracováním uvedené problematiky především od

Gabriela [1], který odvodil výpočet pro rázové vlny v přivaděčích vodních elektráren. Ve svém díle se přímo odkazuje na práci Puzanova [2], jenž se zabýval fyzikálním principem celého jevu. Postupy výpočtu uváděné ostatními autory (viz. Čabelka [7], Kratochvíl [8] a Broža [9]) se odkazují na práci Gabriela [1] nebo jsou jím přímo zpracovány. Z hlediska aplikace numerického řešení je práce zaměřena na využití volně dostupných softwarů zabývajících se řešením vodohospodářských úloh v 1D proudění, a to softwarů TELEMAC-MASCARET [16] a HEC-RAS [4].

Odvozený postup stanovení průběhu rázových vln Gabriel [1] porovnal na experimentálním pokusu na fyzikálním modelu, jenž je součástí publikace [1]. Výsledky provedeného pokusu jsou využity pro verifikaci zvolených softwarů. Následným vyhodnocením vzájemného porovnání zvolených charakteristik rázové vlny je určena vhodnost použití na vodohospodářských úlohách. Verikované metody jsou aplikovány na již realizované MVE Železný Brod [10] se zaměřením na kritické stavy provozu [11] a zpětnou kladnou vlnu.

4. Nástroje řešení

Výpočet neustáleného proudění v otevřených korytech během rázových jevů patří i v dnešní době mezi složitější úlohy hydrauliky. Pro odvození analytického řešení je nutné zavést několik zjednodušujících předpokladů, které ale mohou mít vliv na výsledný průběh rázových vln. S pokrokem výpočetní techniky je možné k řešení složitých úloh neustáleného proudění kromě analytického řešení využít rovněž numerické modely. V současné době je možné k řešení uvedeného typu úloh využít jednorozměrné (1D) proudění (TELEMAC-MASCARET [20], HEC-RAS [4]), dvourozměrné (2D) proudění (TELEMAC-MASCARET 2D [16]) a trojrozměrné (3D) proudění (Flow 3D [21]). Diplomová práce se zabývá řešením úlohy s použitím 1D modelu, které jsou relativně náročné na vstupní data, uživatelské znalosti softwaru a čas výpočtu.

5. Současné metody řešení rázových vln

Neustálené proudění se v derivačních kanálech vyskytuje ve dvou případech:

a) Translační vlny, které jsou způsobeny náhlou změnou průtoku, např. při náhlé odstávce elektrárny nebo při spuštění elektrárny při nahrazení výpadku jiných

zdrojů. Tyto vlny jsou charakterizovány zvýšenou hladinou a přenosem změny průtoku.

b) Oscilační vlny na rozdíl od předchozího typu nepřenášejí žádný průtok a projevují se zejména zvlněním vodní hladiny z důsledku např. účinku větru nebo pohybu plavidel.

Rázové vlny jsou přímým zástupcem translačních vln a jejich průběh lze stanovit několika metodami. Jako první se nabízí empirické odvození vzorců pomocí experimentálního měření na fyzikálním modelu. Další metodou je analytický výpočet požadovaných charakteristik dle fyzikální podstaty celého jevu a odvození vzorců s odkazem na zákony hydrauliky, o které se opírá např. postup Gabriela [1] resp. Puzanova [2]. S pokrokem výpočetní techniky je možné rovněž využívat nástroje numerického modelování. Důležitým prvkem je v případě zvolení jakékoliv metody posouzení věcné přesnosti, tj. verifikace výsledků výpočtu se skutečným průběhem jevu.

Řešení rázových vln je v dnešní době důležitým předpokladem pro projektování a provoz veškerých vodních děl, kde dochází ke změnám průtoku, ať už z hlediska provozu malých vodních elektráren, jalových výpustí či jiných objektů regulujících průtok přes dílo. V souvislosti se změnou průtoku, mohou nastat dva případy:

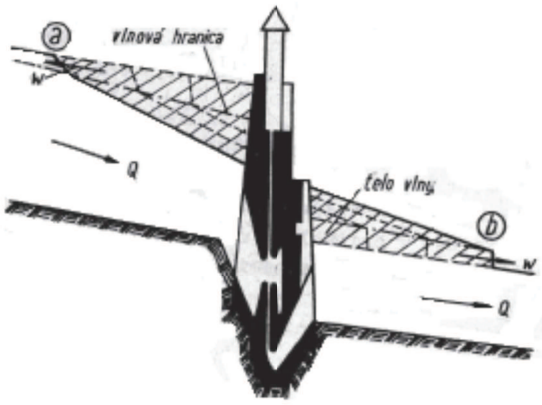
1. rychlý nárůst průtočného množství, který je spojen s náhlým spouštěním elektrárny;
2. rychlý pokles průtočného množství, který je vyvolán náhlým odstavením vodní elektrárny.

V souvislosti s vyvolanou změnou průtoku dochází v přivaděči a odpadním kanále ke dvěma stavům, které spolu navzájem korespondují, resp. objem vody průchozí přes vodní elektrárnu, jež zapříčiní zvýšení stavu v odpadním kanále, je roven úbytku objemu postupujícího přivaděčem.

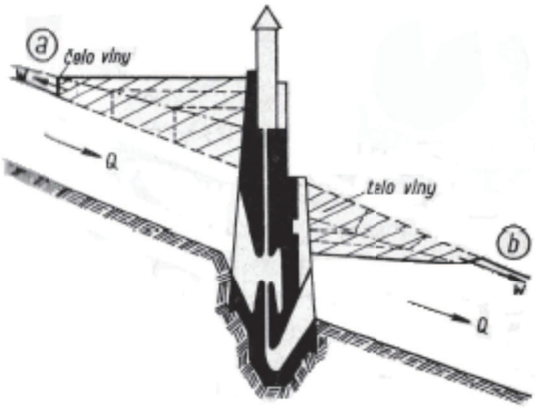
V prvním případě dochází v přivaděči k náhlému snížení hladiny, jehož vlivem vzniká záporná zpětná vlna (obr. 5.1a). Množství využité vody z prostoru nad elektrárnou je přetvořeno do poklesu hladiny. V odpadním kanále hladina stoupá a tím vzniká kladná přímá vlna (obr. 5.1b). Voda tvořící rázovou vlnu je rovna množství vody využité z přivaděče elektrárny.

Ve druhém případě, kdy se průtok snižuje, se vzniklé jevy zaměňují. V přivaděči se akumulovaná voda, kterou tvoří objem původního průtočného množství, přetvoří do kladné zpětné vlny (obr. 5.2a). V odpadním kanále je naopak původní průtočné množství nahrazeno snížením hladiny a vyvoláním přímé záporné vlny (obr. 5.2b). Stejně jako v prvním případě se objemy změn navzájem rovnají.

Z hlediska možných nepříznivých dopadů je nejzávažnější jev, ke kterému dochází při náhlém zastavení průtoku, a to v přivaděči kde nastává kladná zpětná vlna. Vznik samotné vlny nelze příliš předvídat, neboť je ve většině případů způsobena náhlým uzavřením soustrojí elektrárny, které není plánované a vychází z krizových situací. Z toho důvodu charakteristiky probíhajícího jevu nabývají extrémních hodnot, jelikož průběh rázových vln je zásadně ovlivněn dobou uzavření resp. otevření.



Obr. 5.1 Schéma rázových vln při zvětšení průtoku dle [1]



Obr. 5.2 Schéma rázových vln při poklesu průtoku dle [1]

Výpočet velikosti a průběhu rázových vln vzniklých v derivačních kanálech je nezbytný zejména pro určení parametrů souvisejících s návrhem těchto kanálů jako například výšky kanálů popř. hrází, opevnění a těsnění svahů. Naopak kolísání hladin může mít negativní vliv na plavbu.

5.1 Analytické řešení průběhu rázových vln

5.1.1 Matematická formulace problému

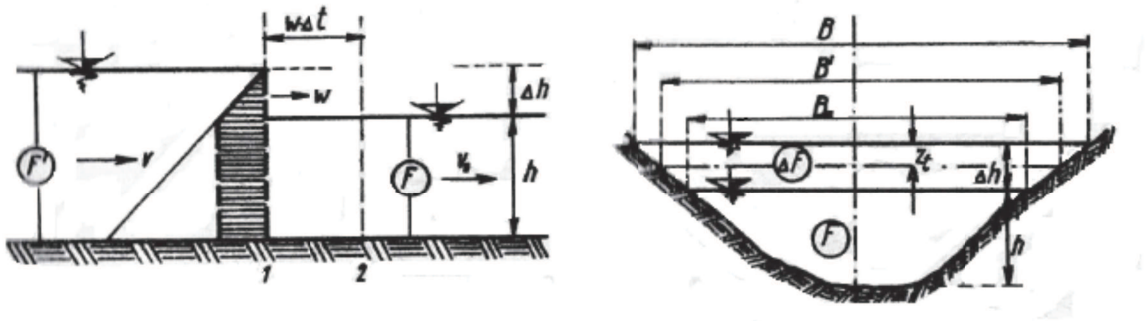
Analytické řešení je založeno na zjednodušujících předpokladech, bez kterých by nebylo reálné dosáhnout výsledků. Na správnosti zvoleného postupu a zanedbání jednotlivých vlivů závisí vypovídající schopnost řešení.

Výpočtem rázových vln se zabývalo několik autorů. V domácí literatuře převažuje metoda dle Gabriela [1], která je zmiňována v ostatních literaturách souvisejících s využitím vodní energie. Další variantou postupu je výpočetní metoda stanovená Kratochvílem [8], která, na základě stejných předpokladů jako metoda Gabriela [1], vede na iterační postup výpočtu výšky hladiny rázové vlny. Diplomová práce se zaměřuje na postup Gabriela [1], jež

odvodil postup pro přímé určení parametrů rázových vln.

Metoda dle Gabriela [1] vychází z prací dvou autorů. Jedná se o práci Čertousova [12], která je jedna z nejvýznamnější z hlediska svého praktického využití, a dále práce Puzanova [2], který ve své publikaci vysvětlil fyzikální podstatu pohybu rázových vln. Puzanov [2] odvodil vzorec pro určení postupové rychlosti a výšky čela rázové vlny pro libovolný tvar koryta a stanovil přímé řešení na výpočet rázových vln v obdelníkovém a lichoběžníkovém korytě. Jev rázových vln je způsoben neustáleným proměnným prouděním, a tak řešení je odvozeno na základě tzv. impulsové věty. Odvození základní soustavy rovnic pro obecné koryto provedeme dle Puzanova [2] pro kladnou přímou vlnu a následně upravíme pro případ kladné zpětné vlny.

Výpočet vychází z několika zjednodušujících předpokladů. Dno koryta bude vodorovné, rozdělení rychlosti po profilu bude rovnoměrné a čelo rázové vlny bude kolmé. Z postupu rázové vlny vymezíme výsek prostoru ohraničený řezy 1 a 2 , které jsou od sebe vzdáleny $w\Delta t$ (obr. 5.3), kde w značí rychlost postupu čela vlny a Δt je doba doběhu vlny.



Obr. 5.3 Schéma pro odvození pohybových rovnic dle Puzanova [2]

Z toho vyplývá, že v čase Δt proteče řezem 1 objem vody $v(F+\Delta F)\Delta t$ a řezem 2 odteče objem $v_0 F\Delta t$. Za tento čas se pak změní objem vody v ohraničeném prostoru o $w\Delta F\Delta t$ a platí vztah

$$v\left(F+\Delta F\right)\Delta t - v_0 F\Delta t = w\Delta F\Delta t \quad , \tag{5.1}$$

kde v je postupová rychlost po přechodu čela vlny,

F původní průtočná plocha,

ΔF průtočná plocha čela vlny,

v_0 původní profilová rychlost v korytě.

Vztah (5.1) lze upravit do tvaru

$$\left(Q_0+\Delta Q\right) - Q_0 = w\Delta F \quad , \tag{5.2}$$

kde Q_0 je původní průtok koryta toku,

ΔQ rozdíl průtoku po přechodu čela vlny.

Úpravou (5.2) dostáváme rovnici kontinuity ve tvaru

$$w=\frac{\Delta Q}{\Delta F} . \qquad (5.3)$$

Aby bylo možné přejít z neustáleného proudění na proudění ustálené je nutné zavést pohyblivou soustavu souřadnic. Označíme-li si postupovou rychlost čela vlny a, pak pro $w=v_0+a$, dostaneme z rovnice (5.1):

$$v(F+\Delta F)-v_0 F=(v_0+a)\Delta F , \qquad (5.4)$$

která nám po úpravě změní tvar rovnice kontinuity na

$$v-v_0=\frac{\Delta F}{F+\Delta F}a . \qquad (5.5)$$

Další z rovnic pro neznámé F a a získáme z impulsové věty. Na rozdíl od původního proudu vlna postupuje rychlostí a a za jednotku času pokryje objem $F.a$, který má hmotnost

$\rho Fa=\frac{\gamma}{g}Fa$. Původní rychlost v_0 se změní na v, z čehož vyplývá, že uvažovaná hybnost prvku vody se změní za jednotku času o hodnotu

$$\frac{\gamma}{g}Fa(v-v_0) , \qquad (5.6)$$

kde γ je měrná tíha vody,

g gravitační zrychlení.

Po směru toku na soustavu působí vnější síly, a to:

a) hydrostatický tlak, na původní průřezovou plochu $\gamma F\Delta h$;

b) hydrostatický tlak na plochu čela vlny $\gamma\Delta Fz_t$, kde z_t je označení pro vzdálenost těžiště plochy čela vlny od hladiny;

c) třecí síly a objemové síly po směru pohybu, které při vodorovném dně nebo při úvaze malého sklonu dna nabývají zanedbatelných hodnot, přičemž působí opačnými směry a navzájem se tak částečně kompenzují. Z tohoto hlediska je možné obě síly zanedbat.

V případě, že porovnáme změnu hybnosti s působení vnějších sil za jednotku času, dochází k úpravě na vzorec:

$$\frac{\gamma}{g} F a (v - v_0) = \gamma F \Delta h + \gamma \Delta F z_t , \qquad (5.7)$$

kde Δh je výška výběhu čela vlny,

z_t vzdálenost těžiště plochy čela vlny od hladiny.

Po dosazení rovnice kontinuity (5.5) do námi upraveného vztahu (5.7), dostáváme výpočet všeobecného vztahu pro relativní postupovou rychlost čela kladné vlny:

$$a = \pm \sqrt{g \left[\frac{F+\Delta F}{\Delta F} \Delta h + \frac{F+\Delta F}{F} z_t \right]} , \qquad (5.8)$$

absolutní postupová rychlost čela kladné rázové vlny potom bude

$$w = \sqrt{g \left[\frac{F+\Delta F}{\Delta F} \Delta h + \frac{F+\Delta F}{F} z_t \right]} \pm v_0 . \qquad (5.9)$$

Rovnice (5.9) obecně platí pro libovolný tvar koryta a libovnou střední výšku vlny. Rovnice je odvozena pro kladné vlny, kde při využití kladného znaménka získáme vzorec pro kladnou přímou vlnu a při aplikaci záporného znaménka kladnou zpětnou vlnu.

V případě aplikace výpočtu na stanovení postupové rychlosti čela záporné vlny, podobně odvodíme vztah ve tvaru:

$$w = \sqrt{g \left[\frac{(F-\Delta F)^2}{F \Delta F} \Delta h + \frac{F-\Delta F}{F} z_t \right]} \pm v_0 . \qquad (5.10)$$

Rychlost w je stanovena pro určení rychlosti šíření vlny v případě, že se stávající průtok v kanále pohybuje rychlostí v_0.

V případě přechodu z obecného tvaru koryta na rozměry pravidelných tvarů je možné upravit vzorce pomocí základních vztahů. V případě obdelníkového koryta platí vztahy $F=Bh$, $\Delta F=B\Delta h$ a $z_t=\frac{1}{2}\Delta h$, které po dosazení do rovnice postupové rychlosti čela vlny upraví výsledný výraz na:

$$w = \sqrt{gh \left[1 \pm \frac{3}{2} \frac{\Delta h}{h} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2 \right]} \pm v_0 , \qquad (5.11)$$

přičemž znaménko u členu $\frac{3}{2} \frac{\Delta h}{h}$ rozhoduje zda se jedná o kladnou nebo zápornou vlnu.

Pro lichoběžníkový tvar koryta je převzat zjednodušující předpoklad na základě práce Forschheimera [13], kde je uvažována výška hladiny h jako podíl průtočné plochy F a šířky průtočného profilu B' v polovině výšky čela rázové vlny (obr. 5.1). Rovnice je pak upravena

do tvaru:

$$w=\sqrt{g\frac{F}{B'}\left[1\pm\frac{3}{2}\frac{B'}{F}\Delta h+\frac{1}{2}\left(\frac{B'}{F}\Delta h\right)^2\right]}\pm v_0\ . \qquad (5.12)$$

Rovnice (5.11) je často využívána řadou autorů. Puzanov [2] ve své práci porovnáním teoretického rozboru a výsledků experimentálních metod ostatních autorů dokázal, že aplikace toho vztahu je z fyzikálního hlediska správná a dosahuje uspokojivých výsledných hodnot v porovnání s hodnotami odečtenými z praktického měření.

Dle mnohých autorů (např. Forschheimer [13], Čertousov [12] aj.) je v případě výpočtu rovnic (5.11) a (5.12) možno zanedbat kvadratický člen a využívat je ve tvaru:

$$w=\sqrt{gh\left(1\pm\frac{3}{2}\frac{\Delta h}{h}\right)}\pm v_0\ , \qquad (5.13)$$

respektive

$$w=\sqrt{g\frac{F}{B'}\left(1\pm\frac{3}{2}\frac{B'}{F}\Delta h\right)}\pm v_0\ . \qquad (5.14)$$

Obě rovnice byly již odvozeny Saint Venantem. Použití těchto vztahů je omezeno pro relativně malé vlny, při kterých není překročen poměr

$$\frac{\Delta h}{h}<0{,}25\ . \qquad (5.15)$$

V případě vln s velmi malou amplitudou Lagrange uvádí vzorec

$$w=\sqrt{g\,h}\pm v_0 \qquad (5.16)$$

Výpočet (5.16) je zejména vhodný pro určení postupové rychlosti krajního bodu čela záporné vlny, který však není součástí diplomové práce.

5.1.2 Zhodnocení faktorů ovlivňujících průběh rázové vlny

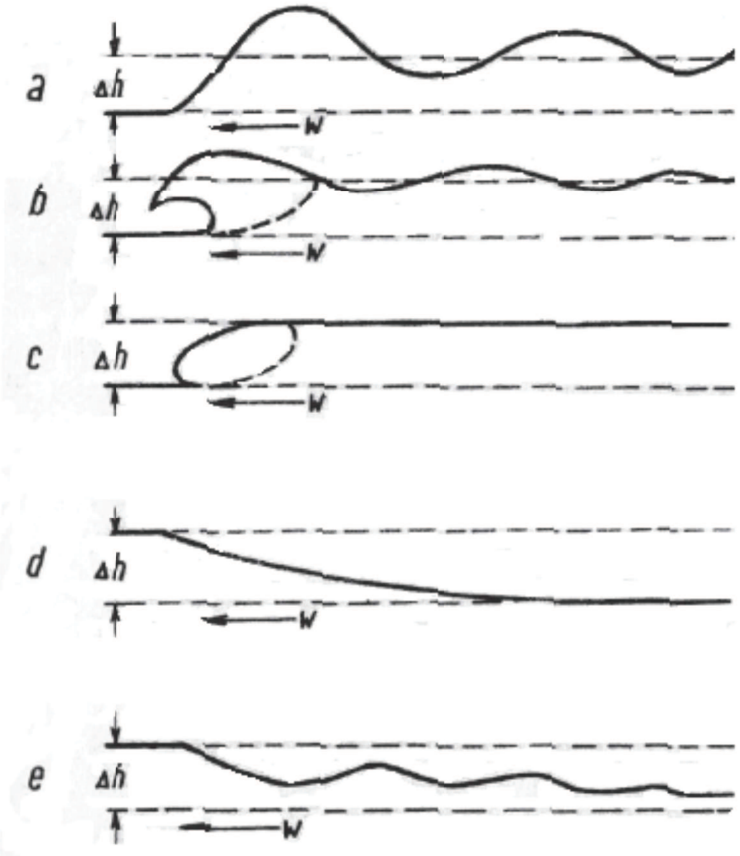
Při odvozování vztahů pro výpočet bylo zmíněno několik zjednodušujících předpokladů, které umožňují odvození výpočetních vztahů. Jelikož se jedná o složitou úlohu, musí být zpětně posouzeno zda zohlednění jednotlivých předpokladů nemá výrazný vliv na výsledné hodnoty.

Lze předpokládat, že čelo rázové vlny ve skutečnosti není svislé, jak je v uvažováno při sestavování rovnice postupové rychlosti. Kladné i záporné vlny mají téměř stejný průběh, ale liší se tvarem čela vlny. V současné době je vymezeno několik typů čel rázových vln (viz obr. 5.4). Pro kladné rázové vlny jsou to tři různé tvary čela a pro záporné vlny dva tvary čel.

První, kdo se zaměřil na hodnocení tvaru čela kladných přímých vln, byl H.Favre [14]. Stanovil, že tvar čela kladné vlny je přímo závislý na poměru střední výšky čela vlny a původní hloubky vody. Veličinu označil jako:

$$\chi = \frac{\Delta h}{h} . \qquad (5.17)$$

V případě kdy tento parametr nabývá hodnot $\chi < 0{,}28$, tedy malých výšek vln, je čelo charakterizováno postupem jednotlivých vln – tzv. zvlněné čelo (obr 5.4 a). Při velkých vlnách a poměru výšek $\chi > 0{,}28$ dochází k překlápění čela vlny (obr. 5.4 b) a následnému přechodu do tvaru vzdušného válce (obr 5.4 c). Záporné vlny se ve svém průběhu proti kladným vlnám výrazně liší. Jak vyplývá z obrázku (5.4 d, e) dochází k plynulému přechodu mezi hladinami a v úrovni původní hladiny nastává zlom, který ale ve většině případů nenastává. Blíže se k problematice tvaru rázových vln věnuje Puzanov [2] ve své publikaci. Záporné vlny nejsou součástí práce a nebudeme je podrobně rozebírat.



