

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA ZDRAVOTNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ**



**STUDIE POSOUZENÍ A NÁVRH OCHRANY VÝTLAČNÉHO
ŘADU SUROVÉ VODY NA UMĚLÉ INFILTRACI ZDROJE
PITNÉ VODY KÁRANÝ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

KAREL TUREČEK

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Bohumil Šťastný, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jan Krupička, Ph.D.

Leden 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tureček** Jméno: **Karel** Osobní číslo: **396653**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra zdravotního a ekologického inženýrství**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Vodní hospodářství a vodní stavby**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Studie posouzení a návrh ochrany výtlačného řadu surové vody na umělé infiltraci zdroje pitné vody Káraný

Název diplomové práce anglicky:

Assessment study and design of discharge protection range of raw water for artificial recharge drinking water sources Káraný

Pokyny pro vypracování:

Cílem diplomové práce je posouzení stávajícího stavu ochrany výtlačného řadu surové vody na zdroji pitné vody Káraný a navrhnout opatření vhodné ochrany výtlačného řadu surové vody. Součástí diplomové práce je provedení rešerše, obecný popis problému, experimentální část, zhodnocení a závěry.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Bohumil Šťastný Ph.D., katedra zdravotního inženýrství

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **11.10.2016** Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 8. 1.2016

.....
Karel Tureček

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohumilu Šťastnému, Ph.D. Další poděkování náleží Ing. Ivanu Francovi za čas věnovaný konzultacím k problematice diplomové práce a také Ing. Janu Krupičkovi, Ph.D. za cenné rady a poskytnutí výpočtového programu VODRAZ.

ABSTRAKT

Obsahem této diplomové práce je popis problematiky související s vodními rázy ve vodovodním potrubí. Z hlediska formy je tato práce rozdělena na čtyři hlavní kapitoly, které jsou věnovány důkladné rešerši oblasti vodovodního potrubí a vodních rázů, popisu a modelování průběhu vodního rázu, vyhodnocení dané oblasti a stanovení závěru a doporučení na základě dosažených výsledků diplomové práce.

V rámci teoretické části diplomové práce je popis rozdělen na dva bloky. V první části se autor věnuje popisu dílčích prvků vodovodní sítě. V druhé části je uveden popis vodních rázů. Zde je charakterizován historický vývoj a současný přístup k řešení problematiky vodních rázů, matematicko-fyzikální význam, nedílnou součástí je vymezení základních pojmů a popis možností vedoucích k utlumení nebo úplnému zamezení vodních rázů.

Experimentální část diplomové práce je věnována popisu posuzované oblasti. Jsou zde uvedeny dílčí cíle diplomové práce, vč. popisu základních vlastností jednotlivých prvků čerpací stanice surové vody, důraz je kladen na modelování vodního rázu z několika hledisek.

Ve třetí části dochází k vyhodnocení průběhu vodních rázů. Ve čtvrté části jsou stanoveny závěry a doporučení vycházející z výsledků diplomové práce.

Klíčová slova:

voda
vodovodní potrubí
vodní ráz
tlakový ráz
hydraulický ráz
proti-rázová ochrana

ABSTRACT

This thesis introduces problems related with water hammer in water pipeline. The thesis consists of four main chapters, which are dedicated thoroughly to research and description of water pipeline, water hammer and modelling of water hammer, evaluation of problems in task area and conclusion based on results of this thesis.

Theoretical part of this thesis is divided in two main segments. First segment describes essential elementary of water pipeline. Second segment describes water hammer and this segment is focused on historical development and current attitude, math-physics attitude, introduction of essential term and description of options lead to preclusion of water hammer.

Experimental part of this thesis focuses on description of task area. There are presented aims of this thesis, description of essential characteristic of components of pumping station and modelling of water hammer for different variants.

In the third process of water hammer in task area part is evaluated. In fourth part conclusion and reference based on results of this thesis is defined.

Key words:

water
water pipe
water hammer
surge pressure
hydraulic transient
surge control

STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je důkladné představení a popsání problematiky týkající se vodních rázů, popis jednotlivých prvků a posouzení protirázové ochrany výtlačného řadu na čerpací stanici surové vody na umělé infiltraci zdroje pitné vody Káraný. Po formální stránce je práce rozdělena na část teoretickou a část experimentální.

Část teoretická je rozdělena na dvě hlavní podkapitoly. První si klade za cíl uvedení čtenáře do problematiky jednotlivých zařízení nacházející se na vodovodní síti. Mezi tyto prvky se řadí vodovodní potrubí, tvarovky, armatury, vodárenské nádrže a v neposlední řadě čerpací stanice. Druhá podkapitola je věnována problematice vodních rázů. Cílem této části diplomové práce je teoretický popis vodního rázu, příčiny jeho vzniku a jakých zařízení se týká. Dále uvedení matematicko-fyzikálního popisu a seznámení s jednotlivými pojmy. V posledním bloku teoretické části jsou pak popisovány jednotlivé přístupy a způsoby k zamezení nebo utlumení vodních rázů.

Část experimentální je věnována popisu posuzované oblasti protirázové ochrany výtlačného řadu na surové vodě. Oblast je popisována od širších vztahů až po budovu ochrany výtlačného řadu vč. samotného výtlačného řadu. Nedílnou součástí je rovněž modelování stávajícího a nového stavu, zpracování výsledků a stanovení dílčích závěrů a doporučení.

Hlavním cílem této diplomové práce je ověření funkčnosti stávající protirázové ochrany v podobě zavodňovací nádrže a stanovení maximálního přetlaku a podtlaku, který může vzniknout při náhlém výpadku čerpadla/čerpadel. Modelování průběhu vodního rázu je provedeno ve čtyřech variantách.

ABSTRAKT	5
ABSTRACT	6
STANOVENÍ CÍLŮ PRÁCE	7
1 TEORETICKÁ ČÁST	10
1.1 ZÁKLADNÍ PRVKY VODOVODNÍ SÍTĚ.....	10
1.1.1 <i>Vodovodní potrubí</i>	10
1.1.2 <i>Tvarovky</i>	14
1.1.3 <i>Armatury</i>	15
1.1.4 <i>Čerpadla a čerpací stanice</i>	18
1.1.5 <i>Akumulace vody na vodovodní síti</i>	21
1.2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VODNÍHO RÁZU.....	22
1.2.1 <i>Vodní ráz</i>	22
1.2.2 <i>Historický vývoj přístupu k vodním rázům vs. současný stav</i>	23
1.2.3 <i>Matematický popis vodního rázu</i>	24
1.2.4 <i>Vymezení základních pojmů a popis vodního rázu</i>	25
1.2.5 <i>Vhodná opatření pro utlumení vodního rázu</i>	34
1.2.6 <i>Přístup k řešení problematiky vodních rázů v ČR a zahraničí</i>	41
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	42
2.1 POPIS A UMÍSTĚNÍ VODÁRENSKÉHO OBJEKTU	42
2.1.1 <i>Zdroj pitné vody Káraný – umělá infiltrace</i>	42
2.1.2 <i>Popis ČSSV</i>	43
2.1.3 <i>Popis funkce stávající ochrany výtlačného řadu</i>	46
2.1.4 <i>Výtlačný řad surové vody</i>	47
2.2 ÚVOD A STANOVENÍ CÍLE MODELOVÁNÍ VODNÍHO RÁZU	49
2.3 MODELOVÁNÍ PRŮBĚHU VODNÍHO RÁZU JEDNOTLIVÝCH VARIANT.....	57
2.3.1 <i>Výpočet základních veličin vodního rázu</i>	57
2.3.2 <i>Var. I – Stávající čerpadlo M3 = 455l/s, bez zavodňovací nádrže</i>	58
2.3.3 <i>Var. II – Stávající čerpadlo M3 = 455 l/s, se zavodňovací nádrží</i>	61
2.3.4 <i>Var. III – Nové čerpadlo M1, Q = 650l/s</i>	63
2.3.5 <i>Var. IV – Souběh nových čerpadel M1, M2 a M4, Q = 1950l/s</i>	66
3 VYHODNOCENÍ	69

3.1	VYHODNOCENÍ PRŮBĚHU VODNÍCH RÁZŮ	69
3.1.1	<i>Vyhodnocení a posouzení Var. I a Var. II</i>	69
3.1.2	<i>Vyhodnocení Var. III</i>	71
3.1.3	<i>Vyhodnocení Var. IV</i>	72
3.2	NÁVRH A POSTUP MĚŘENÍ VODNÍHO RÁZU	73
3.3	ANALÝZA MOŽNÝCH OPATŘENÍ OCHRANY VÝTLAČNÉHO ŘADU	75
4	ZÁVĚR A DOPORUČENÍ	80
5	SEZNAM LITERATURY A PODKLADŮ.....	83
6	SEZNAM TABULEK	86
7	SEZNAM OBRÁZKŮ	86
8	SEZNAM GRAFŮ	87

1 TEORETICKÁ ČÁST

V rámci teoretické části diplomové práce se autor v první fázi zabývá stručným rozbořem základních prvků vodovodní sítě. Charakterizovány jsou jednotlivé komponenty – zařízení až po čerpací stanici. Popisovány jsou jednotlivé typy a označení vodovodního potrubí vč. základní problematiky příčin poruch na vodovodním potrubí. Dále jsou uvedeny jednotlivé typy trubních armatur a tvarovek, stručný popis akumulčních zařízení, část je věnována také vymezení rozdílu mezi čerpací stanicí a čerpadly.

V druhé fázi je čtenář uveden do problematiky vodních rázů. Zde je popisováno, čím jsou vodní rázy vyvolávány a jaká zařízení mohou poškodit. Dále je uvedeno zařazení této problematiky do historického kontextu a moderní přístup k řešení otázky vodních rázů. Nedílnou součástí je poté uvedení matematického popisu a vymezení jednotlivých základních pojmů. V závěru teoretické části se autor věnuje vymezení vhodných způsobů k utlumení vodních rázů.

1.1 Základní prvky vodovodní sítě

1.1.1 Vodovodní potrubí

Základním prvkem vodovodní sítě je vodovodní potrubí, které zajišťuje přítok vody od vodního zdroje až po odběratele. Proudící voda v potrubí protéká ve směru sklonu tlakové čáry.

Vodovodní potrubí je rozdělováno podle účelu na několik skupin a kategorií, mezi nimiž nejvýznamnější je rozdělení podle druhu materiálu a to na kovová a nekovová potrubí. [3]

Kovová potrubí

Do této skupiny patří litinové *trouby z šedé litiny*, které jsou označovány jako nejdéle používaný materiál ve vodárenství a co do rozšířenosti je nejčastěji používaným na našem území. Potrubí disponuje poměrně dobrou schopností odolávat korozi, avšak značná křehkost a špatná pevnost v tahu způsobuje jeho vysokou poruchovost. Nástupcem tohoto potrubí jsou *litinové trouby z tvárné litiny*, používané od konce 80. let minulého století. Mezi největší výhody při užití tohoto potrubí jsou velmi vysoká schopnost odolávat korozi, potrubí je pružné a pevné,

může tedy velmi dobře odolávat zatížení vyvolanému vnějšími vlivy, jako je autodoprava apod. Významným faktem co do ušetření investic je možnost zasypaní výkopu přímo vytěženou zeminou na staveništi. Prakticky jedinou nevýhodou materiálu je poměrně vyšší cena, která velmi často představuje rozhodující faktor ve výběrovém řízení dodavatele stavby. Spoje litinových trub jsou prováděny buď spojováním pomocí hrdel, nebo pomocí přírub. Třetím zástupcem trub kovových jsou *ocelové trouby*, které jsou druhým nejstarším a zároveň druhým nejpoužívanějším materiálem u nás. S těmito troubami se lze setkat spíše u objektů s větší světlostí potrubí (velikost DN800 a více), přičemž velké využití mají v oblasti vodní energetiky, kde tento materiál disponuje velkou pevností, čímž se stává odolným vůči vysokým hydrostatickým a hydrodynamickým tlakům vody a vodním rázům. Ocelové potrubí je velmi dobře zpracovatelné. Ohrožení korozí je však velmi značné, přičemž u špatně navržené nebo nevhodně zvolené protikorozi ochrany může životnost potrubí klesnout pod 5 let. Spojování potrubí se provádí svařováním, spojením hrdly, přírubami nebo využití spoje na závit. Posledním z nejpoužívanějších materiálů z řad kovových potrubí je *potrubí z nerezové oceli*, které je v poslední době stále častěji používáno, a to především ve vodárenských objektech jako jsou armaturní šachty, vodojemy, čerpací stanice, úpravny vod, čistírny odpadních vod apod. U tohoto materiálu rozeznáváme několik tříd – typů nerezové oceli podle jednotlivého zastoupení chemických prvků – kovů. Potrubí z nerezavějící oceli je v případě dodržení montážní kázně vysoce odolné vůči korozi, bezporuchové a celkově velmi spolehlivé, odolává vysokým tlakům, je velmi dobře zpracovatelné a snadno udržovatelné. Nevýhodou je poměrně vysoká cena a při nedodržení čistoty prostředí při svařování může spojení jednotlivých trub znamenat výrazné oslabení celého vodovodního systému. Spojování je nejčastěji prováděno svařováním nebo přírubami. [3]

Nekovová potrubí

Do této oblasti spadají potrubí jak z plastových materiálů, tak i z materiálů ostatních. Z plastových materiálů se jedná o *potrubí z PVC (polyvinylchlorid)*, je šedivé barvy a charakteristické vysokou chemickou odolností vůči okolnímu prostředí i kvalitě dopravované vody. Potrubí z PVC je velmi pružné, dobře

odolává vlivům způsobeným vnějším zatížením, korozní odolnost je velmi dobrá. Montáž potrubí umožňuje rychlý a bezpečný chod práce, bez nutnosti použití velkých stavebních strojů jako jsou jeřáby, kladkostroje apod. Omezení nastává při dopravě vody s 20°C a více (s přibývajícím teplotou klesá životnost potrubí). Maximální provozní tlak bývá do 100 metrů vodního sloupce. Náročnost provedení podsypu, obsypu a zásypu kolem potrubí prodražuje celkové finanční náklady na stavbu. Spojování je prováděno hrdly, horkým vzduchem, lepením, závití, příruby a mechanickými spojkami. Dalším materiálem z řady plastů je *potrubí z PE (polyetylén)*, trubka bývá vyráběna v černém provedení s modrými pruhy pro vodárenské účely nebo v modrém provedení. Mezi základní dva typy se řadí LDPE a HDPE. Potrubí je k dispozici buď tradičně v rourách nebo i do DN110 ve svitcích. Vlastnosti materiálu jsou obdobné jako u PVC, materiál je ale měkčí a tak jeho odolnost vůči mechanickému poškození slabší. Spojování může být prováděno svařováním na tupo nebo elektrotvarovkami, hrdly, přírubami, závití, lepením i mechanickými spojkami. [3,5] Zcela jiným používaným typem nekovového potrubí je *sklolaminát*. Stěny těchto trubek jsou velmi hladké, a tak je hydraulická třecí ztráta minimální. Jsou trvanlivé, korozně odolné, odolávají dobře mechanickým vlivům, materiál se na povrchu vnitřního líce potrubí usazuje minimálně, dobře odolává provozním tlakům. Uložení potrubí je velmi obdobné jako u plastů – vysoká citlivost na pokládku a obsyp. Spojování je prováděno hrdly nebo mechanickými spojkami popřípadě adaptéry. [6] Potrubí z *azbestocementu*, u něhož byl prokázán nepříznivý vliv na lidské zdraví v podobě přítomnosti karcinogenních látek, se v současnosti již nepoužívá a je vyřazováno z provozu. [3]

Dále se potrubí rozdělují podle účelu použití, druhu spoje, velikosti tlaku a dalších charakteristik.

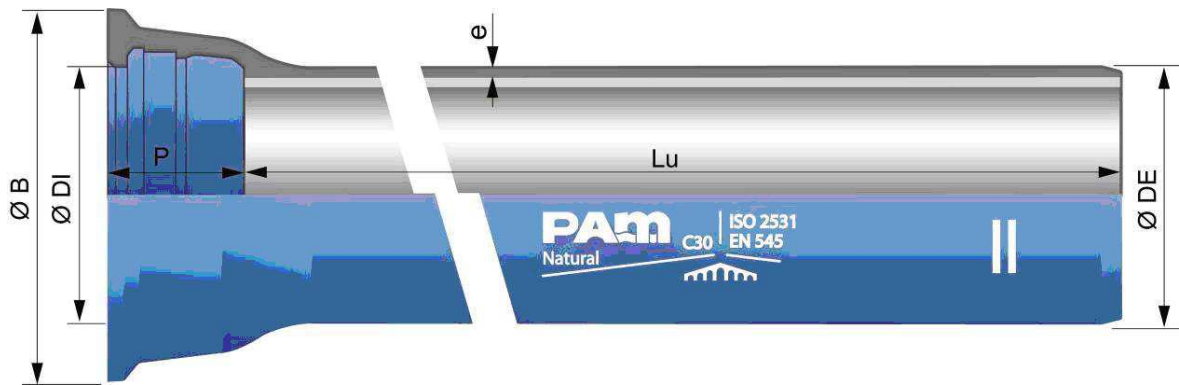
Mezi základní charakteristické parametry patří vnitřní jmenovitá světlost DN a jmenovitý tlak označovaný jako PN. U trub plastových je DN uvedeno jako vnější rozměr průměru potrubí, kdežto u trub kovových je pod zkratkou DN označován vnitřní průměr potrubí. DN potrubí je uváděno normou ČSN EN ISO 6708. Pojem jmenovitý tlak je definován jako číselný desetinasobek nejvyššího pracovního přetlaku v systému, jehož velikost je udávána v MPa. Určený je normou ČSN 13 0010. [1,4]

Vodovodní potrubí jako jakýkoli jiný materiál používaný ve stavebnictví podléhá značné degradaci. Tato degradace materiálu je pak závislá především na druhu použitého materiálu vodovodního potrubí, ale také na typu protékaného média a jeho složení, ale také na tom, čím je vodovodní potrubí ovlivňováno z vnějšího prostředí. Rozdílná situace nastává u potrubí uloženého v zemi a potrubí nacházejícího se v armaturních komorách a šachtách vodovodní sítě či bazénových provozech. [2]

Pro přehlednost nejčastějších poruch a problémů pro dané materiály je přiložena tabulka (Tab. 1.1).

Tab. 1.1 Nejčastější poruchy potrubí pro různé potrubní materiály [2]

Potrubní materiál	Problémy
Polyvinylchlorid	Nadměrné deformace, vychýlení spojů, netěsnost spojů
Polyetylén	Trhliny bývají podélné i po obvodě potrubí, stav potrubí se typicky zhoršuje vlivem ozónu a UV záření. Trhliny se nejčastěji objevují z důvodu mechanického nárazu na potrubí vysokým vnitřním tlakem - poškození působení rozpouštědel, těžké vyhledávání, poškození se může objevit při odposlechu.
Šedá litina	Vnitřní koroze, vychýlení spojů, úniky, vnější koroze, netěsnost spojů, vyrobené chyby, trhliny se obvykle objevují po obvodě potrubí, způsobené napětím v potrubí.
Tvárná litina	Vnitřní koroze, vychýlení spojů, úniky, vnější koroze, netěsnost spojů, vyrobené chyby, koroze bludnými proudy.
Ocel	Vnitřní a vnější koroze, nadměrná deformace, netěsnost spojů, nedokonalost svařovaného spoje.
Azbestocement	Vnitřní koroze, praskliny, posun spojů, netěsnosti, malé potrubí můžou být poškozené v čase manipulací nebo odposlechu, těžké vyhledávání.
Železobeton	Kontakt s podzemní vodou s vysokým obsahem síranů a chloridů způsobuje korozi, potrubí je velmi těžké, sázení okolní půdy může způsobit netěsnost spojům vyrobené chyby.



Obr. 1.1 Litinová trubka s jednokomorovým hrdlem [8]

1.1.2 Tvarovky

Nedílnou součástí vodovodní sítě jsou tvarovky, které slouží několika účelům. Nejčastější charakteristické vlastnosti tvarovek umožňují:

- změnu trasy potrubí koleny;
- změnu průměru potrubí redukcemi;
- odbočení nebo připojení potrubí pomocí T-kusů;
- ukončení potrubí pomocí X-kusů;
- přechod mezi dvěma materiály potrubí pomocí adaptérů.

Materiál tvarovek bývá často shodný s materiálem trubní sítě, kombinace materiálů tvarovek ale nebývají výjimkou. Spoje tvarovek k vodovodní trubce nebo armatuře jsou závislé na použitém materiálu potrubí a armatur. Nejčastěji to bývají spoje přírubové nebo hrdlové. [3]



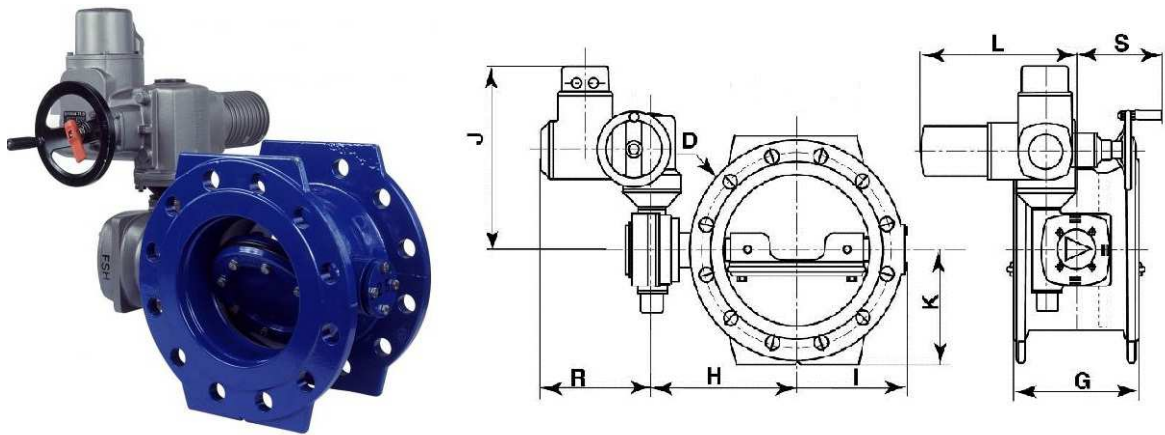
Obr. 1.2 Přírubový T-kus [9]

1.1.3 Armatury

Armatury jsou pohyblivé řídicí a ovládací mechanismy, používané ve vodárenství pro absolutní kontrolu nad proudem tekoucí vody. Volba materiálu pro výrobu armatur probíhá tak, aby zajišťovala bezpečný a spolehlivý provoz s dlouhou životností. Při provozu dochází k zatížení jednak vodním tlakem, ale také okolním prostředím, dále pak musejí být armatury odolné vůči chemikáliím, otěru a korozi. Nejvíce rozšířeným používaným materiálem bývá litina šedá nebo tvárná, dále pak nerezavějící ocel z chromové nebo austenitické oceli. Používají se ale i armatury vyráběné z plastů. Spoje potrubí jsou řešeny nejčastěji přírubově nebo hrdlově, plastové armatury bývají spojovány i lepením a svařováním. Mezi základní druhy armatur se řadí armatury uzavírací a odběrné. [7]

Uzavírací armatury

Jedná se o prvky, které umožňují uzavřít proud tekoucí vody. Za základní prvek jsou považována *šoupátka*. Šoupátka jsou navrhována v místech připojování či odbočování vodovodních potrubí, vodojemech, nebo armaturních šachtách pro možnost uzavření proudu vody v potrubí a následnou revizi či opravu armatur měřících, regulačních a jiných. Použití šoupátek je omezeno pouze na polohu otevřeno nebo uzavřeno, regulace proudu není u šoupátek výrobcem doporučována. Ovládání je umožněno buď z armaturních komor, nebo pomocí zemních souprav. Návrh šoupátek je částečně omezen svou masivní konstrukcí, u větších průměru přibližně nad DN500 a více jsou spíše navrhovány *uzavírací klapky*, které disponují podstatně menším záborem prostředí a tím i náročnost montážních prací je výrazně zjednodušena. Opět platí pravidlo použití pouze při poloze otevřeno nebo uzavřeno. Jiným případem klapek jsou *zpětné klapky a klapky koncové – žabí*, které umožňují průtok vody pouze jedním směrem, v případě, kdy je odstaveno čerpadlo, dochází k částečně zpětnému proudu, ten je v určitém okamžiku zastaven konstrukcí zpětné klapky. Tyto klapky bývají talířové nebo kulové. Posledním typem jsou *ventily (uzavírací, solenoidové)* nebo *kohouty*, které jsou využívány u menších dimenzí (běžně přibližně do DN50). Využití je nejčastěji u vodovodních přípojek. [3,7]



Obr. 1.3 Uzavírací klapka s elektropohonem [10]

Odběrné armatury

Mezi základní odběrné objekty se řadí hydranty. Jejich funkce se odvíjí od jednotlivých typů hydrantů, přičemž mohou být využity pro účely požární, proplachovací, odkalovací a odvzdušňovací. Jejich umístění vzhledem k zemskému povrchu může být buď pod zemí – podzemní hydranty nebo nad zemí – nadzemní hydranty. Dále také rozeznáváme třetí typ a to hydranty šachtové. Materiálem hydrantů je litina tvárná nebo šedá. Ovládání hydrantů je umožněno pomocí zemnicí soupravy buď se samostatnou konstrukcí přes šoupátko, nebo součástí tělesa hydrantu – např. podzemní hydrant DUO. *Požární hydranty* jsou navrhovány, buď jako podzemní, nebo nadzemní a hustota rozmístění jednotlivých vzdáleností od sebe a od jednotlivých objektů je daná ČSN 73 0873. DN potrubí se pohybuje od DN150 do DN300. *Proplachovací a odkalovací hydranty* slouží k vypouštění vodovodní sítě, *odvzdušňovací hydranty* neboli vzdušníky slouží k odvzdušnění potrubí v nejvyšších místech lomových bodů. Mohou být ruční nebo automatické, osazení může být v armaturních komorách nebo v zemi. [7]



Obr. 1.4 Podzemní hydrant DUO [25]

Ostatní armatury

Armatury pro redukci tlaku vody ve vodovodní síti nazýváme *redukční ventily*, pomocí kterých upravujeme vstupní tlak na požadovaný tlak výstupní. V principu se jedná o armaturu, jejíž konstrukci tvoří škrtkový prvek (ventil), regulační píst a pružina. Stlačování a uvolňování pístu nastává buď při zvyšování, nebo při poklesu tlaku. Pro účely regulace průtoku vody slouží *regulační ventily* nebo *plunžrové ventily*. U těchto armatur se průtok vody reguluje změnou velikosti průtokové plochy. Oproti uzavíracím armaturám je umožněna plná regulace průtoku – poloha otevřeno a uzavřeno se nepředpokládá. Ovládání může být ruční, nebo dálkově řízené. Pro usnadnění montáží a demontáží potrubí slouží *montážní vložky*, jsou to přírubové armatury s teleskopickou funkcí. Odchytky zkrácení nebo prodloužení bývají řádově v jednotkách centimetrů. Pro zajištění spolehlivé funkce je třeba, aby docházelo ke kontrole šroubů a jejich ozkoušení. Pro zajištění teplotních změn, drobných změn trasy potrubí a omezení chvění potrubí slouží pro vodárenské účely *kompensátory*. V praxi se lze setkat s pryžovými nebo vlnovými kompensátory. Jedná se o armatury spojované přírubami. [3,7]



Obr. 1.5 Regulační ventil (vlevo) [13], montážní vložka (vpravo) [14],

Měřicí armatury

Vodoměry a průtokoměry jsou základní používaná měřicí zařízení na vodovodní síti a slouží k zaznamenání objemu tekoucí vody. Základní typy vodoměrů jsou rychlostní, objemové, průřezové, indukční a ultrazvukové. Můžeme

ale také rozlišovat vodoměry podle toho, zdali je počítadlo umístěné v proudu tlakové vody – mokroběžné nebo mimo proud – suchoběžné. Pro vodárenské účely jsou používané vodoměry výrobní (použití u čerpacích stanic, vodojemů, úpraven vod) nebo vodoměry bytové, domovní a sekční pro vyhodnocení fakturace větších oblastí. [3,15]

K zaznamenávání tlaku na vodovodním potrubí jsou užívány *tlakoměry*. Podle požadované velikosti naměřovaných tlaků se tlakoměry rozdělují na:

- Manometry – měření přetlaků;
- Vakuometry – k měření velmi malých absolutních tlaků;
- Manovakuometry – k měření přetlaků i podtlaků;
- Tahoměry – k měření malých podtlaků;
- Diferenční tlakoměry – k naměřování tlakových rozdílů.

