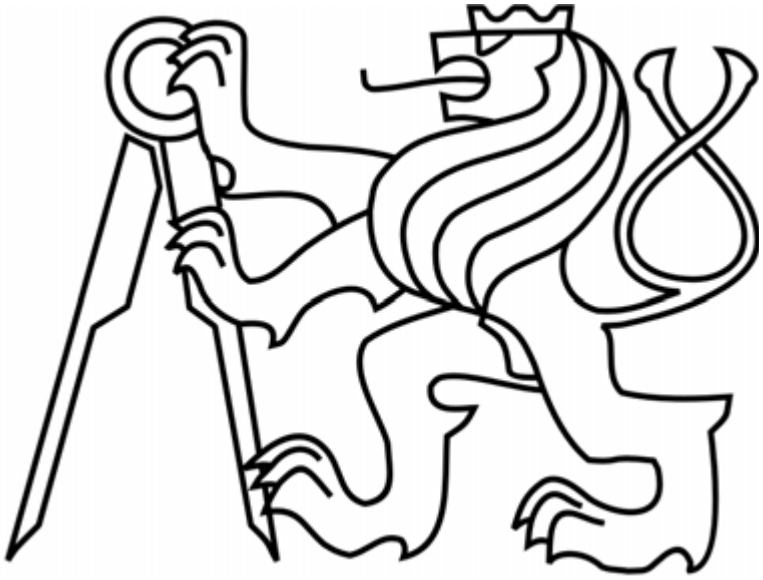
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

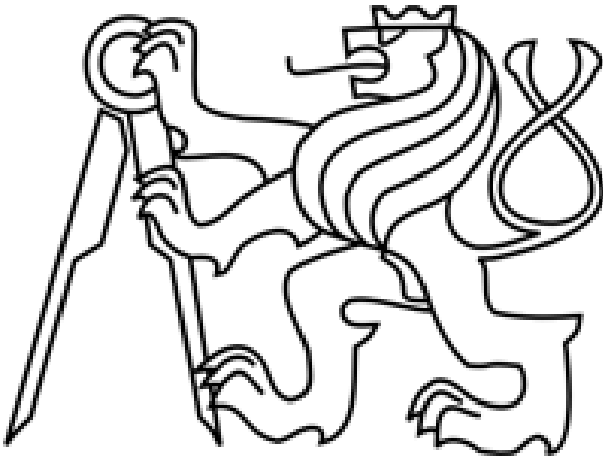
V PRAZE 2010 PAVEL ŠVARC

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V

PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



Studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Řídicí technika (magisterský)

Modelování a řízení kvality vody ve vodárenské síti

Modelling of water distribution network and water quality controlling

Diplomová práce

Autor:	Pavel Švarc
Vedoucí DP:	doc. Ing. Petr Horáček, CSc.
Oponent:	Ing. Radek Šindelář PhD.

V Praze dne 12.5.2010

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze, dne …….. ……..

Děkuji doc. Ing. Petru Horáčkovi, CSc. za možnost pracovat na projektu s možným praktickým uplatněním, Rockwell Automation za výborné podmínky k práci a pracovní materiály, panu Ing. Dušanu Libosvárovi z VAKV a.s. za vlídný přístup a poskytnuté podklady a v neposlední řadě také Ing. Radku Šindelářovi PhD. za cenné rady nejen ohledně diplomové práce.

Název práce

Modelování a řízení kvality vody ve vodárenské síti

Abstrakt

Tento dokument se věnuje problematice distribučních sítí pitné vody, konkrétně jejich modelování a řízení. Je zde obsažen popis vývoje hydraulického modelu distribuční sítě a jeho implementace vhodná pro simulaci v reálném čase a jeho nadstavby, diskrétního modelu stáří vody. V práci je uveden nový přístup k výpočtu stáří vody vhodný pro modelování a simulaci v prostředí Matlab/Simulink. Pro oba typy modelů je vytvořena knihovna komponent v tomto prostředí. Práce obsahuje výčet cílů řízení distribuční sítě a přístupy k jejich realizaci.

Knihovny komponent včetně v práci uvedených teoretických podkladů jsou využity ke stavbě modelu části skutečné distribuční sítě v případové studii v druhé polovině dokumentu. Tento model je porovnán s měřenými historickými daty. Dále je navrženo programové řízení pro dosažení v textu uvedených cílů. Práce je prvním krokem k vytvoření hydraulického modelu a modelu stáří vody v reálném čase celé skutečné sítě a využití řízení v praxi.

Klíčová slova: Modelování v reálném čase, distribuční síť, pitná voda, řízení, kvalita vody, stáří vody

Title

Modeling and control of water quality in a water distribution network

Abstract

This document is devoted to the problematics of water distribution networks, specificaly to their control and modeling. The process of developing the hydraulic model of distribution network and its implementation suitable for real time simulation is described in this paper. Water age model is created as a superstructure of hydraulic model. The new method of water age calculation for the real time simulations in Matlab/Simulink is introduced in the text. The library of components is created in this environment for both of these models. The goals and targets of the control algorithms are stated.

The theoretical background and the libraries of components are used in order to create a model of a part of a real distribution network in the case study in the second part of this document. This model is compared with the measured data and its similarity with the real system is reviewed. The control algorithm is designed to reach the goals listed in the text. This document is the first step in developing the real time hydraulic and water age model of the existing water distribution network and its control based on the water quality.

Keywords: Real-time modeling, distribution network, drinking water, control, water quality, water age

Obsah

1. Teoreticky úvod a motivace 4
   1.1 Motivace a cíle 4
   1.2 Pitná voda 4
   1.3 Distribuce pitné vody 4
   1.4 Popis soustavy 5
   1.5 Spotřeba pitné vody a její skladování 7
   1.6 Zdroje, kvalita a úprava vody 9
   1.7 Možnosti a cíle řízení distribuční soustavy 9
   1.8 Závěr 9
2. Modelování 10
   2.1 Úvod 10
   2.2 Způsoby modelování a simulací 10
   2.3 Hydraulický model 11
      2.3.1 Transport vody 11
      2.3.2 Ztráta energie – třecí síly, redukce 13
      2.3.3 Zisk energie – gravitace a čerpací stanice 16
      2.3.4 Knihovna komponent distribučního systému 17
      2.3.5 Příklad 20
      2.3.6 Závěr 21
   2.4 Modelování spotřeby a jiných odběrů pitné vody z distribuční soustavy 21
   2.5 Modelování kvality, stáří a dalších atributů pitné vody 22
      2.5.1 Metody modelování v potrubí a vodojemech 23
      2.5.2 Knihovna komponent modelu stáří vody 26
      2.5.3 Příklad 28
      2.5.4 Závěr 29
3. Řízení 31
   3.1. Cíle řídicího systému a nástroje k jejich dosažení 31
      3.1.1. Snížení úniků vody 31
      3.1.2. Minimalizace stáří vody, maximalizace kvality vody 34
      3.1.3. Snížení provozních a servisních nákladů 35
   3.2. Závěr 35
4. Případová studie – Distribuční soustava pitné vody VAKV 37
   4.1 Obecný popis soustavy 37
   4.2 Hydraulický model 39
      4.2.1 Tvorba základního hydraulického modelu 39
      4.2.2 Analýza obdržených měřených zaznamenaných dat 40
      4.2.3 Ladění matematického modelu 41
      4.2.4 Předvedení funkce 42
      4.2.4 Závěr 45
   4.3 Model stáří vody 46
      4.3.1 Popis tvorby 46
      4.3.2 Ladění 46
      4.3.3 Předvedení funkce 47

4.3.4 Závěr 48
4.4 Návrh řízení části distribuční soustavy VAKV 49
4.5 Ekonomické srovnání 53
4.6 Závěr 55
5. Závěr 56
6. Literatura a zdroje 57
7. Přílohy 59
7.1 Tabulka koeficientů C různých materiálů pro metodu Hazen-Williams 59
7.2 Tabulka relativní hrubosti různých materiálů 60
7.3 Graf závislosti koeficientu tření f metody Darcy-Weisbach v závislosti na Reynoldsově čísle a relativní hrubosti materiálu 61
7.4 Koeficient hrubosti n pro metodu Chezy-Manning 62
7.5 Koeficient K_L pro vedlejší ztráty tlaku 63
7.6 Hydraulický model Karolinka – Ústí – Lužná celek 64
7.7 Hydraulický model oblasti Karolinka 65
7.8 Hydraulický model oblasti Ústí 66
7.9 Hydraulický model oblasti Lužná 67
7.10 Model stáří vody oblasti Karolinka 68
7.11 Model stáří vody oblasti Ústí 69
7.12 Model stáří vody oblasti Lužná 70

1. Teoreticky úvod a motivace

1.1 Motivace a cíle

Pitná voda je esenciální pro život, přístup k ní je jednou z nejzákladnějších potřeb lidstva. Oba termíny: „přístup“ a „pitná voda“ se za dobu existence lidstva velice změnily a prošly značným vývojem. Požadavky na kvalitu vody neustále rostou stejně jako na kvalitu její distribuce. Motivací pro tuto práci je vytvoření souhrnu obecných teoretických znalostí o distribučních sítích pitné vody, o jejich historii, funkci, a o problémech, se kterými se soustavy potýkají. Cílem je navrhnout možná řešení těchto problémů a funkci soustav zlepšit a to především v oblasti stáří vody a provozních nákladů.

Práce je rozdělena na tři části. První část (kapitola 1) je věnována výhradně teorii: popis distribučních sítí, obecné informace o komponentech soustav a jejich řízení. Druhá část (kapitola 2 a 3) se zabývá modelováním a řízením distribučních soustav.
Z teoretických základů je v těchto kapitolách vyvinut hydraulický model a model stáří vody spolu s návrhem řízení. Poslední částí (kapitola 4) je aplikace a kombinace všech poznatků z předchozích kapitol. Je zde vytvořen model části reálné distribuční sítě pitné vody společnosti Vodárny a Kanalizace Vsetín a.s. a návrh programového řídicího algoritmu spolu s ekonomickým zhodnocením tohoto řízení.

1.2 Pitná voda

Pitná voda je podle vyhlášky ministerstva zdravotnictví 252/2004 Sb. [1] definována následovně: „Pitná a teplá voda nesmí obsahovat mikroorganismy, parazity a látky jakéhokoliv druhu v počtu nebo koncentraci, které by mohly ohrozit veřejné zdraví“. Je také vyžadováno, aby pitná voda splňovala mnoho dalších kritérií jako je absence zápachu, bezbarvost a další. Pro Českou republiku jsou parametry definující pitnou vodu určeny ve zmíněné vyhlášce.

1.3 Distribuce pitné vody

V dnešní době je ve vyspělé části světa standardem přístup k pitné vodě prakticky na každém místě, kde se zdržují lidé. Lidé berou jako samozřejmost, že při otočení kohoutku v místě jejich bydliště či pracoviště teče čistá voda o určité teplotě a daném tlaku. Ještě v relativně nedávné historii tomu tak ovšem nebylo. K tomu, aby distribuce vody mohla být tak spolehlivá, kvalitní a relativně levná jako je nyní, byl nutný značný pokrok ve vědě a technologiích.

Od pradávna si lidé museli pro vodu chodit ke zdrojům a donášet ji do svých obydlí. Faktem, že získání vody vyžadovalo značné úsilí, byla její spotřeba minimalizována. Velké objemy vody, které spotřebovává dnešní společnost ke sprchování, zalévání či průmyslové výrobě není možné doručit jinak než komplexním distribučním systémem.

Nejstarší pozůstatky potrubního distribučního systému byly nalezeny na území starého Řecka na ostrově Kréta. Voda těmito hliněnými trubkami protékala v druhém tisíciletí před Kristem. Několik století před naším letopočtem bylo podobné potrubí využíváno na území dnešního Turecka v tehdejší Malé Asii [2].

První sofistikovanější distribuční systém byl vystavěn ve starém Římě. Značná koncentrace lidí způsobila, že studně a blízké prameny zásobující Řím pitnou vodou byly znečištěny a bylo nezbytné dopravovat vodu ze vzdálených pramenů. První akvadukt, pojmenovaný Appia, který tuto funkci plnil, byl postaven v roce 312 př.n.l. Appia měří necelých 17km a převýšení od zdroje k jeho konci je 10 m. Rozšíření sítě akvaduktů dopravujících vodu z velice vzdálených a vyvýšených míst se záhy rozrostla, aby pokryla vzrůstající poptávku po vodě. Z historických záznamů a archeologických vykopávek je zřejmé, že síť akvaduktů byla v dodávce vody velice nespolehlivá a prakticky neustále bylo významné množství akvaduktů v opravě [3].

Obr. 1.1 Pozůstatky akvaduktu Aqua Marcia, nejdelšího ze všech 11 akvaduktů starého Říma (91 km)

Po pádu Říma se od budování vodovodních distribučních sítí upustilo a úroveň hygieny klesala až do příchodu renesance instalacemi litinových potrubí [2]. Od této doby se distribuce vody výrazně zlepšovala až do dnešní doby, kdy jsou k plánování výstavby a řízení soustav tvořeny sofistikované počítačové modely.