Obr 5.4 Typy rázových vln dle [1]

Dalším ze zjednodušujících předpokladů je rovnoměrné rozdělení rychlosti po profilu. Dle měření struktury proudění, které bylo provedeno Puzanovem [2], který se zaměřil na

bodové rychlosti v příčném profilu kanálu, se při průběhu rázové vlny rychlosti v jednotlivých místech liší, a to nejen svoji velikostí, ale také směrem. Z čehož vyplývá, že přesné určení průběhu tohoto jevu je velmi složité.

Při průběhu rázových vln dochází k jejich částečné deformaci. Touto problematikou se zabývala řada autorů a dospěli k výsledkům, při nichž dochází z počátku k formaci vlny a po ustálení nabývá svých maximálních hodnot. Při dalším postupu čela vlny dochází k jeho sploštění. Tento jev je daleko pozvolnější oproti předchozímu. Délka zformování se bere jako vzdálenost, kdy dochází k ustálení střední výšky vlny. Deformacemi rázových vln se zaobíral ve své práci také Gabriel [1], který zhodnotil jednotlivé přístupy autorů k této problematice. Mezi příčiny deformace můžeme považovat neprizmatičnost kanálu, účinek tření podél těla vlny a různé lokální vlivy v kanálu. Zhodnocení parametrů postupové rychlosti a maximálního převýšení vlny provedl na postupech od Čertousova [12] a Puzanova [2].

V případě obou metod autoři uvažují s neprizmatičností koryta. Čertousov [12] uvažuje účinek tření podél těla rázové vlny. V tomto se liší od Puzanova [2], který tření zanedbává. Ve svém postupu zanechává kvadratický člen (5.11) naopak Čertousov [12] ho při výpočtu postupové rychlosti čela rázové vlny vynechává (5.13). Při porovnání jednotlivých hodnot vychází metoda Čertousova [12] jako vhodná pro výpočet rázových vln. Vypočtené hodnoty jsou blízké hodnotám průběhu maximální výšky a postupové rychlosti. Drobné odchylky mohou být zapříčiněny ostatními vlivy, které do výpočtu nelze zanést. Naopak postup dle Puzanova [2] nedosahuje výsledků odpovídajících naměřeným hodnotám. Vypočítané výšky jsou po celou dobu průběhu téměř konstantní. Z porovnání naměřených hodnot plyne, že metoda Čertousova [12], která uvažuje s účinkem tření dochází k přesnějším hodnotám než metoda Puzanova [2] a při výpočtu nelze zanedbat účinek tření podél těla rázové vlny. Metoda Puzanova [2] je tak vhodná pouze pro výpočet výšky čela rázové vlny a postupové rychlosti v oblasti počátku vzniku rázové vlny.

5.1.3 Kladná zpětná vlna – částečné uzavření průtoku

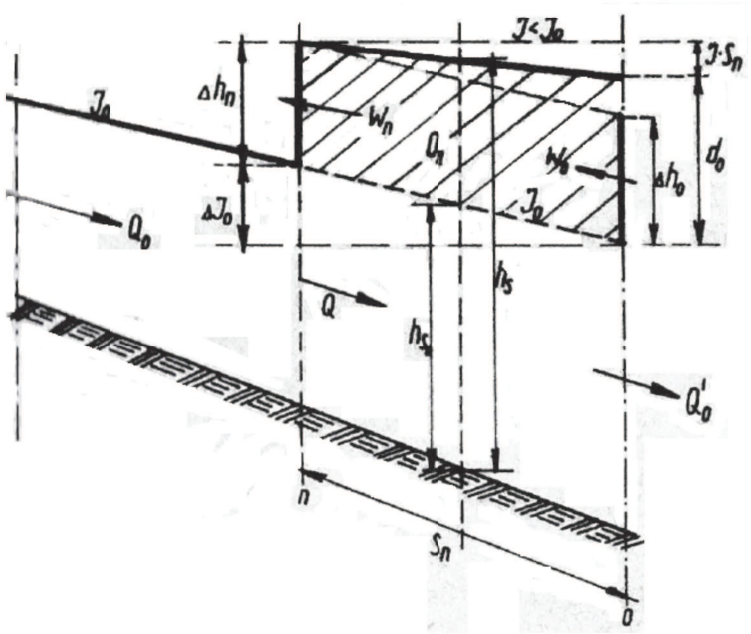
Diplomová práce se zaměřuje na řešení kladné zpětné vlny. Výpočetní postup byl převzat na základě odvozených vztahů dle Gabriela [1]. Ke vzniku kladné zpětné vlny dochází při náhlém snížení průtoku přes elektrárnu. V tuto chvíli nastávají dvě varianty, kdy může dojít k částečné regulaci průtoku, a nebo k úplnému uzavření soustrojí. Pro oba případy stanovíme vlastní početní postup.

V prvním odvození se zaměříme na regulaci průtoku v kanále. Uvažováno je ustálené proudění v kanále s průtokem Q_0 se známými hodnotami výšek hladin a hydraulických veličin

v každém profilu. Pokud se změní hodnota průtoku z Q_0 na Q_0', dojde ke snížení průtoku o hodnotu:

$$\Delta Q_0 = Q_0 - Q'_0 , \tag{5.18}$$

a tím vznikne kladná zpětná vlna, která postupuje proti směru proudění v přívodním kanálu. Stejně jako v předcházejícím odvozování rázových vln zaneseme zjednodušující předpoklady.



Obr. 5.5 Schéma kladné zpětné vlny dle [1]

Čelo rázové vlny je kolmé a rychlost proudění je rovnoměrně rozložena po celém profilu i v době postupu vlny. Původní hydraulické veličiny před vznikem rázové vlny označíme indexem $_0$. Mezi veličinami při přechodu čela rázové vlny a původními veličinami tak platí vztahy

$$Q < Q_0 \qquad \text{a} \qquad F < F_0 , \tag{5.19}$$

z čehož vyplývá

$$v < v_0 . \tag{5.20}$$

V závislosti na rychlosti pak

$$R < R_0 \qquad \text{a} \qquad C \sim C_0 , \tag{5.21}$$

kde R hydraulický poloměr po přechodu čela vlny,

R_0 původní hydraulický poloměr,

C Chézyho rychlostní součinitel po přechodu čela vlny,

C_0 původní Chézyho rychlostní součinitel.

Dále musí platit:

$$0 < J < J_0 \,, \tag{5.22}$$

kde J sklon hladiny po přechodu čela vlny,

J_0 původní sklon hladiny.

Při regulaci průtoku není hladina po průtoku rázové vlny vodorovná, nabývá sklonu který je menší než původní sklon a je uvažován konstantní v každém okamžiku.

Pro pohyb vlny při uvažovaných předpokladech v libovolném úseku je nutno odvodit několik základních rovnic (obr. 5.5).

Pro přírůstek průtoku při přechodu čela rázové vlny platí

$$\Delta Q_n = w_n B_n' \Delta h_n \,, \tag{5.23}$$

kde w_n je postupová rychlost čela rázové vlny,

Δh_n výška čela vlny,

B'_n šířka průtočného profilu v polovině výšky čela vlny.

Pro postupovou rychlost čela rázové vlny platí (5.11)

$$w = \sqrt{g h \left[1 \pm \frac{3}{2} \frac{\Delta h_n}{h_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta h_n}{h_n} \right)^2 \right]} - v_n \,, \tag{5.11}$$

kde v_{n0} je původní střední profilová rychlost,

h_n náhradní hloubka.

Pro čas postupu čela vlny platí

$$t_n = \frac{S_n}{\bar{w}_n} \,, \tag{5.24}$$

kde S_n je vzdálenost n-tého profilu od počátečního,

w_n střední postupová rychlost mezi počátečním a n-tým profilem.

$$\bar{w}_n = \frac{1}{2} \left(w_0 + w_n \right) \tag{5.25}$$

Pro rovnici kontinuity platí

$$O_n = \Delta Q_0 t_n \,, \tag{5.26}$$

kde O_n je přírůstek objemu vody za čas t_n.

Pro průměrný průtok po přechodu čela rázové vlny platí

$$\bar{Q} = \bar{K} \sqrt{J} \,, \tag{5.27}$$

kde $\bar{Q}$ je střední průtok mezi počátečním a n-tým profilem,

$\bar{K}$ střední hodnota modulu průtoku v daném úseku.

Z těchto rovnic můžeme sestavit početní postup. Přírůstek obejmu vody 0_n za čas t_n lze určit ze vztahu:

$$O_n = \frac{1}{4} S_n \left(\Delta h_n + d_0 \right) \left(B_n' + B_0' \right) , \tag{5.28}$$

kde d_0 je zvýšení hladiny v počátečním profilu na konci času t_n ,

B'_0 šířka průtočného profilu *0* odpovídajících dané výšce,

B'_n šířka průtočného profilu n odpovídajících dané výšce a

úpravou dostaneme

$$\frac{1}{2} \left(\Delta h_n + d_0 \right) = \frac{2 \Delta O_n}{S_n \left(B_0' + B_n' \right)} . \tag{5.29}$$

Poté za použití úprav rovnicemi (5.24) a (5.26) lze stanovit vztah pro výpočet hloubky vody ve středním profilu

$$\frac{1}{2} \left(\Delta h_n + d_0 \right) = \frac{2 \Delta Q_0}{\bar{w} \left(B_0' + B_n' \right)} . \tag{5.30}$$

Z obrázku (5.5) pak můžeme odečíst rovnici

$$\frac{1}{2} \left(\Delta h_n + d_0 \right) = h_s - h_{s0} , \tag{5.31}$$

kde h_s je hloubka vody ve středním profilu ,

h_{s0} původní hloubka ve středním profilu,

a po porovnání rovnic (5.30) a (5.31) dostáváme tvar

$$h_s = h_{s0} + \frac{2 \Delta Q_0}{\bar{w} \left(B_0' + B_n' \right)} . \tag{5.32}$$

Zvýšení hladiny v počátečním profilu získáme úpravou rovnice (5.29)

$$d_0 = \frac{4 \Delta Q_0}{\bar{w} \left(B_0' + B_n' \right)} - \Delta h_n , \tag{5.33}$$

modul průtoku pro střední profil je

$$\bar{K} = F_s C_s \sqrt{R_s} \ , \tag{5.34}$$

mezi profily *0* a *n* pak v daném úseku kanálu bude

$$\bar{Q} = Q_0 - \frac{1}{2}\left(\Delta Q_n + \Delta Q_0\right) , \tag{5.35}$$

a dosazením rovnice (5.27) stanovíme Q_n

$$\Delta Q_n = \left(2 Q_0 - \Delta Q_0\right) - 2 \bar{K} \sqrt{J} \ . \tag{5.36}$$

Sklon hladiny po průběhu čela vlny odvodíme z obrázku (5.5)

$$J S_n + d_0 = \Delta h_n + \Delta J_0 \ , \tag{5.37}$$

kde ΔJ_0 je původní spád hladiny,

potom sklon hladiny je

$$J = \frac{1}{S_n}\left(\Delta h_n + \Delta J_0 - d_0\right) \ . \tag{5.38}$$

Tento odvozený výpočet je poté aplikován dle Gabriela [1] jako graficko-početní úloha, při které libovolně volíme výšku čela vlny Δh_n, z které určíme postupovou rychlost čela vlny (5.11), střední postupovou rychlost z rovnice (5.25), střední hloubku v profilu z rovnice (5.32), modul průtoku pro střední profil (5.34), zvýšení hladiny v počátečním profilu (5.33) sklon hladiny po průchodu čela vlny (5.38), přírůstek průtoku v n-tém profilu (5.36) a výšku čela vlny v n-tém profilu (5.23)

$$\Delta h_n'' = \frac{\Delta Q_n}{w_n B_n'} \tag{5.23}$$

Po provedení výpočtu charakteristik jednotlivých stavů sestrojíme graf, kde znázorníme závislost $\Delta h_n'' = f_1(\Delta h_n')$ a vytvoříme průsečík s přímkou $\Delta h_n'' - \Delta h_n' = 0$ z čehož odečteme hodnotu Δh_n. Ve stejném grafu vyneseme závislost $w_n = f_2(\Delta h_n')$; a odtud odečteme pro hodnotu Δh_n hledanou hodnotu w_n.

Pro urychlení výpočtu byla stanovena přímá metoda pro kterou můžeme odvodit vztahy jako v předchozím případě. Po dopočítání hodnot v počátečním profilu přecházíme na výpočet střední výšky čela rázové vlny v n-tém profilu dle vztahu

$$\Delta h_n = \frac{\kappa' \eta' + \mu}{\eta'^2 - 2\kappa' \xi}\left[1 - \sqrt{1 - \frac{\left(\kappa'^2 - \mu\delta\right)\left(\eta'^2 - 2*\kappa' \xi\right)}{\left(\kappa' \eta' + \mu\right)^2}}\right] \tag{5.39}$$

a v tom samém profilu je postupová rychlost

$$w_n = \xi \Delta h_n + \eta' \,. \tag{5.40}$$

kde jednotlivé pomocné veličiny vypočítáme ze vztahů:

$$\xi = \frac{0.74 * \sqrt{g}}{\sqrt{h_n}} \;; \tag{5.41}$$

$$\mu = \frac{4}{n^2 S_n} \left[h_{S0} + \frac{2\Delta h_0}{1 + \frac{w_n}{w_0}} \right]^{10/3} \;; \tag{5.42}$$

$$\eta' = \sqrt{g h_n} - v_{n0} \;; \tag{5.43}$$

$$\kappa' = 2 q_0 - \Delta q_0 \;; \tag{5.44}$$

$$\delta' = \Delta J_0 - \frac{4\Delta h_0}{1 + \frac{w_n}{w_0}} \;; \tag{5.45}$$

Pro čas postupu platí rovnice (5.24). Postup řešení odpovídá předcházejícímu případu.

5.1.4 Kladná zpětná vlna - úplné uzavření turbíny

Jak již bylo zmíněno, druhý typ kladné zpětné rázové vlny nastává při úplném uzavření elektárny. Jedná se o výraznější děj, než je ten předešlý. Charakteristiky rázových vln jsou výrazně ovlivněny dobou uzavíraní elektrány a velikostí změny průtoku. K úplnému uzavření turbíny dochází v běžném provozu zřídka, nejčastěji nastává náhlá změna, která je vyvolaná krizovou situací a dochází tak k uzavření ve velmi malém časovém horizontu. Z tohoto důvodu se jedná o výrazný a nepředvídatelný vliv, kterému se při provozu MVE nedá předejít. Pro tento jev byl odvozen výpočet dle Gabriela [1], který je následně částečně upraven jednoduššími výrazy tak, aby se výsledné charakteristiky daly určit přímou metodou [3].

Pro výpočtovou metodu je nutné jako v předešlých případech zavést zjednodušující předpoklady. Čelo rázové vlny je kolmé a rychlost proudění je rovnoměrně rozložena po celém profilu i po dobu průběhu vlny. V tomto případě lze předpokládat, že mezi počátečním profilem a čelem rázové vlny neprotéká žádný průtok. V případě, že budeme vycházet z tohoto předpokladu, můžeme křivku volné hladiny považovat za vodorovnou. Výpočet

nejdříve stanovíme pro obdelníkové koryto a následně upravíme pro lichoběžníkové, které je přirozenější pro toky v přírodě. Výpočet pro libovolný úsek kanálu:

Výpočet přírůstku průtoku při přechodu rázové vlny:

$$\Delta Q_n = w_n B \Delta h_n \tag{5.23}$$

postupová rychlost čela rázové vlny:

$$w_n = \sqrt{g h \left[1 \pm \frac{3}{2}\frac{\Delta h}{h} + \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 \right]} - v_0 \tag{5.11}$$

čas postupu čela vlny:

$$t_n = \frac{S_n}{\bar{w}_n} \tag{5.24}$$

rovnice kontinuity:

$$O_n = \Delta Q_0 t_n \tag{5.26}$$

Pro zjednodušení výpočtu a stanovení přímé metody využijeme úpravy rovnice postupové rychlosti čela rázové vlny (5.11). Zavedeme poměrnou veličinu

$$x = \frac{\Delta h_0}{h_0} \tag{5.46}$$

a následně provedeme úpravu rovnic (5.11) a (5.23)

$$w_0 = \sqrt{g h_0}\left(1 + \frac{3}{2}x + \frac{1}{2}x^2\right)^{1/2} - v_0 \ , \tag{5.47}$$

$$w_0 = \frac{h_0 v_0}{\Delta h_0} = \frac{v_0}{x} \ . \tag{5.48}$$

Rovnici (5.32) pak upravíme pomocí subsituce

$$f(x) = \left(1 \pm \frac{3}{2}x + \frac{1}{2}x^2\right)^{1/2} = x K(x) + 1 \ , \tag{5.49}$$

kde funkce K se pohybuje v mezích 0-1, které vyhovují praktickým výpočtům, pro náš výpočet lez předpokládat konstantní hodnotu K=0.74. Tato úprava nám dovolí přepsat rovnici

pro rychlost postupu čela rázové vlny (5.47) na tvar

$$w_0 = \sqrt{g h_0}(0.74x + 1) - v_{n0} \ , \tag{5.50}$$

následnou úpravou rovnice (5.23) dostaneme výraz

$$w_0 = \frac{\Delta Q_0}{B h_0} = \frac{\Delta Q_0}{B H_0 x} \ . \tag{5.51}$$

Rovnice (5.50) a (5.51) tvoří soustavu dvou rovnic a dvou neznamých a to w_0 a x, pomocí kterých pak lze dopočítat h_0:

$$h_0 = x H_0 \ . \tag{5.52}$$

Dalším předpokladem je splnění objemové podmínky

$$O_n = \Delta Q_0 t_n \ , \tag{5.53}$$

kde O_n je objem vody, o který vzroste hladina vody v daném kanále za celkový čas t_n, v němž postoupila rázová vlna z 0 do n-tého profilu. Po tuto dobu stále přitéká do horní části $Q0=konst$ a v dolní části odtéká průtok $Q_0 - \Delta Q_0 = 0$. Z čehož vyplývá přibližně

$$t_n = \frac{L_n}{\frac{1}{2}(w_0 + w_n)} \tag{5.54}$$

a po úpravě rovnicí (5.38) dostaneme:

$$w_n = \frac{2 L_n \Delta Q_0}{O_n} - w_0 \ . \tag{5.55}$$

Nyní z této rovnice můžeme, spolu s řešení rovnice (5.11), nalézt v libovolném profilu hodnoty h_n a w_n. Výslednou velikost těchto charakteristik je nutné dosáhnout zkoušením. Další úpravou rovnic můžeme dosáhnout přímého řešení. Při původním konstantním sklonu hladiny J_0 je přibližně přírůstek objemu

$$O_n = \frac{1}{2} B L_n (2 h_n + J_0 L_n) \tag{5.56}$$

a následně dosazením rovnic (5.56) a (5.23) do rovnice (5.55) dostáváme tvar

$$w_n = \frac{4 v_{n0}}{2 x_n + \frac{J_0 L_n}{H_n}} - w_0 \quad , \tag{5.57}$$

kde v_{n0} je původní rychlost v n-tém profilu a čase 0. Z toho pak

$$x_n = \frac{2 v_{n0}}{w_n + w_0} - \frac{J_0 L_n}{2 H_n} \, . \tag{5.58}$$

Pro postupovou rychlost w_n už byla odvozena rovnice (5.50):

$$w_0 = \sqrt{g H_n}(0.74 x + 1) - v_0 \tag{5.50}$$

a vložením rovnice (5.58) vzniká rovnice:

$$w_0 = \sqrt{g H_n}\left(\frac{1.48 v_{n0}}{w_n + w_0} - \frac{0.37 J_0 L_n}{H_n} + 1\right) - v_0 \, . \tag{5.59}$$

Z této rovnice jsou vytknuty členy A, D které mají tvar:

$$A = 1.48 v_{n0} \sqrt{g H_n} \, , \quad D = \sqrt{g H_n}\left(1 - \frac{0.37 J_0 L_n}{H_n}\right) - v_{n0} \, . \tag{5.60}$$

A jenoduchou úpravou pak lze získat kvadratickou rovnici

$$w_n^2 + w_n(w_0 - D) - (A + D w_0) = 0 \, . \tag{5.61}$$

Pro daný výpočet má fyzikální smysl pouze kladný kořen

$$w_n = \frac{-(w_0 - D)}{2} + \sqrt{\left(\frac{w_0 - D}{2}\right)^2 + A + D w_0} \, . \tag{5.62}$$

Střední výšku čela vlny se poté snadno vypočítá dle rovnice (5.58) kde $h_n = x_n H_n$.