Dále lze podle principu použití rozeznávat tlakoměry zvonové a pístové, kapalinové, deformační, elektrické. Pro umístění tlakoměrů je nutné vybrat vhodné místo tak, aby nedošlo k ovlivňování výsledků nestacionaritami proudění apod. [33]

1.1.4 Čerpadla a čerpací stanice

Nedílnou součástí téměř každé vodárenské soustavy jsou zařízení, pomocí kterých lze vést vodu z nižšího místa na místo položené výše. Tato zařízení jsou hovorově nazývána pumpami nebo čerpadly. Čerpacími stanicemi jsou pak objekty s příslušnou technologií vč. nejdůležitějšího prvku – čerpadla. Součástí každé čerpací stanice jsou trubky, tvarovky, armatury a již zmiňovaná čerpadla, která mohou mít různá uspořádání zapojení (paralelní, sériová). Základní druhy čerpadel lze rozlišit podle konstrukce a to na:

- čerpadla točivá – odstředivá, šikmotoká, vrtulová;
- čerpadla rotační objemová – šroubová, s uzubenými koly, křídlová;
- čerpadla s kmitavým pohybem – pístová, plunžerová, membránová;
- čerpadla proudová – ejektory, injektory;
- čerpadla pneumatická – mamutová, monžíky, pulzometry.

Dále se čerpadla rozlišují podle polohy hřídele, pohonu, dosažení pracovního přetlaku, počtu oběžných kol a v neposlední řadě podle použití. Pro vodárenské účely v rámci čerpacích stanic jsou nejvíce využívána čerpadla odstředivá. [3]

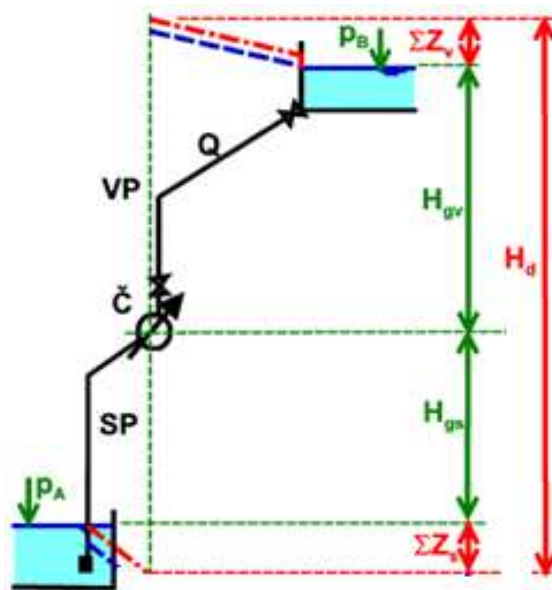


Obr. 1.6 Čerpadla vhodná pro vodárenské účely [11]

Dopravní výška čerpadla

Stanovení velikosti dopravní výšky je patrné z obrázku (Obr. 1.7), platí zde vztah pro výpočet dopravní výšky:

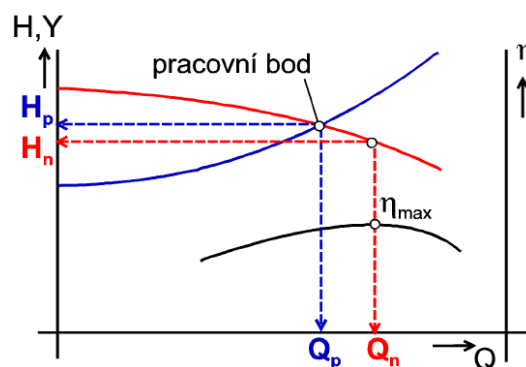
$H_D = H_{GV} + \Sigma Z_V + H_{GS} + \Sigma Z_S$, kde H_D charakterizuje celkovou dopravní výšku potřebnou k překonání z nižšího místa na místo vyšší. H_{GS} je geodetický rozdíl hladiny sací jímky (p_A je atmosférický tlak v sací jímce) a čerpadla. H_{GV} je geodetický rozdíl čerpadla a hladiny jímky, kam je voda čerpána (p_B je atmosférický tlak v horní jímce). ΣZ_V je suma ztrát místních a třecích na výtlačném potrubí. ΣZ_S je suma ztrát místních a třecích na sacím potrubí. SP je sací potrubí, VP je výtlačné potrubí, \check{C} je čerpadlo a Q je objemový průtok vody. [18]



Obr. 1.7 Dopravní výška čerpadla [18]

Pracovní bod čerpadla

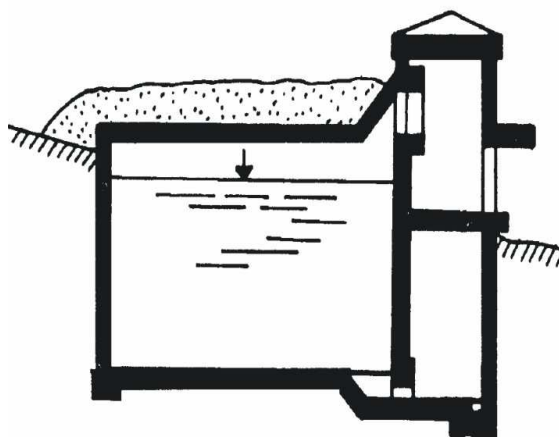
Pracovním bodem čerpadla (Obr. 1.8) je označován průsečík charakteristiky potrubí (modrá křivka – stoupající) a charakteristiky čerpadla (červená křivka – klesající). Graf pracovního bodu udává závislost průtoku – Q a dopravní výšky – H , nebo měrné energie – Y . Snahou každého návrhu čerpadla je optimalizovat pracovní bod tak, aby byla zajištěna pokud možno maximální účinnost - η čerpadla. Charakteristika potrubí se spočítá na základně znalosti topologie vodovodní sítě, charakteristiku čerpadla zajistí výrobce čerpadla spolu s křivkou účinnosti. Další nedílnou součástí optimálního návrhu čerpadla je, aby výrobce dodal křivku příkonu (závislost průtoku na příkonu) a tzv. kavitační charakteristiku neboli NPSH charakteristiku (net pressure suction head). [18]



Obr. 1.8 Pracovní bod čerpadla [18]

1.1.5 Akumulace vody na vodovodní síti

Objekty, v nichž pro vodárenské účely dochází k akumulaci vody, jsou nejčastěji vodojemy, které jsou podle základního výškového kritéria děleny na vodojemy zemní a věžové. Dalším typem rozdělení je dělení podle účelu (zásobní, hlavní, přerušovací, vyrovnávací, požární) nebo také podle umístění vůči spotřebišti (před spotřebištem, za spotřebištem, ve spotřebišti nebo kombinace poloh). Základní funkcí vodojemu je funkce zásobní (zajištění dostatečného množství vody), kontaktní funkce (místo, kde se chlóruje) a funkce tlaková (zajištění dostatečného tlaku ve spotřebišti). Dalšími důležitými objekty pro vytváření zásoby vody jsou sací jímky čerpadel, vyrovnávací nádrže, zavodňovací nádrže apod. [3]

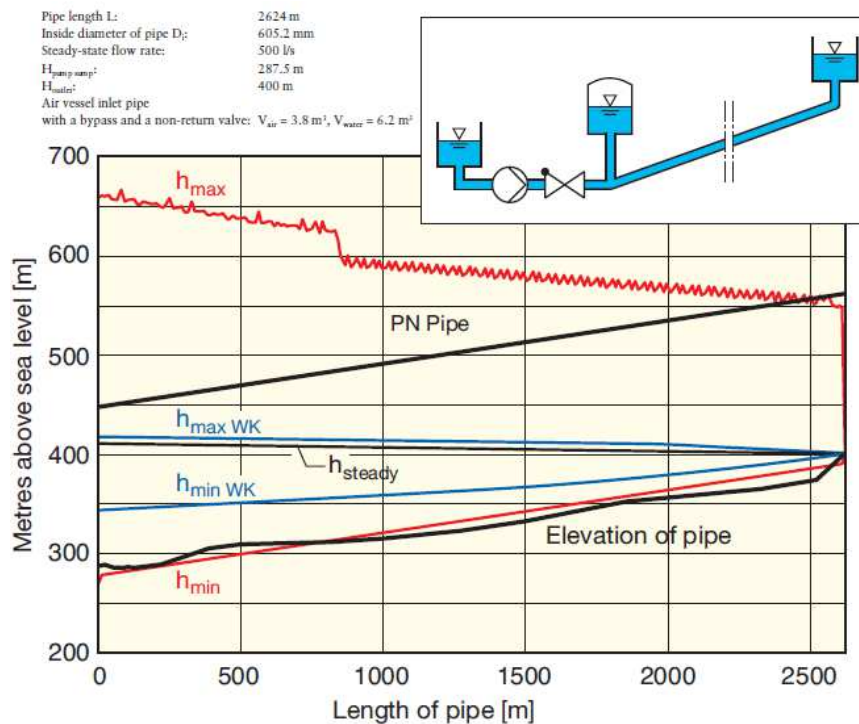


Obr. 1.9 Zemní vodojem [12]

1.2 Úvod do problematiky vodního rázu

1.2.1 Vodní ráz

Jev označovaný pojmem *vodní ráz* představuje jedno z mnoha úskalí nejenom vodárenských společností, ale i těžby a úpravy surovin, energetiky, průmyslové chemie, transportu ropných produktů, dávkování kapalin, strojírenství, medicíny apod. V oboru vodního hospodářství tento jev poté představuje nejčastěji problémy na všech kategoriích potrubí. Od příváděcích řadů po přípojky, dále i vnitřní instalace budov. Otázka vodních rázů je řešena rovněž i v oboru hydroenergetiky nebo krajinného inženýrství v rámci zavlažovacích systémů. Vodní rázy, neboli hydraulické a tlakové rázy jsou definovány jako neustálené proudění stlačitelné kapaliny, čili proudění, které se mění s časem. Tento jev je vyvolán při náhlé změně rychlosti ve vodovodní síti, ta zapříčí prudkou změnu tlaku, která se v potrubí pohybuje rychlostí zvuku. Tato změna rychlosti v potrubí může nastat při náhlém uzavření nebo otevření vodovodního potrubí uzavírací armaturou (uzavírací a zpětná klapka, šoupátko, apod.), výpadkem nebo najetím čerpadla, špatným výběrem čerpadla, náhlými změny směru, chemickými reakcemi a tepelnými změnami, mechanickými a dynamickými vibracemi a jinými příčinami. Na obrázku (Obr. 1.10) je vývoj tlakového rázu znázorněn na obdobném příkladu (výpadek čerpadla), jako je řešen v experimentální části diplomové práce. Křivka h_{steady} představuje tlakovou výšku při ustáleném proudění. *Elevation of pipe* je prvek (vodovodní řad), který spojuje dolní a horní nádrž. *PN Pipe* je maximální hodnota přetlaku potrubí, na který je potrubí navrženo. Křivky h_{max} a h_{min} (křivky červené barvy) představují obalovou oblast vnitřních přetlaků a podtlaků. Z obrázku je patrné, že při variantě vodovodního řadu bez větrníku by téměř v celé délce trasy potrubí střídavě docházelo k nebezpečným přetlakům i podtlakům. Naproti tomu z případu, kdy byl v rámci modelu instalován větrník s příslušnými prostory pro objem vzduchu a vody vyplývá, že by bylo potrubí bezpečně chráněno vůči vznikajícímu vodnímu rázu. To představuje $h_{max\ WK}$ a $h_{min\ WK}$ (modrá křivka). [11,16,17]



Obr. 1.10 Vývoj tlakového rázu [11]

Je zřejmé, že vodní rázy způsobují nemalé potíže vodárenským společnostem, jednak technické, ale i ekonomické. Tuto problematiku je třeba podchytit už na počátku návrhu jakéhokoli systému, protože opatření vedoucí k prevenci této (jakožto i jakékoli jiné problematiky), jsou mnohem méně technicky a ekonomicky náročná, než opatření, která řeší již vzniklý havarijní stav nebo jiné technicky nezpůsobitelné stavy. Vodní ráz nemusí svým účinkem zcela zničit potrubí, ale může zapříčinit popraskání potrubí nebo uvolnit spoje potrubí, což poté může vést k dlouhotrvajícím ztrátám vody. [11]

1.2.2 Historický vývoj přístupu k vodním rázům vs. současný stav

Z historického hlediska se na vymezení teoretických základů problematiky vodních rázů významně podílel Thomas Young (začátek 18. století), ten však v rámci své studie nezcela objasnil rychlost šíření vodního rázu. Poté se problematice významněji věnovali němečtí bratři Wéberové (polovina 19. století). Nikolai Jegorovič Žukovskij (přelom 19. a 20. století) však předložil první ucelenou terminologickou formu, kterou doložil v rámci několika experimentů na vodárenské

soustavě pitné vody v Moskvě. V tomto měření testoval vodní rázy na různě dlouhých úsecích při různých průměrech potrubí. Jeho výsledky experimentů a teoretických studií poté publikoval v roce 1898. Žukovského rovnice, která je popisována jako změna tlaku, která je zapříčiněna okamžitou změnou rychlosti, se počítá následovně:

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v,$$

Δp – změna tlaku v potrubí ($\text{Pa} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
 ρ – objemová hmotnost vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 a – rychlost šíření rázové vlny ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 Δv – změna velikosti rychlosti ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) [11]

Dalšími autory, kteří se věnovali této problematice, jsou například Alliévy, Bergéron, Parmakian [16], dále pak autoři podílející se na literatuře v rámci [22,23]. U nás se vodním rázům věnovali např. Haindl, Lang, Nechleba, Pavluch, Seidl. [16]

Výpočet průběhu vodních rázů probíhal dříve pomocí graficko-analytických metod, které byly však velmi časově náročné a poměrně nepřesné. S rozvojem výpočetní techniky v 80. letech 20. století se vodní rázy začaly řešit různými sofistikovanými programy, mezi ně patří: FLOWMASTER, HYPRESS, WANDA, „ZÁRUBA“, DYNISIP [16], dále pak SIMULINK, InfoSurge, VODRAZ, a jiné.

1.2.3 Matematický popis vodního rázu

Pro výpočet vodního rázu se kapalina uvažuje jako stačitelné médium a stěna potrubí se může pružně deformovat. Základními řídicími rovnicemi jsou rovnice pohybová a rovnice kontinuity. Rovnice pohybová vyjadřuje princip zachování hybnosti. Rovnice kontinuity vyjadřuje princip zachování hmotnosti. Pro tyto dvě rovnice jsou neznámými rychlost a poloha tlakové čáry velikosti těchto veličin se mění po uražené dráze x a uplynulém čase t .

Rovnice pohybová:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + g \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda \cdot v |v|}{2 \cdot D} = 0,$$

v – průřezová rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 H – poloha tlakové čáry (m)
 D – vnitřní průměr potrubí (m)

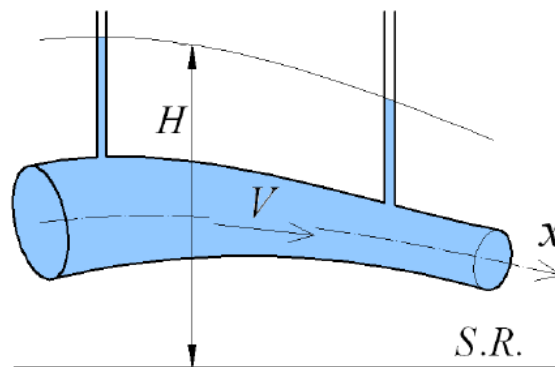
λ – součinitel ztrát třením (-)

Rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad a - \text{rychlost šíření rázové vlny (m.s}^{-1}\text{)}$$

Pro rychle se měnící proudění platí tyto rovnice za následujících podmínek:

- střední průřezová rychlost v je vztažena pro celý profil potrubí
- průtočné médium je stlačitelné, to je dáno objemovým modulem K ,
- rychlost šíření rázové vlny je a
- stěny potrubí se pružně deformují podle Hookova zákona
- tlakové síly jsou počítány podle zákonů hydrostatiky
- tření ve výpočtu může být zjednodušeno podle výpočtu pro ustálené proudění a být tak uvažováno podle Darcy-Weisbacha [18,24]



Obr. 1.11 Matematický popis vodního rázu [18]

1.2.4 Vymezení základních pojmů a popis vodního rázu

Rázová perioda – μ

Je doba, za kterou dojde od vzniku rázové vlny k jejímu odrazu a návratu zpět na zdroj vyvolaného rázu.

$$\mu = \frac{2L}{a}, \quad L - \text{délka potrubí (m)}$$

$a - \text{rychlost šíření rázové vlny (m.s}^{-1}\text{)}$

Manipulační doba uzávěru – Tu

Je doba, která představuje dobu uzavírání uzavíracích armatur, přičemž vliv na vodní rázy hraje prakticky největší roli v oblasti této problematiky. Jednotkou manipulační doby jsou sekundy.

Rychlost šíření rázové vlny – a

Rychlost šíření rázové vlny je závislá na druhu média a materiálu potrubí. Ve vodovodním potrubí rychlost rázové vlny postupuje rychlostí zvuku. Pro tenkostěnná potrubí jsou stanoveny orientační hodnoty rychlosti šíření rázových vln (Tab. 1.2), nebo lze použít uvedený vztah:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot e}}}, \quad K - \text{modul objemové pružnosti kapaliny (Pa)}$$

E – Youngův modul pružnosti materiál (Pa)

ρ – objemová hmotnost kapaliny ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

d – průměr potrubí (m)

e – tloušťka stěny potrubí (m)

V praxi to znamená, že na potrubí, které je jeden kilometr dlouhé a bylo postaveno z litiny, představuje rázová perioda pouhé necelé dvě sekundy.

Tab. 1.2 Příkladů orientačních hodnot rychlosti zvuku pro jednotlivá potrubí [16]

Potrubní materiál	a (m/s)
Ocelové bezešvé	1250
Ocelové svařované	1150
Litinové	1100
PVC	450
PE	280

Přímý ráz

Nastává, je-li $\mu < Tu$. To představuje vznik vysokých hodnot rázových výšek a nemalé riziko ohrožení spolehlivosti potrubí. V praxi je snaha převést přímý ráz na nepřímý ráz nebo zvolit vhodnou ochranu způsobenou rázy. Obrázek (Obr. 1.13) ukazuje vliv na velikost vodního rázu.

Nepřímý ráz

Nastává, je-li $\mu > Tu$. To představuje citlivou manipulaci s uzavěry vodovodních potrubí, pomalých náběhu a doběhu čerpadel apod. Obrázek (Obr. 1.13) ukazuje vliv na velikost vodního rázu.

Rázová výška – ΔH

Je výsledná veličina charakterizující velikost vodního rázu. Rázovou výšku vyvolá náhlá změna rychlosti, ta představuje okamžitou změnu tlaku, který vede k vyvolání rázové výšky určité velikosti, která je závislá především na velikosti změny počáteční a koncové rychlosti a době, za kterou k tomuto jevu došlo. Pro přímý ráz podle Žukovského platí, že:

$$\pm \Delta H = \pm \frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{a \Delta v}{g},$$

ΔH – velikost rázové výšky (m)

ΔP – změna velikosti tlaku (Pa)

ρ – objemová hmotnost vody (kg.m^{-3})

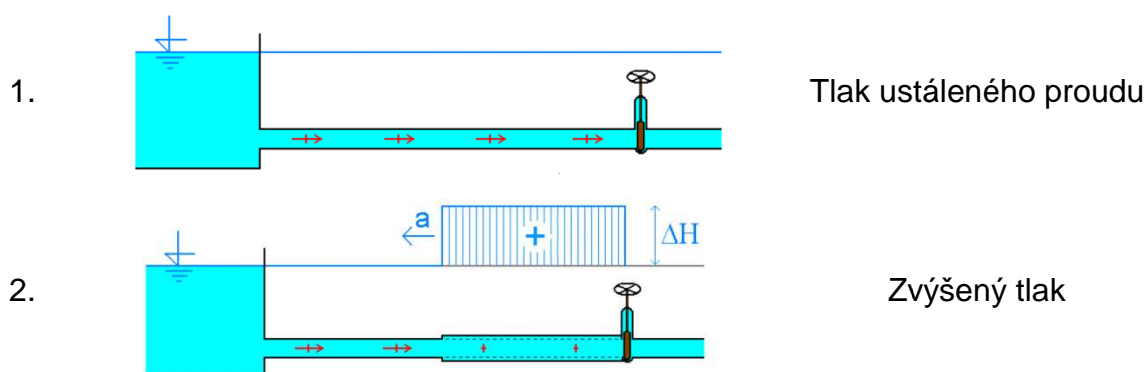
g – tíhové zrychlení země (m.s^{-2})

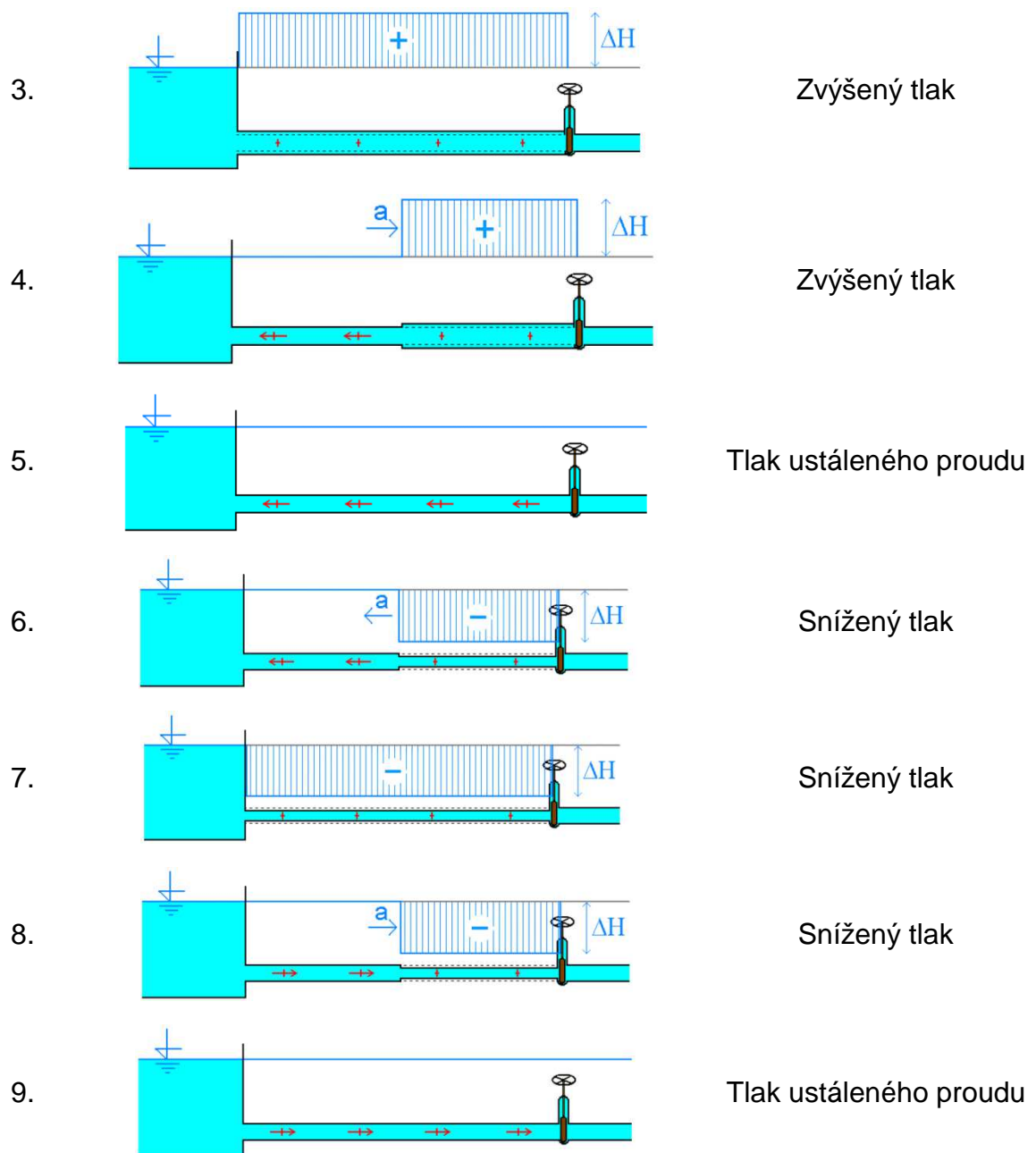
a – rychlost šíření rázové vlny (m.s^{-1})

Δv – změna velikosti rychlosti (m.s^{-1})

Popis průběhu vodního rázu

Popis jevu hydraulického rázu je popsán u hydraulického systému s vodní nádrží a uzavírací armaturou, který je spojen vodovodním potrubím a znázorněn na obrázku (Obr. 1.12).





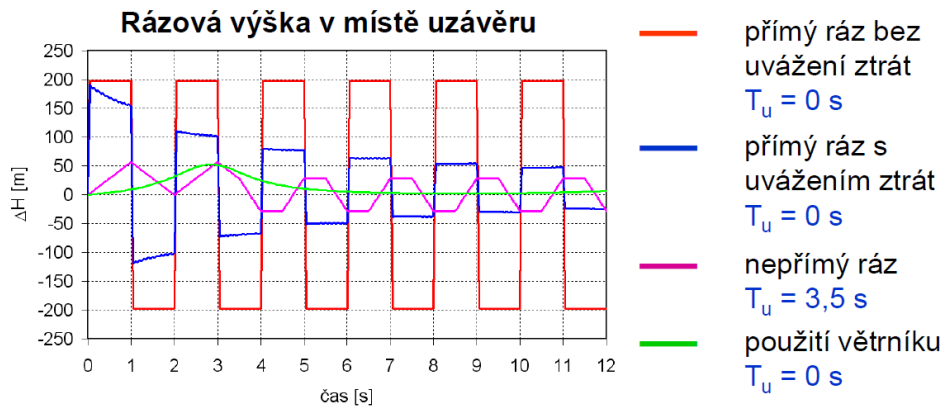
Obr. 1.12 Průběh vodního rázu [18]

1. v této fázi odpovídá čas $t = 0\mu$, dochází k uzavření potrubí uzavírací armaturou, do této doby voda proudí z nádrže k uzávěru, tlaková čára je dána výškou hladiny v nádrži. Začátek aktivního rázu.

2. čas $t = 1/4\mu$, po uzavření potrubí se začne zvyšovat tlak směrem proti proudu a šíří se rychlostí zvuku, rychlost proudící vody v místě přetlaku je rovna nule. Voda je stlačována, potrubí se začne roztahovat.