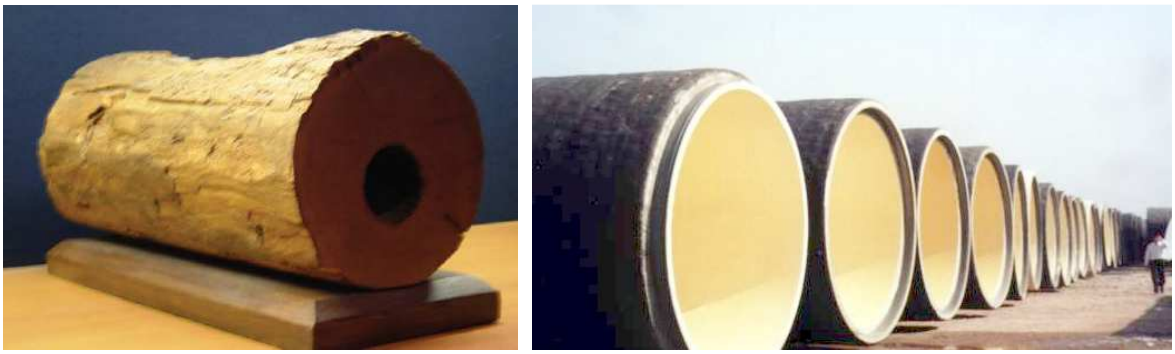
1.4 Popis soustavy

Vodárenskou síť lze rozdělit na dvě základní části: hlavní páteřní síť a koncovou distribuční síť. Koncová distribuční síť má za úkol rozvést vodu potrubím o menších průměrech přímo ke koncovým zákazníkům (domácnosti atd.). Páteřní síť propojuje potrubím o mnohdy několikrát větších průměrech zdroje vody, úpravny vody, velké vodojemy a reservoáry např. i mezi několika městy. Tato práce se věnuje výhradně páteřním sítím. V následujícím textu budou uvedeny ty nejdůležitější komponenty, ze kterých se páteřní sítě skládají; bude vyčtena jejich základní funkce, materiály, ze kterých jsou vyráběny a problémy spjaty s jejich využitím.

Potrubí

Pitnou vodu je nutné transportovat na dlouhé vzdálenosti a během tohoto transportu je nezbytné, aby se její chemické složení změnilo co nejméně. Potrubí zajišťuje odloučení protékajícího média od okolí. Ve vodárenské distribuční soustavě je voda přepravována v potrubích pod tlakem. Materiály, ze kterých je potrubí vyrobeno se liší a to především díky změnám v technologiích, které jsou v historii značné. Materiály se také liší podle typu

využití a zatížení potrubí v síti. První potrubí, jak již bylo zmíněno výše, bylo hliněné. V 15. století bylo poprvé použito litinové potrubí. Dřevěné trubky byly používány v 16. s 17. století. Další inovací bylo použití olověného, azbestocementového, ocelového potrubí a plastového potrubí z PVC. Technologicky nejnovější je sklolaminát. Síť potrubí je tedy často vyrobena z mnoha druhů materiálů. Část materiálů používaných v historii je zdravotně závadných (olovo, azbestocement) a proto jsou tyto segmenty vyměňovány za potrubí z vhodnějších materiálů. Materiál, ze kterého je potrubí vyrobeno, ovlivňuje kvalitu vody. Chemikálie přidávány do vody pro desinfekci reagují se stěnami potrubí s různou intenzitou a tvoří odlišné vedlejší produkty. Materiál také ovlivňuje rozsah tvorby vodního kamene na stěnách potrubí (povrchová úprava vnitřní části potrubí).



Obr. 1.5 a) Dřevěná trubka z původní distribuční soustavy v Seattlu. b)Betonové potrubí (až do 2,5Mpa)

Čerpací stanice

Čerpacími stanicemi, které jsou nezbytné pro přečerpávání vody do větších výšek, vodárenská soustava překonává nerovnosti terénu a je schopna zásobovat vodou i místa umístěna výše, než je zdroj. Stanice je často tvořena několika nezávislými čerpadly, která mohou pracovat současně nebo se střídají pro minimalizaci opotřebování. Čerpadlo je řízeno frekvenčním měničem nebo je připojeno přímo na síť. Jeho výstupní tlak může být regulován nebo se jedná o tzv. on/off čerpadlo – je-li v provozu, tvoří na výstupu jmenovitý tlak.

Vodojem / reservoár

Zásobníky vody jsou budovány nejen za účelem vyhladit špičky denní spotřeby, ale také zabezpečit dostatek vody při krátkodobém selhání zdroje, opravách potrubí či požáru a stabilizaci tlaku v celé soustavě. Některé nádrže slouží k mísení vody z různých zdrojů nebo z úpraven vody. Zásobníky vody mají různé tvary, jsou z různých materiálů a mají rozličné umístění v závislosti na jejich funkci. Mohou být otevřené, uzavřené nebo přetlakové pro zvýšení tlaku u výtoku. Výška umístění zásobníku je volena v závislosti na výškovém rozložení celé sítě a přispívá k vyrovnání tlaku systému (věžové vodojemy).

Obr. 1.6 a) Otevřený reservoár v Tampě b) Vodojem ve Švédsku c) Zásobník vody v Kalifornii

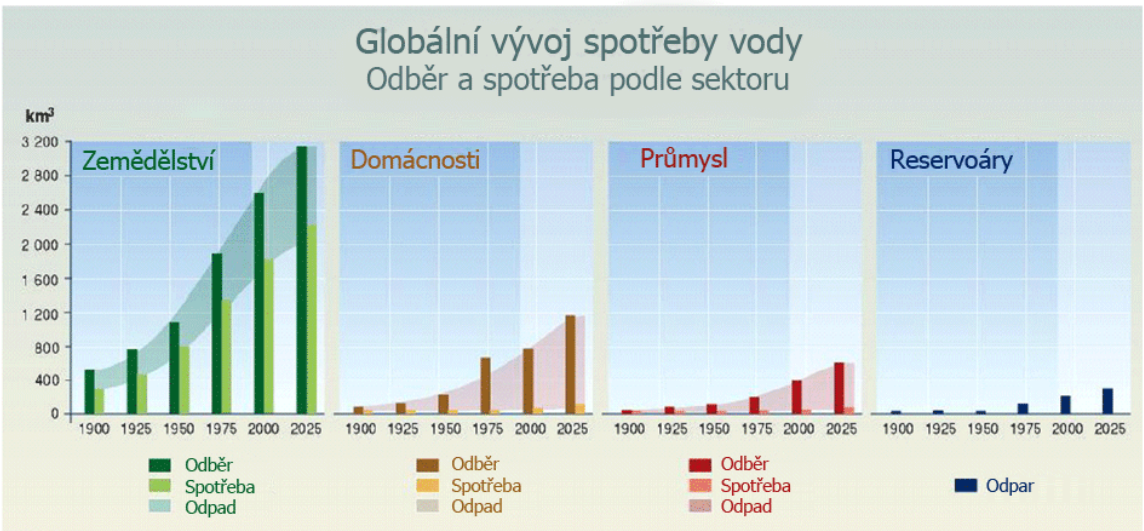
Ventily

Vedle čerpacích stanic jsou ventily hlavními řídicími prvky distribučních sítí. Ventily lze rozdělit na dva základní druhy: řídicí a servisní. Servisní ventily jsou nejčastěji ovládány manuálně a využívají se při plánované odstávce (čištění, výměna, servis) nebo při poruše. Servisní ventily by měly být v soustavě rozmístěny tak, aby bylo při poruše nebo nutném servisu určitého úseku bez dodávky pitné vody co nejméně spotřebitelů. Řídicí ventily se dále dělí podle své funkce: řízení průtoku a tlaku, zpětnovazební výškou řízené ventily a zpětné klapky.

Některé z výše uvedených komponent jsou osazeny měřícími a řídicími členy. Valná většina distribuční sítě však měřená není a je nutné disponovat kvalitním modelem např. pro zjištění aktuálního průtoku či tlaku v potrubí nebo výšky hladiny.

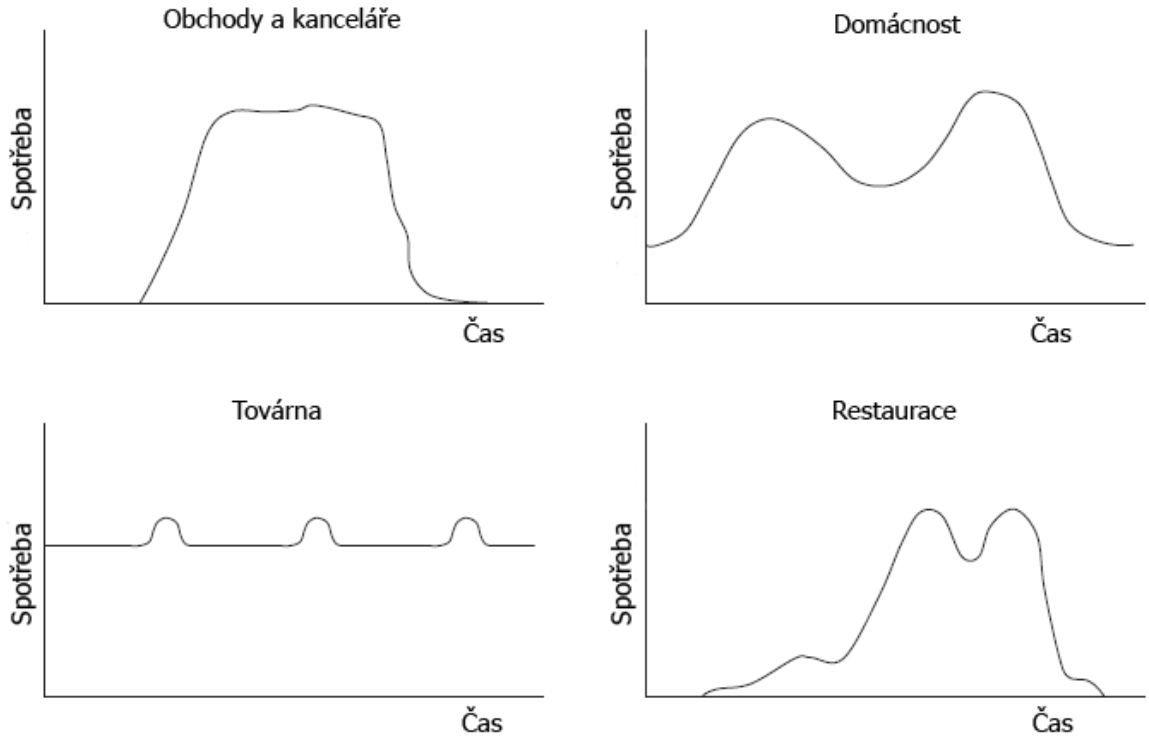
1.5 Spotřeba pitné vody a její skladování

Spotřeba pitné vody (ta ovšem nemusí být nutně vypita nebo použita k přípravě potravy) na osobu je v různých obdobích v historii velice odlišná stejně jako na různých místech na Zemi. S růstem civilizace roste i spotřeba vody. Vývoj spotřeby pitné vody ve světě je znázorněn na obr.1.2.



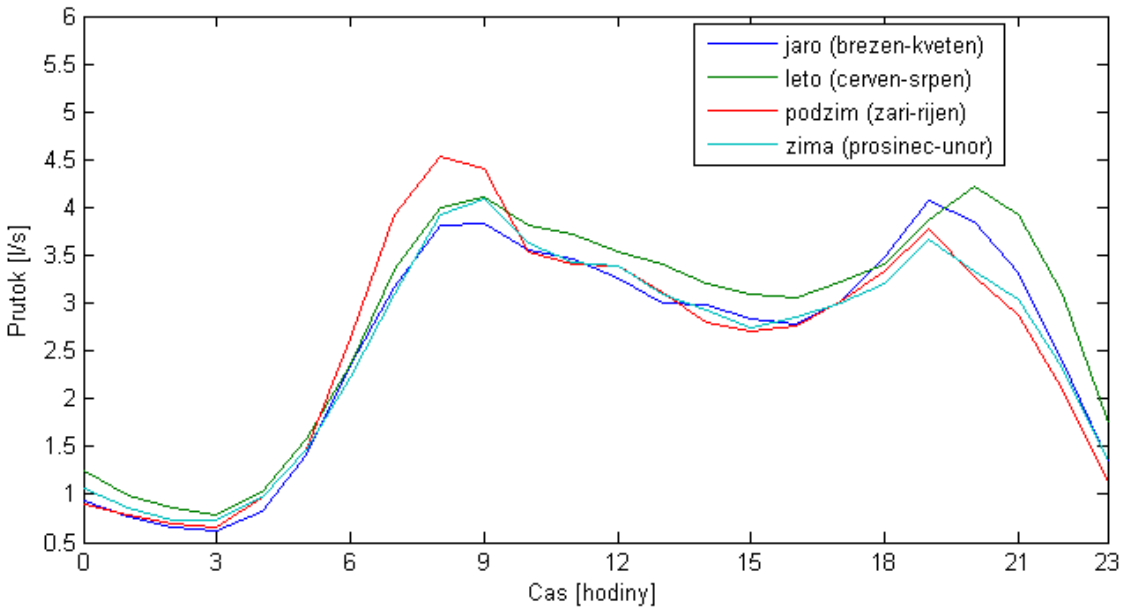
Obr. 1.2 Vývoj celosvětové spotřeby vody v jednotlivých sektorech [5]

Spotřebitele pitné vody lze rozdělit do několika skupin, každá skupina má svoji tradiční denní křivku spotřeby. Na grafech níže (obr. 1.3) jsou některé z těchto křivek znázorněny. Počet obyvatel, počet a typ továren a ostatní typy spotřebitelů v oblasti určují celkovou křivku spotřeby vody, od které se odvíjí design distribuční sítě a její řízení.



Obr. 1.3 Některé z typických denních křivek spotřeb vody pro různé druhy odběratelů [4]

Vliv na spotřební křivku má i roční období, počasí, nebo zda se jedná o pracovní či volný den. Na grafu obr. 1.4 jsou zobrazeny typické křivky spotřeby pro různá roční období.



Obr. 1.4 Průměrná denní spotřební křivka pro různá roční období v oblasti Horní Lideč (distribuční soustava VAKV)

V případě výrazných špiček spotřeby vody během dne (obr. 1.4) je nezbytné vodu skladovat a v těchto chvílích, kdy je přítok ze zdroje nedostačující, distribuovat vodu z vodojemů, reservoárů nebo z jiných zásobníků. Skladováním vody lze pokrýt špičky spotřeby, avšak za cenu zhoršování kvality – stárnutí akumulované pitné vody. Blíže se odhadu spotřeby vody a tvarům jednotlivých křivek spotřeby budeme věnovat v kapitole 2.4.