Tento výpočet byl odvozen pro obdelníkové koryto. Tyto výsledky se dají s dostatečnou přesností využít i při postupu rázové vlny v lichoběžníkovém korytě. S ohledem na zavedení náhradní hloubky H_n, která nahradí původní hloubku ustáleného proudění.

$$H_n = \frac{S_{n0}}{B'_n} \, , \tag{5.63}$$

kde S_{n0} je plvodní průtočná plocha v n-tém průřezu a B'_n je šířka průřezu v polovině vyšky čela rázové vlny. Jelikož z počátku není známa střední výška vlny a jednotlivé parametry, rovnice (5.63) nelze dopočítat. Lze vypočítat jednotlivé parametry pro počáteční stav bez vzdutí:

$$H_n = \frac{S_{n0}}{B_0}\ , \tag{5.64}$$

a dosadit do soustavy rovnic

$$w_0 = \sqrt{g\,H_0}(0.74\,x+1) - v_0 \quad , \tag{5.65}$$

$$w_0 = \frac{\Delta Q_0}{B H_0 x}\ . \tag{5.66}$$

Z těchto dvou rovnic lze následně dopočítat h_0 a w_0, které umožní dopočítat šířku hladiny v polovině výšky rázové vlny B'_0. A zpřesněná náhradní hloubka bude:

$$H_{n0} = \frac{S_0}{B'_0} \tag{5.63}$$

pomocí této hodnoty se opakujeme předešlý výpočet. V tuto chvíli jsou známé vstupní parametry pro výpočet průběhu vlny v dalším profilu. Dle dopočítané hodnoty B'_0 lze stanovit přibližně B'_1 a tím náhradní hloubku:

$$H_1 = \frac{S_1}{B'_1} \tag{5.67}$$

Následně dle rovnice (5.60) lze stanovit pomocné hodnoty A,D v závislosti na kterých je možné dopočítat postupovou rychlost čela rázové vlny v profilu 1.

$$w_1 = \frac{-(w_0 - D)}{2} + \sqrt{\left(\frac{w_0 - D}{2}\right)^2 + A + D w_0} \tag{5.62}$$

Pomocí této rychlosti pak lze dopočítat střední výšku čela vlny v průřezu 1:

$$h_1 = H_{n1}\left(\frac{2v_1}{w_1 + w_0} - \frac{J_0 L_1}{2H_{n1}}\right). \tag{5.69}$$

Pokud dojde k velkému rozdílu mezi hodnotami B'_0 a B'_1, musí dojít opakováním výpočtu k dopřesnění výsledných hodnot. V případě, že jsou hodnoty přibližně stejné, lze přikročit k výpočtu nejvyššího vrcholu zvlněného čela nad původní hladinou:

$$h_{1\,max} = H_{n1}\left(\frac{v_1 + w_1}{gH_{n1}} - 1\right) \tag{5.69}$$

a doby doběhu čela vlny z počátečního profilu do profilu 1:

$$t_{01}=\frac{2L_1}{w_0+w_1} \tag{5.70}$$

Následně je možné vypočítat požadované charakteristiky v navazujících zájmových příčných profilech stejným postupem jako v uvedeném případě.

5.2 Numerické řešení průběhu rázových vln

Rozvojem výpočetní techniky nastává změna ve výpočtových postupech a původní jedinečné řešení pomocí analytických metod je dnes střídáno numerickými modely. Využití softwaru velmi usnadňuje práci, kde oproti pracným metodám výpočtu můžeme na základě dosazení potřebných vstupních parametrů získat výsledné hodnoty v kratším časovém horizontu. Při aplikaci numerických modelů je vhodné provést verifikaci řešení, zda byl zvolen správný typ modelu a výsledné hodnoty mají dobrou vypovídající schopnost. K řešení problematiky rázových vln byly zvoleny volně dostupné softwary HEC-RAS a TELEMAC-MASCARET. Programy simulují proudění v 1D a jsou určeny především pro výpočet proudění v korytech a to jak pro ustálené tak neustálené.

HEC-RAS je software vyvíjený americkým ministerstvem obrany. Pod toto misterstvo spadá díky začlenění vodního hospodářství Spojených států amerických do oblasti národní bezpečnosti. Software je tak zdokonalován za státní peníze a je poskytován zdarma pro veřejné účely. Výpočetní model HEC-RASu je založen na metodě konečných diferencí. Výpočetní model byl sestaven dle R.L. Barkaua [4]. Po spuštění výpočtu v HEC-RASu bylo zjištěno, že software nedokáže poskytovat výsledky v menším časovém kroku než jedné minuty a z tohoto důvodu není možné provést verifikace s experimantálním měřením na fyzikálním modelu dle Gabriela [1] a proto byl z dalšího řešení vyřazen.

Dalším zástupcem volně dostupných softwarů je TELEMAC-MASCARET [16]. Výpočetní modul zakládající se na numerické metodě konečných diferencí [20] je zaměřen na stanovení charakteritik za předpokladu 1D proudění. Dokáže pracovat s jednoduchou nebo větevnou sítí, říčným nebo bystřinným prouděním, ustáleným nebo neustáleným prouděním. Pomocí programu lze řešit problematiku modelování záplavových území, rázových vln v případě poruchy přehrad nebo vodních elektráren, úpravy toků, zavlažovací kanály, transport sedimentů nebo kvalita vody.

TELEMAC-MASCARET slouží pouze jako výpočetní modul a je nutné doplnit program o předvýpočetní nadstavbu FUDAA-PREPRO. Nadstavba umožňuje uživateli zadávání jednotlivých parametrů a charakteristik, a tvoří tak uživatelské prostředí pro TELEMAC-MASCARET jako geografický informační systém. GIS uživateli zpřístupňuje

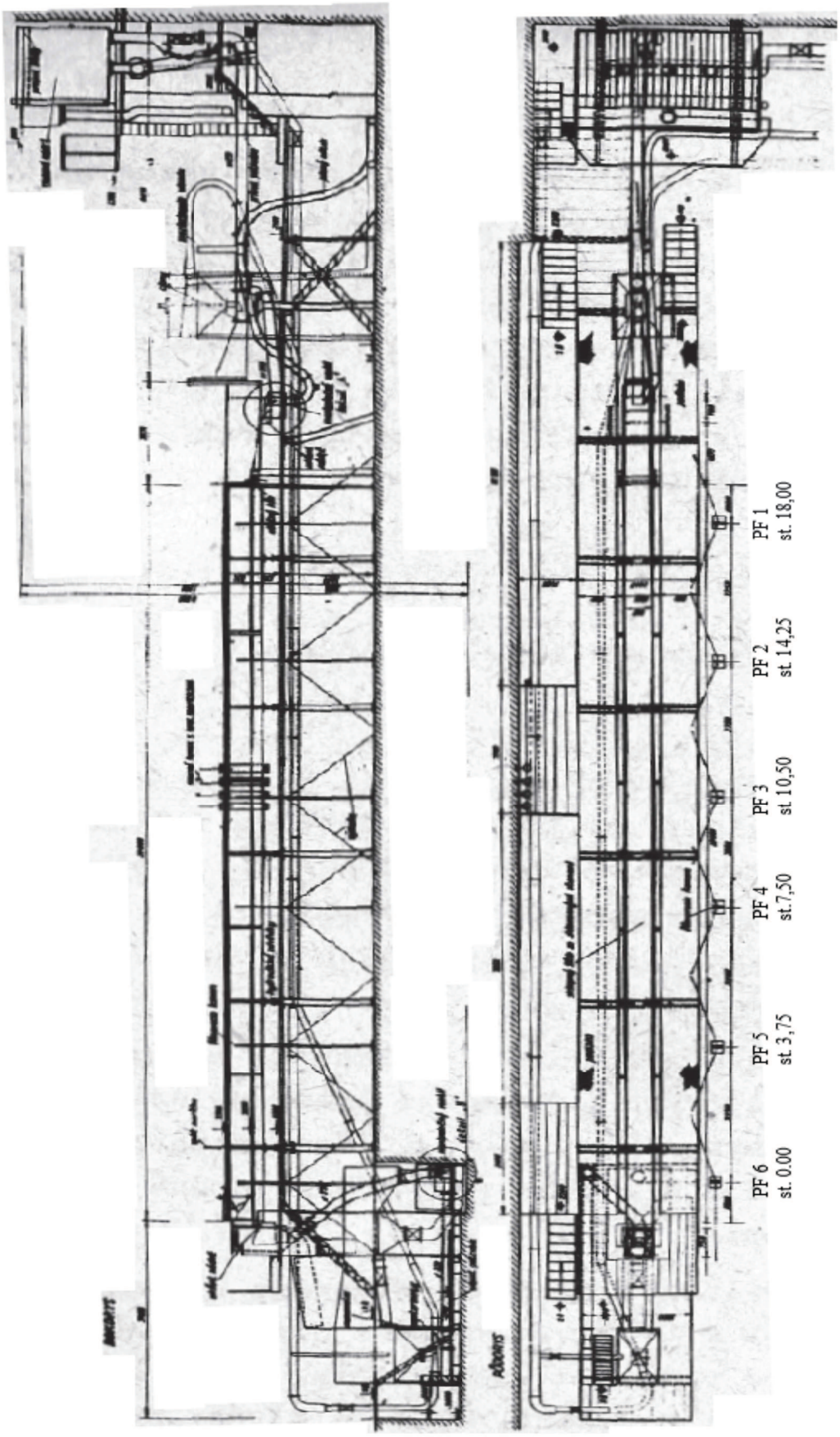
zadání směru toku, příčných profilů, okrajových podmínek, počátečních podmínek, rozdělení výpočetní sítě, objektů na toku a zadání charakteristik koryta.

Zadání vstupních parametrů je seřazeno do několika po sobě jdoucích kroků. V prvé řadě je nutné nadefinovat výpočetní síť toku, respektive určit, o jaký typ proudění se jedná. Na výběr je z bystřinného proudění, ustáleného proudění a neustáleného říčního proudění. Po výběru typu proudění se zpřístupní položka vytvoření hydraulické sítě, kde je možné pomocí grafických funkcí sestavit výpočetní síť. Po délce sítě je možné nadefinovat příčné profily a jejich rozestupy. V jednotlivých uzlových bodech lze nastavit okrajové podmínky, které mohou být určeny formou grafů. Mezi hlavní využívané typy patří graf závislosti průtoku nebo vodního stavu na čase, graf závislosti průtoku včetně vodního stavu na čase, měrná křivka a jiné. Po vytvoření sítě s jednotlivými okrajovými podmínkami přistoupime k rozdělení početní sítě. Možnost volby kroku sítě (tzv. prostorové diskretizace) je v podélném směru a v příčném směru toku. Při volbě neustáleného proudění je k dispozici nastavení počátečních podmínek, které lze zadat pomocí průtoku a odpovídajícího vodního stavu. Přesnost výpočtu lze také změnit velikostí časového kroku a následný celkový výpočet omezit několika parametry jako je např. počet časových kroků nebo celkový čas simulace. Drsnost povrchu lze zadat dle Stricklera, Chézyho, Colebrooka nebo Bazina.

Výsledky je možné zobrazit na příčných profilech, kde v závislosti na čase vidíme průběh vodního stavu v korytě toku. Další možností zobrazení je podélný profil. Výsledky jsou znázorněny s podrobností námi zvolených časových kroků. TELEMAC-MASCARET výsledky znázorňuje v časových krocích menších než jedna sekunda a je možné verifikovat využití programu na experimentálním pokusu Gabriela [1].

6. Verifikace metod řešení na fyzikálním modelu

Diplomová práce se zaměřuje především na výpočet kladné zpětné rázové vlny analytickým výpočtem dle Gabriela [1] a numerickým řešením programu TELEMAC-MASCARET. Ve své publikaci popisuje výpočtovou metodiku s odkazem na práci Čertousova [12] a Puzanova [2]. Autor provedl experimentální pokus na fyzikálním modelu, který měl za úkol potvrdit nebo vyvrátit správnost odvozeného analytického výpočtu. Shoda analytického výpočtu a experimentálního pokusu byla potvrzena a v diplomové práci poslouží jako prostředek pro verifikaci stanovených výsledků. Součástí každého posouzení bude porovnání průběhu rázové vlny dle analytického řešení [1] s numerickým řešením pomocí programu TELEMAC-MASCARET. Průběh hladin je odečten z literatury [1] a porovnán s



Obr. 6.1 Schéma hydraulického žlabu [1]

výsledky TELEMAC-MASCARET. Verifikace prováděných pokusů je vhodným podkladem pro obhajobu vlastních výsledků práce. Z celé řady prováděných pokusů rázových vln je využita stať věnující se výsledkům experimentů kladných zpětných vln. Pokusy byly prováděny v dostatečném počtu měření, aby bylo možné ověřit správnost všech zavedených předpokladů.

6.1 Fyzikální model

Měření dle [1] probíhalo na hydraulickém žlabu s proměnných spádem (viz Obr. 6.1). Žlab měl pravoúhlý profil o rozměrech 0,60 x 0,60 m. Celková užitná délka žlabu činila 20 m. Stěny celého žlabu byly ze skleněných tabulí. Součástí systému byla tlaková nádrž, z které vyúsťuje přívodní potrubí, a záchytná nádrž s odvodním potrubím. K vyhodnocení pokusu byly použity kamery, na které byl nahrán záznam průběhu rázové vlny. Dodatečně tak mohlo dojít k vyhodnocení jevu. Kamery byly umístěné v šesti zvolených profilech tvořících 18 m dlouhý měřený úsek. První kamera byla umístěna 1 m od konce žlabu, další dvě kamery se stejným rozestupem 3,75 m od předcházející kamery. Čtvrtá kamera byla vzdálena 3 m od předchozí, pátá a šestá jako v předchozím případě s rozestupem 3.75 m dotváří osově symetrické rozmístění kamer podél žlabu.

Žlab byl nakalibrován na zkoušené průtoky. Na průtočné množství 30, 60, 90 l/s byly nakalibrovány dvě hodnoty drsností, které odpovídaly sklonům žlabu. Pro sklon 1,66 ‰ byl stanoven Manningův součinitel drsnosti žlabu 0,014 – 0,0125 dle výšky hladiny. Pro sklon 2,15 ‰ se hodnota Manningova součinitele drsnosti pohybovala v rozmezí 0,016 – 0,014.

6.2 Analytické řešení

Výsledné hodnoty analytického řešení jednotlivých zvolených případů nebyly převzaty dle výsledků Gabriela uváděných v literatuře [1], ale byly stanoveny vlastním výpočtem dle odvozeného postupu (viz kapitola 5.1). V těchto hodnotách dochází, i přes předpoklad naprosté rovnosti, k malým odchylkám, které mohou být způsobeny špatným odečtením hodnot z literatury důsledkem špatné čitelnosti, vlivem zaokrouhlování v jednotlivých fázích výpočtu nebo přizpůsobení aktuálním vlivům, které nejsme schopni dodatečně posoudit. Experimentální úsek byl stanoven na 18 m, tedy vzdálenost krajních kamer. Ve vzdálenosti 1 m od uzávěru (první kamera), se nachází 0-tý profil (resp. profil 6), od kterého se odvíjí následný výpočet průběhu vlny. Provedené experimentální pokusy se liší

mírou změny průtoku, a to na částečné omezení průtoku a úplné uzavření průtoku. Pro oba typy změn je stanoven odlišný postup výpočtu.

Při omezení průtoku je počáteční střední výška vlny stanovena iterací se třemi opakováními pro dostatečné zpřesnění výpočtu. Iterovanou rovnici je možné odvodit z porovnání rovnic (5.11) a (5.23). Následně je možné dle rovnice (5.23) dopočítat postupovou rychlost čela vlny v počátečním profilu. Dále můžeme navázat na odvozený přímý postup určení charakteristik rázové vlny v navazujících profilech. Dopočítáním veličin dle rovnic (5.41), (5.42), (5.43), (5.44) a (5.45) získáme neznámé pro stanovení rovnic (5.39) a (5.40). Doba doběhu se určí z rovnice (5.24).

Pro případ úplného zastavení průtoku je postup odlišný. Charakteristiky v počátečním v profilu stanovíme ze soustavy dvou rovnic (5.50) a (5.51). Rovnice mají dvě neznámé x a w_0. Poté můžeme snadno dopočítat střední výšku rázové vlny ze vztahu (5.46). V nádcházejícím profilu vypočítáme pomocné veličiny dle rovnice (5.60), které následně dosadíme do rovnice (5.62) a získáme rychlost postupu rázové vlny v daném profilu. Střední výšku dopočítáme dle vztahu (5.69). V dalších profilech opakujeme stejný postup.

Jelikož se jedná o pravoúhlý žlab s ustáleným prouděním, není nutné v každém profilu dopočítávat velikost počáteční střední profilové rychlosti a šířky žlabu v úrovni hladiny.

6.3 Numerické řešení

V předchozích kapitolách jsme se zmínili o současných možnostech využití numerických modelů pro řešení hydraulických úloh. Pro zvolený program nebyly nalezeny publikace zabývající se praktickou aplikací numerických modelů na řešení průběhu rázových vln. I z tohoto důvodu je vhodné provést verifikaci programu a ověřit tak věcnou přesnost modelu. Tato kapitola se zaměřuje na srovnání experimentálního pokusu dle Gabriela [1] se softwarem TELEMAC-MASCARET. Nabízí se i porovnání se softwarem HEC-RAS. Jak již bylo uvedeno při popisu jednotlivých výpočetní modelů, HEC-RAS při prezentaci výsledků poskytuje hodnoty průběhu neustáleného proudění pouze v minutových intervalech, a to je v případě experimentálního pokusu nedostačující. Veškeré průběhy rázových vln se odehrávají v intervalu 10 – 30 sekund.

V případě softwaru TELEMAC-MASCARET dochází také k drobným změnám oproti původním předpokladům. Při výběru proudění bylo zvoleno neustálené říční proudění, ale po přehodnocení fyzikálního modelu je nutné zvolit variantu bystřinného proudění, v kterém je možné počítat s ustáleným i neustáleným prouděním. Žlab zadáme do softwaru v plné délce

20 m, pouze při odečítání hodnot se omezíme na zájmový úsek dlouhý 18 m. Při zadávání geometrie musíme zohlednit sklon dna a připočítat ho k výškovým souřadnicím kanálu. Po vytvoření říční sítě je zvoleno dělení říční sítě po délce na hodnotu 0,1 m a po výšce v daných profilech také 0,1 m. Od navolení hustoty výpočetní sítě přecházíme k zadání časových kroků, které jsou důležitým faktorem pro přesnost výsledných hodnot a stabilitu výpočtu. Prvním voleným faktorem je velikost časového kroku pro samotný výpočet, který je určující pro interval prezentace výsledných hodnot, a celkovou dobu probíhajícího jevu. Časový krok je stanoven na 0,1 s. Délka jevu je v našem případě porovnávání známá, a pokud nepředpokládáme výraznou odchylku, bude pro zadání dostačující. V ostatních případech je nutné pomocí provedení několika výpočtů stanovit dobu částečně vyšší než je přesná doba trvání jevu. Částečně vyšší je uváděno s ohledem na fakt, že při výrazném překročení doby trvání jevu dochází v důsledku postupného plnění přivaděče a nárůstu hladiny k umělému navyšování hodnot od konce výpočtového kanálu a následně zkreslení výsledků. V případě zadání krátké doby trvání jevu nedojde k průběhu po celé délce žlabu a není možné stanovit požadované charakteristiky ve všech zájmových profilech. Při zvolení typu drsnosti žlabu je vybráno zadání dle Chézyho. Ze známých hodnot drsností dopočítáme velikost Chézyho součinitele. Pro obě drsnosti je zvolena hodnota 55 $m^{0,5}/s$.

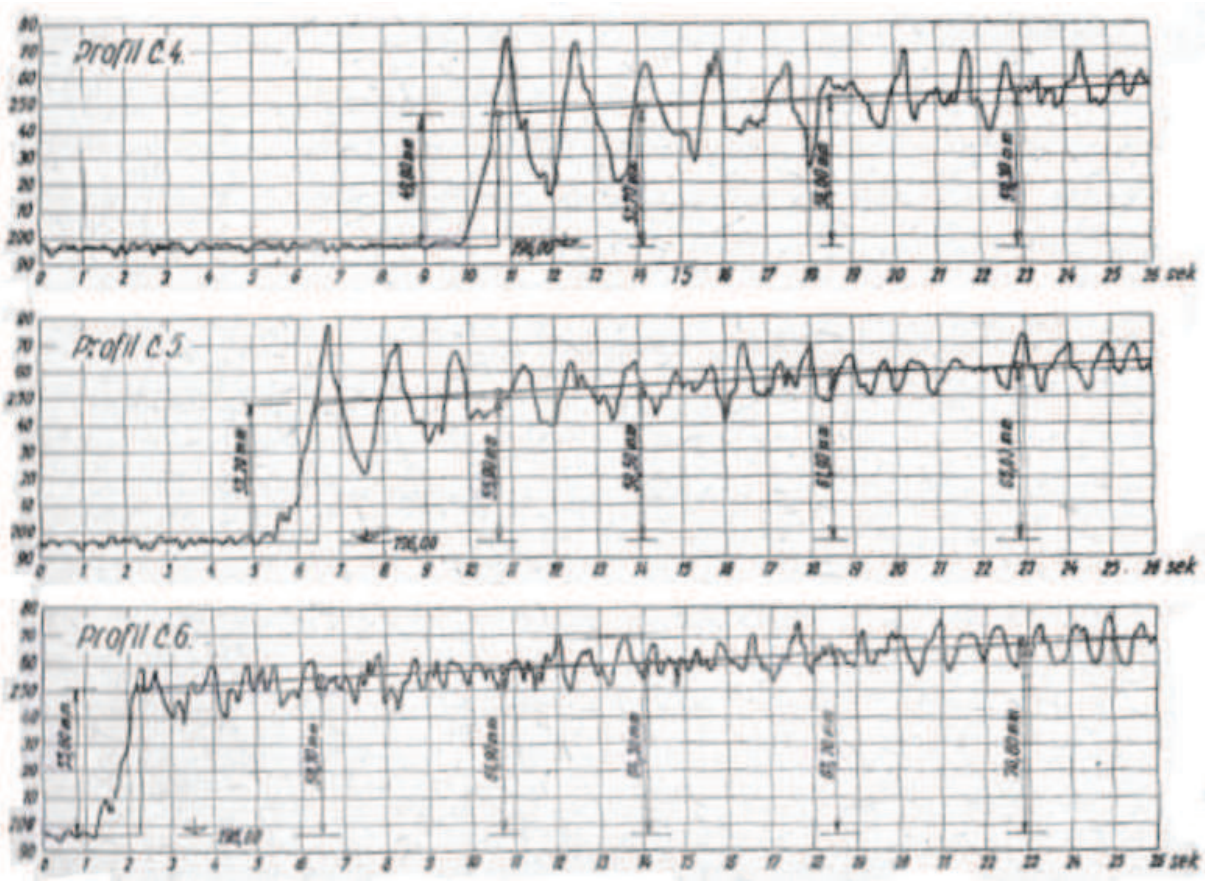
Po správném sestavení modelu můžeme přistoupit ke srovnání vypočtených hodnot porovnáním s výsledky dle Gabriela [1]. Srovnání provedeme na čtyřech výše zmíněných vodních stavech.