3. čas $t = 1/2\mu$, tlaková vlna dorazila k nádrži rychlostí zvuku. V celém potrubí je zvýšený tlak, proud vody se zastavil. Potrubí je po celé své délce roztahováno.
4. čas $t = 3/4\mu$, dochází k odrazení tlakové vlny, vodní ráz putuje zpět k uzávěru, voda začne nádrž napouštět svou počáteční rychlostí proudění, tlak v potrubí se postupně zmenšuje a tím se vrací do svého původního stavu – vyfukuje se.
5. čas $t = 1\mu$, rázová vlna dorazila k uzávěru, tlak potrubí odpovídá ustálenému stavu a odpovídá hladině v horní nádrži, voda se v celém rozsahu potrubí pohybuje směrem k nádrži. Dojde k negativnímu rázu.
6. čas $t = 5/4\mu$, došlo k odrazu tlakové vlny od uzávěru, vzhledem k tomu, že voda proudí ve směru nádrže a rázová vlna putuje ve stejném směru, dochází ke snížení tlaku, čili podtlaku. Proudící voda za hranicí tlakového rázu má nulovou rychlost, dochází k jejímu rozpínání a potrubí je stlačováno.
7. čas $t = 3/2\mu$, tlakový ráz doputoval k nádrži s vodou, po celém potrubí je snížený tlak a proudící voda se zastavila.
8. čas $t = 7/4\mu$, opět došlo k odrazu tlakové vlny, směr proudění vody je orientován k uzávěru, tlak vody v potrubí se začne postupně zmenšovat, tvar potrubí se vrací do původního stavu.
9. čas $t = 2\mu$, rázová vlna doputovala k uzávěru, tlak vody odpovídá hladině vody v nádrži, proud vody v celé délce potrubí směřuje k uzávěru. [18]

V případě, že vliv energetických ztrát (ztráty třením, ztráty místní) v potrubí bude zanedbán, se pohyb vody netlumeně opakuje do nekonečna. To je patrné na grafu (Obr. 1.13). Při uvážení vlivu ztrát, je z grafu (Obr. 1.13) patrné, že pohyb tlakové vlny je tlumený a s určitým časovým odstupem se tlak v potrubí vyrovná svému tlaku počátečnímu. V případě nepřímého rázu je zřejmé, že nárůst tlakové vlny zdaleka nedosáhne takových hodnot jako v případě rázu přímého. V případě použití vhodného opatření pro tlumení tlakových rázů je patrné, že velikost rázové vlny je zmenšena na požadované maximum tlakového rázu, a tím zajištěna větší míra spolehlivosti vodovodní sítě. [18]



Obr. 1.13 Typy vodních rázu [18]

Přetlak a podtlak ve vodovodním potrubí

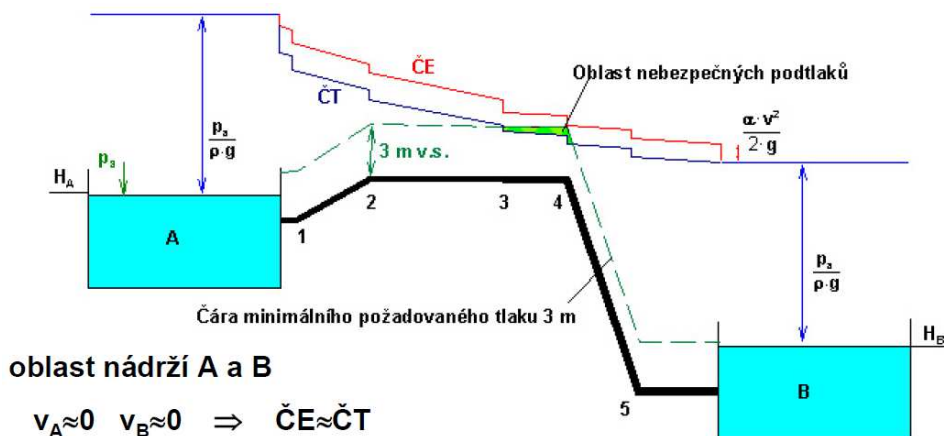
Pro posouzení výskytu přetlaku nebo podtlaku ve vodovodním potrubí je na místě rozlišit dva přístupy. Prvním je posuzování v tlacích absolutních (Obr. 1.14), absolutní tlak je vztažen k nulovému - prázdnému tlaku, čili vakuu.

Přetlak v potrubí nastává při $\frac{P}{\rho g} > 10$ mv. sl.

Podtlak v potrubí nastává při $\frac{P}{\rho g} < 10$ mv. sl.

Teoretické minimum (vakuum) $\frac{P_{\min}}{\rho g} = 0$ mv. sl.

Požadované minimum $\frac{P}{\rho g} > 2 \div 4$ mv. sl.



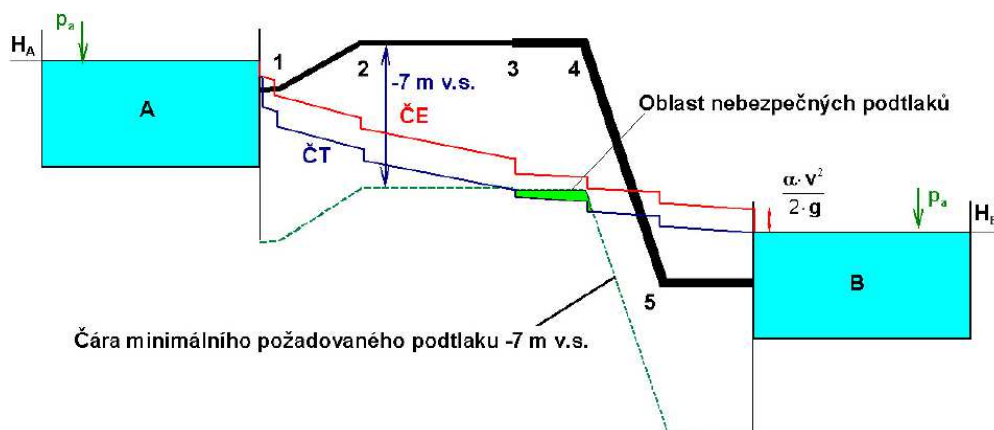
Obr. 1.14 Posouzení tlakových poměrů v absolutních tlacích [20]

Druhým případem je posuzování v tlacích absolutních, čili relativní tlak je posuzován vzhledem k atmosférickému tlaku.

Přetlak v potrubí nastává při $\frac{P}{\rho g} > 0 \text{ mv. sl.}$

Podtlak v potrubí nastává při $\frac{P}{\rho g} < 0 \text{ mv. sl.}$

Požadované minimum $\frac{P}{\rho g} > 6 \div 8 \text{ mv. sl.}$



Obr. 1.15 Posouzení tlakových poměrů v relativních tlacích [20]

Přetlak v potrubí se stává nebezpečným tehdy, je-li překročena jeho hodnota vůči návrhovému PN potrubí. Na potrubí poté dochází k jeho roztržení, prasklínkám, k vychýlení spojů, rozevření hrdel, ale také poničení nebo úplnému zničení čerpadel, armatur, tvarovek, kotevních bloků, apod. K opačnému případu výskytu podtlaku nastává, je-li překročena hranice požadovaného minima tlaku na potrubí, kde může dojít k prohnutí – smrštění potrubí, narušení vnitřní izolace potrubí (cementová vystýlka), vniknutí nežádoucích látek (odpadní voda, balastní voda, a jiné) do pitné vody, odtržení vodního sloupce, kavitaci, apod. [11,16,20]

Pokud se jedná o potrubí, která dlouhodobě podléhají vnitřní a vnější korozi, poté pevnostní charakter stěny potrubí klesá. Obecně lze říci, že čím starší potrubí je, tím vyšší je riziko ohrožení jeho pevnosti. U potrubí je všeobecně třeba dodržovat správné skladování, ukládání a montáž – v případě nedodržení životnost trubek klesá. U ocelového tenkostěnného potrubí s DN700 a větším mohou vzniklé podtlaky vést především ke ztrátě tvarové stability. [11]

Veškeré výstupy experimentální části diplomové práce jsou uváděny v tlacích relativních.

Pohyb vody setrvačností

Jedním z případů vzniku vodního rázu je situace při náhlém výpadku čerpadla, kde se voda vlivem setrvačných sil pohybuje od dolní nádrže směrem k horní nádrži, kam je čerpána. V okamžiku, kdy jsou síly setrvačné překonány silami gravitačními, dochází ke zpětnému proudu, jemuž je bráněno zpětnými klapkami, poté dochází k charakteristickému prásknutí. Ve chvíli, kdy dojde k prásknutí zpětnou klapkou nebo zpětnými klapkami, nastává přímý vodní ráz. V první fázi pohybu vody k horní nádrži nastává prudké snížení tlaku, postupně se voda zastaví, následně putuje nazpět a vyvolá pozitivní rázovou vlnu. [3]

Výrazné ovlivnění pohybu vody svou setrvačností má na svědomí doba doběhu čerpacího ústrojí při výpadku čerpadel. Čím delší je doba doběhu čerpadel, tím menší tlakový rozruch vyvolá výpadek těchto čerpadel. Výpočet doby doběhu čerpadel je dán momentem setrvačnosti oběžného kola, účinností čerpadla, topologií sítě a aktuálním čerpaným množstvím.

$$\Delta t = \frac{(2\pi \cdot n)^2 \cdot \frac{m \cdot r^2}{2} \cdot \eta}{\rho \cdot g \cdot h \cdot Q}$$

Δt – doba doběhu čerpadla (s)

n – aktuální počet otáček (ot/s)

m – hmotnost oběžného kola (kg)

r – poloměr oběžného kola (m)

η – účinnost čerpadla v dopravním bodě (-)

ρ – objemová hmotnost vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

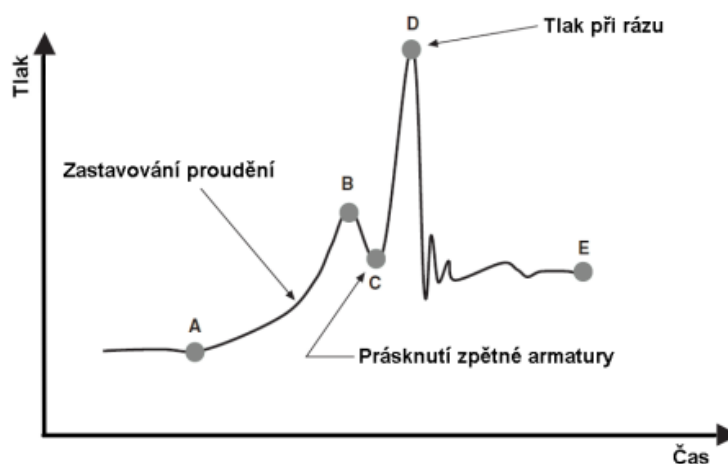
g – tíhové zrychlení země ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

h – statický rozdíl hladin (m)

Q – aktuální objemový průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

Charakteristický průběh pohybu proudící vody je zobrazen na grafu (Obr. 1.16). Bod A odpovídá tlaku vody v nádrži, kam je voda čerpána, mezi body AB dochází k zastavování proudění (voda stále vlivem setrvačnosti proudí ve směru tlakové čáry), mezi body BC tlak poklesne a následně dojde k prásknutí zpětné klapky v místě C, následně přichází prudký nárůst tlaku (pozitivní tlakový

ráz), nakonec dochází ke střídání pozitivních tlakových rázů a negativní tlakových rázů a po určité době nastane ustálený stav tlaku. [39]



Obr. 1.16 Průběh tlaku za zpětnou armaturou [27]

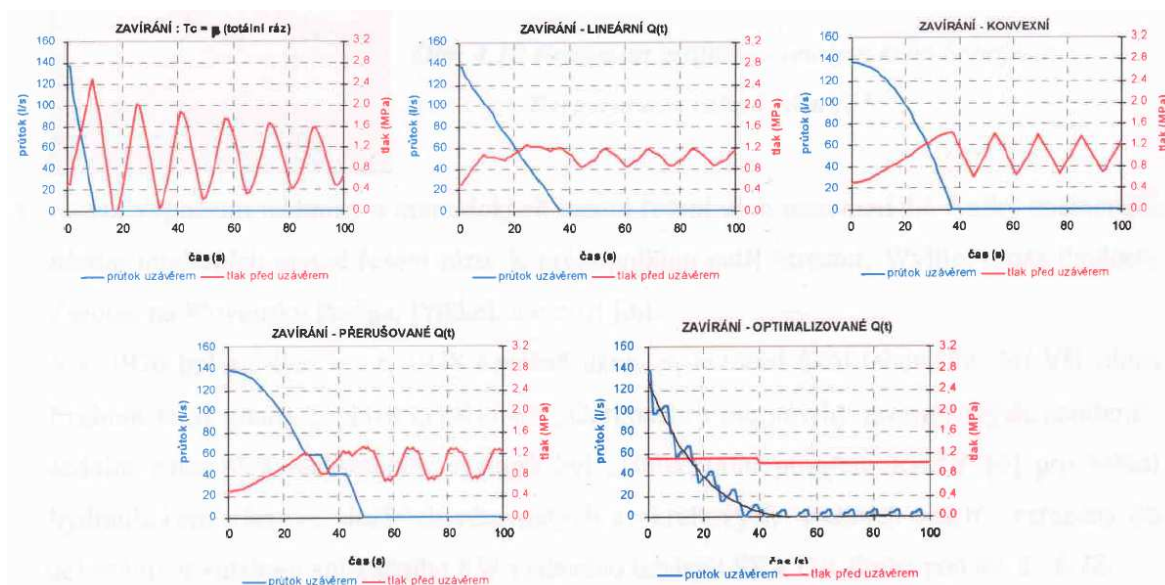
Kavitace

Kavitace je jev, při kterém drobné bublinky plynu ve vodovodním potrubí mohou nepříznivě působit na celou vodovodní síť (trubky, armatury, tvarovky). Tento jev vzniká při odpařování kapaliny, následně dochází ke kondenzaci kapaliny. Ve vodárenství se lze s kavitací setkat při dosažení hodnoty tlaku úrovně nasycených vodních par. Zánik těchto bublinek plynu nastává tehdy, je-li tato hodnota opět překročena na svoji původní hodnotu. Při kavitaci dochází k implozi vzduchových dutinek a následně k místnímu zvýšení tlaku, což má za důsledek vyvolání vodního rázu. K vytvoření kavitace jsou důležité tyto faktory: pokles tlaku pod úroveň tlaku nasycených vodních par a zvýšení tlaku k následné implozi bublinek. Nejvíce ohroženými úseky na vodovodní síti jsou místa s vysokými rychlostmi, kde dochází k velké turbulenci proudu, nebo místa, kde hrozí odtržení vodního sloupce. V případě vzniku kavitace je tento jev provázen vibracemi, hlukem, tlakovými pulzacemi, destrukcí obtékaného povrchu, ztrátou účinnosti jednotlivých zařízení. Pokud je to možné, je žádoucí se kavitací vyvarovat vhodnou manipulací s uzávěry, vhodným výběrem technologického zařízení, uspořádáním sítě, tlakové třídy potrubí, ochranou výtlačných řadů apod. [26]

1.2.5 Vhodná opatření pro utlumení vodního rázu

Ochranu vodovodního potrubí proti vodním rázům je třeba řešit v jednotlivých případech individuálně, s ohledem na investiční a provozní náklady. Výjimkou nebývají kombinace jednotlivých přístupů k ochraně potrubí. Manipulace s uzavíracími armaturami by měla probíhat s ohledem na riziko vzniku vodních rázu a to tak, aby došlo k řízenému otevírání a uzavírání průtoku. Samozřejmostí je dostatečná znalost topologie vodovodní sítě, průtokových a tlakových poměrů.

Na grafech (Obr. 1.17) je znázorněn vliv uzavírání regulačního uzávěru na tlak v potrubí. Z těchto grafů je patrné, že při prudkém uzavření potrubí nastává prudká změna tlaku. Naopak s šetrnějším přístupem uzavírání průtoku vody vodovodního potrubí se nárůst tlaku snižuje. Na pravém dolním grafu (Obr. 1.17) dochází k uzavírání optimalizovanému, které zajistí prakticky ustálený stav tlaku. Je však třeba dodat, že doba uzavírání se tak několikanásobně prodlouží, což může být předmět další diskuze. [3]



Obr. 1.17 Příklady vlivu průběhu průtoku a tlaku v čase [16]

Zpětné armatury

Zpětné armatury nelze zařadit přímo mezi opatření vedoucí k zamezení vodních rázů, ale při vhodném výběru těchto technologických zařízení lze velmi účinně vodnímu rázu zabránit, nebo alespoň zmírnit jeho velikost.

Zpětné armatury jsou nedílnou součástí každého výtlačného systému a některých typů ochran vodovodních řadů. Nacházejí se v těsné blízkosti čerpadel na straně výtlačného potrubí, nebo bývají umístěné v rámci protirázové ochrany s tlakovými nádobami nebo zavodňovacími nádržemi. Pomocí zpětných armatur jsou chráněny čerpadla a dochází k zamezení výtoku vody z potrubí. Samotné uzavírání těchto armatur je doprovázeno typickým prasknutím. Pro vodárenské účely jsou nejčastěji používána přírubová a mezi přírubová spojení, ale používají se také závitové spoje pro menší průměry. Sortiment zpětných armatur je široký, z nichž nejčastější jsou: zpětné ventily (axiální, s koulí), zpětné klapky (prosté, s protizávažím, s dvojitým diskem, se šikmým sedlem) a ostatní (membránové, zpětný ventil – duckbill). Pro vhodný výběr je třeba uvážit jednotlivé aspekty daných armatur – dynamické chování jednotlivých armatur je znázorněno v grafu (Obr. 1.19). Prakticky bez praskání jsou zpětné axiální ventily, silné praskání se objevuje u zpětných ventilů s koulí nebo prostých zpětných klapek. Důležitým faktorem pro správný výběr těchto armatur je poté stupeň otevření a velikost tlakové ztráty, těsnost armatury, hlučnost, maximální přípustná rychlost zpětného proudění, přípustnost tlakových rázů, údržba a v neposlední řadě pořizovací náklady. [27,28]

Rychlost zpětného proudění lze vypočítat z Žukovského rovnice:

$$\Delta v = \frac{\Delta p}{\rho a};$$

zpomalení lze zjednodušeně získat při uvažování nestlačitelné kapaliny a bez vlivu tření a setrvačnosti čerpadla jako:

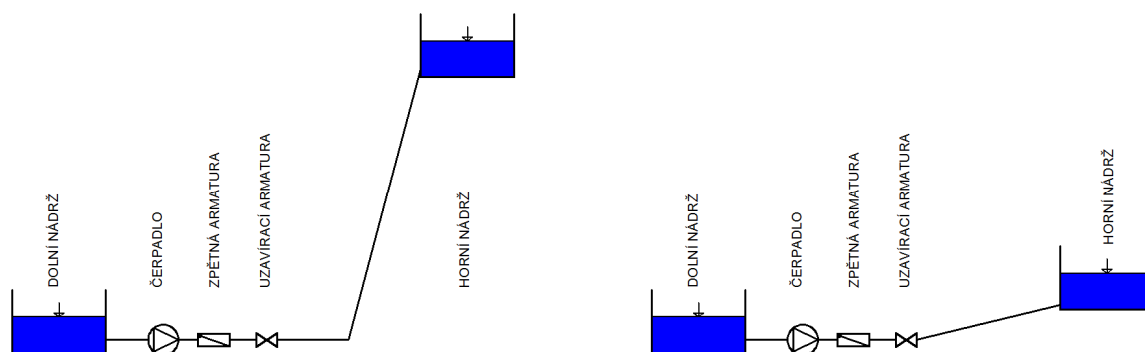
$$dv/dt = \frac{gH}{L}, \quad dv/dt - \text{zpomalení (proudové zpoždění) (m.s}^{-2}\text{)}$$

$$g - \text{tíhové zrychlení země (m.s}^{-2}\text{)}$$

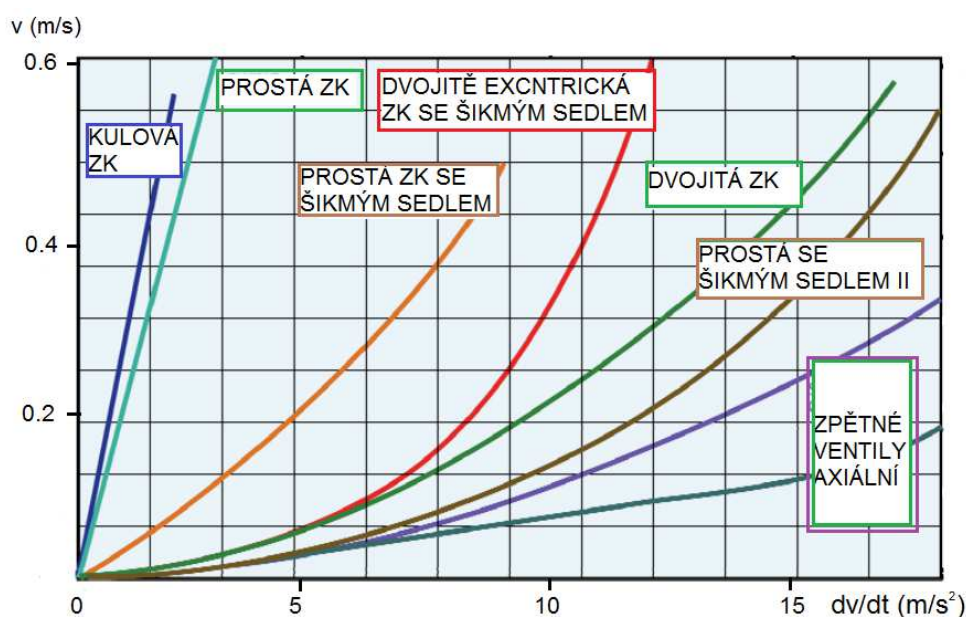
$$H - \text{rozdíl výšek hladin horní a dolní nádrže (m)}$$

$$L - \text{vzdálenost mezi nádržemi (m)}.$$

Hodnota proudového zpomalení je závislá na sklonu čáry tlaku, pro ilustraci je uvedeno schéma (Obr. 1.18), které představuje dva rozdílné systémy. V případě obrázku vlevo by došlo k mnohem většímu proudovému zpomalení (za předpokladu stejně dlouhého potrubí), protože hodnota $\frac{gH}{L}$ by byla větší, než tato hodnota u obrázku vpravo.



Obr. 1.18 Vliv schéma čerpání na velikost proudového zpomalení [35]



Obr. 1.19 Dynamická charakteristika zpětných armatur [27]

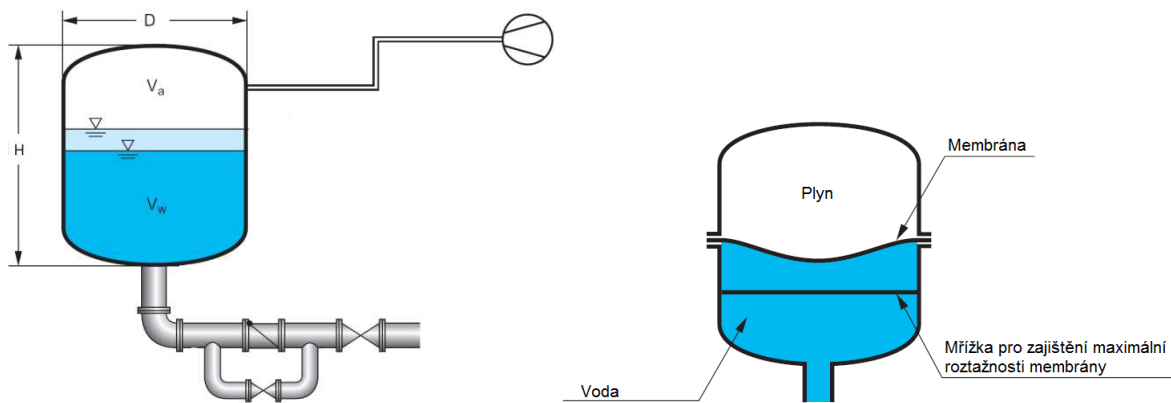
Z následujícího grafu (Obr. 1.19) lze vysledovat přímou závislost rychlosti zpětného proudění - v těsně před uzavřením armatury, čili velikost rázové vlny vypočítané ze Žukovského vztahu pro přímý ráz. Obecně však lze konstatovat, že čím menší rychlosti zpětného proudu pro dané hodnoty proudového zpomalení zpětný uzávěr udává, tím je jeho koeficient místní ztráty ξ vyšší. Proto je třeba problematiku navrhování a posuzování hydraulických systémů provádět komplexně. V rámci redukování vodních rázů se projektant hydraulického systému v oblasti zpětných armatur soustředí na návrh těchto armatur tak, aby:

- došlo k uzavření armatury v čase nulového průtoku a tím se zamezilo zpětnému nežádoucímu proudění směrem k čerpadlům;
- byl doložen technický list uvažovaného typu zpětné armatury, v ideálním případě aby byla dodána dynamická charakteristika zpětné armatury, uzavírací časy, potřebná rychlost k úplnému otevření, ztrátový koeficient v závislosti na úhlu otevření klapky, obecný a montážní návod.

Rychlost zpětného proudu je přímo závislá na dráze, kterou musí zpětná armatura urazit. To znamená, že umožňuje-li zpětná armatura úhel otevření 90°, doba uzavření a uražení vzdálenosti bude výrazně vyšší, než u armatur s maximálním úhlem otevření např. 60°. S ohledem na velikost úhlu otevření zpětné armatury dále úzce souvisí místní ztráty, proto je třeba opět problematiku návrhu zpětné armatury řešit komplexně. Velmi důležitým bodem v oblasti návrhu zpětných armatur a posouzení jejich vlivu nejen na velikost vodních rázu, ale i ekonomickou stránku věci co do provozování distribuce vody, je ověření, zdali bude zpětná armatura při provozu plně otevřena. Výrobce by měl doložit křivku se závislostí úhlu otevření armatury pro dané rychlosti proudění či tlaku. [35,36]

Větrník

Použití tohoto prvku je ve vodárenství velmi rozšířené, disponuje dobrou účinností a provozní spolehlivostí. Pořizovací náklady na tuto technologii jsou jak po stavební i technologické stránce přijatelné. Jedná se o tlakovou nádobu, která je schopna zachytit jednak vzniklé podtlaky, tak i přetlaky. Tlaková nádoba se skládá ze dvou komor. Vrchní část tvoří vzduchový prostor, spodní část prostor vyplněný vodou. V případě poklesu tlaku dojde ke snížení objemu vody v tlakové nádobě, naopak při nárůstu tlaku dojde ke stlačení vzduchového prostoru. Větrníky jsou rozlišovány na dva typy: tlakové nádoby s kompresorem a membránové tlakové nádoby. Na obrázku vlevo (Obr. 1.20) je tlaková nádoba s kompresorem, kde D je průměr větrníku, H je výška větrníku, V_a je objem vzduchu a V_b je objem vody ve větrníku. Čím je potrubí delší a průtočné množství větší, tím jsou i tlakové nádoby větší, což tvoří omezení v oblasti použití. [3,11]



Obr. 1.20 Tlaková nádoba s kompresorem (vlevo), s membránou (vpravo) [11]

Zavodňovací nádrže

Popisu a funkci zavodňovací nádrže je věnován prostor v rámci experimentální části práce (součást kapitoly 2.1.3). Nevýhodou zavodňovací nádrže je, že není schopna zachytit vzniklé přetlaky při vodním rázu v potrubí.