1.6 Zdroje, kvalita a úprava vody

S nutností dopravovat vodu ze vzdálených zdrojů a skladovat ji z důvodu pokrytí špiček spotřeby roste doba, kterou voda stráví v distribuční soustavě – v zásobníku nebo v potrubí. Tato doba má za následek změnu parametrů vody – především se v ní začínají množit mikroorganismy. K předcházení znehodnocování vody slouží aplikace desinfekčních látek. Tyto látky jsou do vody přidávány v úpravnách, kam je voda čerpána ze zdrojů nebo v době, kdy hrozí, že její kvalita klesne pod hranici použitelnosti. Desinfekční látky reagují se stěnami potrubí a vodojemů a po určité době se zcela rozpadnou a jejich účinek vymizí – proto je stále velice důležité i upravenou vodu co nejdříve dopravit ke spotřebiteli. Bližší rozbor kvality vody a jeho modelování bude následovat v kapitole 2.5. Typy zdrojů pitné vody pro vodárenské soustavy jsou dva: podzemní a povrchové. Povrchové zdroje (řeky, jezera, přehrady) je nutné tzv. surovou vodu bezpodmínečně chemicky upravit. Podzemní zdroje, i přes dostatečnou kvalitu je nutné upravit z důvodu možné kontaminace při transportu. Úprava podzemní a povrchové vody se však liší.

1.7 Možnosti a cíle řízení distribuční soustavy

Dodávka vody v dnešní době podléhá striktním pravidlům, ať se jedná o její kvalitu, tlak nebo garanci dostupnosti. Pro dodržení všech těchto často zákonem stanovených požadavkům je nutné celou vodárenskou síť kvalitně řídit. Vzhledem k faktu, že provozovatelé distribučních soustav jsou komerční společnosti orientované na zisk, se ke všem výše zmíněným omezením přidává ještě maximalizace výnosu z distribuce vody. Distribuční společnosti se snaží minimalizovat spotřebu drahé elektrické energie (čerpadla využívají převážně v noci), minimalizovat opotřebení jednotlivých komponent sítě, ale zároveň se musí vejít do zákonem předepsaných norem. Těmto proti sobě stojícím cílům a řízení distribuční soustavy obecně se budeme věnovat v kapitole 3.

1.8 Závěr

V první kapitole byly shrnuty základní informace o distribučních systémech pitné vody – popis funkce, historie a jednotlivých komponentů. Hlavním účelem této části bylo seznámení s principy a zákonitostmi vodárenských soustav a příprava pro kapitoly následující, kde budou tyto informace využity pro vývoj modelů komponent distribučních síti a návrhu jejich řízení. Obecné informace budou také využity v případové studii v kapitole 4.

2. Modelování

2.1 Úvod

Model je matematický popis systému. Kvalita modelu se odvíjí od podobnosti modelu s předlohou a to podle předem zvolených kritérií. Samotné posuzování, zda model dostatečně za všech okolností odpovídá skutečnému systému je podobně náročné jako model sestrojit. Valná většina modelovaných jevů je natolik složitá, že je nezbytné je zjednodušit a to platí i o modelování distribuční síti pitné vody. Proudění kapalin patří obecně mezi jeden z nejsložitěji matematicky popsatelných fyzikálních jevů.
V hydraulickém modelu, který má pouze za úkol popsat směr objemového průtoku média, je aplikována základní fyzika – hydraulika. Pro kvalitní modelování stáří a kvality vody je již nutné znát základy o proudění a mísení kapalin spolu s chemickými reakcemi odehrávajícími se ve vodě.

Modelování distribučních soustav pitné vody má mnoho důvodů a ty se v průběhu let, kdy je modelování díky vyspělé výpočetní technice proveditelné, měnily. Modely distribučních soustav se dají rozdělit na dvě skupiny. První skupina je určena ke vhodnému designu budoucích distribučních soustav a případně k rozšiřování stávajících. Jedná se o modely, které představují neexistující sítě a podle kterých jsou komponenty při výstavbě dimenzovány. Tomuto typu modelování se v této práci věnovat nebudeme. Druhou skupinou modelů je reprezentace stávajících sítí. Účelů pro vytváření druhého typu modelů je mnoho. Jedním z velkých problémů distribučních sítí je ztráta vody během transportu v potrubí. Pomocí modelů v kombinaci s měřeními na reálném systému je možné detekovat, kde k těmto únikům dochází. Tento typ modelů je také vhodný pro testování různých druhů scénářů, které mohou nastat při opravách vodojemů či potrubí, odstávkách zdrojů nebo úpraven pitné vody a např. i živelných katastrofách. Při aplikaci scénářů na model je možné sledovat stav vody a tlaku v celé síti stejně jako její stáří a chemismus. Získané údaje lze vyhodnotit a případně reálný systém hardwarově či softwarově upravit tak, aby lépe reagoval na připravované i nečekané změny. Model může také informovat operátory o neměřených či neměřitelných veličinách v systému. Návrh řídicích systému pro distribuční soustavy vyžaduje model, na kterém je možno regulaci navrhnout a vyladit, čemuž se bude věnovat kapitola 3.

2.2 Způsoby modelování a simulací

Způsoby modelování resp. simulování funkce distribučních soustav pitné vody lze rozdělit do dvou skupin. Tradiční je skupina modelů, které jsou spuštěny na určitou dobu s danými počátečními podmínkami a výsledkem je stav na konci simulace popř. historický záznam sledovaných veličin. Druhou skupinou jsou tzv. modely v reálném čase, kdy je možné model spustit na časově neomezenou dobu, sledovat za běhu zvolené veličiny, libovolně měnit vstupy a nastavení, synchronizovat model s reálným systémem a to vše v reálném čase. Tato práce se věnuje především druhému typu modelování.
V následujícím textu bude však věnován prostor i typu prvnímu.

Všechny typy modelování mají knihovnu komponentů distribuční sítě, která obsahuje významné součásti systému. Každá z těchto komponent má vlastní nastavení a

parametry a reprezentuje reálný prvek soustavy. Detailní soupis a popis těchto komponent je popsán později v této kapitole. V průběhu modelování jsou komponenty nastaveny tak, aby co nejvěrněji odpovídaly svým reálným předlohám, k čemuž je zapotřebí měřených dat. Tento postup je rozepsán v kapitole 4 v případové studii. Jednotlivé komponenty jsou následně propojeny podle mapy reálného systému.

Základním nástrojem pro modelování, který je rozšířen po celém světě, využívá se jako platforma pro většinu komerčních softwarů a jeho výpočetní engine je považován za dnešní standard, se jmenuje EPANET. Jedná se o software vyvíjený za podpory americké vlády již několik desítek let. Modely vyvíjené tímto nástrojem vypočítávají ztrátu tlaku vody v potrubí, což je nosný algoritmus všech modelů, pomocí metod Hazen-Williams, Darcy Weisbach nebo Chezy-Manning, kterým se budeme věnovat později v této kapitole. Engine EPANETu zahrnuje nespočet dalších vlastností, mimo jiné možnost sledovat chemismus vody a její stáří [6]. V současné době existuje mnoho softwarů jako nadstaveb nad EPANETem (např. HydrauliCAD, WaterGEMS, MikeNet atd.) [7], jehož licence je zdarma dostupná. K dispozici je také velké množství modulů přímo do EPANETu, které vylepšují jeho vlastnosti. Model, který bude vytvořen v této práci, využívá podobných principů jako EPANET ovšem se zcela odlišným konečným výsledkem a funkcí. EPANET a softwary od něj odvozené patří do první skupiny – simulace probíhá po určitou časovou periodu se zadáním vstupů či nastavením scénářů při spuštění. Nyní se budeme věnovat modelování v reálném čase.

Simulování funkce systému v reálném čase má mnoho výhod. Model lze provozovat paralelně s reálným systémem a operátor jej může využívat k testování svých rozhodnutí – simulace samozřejmě může také běžet ve zrychleném reálném čase. Při současném běhu modelu a reálného systému lze detekovat případné poruchy (úniky, prasklé potrubí atd.) nebo např. černé odběry. Model může být synchronizován za běhu s reálným systémem pomocí online měření (např. u nemodelovatelných veličin – manuální řízení atd.), což mu zaručuje shodu s realitou a zároveň může poskytovat informace operátorům o neměřených veličinách. Model tohoto typu bude vytvořen v této práci.

2.3 Hydraulický model

Tato kapitola obsahuje matematický popis transportu a proudění vody spolu se všemi nezbytnými komponenty distribučního systému. Model, který je v této práci tvořen, je vyvíjen v prostředí Matlab/Simulink R2006a.

2.3.1 Transport vody

Distribuční soustava je síť potrubí, ve kterých je voda transportována pod tlakem. Voda teče od zdroje směrem ke spotřebitelům, tlak v soustavě je tvořen gravitací (umístěním zdroje a zásobníků vody výše než místa odběrů) nebo pomocí čerpacích stanic. Následující odstavce budou věnovány typům proudění v potrubí a prouděním v potrubních uzlech.

Voda v potrubí může proudit třemi způsoby: turbulentně, přechodně a laminárně. Způsob, jakým se voda v potrubí pohybuje, je závislý na tzv. Reynoldsovu číslu (tabulka 2.1), které lze vypočítat pomocí vzorce (2.1):

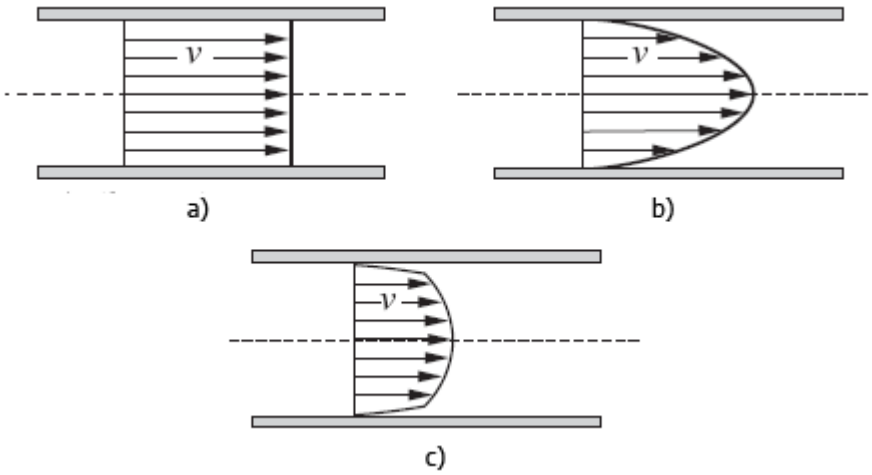
$$Re = \frac{Vd\rho}{\mu} \qquad (2.1)$$

Kde Re = Reynoldsovo číslo [-]
d = průměr potrubí [m]
ρ = hustota kapaliny [kg·m^{-3}]
μ = absolutní viskozita [kg·m^{-1}·s^{-1}]

Typ proudění	Reynoldsovo číslo
Laminární	< 2000
Přechodné	2000 – 4000
Turbulentní	> 4000

Tab. 2.1 Reynoldsovo číslo pro různé typy proudění

V distribučních soustavách voda většinou proudí turbulentně, pouze v oblastech, kde je odběr vody minimální a voda v potrubí proudí pomalu, je proudění laminární. Rozdíl mezi třemi druhy proudění je znázorněn na obr. 2.1 níže.

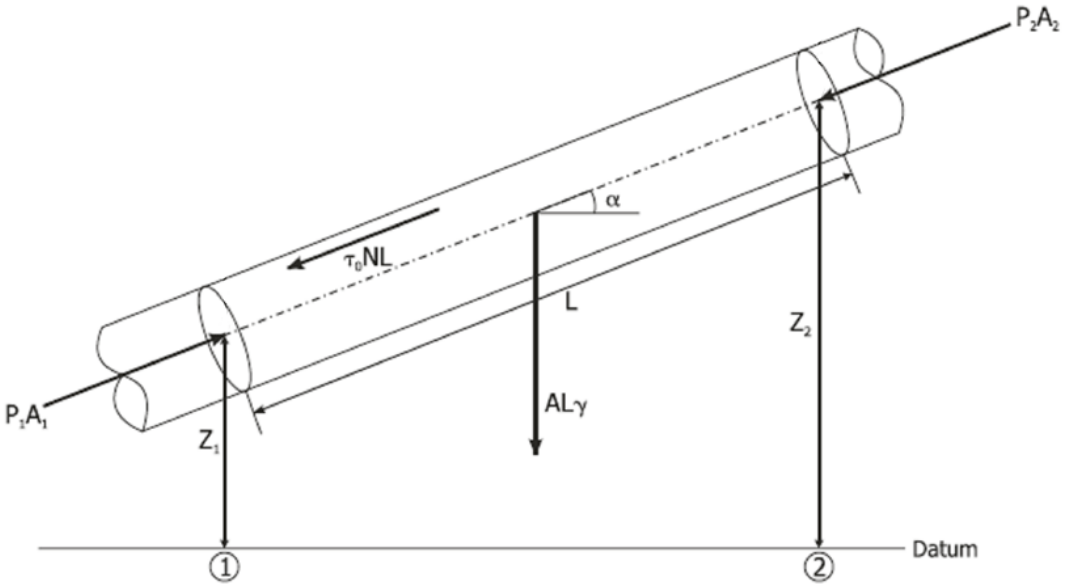


Obr. 2.1 a) Rychlostní profil uniformního proudění b) Rychlostní profil laminárního proudění c) Rychlostní profil turbulentního proudění [4]

Na obr. 2.1a je znázorněn rychlostní profil uniformního proudění – je v celém průřezu potrubí identický, nevznikají žádné třecí síly mezi protékajícím médiem a stěnami potrubí. Tento ideální případ ovšem nenastává. Na obr. 2.1b je vyobrazen rychlostní profil laminárního proudění. Kapalina proudí velice pomalu v blízkosti stěn potrubí a naopak rychleji blíže ke středu. Turbulentní proudění (obr. 2.1c) má rychlostní profil výrazně plošší – rychlost proudění se v jednotlivých místech potrubí liší méně než u laminárního proudění. U laminárního proudění je ztráta tlaku při průtoku potrubím zapříčiněna více viskozitou kapaliny než hrubostí vnitřního povrchu potrubí, u turbulentního proudění mají velký vliv víry vzniklé právě nerovnostmi potrubí. Přechodné proudění je mezistupeň mezi turbulentním a laminárním.