6.4 Verifikace výsledků

Změřené výsledky průběhu rázových vln dle [1] byly zpracovány do jednotlivých grafů, kde je uvedena výška hladiny rázové vlny v závislosti na čase po dobu průběhu jevu. Tento graf byl sestaven pro každý měřený profil samostatně (obr. 6.2). Profily odpovídají umístěným kamerám. Z grafu je možné odečíst charakteristiky průběhu rázových vln, a to střední výšku čela vlny a dobu doběhu čela vlny do jednotlivých profilů. Autor zde také porovnává přesnost odvozeného analytického řešení, které zaznamenal lomenou čarou do průbehu hladin v jednotlivých časových krocích. Při pohledu na vzájemnou polohu čar vyplývá, že analytické řešení odpovídá středním hodnotám experimentálně změřených hodnot, a tak lze uvažovat odvozený postup řešení za správný.

Po ověření správnosti odvozeného výpočtu a experimentálního pokusu převzatého od Gabriela [1] je nutné provést verifikaci softwaru TELEMAC-MASCARET. Vyhodnocení je

posuzováno na charakteristikách kladné zpětné rázové vlny. Pro každý z řešených příkladů jsou porovnány hodnoty středních výšek čela vlny a doby doběhu do daného profilu. Výsledek je v tomto případě porovnáván pouze s analytickým řešením. Pro



Obr. 6.2 Vyhodnocení experimentálního pokusu snížení průtoku z 90 l/s na 60 l/s dle [1]

porovnání s experimentálním pokusem je zvoleno znázornění průběhu hladiny ve vybraném profilu po dobu průběhu rázové vlny od uzavření po dosažení posledního měřeného profilu. Verifikace je provedena na čtyřech případech uváděných v literatuře [1]. Se zaměřením na kladné zpětné vlny jsou zvoleny tyto případy:

- snížení průtoku z 90 l/s na 60 l/s při sklonu dna 1,66 ‰ a frakci kameniva na dně modelu 2,5 mm;
- úplné uzavření průtoku 60 l/s při sklonu dna 1,66 ‰ a frakci kameniva na dně modelu 2,5 mm;
- snížení průtoku z 90 l/s na 30 l/s při sklonu dna 2,15 ‰ a frakci kameniva na dně modelu 12,5 mm;
- úplné uzavření průtoku 90 l/s při sklonu dna 2,15 ‰ a frakci kameniva na dně

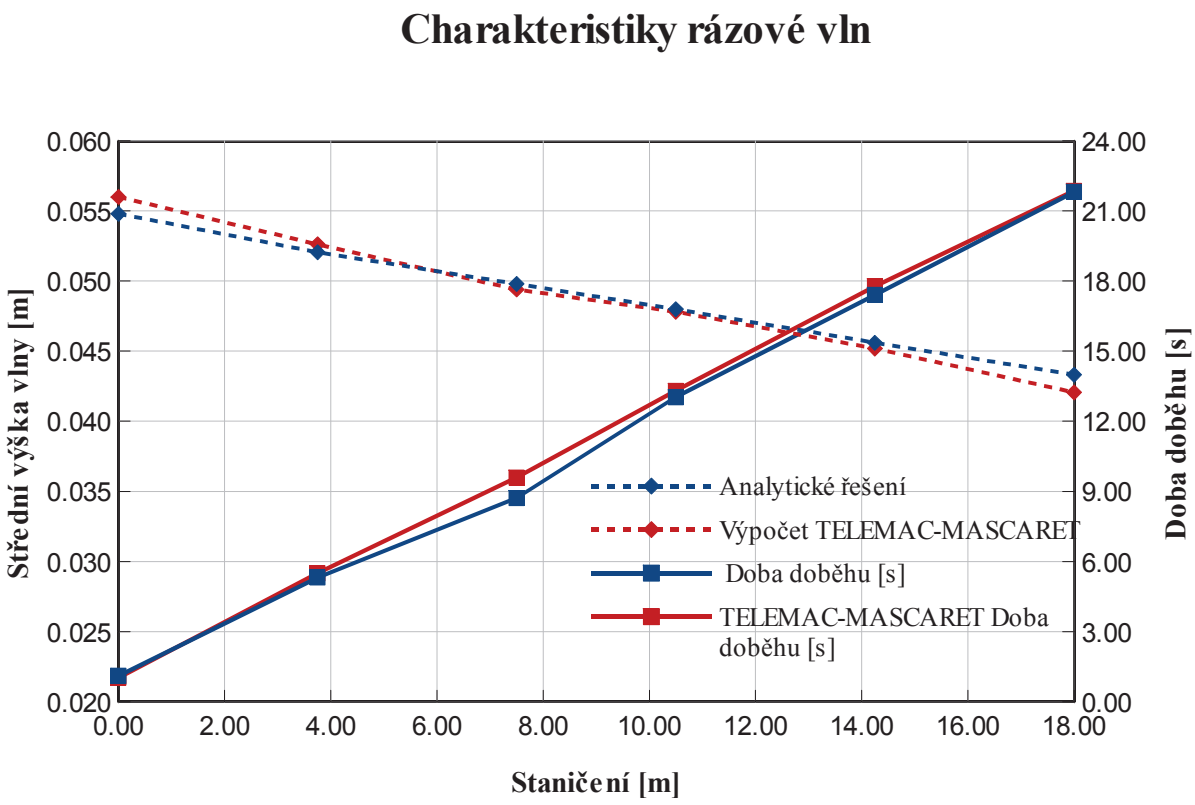
modelu 12,5 mm.

6.4.1 Snížení průtoku z 90 l/s na 60 l/s

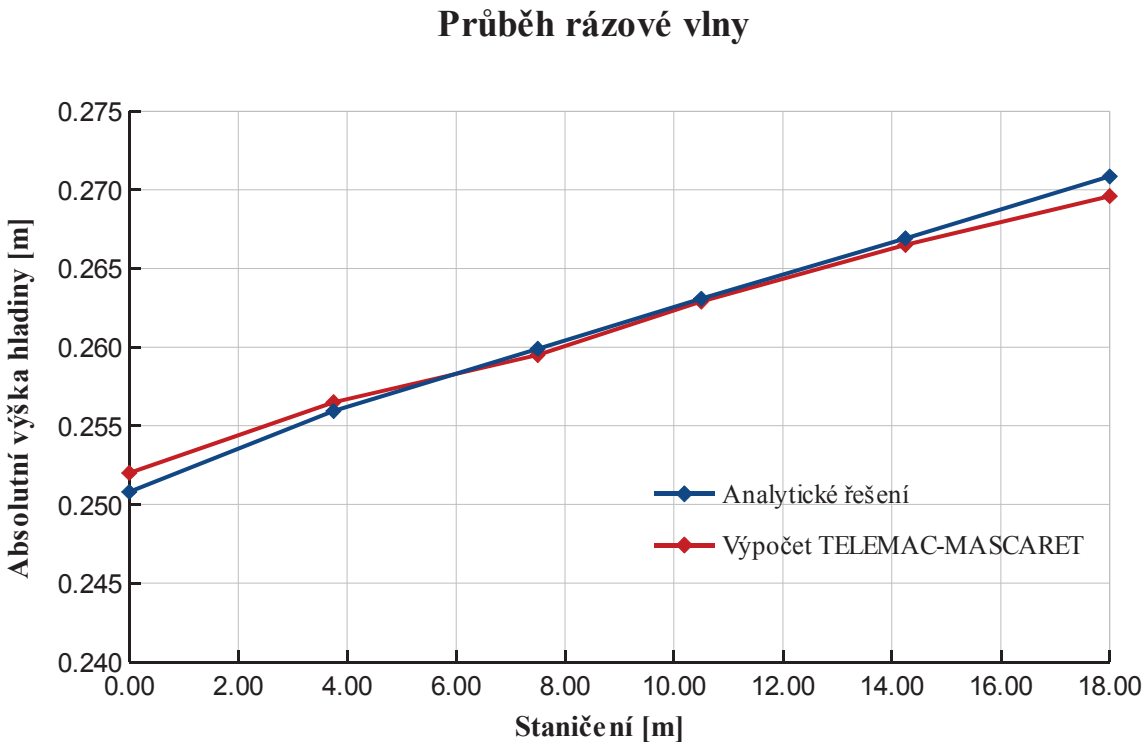
Výpočet vychází z předpokladu, že ve žlabu je ustálené proudění s průtokem 90 l/s a dochází k náhlému snížení na 60 l/s. Vypočtené hodnoty jsou zaznamenány do tabulky (Tab.1), kde je možné číselně porovnat průběh rázové vlny. Pro vizuální představu rozdílu vypočtených průběhů je doložen graf (Obr. 6.3) se střední výškou vlny a dobou doběhu.

Tab. 1 Porovnání vypočtených hodnot pro snížení průtoku z 90 na 60 l/s

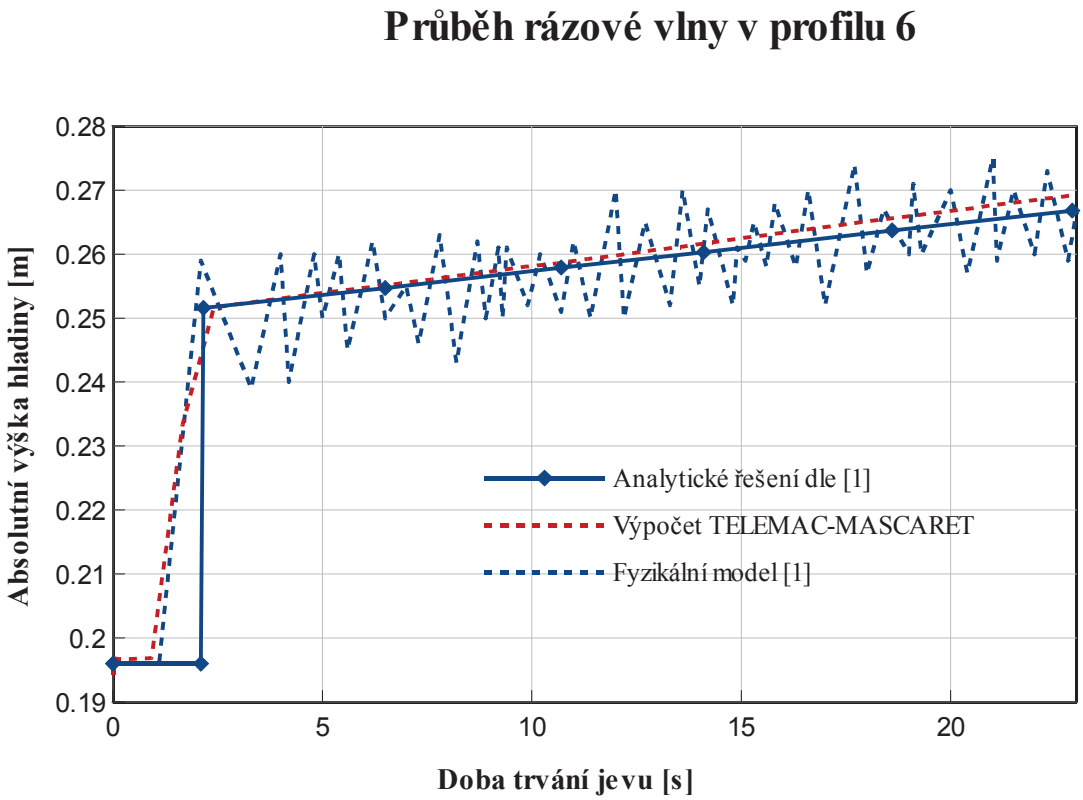
Fyzikální model			Analytické řešení dle Gabriela [1]			TELEMAC-MASCARET		
Profil	Staničení	Výška dna	Střední výška vlny	Výška hladiny	Doba doběhu	Střední výška vlny	Výška hladiny	Doba doběhu
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]	[s]
6	0.00	0.000	0.0548	0.251	1.11	0.0560	0.252	1.41
5	3.75	0.008	0.0521	0.256	5.31	0.0526	0.257	5.50
4	7.50	0.014	0.0498	0.260	8.72	0.0494	0.260	9.60
3	10.50	0.019	0.0480	0.263	13.03	0.0478	0.263	12.94
2	14.25	0.025	0.0456	0.267	17.41	0.0452	0.267	17.41
1	18.00	0.032	0.0433	0.271	21.81	0.0421	0.270	21.86



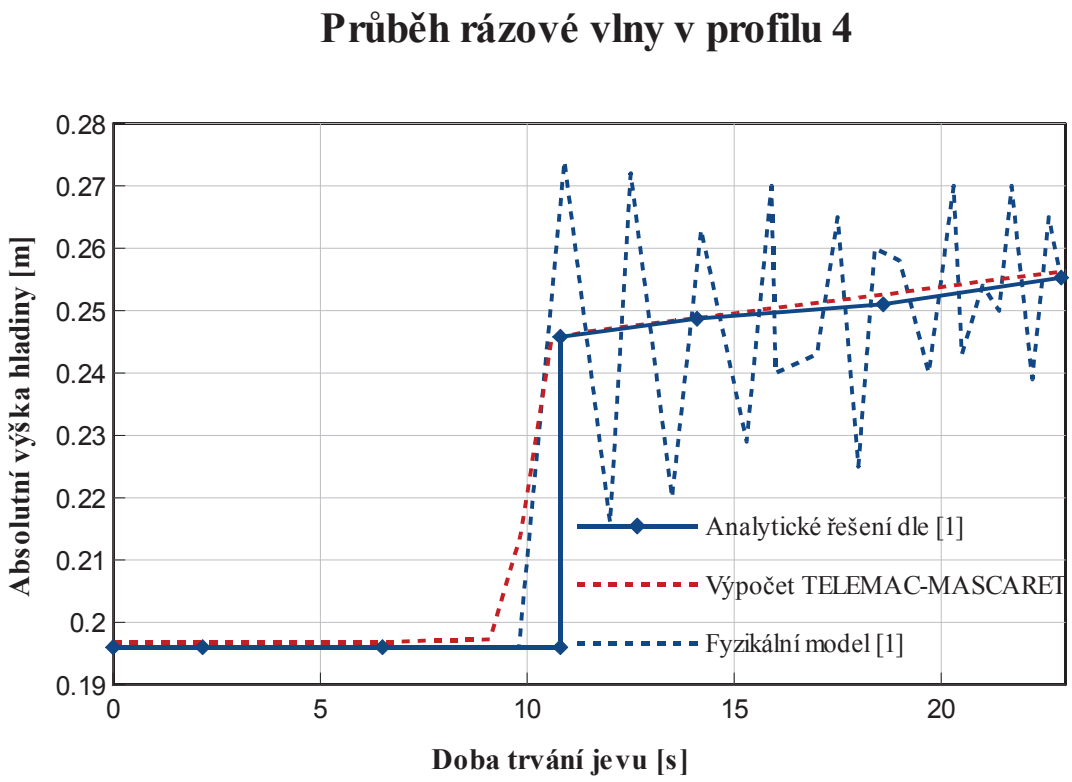
Obr. 6.3 Grafické porovnání vypočtených hodnot rázové vlny při snížení průtoku z 90 na 60 l/s



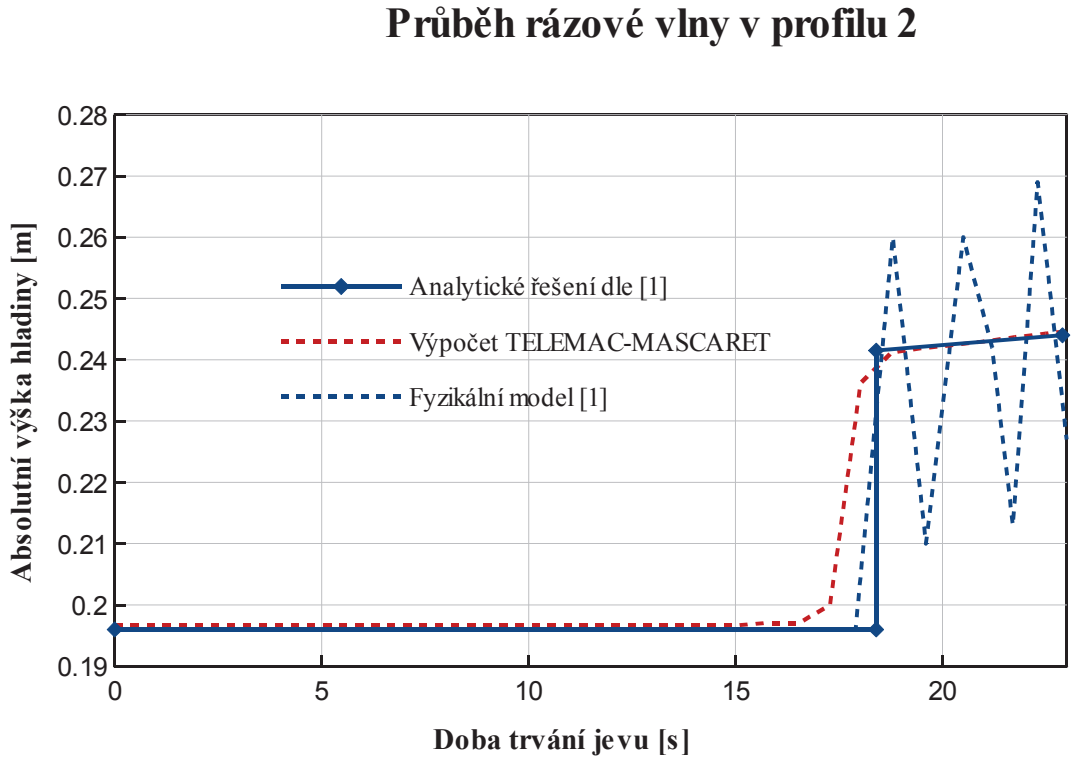
Obr. 6.4 Grafické porovnání absolutních výšek při snížení průtoku z 90 na 60 l/s



Obr. 6.5 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 6 při snížení průtoku z 90 na 60 l/s



Obr. 6.6 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 4 při snížení průtoku z 90 na 60 l/s



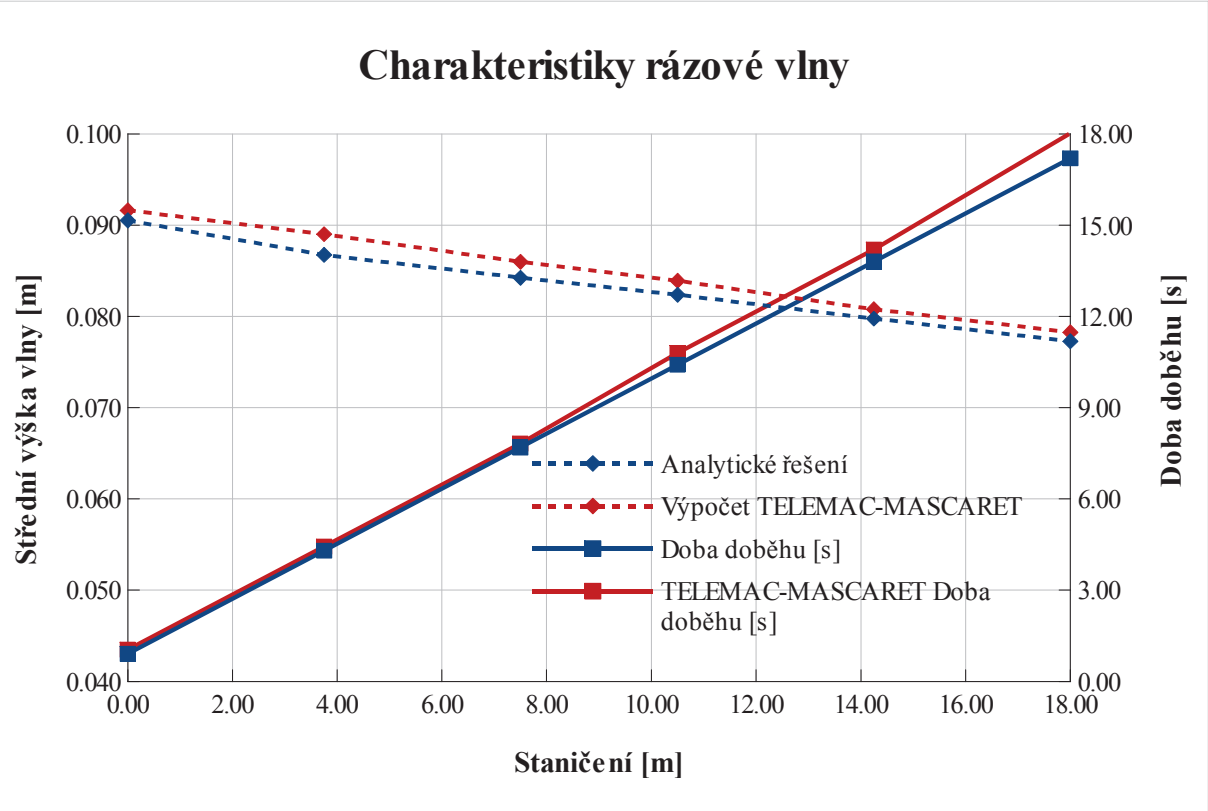
Obr. 6.7 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 2 při snížení průtoku z 90 na 60 l/s

6.4.2 Úplné uzavření průtoku 60 l/s

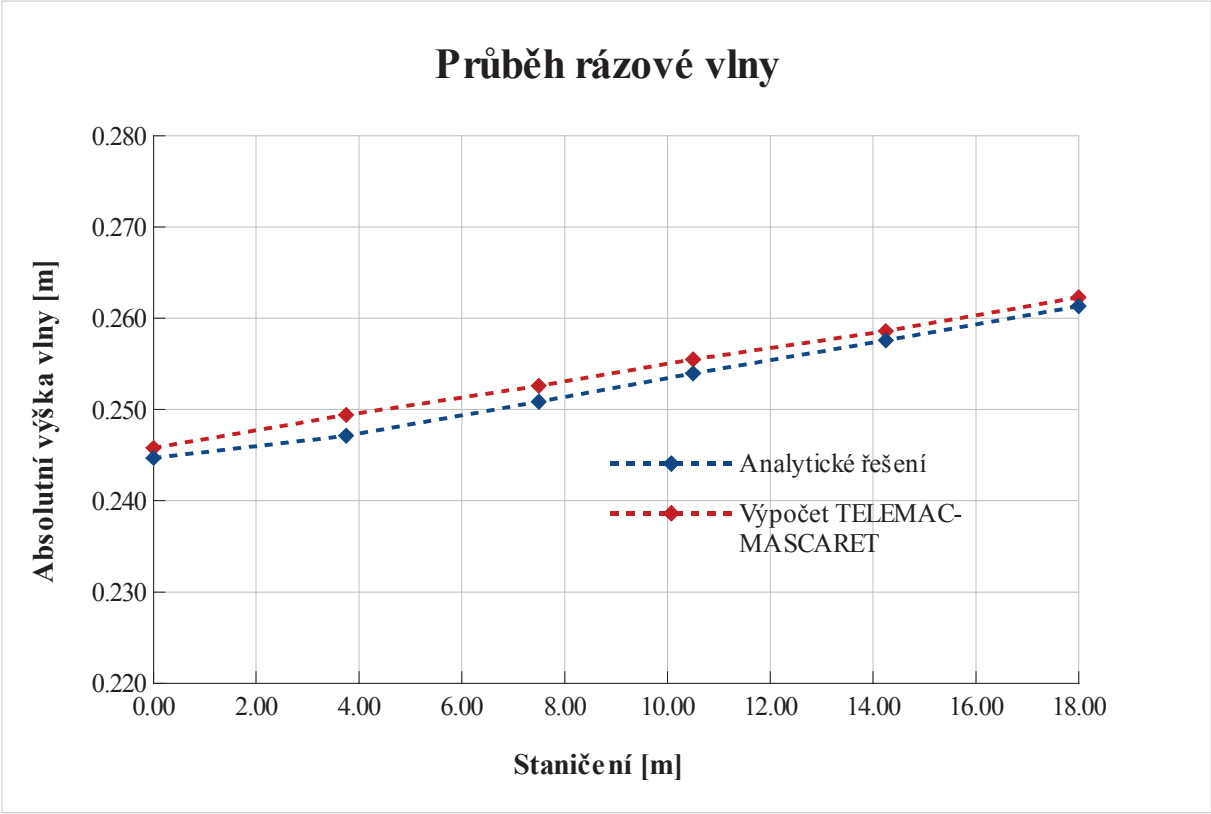
Výpočet vychází z předpokladu, že ve žlabu je ustálené proudění s průtokem 60 l/s a dochází k náhlému uzavření odtokového potrubí. Vypočtené hodnoty jsou zaznamenány do tabulky (Tab.2), kde můžeme číselně porovnat průběh rázové vlny. Pro vizuální představu rozdílu vypočtených průběhů je doložen graf (Obr. 6.8) se střední výškou vlny a dobou doběhu.