Automatické od / zavzdušňovací ventily

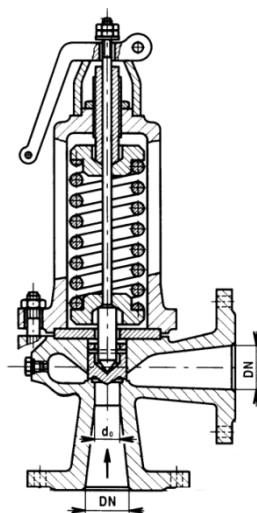
Jedná se armatury velmi využívané ve vodárenství. Jejich základní funkcí je při určitém zvýšeném tlaku odvést (odfouknout) určité množství vzduchu tak, aby nedocházelo k nedovolenému překročení tlaku. Nebo naopak při poklesu tlaku přivést (přifouknout) určité množství vzduchu tak, aby nedošlo k nebezpečným podtlakům. Běžně se vzdušníky umísťují na lokálních vrcholech vodovodního potrubí, ale využity mohou být i při ochraně výtlačných řadů v rámci protirázové ochrany. Tyto ventily jsou samočinné zařízení a lze rozlišovat tyto druhy: ventily s plovákem, talířové ventily zatěžované pružinou a řízené pístové ventily. Ventily s plovákem jsou vhodné pro zavzdušňování a odvzdušňování při napouštění a vypouštění potrubí, při běžném provozu nebo při náhlých změnách směru průtoku za předpokladu, že množství vzduchu, které bude přiváděno, nebude nabývat velkých objemů. Ventily s pružinou se více hodí pro zavzdušnění potrubí většími objemy vzduchu a ventily řízené se navrhuje pro odfouknutí většího objemu vzduchu pro mohutnější vodovodní potrubí. Pro návrh velikosti vzdušníku může být využito nomogramů, kde podle maximálního požadovaného průtoku lze vybrat požadovanou velikost odvzdušňovacího resp. zavzdušňovacího zařízení. [28]



Obr. 1.21 Protirázové provedení od / zavzdušňovacího ventilu [29]

Pojistné ventily

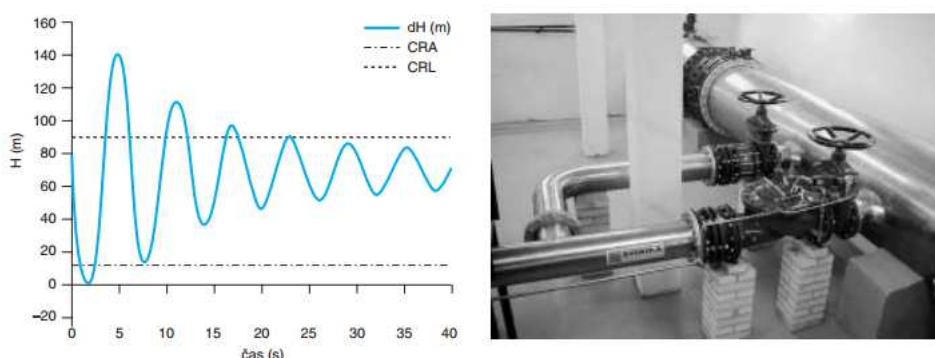
Jedná se o samočinné armatury, které chrání vodovodní potrubí při náhlém zvýšení tlaku. Při překročení určité hodnoty tlaku dojde k odfouknutí vody a vzduchu a tím je zajištěn bezpečný provoz vodovodního potrubí. Jakmile dojde k poklesu tlaku, ventil se uzavře. Základním požadavkem na tuto armaturu je absolutní těsnost, aby při běžných tlacích a průtocích nedocházelo ke ztrátám vody. Mezi základní typ pojistných ventilů se řadí přímočinné pojistné ventily (principem funkce je rovnováha sil – pracovní látka a závaží nebo pružina), dalším typem jsou impulsní pojistné ventily pro větší odpuštění vody. Součástí návrhu této technologie jsou přívodní a odpadní potrubí, která musí být vhodně navržena, aby správně plnila svou funkci. Konstrukce těchto ventilů je poměrně složitá a její návrh je třeba konzultovat s výrobcem armatur, u složitých systémů by měly být tyto ventily ideálně otestovány přímo v terénu. Vhodnost použití tohoto zařízení je v oblasti vytápění, klimatizační a tlakové techniky nebo jako přídavné zařízení k tlakovým nádobám (větrníkům). [7]



Obr. 1.22 Řez konstrukcí pojistného ventilu [30]

Přepouštěcí hydraulicky řízené ventily

Tyto ventily jsou schopné zajistit velmi rychlé otevření a omezí zvýšeného tlaku přepouštěním vody z výtlačné části potrubí, tj. při určitém přetlaku dojde k „oříznutí“ určitého množství tlaku nad nastavenou mez, jako je uvedeno na obrázku (Obr. 1.23). Provoz těchto armatur je samočinný, jsou schopny předvídat náhlý nárůst nebo pokles tlaku a přizpůsobit se dané situaci. Základním požadavkem na tyto armatury je dostatečnost přivedení nebo odvedení takového množství vody, které zabezpečí plynulý provoz vodovodní sítě. Spojení mezi potrubím je provedeno přírubami a bývá doplněno uzavírací armaturou, filtry nebo vzdušníky. [31]



Obr. 1.23 Průběh tlakového rázu a sestava redukčního ventilu [31]

Vyrovňovací komora

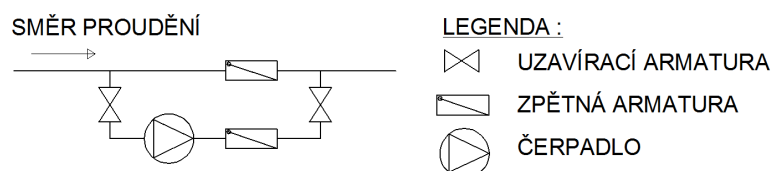
Vyrovňovací komory jsou nádrže o volné hladině, kde úroveň hladiny odpovídá úrovni tlaku vody ve vodovodním potrubí. Zpravidla se tedy jedná o velmi vysoké stavby. Ekonomická výhodnost je omezena pro systémy s menšími dopravními výškami – např. u kratších svahových potrubí nebo v podobě nádrže umístěné v horním podloží čerpací stanice.

1.2.6 Přístup k řešení problematiky vodních rázů v ČR a zahraničí

Obecný přístup k řešení problematiky se dá považovat v globálním měřítku za jednotný. Vždy je snahou vypočtené údaje porovnat s měřením a provést patřičnou kalibraci a verifikaci výpočtového modelu.

V případě, kdy je nutné zasáhnout některým z uvedených způsobů do průběhu vodního rázu, jsou u nás i v zahraničí používány stejné principy a druhy opatření.

V zahraniční literatuře jsou navíc jako velmi často používané opatření uváděny setrvačníky čerpadel. Toto externí zařízení čerpadel zvyšuje setrvačnost čerpadla a v případě jeho výpadku tak prodlouží dobu doběhu čerpadla a tím se značně podílí na zmírnění vodního rázu. Nutno brát v potaz, že se prodlouží doba doběhu čerpadla, ale zároveň bude spotřebováno více elektrické energie při provozu tohoto čerpadla. Podle KSB [11] patří setrvačníky mezi nespolehlivější a neúčinnější zařízení pro tlumení vodních rázů. Dalším opatřením může být čerpadlo a zpětná armatura umístěné na obtoku (Obr. 1.24), se zpětnou armaturou umístěnou na přímé trati mezi obtoky. V případě výpadku čerpadla dojde k přísátí vody z dolní nádrže a následnému zamezení nebezpečných podtlaků. Toto opatření není schopno řešit zvýšené tlaky.



Obr. 1.24 Čerpadlo a uzavírací armatura na obtoku [40]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V rámci experimentální části dochází nejdříve k popisu lokality vodárenského objektu od umístění objektu vzhledem ke geografické poloze až po samotný výtlačný řad, včetně budovy ochrany výtlačného řadu a čerpací stanice. V druhé části je prostor věnován popisu sestavení výpočtového modelu. Jsou zde uvedeny jednotlivé dílčí cíle výpočtového modelu, popis jednotlivých prvků sestaveného modelu a posuzovaná oblast je rozdělena na stav stávající a na nový stav.

2.1 Popis a umístění vodárenského objektu

2.1.1 Zdroj pitné vody Káraný – umělá infiltrace

Posuzovaný stav ochrany výtlačného řadu se nachází na zdroji pitné vody Káraný, ležícím severovýchodně od Prahy nedaleko obce Brandýs Nad Labem – Stará Boleslav, geografická poloha je pro orientaci znázorněna na mapě (Obr. 2.1).



Obr. 2.1 Umístění ČSSV, výtlačného řadu a haly filtrace

Zdroj pitné vody Káraný dodává vodu přibližně z 25 % do pražské vodárenské sítě, zbytek je do této sítě dodáván ze zdroje pitné vody Želivka. Zdroj pitné vody v Káraném je rozdělen na dva způsoby výroby vody. Prvním je břehová infiltrace, druhým je infiltrace umělá. Objekt, v rámci něhož je řešena problematika

ochrany výtlačného řadu, se nachází na infiltraci umělé. Umělá infiltrace na zdroji pitné vody představuje unikátní soubor výroby vody, který je svou velikostí evropským unikátem. Principem je odběr vody z vodárenského toku Jizera, voda je pomocí středních a jemných česlí zbavena nejhrubších nečistot, dále je voda pomocí čerpací stanice surové vody (dále jen ČSSV) odváděna na dvě haly pískových filtrů, kde každá hala má dvě linky po šesti filtrech. Voda je poté zasakována zpět do půdního prostředí s unikátními vlastnostmi geologického prostředí. Zasakování probíhá v sedmnácti vanách vč. dvou doplňkových, přičemž celková plocha dna je 70.650 m². Poté dochází opět k čerpání zasáknuté vody systémem sběrných a svodných studní, voda má v tomto okamžiku svou kvalitou charakter vody pitné. Ve spojném objektu poté dochází k odželezování, chloraci a čerpání vody dvěma výtlačnými řady směrem ku Praze a přilehlému okolí. Kapacita umělé infiltrace představuje 1950 l/s, běžně je využíváno přibližně 600 l/s. V případě havárie na vodním zdroji Želivka je zdroj pitné vody Káraný schopen přivést do Prahy dostatečné množství pitné vody, je tak velmi důležitým strategickým zdrojem. [32]

2.1.2 Popis ČSSV

ČSSV se nachází v těsné blízkosti odběrného objektu surové vody na vodním toku Jizera. Voda je sem přiváděna přes hrubé a jemné česle na síťové filtry dvěma řady DN1200 do jímek sacího potrubí. Technologicky je ČSSV rozdělena na dvě linky. Jednou linkou je odváděna voda ze sacích jímek pomocí čerpadel M1 a M4, druhou linkou je voda čerpána pomocí čerpadel M2 a M3. Dispoziční umístění jednotlivých technologií je patrné z technologického schéma (Obr. 2.2).

Pro čerpání vody do úpravny jsou ve strojovně čerpací stanice osazena tato stávající čtyři čerpadla:

- **M1 – Sigma SLS 8-LN-FE; Q=1450 l/s, H=18 m, Pm=400 kW**

Je rotační šroubové čerpadlo nacházející se v suché jímcce. Možnost regulace průtoku je umožněna pomocí motorového spouštěče a pohybuje se přibližně od 1200-1400 l/s.

- **M2 – KSB RDL V600-540; Q=700-1400 l/s, H=21-25 m, Pm=450kW**

Je čerpadlo se spirálním tělesem s radiálním kolem nacházející se v suché jímce. Možnost regulace je umožněna pomocí frekvenčního měniče a v rozsahu průtoků 700-1400 l/s.

- **M3 – U-VF-400a/l-LN-FE; Q=400 l/s, H=20 m, Pm=160kW**

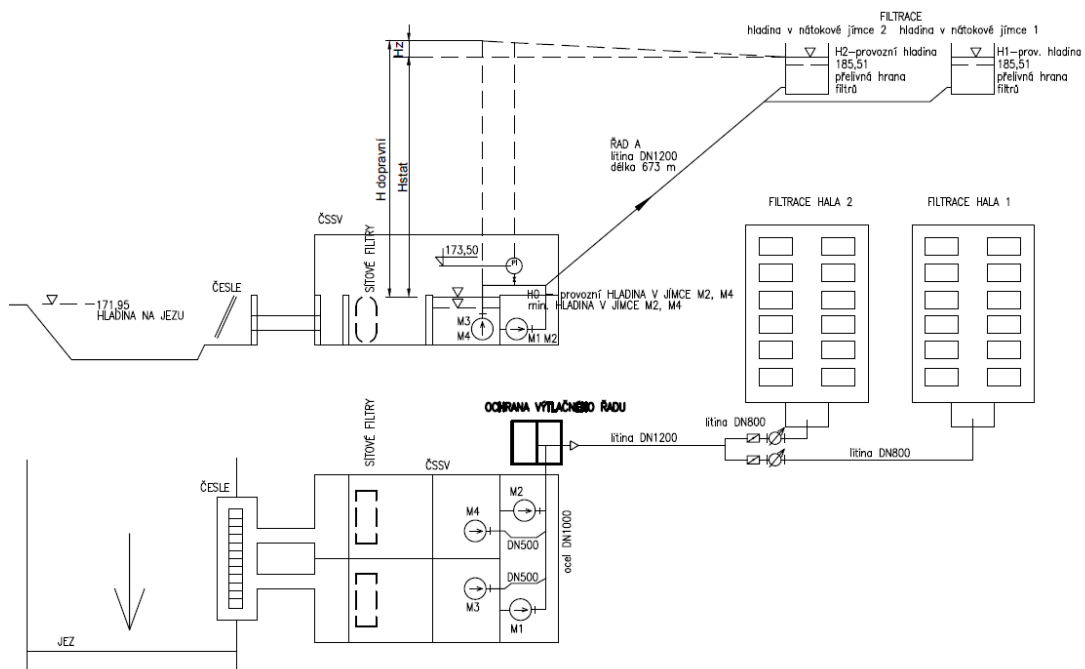
Je vertikální čerpadlo nacházející se v mokré sací jímce.

- **M4 – KSB AMAREX KRT K 350-500/200 6 UG; Q=600 l/s, H=21 m, Pm=200kW**

Je vertikální čerpadlo nacházející se v mokré sací jímce.

Čerpadla tak tvoří dvě provozuschopné jednotky, z nichž každá je osazena v samostatné sací jímce a tvoří tak 100% rezervu, anebo kryje zvýšený požadavek dodávaného množství.

Na výtlaku každého čerpadla je osazena zpětná klapka. Výtlaky všech čtyř čerpadel jsou napojeny do sběrného výtlaku DN1000, který je zajištěn protirázovou ochranou, která je situována mimo objekt ČSSV. Na tomto společném výtlaku je za ochranou výtlačného řadu „A“ instalováno šoupě s elektrickým pohonem. [32]



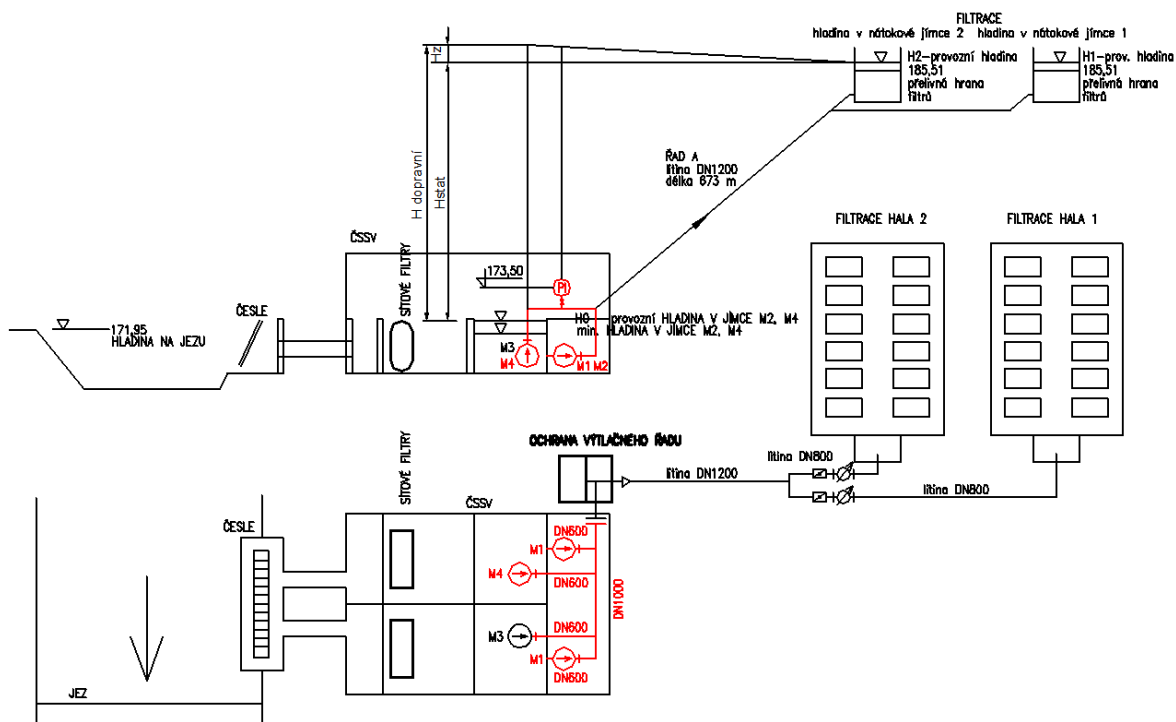
Obr. 2.2 Provozní schéma stávající ČSSV [37]

Vzhledem k tomu, že stávající technologie byla budována v 60. letech minulého století, je současný stav ČSSV nedostatečný, jednak z hlediska technického, ale i ekonomického.

V rámci optimalizace čerpání vody je uvažováno o kompletní výměně stávající technologie a rekonstrukce celé ČSSV. Stávající rozvody ve strojovně ČSSV budou nahrazeny novými nerezovými trubkami a tvarovkami, čerpadla M1, M2 a M4 budou zcela nahrazeny novými čerpadly. Čerpadlo M3 již bylo vyměněno za nové v roce 2014 a bude ponecháno. Veškeré armatury budou taktéž vyměněny. Potrubní rozvody budou „napřímeny“ a jejich dimenze potrubí bude na jednotlivých větvích DN600 – tyto větve jsou zaústěny do společného výtlaku DN1000. Rozsah optimalizace ČSSV je patrný ze schématu (Obr. 2.3). [38]

Nová uvažovaná čerpadla jsou principem zapojení stejná, všechna disponují možností regulací otáček. Přehled nových uvažovaných čerpadel M1, M2 a M4, čerpadlo M3 je stávající:

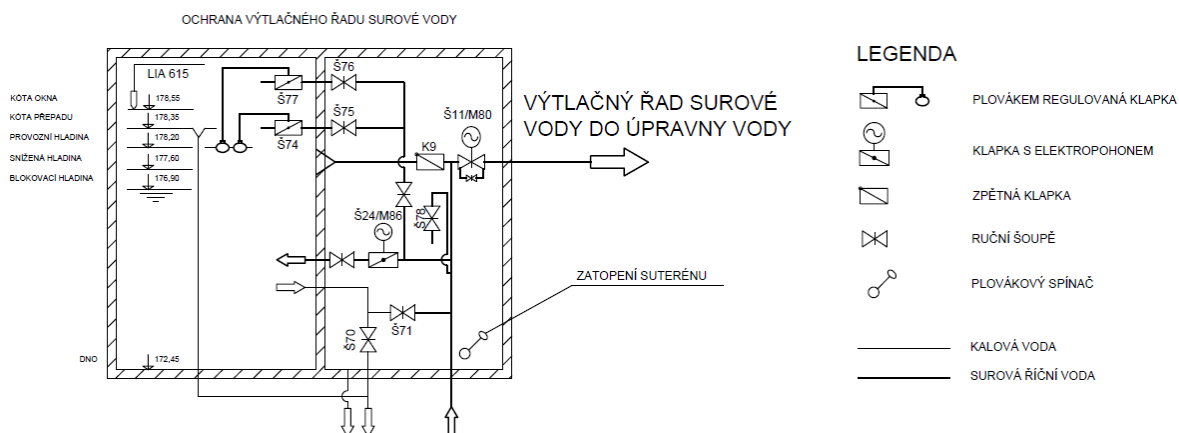
- M1 – $Q = 650$ l/s, $H = 21$ m, $P_m = 181$ kW, 670 ot/min;
- M2 – $Q = 650$ l/s, $H = 21$ m, $P_m = 181$ kW, 670 ot/min;
- M3 – $Q = 560$ l/s, $H = 20$ m, $P_m = 160$ kW, 1580 ot/min;
- M4 – $Q = 650$ l/s, $H = 21$ m, $P_m = 163$ kW, 1460 ot/min.



Obr. 2.3 Provozní schéma nové ČSSV [37]

2.1.3 Popis funkce stávající ochrany výtlačného řadu

Umístění ochrany výtlačného řadu je patrné ze schématu (Obr. 2.2). Samostatná ochrana je navržena tak, aby nedošlo k poruše vlivem vodního rázu na výtlačném potrubí litinového řadu DN1200, kterým je voda odváděna z řeky Jizery na pískovou filtraci. Řešení protirázové ochrany je provedeno pomocí zavodňovací nádrže s volnou hladinou a příslušnou armaturní komorou. Potrubí surové říční vody je v armaturní komoře tvořeno ocelovým potrubím DN1000 a disponuje řadou armatur, jejichž rozmístění je patrné z provozního schématu (Obr. 2.4). Pomocí zpětné klapky nedochází k plnění této nádrže, a naopak při náhlém poklesu tlaku je umožněno zavodnění potrubí, což zajistí, že nedojde k nebezpečnému podtlaku, který by mohl ohrozit jeho spolehlivost. Hladina v zavodňovací nádrži je udržována pomocí dvou potrubí s uzavíracími klapkami s plováky. V dolní části nádrže je umožněno pomocí odkalovacího potrubí celkové vypuštění a v horní části se nachází bezpečnostní přeliv. Pro zajištění bezpečnosti chodu čerpadel M1 a M2 je zde nastavena tzv. blokovácí hladina, která zajišťuje, že v případě poklesu hladiny pod tuto úroveň, dojde k řízenému předepsanému odstavení obou čerpadel. Běžné plnění zavodňovací nádrže je prováděno pomocí potrubí DN200 spojeného přímo s výtlačným řadem. Pomocí řídicího systému s hladinovými ukazateli dojde k naplnění nádrže po určitou úroveň, od které dochází k plnění pomocí potrubí s plováky. V situaci, kdy nelze dodržet, že hladina vody bude na požadované úrovni, ocitá se výtlačný řad zcela bez ochrany a čerpat se nesmí. [32]



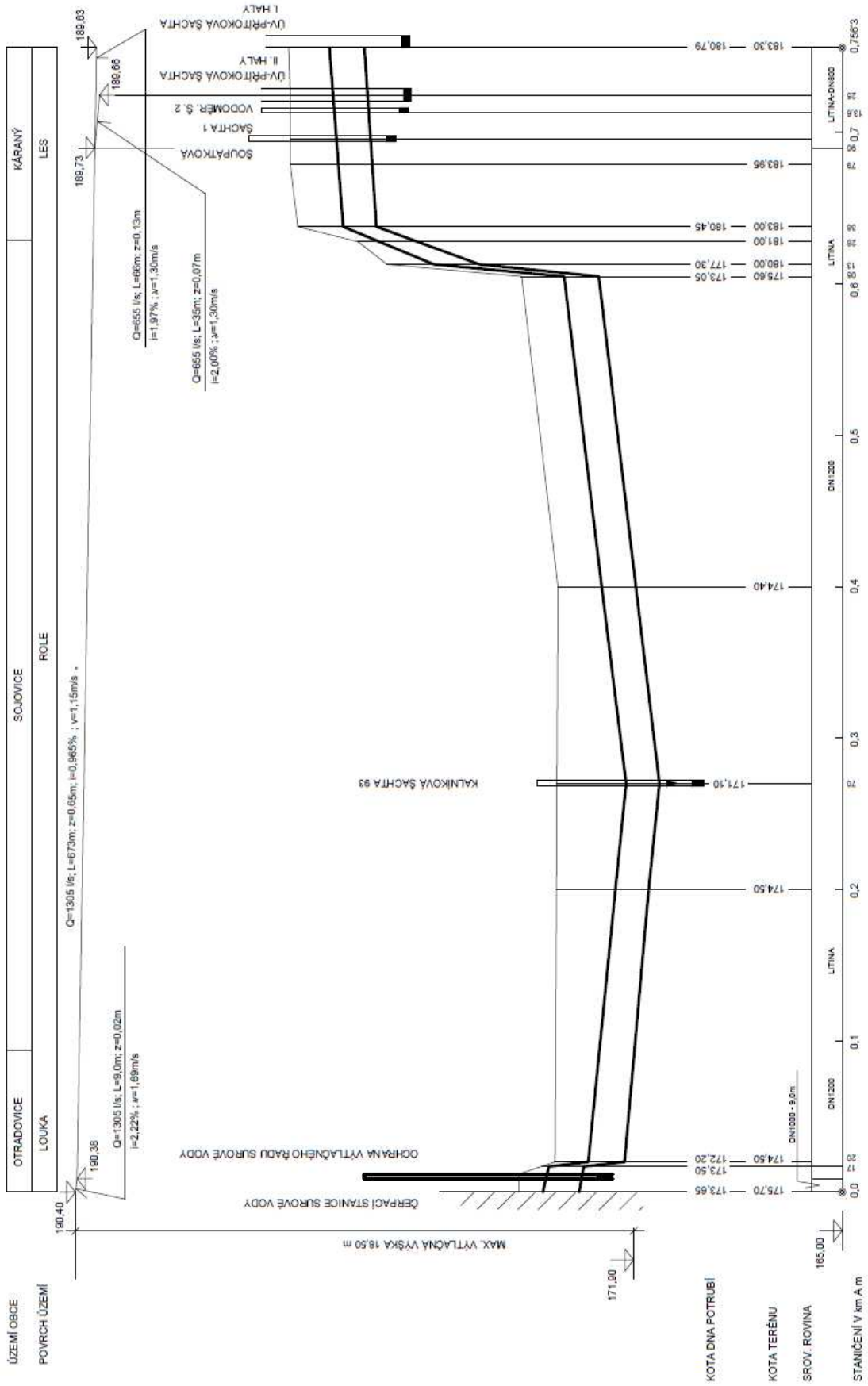
Obr. 2.4 Provozní schéma ochrany výtlačného řadu [32]

Provozní hladiny zavodňovací nádrže:

Revizní okno	178,55 m n. m.
Bezpečnostní přepad	178,35 m n. m.
Provozní hladina	178,20 m n. m.
Snížená hladina	177,60 m n. m.
Blokovací hladina	176,90 m n. m.
Dno nádrže	172,45 m n. m.

2.1.4 Výtlačný řad surové vody

Výtlačný řad surové vody je rozdělen na dvě charakteristické části. První částí je sběrné potrubí jednotlivých výtlačků potrubí čerpadel M1 – M4. Potrubí je zde tvořeno ocelovými svařovanými trubkami. Výtlačné potrubí čerpadel M1 a M2 je DN 1000, PN 10. Výtlačné potrubí čerpadel M3 a M4 je DN 500, PN10. Tato potrubí jsou svedena do společného výtlačku potrubí DN 1000, PN10 viz schéma (Obr. 2.2). V druhé části dochází za objektem protirázové ochrany ke změně a dimenzi potrubí na troubu z tvárné litiny o průměru DN 1200, tlaková třída je však neznámá, lze odhadovat třídu PN10, ale i PN6. Potrubí surové vody poté přitéká na tzv. šoupátkovou šachtu, kde je rozděleno na dvě větve o průměru DN 800, dále voda přitéká do nátokových šachet hal filtrace I a II. Podélný profil řadu surové vody je zobrazen na obrázku (Obr. 2.5), z kterého jsou patrné jednotlivé polohové a výškové úrovně důležitých prvků, dále lze pozorovat rozsah jednotlivých profilů potrubí. Tučně je znázorněno potrubí a objekt protirázové ochrany. [32] Hodnota drsnosti vnitřních stěn potrubí je podle provedeného korozního průzkumu poměrně vysoká a její hodnota byla odhadnuta na 10mm. [37]



Obr. 2.5 Podélný profil výtlačného řádu surové vody [37]

2.2 Úvod a stanovení cíle modelování vodního rázu

Cílem diplomové práce je ověření, zdali bude mít nová technologie vliv na velikost vodního rázu. Lze očekávat, že náhrada stávající zpětné klapky DN1000 za klapku DN600, s odlišnou konstrukcí provedení, projeví známky zvýšených tlakových rázů. Podle dostupných podkladů, vlastního průzkumu a rozhovoru s mistrem provozu ČSSV je využití stávající protirázové ochrany výtlačného řadu nejasné. Dále využití stávajících čerpadel pro aktuální požadavek množství vody je tvořeno volbou kapacity čerpadla. Nedochozí však k souběhu jednotlivých čerpadel. Při novém stavu by v případě většího množství vod, nebo v krajním případě využití až maximální kapacity $Q = 1950\text{l/s}$ došlo k souběhu tří čerpadel.