2.3.2 Ztráta energie – třecí síly, redukce

Ztráta energie proudící vody v potrubí je reprezentována snižováním tlaku v síti. Důvodem jsou třecí síly a víry v proudění, které vznikají při kontaktu pohybujícího se média a stěnami potrubí nebo prouděním skrze ventily atp. Ztráty tlaku rozdělíme na dvě skupiny: hlavní – vlivem potrubí a vedlejší – vlivem jiných komponent. V dalším odstavci budou popsány síly působící na tekoucí vodu v nakloněném potrubí, následně budou uvedeny tři způsoby výpočtu ztráty tlaku patřící do skupiny hlavních ztrát. Vedlejší ztráty budou popsány později.



Obr. 2.2 Nakloněné potrubí s vodou [4]

Na vodu v nakloněném potrubí o úhel α k horizontální rovině na obr. 2.2 působí v průřezu A_1 se středem umístěným ve výšce Z_1 tlak P_1 a na průřez A_2 v horní části potrubí se středem ve výšce Z_2 tlak P_2. Vyrovnáním sil působících na objem vody v tomto potrubí můžeme získat výraz, který určuje sílu, která má za následek ztrátu tlaku způsobenou třením. Síly působící na vodu v potrubí [4]:

- Rozdíl tlaků mezi dvěma konci P_1 a P_2
- Váha vody obsažené mezi konci potrubí
- Tření podél stěn potrubí

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - \bar{A} L \rho g sin\alpha - \tau_0 N L = 0 \quad (2.2)$$

Kde P_1 = Tlak na spodním konci potrubí [kg·m^{-1}·s^{-2}]
A_1 = Plocha průřezu potrubí na spodním konci potrubí [m^2]
P_2 = Tlak na horním konci potrubí [kg·m^{-1}·s^{-2}]
A_2 = Plocha průřezu potrubí na horním konci potrubí [m^2]
$\bar{A}$ = Průměrný průřez potrubí mezi horním a spodním koncem [m^2]
L = Vzdálenost mezi spodním a horním koncem potrubí [m]
α = Úhel naklonění potrubí k horizontální rovině [rad]
ρ = Hustota [kg·m^{-3}]
g = gravitační zrychlení [m·s^{-2}]
τ_0 = Napětí podél stěn potrubí působící proti toku vody [kg·m^{-1}·s^{-2}]
N = Obvod průřezu potrubí [m]

Poslední člen je původcem ztrát tlaku vody způsobeném hrubosti vnitřního povrchu potrubí.

$$h_L = \tau_0 \frac{NL}{\gamma A} \quad (2.3)$$

Ztrátu tlaku je podle [4] možné vypočítat pomocí tří základních metod. Každá z nich přistupuje k problému trochu jiným způsobem a je využívána k odlišným účelům.

Metoda Darcy-Weisbach

$$h_L = f \frac{LV^2}{d2g} = \frac{8fLQ^2}{gd^5\pi^2} \quad (2.4)$$

Kde h_L = Ztráta tlaku způsobena hlavními ztrátami [m]
f = Darcy-Weisbachův faktor tření [-]
g = Gravitační zrychlení [m·s^{-2}]
Q = Průtok [m^3·s^{-1}]
d = Průměr potrubí [m^2]

Darcy-Weisbachův faktor tření, f, lze vyjádřit následujícím vzorcem

$$f = F\left(\frac{VD\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{d}\right) = F\left(Re, \frac{\varepsilon}{d}\right) \quad (2.5)$$

Faktor tření f je závislý na rychlosti proudění kapaliny V, její hustotě ρ a viskozitě μ spolu s průměrem d a hrubostí vnitřního povrchu potrubí ε (příloha 7.2), kterým proudí. Viskozita, hustota, rychlost proudění a průměr potrubí lze vyjádřit pomocí Reynoldsova čísla Re. Graf v příloze 7.3 zobrazuje závislost f na Re a $\frac{\varepsilon}{D}$. Faktor tření f lze spočítat několik způsoby, nejrozšířenějším je tzv. Swamee-Jain metoda:

$$f = \frac{1{,}325}{\left[ln\left(\frac{\varepsilon}{3{,}7d} + \frac{5{,}74}{Re^{0{,}9}}\right)\right]^2} \tag{2.6}$$

Metoda Hazen-Williams

$$h_L = \frac{L}{C^{1{,}852} d^{4{,}87}} Q^{1{,}852} \tag{2.7}$$

Tento způsob výpočtu je také často využíván podobně jako metoda Darcy-Weisbach a to především v Severní Americe. Nejvýraznějším rozdílem mezi těmito metodami je využití jiného faktoru tření *C* [-]. Vyšší faktor *C* reprezentuje hladší povrch potrubí, nízké *C* naopak znamená hrubé potrubí. Typické faktory *C* pro různé materiály jsou uvedeny příloze 7.1.

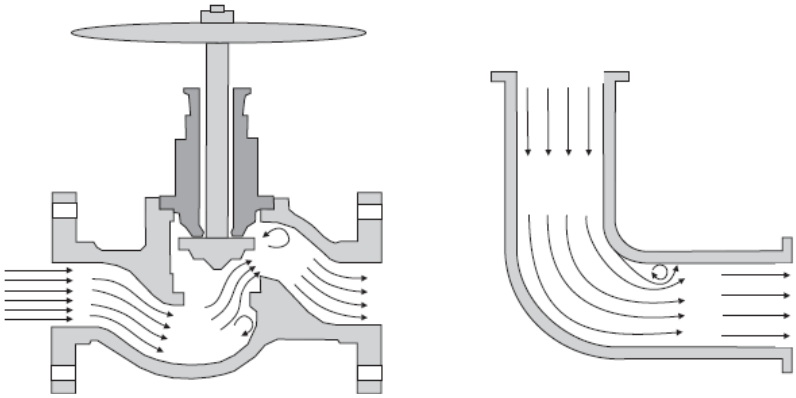
Metoda Chezy-Manning

$$h_L = \frac{L(nQ)^2}{d^{5{,}3}} \tag{2.8}$$

V této metodě je využíván parametr hrubosti *n* [-] (čím vyšší hodnota, tím hrubší vnitřní povrch potrubí). Hodnoty tohoto koeficientu jsou uvedeny v tabulce v příloze 7.4 pro nejčastěji využívané materiály k výrobě potrubí.

Výše uvedené přístupy k výpočtům ztrát tlaku se liší a jejich volba spočívá především v podstatě modelovaného systému. Darcy-Weisbachova metoda je založena na Newtonově druhém zákoně, s dostatečnými informacemi o protékajícím médiu, lze vypočítat ztrátu tlaku pro jakoukoli newtonovskou kapalinu. Hazen-Williamsova a Chezy-Manningova metoda je založena na historických datech a lze použít pouze pro turbulentní proudění. Pro modelování v prostředí Matlab/Simulink byla zvolena metoda první, tedy Darcy-Weisbachova.

Vedlejší ztráty tlaku jsou způsobovány tokem přes ventily, fitinky, potrubní uzly nebo ohyby potrubí – víry a turbulencemi v proudu vody, jak je znázorněno na obrázcích obr. 2.3.a a obr. 2.3.b níže. I tyto ztráty lze vyjádřit vzorcem s pomocí tabulek, které udávají tzv. koeficient vedlejších ztrát K_L pro různé typy a různě otevřené ventily a ostatní původce turbulencí.



Obr. 2.3 a) Průtok kapaliny otevřeným ventilem b) Průtok vody zahnutým potrubím [4]

$$h_m = K_L \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2.9)$$

Kde h_m = ztráta tlaku způsobena vedlejšími ztrátami [m]
K_L = koeficient vedlejších ztrát [-]
Q = průtok [$m^3 \cdot s^{-1}$]
A = Plocha průřezu [m^2]
g = gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

Koeficient K_L je vyčíslen pro různé typy fitinek a ventilů v tabulce v příloze 7.5. Tyto koeficienty jsou závislé na rychlosti proudění, ale z praktických důvodů jsou uváděny jako konstanty [4].

Modelování vedlejších ztrát lze provést virtuálním prodloužením potrubí, na kterém se zdroj vedlejších ztrát tlaku nachází a tím adekvátně zvýšit ztráty hlavní pomocí následujícího vzorce.

$$L_e = \frac{K_L d}{f} \quad (2.10)$$

Kde L_e = prodloužení stávajícího potrubí [m]
d = průměr potrubí [m]
f = Darcy-Weisbach faktor tření [-]

Snížení tlaku může být v některých případech cílené a nezbytné. V případě, že je zdroj vody umístěn příliš vysoko, je tlak v nižších částech distribučního systému příliš vysoký: hrozí poškození potrubí; velký tlak není žádoucí ani u odběratelů. Redukce tlaku je možná pomocí redukčního ventilu, kdy je omezen v jednom místě průtok polozavřeným ventilem nebo pomocí turbíny, která je v potrubí umístěna. Turbína redukuje průtok a kinetickou energii, kterou z proudící vody získává, mění na elektrickou.

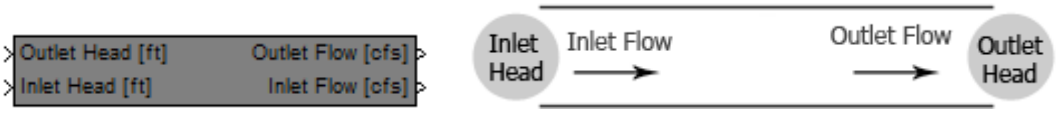
2.3.3 Zisk energie – gravitace a čerpací stanice

Jak již bylo řečeno, pitná voda v distribučním systému je vedena pod tlakem. Tlakové rozdíly jsou iniciátorem pohybu vody v soustavě. Tlak (a tedy i směr pohybu) je tvořen gravitační silou – v případě, že zdroj je umístěn ve vyšší nadmořské výšce než odběratelé, nebo čerpacími stanicemi, které čerpají vodu z nižších výškových pásem do vyšších a zvyšují tlak v soustavě. Díky čerpacím stanicím voda v potrubí získává energii a je schopna překonávat výškové rozdíly, kompenzovat ztráty tlaku v potrubí a jiných komponentech či zvyšovat průtok.

2.3.4 Knihovna komponent distribučního systému

Jednotlivé komponenty hydraulického modelu jsou v některých případech převzaty z knihovny vytvořené Rockwell Automation (vodojem, potrubní uzel) nebo jí jsou inspirovány. Následuje výpis modelovaných komponent v prostřední Matlab/Simulink R2006a se stručným objasněním jejich funkce.

Potrubí



a) b)

Obr. 2.4 a) Blok z knihovny modelu v Simulinku: potrubí b) Schematické znázornění potrubí

Blok potrubí převádí rozdíl tlaků mezi počátkem a koncem potrubí na průtok pomocí následujícího vzorce [8]:

$$Q = \frac{\Delta P d^2}{L} \frac{\pi d^2}{128 \mu} \tag{2.11}$$

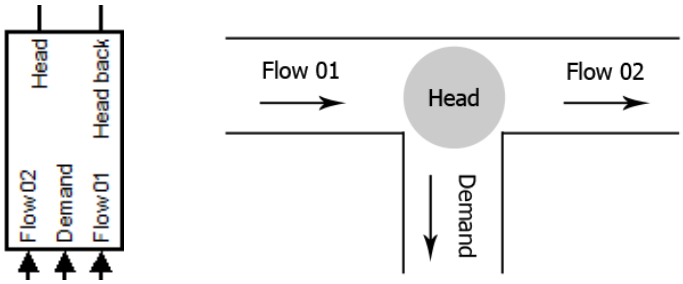
Kde Q = Průtok potrubím [$m^3 \cdot s^{-1}$]
ΔP = Rozdíl tlaků na začátku a konci potrubí [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$]
L = Délka potrubí [m]
d = Průměr potrubí [m]
μ = Viskozita kapaliny [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]

Od rozdílu tlaků ΔP je také, mimo vstupní a výstupní tlak, odečítána ztráta tlaku v důsledku tření podle (2.4). Vstupy jsou tedy vstupní a výstupní tlak a výstupy jsou vstupní a výstupní průtok. Tento blok má několik vnitřních parametrů, některé z nich jsou přesně definovány výrobcem daného potrubí, jiné je nutné doladit pomocí měřených dat (viz tab. 2.2).