Tab. 2 Porovnání vypočtených hodnot pro úplné uzavření průtoku 60 l/s

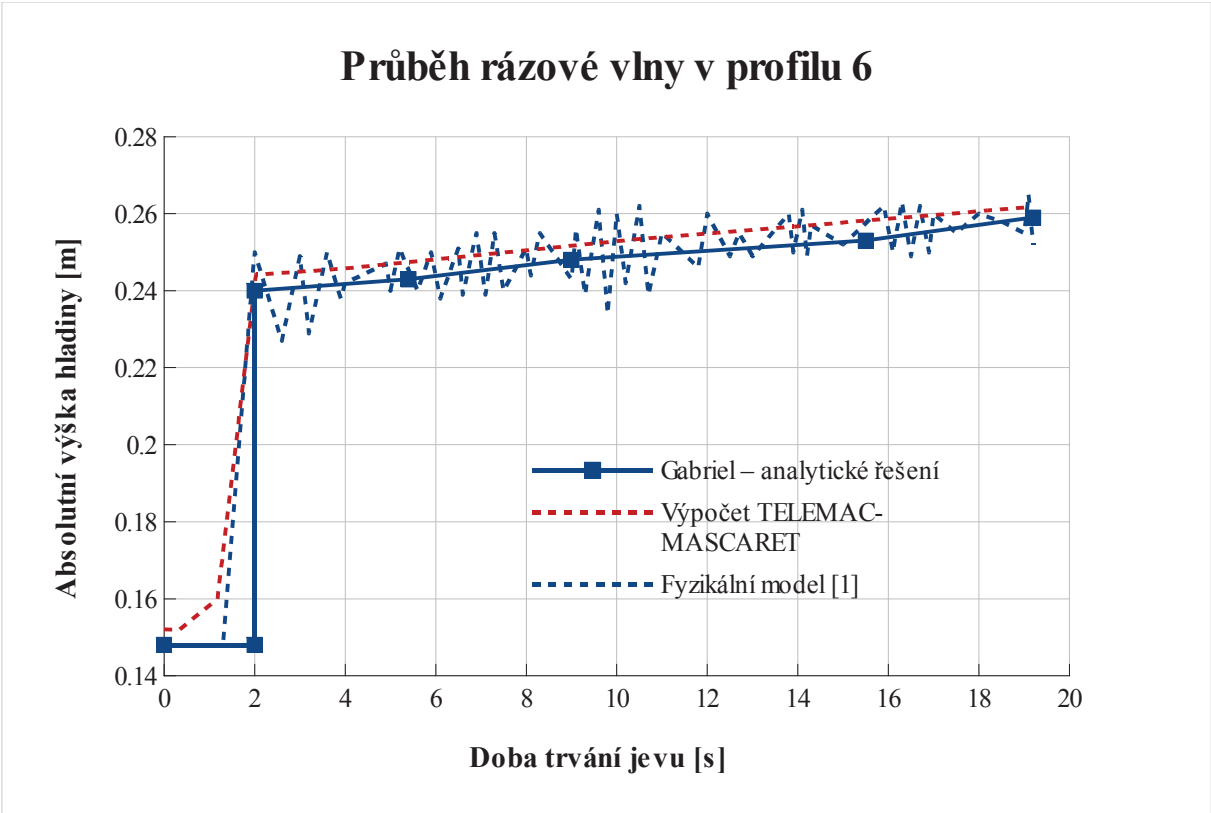
Hydraulický žlab			Analytické řešení dle Gabriela [1]			TELEMAC-MASCARET		
Profil	Staničení	Výška dna	Střední výška vlny	Výška hladiny	Doba doběhu	Střední výška vlny	Výška hladiny	Doba doběhu
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]	[s]
6	0.00	0.002	0.0905	0.245	0.91	0.0916	0.246	1.04
5	3.75	0.008	0.0867	0.247	4.30	0.0890	0.249	4.43
4	7.50	0.014	0.0842	0.251	7.69	0.0860	0.253	7.82
3	10.50	0.019	0.0824	0.254	10.41	0.0839	0.256	10.80
2	14.25	0.025	0.0798	0.258	13.81	0.0808	0.259	14.20
1	18.00	0.032	0.0773	0.261	17.20	0.0783	0.262	18.03



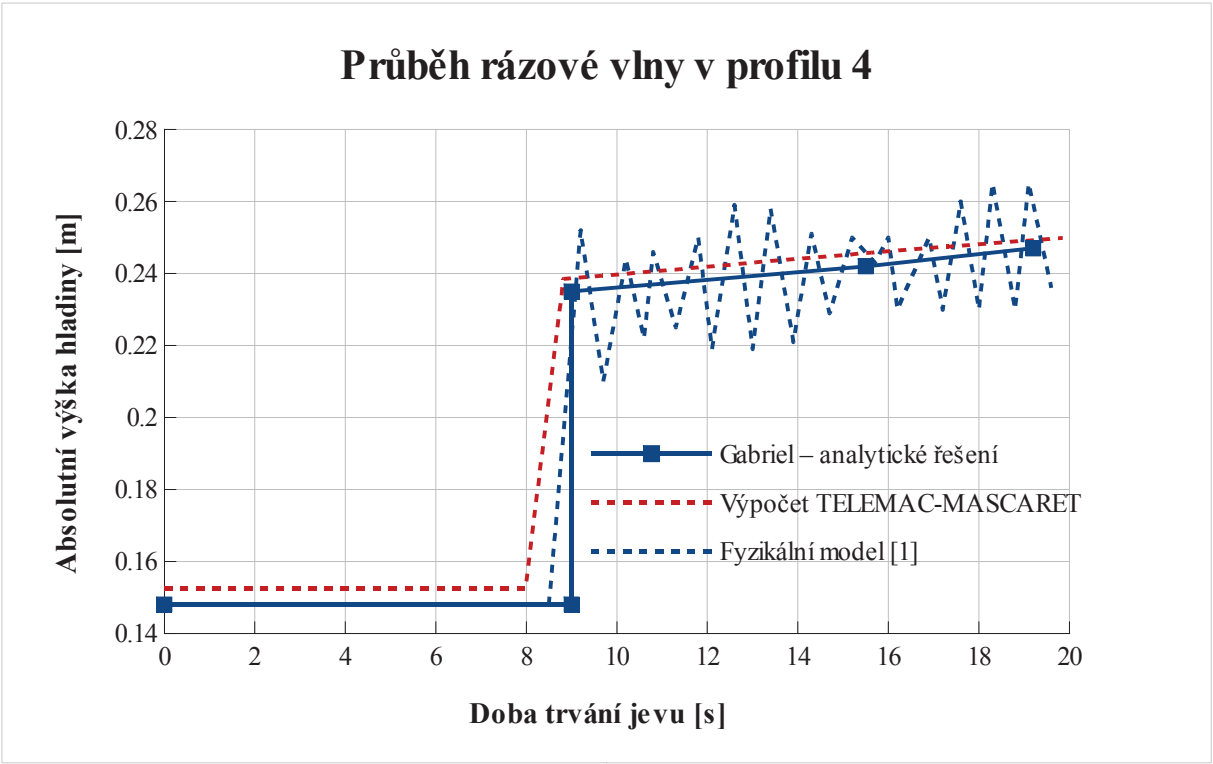
Obr. 6.8 Grafické porovnání vypočtených hodnot při úplném uzavření průtoku 60 l/s



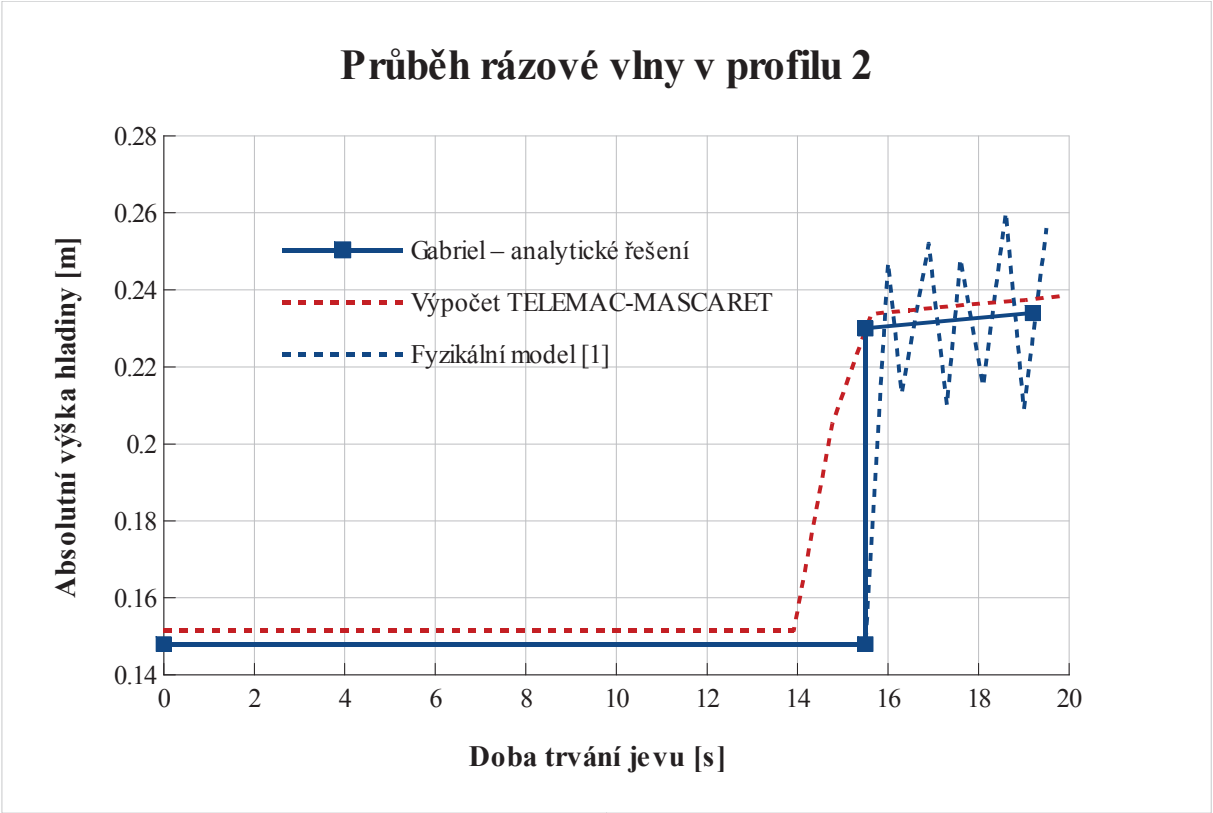
Obr. 6.9 Grafické porovnání absolutních výšek při úplném uzavření průtoku 60 l/s



Obr 6.10 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 6 při úplném uzavření průtoku 60 l/s



Obr. 6.11 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 4 při úplném uzavření průtoku 60 l/s



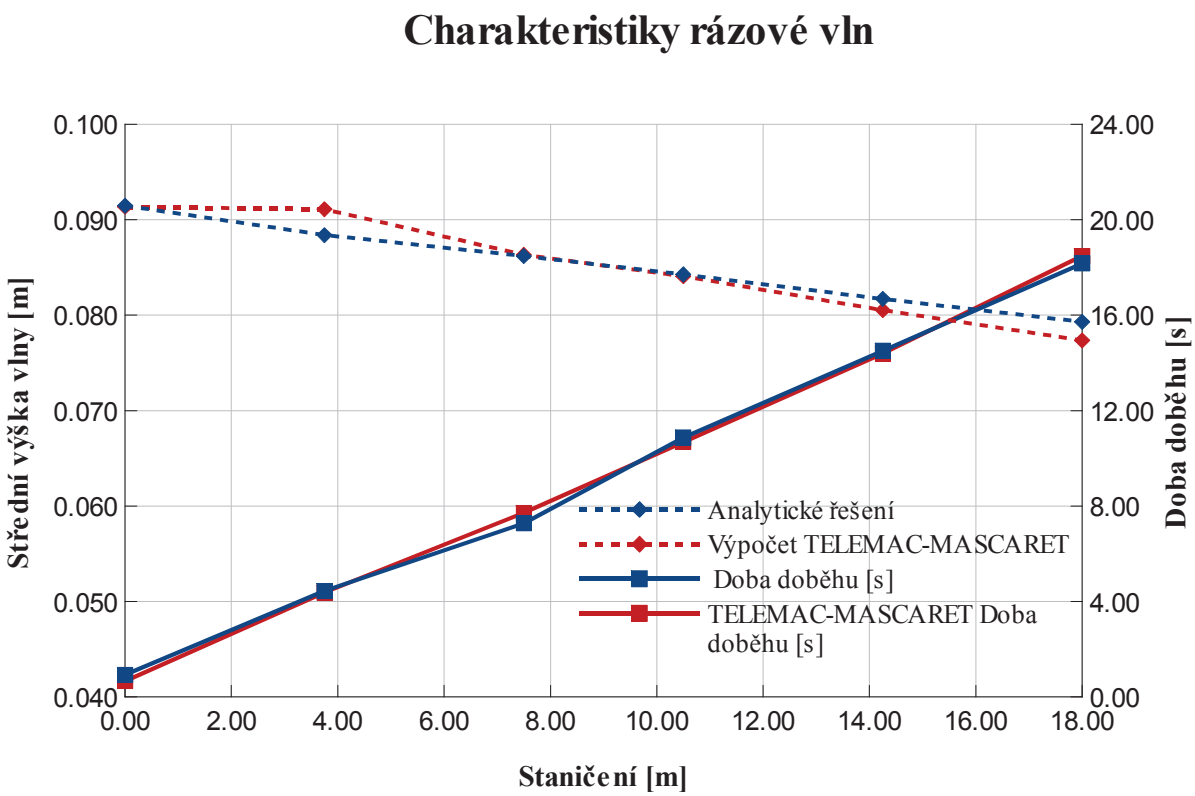
Obr. 6.12 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 2 při úplném uzavření průtoku 60 l/s

6.4.3 Snížení průtoku z 90 l/s na 30 l/s

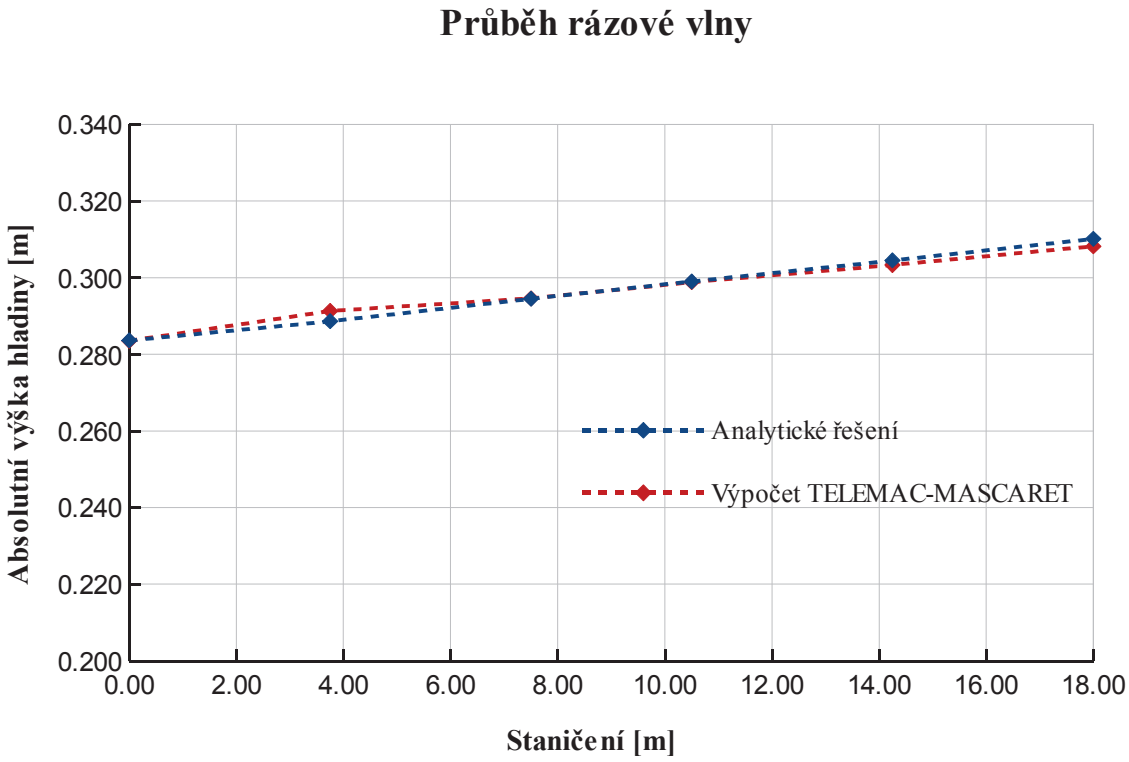
Výpočet vychází z předpokladu, že ve žlabu je ustálené proudění s průtokem 90 l/s a dochází k náhlému snížení na 30 l/s. Vypočtené hodnoty jsou zaznamenány do tabulky (Tab.3), kde můžeme číselně porovnat průběh rázové vlny. Pro vizuální představu rozdílu vypočtených průběhů je doložen graf (Obr. 6.13) se střední výškou vlny a dobou doběhu.