Stěžejním bodem diplomové práce je tedy modelování průběhu vodního rázu. Na základě podkladů získaných od Vodárny Káraný a.s. a vlastního průzkumu byl vytvořen pomocí programu VODRAZ. model čerpání surové vody z řeky Jizery na pískové filtry.

Pro modelování stávajícího stavu bylo využito těchto podkladů:

- podélný profil výtlačného řadu surové vody;
- provozní schéma ochrany výtlačného řadu;
- provozní schéma ČSSV;
- provozní řád umělé infiltrace úpravny vody Káraný;
- osobní průzkum v terénu.

Vytvořený model se v jednotlivých variantách soustředí na:

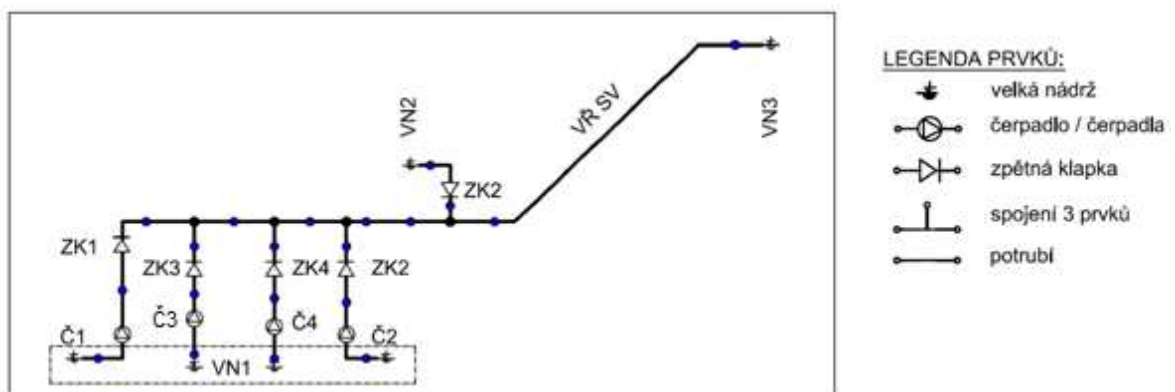
- funkci zavodňovací nádrže;
- možnost vzniku nebezpečných podtlaků a jejich velikost;
- možnost vzniku nebezpečných přetlaků a jejich velikost.

Modelování průběhu vodního rázu je provedeno v následujících variantách:

- běžný průtok stávajícím čerpadlem $M3 = 455\text{l/s}$, bez zavodňovací nádrže;
- běžný průtok stávajícím čerpadlem $M3 = 455\text{l/s}$, se zavodňovací nádrží;
- běžný průtok novým čerpadlem $M1 = 650\text{l/s}$, se zavodňovací nádrží;

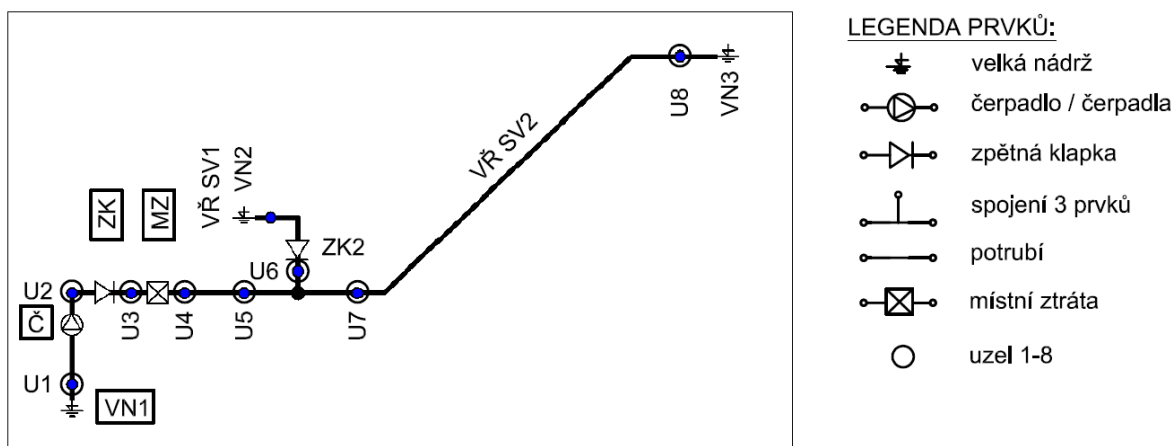
- maximální průtok při souběhu nových čerpadel M1, M2 a M4 = 1950l/s, se zavodňovací nádrží.

Modelování průběhu vodního rázu bylo provedeno pomocí programu VODRAZ. Tento program byl vytvořen a poskytnut Ing. Janem Krupičkou, Ph.D. z ČVUT v Praze, fakulty stavební, katedry hydrauliky a hydrologie. Jedná se o program sloužící k simulaci tlakových rázů a pro výpočet využívá tzv. metody charakteristik. Pro modelování bylo užito jistých zjednodušení, ideální stav modelu čerpání vody je zobrazen na schématu (Obr. 2.6). Vytvoření tohoto schématu je v modelovacím programu základním úkonem, vložení jednotlivých charakteristik chování prvků je poměrně pracné ale nezbytné. Vytvořený model na (Obr. 2.6) je však z hlediska numerického řešení poměrně složitý a není jednoduché s ním dosáhnout konvergence výpočtů. Složitost modelu se navíc projevuje tím, že vypočtené výsledky jsou obtížně interpretovatelné a tudíž se jen dají obtížně odlišit reálné výsledky od nereálných důsledků přijatých modelových zjednodušení.



Obr. 2.6 Schéma čerpání vytvořené v programu VODRAZ – idealizované

Z tohoto důvodu byla zvolena varianta výpočtu se zjednodušeným schématem čerpání, viz grafické zobrazení (Obr. 2.7). Ze čtyř větví čerpadel M1 – M4 byla vytvořena jedna větev. Pro prvky Č, ZK, MZ, VN1 (zobrazeny v rámečku) jsou uvažovány různé velikosti hodnot a charakteristik pro jednotlivé případy simulace výpočtů, zbytek prvků (parametry a charakteristiky) jsou neměnné.



Obr. 2.7 Schéma čerpání vytvořené v programu VODRAZ – výpočetní

Popis jednotlivých prvků a vstupní hodnoty:

- ***VN1 – Velká nádrž 1***
 - jedná se o nádrž, ve které je konstantní objem vody udržovaný na určité zadané úrovni;
 - VN1 představuje sací jímku čerpadel M1 – M4;
 - dosazované hodnoty jsou nadmořská výška a koeficienty místní ztráty vtokem do potrubí.

- ***VN2 – Velká nádrž 2***
 - jedná se o nádrž, ve které je konstantní objem vody udržovaný na určité zadané úrovni;
 - VN2 představuje zavodňovací nádrž protirázové ochrany výtlačného řadu;
 - dosazované hodnoty jsou nadmořská výška a koeficienty místní ztráty vtokem do potrubí a výtokem z nádrže.

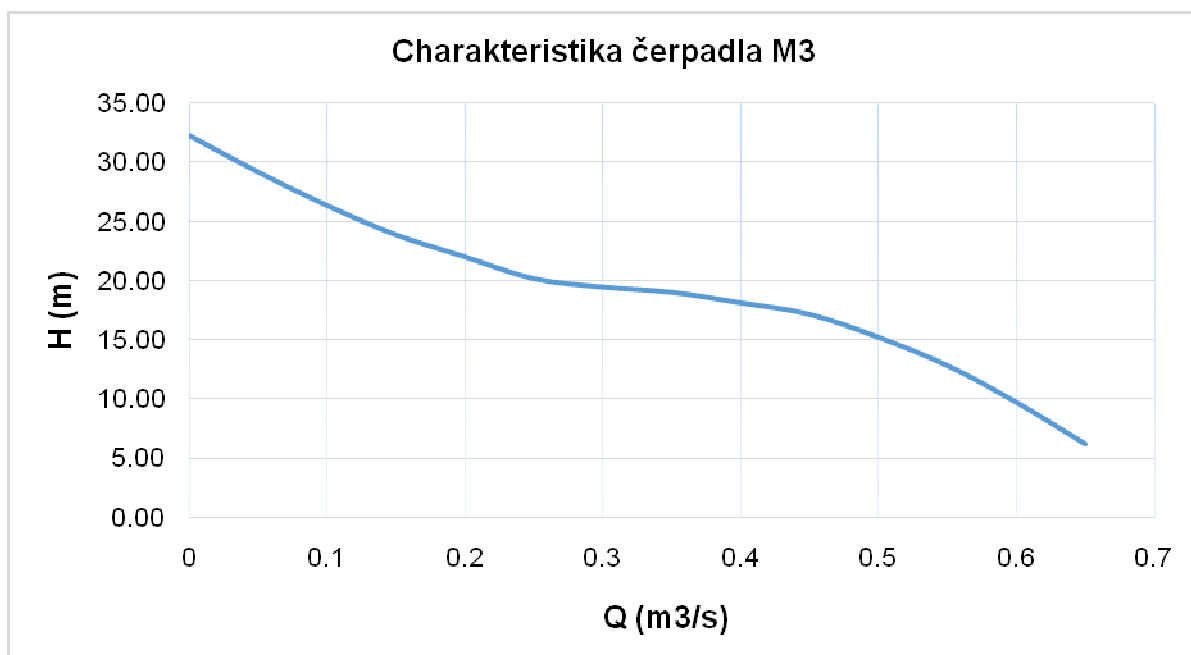
- ***VN3 – Velká nádrž 3***
 - jedná se o nádrž, ve které je konstantní objem vody udržovaný na určité zadané úrovni;
 - VN3 představuje úroveň horní nádrže, ze které je voda odváděna na pískové filtry;
 - dosazované hodnoty jsou nadmořská výška a koeficienty místní ztráty vtokem do potrubí a výtokem z nádrže.

Tab. 2.1 Zadávací parametry VN, VN2, VN3

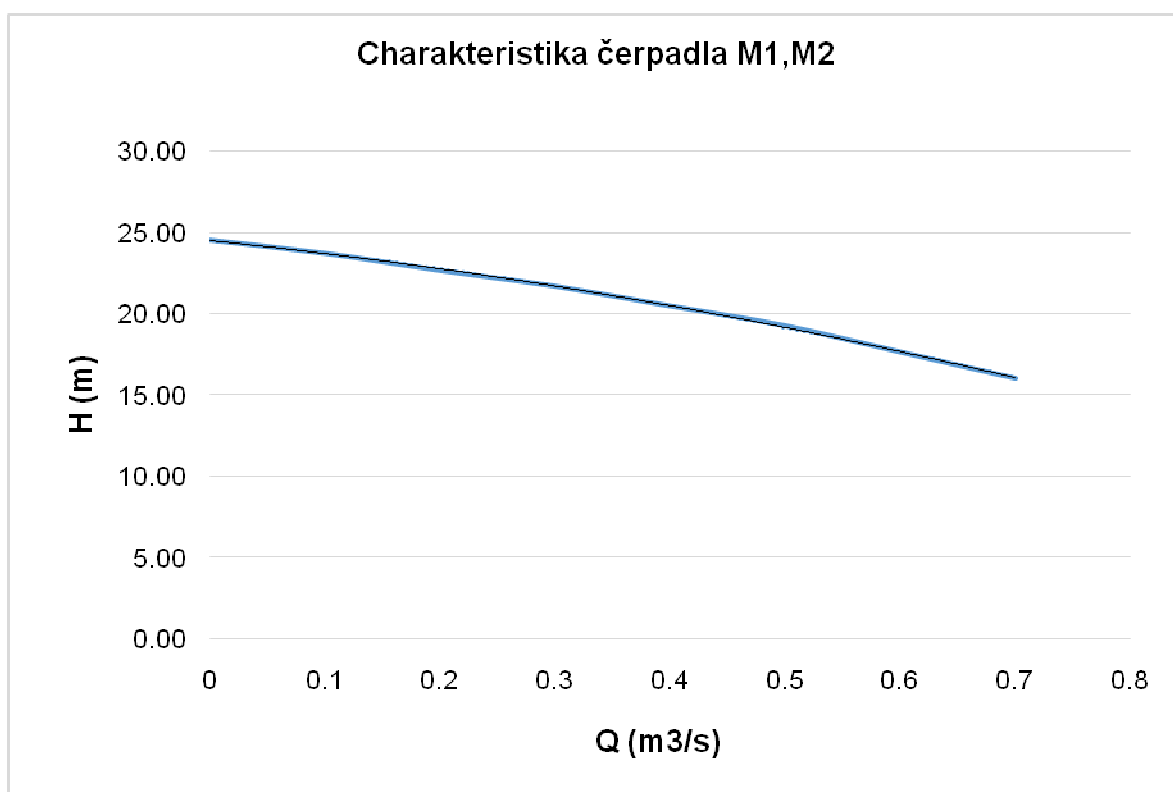
VN1 – Velká nádrž 1			
Místní ztráta výtokem do potrubí (při provozu čerpadla M3 - stávající čerpadlo) - vtok do potrubí, $\xi = 0.5$ - redukce DN400/500, $\xi = 0.05$	ξ VÝTOK	0.55	(-)
Místní ztráta výtokem do potrubí (při provozu čerpadla M1 - nové čerpadlo) - vtok do potrubí, $\xi = 0.5$ - redukce DN1000/800, $\xi = 0.05$ - uzavírací klapka DN800, $\xi = 0.3$ - montážní vložka DN800, $\xi = 0.05$ - redukce a redukované koleno na DN500, $\xi = 0.2$	ξ VÝTOK	1.1	(-)
Místní ztráta vtokem do nádrže	ξ VÝTOK	-	(-)
Úroveň hladiny	H	172	(m)
VN2 – Velká nádrž 2			
Místní ztráta výtokem do potrubí - vtok do potrubí, $\xi = 0.5$ - zpětná klapka DN1000 $\xi = 1.1$	ξ VÝTOK	1.6	(-)
Místní ztráta vtokem do nádrže	ξ VÝTOK	-	(-)
Úroveň hladiny	H	172	(m)
VN3 – Velká nádrž 3			
Místní ztráta výtokem do potrubí	ξ VÝTOK	0.5	(-)
Místní ztráta vtokem do nádrže	ξ VÝTOK	1	(-)
Úroveň hladiny	H	172	(m)

- Č - Čerpadlo
 - jedná se o čerpací zařízení;
 - nachází se ve strojovně čerpadel;
 - pro výpočet jsou použity stávající čerpadlo M3 a nové čerpadlo M1;
 - zadávanými parametry jsou charakteristika čerpadla $H = f(Q,n)$ a řízení čerpadla (simulovaný výpadek čerpadla nastane po dosažení ustáleného proudění).

Graf. 1 Charakteristika čerpadla M3, $n=1490\text{ot/min}$



Graf. 2 Charakteristika čerpadla M1, $n=670\text{ot/min}$



- *MZ – Místní ztráta*
 - místní ztráta je prvek, ve kterém jsou sečteny dílčí koeficienty místních ztrát;
 - při jednotlivých variantách výpočtu jsou místní ztráty rozlišně zadávány;
 - ve výpočtu jsou místní ztráty vztaženy k jednomu bodu.

Tab. 2.2 Zadávací parametry místních ztrát

MZ - Místní ztráta (při provozu čerpadla M3 - stávající čerpadlo)			
Místní ztráta - 3x koleno 30°, $\xi = 3 \times 0.6$ - zpětná klapka DN500 (při plném otevření), $\xi = 0.9$ - šoupátko DN500, $\xi = 0.06$ - odbočení DN500/1000, $\xi = 0.5$	ξ_{MZ3}	3.26	(-)
MZ - Místní ztráta (při provozu čerpadla M1 - nové čerpadlo)			
Místní ztráta - redukce DN600/400 (při plném otevření), $\xi = 0.12$ - zpětná klapka DN600 (při plném otevření), $\xi = 0.9$ - uzavírací klapka DN600, $\xi = 0.4$ - koleno DN600, $\xi = 0.3$ - odbočení DN600/1000, $\xi = 0.5$	ξ_{MZ1}	2.22	(-)

- *ZK – Zpětná klapka*
 - je uzavírací armatura (hlavní zdroj tlakového rázu);
 - pro jednotlivé varianty výpočtu odpovídají dimenze ZK jednotlivým výpočtům;
 - uvažovaný typ zpětných klapek je ZK se šikmým sedlem;
 - zadávacími parametry jsou otevírací tlak, uzavírací průtok a dynamická charakteristika zpětných klapek.

Tab. 2.3 Zadávací parametry zpětných klapek

ZK - Zpětná klapka DN500 (při provozu čerpadla M3 - stávající stav)			
Otevírací přetlak	P	0.03	(bar)
Uzavírací průtok	Q	0	(m ³ /s)
ZK - Zpětná klapka DN600 (při provozu čerpadla M1 - nový stav)			
Otevírací přetlak	P	0.03	(bar)
Uzavírací průtok	Q	0	(m ³ /s)
ZK2 - Zpětná klapka DN1000 (ZK zavodňovací nádrže)			
Otevírací přetlak	P	0.2	(bar)
Uzavírací průtok	Q	0	(m ³ /s)

Graf. 3 Dynamická charakteristika zpětné klapky se šikmým sedlem



- **VŘ SV1 – Výtlačný řad surové vody 1**
 - je spojovací (sběrné potrubí) jednotlivých větví čerpadel M1 – M4 ve strojovně čerpadel;
 - jsou zde uvažovány ztráty třením;
 - zadávacími parametry jsou délka potrubí (12 m) a podélný profil potrubí (jedné se o vodorovné potrubí dlouhé 12 metrů na kótě 173,9 m. n. m.).
- **VŘ SV2 – Výtlačný řad surové vody 2**
 - je výtlačné potrubí spojující nacházející se za ochranou výtlačného řadu a její vyústění je do horní nádrže, ze které je voda odváděna na pískové filtry;
 - jsou zde uvažovány ztráty třením;
 - zadávacími parametry jsou délka potrubí (730 m) a podélný profil potrubí odpovídá schématu podélného profilu výtlačného řadu (Obr. 2.5).
- **U1-8 – Uzly**
 - jsou body, u kterých dochází ke spojení jednotlivých prvků;
 - zadávacími parametry jsou nadmořské výšky a profil jednotlivých potrubí, který tento prvek spojuje.

Tab. 2.4 Zadávací parametry uzlů (provoz čerpadla M3 – stávající stav)

Uzly (při provozu čerpadla M3 - stávající stav)				
uzel č.1	Nadmořská výška	H	172	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel tř. 11, DN500		(-)
uzel č.2	Nadmořská výška	H	173.1	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel tř. 11, DN500		(-)
uzel č.3	Nadmořská výška	H	173.1	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel tř. 11, DN500		(-)
uzel č.4	Nadmořská výška	H	173.9	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel tř. 11, DN1000		(-)
uzel č.5	Nadmořská výška	H	173.9	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel tř. 11, DN1000		(-)
uzel č.6	Nadmořská výška	H	173.9	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel tř. 11, DN1000		(-)
uzel č.7	Nadmořská výška	H	139.9	(m. n. m.)
	Potrubní profil	litina, DN1200		(-)
uzel č.8	Nadmořská výška	H	181.39	(m. n. m.)
	Potrubní profil	litina, DN1200		(-)

Tab. 2.5 Zadávací parametry uzlů (provoz čerpadla M1 – nový stav)

Uzly (při provozu čerpadla M1 - nový stav)				
uzel č.1	Nadmořská výška	H	172	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel tř. 11, DN1000		(-)
uzel č.2	Nadmořská výška	H	171.3	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel 1.4301, DN600		(-)
uzel č.3	Nadmořská výška	H	171.3	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel 1.4301, DN600		(-)
uzel č.4	Nadmořská výška	H	173.9	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel 1.4301, DN600		(-)
uzel č.5	Nadmořská výška	H	173.9	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel 1.4301, DN600		(-)
uzel č.6	Nadmořská výška	H	173.9	(m. n. m.)
	Potrubní profil	ocel tř. 11, DN1000		(-)
uzel č.7	Nadmořská výška	H	139.9	(m. n. m.)
	Potrubní profil	litina, DN1200		(-)
uzel č.8	Nadmořská výška	H	181.39	(m. n. m.)
	Potrubní profil	litina, DN1200		(-)

- *Spojení 3 prvků*
 - umožňuje připojit tři prvky a přiřadit jim místních ztráty (v tomto případě nebyly místní ztráty zadány).

2.3 Modelování průběhu vodního rázu jednotlivých variant

Průběh vodního rázu byl modelován ve čtyřech variantách. Popisu a výpočtu jednotlivých variant jsou věnovány následující kapitoly. Po zadání potřebných dat k uvedení výpočtu bylo třeba nastavit délku časového kroku, která byla nastavena na 0,01 sec a doba samotného výpočtu byla nastavena na 200 sec. Výpočetní program umožňuje dva základní typy výstupních dat.

Prvotními daty jsou hodnoty (průtoků, rychlosti, přetlaku, tlakových výšek, čáry energie, kóty potrubí, průměru potrubí) vztažené k podélnému profilu potrubí. Podle požadavku na dané veličiny lze dosáhnout požadovaných výstupů. Pro účely diplomové práce byl vybrán průtok a tlaková výška pro zadaný podélný profil potrubí. Hodnota tlakové čáry je závislá na poloze a času, a pro úplné zaznamenání mezních hodnot výpočtu slouží obalové křivky, které jasně definují největší vzniklé přetlaky ev. podtlaky pro konkrétní místo čerpacího systému.

Dalšími výstupy jsou hodnoty průtoků a tlaků vztažené ke konkrétnímu bodu – uzlu. Na grafických výstupech pak lze zaznamenat „historii“ průtoků či tlaku. Pro účely diplomové práce byly vybrány hodnoty obou těchto veličin a výběr místa byl zvolen v uzlu č. 7.

Ve všech variantách výpočtů byl nejprve vypočten ustálený stav proudění, po dosažení ustáleného stavu byl nasimulován výpadek čerpadla. V jednotlivých variantách se uvažuje různá doba doběhu čerpadla.

2.3.1 Výpočet základních veličin vodního rázu

Rychlost šíření rázové periody byla vypočtena pro stávající litinové potrubí DN 1200 a rázová perioda tlakové vlny je 1,6 sec. Manipulační doba uzavěru je podle technického listu uzavírací armatury 0,6 sec. Z kritéria pro určení typu rázu vyplývá, že se jedná o přímý ráz a pro výpočet rázové výšky může být použit Žukovského vzorec.

Rychlost šíření rázové vlny - Litina DN1200

K =	2	- modul pružnosti vody (GPa)
ρ =	1000	- objemová hmotnost vody ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
E =	170	- Youngův modul pružnosti materiálu (GPa)
d =	1.2	- průměr potrubí (m)
e =	0.01	- tloušťka stěny potrubí (m)
a =	910.6	- rychlost šíření rázové vlny ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Rázová perioda

L =	730	- délka potrubí (m)
a =	910.6	- rychlost šíření rázové vlny ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
μ =	1.6	- rázová perioda (t)

Kritérium přímého / nepřímého rázu pro pozitivní rázovou výšku

μ =	1.6	- rázová perioda (t)
Tu =	0.6	- doba uzavírání armatury (t)

2.3.2 Var.I – Stávající čerpadlo M3 = 455l/s, bez zavodňovací nádrže

Jedná se o variantu, při které byla uvažována absence zavodňovací nádrže. Tato varianta byla zvolena z důvodu ověření, zdali by měla absence této nádrže negativní vliv na distribuci surové vody. Pro výpočet stávajícího stavu bylo vybráno stávající čerpadlo M3. Otáčky čerpadla byly pro výpočet nastaveny na 1400 ot/min, výpočtem byl stanovený průtok při ustáleném stavu na $Q = 455$ l/s. Charakteristice čerpadla odpovídá výše uvedený graf (Graf. 1). Po dosažení ustáleného stavu byl simulován výpadek tohoto čerpadla. Na obrázku níže (Obr. 2.8) je znázorněn podélný profil čerpání surové vody do horní nádrže. Vlevo na svislé ose se nachází velikost tlakové výšky (m. n. m.) a vpravo na svislé ose je zobrazen průtok (m^3/s). Na vodorovné ose je znázorněn podélný profil potrubí (m). Pro ustálený stav průtoku 455 l/s je zobrazena čára ustálené tlakové výšky. V případě výpadku začne prudce klesat průtok a tlak, kde je závislost rychlosti poklesu dána jednak topologií sítě a také setrvačností doběhu čerpadla. Ve skutečnosti je doba doběhu čerpadla parabolická křivka [11,16], bohužel je však tato charakteristika nedohledatelná a lze ji ověřit pouze měřením na konkrétním provozu a proto pro výpočet byl uvažován lineární pokles otáček čerpadla a využit výpočet z [11] str. 12. Pokles otáček na nulu byl vypočten ze 1400 ot/min za 8,1 sec. Výpočet je uveden zde:

Výpočet doby doběhu čerpadla M3

m =	80	- hmotnost oběžného kola (kg)
r =	0.145	- poloměr oběžného kola (m)
o =	1400	- počet otáček za minutu (ot/min)
η =	0.71	- účinnost čerpadla (-)
ρ =	1000	- objemová hmotnost vody ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
g =	9.81	- tíhové zrychlení země ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
Q =	0.455	- objemový průtok vody ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
H =	21	- dopravní výška čerpadla (m)
Δt =	8.2	- teoretická doba doběhu čerpadla (s)

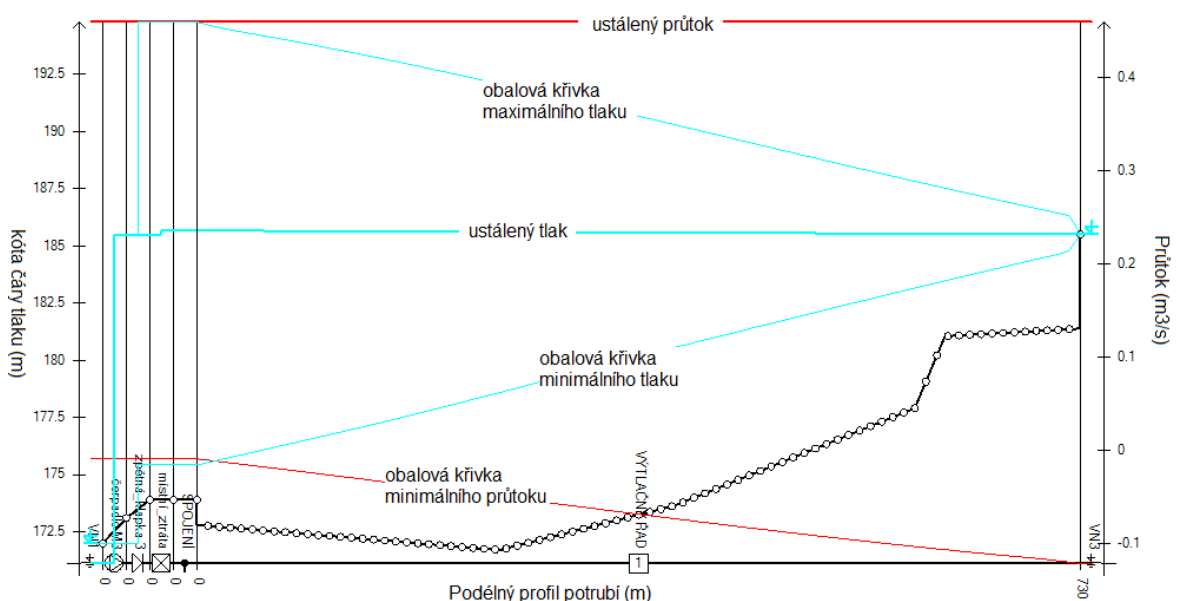
Hodnota nejvyššího dosaženého tlaku je v místě zpětné klapky $H_{\text{MAX}} = 194,8$ m. n. m. Oproti statickému tlaku z horní nádrže (185,51 m. n. m.) tedy stoupl tlak o 9,29 m.