Název	Typ	Význam
d	Parametr	Vnitřní průměr potrubí
l	Parametr	Délka potrubí
material	Parametr	Konstanta určující typ materiálu
Inlet Head	Vstup	Vstupní tlak
Outlet Head	Vstup	Výstupní tlak
Inlet Flow	Výstup	Přítok do potrubí
Outlet Flow	Výstup	Odtok z potrubí

Tab. 2.2 Tabulka parametrů, vstupů a výstupů bloku hydraulického modelu: potrubí

Potrubní uzel a redukční stanice

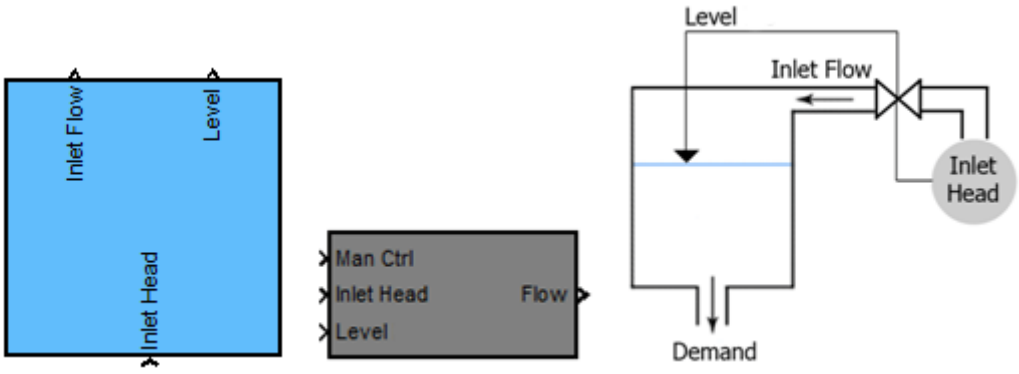


Obr. 2.5 a) Blok z knihovny modelu v Simulinku b) potrubní T-křižovatka

Potrubní uzel je místo, kde se setkávají tři jednotlivá potrubí (nejčastěji tzv. T křižovatka). Vstupy tohoto bloku jsou tři přítoky/odtoky, na základě jejich součtu je vypočítán tlak v tomto místě. Tento blok je navržen tak, že jeden vstup je přítokový (*Flow01*) a ostatní odtokové (*Demand*, *Flow02*). V případě, že předchozí uzel přítoku má jinou nadmořskou výšku, tedy jiný tlak, je nutné tento rozdíl korigovat jeho přičtením k vypočítanému tlaku v tomto bodě. Prvním výstupem (*Head*) je tedy tlak v tomto potrubním uzlu a druhý výstup (*Head back*) je tato hodnota zvýšená o zmiňovaný rozdíl. Pro názornost je tento přístup prezentován níže na malé fiktivní síti.

Redukční stanice je reprezentována stejným blokem jako potrubní uzel s tím rozdílem, že do něj vede pouze přítok a odtok. Redukce tlaku je simulována posazením tohoto uzlu do vyšší nadmořské výšky, tedy zmenšením tlaku na požadovanou hodnotu.

Vodojem a ventil



Obr. 2.6 Bloky z knihovny modelu v Simulinku: a) Vodojem b) Ventil c) Schéma zapojení ventilu ve vodojemu

Blok vodojem reprezentuje jakýkoli typ zásobníku vody. Knihovna obsahuje několik typů bloků v závislosti na počtu přítoků. Blok s jedním přítokem (obr. 2.6.a) má tedy jeden vstup – tlak na vstupním potrubí (*Inlet Head*). Dva výstupy reprezentují aktuální simulovanou hladinu (*level*) ve vodojemu a přítok vody do vodojemu (*Inlet Flow*).

Přítok je vypočítán z rozsahu otevření ventilu, který je součástí vodojemu a velikosti vstupního tlaku. Z tohoto přítoku, od kterého je uvnitř bloku odečítána spotřeba vody (*Demand*), je počítán aktuální objem vody v zásobníku a ten je přes zadané rozměry přepočítáván na výšku hladiny. Ventil, který je často obsažen ve vodojemu, je reprezentován blokem znázorněným na obrázku obr. 2.6.b. Otevírání ventilu je závislé na aktuální výšce hladiny (*Level*) – ventil se otevírá lineárně mezi dvěma nastavenými výškami. Dalšími vstupy je *Man Ctrl* (manuální ovládání ventilu) a vstupní tlak (*Inlet Head*). Jediným výstupem je průtok ventilem, který je počítán ze vstupů spolu s dalšími parametry ventilu.

Parametry bloku vodojemu a ventilu jsou rozepsány v tabulce tab. 2.3:

Název	Typ	Význam
Crest	Parametr vodojem	Horní hranice vodojemu
HW	Parametr vodojem	Maximální výška hladiny
Outlet	Parametr vodojem	Výška odtoku
Diameter / Dimensions	Parametr vodojem	Rozměry vodojemu
Level_ini	Parametr vodojem	Počáteční výška hladiny
AltVLV	Parametr ventil	Výška hladiny pro úplné zavření přívodního ventilu
AltVLVo	Parametr ventil	Výška hladiny pro úplné otevření přívodního ventilu
Vlin_G	Parametr ventil	Konstanta ventilu určující rychlost průtoku
Inlet Head	Vstup vodojem	Vstupní tlak
Inlet Flow	Výstup vodojem	Přítok / odtok z vodojemu
Level	Výstup vodojem	Výška hladiny
Man ctrl	Vstup ventil	Manuální řízení
Inlet Head	Vstup ventil	Vstupní tlak
Level	Vstup ventil	Výška hladiny ve vodojemu
Flow	Výstup ventil	Průtok ventilem

Tab. 2.3 Tabulka parametrů, vstupů a výstupů bloku hydraulického modelu: vodojem a ventil

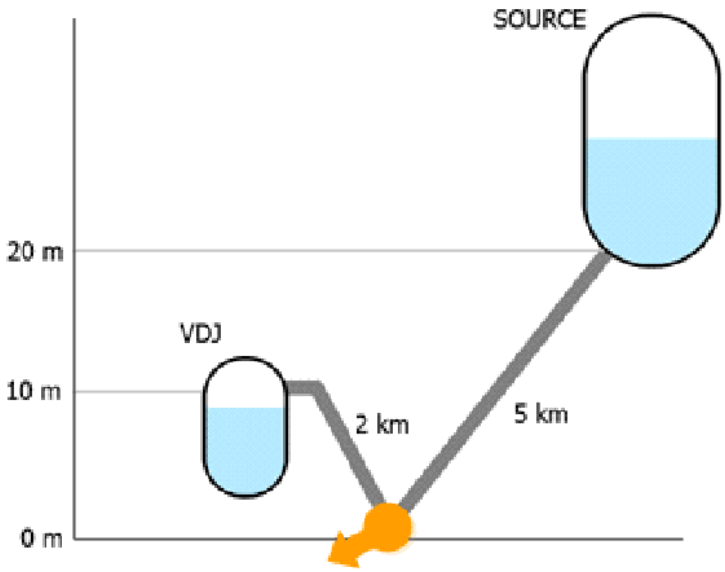
Čerpací stanice

Čerpadlo nebo čerpadla v čerpací stanici zvyšují tlak v systému. Model čerpadla je výrazně složitější než všech ostatních komponent. Je nezbytné namodelovat jak jeho základní funkci, která spočívá v odběru vody na vstupu s menším tlakem a odtokem z výstupu s vyšším tlakem, tak jeho vedlejší vlastnosti. Existuje několik typů čerpadel, pracujících na různých principech, každý druh má svou typickou křivku náběhu a své limity. K naladění modelu čerpadla je nutné disponovat velice dobrými daty – data od výrobce nejsou dostačující, protože čerpadlo je komponent, který se značně opotřebovává a tím mění své vlastnosti. Z důvodu úplné absence dat o čerpadlech v čerpacích stanicích (kromě jejich maximálního průtoku) v případové studii v kapitole 4, pro kterou tato knihovna vznikla,

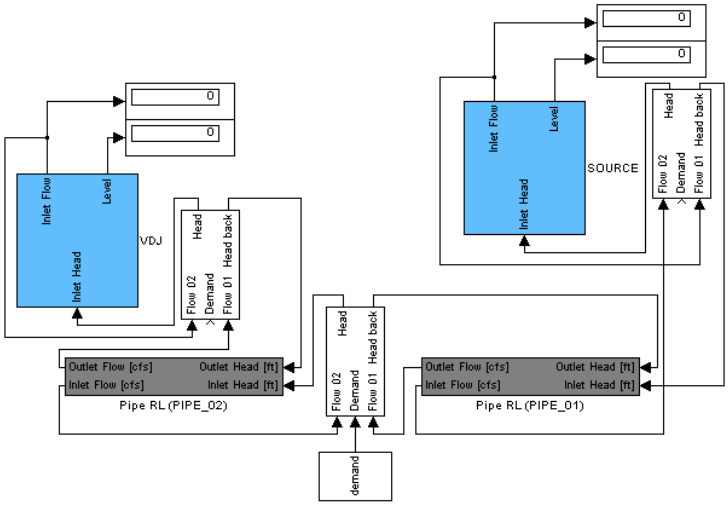
zde model čerpadla prezentován není. Čerpadlo je realizováno pouze lineárním zvyšováním nebo on/off nastavováním průtoku skrz potrubí s čerpadlem.

2.3.5 Příklad

V této podkapitole bude sestavena malá fiktivní síť za účelem představení funkce několika základních komponent. Síť obsahuje zdrojový vodojem *SOURCE* s velmi velkým objemem, vodojem *VDJ* s menším objemem a instalovaným odběrem. Mezi potrubími propojující oba vodojemy je také instalován další odběr pitné vody. Na následujícím schématu (obr. 2.7b) je vyobrazeno propojení bloků v Simulinku a pohled na soustavu z boku (obr. 2.7a). Dále jsou uvedeny grafy průtoků v tomto malém systému.



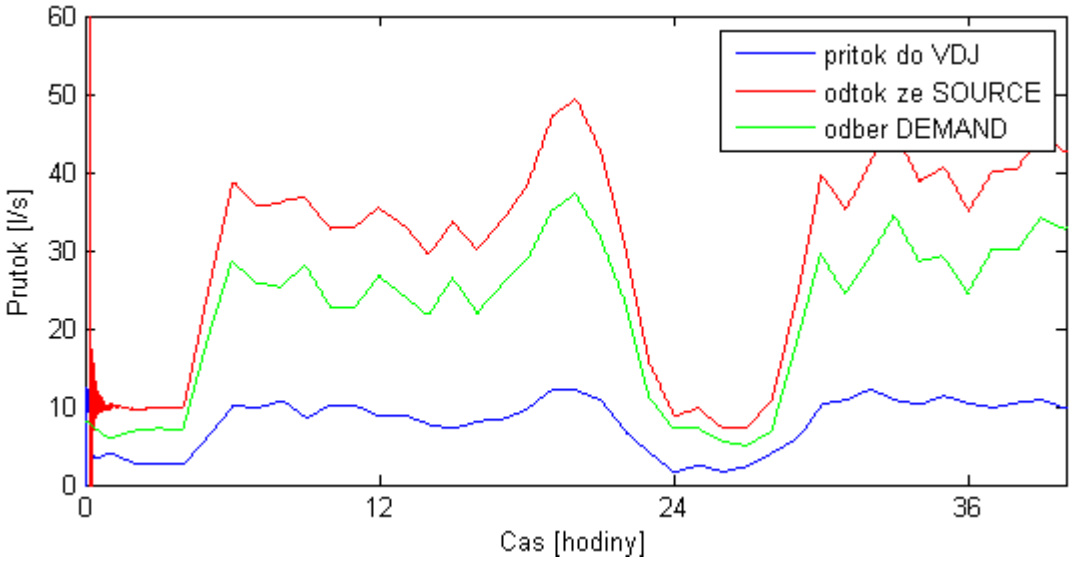
a)



b)

Obr. 2.7 a) Pohled na soustavu z boku s vyznačenými výškovými rozdíly
b) Zapojení bloků z hydraulické knihovny v Simulinku

Odtok vodojemu *SOURCE* je umístěn v relativní výšce 20 m vztažené k potrubnímu uzlu; uzel je tedy ve výšce 0 m a ústí vodojemu *VDJ* je o 10 m výše než potrubní uzel. Délka potrubí mezi zdrojem vody *SOURCE* a potrubním uzlem je 5 km a mezi potrubním uzlem a vodojemem *VDJ* 2 km. Voda je tedy ze zdroje dopravována gravitací jak k potrubnímu uzlu, kde je instalovaný odběr *DEMAND*, tak do vodojemu *VDJ* (taktéž s instalovaným odběrem). Přítok do *VDJ* je řízen ventilem, který je řízen aktuální výškou hladiny ve *VDJ* - v závislosti na této výšce je lineárně otevírán nebo zavírán.



Obr. 2.8 Průběhy průtoků ve fiktivním modelu s patrným počátečním rozkmitáním a rychlým ustálením

2.3.6 Závěr

Jednotlivé komponenty dávají možnost vytvořit, při jejich správné inicializaci, model distribuční soustavy pitné vody, který odpovídá reálnému systému. Pomocí takového modelu lze sledovat proudění vody v systému stejně jako průběhy tlaků. Nezbytné je však znát detailní informace o reálném systému a disponovat měřenými daty pro kvalitní naladění neměřitelných parametrů jako např. koeficient hrubosti vnitřní plochy potrubí pro výpočet ztráty tlaku proudící vody. Existuje mnoho detailů, které namodelovat nelze (netěsnosti a trhliny v potrubí, usazeniny ve vodojemech atp.). Tyto nemodelovatelné a velice často neměřitelné skutečnosti lze však nahradit úpravou konstant pomocí měřených dat tak, aby model jako celek věrně kopíroval reálný systém. Proces ladění je poměrně náročný proces, stejně jako ověřování, zda model skutečně odpovídá reálné soustavě. Tento proces je proveden a popsán v kapitole 4.3.2 na reálném systému.

2.4 Modelování spotřeby a jiných odběrů pitné vody z distribuční soustavy

Tato kapitola bude věnována spotřebě pitné vody – odvodu vody z distribučního systému. Detailní popis odhadu a modelování odběrů vody by bylo nad rámec této práce,

proto zde bude uveden pouze okrajově. Existuje několik typů odběrů vody: fakturovaná spotřeba klientů, úniky během transportu a také vnitřní spotřeba. Odběr vody je hybnou silou veškeré dynamiky hydraulického systému distribuční soustavy.