Tab. 3 Porovnání vypočtených hodnot pro snížení průtoku z 90 na 30 l/s

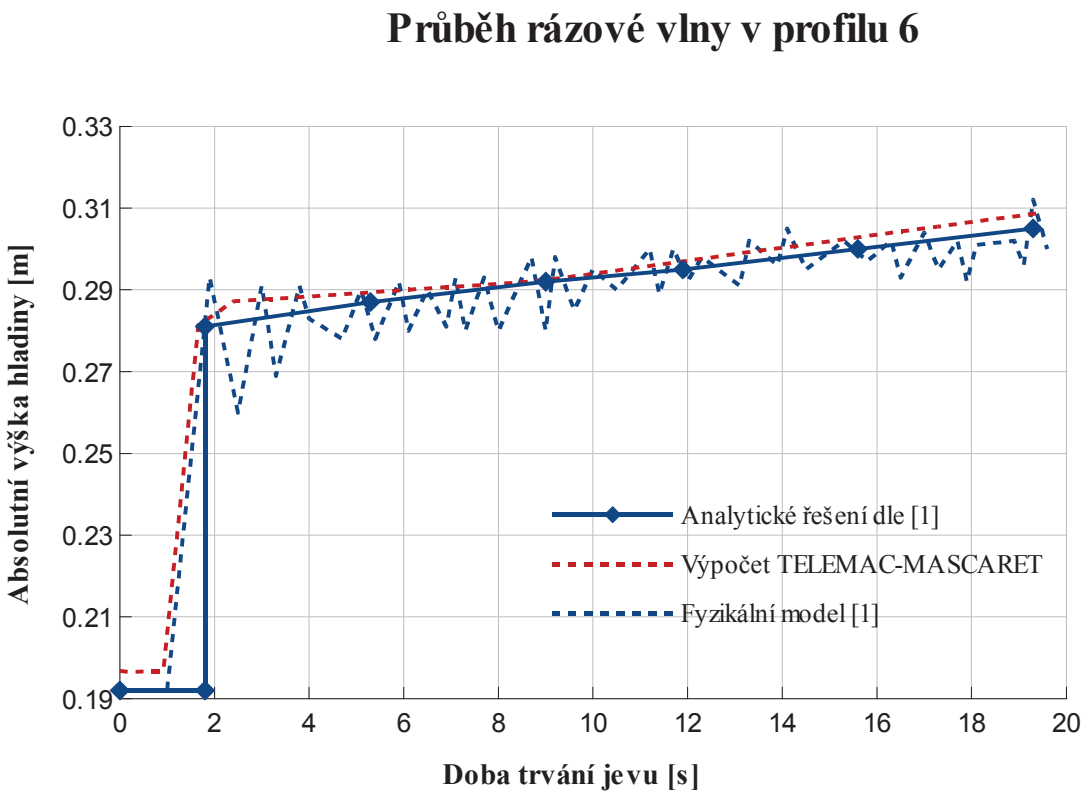
Fyzikální model			Analytické řešení dle Gabriela [1]			TELEMAC-MASCARET		
Profil	Staničení	Výška dna	Střední výška vlny	Výška hladiny	Doba doběhu	Střední výška vlny	Výška hladiny	Doba doběhu
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]	[s]
6	0.00	0.002	0.0915	0.284	0.92	0.0914	0.284	1.41
5	3.75	0.010	0.0884	0.289	4.44	0.0911	0.291	5.50
4	7.50	0.018	0.0862	0.294	7.28	0.0863	0.295	9.60
3	10.50	0.025	0.0843	0.299	10.87	0.0841	0.299	12.94
2	14.25	0.033	0.0817	0.304	14.50	0.0805	0.303	17.41
1	18.00	0.041	0.0793	0.310	18.16	0.0774	0.308	18.48



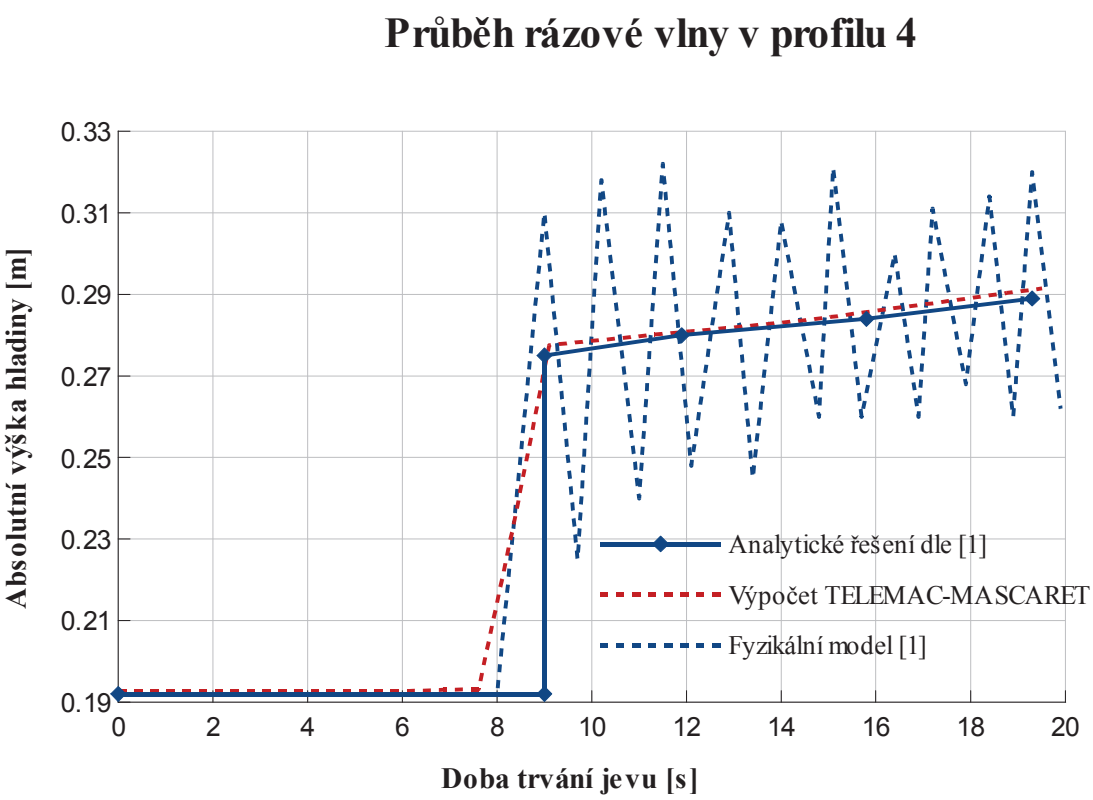
Obr. 6.13 Grafické porovnání vypočtených hodnot rázové vlny při snížení průtoku z 90 na 30 l/s



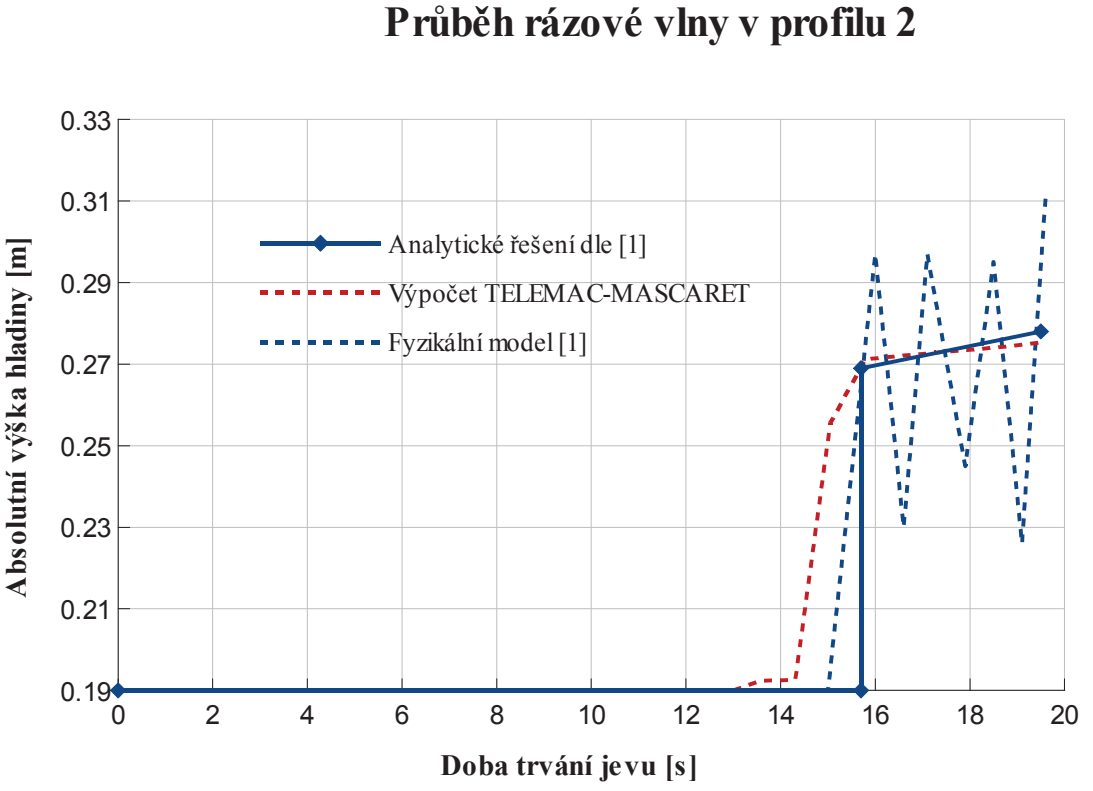
Obr. 6.14 Grafické porovnání absolutních výšek při snížení průtoku z 90 na 30 l/s



Obr. 6.15 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 6 při snížení průtoku z 90 na 30 l/s



Obr. 6.16 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 4 při snížení průtoku z 90 na 30 l/s



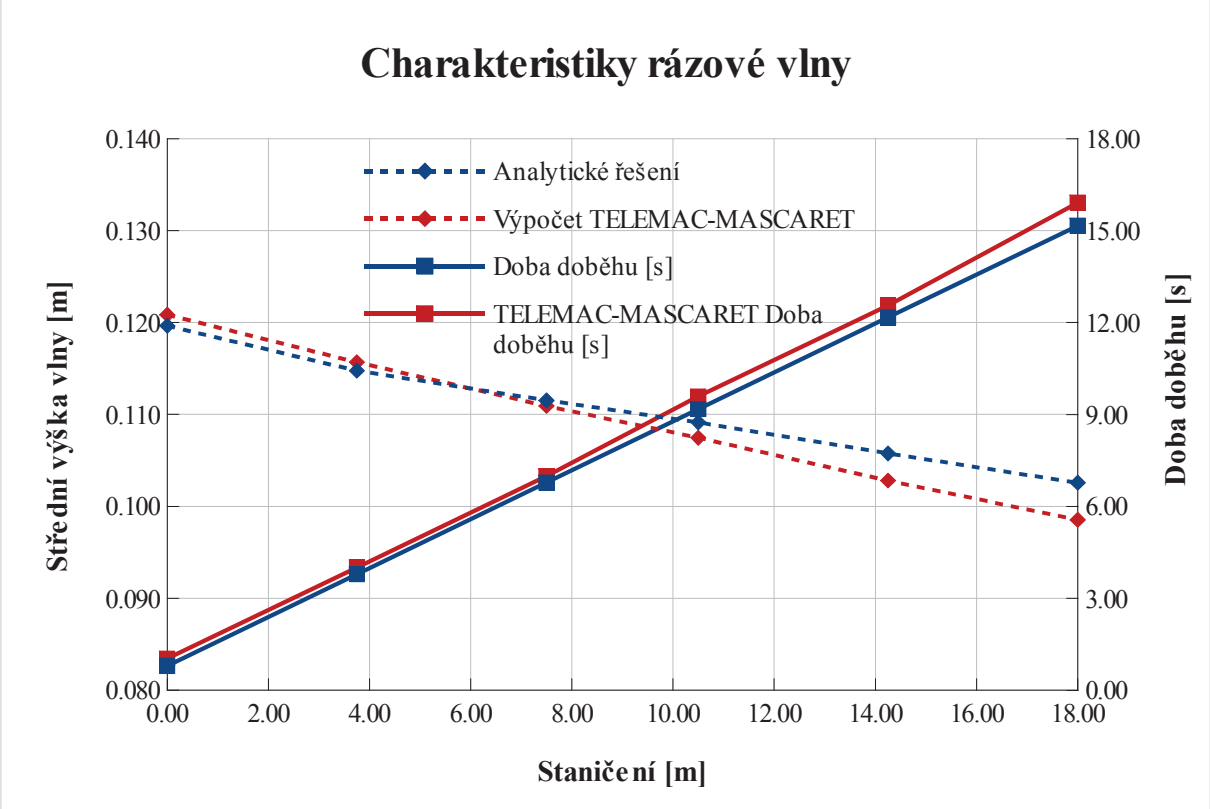
Obr. 6.17 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 2 při snížení průtoku z 90 na 30 l/s

6.4.4 Úplné uzavření průtoku 90 l/s

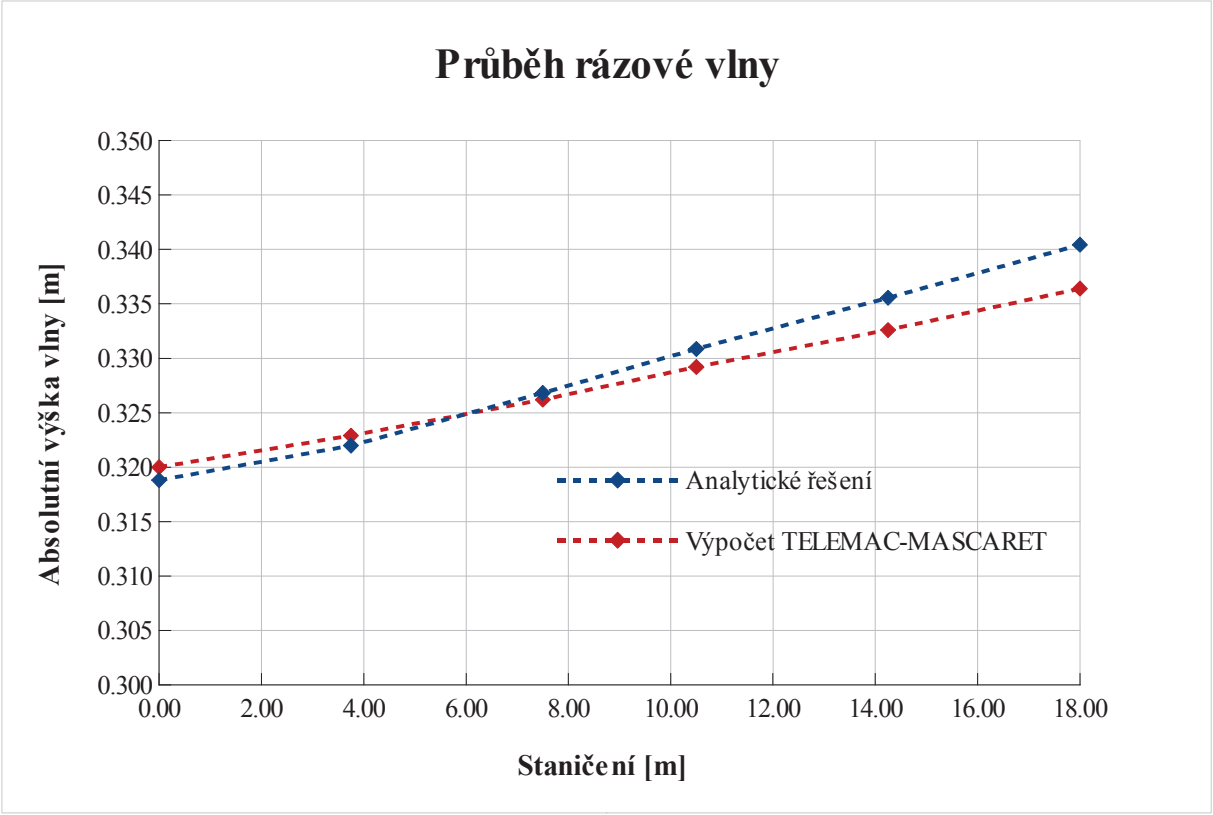
Výpočet vychází z předpokladu, že ve žlabu je ustálené proudění s průtokem 90 l/s a dochází k náhlému uzavření odtokového potrubí. Vypočtené hodnoty jsou zaznamenány do tabulky (Tab.4), kde můžeme číselně porovnat průběh rázové vlny. Pro vizuální představu rozdílu vypočtených průběhů je doložen graf (Obr 6.18) se střední výškou vlny a dobou doběhu.

Tab. 4 Porovnání vypočtených hodnot pro úplné uzavření průtoku 90 l/s

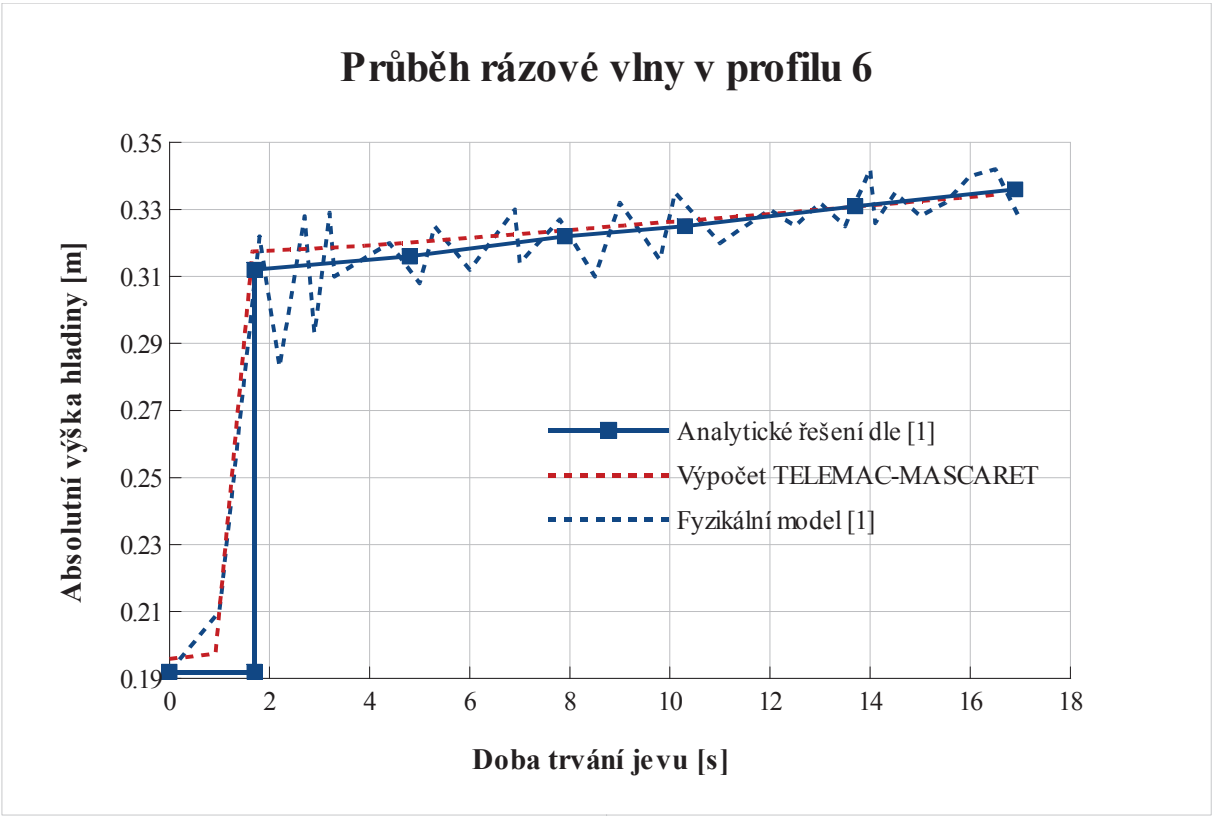
Fyzikální model			Analytické řešení dle Gabriela [1]			TELEMAC-MASCARET		
Profil	Staničení	Výška dna	Střední výška vlny	Výška hladiny	Doba doběhu	Střední výška vlny	Výška hladiny	Doba doběhu
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[s]	[m]	[m]	[s]
6	0.00	0.002	0.1197	0.319	0.80	0.1209	0.320	1.04
5	3.75	0.010	0.1148	0.322	3.79	0.1157	0.323	4.01
4	7.50	0.018	0.1115	0.327	6.78	0.1109	0.326	6.99
3	10.50	0.025	0.1091	0.331	9.17	0.1075	0.329	9.59
2	14.25	0.033	0.1058	0.336	12.17	0.1028	0.333	12.56
1	18.00	0.041	0.1026	0.340	15.16	0.0986	0.336	15.91



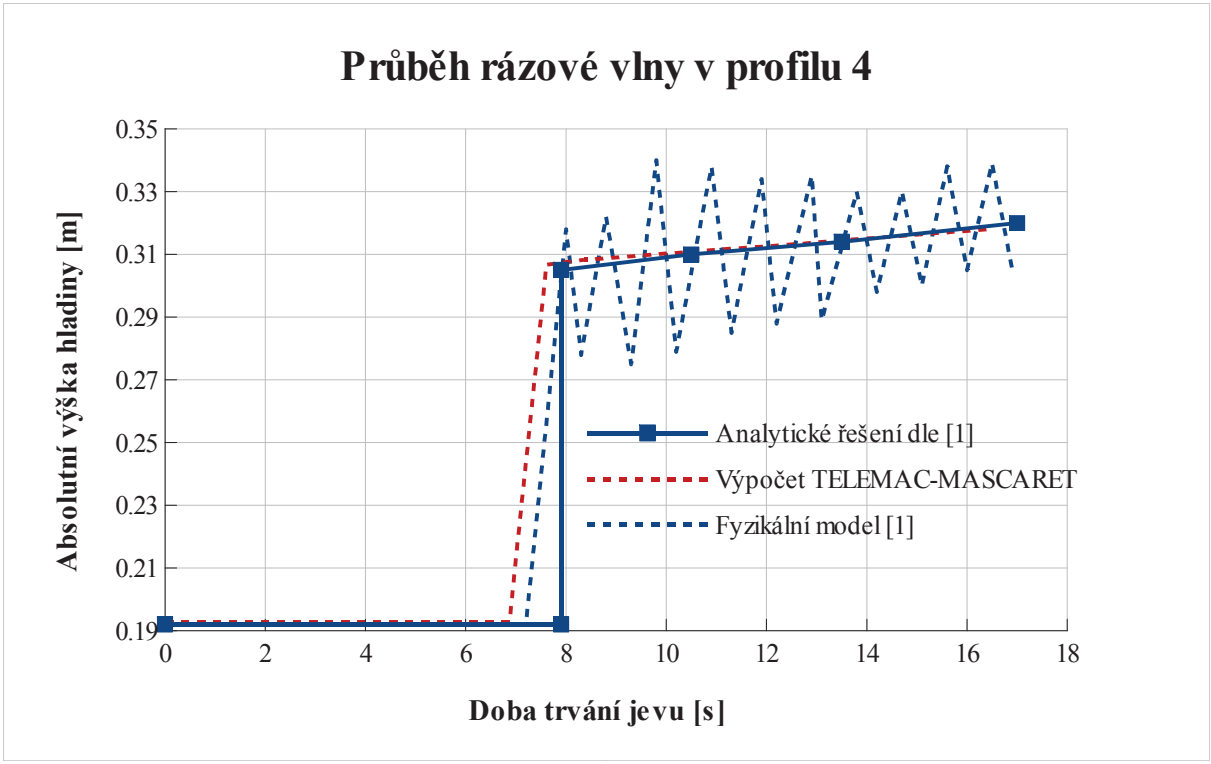
Obr. 6.18 Grafické porovnání vypočtených hodnot při úplném uzavření průtoku 90 l/s