Hodnota nejnižšího dosaženého tlaku je v místě zpětné klapky $H_{\text{MIN}} = 175,4$ m. n. m. Oproti statickému tlaku z horní nádrže (185,51 m. n. m.) tedy klesl tlak o 10,11 m.

Výpočet rázu při dovření zpětné armatury:

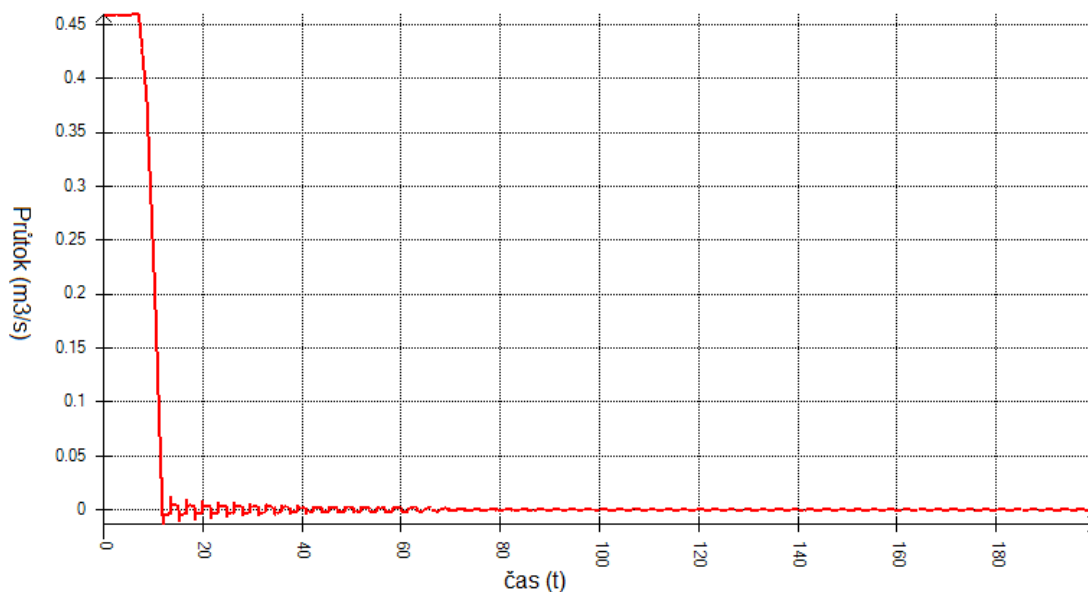
Rázová výška

a =	910.6	- rychlost šíření rázové vlny ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
g =	9.81	- tíhové zrychlení země ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
Δv =	0.1	- odečet zpětné rychlosti z modelu průběhu vodního rázu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
ΔH^+ =	9.3	- maximální pozitivní rázová výška při dovření zpětné klapky (m)
ΔH^- =	-9.3	- maximální negativní rázová výška pro odrazení rázové vlny (m)

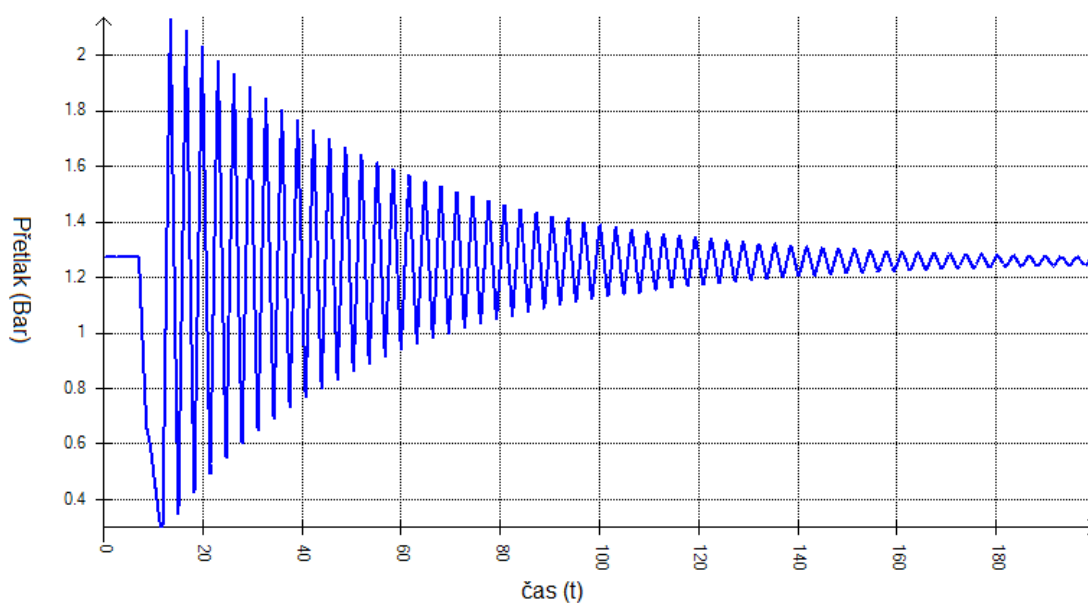


Obr. 2.8 Var. I – podélný profil

Na obrázcích níže (Obr. 2.9 a Obr. 2.10) je znázorněn průběh poklesu u průtoku a tlaku v čase v uzlu č.7. Nejnižší dosažený tlak nastal při výpadku samotného čerpadla a naopak nejvyšší dosažený tlak byl dosažen při zpětném proudění surové vody a následném zavření zpětné klapky. Poté nastává pulsace průtoku a tlaku (kmitání s tlumeným pohybem), jak je uvedeno v [11,16,18,21,22]. Tlumení proudu vody a tlaku je dáno vlivem třecích a místních ztrát.



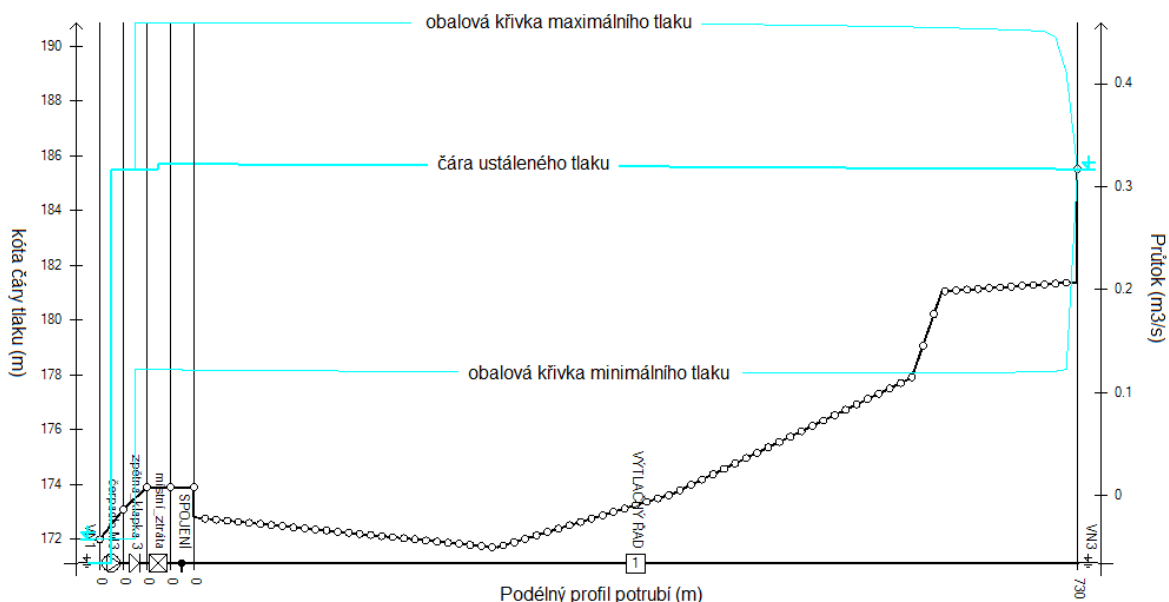
Obr. 2.9 Var. I – průběh průtoku



Obr. 2.10 Var. I – průběh tlaku

2.3.3 Var. II – Stávající čerpadlo M3 = 455 l/s, se zavodňovací nádrží

Jedná se o variantu skutečného stavu. Cílem této varianty je ověřit, zdali je zavodňovací nádrž plně využita a za jakých podmínek. Pro výpočet bylo vybráno stejné čerpadlo jako ve variantě I. Otáčky čerpadla byly pro výpočet nastaveny na 1400 ot/min, výpočtem byl stanovený průtok při ustáleném stavu na $Q = 455$ l/s. Charakteristice čerpadla odpovídá výše uvedený graf (Graf. 1). Po dosažení ustáleného stavu byl simulován výpadek tohoto čerpadla. Na obrázku (Obr. 2.12) je znázorněn podélný profil čerpání surové vody do horní nádrže. Vlevo na svislé ose se nachází velikost tlakové výšky (m. n. m.) a vpravo na svislé ose je zobrazen průtok (m^3/s). Na vodorovné ose je znázorněn podélný profil potrubí (m). Pro ustálený stav průtoku 455 l/s je zobrazena čára ustálené tlakové výšky. V případě výpadku začne prudce klesat průtok a tlak, kde je závislost rychlosti poklesu dána jednak topologií sítě a také setrvačností doběhu čerpadla. V případě, kdy se uvažovala nulová setrvačnost čerpacího ústrojí, nastal nebezpečný podtlak v posledních přibližně 200 metrech před nátokem do horní nádrže, tento průběh však neodpovídá reálnému chování čerpacího systému a tak nebude dále uvažován, pro ilustraci je uveden namodelovaný průběh na následujícím grafu (Obr. 2.11).



Obr. 2.11 Var. II – nereálný průběh výpadku čerpadla

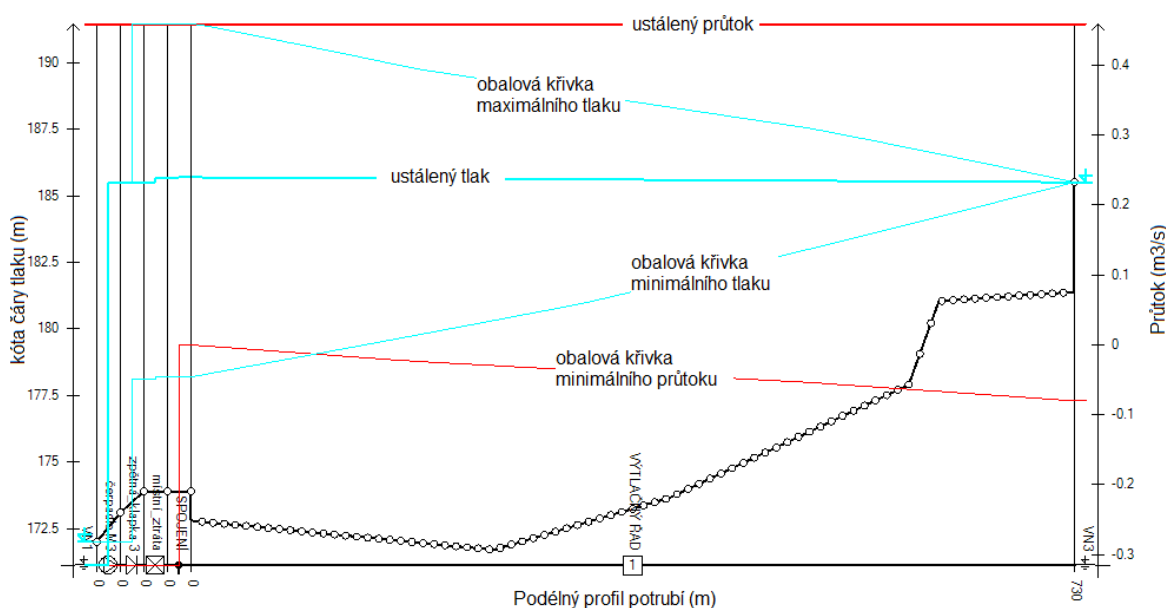
Pro výpočet bylo tedy opět odhadnuto, že pokles 1400 ot/min by trval 8,1 sec.

Hodnota nejvyššího dosaženého tlaku je v místě zpětné klapky $H_{MAX} = 191,4$ m. n. m. Oproti statickému tlaku z horní nádrže (185,51 m. n. m.) tedy stoupl tlak o 5,89 m.

Hodnota nejnižšího dosaženého tlaku je v místě zpětné klapky a odpovídá kótě hladiny zavodňovací nádrže $H_{MIN} = 178,2$ m. n. m. Oproti statickému tlaku z horní nádrže (185,51 m. n. m.) tedy klesl tlak o 7,31 m.

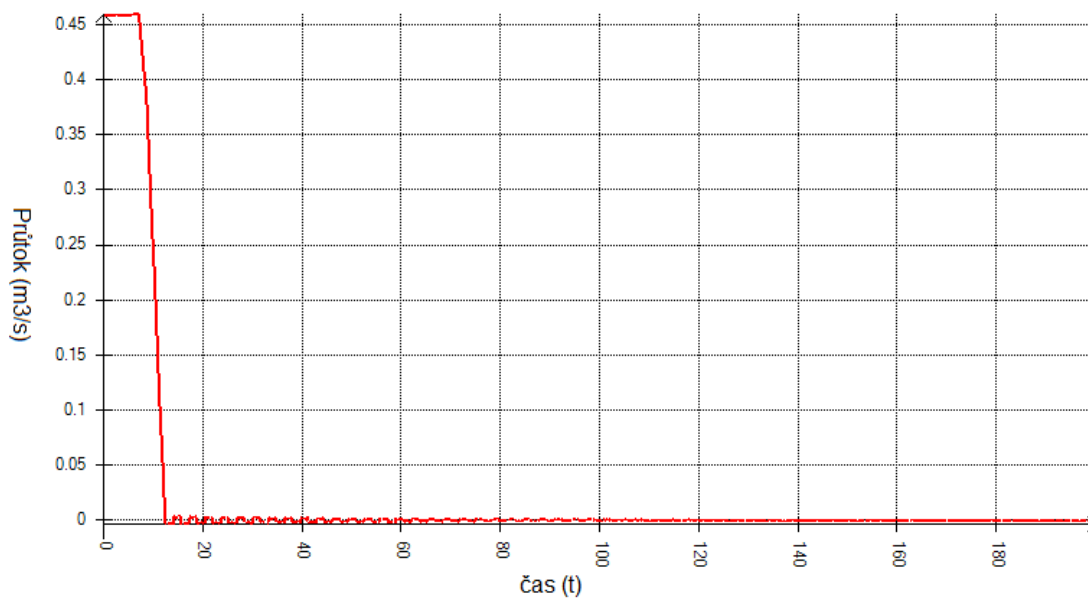
Výpočet rázu při dovření zpětné armatury:

Rázová výška	
$a =$	910.6 - rychlost šíření rázové vlny ($m \cdot s^{-1}$)
$g =$	9.81 - tíhové zrychlení země ($m \cdot s^{-2}$)
$\Delta v =$	0.064 - odečet zpětné rychlosti z modelu průběhu vodního rázu ($m \cdot s^{-1}$)
$\Delta H^+ =$	5.9 - maximální pozitivní rázová výška při dovření zpětné klapky (m)
$\Delta H^- =$	-5.9 - maximální negativní rázová výška pro odrazení rázové vlny (m)

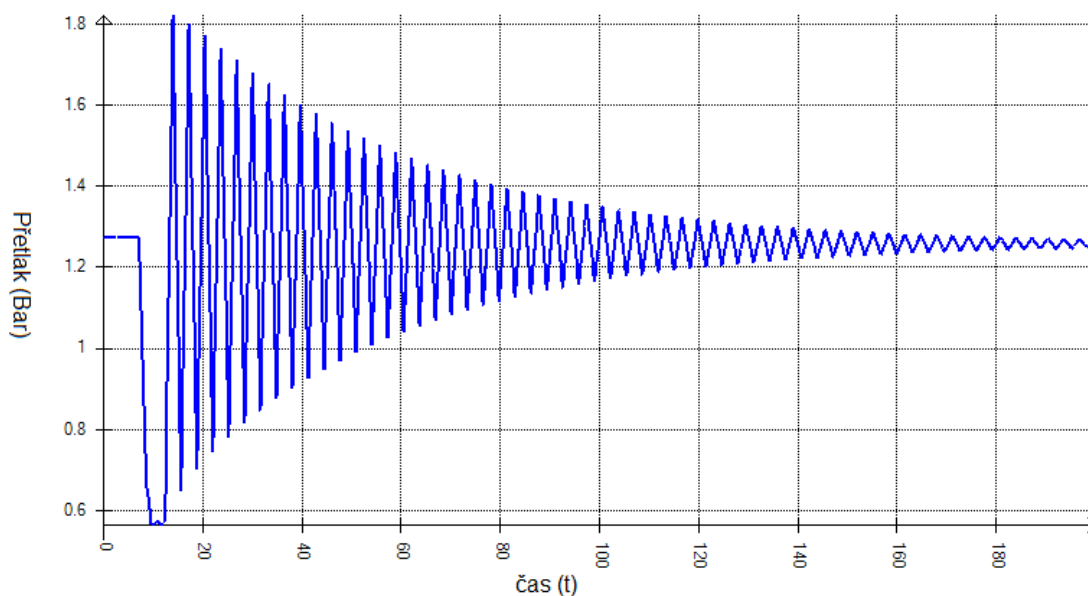


Obr. 2.12 Var. II – podélný profil

Na grafech (Obr. 2.13 a Obr. 2.14) je znázorněn průběh poklesu průtoku a tlaku v čase v uzlu č. 7. Průběh průtoku a tlaku je obdobný jako v první variantě, dochází k nejnižšímu dosaženému tlaku při výpadku čerpadla a nejvyššímu dosaženému tlaku při zavření zpětných klapek. Průběh obou veličin odpovídá opět teorii podle literatury.



Obr. 2.13 Var. II – průběh průtoku



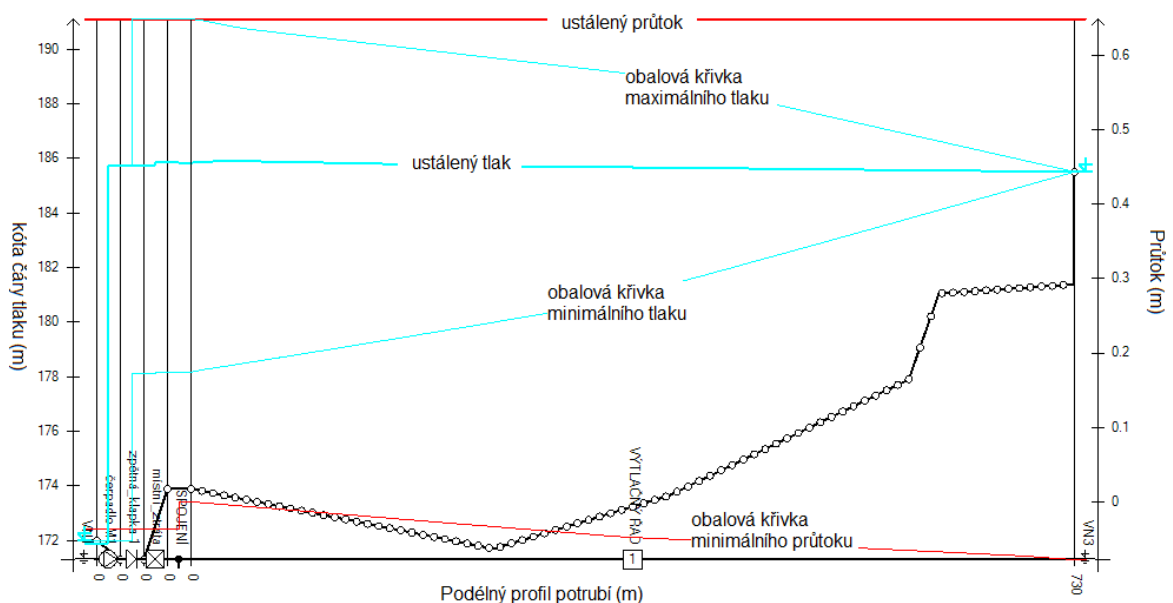
Obr. 2.14 Var. II – průběh tlaku

2.3.4 Var. III – Nové čerpadlo M1, $Q = 650\text{/s}$

Jedná se o variantu, při které je uvažováno nové čerpadlo M1. Parametry stávající zavodňovací nádrže jsou ponechány a tato protirázová ochrana je ve výpočtu uvažována. Otáčky nového čerpadla M1 byly pro výpočet nastaveny na

670 ot/min, výpočtem byl stanovený průtok při ustáleném stavu na $Q = 650$ l/s. Charakteristice čerpadla odpovídá výše uvedený graf (Graf. 2). Po dosažení ustáleného stavu byl simulován výpadek tohoto čerpadla. Na obrázku níže (Obr. 2.15) je znázorněn podélný profil čerpání surové vody do horní nádrže. Vlevo na svislé ose se nachází velikost tlakové výšky (m. n. m.) a vpravo na svislé ose je zobrazen průtok (m^3/s). Na vodorovné ose je znázorněn podélný profil potrubí (m). Pro ustálený stav průtoku 650 l/s je zobrazena čára ustálené tlakové výšky. V případě výpadku začne prudce klesat průtok a tlak, kde je závislost rychlosti poklesu dána jednak topologií sítě a také setrvačností doběhu čerpadla. Pro výpočet byl opět uvažován lineární pokles otáček čerpadla a využit výpočet z [11] str. 12. Pokles otáček na nulu byl vypočten z 670 ot/min za 17,9 sec. Výpočet je uveden zde:

Výpočet doby doběhu čerpadla M1	
$m =$	230 - hmotnost oběžného kola (kg)
$r =$	0.295 - poloměr oběžného kola (m)
$\omega =$	670 - počet otáček za minutu (ot/min)
$\eta =$	0.81 - účinnost čerpadla (-)
$\rho =$	1000 - objemová hmotnost vody ($kg \cdot m^{-3}$)
$g =$	9.81 - tíhové zrychlení země ($m \cdot s^{-2}$)
$Q =$	0.65 - objemový průtok vody ($m^3 \cdot s^{-1}$)
$H =$	21 - dopravní výška čerpadla (m)
$\Delta t =$	17.9 - teoretická doba doběhu čerpadla (s)



Obr. 2.15 Var. III – podélný profil

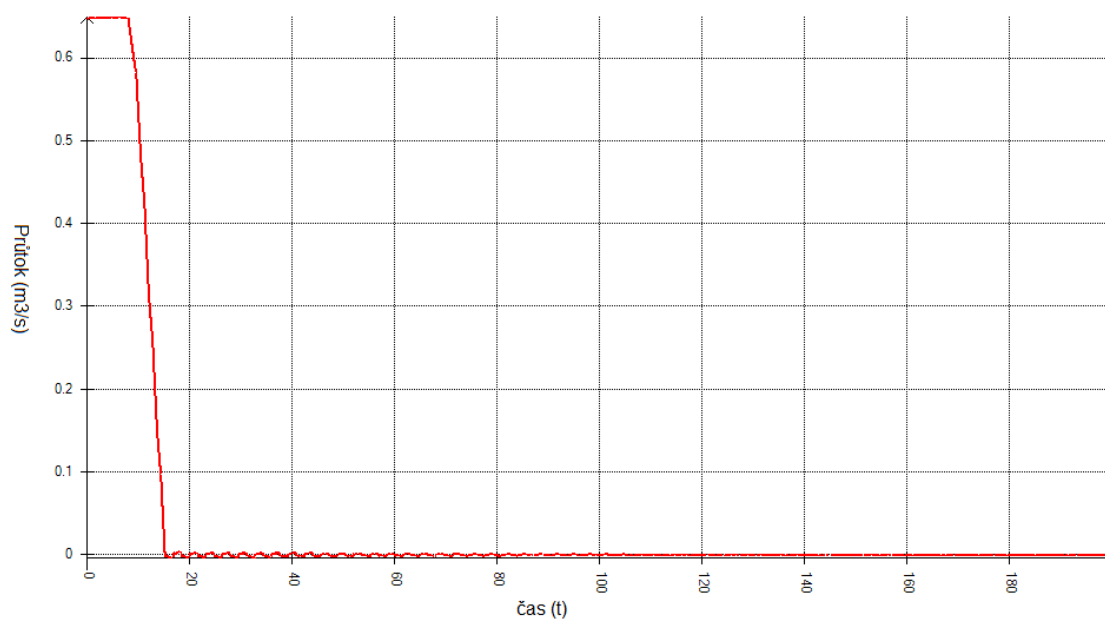
Hodnota nejvyššího dosaženého tlaku je v místě zpětné klapky $H_{MAX} = 190,7\text{ m. n. m.}$ Oproti statickému tlaku z horní nádrže ($185,51\text{ m. n. m.}$) tedy tlak stoupl o $5,19\text{ m.}$

Hodnota nejnižšího dosaženého tlaku je v místě zpětné klapky $H_{MIN} = 178,2\text{ m. n. m.}$ Oproti statickému tlaku z horní nádrže ($185,51\text{ m. n. m.}$) tedy tlak klesl o $7,31\text{ m.}$

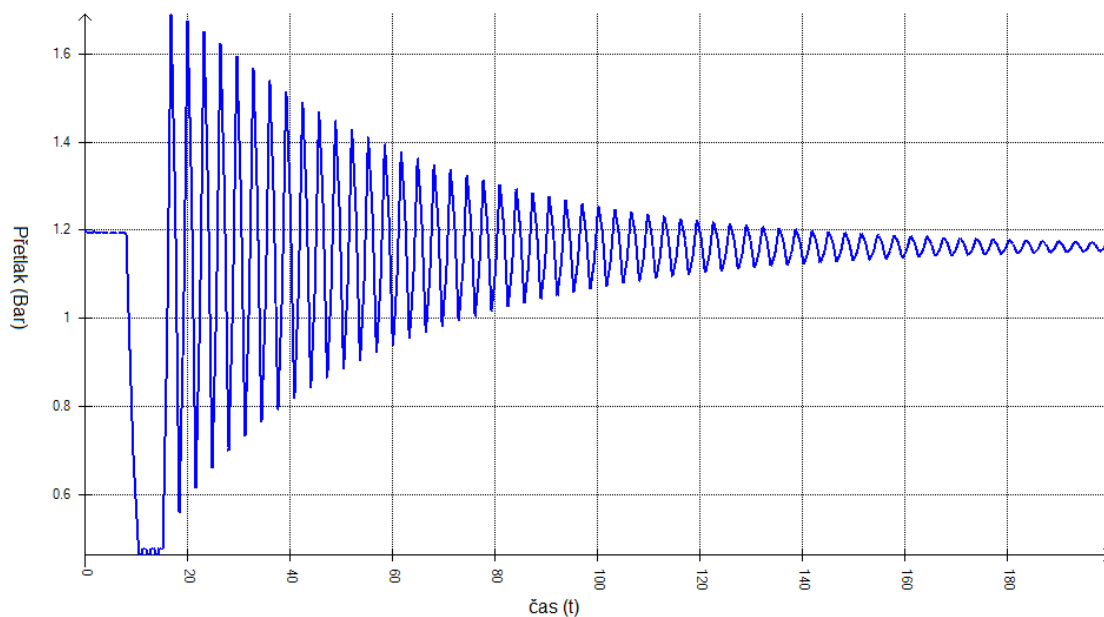
Výpočet rázu při dovržení zpětné armatury:

Rázová výška

$a =$	910.6 - rychlost šíření rázové vlny (m.s^{-1})
$g =$	9.81 - tíhové zrychlení země (m.s^{-2})
$\Delta v =$	0.056 - odečet zpětné rychlosti z modelu průběhu vodního rázu (m.s^{-1})
$\Delta H^+ =$	5.2 - maximální pozitivní rázová výška při dovržení zpětné klapky (m)
$\Delta H^- =$	-5.2 - maximální negativní rázová výška pro odražení rázové vlny (m)



Obr. 2.16 Var. III – průběh průtoku



Obr. 2.17 Var. III – průběh tlaku

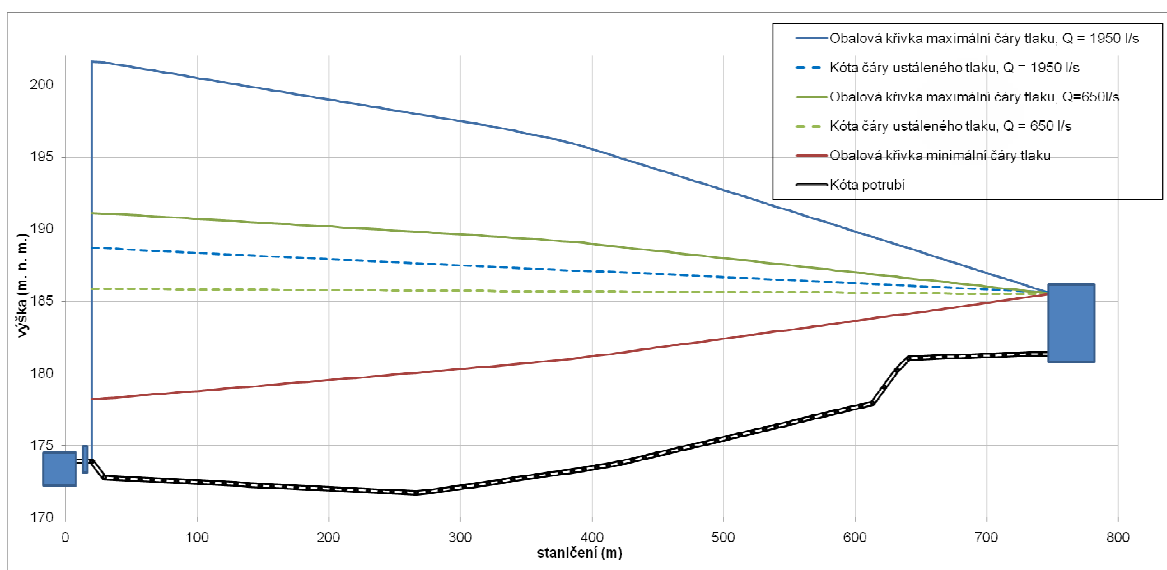
2.3.5 Var. IV – Souběh nových čerpadel M1, M2 a M4, Q = 1950 l/s

Jedná se o variantu, při které je uvažován souběh nových čerpadel po rekonstrukci ČSSV. Jak již bylo zmíněno, jedná se o čerpadla M1, M2, a M4, které jsou v souběhu čerpání schopné dodat až 1950 l/s surové vody a dostat se tak na plnou kapacitu hal objemové filtrace. Délky jednotlivých větví čerpadel, dimenze potrubí a armatur jsou shodné a odpovídají DN600. Jako výchozí zjednodušení výpočtu jsou uvažovány čerpadla M1, M2 a M4 shodných typů a parametrů. Jejich parametry odpovídají čerpadlu M1, tj. pro 670 ot/min se pro danou distribuční síť surové vody dosáhne průtoku 650 l/s. Charakteristice čerpadla odpovídá výše uvedený graf (Graf. 2). Prvním krokem tohoto výpočtu bylo dosažení ustáleného stavu proudění při souběhu čerpadel M1, M2 a M4. Poté byl simulován výpadek těchto čerpadel najednou. Při této simulaci bylo z důvodu velkého množství vložených dat, jednotlivých prvků a uzlů dosaženo nereálných výsledků (výpočetní model odpovídal výše uvedenému schématu (Obr. 2.6). Z tohoto důvodu došlo k dalšímu zjednodušení výpočtu výsledného tlakového rázu, kterými jsou:

- namodelovaný průběh tlakové výšky při ustáleném proudění a souběhu čerpadel M1, M2 a M4 byl získán z programu VODRAZ;

- snížení tlaku při výpadku čerpadel M1, M2 a M4 je také závislé na době doběhu těchto čerpadel, tato doba je uvažovaná stejná jako pro čerpadlo M1 z Var. III (čerpání novým čerpadlem M1 při 670 ot/min);
- hodnota maximálního snížení tlaku neklesne pod hodnotu úrovně zavodňovací nádrže (kóta 178,2 m. n. m.) a odpovídá Var. III;
- při zastavení proudu vody a následném zpětném proudění dojde k symetrickému přerozdělení průtoku mezi jednotlivé větve výtlaku čerpadel M1, M2 a M4;
- hodnota zvýšení tlaku pozitivní rázové vlny při zavření zpětných klapek je tedy trojnásobně větší oproti Var. III (čerpání novým čerpadlem M1 při 670 ot/min).

Výsledky průběhu vodního rázu při simulaci výpadku čerpadel byly exportovány do textového souboru a následně zpracovány pomocí programu EXCEL 2007 – jejich grafické zobrazení je uvedeno na podélném profilu - Obr. 2.18). Vlevo na svislé ose se nachází velikost tlakové výšky (m. n. m.). Na vodorovné ose je znázorněn podélný profil potrubí (m). Pro ustálený stav průtoku 1950 l/s je zobrazena čára ustálené tlakové výšky. Dále je zobrazena obalová čára maximálního a minimálního tlaku při výpadku všech tří čerpadel. Pro názornost je na podélném profilu také zobrazen stav tlaku při ustáleném proudění čerpadla M1 a jeho obalová čára maximálního tlaku po dověření zpětné klapky.



Obr. 2.18 Var. IV – Podélný profil potrubí

Hodnota nejvyššího dosaženého tlaku je v místě zpětné klapky $H_{MAX} = 201,60$ m. n. m. Oproti statickému tlaku z horní nádrže (185,51 m. n. m.) tedy stoupl tlak o 16,19 m.

Hodnota nejnižšího dosaženého tlaku je v místě zpětné klapky $H_{MIN} = 178,2$ m. n. m. Oproti statickému tlaku z horní nádrže (185,51 m. n. m.) tedy klesl tlak o 7,31 m.

Výpočet rázu při dovření zpětné armatury:

$a =$	910.6	- rychlost šíření rázové vlny ($m.s^{-1}$)
$g =$	9.81	- tíhové zrychlení země ($m.s^{-2}$)
$\Delta v =$	0.058	- odečet zpětné rychlosti z modelu průběhu vodního rázu ($m.s^{-1}$)
$\Delta H^+ =$	5.4	- maximální pozitivní rázová výška při dovření jedné zpětné klapky (m)
$3x\Delta H^+ =$	16.2	- maximální pozitivní rázová výška při dovření tří zpětných klapek (m)

3 VYHODNOCENÍ

Vyhodnocení modelování je provedeno podle variantních výpočtů. Dále je také uveden vhodný postup měření vodních rázů pomocí vypínací zkoušky čerpadel pro účely správného vyhodnocení stavu stávajícího a kalibrování modelu stavu nového. V posledním bodě vyhodnocení je provedena analýza možných opatření k utlumení a zamezení vodních rázů.

3.1 Vyhodnocení průběhu vodních rázů

3.1.1 Vyhodnocení a posouzení Var. I a Var. II

Vyhodnocení Var. I a Var. II bylo sdruženo do jedné kapitoly. Z této varianty popisující chování stávající sítě vyplývá, že při náhlém výpadku čerpadla M3 dojde k prudkému poklesu tlaku, jehož velikost je přímo závislá na chodu doběhu čerpadla. Byl testován případ, kdy byl záměrně doběh otáček čerpadla nastaven na okamžité zastavení po výpadku čerpadla. Tato varianta realitě neodpovídá, ale dokazuje velmi dobré funkční chování zavodňovací nádrže. V tomto případě by v horní části čerpání došlo k podtlaku dosahujícího téměř 5 m.v.sl., ale k nebezpečnému přetržení vodního sloupce by nedošlo.

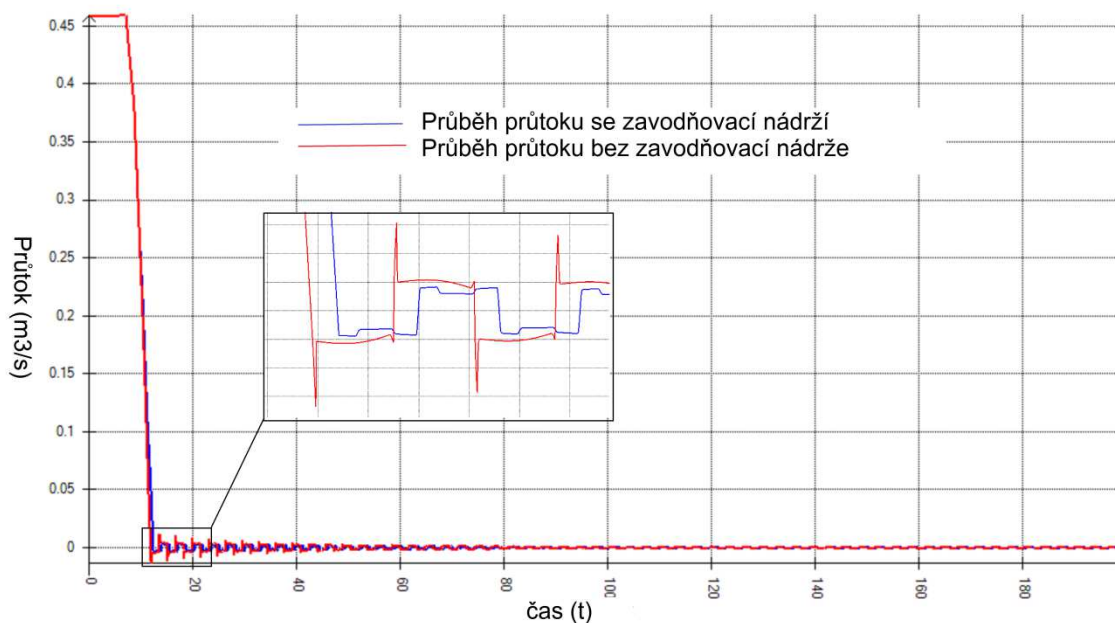
Testování chování zavodňovací nádrže bylo tedy provedeno jednak na nereálném případě výpadku čerpadla, ale také došlo k posouzení pro reálně uvažovaná data. Z těch vyplývá, že pokles tlaku nemůže v žádné z testovaných variant klesnout pod hodnotu 178,2 m. n. m. a tím by nebylo nikdy dosaženo nebezpečného podtlaku vedoucího k přetržení vodního sloupce a kavitaci. Neznámou však zůstává tlak vody, který zajistí plné otevření zpětné klapky s protizávažím zavodňovací nádrže, tato hodnota byla pro výpočet pouze odhadnuta. Pro různé hodnoty otevíracího tlaku zpětné armatury dojde k rozdílným průběhům tlakové čáry.

Závěr:

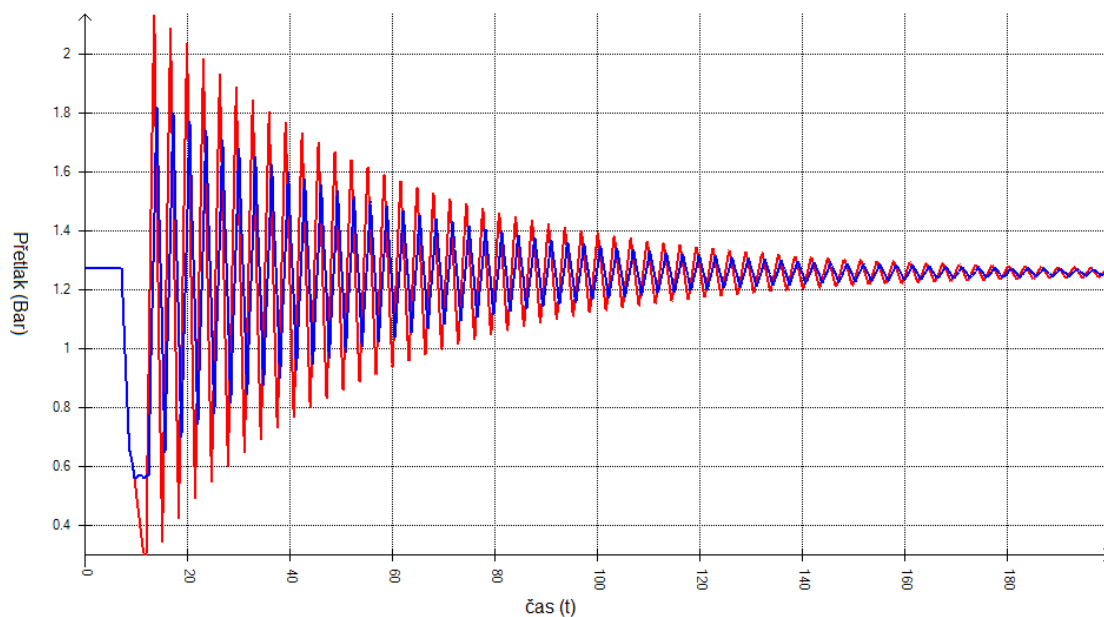
Na základě namodelovaného průběhu tlakových čar lze konstatovat, že stávající protirázová ochrana v podobě zavodňovací nádrže zajistí ochranu výtlačného řadu surové vody na určitou úroveň snížení tlaku (hladina vody

v nádrži VN2 – 178,2 m. n. m.) bez ohledu na pokles otáček v čase při výpadku čerpadla a její návrh z 60. let 20. stol. lze hodnotit jako vyhovující.

Snížení tlakové čáry při výpadku čerpadla je přímo závislé na charakteristice doběhu čerpadla, pro účel diplomové práce byl vybrán lineární pokles otáček. Hodnota zvýšeného tlaku po výpadku čerpadla, doběhu vody její setrvačností a následným dovržením zpětné klapky byla vypočítána ze Žukovského vztahu pro přímý ráz. V případě varianty bez uvážení zavodňovací nádrže činí přírůstek tlaku 9,29 metru a v případě varianty se zavodňovací nádrží tento přírůstek činí 5,29 metru. Hodnoty zvýšeného tlaku se nepatrně liší a jejich rozdíl ($9,29 - 5,29 = 4$ m. v. sl.) je dán schopností dodat vodu do potrubí vlivem působnosti zavodňovací nádrže, tím dojde k nepatrnému prodloužení doby setrvačnosti proudící vody směrem k horní nádrži, hodnota proudového zpomalení se tedy zmenší. Na obrázku níže (Obr. 3.1) je patrná rozdílná doba průběhu průtoku v čase. Rozdílná změna průtoku pak pro jednotlivé varianty znamená rozdílnou hodnotu velikosti tlaku – viz obrázek níže (Obr. 3.2). V obou případech se jedná o velmi malý přírůstek tlakové výšky a lze tedy konstatovat, že při čerpání čerpadlem M3, s ohledem na tlakovou třídu potrubí (VŘ SV2 – potrubí a tvarovky jsou minimálně třídy PN6), nemůže mít toto zvýšení tlaku negativní vliv na potrubí, tvarovky a armatury (armatury jsou třídy PN10).



Obr. 3.1 Průběh tlaku pro variantu s a bez zavodňovací nádrže



Obr. 3.2 Průběh průtoku pro variantu s a bez zavodňovací nádrže

3.1.2 Vyhodnocení Var. III

Z této varianty popisující chování nově navržené technologie vyplývá, že při náhlém výpadku čerpadla M1 dojde opět k prudkému poklesu tlaku. Oproti čerpadlu M3 je čerpadlo M1 jiné konstrukce a z výpočtu pro dobu doběhu čerpadla vychází doba doběhu čerpadla M1 přibližně dvojnásobná při náhlém výpadku.

Funkce zavodňovací nádrže byla v této variantě uvažována a došlo k ověření její dobré funkčnosti.

Závěr:

Na základě namodelovaného průběhu tlakových čar lze konstatovat, že stávající protirázová ochrana v podobě zavodňovací nádrže zajistí ochranu výtlačného řadu surové vody na určitou úroveň snížení tlaku (hladina vody v nádrži VN2 – 178,2 m. n. m.) bez ohledu na pokles otáček v čase při výpadku čerpadla a její návrh z 60. let 20. stol. lze zhodnotit jako vyhovující.

Snížení tlakové čáry při výpadku čerpadla je přímo závislé na charakteristice doběhu čerpadla, pro účel diplomové práce byl vybrán lineární pokles otáček. Hodnota zvýšeného tlaku po výpadku čerpadla, doběhu vody její setrvačností a následným dovřením zpětné klapky byla vypočítána ze Žukovského

vztahu pro přímý ráz. Tento přírůstek tlaku je velmi nepatrný a jeho hodnota je o 5,19 metru větší než hodnota statického tlaku z horní nádrže a lze tedy konstatovat, že při čerpání čerpadlem M1, s ohledem na tlakovou třídu potrubí (VŘ SV2 – potrubí a tvarovky jsou minimálně třídy PN6), nemůže mít toto zvýšení tlaku negativní vliv na potrubí, tvarovky a armatury (armatury jsou třídy PN10).

3.1.3 Vyhodnocení Var. IV

Z této varianty popisující chování nově navržené technologie vyplývá, že za náhlého výpadku čerpadel M1, M2 a M4 lze předpokládat prudký pokles tlaku, obdobně jako v předchozích variantách. Doba doběhu čerpadel bude stejná nebo velice podobná za předpokladu, že všechna čerpadla budou čerpat při stejných otáčkách. Zároveň byl zvolen předpoklad rovnoměrného přerozdělení průtoku mezi tři větve výtlaku čerpadel s tím, že dojde k uzavření zpětných klapek v jeden okamžik. Funkce zavodňovací nádrže byla v této variantě uvažována a byl zaveden předpoklad, že při náhlém výpadku čerpadel dojde k prudkému snížení tlaku a následnému přísátí vody z této nádrže.

Závěr:

Na základě namodelovaného průběhu tlakových čar lze konstatovat, že stávající protirázová ochrana v podobě zavodňovací nádrže zajistí dostatečnou ochranu výtláčného řadu surové vody na určitou úroveň snížení tlaku (hladina vody v nádrži VN2 – 178,2 m. n. m.) bez ohledu na pokles otáček v čase při výpadku čerpadla a její návrh z 60. let 20. stol. lze zhodnotit jako vyhovující.

Hodnota zvýšeného tlaku po výpadku čerpadel M1, M2 a M4, doběhu vody její setrvačností a následným dovřením zpětných klapek byla vypočítána ze Žukovského vztahu pro přímý ráz. Tento přírůstek tlaku činí hodnotu o 16,2 metru větší než hodnota statického tlaku z horní nádrže, tj. nejvyšší dosažený tlak se pohybuje na kótě 201,6 m. n. m. Byl dohledán největší rozdíl přetlaku, který se nachází v místě v těsné blízkosti za zavodňovací nádrží směrem po proudu vody a jeho velikost činí 28,79 m. v. sl. (2,89 Bar). Z těchto hodnot vyplývá, že při čerpání čerpadly M1, M2 a M4 v jejich souběhu, s ohledem na tlakovou třídu potrubí

(VŘ SV2 – potrubí a tvarovky jsou minimálně třídy PN6), nemůže mít toto zvýšení tlaku negativní vliv na potrubí, tvarovky a armatury (armatury jsou třídy PN10).

3.2 Návrh a postup měření vodního rázu

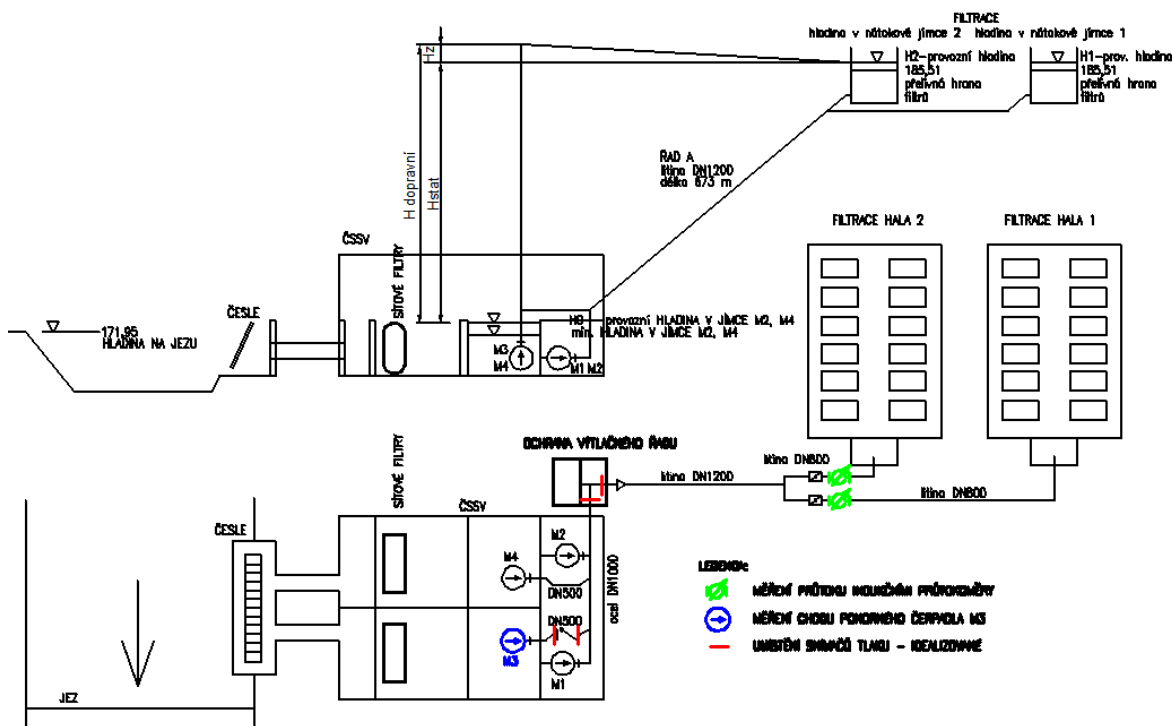
Modelování simulace výpadku stávajícího čerpadla/čerpadel je nezbytným krokem pro posouzení průběhu hydraulických procesů. Důležitějším krokem pro návrh nového systému při plánovaném zásáhnutí do systému stávajícího je však provedení měrné kampaně, při kterém dojde ke kalibraci a verifikaci matematického modelu. Poté lze namodelovaná upřesněná data považovat za dostatečná, protože samotný výpočet podléhá řadě zjednodušení a odhadů. Je rovněž třeba uvážit, že problematika měření není pouze věcí technického rázu, ale spadá rovněž do sféry finanční, správní a administrativní.

Měrná kampaň plánovaná na ČSSV do konce termínu odevzdání diplomové práce nebyla realizována, v této kapitole tak bude uveden alespoň popis možného způsobu provedení měření skutečných hodnot.

Změření vodního rázu je možné provést na tzv. vypínací zkoušce. Při vypínací zkoušce dojde k simulaci výpadku čerpadla vypnutím elektromotoru. Vypnutí čerpadla by mělo dojít za ustáleného proudění vody do horní jímky. Tato simulace by měla být provedena alespoň ve dvou, lépe třech pokusech. Vždy je potřeba, aby k vypnutí došlo za stejných podmínek (čerpadlo, otáčky čerpadla). Je třeba předem vyhodnotit, jaké veličiny bude nutné zaměřit a na základě toho zvolit vhodné měřicí zařízení. Neméně důležitým prvkem je také vhodně zvolené místo sběru dat a po zaměření provedení korekce těchto dat. Sběr dat je možné provést pomocí externího zařízení, nebo v případě ČSSV lze využít stávající řídicí systém ÚV Sojovice. Tento řídicí systém lze podle dostupných informací přeprogramovat na sběr dat pro účely měření vodních rázu. Přeprogramování je nutné z důvodu požadavku na sběr dat s časovým intervalem alespoň po 0,1 sec. Po zaměření veličin je třeba uvést systém řízení do původního stavu. Měřená data by měla zahrnovat závislost měřených veličin v čase a těmito veličinami by měl být průtok, tlak a údaje o chodu čerpadla. Měření průtoku může být provedeno na stávajícím indukčním průtokoměru před horní nádrží. Měření tohoto údaje je velmi důležité, neboť je zcela zásadní pro následnou velikost vodního rázu. Další měřenou

veličinou je kolísání tlaku v čase. Výběr snímačů tlaku by měl umožňovat rozsah záznamu tlaku jednak v přetlacích, tak i podtlacích a nesmí obsahovat tlumič vodních rázů. Rozmístění snímačů tlaku při čerpání čerpadlem M3 je znázorněno na schématu níže (Obr. 3.3). Rozmístění je koncipováno tak, aby byla zajištěná velikost tlakového rázu před, i za zpětnou klapkou a za zavodňovací nádrží. Připojení snímače tlaku může být provedeno buď na stávající odběrná místa, nebo mohou být na stávající ocelové trouby přivařeny nová odběrná připojení. Velmi důležitým bodem měrné kampaně jsou údaje o chodu čerpadla, které jsou pro samotnou kalibraci nezbytné. Dále je doporučeno sledovat chování zpětné klapky s protizávažím, která je součástí zavodňovací nádrže.

Vzhledem k tomu, že čerpadlo M3 je na ČSSV nejnovější a jeho charakteristiky dodané výrobcem byly ověřeny i pomocí výpočtů [37], je doporučeno, aby pro vypínací zkoušku bylo vybráno toto čerpadlo. Součástí tohoto čerpadla, které bylo vyměněno v roce 2014, jsou i nové připojení trubního vedení na stávající společný výtlak surové vody vč. nové zpětné klapky, o které [35] poskytlo patřičné údaje.



Obr. 3.3 Schéma umístění měřících armatur

3.3 Analýza možných opatření ochrany výtlačného řadu

Součástí zadání diplomové práce je návrh opatření vedoucích k zamezení nebezpečných vodních rázů, přičemž dosažené výsledky modelování průběhu těchto rázů na ČSSV a VŘ SV lze považovat vzhledem ke stávající tlakové třídě potrubí, tvarovek a armatur za neškodné. Z tohoto důvodu je obsahem této kapitoly pouze krátká analýza vhodnosti použití jednotlivých možností ochrany výtlačného řadu surové vody v Káraném, nebo případné doplnění stávající protirázové ochrany.