Odhad odběru vody lze realizovat několika způsoby a způsob se volí na základě kvality dostupných měřených dat. V případě, že disponujeme měřeními ve většině odběrných míst (alespoň hodinovými průměry) je možné tyto měření využít a sestavit průměrné denní křivky spotřeby pro jednotlivé měsíce s rozdělením na pracovní dny a víkendy. Vhodné je vytvořit obálku okolo této průměrné denní křivky podle maximálních a minimálních měřených hodnot a dalších parametrů. Pokud se však jedná o síť rozsáhlou, kde nejsou dostupná dostačující měřená data lze spotřebu odhadnout podle [4] (k jednotlivým bodům se detailněji vrátíme později v textu):

1. Stanovení průměrných odběrů (průměrná denní spotřeba).
2. Určení koeficientů špiček pro zakřivení průměrných odběrů.
3. Odhad odběrů při změně podmínek (pro plánování, řízení a design).

Průměrný denní odběr zákazníků lze stanovit z tabulkových hodnot pro místní podmínky (průměrná spotřeba na osobu, na výrobu určitého produktu atd.) v závislosti na počtu odběrných míst. K této hodnotě lze velice snadno přidávat nové odběratele. Možné je také průměrný odběr určit z vodoměrů jednotlivých klientů, i když se jedná o poměrně náročný úkol (tyto informace nebývají v digitální podobě). Postupem popsaným výše však získáme pouze tzv. fakturovanou spotřebu, nutné je přidat úniky vody během transportu a vnitřní spotřebu sítě. Vnitřní spotřeba je často monitorována (je známo kolik vody je spotřebováno při čištění soustavy), celkové úniky lze stanovit z rozdílu objemu veškeré produkované vody, fakturované vody a vnitřní spotřeby. Celkový únik vody je nutné rozpočítat na jednotlivé potrubní segmenty. Z průměrných denních hodnot je nezbytné vytvarovat denní křivku spotřeby pro jednotlivá odběrná místa. Jak již bylo řečeno v 1. kapitole, každý typ odběratele má svojí typickou křivku denní spotřeby. Těchto typických křivek lze využít a průměrné denní hodnoty podle nich upravit. Významnou výhodou této metody, která není založená pouze na měřených datech, je možnost jednoduché úpravy v případě navýšení či snížení odběru (nová továrna, zvýšení počtu obyvatel atd.).

Vytvořený model, ať už na základě měřených dat nebo z tabulkových hodnot, lze zapojit do hydraulického modelu a stává se z něj jeho hybná síla: odebírá vodu z potrubních uzlů a snižuje hladiny vodojemů, na základě čehož jsou otevírány ventily a čerpána voda ze zdrojů.

2.5 Modelování kvality, stáří a dalších atributů pitné vody

Pro zkušeného dispečera vodárenské distribuční soustavy je stáří (čas, který konkrétní objem vody setrval v distribučním systému) vody v jednotlivých vodojemech a jiných zásobnících vody jedním z důležitých faktorů, podle kterých je vyhodnocován aktuální stav sítě. Jak již bylo řečeno, stáří vody je pojem, který nese informaci o celkovém stavu vody. Ve staré vodě je méně desinfekční látky, obsahuje více prvků ze stěn potrubí a vodojemů a také více nežádoucích živých organismů. Voda určitými místy v soustavě proudí více a některými méně (slepé uličky, méně využívané větve). V těch oblastech, kde se voda obměňuje méně často, se zvyšuje stáří vody a je pouze na

zkušenostech dispečera či na nastavení řídicího systému, do jaké míry je stáří vody akceptovatelné a kdy je nutné zakročit - vodu smísit s čerstvější nebo starou vodu chemicky ošetřit. Následující text se tedy bude věnovat modelování pouze stáří pitné vody, jelikož právě z tohoto parametru lze odvodit všechny ostatní parametry závislé na čase.

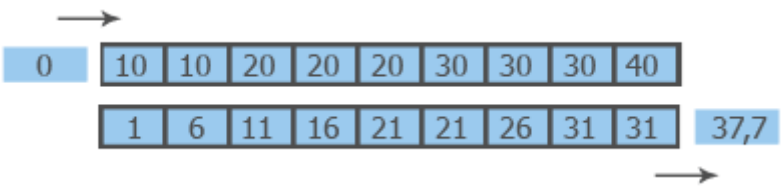
Stáří vody lze modelovat několik způsoby, vždy však bude tento model pouze nadstavbou hydraulického modelu, který je popsán výše. Z hydraulického modelu bude model stáří vody čerpat data o průtocích v jednotlivých částech vodárenské soustavy. Podle [4] jsou dva základní pohledy na modelování stáří vody. Obě metody jsou diskrétní a dělí veškerou vodu v soustavě (v potrubí a vodojemech) do tzv. balíků a těm přiřazují vlastnosti typu stáří, obsah chlóru, počet živých organismů atd. Čím častěji, s kratší periodou, jsou atributy balíků modelem přepočítávány, tím je metoda přesnější.

2.5.1 Metody modelování v potrubí a vodojemech

První metoda je založena na Eulerově principu, kdy je každé samostatné potrubí rozděleno na určitý počet stejně dlouhých úseků. Tím vzniknou balíky vody, které se v potrubí pohybují. Na křižovatkách a ve vodojemech se mísí s jinými balíky vody. Druhá metoda, Langrageovský přístup, potrubí nedělí svévolně na úseky, ale k rozdělení dochází až v závislosti na rozdílech sousedních balíků. Ani jedna z těchto metod nebyla pro modelování v prostředí Matlab/Simulinku vhodná – během simulace není možné v tomto prostředí dynamicky měnit rozměry polí (potrubí je reprezentováno polem rozděleným na balíky vody). Eulerův přístup příliš mísí balíky vody a průměruje jejich stáří; zároveň je také velice výpočetně náročný. Proto byla pro tuto práci vyvinuta metoda, která oba přístupy kombinuje. Všechny tři metody jsou blíže popsány níže v textu.

Eulerův přístup [4]

Jak již bylo řečeno, každý samostatný úsek potrubí je rozdělen na daný počet stejně dlouhých úseků o stejných objemech. V každém časovém kroku, kdy do potrubí přiteče balík vody (a zároveň stejně velký balík vody odteče) je tato voda rozdělena do opět stejně velkých balíků a případný „přebytek“ je smísen s balíkem předchozím. Na obr. 2.9 je konkrétní příklad, kdy do potrubí o 9 balících s objemem 1 přitéká balík o objemu 1,5 se stářím 0. V jednom časovém kroku všechna voda v systému zestárne o 1. Přiteklá voda se tedy z části smísí s objemem z prvního balíku v potrubí a zároveň se všechny balíky posouvají ve směru toku. Váženým průměrem dostaneme stáří všech balíků v potrubí a také balíku výstupního, který má stejný objem jako balík přitékající.

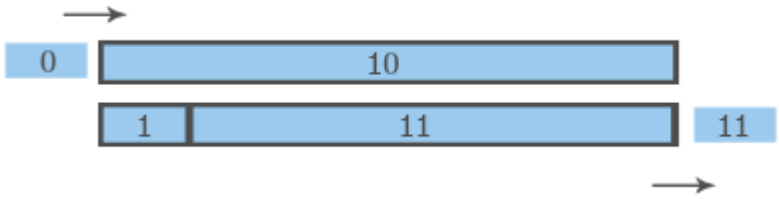


Obr. 2.9 Příklad výpočtu stáří proudící vody v potrubí s Eulerovým přístupem

Výhodou této metody je stálost výpočtu. V každém kroku je v soustavě stejný počet stejně velkých balíků a výpočtem získáváme pouze stáří (popř. jinou sledovanou veličinu jako např. koncentraci určité chemické látky) těchto balíků. Velkou nevýhodou je zbytečně velká výpočetní náročnost. V případě, kdy má voda v celém potrubí identický sledovaný parametr je zbytečné ji dělit na úseky. Další nevýhodou je ztráta přesnosti. Při velkých výkyvech sledovaného parametru přitékající vody po malých objemech se balíky musí mísit a průměrovat. Chybu odhadu lze zmenšovat zvyšováním počtu balíků na délku potrubí.

Langrageovský přístup [4]

Tato metoda dělí potrubí na balíky pouze v případě, kdy by mělo dojít ke smísení vody s rozdílným stářím (nebo jiným sledovaným atributem). Názorně je tento postup graficky znázorněn na obr. 2.10, kde přitéká jeden balík se stářím 0. V potrubí se voda nemísí, pouze stejně velký balík odteče (je oddělen z balíku v potrubí a nese tedy i jeho stáří).

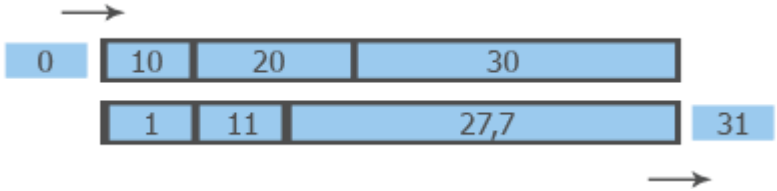


Obr. 2.10 Příklad výpočtu stáří proudící vody v potrubí s Lagrangeovským přístupem

Zřejmou nevýhodou je teoreticky možné zvyšování počtu balíků do nekonečna. Toto riziko lze odstranit aplikací pravidla, které spojuje sousední balíky, které se ve sledovaném atributu liší pouze minimálně (uživatelsky definováno). Při velkých průtocích, kdy za jeden časový krok voda proteče velkou částí potrubí, minimalizuje tato metoda výpočetní a paměťovou náročnost.

Kombinace metod

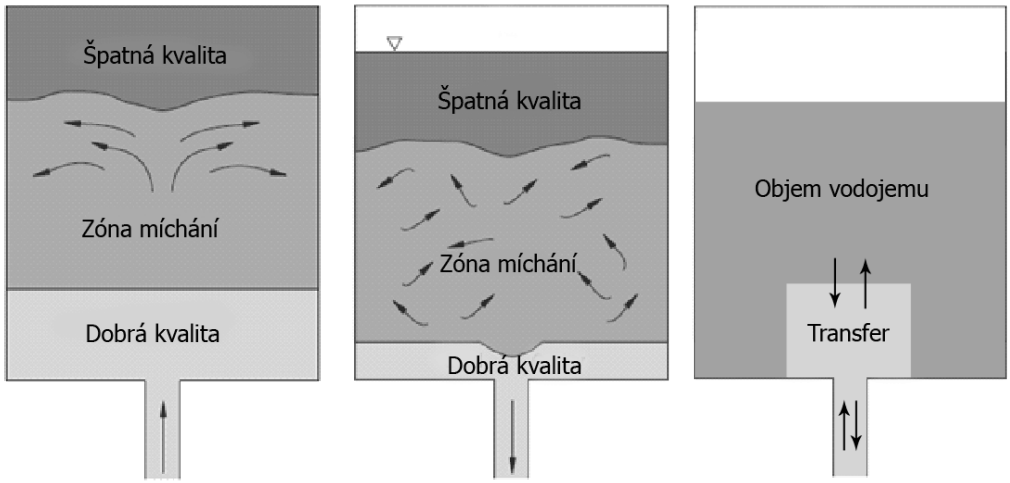
Pro vytvoření knihovny k modelování v prostředí Matlab/Simulink bylo nutné využít jiný algoritmus, z důvodů zmíněných výše, který by využíval konstantní počet balíků v potrubí a zároveň by dosahoval kvalit metody založené na Lagrangeovském přístupu. Proto byla v rámci této práce vyvinuta metoda, která z části kombinuje obě výše uvedené metody. Touto metodou je potrubí rozděleno na konstantní počet segmentů, ale tyto části nemají stejný objem jako u metody předchozí. Jinými slovy, jedním z atributů balíku vody je kromě jeho stáří či kvality i objem. Způsob, jakým je pohyb vody v potrubí modelován, je znázorněn na obr. 2.11. V tomto příkladu přitéká voda o objemu 1 a stáří 0 do potrubí, kde je pro něj vytvořen prostor odtokem stejně velkého balíku, který je oddělen z balíku posledního. Protože je nezbytně nutné zachovat stejný počet balíků, jsou poslední dva balíky smíseny a váženým průměrem je vypočítáno jejich stáří.



Obr. 2.11 Příklad výpočtu stáří proudící vody v potrubí metodou vhodnou pro modelování v Matlab/Simulinku

Balíky se tedy v určité fázi „slévají“, aby byl udržen jejich konstantní počet v potrubí. Slévání je možné realizovat v jednom daném místě potrubí (např. na konci, jak je uvedeno na obr. 2.11) nebo prohledat celé potrubí a nalézt dva sousední balíky s nejpodobnějším stářím vody a spojit je.

Výše uvedené postupy jsou aplikovatelné na výpočet zvoleného atributu vody při jejím pohybu v potrubí, nezbytný je však také výpočet těchto atributů ve vodojemech a jiných zásobnících. I v tomto případě je zde více možností [4]. Vliv na výpočet má také konstrukce zásobníku - v případě, že má zásobník přítok i odtok veden ze dna (nebo z oblasti v blízkosti dna), je vhodné rozdělit objem zásobníku na dvě nebo více sekcí, jak je znázorněno na obr. 2.12 níže.



a-1) a-2) b)

Obr. 2.12 Možnosti dělení (a,b) a ukázka mísení (a-1,a-2) vody ve vodojemu

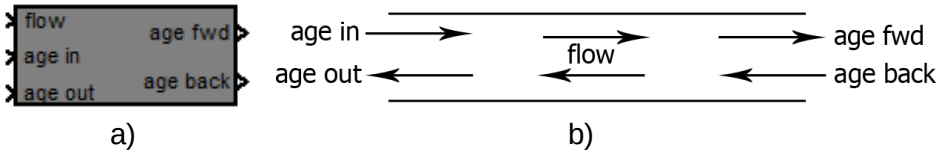
V případě rozdělení vodojemu na více sekcí je velice obtížné determinovat, jak velké sekce mají být a jakým způsobem se mezi nimi mísí voda. Vodojemy mají často instalované mechanické prvky, které vodu v celém objemu mísí. V takových zásobnících, nebo v těch, kam přitéká voda z horní části a odtéká z dolní, se nejčastěji využívá metoda úplného mísení. Objem čerstvé vody, který do vodojemu přiteče, se smísí s celým objemem zásobníku a pomocí váženého průměru je vypočítáno jeho stáří. Celý objem vodojemu má tedy jednotné stáří stejně jako voda z něj odtékající.