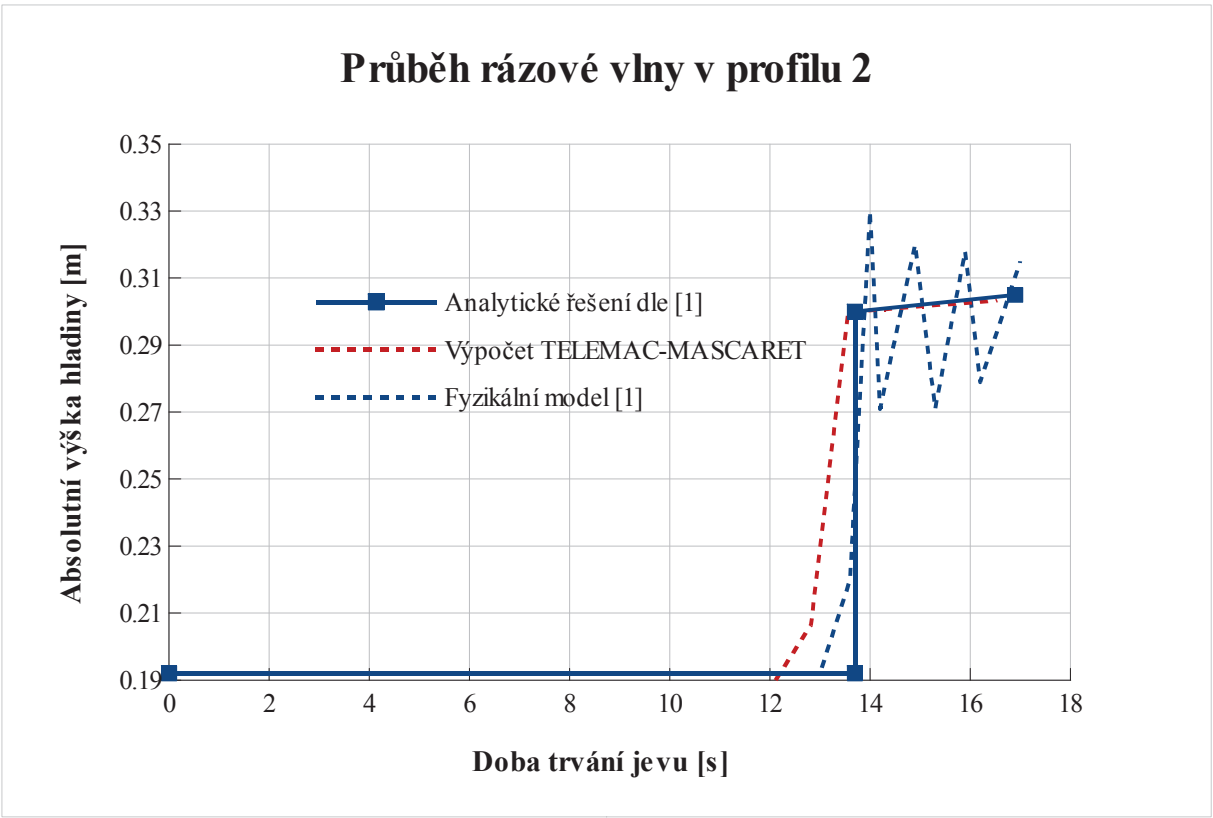
Obr. 6.19 Grafické porovnání absolutních výšek při úplném uzavření průtoku 90 l/s



Obr. 6.20 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 6 při úplném uzavření průtoku 90 l/s



Obr. 6.21 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 4 při úplném uzavření průtoku 90 l/s



Obr. 6.22 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 2 při úplném uzavření průtoku 90 l/s

6.4.5 Závěr verifikace zvolených metod

Výsledky verifikace vykazují shodnost analytického řešení a softwaru TELEMAC-MASCARET. Při porovnávání hodnot průběhu vln v dílčích profilech [1], byla doba doběhu stanovená softwarem TELEMAC-MASCARET posunuta o 1 sekundu na hodnotu počátečních stavů tak, aby sobě průběhy odpovídaly. Nutnost posunu mohla vzniknout časovou prodlevou mezi změnou průtoku a spuštěním kamery. Tato domněnka je směřována na srovnání doby doběhu v tabulkách (Tab. 1, 2, 3, 4), kde doba doběhu stanovená analytickým řešením je téměř totožná s výsledky softwaru. S ohledem na podobnost výledných hodnot se TELEMAC-MASCARET jeví jako vhodný pro řešení rázových vln.

7. Praktická aplikace v lokalitě MVE Železný Brod

Malá vodní elektrárna se nachází řece Jizeře v 97.480 říčním km poblíž města Železný Brod. Spadá do Libereckého kraje a okresu Jablonec nad Nisou. MVE byla realizována na historickém derivačním kanále a do současné podoby byla rekonstruována v roce 2010.

7.1 Popis zvolené lokality

Vzdouvací objekt:	km 97,480 – Jizera
Číslo hydrologického pořadí:	1 – 05 – 02 – 005
Kraj:	Liberecký
Okres:	Jablonec nad Nisou
Obec:	Železný Brod

Hydrologické údaje dle [11]:

M-denní průtoky Jizery

M	30	60	90	120	150	180	210
Q_M [m³/s]	39,1	26,6	20,4	16,4	13,6	11,4	9,66

M	240	270	300	330	355	364
Q_M [m³/s]	8,16	6,86	5,69	4,54	3,47	2,87

N-leté průtoky Jizery

N	1	2	5	10	20	50	100
Q_N [m³/s]	172	235	327	403	482	593	682



Obr 7.1 Situace širších vztahů s vyznačením MVE Železný Brod [17]

Historie stavby přivaděče, elektrárny a jezu sahá do roku 1861, kdy bylo povolení stavby uděleno továrníku Johannu Liebiegovi při stavbě prádelny, která již není v provozu [18]. Během roku 1896 byl provoz prádelny rozšířen a byla vystavěna nová strojovna, ve které byly nainstalovány čtyři nové turbíny. Současná budova MVE stojí na původním náhonu, který byl v průběhu let zasypán, nyní je tak strojovna posunuta o 650 m dále než tomu bylo dříve.



Obr. 7.2 Derivační kanál MVE Železný Brod [19]

Nové umístění strojovny bylo zvoleno z důvodu zvýšeného využití průtoku a snížení

ztráty na spádu. Instalovaný výkon dosahuje až 1 MW. Budova MVE je řešena s ohledem na těsnou vazbu historického komplexu a zároveň je umístěna v krásné přírodní scenérii svahů okolo toku Jizery (Obr. 7.3).



Obr. 7.3 Vtokový objekt a strojovna MVE Železný Brod [19]

Ve spodní stavbě strojovny jsou osazeny tři přímoproudé Kaplanovy „S“ turbíny s průměry oběžných kol 1x 1450 mm a 2x 1150 mm. Celkový průtok MVE je 24,4 m^3/s. Provoz turbín je řízen automatickou hladinovou regulací. Čidlo snímá úroveň horní hladiny vody v jezové zdrži.



Obr. 7.4 Stavidlový jez na řece Jizeře – vpravo vtokový objekt derivačního kanálu [19]

Stavidlový jez o třech polích oddělených kamennými pilíři s šířkou 1,7 m se nachází na Jizeře v km 97,48 (Obr. 7.4). Průtok na jezu je regulován pomocí dřevěných stavidlových tabulí, které jsou zavěšeny na řetězech a u dna se opírají o nízké litinové slupice. Manipulace

se stavidlovými tabulemi se provádí navíjením článkových řetězů. Ke zdvihu stavidlových tabulí je nutné ovládání dvou osob. V současné době je pohon zajištěn elektromotorem. U levého břehu jezové konstrukce se nachází rybí přechod o celkové délce 32 m a šířce 1,5 m.

7.2 Posuzované provozní stavy

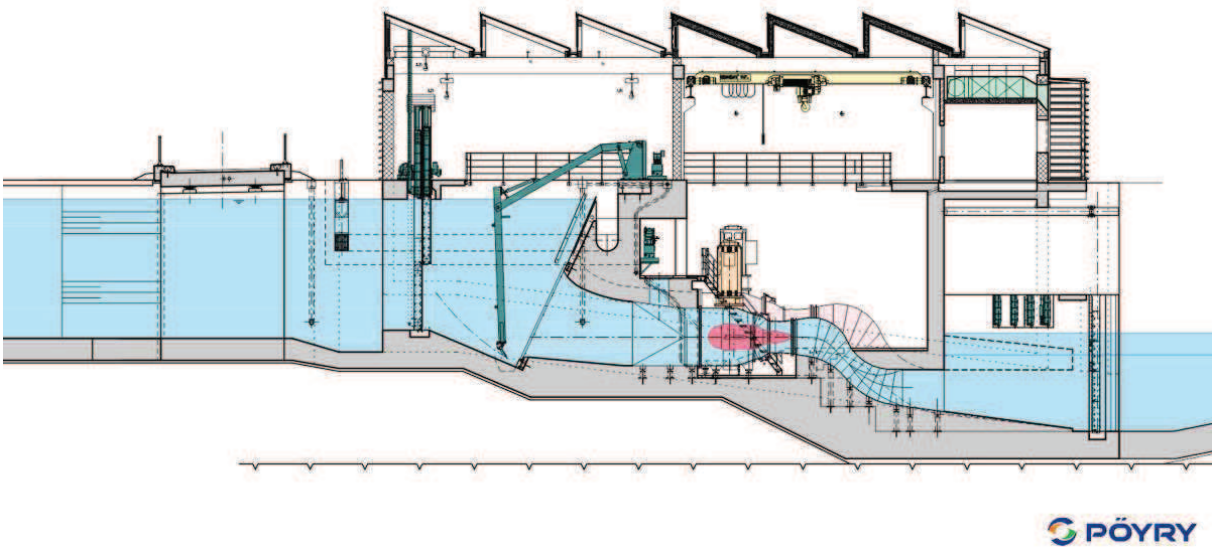
Pro sestavení výpočtového modelu byla společností Vodní elektrárna Železný Brod, a.s. poskytnuta technická [10] a provozní [11] dokumentace stavby. Podklady byly vyhotoveny v závislosti na průběhu rekonstrukce MVE a náhonu probíhající v roce 2010. Součástí technické dokumentace byly příčné a podélné profily derivačního kanálu, konstrukce strojovny, vtokový objekt a jezová konstrukce. Provozní dokumentace obsahuje popis soustrojí MVE a průběh uzavíraní turbín v kritických situacích.

Provozní stavy, které jsou posuzovány, vycházejí z manipulačního řádu MVE [11]. Maximální hltnost turbín 24,4 m^3/s je splněna při výšce hladiny 296,46 m n.m. v nadjezí a odpovídá jí průtok v korytě řeky 27,4 m^3/s. Zbývající 3,0 m^3/s pokrývají minimální zůstatkový průtok, který se dělí na průtok rybím přechodem a přepadem přes jezovou konstrukci. Minimální zůstatkový průtok musí být zachován, je-li to možné, při každém průtoku v korytě řeky bez ohledu na provoz MVE.



Obr. 7.5 Nátok do derivačního kanálu MVE, proplachovací propust I (vlevo) [19]

Po překročení maximálního průtoku 68 m^3/s, který odpovídá výšce hladiny 275,50 m n.m., dochází k postupnému vyhrazení proplachovací propusti I umístěné před nátokem do derivačího kanálu a následnému vyhrazení stavidlových tabulí jezu (Obr. 7.5).



Obr. 7.6 Podélný řez strojovnou MVE Železný Brod [20]

Diplomová práce se zabývá posouzením kladných zpětných rázových vln, které v tomto případě vznikají náhlým omezením průtoku MVE. K dostatečně přesnému posouzení je nutné znát doby uzavírání turbín v běžných a krizových situacích. Provozovatel uvádí uzavření turbín v krizových situacích v délce 3 sekund a v běžných podmínkách je tato doba prodloužena na 5 minut. V případě krizové situace dochází k otevření proplachovací propusti II umístěné v spodní stavbě strojovny MVE, a tím ke snížení účinku rázových vln. Plné otevření propusti je stanoveno na 12 sekund s maximálním průtokem 12,74 m^3/s.

Pro posouzení výpočtových metod byly, po vzájemné dohodě s provozovatelem MVE, navrženy tyto tři stavy odstavení MVE z provozu:

P1 - Průtok v řece průtok 27,4 m^3/s pokrývající maximální hltností turbín 24,4 m^3/s, a minimální zůstatkový 3,0 m^3/s odpovídá výšce hladiny 274,96 m n.m. Dochází k náhlému odstavení soustrojí za 3 sekundy. Následně po uzavření průtoku přes MVE se otvírá proplachovací propust II. Na celkovou kapacitou 12,7 m^3/s se propust otevře za 12 sekund.

P2 - Průtok v řece činí 17,2 m^3/s. S průtokem turbín 14,2 m^3/s odpovídá výšce hladiny 274,96 m n.m. Dochází k náhlému odstavení soustrojí za 3 sekundy. Následně po uzavření průtoku přes MVE se otvírá proplachovací propust II. Na celkovou kapacitou 12,7 m^3/s se propust otevře za 12 sekund.

P3 - Průtok v řece 68 m^3/s, tj. nejrizikovější stav, po němž dochází k vyhrazování stavidlové tabule proplachovací propusti I a potom i jezových stavidel. Odpovídá výšce hladiny 275,50 m n.m. Hltnost turbín je 24,4 m^3/s. Dochází k

náhlému odstavení soustrojí za 3 sekundy. Následně po uzavření průtoku přes MVE se otvírá proplachovací propust II. Na celkovou kapacitou 12,7 m^3/s se propust otevře za 12 sekund.

Pro tyto stavy byl následně proveden výpočet zvolnými metodami. Všechny zvolené stavy jsou řešeny jako úplné uzavření průtoku. Vyhodnocení stavů je rozšířené o krizovou situaci, kdy při stejných podmínkách zvolených provozních stavů nedojde k otevření proplachovací propusti II. Tyto stavy jsou označeny P1*, P2*, P3*.

7.3 Analytické řešení

Posouzení rázových vln je aplikací odvozené metody dle Gabriela [1] na MVE Železný Brod. Výpočet byl sestaven v MS Excel. Hlavními omezujícími faktory při použití analytického řešení je zohlednění doby uzavíraní průtoku a variability uzavírání. Dobu uzavírání není možné v počátečním stavu zohledněnit a nemůžeme tak vyhodnotit změnu vzniku rázových vln při jiném než náhlém uzavření. Dalším výrazným omezením oproti numerickým metodám je fakt, že analytický postup není schopen reagovat na změny průtoku v MVE po uzavření. Postup stanovuje průběh vlny vyvolané počáteční změnou a není možné zanést do výpočtu pozdější regulaci.

Při odvozování výpočtu jsme zmínili několik zjednodušujících předpokladů, které platí i v případě řešení MVE Železný Brod. Rovnoměrně rozložená rychlost proudění po profilu vychází z jejího samotného stanovení, kdy přes velikost průtoku a průtočné plochy zvoleného profilu vypočítáme průměrnou rychlost. Dalším předpokladem je kolmé čelo vlny. Samotné hydraulické řešení přivaděče MVE nám vnáší do výpočtu další zjednodušení, a to v podobě vodorovné hladiny a tím zanedbání sklonu hladiny do výpočtu.

Jelikož jsou všechny posuzované stavy úplným uzavřením průtoku, postup výpočtu je totožný. Celé koryto je lichoběžníkového tvaru a výpočet byl prováděn vždy ve dvou krocích. K provedení výpočtu původní hloubky h_n dle rovnice (5.63) je nutné znát šířku hladiny v polovině výšky rázové vlny, která dočasně není známá. Dosazením počáteční šířky hladiny získáme přibližnou střední výšku vlny, z které následně můžeme dopočítat hodnotu blizkou výsledné šířce hladiny v polovině výšky vlny. Jedno opakování nám poskytne dostatečně přesný výsledek. Z této hodnoty pak můžeme vypočítat postupovou rychlost čela vlny a střední výšku čela vlny. V každém profilu byla stanovena velikost počáteční postupové rychlosti rázové vlny řešením soustavy rovnic (5.50) a (5.51), z nichž vypočítáním parametrů w_0 a x, je možné dopočítat dle rovnice (6.2) střední výšku vlny.

V následujících profilech se postup částečně liší. Po vypočítání přibližné postupové rychlosti a střední výšky vlny, která nám umožní vypočítat původní hloubku, přejdem ke stanovení parametrů *A* a *D* z rovnice (5.60). Nyní lze přikročit ke stanovení skutečných hodnot postupové rychlosti rázové vlny z rovnice (5.62) a střední výšky čela vlny z rovnice (5.69). Následně lze stanovit dobu doběhu rázové vlny z rovnice (5.71).

Tento postup aplikujeme ve všech následujících profilech. Výsledné hodnoty jednotlivých vyšetřovaných stavů jsou doloženy v příslušných tabulkách.

7.4 Numerické řešení

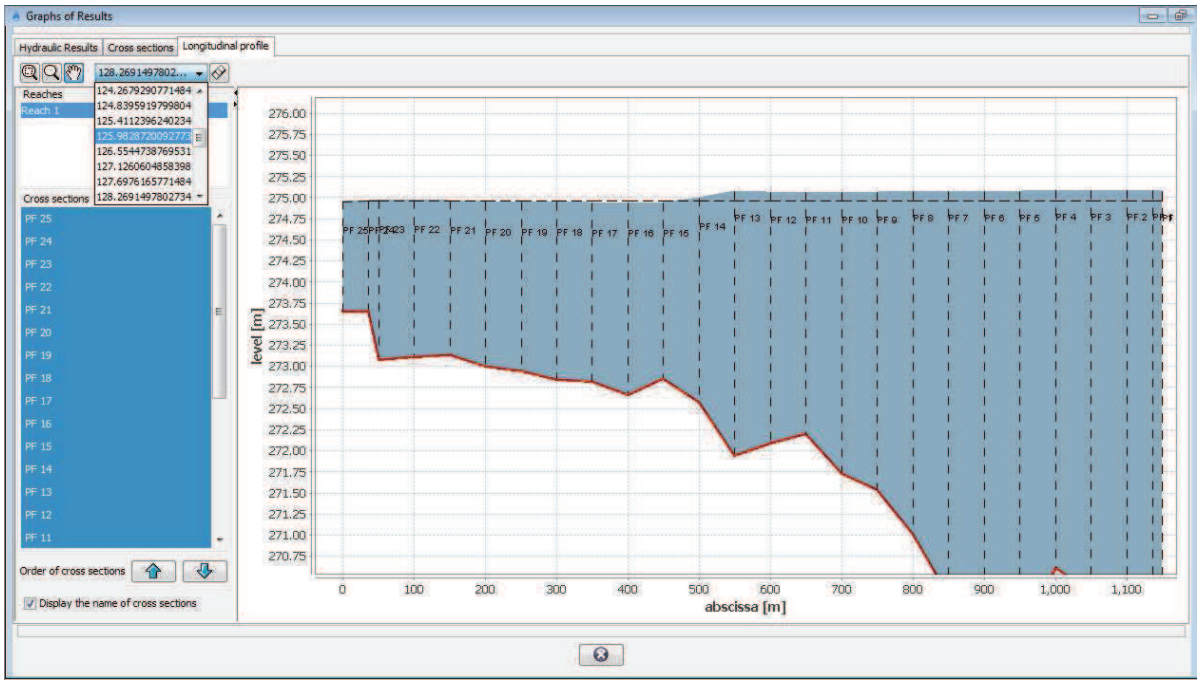
Výpočet provedený pomocí programu TELEMAC-MASCARET je nastaven na typ proudění umožňující náhlé změny průtoku. Geometrie přivaděče je zadána do softwaru pomocí jednotlivých příčných profilů, kde počáteční profil byl zvolen v nejužším místě vtokového objektu MVE. Časová změna jednotlivých průtoku je zohledněna v zadání okrajových podmínek, kde na přítoku volíme konstantní průtoku po celou dobu průběhu jevu a při manipulaci s MVE dochází k uzavření průtoku v časovém kroku 3 sekundy. Provozovatel uvádí, že při náhlém odstavení MVE z provozu dochází k otevření proplachovací propusti II. Otevření propusti přímo navazuje na uzavření průtoku a její plné otevření na 12,7 m^3/s proběhne za dobu 12 sekund. Jako počáteční podmínka je zvolena vodorovná hladina na příslušné výšce 274,94 m n.m. respektive 275,50 m n.m. Zájmový úsek kanálu je rozdělen na dílčí úseky dlouhé 5 m, tedy hodnotu dostačující při celkové délce 1150 m. Jednotlivé příčné profily jsou po výšce děleny po 0,1 m. Časový krok řešení úlohy je stanoven na dobu 1 sekundy s celkovou dobou průběhu vlny 300 sekund. Chézyho rychlostní součinitel je odvozen od hydraulických vlastností koryta řeky a byl stanoven na hodnotu 70 $m^{0,5}/s$.