Druhů opatření vedoucích k zamezení vodních rázů, jak již bylo zmíněno v teoretické části diplomové práce, je celá řada. Návrh těchto prvků musí být volen na základě součinnosti jednotlivých technologií a charakter zvoleného prvku musí odpovídat celkové koncepci čerpání vody. Vzhledem k uvažované výměně stávající technologie s cílem optimalizace hospodárnosti čerpání vody a současně stále se vyvíjející automatizaci řízení jednotlivých technologií, bude návrh opatření přizpůsoben tomuto trendu. Upřednostněno bude využití stávajícího prostoru budov protirázové ochrany a strojovny čerpadel ČSSV.

V následující části je provedena analýza výhod a nevýhod jednotlivých opatření, kde jsou symbolem:

- ⊕ označeny výhody opatření;
- ⊗ označeny nevýhody opatření.

Zpětná klapka s tlumícím pístem

- ⊕ vlivem tlumení dosažení menších hodnot pozitivní rázové výšky;
- ⊗ větší koeficient místní ztráty oproti klasické verzi zpětné klapky se šikmým sedlem;
- ⊗ lze předpokládat vyšší cenu této varianty a opotřebení tlumícího pístu;
- ⊗ vhodnost toho prvku je výrobcem uváděna pro potrubí kratší než 500 metrů s průměrným sklonem okolo 30° a více, pro případ ochrany VŘ SV je tedy tato varianta nevhodná.

Zpětné armatury s bezrázovou dynamickou charakteristikou

- ⊕ dojde k účinnému snížení pozitivního tlakového rázu;

- ⊗ je zapotřebí vysoká hodnota rychlosti pro úplné otevření armatury;
- ⊗ velikost koeficientu místní ztráty ve všech případech nabývá vysokých hodnot a tím dochází k neekonomickému čerpání, pro celkovou koncepci čerpání vody pro účely umělé infiltrace je tato varianta nevhodná.

Zavodňovací nádrž

- ⊕ při vhodném návrhu účinně zamezí nebezpečným podtlakům;
- ⊗ neumí řešit zvýšení tlaku;
- ⊗ je zapotřebí zajistit výměnu vody (především u systému s přímým zásobováním vodou ke spotřebiteli);
- ⊗ v případě ohrožení většími přetlaky je nutno tuto technologii doplnit technologií další.

Vyrovnávací komora

- ⊕ zajistí účinně snížení přetlaku i podtlaku;
- ⊗ velký zásah do krajiny, vyrovnávací věž (komora) bývá vysokou stavbu;
- ⊗ zábor velkého prostoru, návrh musí být proveden v součinnosti statika a technologa, v ideálním případě spolupráce s architektem, toto řešení není doporučeno z důvodu nevyužití stávajících prostor.

Setrvačnick

- ⊕ tlakové pulzace jsou omezeny vlivem pomalejšího doběhu čerpadla na minimum;
- ⊗ potřeba dodání většího množství energie při provozu čerpací stanice;
- ⊗ nedostatečný prostor stávající strojovny ČSSV;
- ⊗ nutnost osazení na všechna čerpadla, tato varianta není doporučena.

Čerpadlo na obtoku

- ⊕ eliminace nebezpečného podtlaku pro určitou topologii sítě;
- ⊗ nedojde ke snížení přetlaku;
- ⊗ nedostatečný prostor stávající strojovny ČSSV, tato varianta není doporučena.

Větrník

- ⊕ velmi účinné zamezení vzniku nebezpečných podtlaků i přetlaků;
- ⊕ tato technologie je hojně využívána a její účinnost je ověřena na mnoha vodárenských provozech;
- ⊗ velké množství čerpaných vod, znamená při návrhu velký objem těchto nádob, a jejich umístění vyžaduje podmínky, za kterých nebude docházet k degradaci materiálu a zamrznání objemu vody – stávající prostor ČSSV a budova protirázové ochrany tento prostor neumožňují;
- ⊗ nutnost zajištění výměny vody, zajištění revize samotné technologie.

Od/zavzdušňovací ventil

- ⊕ velmi účinné zamezení vzniku nebezpečných podtlaků i přetlaků;
- ⊕ zkušenosti z provozů;
- ⊕ vhodné doplnění stávající protirázové ochrany;
- ⊕ minimální zábor prostoru;
- ⊕ možnost osazení na jednotlivé větve výtlaku čerpadel za zpětnou klapku ve směru proudění, nebo osazení na společný výtlak DN1000 v místě stávající protirázové ochrany;
- ⊗ nutnost údržby;
- ⊗ při špatném výběru umístění může zhoršit průběh tlakového rázu;
- ⊗ nízká provozní spolehlivost.

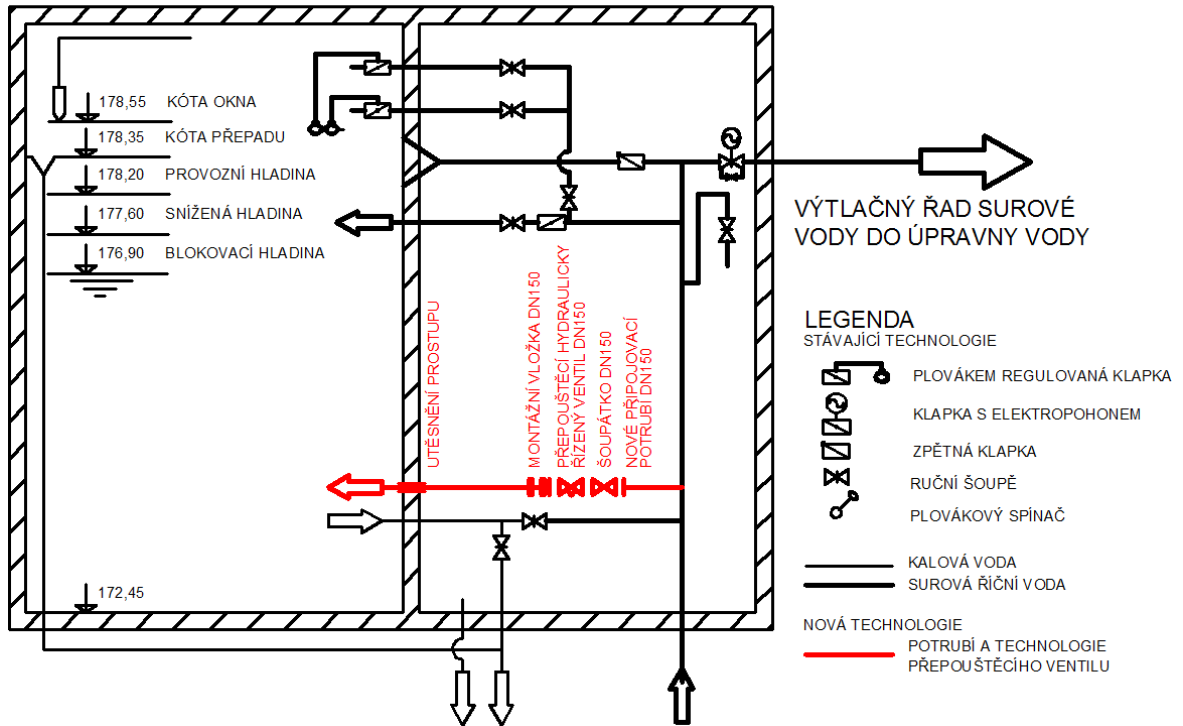
Přepouštěcí hydraulicky řízené ventily

- ⊕ velmi účinné zamezení vzniku nebezpečných přetlaků, vhodné doplnění stávající protirázové ochrany;
- ⊕ snadná údržba;
- ⊕ minimální zábor prostoru;
- ⊕ zkušenosti z ostatních provozů;
- ⊕ možnost osazení na jednotlivé větve výtlaku čerpadel za zpětnou klapku ve směru proudění, nebo osazení na společný výtlak DN1000 v místě stávající protirázové ochrany;

- ⊗ vhodný návrh velikosti ventilu zahrnuje úzkou spolupráci dodavatele a projektanta;
- ⊗ nutnost ověření armatury modelováním ve výpočetních programech vodních rázů.

Z analýzy možných opatření ochrany VŘ SV je doporučeno zachování stávající ochrany (zavodňovací nádrž), která zajistí ochranu výtlačného řadu při náhlém poklesu tlaku. Vhodné doplnění tohoto typu ochrany je takové řešení, které je schopné tlumit zvýšený tlak. Z analýzy vhodných opatření je doporučeno použití přepouštěcího ventilu s hydraulickým řízením a umístěním ve stávající budově protirázové ochrany na stávajícím ocelovém výtlačném potrubí DN1000. Součástí tohoto řešení je přivaření připojovacího potrubí z uhlíkaté oceli tř. 11, šoupátko DN150, samotný přepouštěcí ventil DN150, montážní vložka DN150 a připojení odpadním potrubí z nerezové oceli do zavodňovací nádrže. Pro předběžný návrh je doporučena dimenze přepouštěcího ventilu DN150, jehož velikost byla určena nomogramem podle [28]. Návrh velikosti přepouštěcího zařízení musí být konzultován s výrobcem tohoto ventilu a je doporučeno, aby byla velikost tohoto opatření ověřena matematickým model. S případnou úpravou velikosti tohoto zařízení je třeba upravit připojovací a odpadní potrubí a ostatní příslušné armatury tohoto řešení. Prostup odpadního potrubí musí být zatěsněn například systémovým článkovým těsněním. Dispoziční návrh tohoto opatření je uveden na obrázku (Obr. 3.4). Podle dosažených výsledků se v případě použití tohoto opatření bude jednat o zařízení, které zajišťuje větší spolehlivost vodovodní sítě a je na požadavku provozovatele, na jaké hodnotě dojde k „oříznutí“ tlakové špičky. Návrh způsobu zapojení a oříznutí tlakové špičky je principem stejný jako obrázek (Obr. 1.23).

SCHÉMA OCHRANY VÝTLAČNÉHO ŘADU SUROVÉ VODY - ZAVODŇOVACÍ NÁDRŽ



Obr. 3.4 Dispoziční návrh protirázové ochrany

4 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Problematiku vodních rázů lze považovat i v současné době moderní výpočetní a měřicí techniky, dostupných podkladů a přístupné cestě ke vzdělávání za stále poměrně komplikovanou. Oblast vodních rázů je velmi komplexní a proto by mělo být na tuto problematiku náležitě hleděno a neměla by být podceňována. Výskyt nevhodně navržených vodovodních systémů nebo podcenění této problematiky není výjimečný a havarijní stavy spojené s vodními rázy se objevují prakticky denně. Neopomenutelným bodem v oblasti návrhu a posouzení vodovodních řadů je jednak tvorba modelu distribuce vody se simulací havarijních stavů, ale také kalibrace a verifikace vytvořených matematicko-fyzikálních modelů na základě měření provedených přímo v terénu, nebo provedení zmenšených modelů v laboratoři.

Důležitá je poté komunikace mezi vlastníkem sítě, provozovatelem, projektantem a dodavatelem nové technologie. Spolupráce těchto osob je zcela zásadní a bez vzájemného předávání informací nelze realizovat jakoukoli stavbu. Především dodavatel nové technologie by měl umožnit přístup k veškerým technickým materiálům, listům, prohlášením apod. Některé informace o charakteristikách (čerpadel, uzavíracích armatur, zpětných armatur, apod.) lze dohledat běžně na internetových stránkách výrobce, veškeré podklady však bohužel nejsou vždy přímo volně dostupné a samotné kontaktování jednotlivých osob mnohdy bývá časově náročné.

V teoretické části diplomové práce byla obecně popsána struktura vodovodní sítě a problematika vodních rázů, v části experimentální byl poté věnován prostor přiblížení oblasti čerpací stanice surových vod na umělé infiltraci Káraný a vytvoření matematického modelu stávající a nové vodovodní sítě. Byly vytvořeny celkem čtyři varianty posouzení funkčnosti stávající a nově navržené technologie čerpací stanice s cílem ověření funkčnosti stávající protirázové ochrany a stanovení maximálního možného zvýšení a snížení tlaku při náhlém výpadku jednoho nebo více čerpadel.

Z výsledků první a druhé varianty došlo k ověření dobré funkčnosti stávající protirázové ochrany v podobě zavodňovací nádrže, průběh vodního rázu zde byl modelován na stávající síti při čerpání čerpadla M3 za běžného průtoku

$Q = 455$ l/s. Na základě namodelovaného průběhu vodního rázu varianty I a II bylo také ověřeno, že nikde na vodovodní síti nedochází k nebezpečným podtlakům vedoucím k přetržení vodního sloupce a kavitaci, nebo naopak tato vodovodní síť není ohrožena vzniklými přetlaky vedoucími k porušení stávajícího výtlačného řadu surové vody, který byl stavěn přibližně před padesáti lety.

Modelování vodovodní sítě třetí a čtvrté varianty bylo uvažováno po výměně části technologie čerpací stanice surové vody. Ve třetí variantě byl ověřován průběh vodního rázu při čerpání novým čerpadlem M1 a to za průtoku $Q = 650$ l/s. Při simulaci výpadku tohoto čerpadla, byla opět ověřena dobrá funkce zavodňovací nádrže, vypočítány byly hodnoty snížení a zvýšení tlaku, na jejichž základě byl průběh vodního rázu vyhodnocen za neškodný. Ve čtvrté variantě dochází k modelování stavu při maximální kapacitě úpravny vody, do které je voda čerpána. Čerpáním uvažovanými čerpadly M1, M2 a M4 je možno docílit průtoku 1950 l/s. V případě náhlého výpadku těchto čerpadel byla uvažována stoprocentní funkčnost zavodňovací nádrže, vypočteno bylo zvýšení tlaku při zavření zpětných klapek. Ze čtyř posuzovaných variant došlo ve variantě čtvrté k nejvyšší dosažené hodnotě přetlaku, jehož hodnota byla necelých 3 Bar. I tento přírůstek tlaku lze tedy považovat vzhledem k tlakové třídě potrubí za neškodný.

Závěrem lze podle dosažených výsledků shrnout, že stávající ani nově uvažovaná technologie není nebezpečně ohrožována vodními rázy. Stávající ochrana výtlačného řadu svou funkci plní dostatečně a v tuto chvíli není třeba její výměny nebo doplnění.

Doporučení vyplývající z diplomové práce:

- Výběr velikosti potrubí, tlakové třídy a materiálu potrubí přizpůsobit komplexní analýze distribuce vody.
- Vhodným nástrojem navrhování a posuzování distribuce vody je modelování průběhu jednotlivých veličin (průtok, rychlost, tlak, apod.).
- Při řešení výběru vhodné protirázové ochrany je nutné řešit dva případy nebezpečí – snížení tlaku a zvýšení tlaku.
- Volba protirázové ochrany musí být volena s ohledem na celkový charakter distribuce vody.

- Výběr zpětných klapek musí být v souladu s ekonomickými cíli čerpání vody.
- Podle požadavku lze volit takový typ zpětné armatury, který zajistí minimalizaci vodních rázů.
- Ideální zpětná armatura se uzavře tehdy, je-li průtok nulový a nedojde tedy k rozběhu zpětného proudění.
- Velikost a typ zpětné armatury musí být voleny tak, aby došlo k jejímu plnému otevření pro běžný návrhový průtok vody.
- Velmi důležitým momentem je komunikace a spolupráce projektanta, investora, dodavatele technologie a stavebních prací.
- Dodavatel technologie by měl předat veškeré možné podklady a zkušenosti související s navrhováním, posuzováním a montáží technologických zařízení.
- Ideálním případem je provedení měření za provozu s cílem kalibrace a verifikace modelovaného průběhu vodního rázu. V tomto případě se jedná o vypínací zkoušku se zaznamenáním průtoku, tlaku a zaznamenáním chodu čerpadla během této vypínací zkoušky.
- Provést kalibraci a verifikaci dat po zaměření průběhu tlakových pulsací na stávajícím stavu, poté vytvořit model nové sítě.
- Vhodným typem protirázové ochrany je zvýšení setrvačnosti čerpadla pomocí setrvačnicků (prodlouží se doba doběhu čerpadel a zlepší se reakční schopnost zpětné klapky).
- Pro zvýšení spolehlivosti provozu čerpání bylo navrženo jako nejvhodnější opatření hydraulicky řízený přepouštěcí ventil DN150.

5 SEZNAM LITERATURY A PODKLADŮ

- [1] PAVLOK, Bohuslav. Potrubní systémy a armatury – část 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2001. 81 s.
- [2] KRIŠ, Jozef., HANKOVÁ, Martina. *Scenáře poruch pro plán obnovy vodovodních sítí* Bratislava: Stavebnej fakulta STU v Bratislavě, 2014
- [3] NOVÁK, Josef a kol. *Příručka provozovatele vodovodní sítě*. Praha: Medim, spol. s.r.o., 2003. 151 s. ISBN 80-238-9946-5
- [4] PN – Jmenovitý tlak (PressureNominal) [online]. eTZBshop.cz [cit. 2016-07-11]. Dostupné z WWW: <http://www.etzbshop.cz/advisor/pn-jmenovity-tlak-pressure-nominal>
- [5] DUFKA, Jaroslav. Spojování plastového potrubí. [online].[cit. 2016-08-21]. Dostupné z WWW:<http://www.topin.cz/download.php?idx=72291&di=7>
- [6] HOBAS [online]. hobas.cz. Dostupné z WWW:<http://www.hobas.cz/>
- [7] ROČEK, Jaroslav. Průmyslové armatury. Praha: Informatorium, 2002. ISBN 80-7333-000-8
- [8] PAM SAINT GOBAIN [online]. saint-gobain-pam.cz [cit. 2016-09-10]. Dostupné z WWW:<http://www.saint-gobain-pam.cz/classic/>
- [9] ATJ SPECIAL s r.o. [online]. atj.cz [cit. 2016-09-10]. Dostupné z WWW:<http://www.atj.cz/trubni-tvarovky-ostatni-prirubovy-t-kus>
- [10] PAM SAINT GOBAIN [online]. saint-gobain-pam.cz [cit. 2016-09-10]. Dostupné z WWW:<http://www.saint-gobain-pam.cz/s-ovladanim-pomoci-servopohonu/>
- [11] KSB [online]. ksb.com [cit. 2016-09-10]. Dostupné z WWW:https://www.ksb.com/fluidfuture-cz/cerpadla_a_armatury/High-efficiency_standardised_water_pumps
- [12] Mendelova univerzita v Brně [online]. is.mendelu.cz [cit. 2016-09-10]. Dostupné z WWW:https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=11968
- [13] ATJ SPECIAL s r.o. [online]. atj.cz [cit. 2016-09-17]. Dostupné z WWW:<http://www.atj.cz/regulacni-ventily-cla-val-tlakove-redukzni-ventil-typ-nge>
- [14] ATJ SPECIAL s r.o. [online]. atj.cz [cit. 2016-09-17]. Dostupné z WWW:<http://www.atj.cz/ostatni-ostatni-montazni-vlozka>

- [15] VODÁRENSKÝ INFORMAČNÍ PORTÁL[online]. vodovod.info [cit. 2016-09-17]. Dostupné z WWW:<http://www.vodovod.info/index.php/tema/292-zakladni-konstrukcni-typy-vodomeru#.V9z3FfkS-UI>
- [16] DEBRECZENI, Ondřej. Hydraulický ráz a protirázové ochrany. Centrum odborné přípravy Sezimovo Ústí. Studijní texty. 2004.
- [17] Tlakový ráz v hydraulickém systému bazénů [online]. ASTRAPOOL.cz [cit. 2016-10-12]. Dostupné z WWW:www.astralpool.cz/podpora/Tlakovyraz.pdf
- [18] MATOUŠEK, Václav. Hydraulika 3. Neustálené proudění v tlakových potrubích (přednáška). Praha: ČVUT. Listopad 2015.
- [19] Provozní řád. ÚV Káraný, Uměla infiltrace. Zpracovatel: ELCOM a.s.
- [20] HAVLÍK, Aleš. Hydraulika 2. Proudění v potrubí (přednáška). Praha: ČVUT. Říjen 2013.
- [21] TIJSSILING, Arris S. ANDERSON, Alexander. The Joukowsky equation for fluids and solids [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z WWW:http://www.win.tue.nl/~atijssel/pdf_files/CASA-08-16.pdf
- [22] GHIDAOUI, Mohamed. ZHAO, Ming. AXWORTHY, David. MCINNIS, Duncan. A Review of Water Hammer Theory and Practice. [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z WWW:http://hydraulics.unibs.it/hydraulics/wp-content/uploads/2012/04/A_review_of_water_hammer_theory_and_practice.pdf
- [23] BERGANT, A. SIMPSON, A. TIJSSILING, A. Waterhammer with column separation: a review reaserch in the twentieth century. [online]. [cit. 2016-10-29]. Dostupné z WWW:<https://www.win.tue.nl/analysis/reports/rana04-34.pdf>
- [24] HAVLÍK, Vladimír. Výpočet hydraulického rázu. Sovak. Časopis oboru vodovodů a kanalizací. Jílové u Prahy. Mgr. Pavel Fučík. 5/2013. ISSN 1210-3039.
- [25] HAWLE [online]. hawle.cz [cit. 2016-11-05]. Dostupné z WWW:<http://www.hawle.cz/cz/produkt/hydrant-duo-podzemni-k24008012516/?nRefCatId=>
- [26] HAVLÍK, V. INGEDULD, P. VANĚK, S. ZEMAN, S. *Matematické modelování neustáleného proudění*. Praha: ČVUT. 1992. ISBN 80-01-00764-2

- [27] PAVLÍK, Václav. *Dynamická charakteristika zpětné armatury*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016. 66s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.
- [28] HEILER, Robert. *Armatury ve vodárenství a čištění odpadních vod*. VAG-ArmaturenGmbH.
- [29] JMA [online]. jamhod.cz [cit. 2016-11-06]. Dostupné z WWW:<http://www.jmahod.cz/cs/produkty/detail-products/product/duojetR-od-a-zavzdusnovaci-ventil.html>
- [30] KP VALVES [online]. kpvalves.cz [cit. 2016-11-06]. Dostupné z WWW:<http://www.kpvalves.cz/produkty/pojistne-ventily/sca/>
- [31] FRANČ, Ivan. Využití regulačních ventilů ve vodárenství. *Sovak. Časopis oboru vodovodů a kanalizací. Jílové u Prahy. Mgr. Pavel Fučík. 3/2003.*
- [32] Provozní řád. Umělá infiltrace. Úpravna vody Káraný. Zpracovatel: Elcom a.s. Aktualizace 06/2012.
- [33] JENČÍK, Josef., VOLF, Jaromír a kol. *Technická měření*. Praha: ČVUT. 2000. ISBN 80-01-02138-6
- [34] HAINDL, Karel. *Hydraulický ráz ve vodovodních a průmyslových potrubích*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. 1963.
- [35] VAG academy. Interní podklady dodavatele.
- [36] PAM academy. Interní podklady dodavatele.
- [37] Interní podklady firmy ERMEX ENGINEERING spol. s r. o.
- [38] Místní šetření se zástupci Vodárny Káraný a.s.
- [39] BALLUN, John V. *A methodology for prediction check valve slam*. Journal AWWA, 99 (3), 2007.
- [40] PHALEMPIN, Gwenn A. [online] Technical surge Session. Hydraulic transient and Surge protection device. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z WWW: http://www.env.gov.nl.ca/env/waterres/training/adww/2012/09_Gwenn_Phalempin.pdf
- [41] VALMATIC. [online] *Surge Controls in Pumping Systems*. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z WWW: <http://www.valmatic.com/pdfs/SurgeControlinPumpingSystems3-17-09.pdf>

6 SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Nejčastější poruchy potrubí pro různé potrubní materiály [2]	13
Tab. 1.2 Příklady orientačních hodnot rychlosti zvuku pro jednotlivá potrubí [16]	26
Tab. 2.1 Zadávací parametry VN, VN2, VN3.....	52
Tab. 2.2 Zadávací parametry místních ztrát.....	54
Tab. 2.3 Zadávací parametry zpětných klapek.....	54
Tab. 2.4 Zadávací parametry uzlů (provoz čerpadla M3 – stávající stav)	56
Tab. 2.5 Zadávací parametry uzlů (provoz čerpadla M1 – nový stav)	56

7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Litinová trubka s jednokomorovým hrdlem [8]	14
Obr. 1.2 Přírubový T-kus [9]	14
Obr. 1.3 Uzavírací klapka s elektropohonem [10].....	16
Obr. 1.4 Podzemní hydrant DUO [25]	16
Obr. 1.5 Regulační ventil (vlevo) [13], montážní vložka (vpravo) [14],	17
Obr. 1.6 Čerpadla vhodná pro vodárenské účely [11]	19
Obr. 1.7 Dopravní výška čerpadla [18].....	20
Obr. 1.8 Pracovní bod čerpadla [18].....	20
Obr. 1.9 Zemní vodojem [12].....	21
Obr. 1.10 Vývoj tlakového rázu [11]	23
Obr. 1.11 Matematický popis vodního rázu [18]	25
Obr. 1.12 Průběh vodního rázu [18]	28
Obr. 1.13 Typy vodních rázu [18]	30
Obr. 1.14 Posouzení tlakových poměrů v absolutních tlacích [20]	30
Obr. 1.15 Posouzení tlakových poměrů v relativních tlacích [20]	31
Obr. 1.16 Průběh tlaku za zpětnou armaturou [27].....	33
Obr. 1.17 Příklady vlivu průběhu průtoku a tlaku v čase [16]	34
Obr. 1.18 Vliv schéma čerpání na velikost proudového zpomalení [35]	36
Obr. 1.19 Dynamická charakteristika zpětných armatur [27]	36
Obr. 1.20 Tlaková nádoba s kompresorem (vlevo), s membránou (vpravo) [11]..	38
Obr. 1.21 Protirázové provedení od / zavzdušňovacího ventilu [29].....	39

Obr. 1.22 Řez konstrukcí pojistného ventilu [30]	40
Obr. 1.23 Průběh tlakového rázu a sestava redukčního ventilu [31]	40
Obr. 1.24 Čerpadlo a uzavírací armatura na obtoku [40]	41
Obr. 2.1 Umístění ČSSV, výtlačného řadu a haly filtrace	42
Obr. 2.2 Provozní schéma stávající ČSSV [37]	44
Obr. 2.3 Provozní schéma nové ČSSV [37]	45
Obr. 2.4 Provozní schéma ochrany výtlačného řadu [32].....	46
Obr. 2.5 Podélný profil výtlačného řadu surové vody [37]	48
Obr. 2.6 Schéma čerpání vytvořené v programu VODRAZ – idealizované	50
Obr. 2.7 Schéma čerpání vytvořené v programu VODRAZ – výpočetní.....	51
Obr. 2.9 Var. I – podélný profil.....	59
Obr. 2.10 Var. I – průběh průtoku.....	60
Obr. 2.11 Var. I – průběh tlaku	60
Obr. 2.12 Var. II – nereálný průběh výpadku čerpadla.....	61
Obr. 2.13 Var. II – podélný profil.....	62
Obr. 2.14 Var. II – průběh průtoku.....	63
Obr. 2.15 Var. II – průběh tlaku	63
Obr. 2.16 Var. III – podélný profil.....	64
Obr. 2.17 Var. III – průběh průtoku.....	65
Obr. 2.18 Var. III – průběh tlaku	66
Obr. 2.19 Var. IV – Podélný profil potrubí.....	67
Obr. 3.1 Průběh tlaku pro variantu s a bez zavodňovací nádrže	70
Obr. 3.2 Průběh průtoku pro variantu s a bez zavodňovací nádrže.....	71
Obr. 3.3 Schéma umístění měřících armatur.....	74
Obr. 3.4 Dispoziční návrh protirázové ochrany.....	79

8 SEZNAM GRAFŮ

Graf. 1 Charakteristika čerpadla M3, $n=1490\text{ot/min}$	53
Graf. 2 Charakteristika čerpadla M1, $n=670\text{ot/min}$	53
Graf. 3 Dynamická charakteristika zpětné klapky se šikmým sedlem	55