Následuje popis knihovny komponent pro vytvoření modelu stáří vody a jejich stručný popis.

2.5.2 Knihovna komponent modelu stáří vody

Knihovna pro výpočet stáří vody je tvořena ve stejném prostředí jako knihovna hydraulického modelu: Matlab/Simulink R2006a.

Potrubí



Obr. 2.13 a) Blok z knihovny diskrétního modelu v Simulinku: potrubí b) Znázornění vstupů a výstupů v závislosti na směru toku

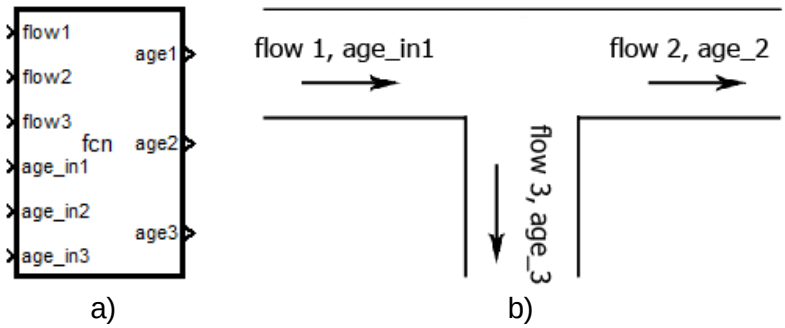
Bloky reprezentující potrubí mají tři vstupy a dva výstupy. Na první vstup (*flow*) je přiveden průtok tímto potrubím z hydraulického modelu (průtok musí být integrován po dobu periody výpočtu diskrétního modelu stáří vody). Druhým vstupem (*age in*) je stáří přitékající vody, třetí vstup (*age out*) je pak stáří přitékající vody z druhé strany potrubí – potrubí je tedy obousměrné. Kladné znaménko u průtoku signalizuje tok z leva doprava (stáří přitékající do potrubí je dáno vstupem *age in*). První výstup (*age fwd*) je využit v případě kladného toku a odpovídá stáří vytékající vody, při toku záporném voda vytéká z opačného konce potrubí se stářím *age back*. V tabulce 2.4 je soupis parametrů, které je nutné pro správnou funkci bloku potrubí nastavit

Název	Typ	Význam
Length	Parametr	Délka potrubí
Diameter	Parametr	Průměr potrubí
Initial age	Parametr	Počáteční stáří vody v potrubí
Number of parcels	Parametr	Počet balíků vody v potrubí
Time step	Parametr	Perioda výpočtu stáří vody
Flow	Vstup	Průtok potrubím
Age in	Vstup	Stáří přitékající vody zleva (kladný flow)
Age out	Vstup	Stáří přitékající vody zprava (záporný flow)
Age fwd	Výstup	Stáří vytékající vody zprava (kladný flow)
Age back	Výstup	Stáří vytékající vody zleva (záporný flow)

Tab. 2.4: Tabulka parametrů, vstupů a výstupů bloku diskrétního modelu: potrubí

Parametr, který má vliv na kvalitu modelování je počet segmentů, na které je potrubí rozděleno. Čím větší je počet segmentů, tím méně je nutné průměrovat stáří přitékající vody, ovšem za cenu zvýšené výpočetní náročnosti. Zvyšovat počet segmentů je vhodné pouze v případech, kdy voda potrubím teče velice pomalu nebo se často mění směr toku.

Potrubní uzel

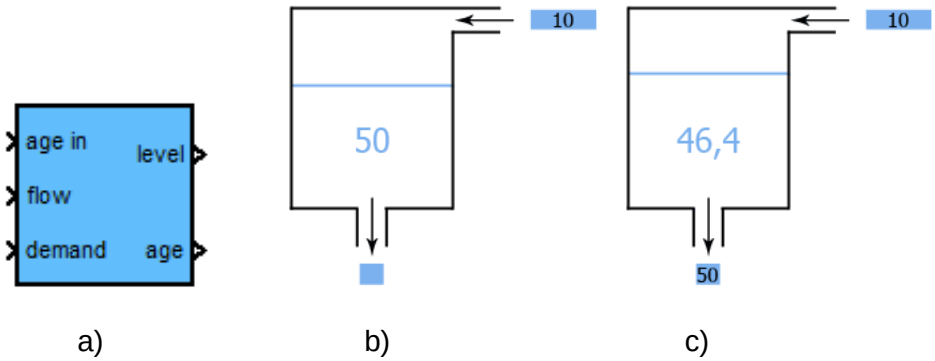


Obr. 2.14 a) Blok z knihovny diskrétního modelu v Simulinku: potrubní uzel. b) Příklad proudění vody v potrubním uzlu

Potrubní uzel (obr. 2.14) je místo spoje tří potrubních cest (stejně jako u hydraulického modelu). Má tedy tři vstupy udávající přítoky (odtoky) do (z) tohoto uzlu jednotlivými potrubími. Průtoky jsou čerpány z hydraulického modelu. Dalšími vstupy je stáří přitékající vody. Na výstupech je pak stáří vody odtékající. Výpočet je prováděn váženým průměrem přítoků a jejich stáří. Obrázek 2.14b znázorňuje vstupy a výstupy. Flow1 (přítok do uzlu) a age_in1 (stáří přitékající vody) jsou vstupy a flow1 je v tomto případě kladný. Flow2 a flow3 jsou také vstupy a reprezentují odtok z uzlu (mají tedy zápornou hodnotu), stáří odtékající vody je age_2, resp. age_3. V tomto případě je tedy age_in1 = age_2 = age_3.

Vodojem

Zásobník vody je reprezentován, podobně jako v hydraulickém modelu, několika typy bloků. Základní blok má celkově tři vstupy: stáří přitékající vody, průtok a odběr vody. Výstupy udávají aktuální stáří vody ve vodojemu a její objem. Pro modelování stáří vody ve vodojemu je využita metoda úplného mísení popsána výše v této kapitole.



Obr. 2.15 a) Blok z knihovny diskrétního modelu v Simulinku: vodojem. b, c) Příklad výpočtu stáří vody ve vodojemu

Výpočet stáří vody ve vodojemu probíhá tak, jak je zobrazeno na obr. 2.15b,c. Přitékající balík vody o objemu 1 a stáří 10 přitéká do vodojemu s aktuálním

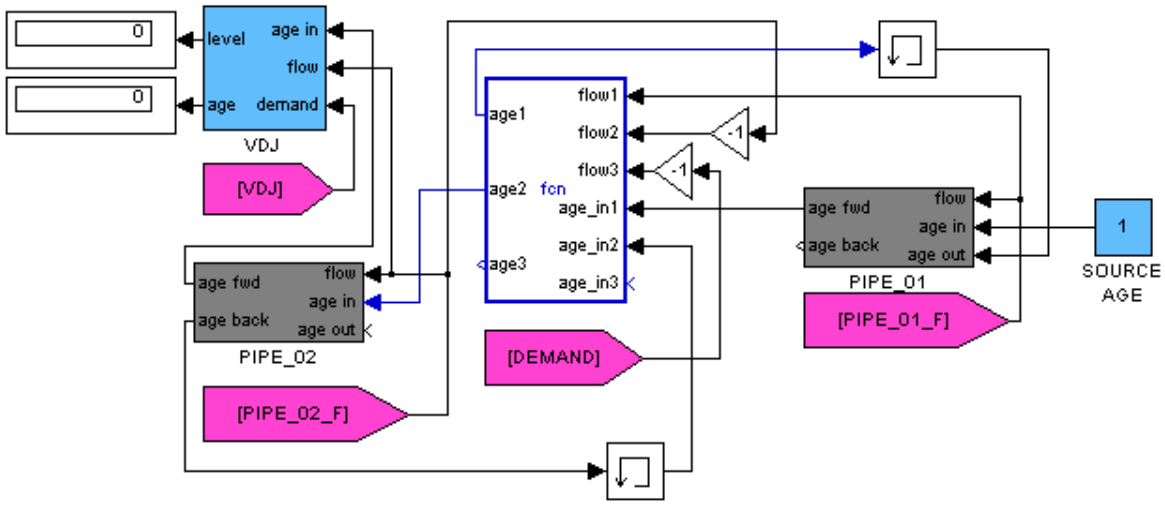
akumulovaným objemem 10 a stářím 50. Vytékající balík má stáří vody 50. Tabulka tab. 2.5 popisuje vstupy, výstupy a parametry vodojemu.

Název parametru	Parametr	Význam
Initial age	Parametr	Počáteční stáří vody ve vodojemu
Initial volume	Parametr	Počáteční objem vody ve vodojemu
Time step	Parametr	Perioda výpočtu stáří vody
Age in	Vstup	Stáří přitékající vody
Demand	Vstup	Odběr vody
Volume	Výstup	Aktuální objem vody ve vodojemu
Age	Výstup	Aktuální stáří vody ve vodojemu

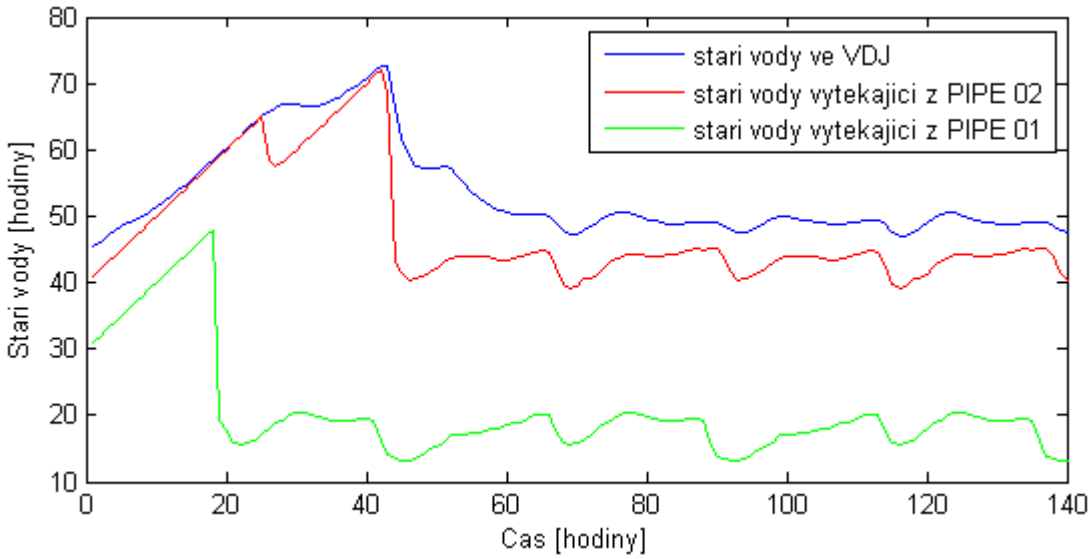
Tab. 2.5 Tabulka parametrů, vstupů a výstupů bloku diskrétního modelu: vodojem

2.5.3 Příklad

Následuje příklad jednoduché vodárenské soustavy s jedním zdrojem vody, krátkou potrubní sítí, samostatným odběratelem a vodojemem s odběrem. Na této malé síti bude prezentována funkce modelu stáří vody. Modelovaný diskrétní systém je napojen na odpovídající hydraulický model z předchozí kapitoly (obr. 2.7), ze kterého jsou čerpány data o aktuálních průtocích. Zdroj vody dodává vodu do systému se stářím 1 (*SOURCE AGE*).



Obr. 2.16 Fiktivní síť počítající stáří vody systému z obr. 2.7



Obr. 2.17 Stáří vody ve vodojemu *VDJ* a na konci potrubí *PIPE_01* a *PIPE_02*

Objemy vody v potrubí i vodojemu byly nastaveny na svoji počáteční hodnotu. Do doby, než inicializační podmínky neodezní, simulované hodnoty mají velice nízkou vypovídající hodnotu. Odeznění přednastavených hodnot je zřejmé z grafu 2.17. Nejprve odezní počáteční stáří v potrubí *PIPE_01* (zelený průběh) a její tvar se ustálí podle denní spotřeby. Následuje analogicky stáří vody vytékající z *PIPE_02* (červený průběh) a nakonec voda ve vodojemu *VDJ* (modrý průběh), kam se musí veškerý objem (mimo odběru *DEMAND*) s nastaveným počátečním stářím dopravit. Blok „zpoždění“ je aplikován mezi jednotlivými komponenty pouze ve zpětných propojeních (kdy voda teče opačným směrem) pro odstranění algebraické smyčky. V případě tohoto systému se jedná pouze o formalitu, stejně jako v případové studii v kapitole 4, protože voda teče výhradně jedním směrem ve všech potrubí.

Relativně vysoké stáří vody je dáno značnou délkou potrubí a nízkým průtokem: z grafu 2.17, ze zeleného průběhu je patrné, že voda potrubím *PIPE_01* proteče za přibližně 18 hodin a za přibližně 22 hodin potrubím PIPE_02 (podle červeného průběhu).