7.5 Výsledky řešení

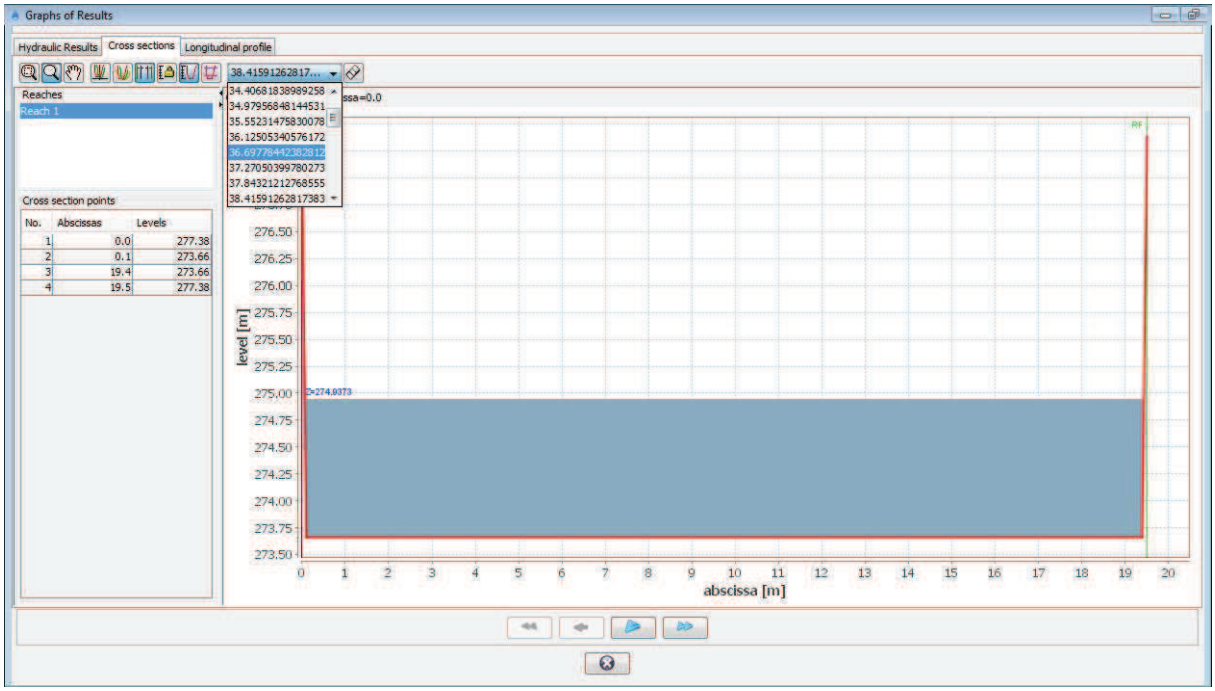
Analytickým řešením pomocí programu MS Excel získáme tabulku s vypovídajícími hodnotami středních výšek vlny a dob doběhu. Následně můžeme vytvořením grafu znázornit graficky její průběh. Software TELEMAC-MASCARET nabízí zobrazení podélného profilu včetně průbehu rázové vlny v jednotlivých krocích (obr. 7.6) nebo případně půběh kolísání hladiny v každém ze zadaných profilů ve všech šasových krocích (obr. 7.7)

Výsledné hodnoty byly rozděleny do dvou kategorií. V prvním případě dochází k

náhlému uzavření MVE a následnému otevření proplachovací propusti II (Obr. 7.9). Jelikož není možné do analytického měření zanést otevření proplachovací propusti II, je analytické řešení vyhodnoceno pro průtok snížený o hodnotu průtoku propusti 12,7 m^3/s. Ve druhém

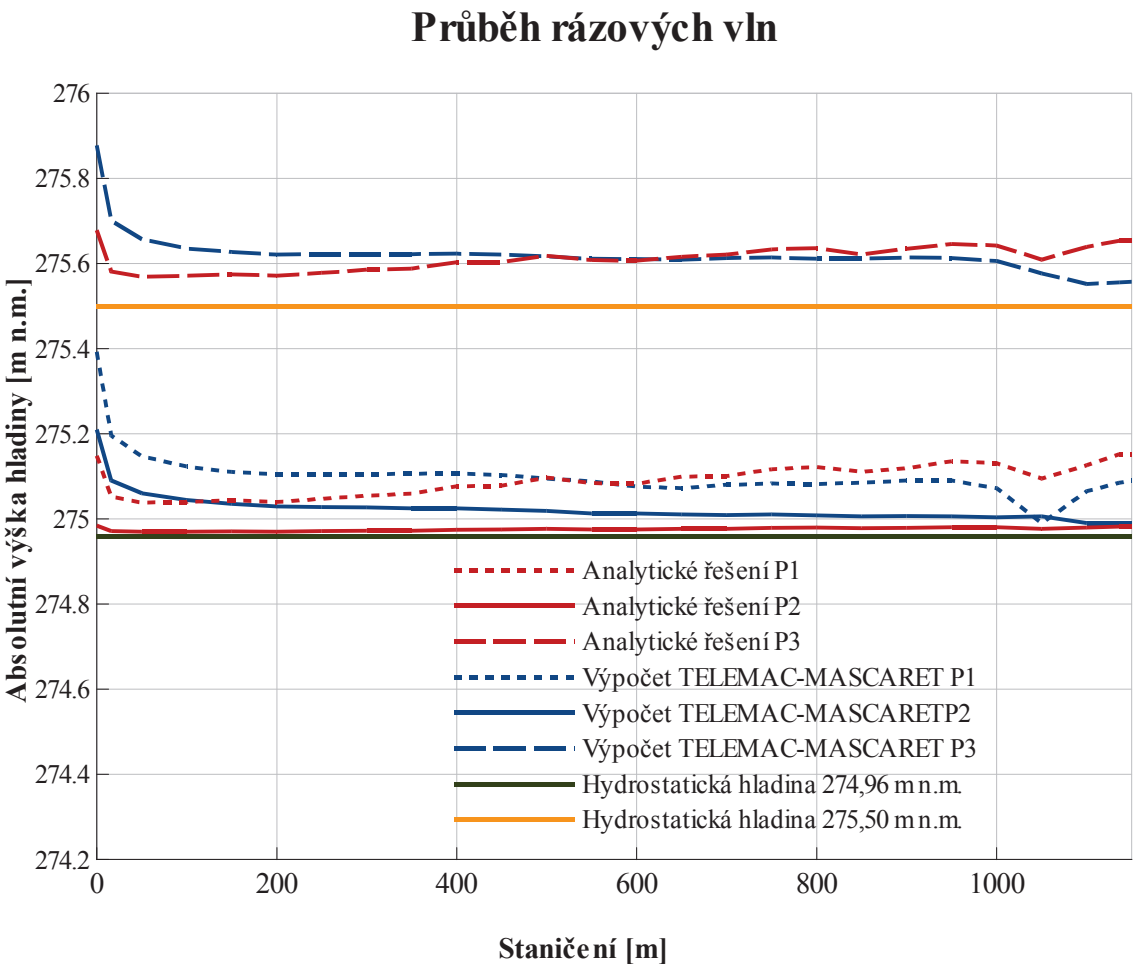


Obr. 7.7 Průběh rázové vlny v podélném profilu (TELEMAC-MASCARET)

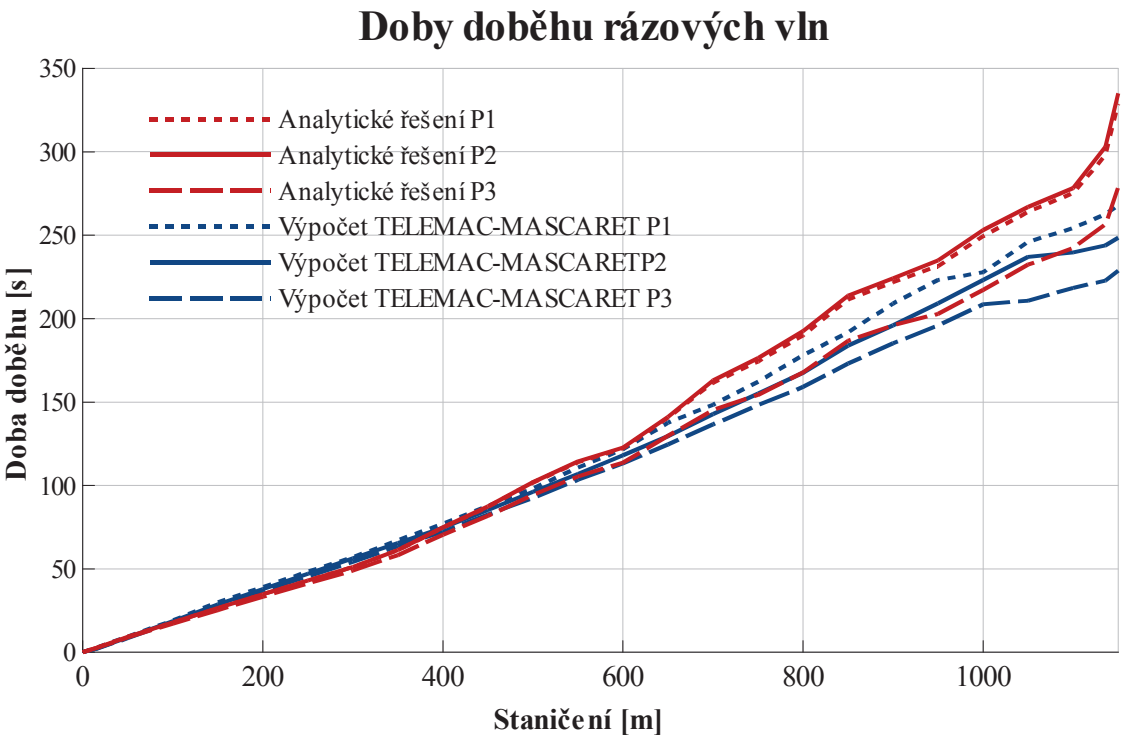


Obr. 7.8 Hladina v příčném profilu ve zvoleném časovém kroku (TELEMAC-MASCARET)

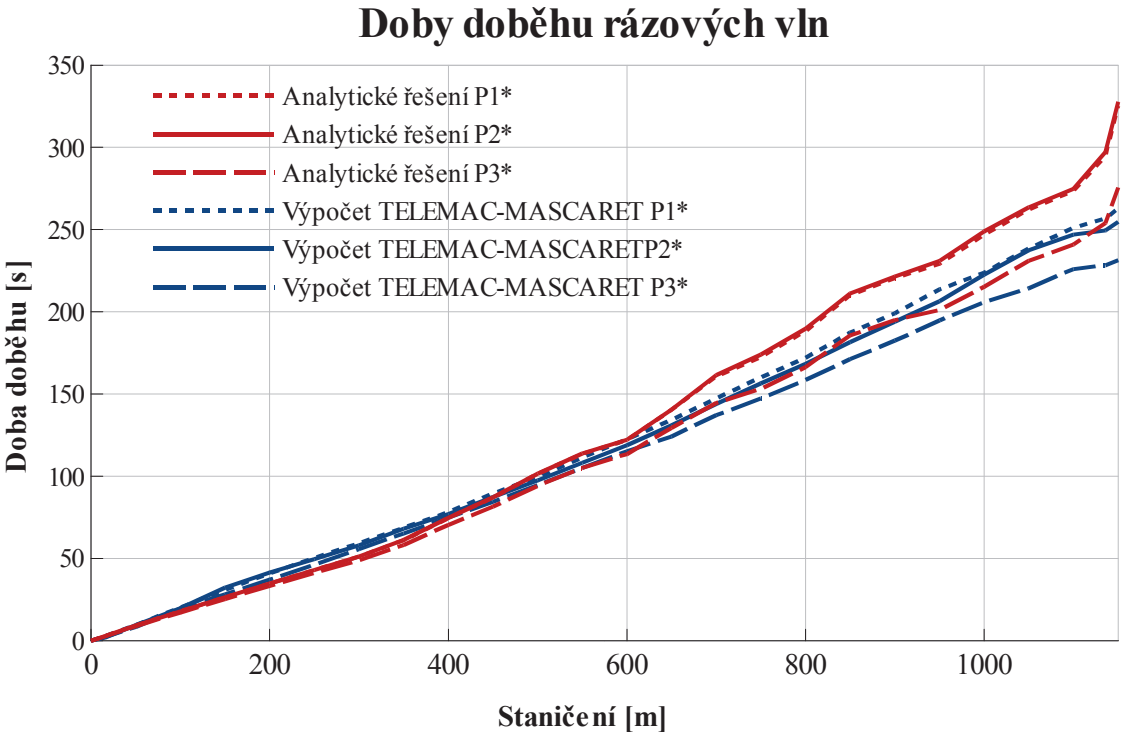
případě je uvažována krizová situace, kdy není možné otevřít proplachovací propust II a rázová vlna je tvořena plným uzavíraným průtokem po celou dobu průběhu vlny (Obr. 7.11).



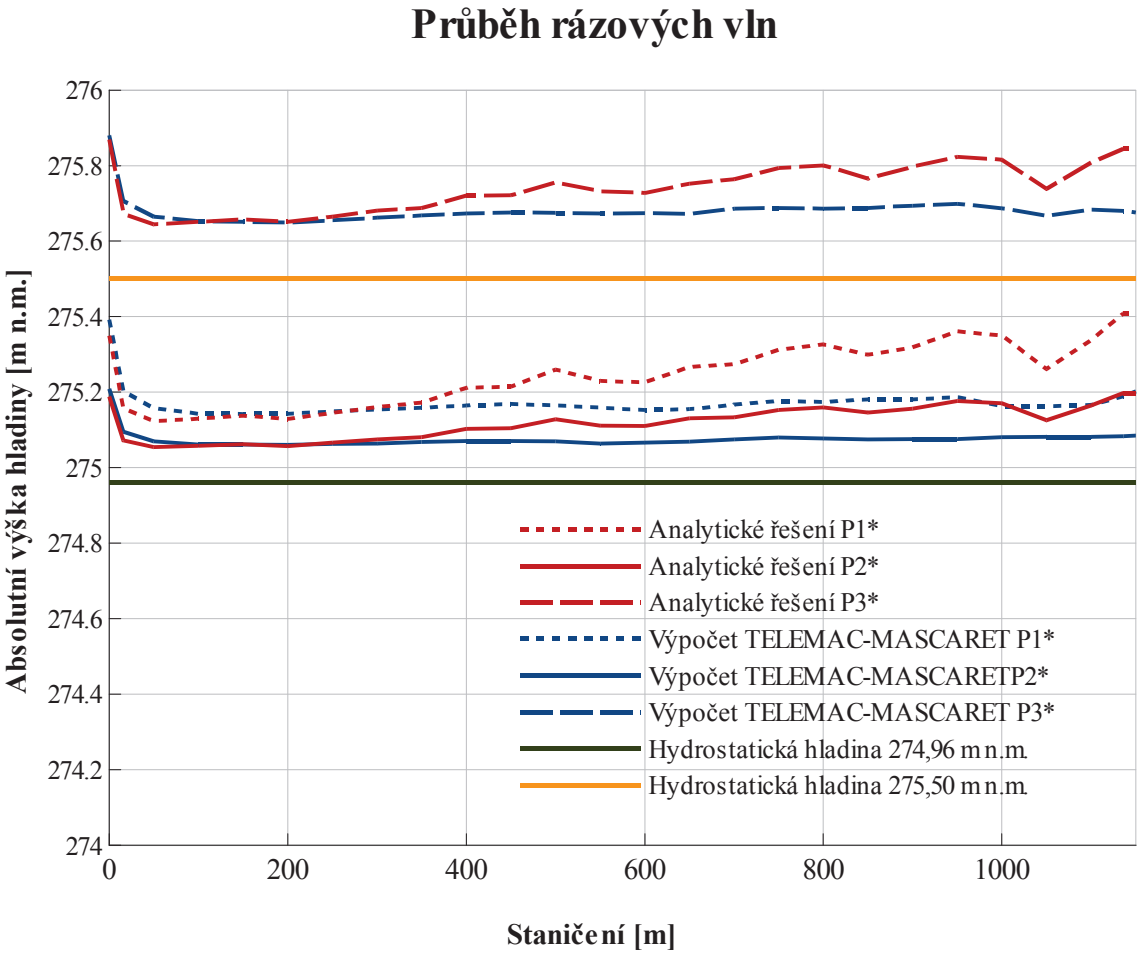
Obr. 7.9 Výsledné řešení pro uzavření průtoku a následného otevření proplachovací propusti II



Obr. 7.10 Výsledné doby doběhu pro uzavření průtoku a následného otevření proplachovací propusti II



Obr. 7.11 Výsledné doby doběhu pro uzavření průtoku bez otevření proplachovací propusti II



Obr. 7.12 Výsledné řešení pro uzavření průtoku bez otevření proplachovací propusti II

7.6 Zhodnocení aplikovaných metod

Do analytického řešení není možné zadat změnu průtoku vlivem otevření proplachovací propusti II. V řešení, kde je uvažováno otevření propusti, je vyvolání rázové vlny počítáno analytickým řešením na průtok snížený o 12,7 m^3/s. Jak je zřejmé z výsledných grafů průběh je ovlivněn pouze v počátku vyvolání vlny a po délce se přibližuje řešení softwaru TELEMAC-MASCARET. Ve výsledcích analytického řešení je patrné, že původní rychlost v měřeném profilu výrazně ovlivňuje střední výšku vlny a v případě, kdy nastává změna charakteru příčného profilu např. zmenšení průtočné plochy a snížení hloubky, dochází k zásadním změnám středních výšek rázové vlny a tím znehodnocení výsledku. Další faktor, který mohl ovlivnit výsledky, je absence zohlednění drsnosti koryta v analytickém řešení. Tato domněnka by musela být ověřena provedením několika měření se změnou drsností. Software TELEMAC-MASCARET má průběh rázových vln plynulý a je schopen reagovat na změny

průtoku v čase.

8. Závěr a diskuze

Cílem diplomové práce bylo provést rešerši dostupných podkladů pro stanovení hydraulických parametrů rázových vln, které vznikají v souvislosti s výskytem havarijních stavů během provozu MVE a provést porovnání zvolených metod. Práce byla zaměřena na analytické řešení dle Gabriela [1] a numerické řešení programu TELEMAC-MASCARET.

Analytické řešení bylo odvozeno na základě několika zjednodušujících předpokladů a v rámci porovnání s experimentálním pokusem na fyzikálním modelu [1] je odvozený postup dostačující a vykazuje shodnost vybraných charakteristik s postupem čela rázové vlny. Mezi nedostatky analytického řešení patří pracnost aplikace výpočtu, neschopnost zanesení objektů v korytě toku, zpětná vazba na změnu průtoku v čase na začátku úseku a neovlivnitelná doba změny průtoku. Oproti zmiňovanému analytickému řešení software TELEMAC-MASCARET vykazuje stejnou přesnost při porovnání experimentálního pokusu [1], ale dokáže reagovat na změnu doby uzavírání, následné regulace i změnu příčných profilů a poskytuje výstupy plynulého průběhu rázové vlny. TELEMAC-MASCARET je vhodný pro řešení vodohospodářských úloh zabývajících se neustáleným prouděním.

9. Seznam tabulek

Tab.1 Porovnání vypočtených hodnot pro snížení průtoku z 90 na 60 l/s
Tab.2 Porovnání vypočtených hodnot pro úplné uzavření průtoku 60 l/s
Tab.3 Porovnání vypočtených hodnot pro snížení průtoku z 90 na 30 l/s
Tab.4 Porovnání vypočtených hodnot pro úplné uzavření průtoku 30 l/s

10. Seznam obrázků

Obr. 5.1 schéma rázových vln při zvětšení průtoku [1]
Obr. 5.2 schéma rázových vln při poklesu průtoku [1]
Obr. 5.3 Schéma pro odvození pohybových rovnice dle A.Puzanova [2]
Obr. 5.4 Typy rázových vln [1]
Obr. 5.5 Schéma kladné zpětné vlny [1]

Obr. 6.1 Schéma hydraulického žlabu [1]
Obr. 6.2 Vyhodnocení experimentálního pokusu snížení průtoku z 90 l/s na 60 l/s dle Gabriela [1]
Obr. 6.3 Grafické porovnání vypočtených hodnot při snížení průtoku z 90 na 60 l/s
Obr. 6.4 Grafické porovnání absolutních výšek při snížení průtoku z 90 na 60 l/s
Obr. 6.5 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 6 při snížení průtoku z 90 na 60 l/s
Obr. 6.6 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 4 při snížení průtoku z 90 na 60 l/s
Obr. 6.7 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 2 při snížení průtoku z 90 na 60 l/s
Obr. 6.8 Grafické porovnání vypočtených hodnot při úplném uzavření průtoku 60 l/s
Obr. 6.9 Grafické porovnání absolutních výšek při úplném uzavření průtoku 60 l/s
Obr. 6.10 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 6 při úplném uzavření průtoku 60 l/s
Obr. 6.11 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 4 při úplném uzavření průtoku 60 l/s
Obr. 6.12 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 2 při úplném uzavření průtoku 60 l/s
Obr. 6.13 Grafické porovnání vypočtených hodnot při úplném uzavření průtoku 60 l/s
Obr. 6.14 Grafické porovnání absolutních výšek při úplném uzavření průtoku 60 l/s
Obr. 6.15 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 6 při snížení průtoku z 90 na 30 l/s
Obr. 6.16 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 4 při snížení průtoku z 90 na 30 l/s
Obr. 6.17 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 2 při snížení průtoku z 90 na 30 l/s
Obr. 6.18 Grafické porovnání vypočtených hodnot při úplném uzavření průtoku 90 l/s
Obr. 6.19 Grafické porovnání absolutních výšek při úplném uzavření průtoku 90 l/s
Obr. 6.20 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 6 při úplném uzavření průtoku 90 l/s
Obr. 6.21 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 4 při úplném uzavření průtoku 90 l/s
Obr. 6.22 Grafické porovnání průběhu vlny v profilu 2 při úplném uzavření průtoku 90 l/s
Obr. 7.1 Situace širších vztahů s vyznačením MVE Železný Brod [17]
Obr. 7.2 Derivační kanál MVE [19]

Obr. 7.3 Vtokový objekt a strojovna MVE Železný Brod [19]
Obr. 7.4 Stavidlový jez na řece Jizeře – vpravo vtokový objekt derivačního kanálu [19]
Obr. 7.5 Nátok do derivačního kanálu MVE, proplachovací propust I (vlevo) [19]
Obr. 7.6 Podélný řez strojovnou MVE Železný Brod [10]
Obr. 7.7 Průběh rázové vlny v podélném profilu (TELEMAC-MASCARET)
Obr. 7.8 Hladina v příčném profilu ve zvoleném časovém kroku (TELEMAC-MASCARET)
Obr. 7.9 Výsledné řešení pro uzavření průtoku a následného otevření proplachovací propusti II
Obr. 7.10 Výsledné doby doběhu pro uzavření průtoku a následného otevření proplachovací propusti II
Obr. 7.11 Výsledné doby doběhu pro uzavření průtoku bez otevření proplachovací propusti II
Obr. 7.12 Výsledné řešení pro uzavření průtoku bez otevření proplachovací propusti II