2.5.4 Závěr

V této kapitole byla vyvinuta knihovna komponentů pro modelování stáří vody v distribuční síti pitné vody na základě výše uvedených teoretických předpokladů. Jedná se o diskrétní model, který může být využit pro výpočet dalších atributů, jakými proudící voda v soustavě může disponovat (původ, chemismus, barva). Model je diskrétní ve smyslu změny modelovaných veličin při simulaci – stáří vody se mění skokově s periodou výpočtu. Základním parametrem, který je nutné u každého podobného modelu volit je tedy perioda, se kterou je výpočet prováděn. Příliš krátká perioda má za následek navýšení časové náročnosti simulace, dlouhé intervaly mezi jednotlivými výpočty snižují přesnost a hodnotu získané informace. Zvolená perioda musí být vždy odpovídat rozloze a chování systému, jak bude uvedeno na konkrétním příkladu v kapitole 4.3.

Stáří vody, podobně jako jiné atributy počitatelné výše uvedeným modelem nelze měřit. Korektnost modelu tedy nelze ověřit. S tímto jsou spojeny nepřesnosti zanesené do modelu a to především v oblasti mísení vody v potrubních uzlech a vodojemech. Stávající přístupy jsou velice hrubě zjednodušené – díky neměřitelnosti je však nemožné je zdokonalit. Informace z tohoto typu modelů ale nejsou určeny k obdržení dokonalých výsledků, které jsou očekávány u modelu hydraulického. Mají dát provozovateli distribuční sítě jistý přehled o jejím fungování a případných nedostatcích. Pomocí těchto modelů lze měnit nastavení řídicích algoritmů a sledovat rámcové změny, které nové nastavení přineslo.

3. Řízení

Komplexní procesy vyžadují sofistikované řízení, aby plnili svoji funkci a aby ji plnily co nejlépe. Do určité míry složitosti systému řídicí funkci může vykonávat člověk nebo skupina lidí. U složitějších systémů nebo v případech, kdy je požadováno sledovat více cílů a řízený systém udržovat na pokraji omezujících podmínek je nezbytné, aby byl člověk nahrazen počítačem s řídicím algoritmem. Menší distribuční soustavy pitné vody lze řídit zcela manuálně (operátor ovládá ventily a čerpadla ručně) nebo s pomocí jednoduchých regulátorů udržujících hladiny ve vodojemech na požadovaných hodnotách (otevření přítokového ventilu nebo čerpadla je ovládáno plovákem, který se hýbe spolu s hladinou ve vodojemu). Větší soustavy, nebo soustavy, jejichž kapacita je plně využita a při nevhodném nastavení může docházet k nedostatku nebo naopak přebytku vody v určitých oblastech, je vhodné aplikovat složitější řídicí systém, který by tyto stavy vyloučil. Kvalitní automatizované řízení distribuční soustavy zajistí nejen její bezproblémové dlouhodobé fungování, ale zároveň může přinést vyšší zisky jejímu provozovateli, snížit provozní náklady, zvýšit kvalitu distribuované vody a celkově vylepšit chod stávající soustavy. Tato kapitola bude věnována nástrojům a postupům, které jsou využívány k dosažení výše vyjmenovaným výhodám automatizovaného řízení. Tyto nástroje budou využity pro nastavení řízení v případové studii v kapitole 4.

3.1. Cíle řídicího systému a nástroje k jejich dosažení

Provozovatel distribuční sítě, jak již bylo zmíněno v předchozím textu, je komerční společnost, jejímž hlavním cílem je maximalizovat svůj zisk. K dosažení tohoto cíle může přispět mnoho faktorů, některé z nich lze ovlivnit pouhým přenastavením řídicího systému.

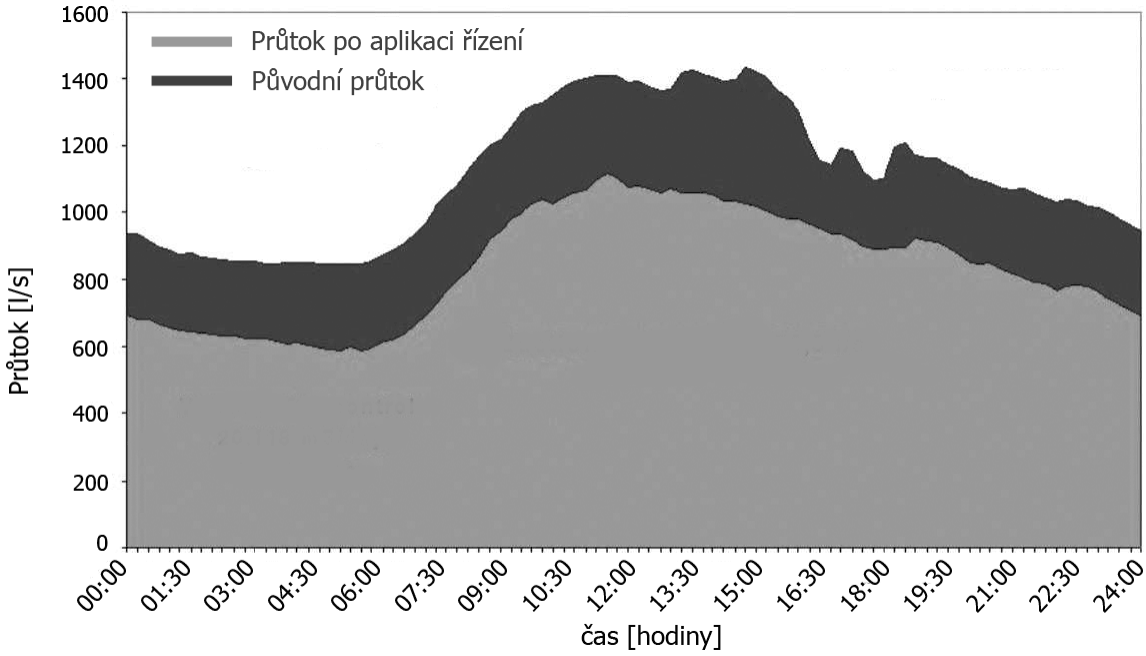
3.1.1. Snížení úniků vody

Příjmy provozovatele soustavy se odvíjí od objemu fakturované vody odběratelům, tento objem se však výrazně liší od objemu vody vyrobené. Část tohoto rozdílu je spotřebována na vlastní údržbu soustavy – nutnost odkalovaní potrubí a čištění vodojemů. Druhá, neméně významná část je únik vody z poškozených potrubí během samotného transportu. Potrubí, které je z valné většiny vedeno pod zemí, je vystaveno nepříznivým vnějším vlivům a za často i desítky let jeho využívání dochází k drobným i větším poškozením. Při větších haváriích má porucha vliv na dodávku vody a část potrubí nebo potrubního uzlu je opravena. V případě menších úniků je místo poruchy velice obtížné detekovatelné. V celé distribuční soustavě je takovýchto míst velice mnoho a celkový objem unikající vody je v průměru 10 - 20% veškeré vody vyrobené [9].

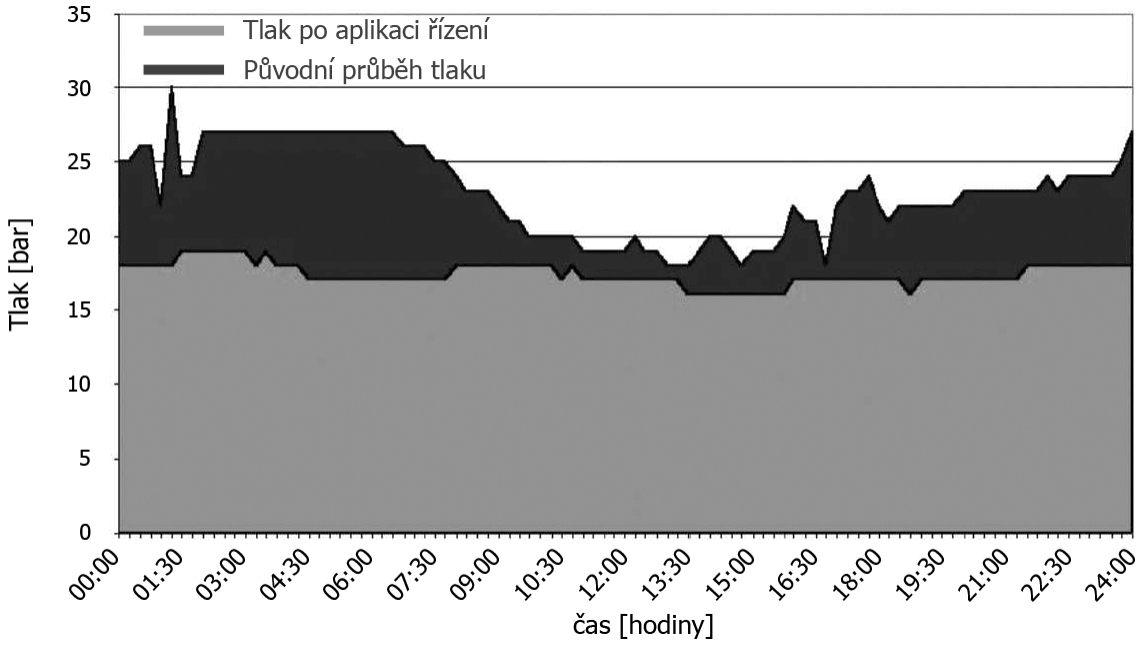
<table>
<tr><td rowspan="6">Vstupní objem vyrobené vody</td><td rowspan="2">Autorizovaný odběr</td><td rowspan="2">Proplacený odběr</td><td>Fakturovaný měřený odběr + voda předaná</td><td rowspan="2">Vyrobená voda s výnosem</td></tr>
<tr><td>Fakturovaný neměřený odběr</td></tr>
<tr><td>Neproplacený odběr</td><td>Nefakturovaný měřený a neměřený odběr</td><td rowspan="5">Vyrobená voda bez výnosu</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Úniky</td><td rowspan="2">Zdánlivé úniky</td><td>Neoprávněné odběry</td></tr>
<tr><td>Nepřesnosti v měření u odběratelů</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Reálné úniky</td><td>Úniky v potrubí</td></tr>
<tr><td>Úniky v zásobnících</td></tr>
<tr><td>Úniky v přípojkách</td></tr>
</table>

Tab. 3.1 Využití a výnosnost vyrobené pitné vody [16]

Nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje rozsah reálných úniků a je ovlivnitelný řídicím systémem je tlak v potrubní síti. Na následujících grafech jsou jako příklad vyobrazeny průběhy průtoků a tlaku v potrubí dlouhém 63,7 km před a po aplikaci řízení tlaku v konkrétní distribuční síti [10].



Obr. 3.1 Měřený denní průběh průtoku před a po aplikaci řídicího algoritmu a redukčních ventilů



Obr. 3.2 Měřený denní průběh tlaku před a po aplikaci řídicího algoritmu a redukčních ventilů

Míra úniku, průtok *L*, poškozeným potrubím je definována následujícím vzorcem [10]:

$$L = C_d A(2gP)^{0,5} \tag{3.1}$$

Kde L= průtok otvorem [$m^3 \cdot s^{-1}$]
C_d = koeficient výtoku [-]
A = plocha otvoru [m^2]
P = tlak v místě otvoru [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$]
g = gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

Rozměr otvoru *A* však může být závislý právě na tlaku *P*. Proto je uváděn další vztah zvaný FAVAD (Fixed And Variable Area Discharges) [10], který zavádí koeficient N_1 určující jakou mírou se mění otvor v závislosti na tlaku.

$$L_1/L_0 = (P_1/P_0)^{N_1} \tag{3.2}$$

Tento vzorec uvádí, jakým způsobem se změní únik (z L_0 na L_1) v případě, že je změněn tlak z P_0 na P_1 [11]. Koeficient N_1 je volen v rozmezí 0,5 – 2,5 v závislosti na materiálu z jakého je vyrobeno potrubí. Elastické materiály mají koeficient N_1>1,5, pro kovové potrubí se N_1 blíží 0,5. V průměru, pro sítě s mnoha typy použitých materiálů, je volen koeficient N_1=1 [10]:

Pro provozovatele soustavy je stejně podstatné, jako snížit objem unikající vody, také minimalizovat počet nově vznikajících míst úniku. Největší vliv na tvorbu nových trhlin v potrubích a přípojkách (mimo vnější vlivy) má fluktuace tlaku v systému. Časté změny ve výšce tlaku a především tlakové špičky namáhají komponenty distribuční sítě nejvíce a jsou iniciátory nových úniků [10]. Řídicí systém

se má tedy snažit nejen o minimalizaci průměrného tlaku v potrubí pro snížení úniků ze stávajících trhlin a netěsností, ale také o redukci tlakových špiček.

Nástrojů k redukci tlaku je několik. Nejjednodušší cesta je snížení hladin ve vodojemech. Tato metoda je využita také pro snížení stáří vody a je popsána detailně v následující kapitole. Do soustav jsou instalovány tlakové redukční ventily, které udržují tlak v nastavených mezích [15]. Pomocí těchto ventilů a řídicích algoritmů je provedena regulace tlaku (obr. 3.2), což má za následek výraznou úsporu ve snížení unikající vody (obr. 3.1). V místech, kde může být tlak redukován výraznějším způsobem a potrubím protéká značný objem vody, může být vhodným řešením instalace vodní turbíny. Turbína připojená na generátor vyrábí elektrickou energii a zároveň snižuje tlak. Oba tyto procesy musí být řízeny tak, aby byly pro distribuční síť prospěšné. Návrh řízení vodní turbíny přesahuje rozsah této práce.

Obr.3.3 Tlakový redukční ventil [15]

3.1.2. Minimalizace stáří vody, maximalizace kvality vody

Distribuční síť pitné vody je mnohdy velice rozsáhlý systém, propojující více měst. Takováto vodárenská soustava má často jen jeden nebo několik hlavních zdrojů vody, která se ještě před vpuštěním do systému musí chemicky upravit, aby splňovala zákonem daná kritéria, jak bylo popsáno v kapitole 1. Pitná voda musí být upravena tak, aby zůstala pitnou až do doby, kdy se dostane k odběrateli. Tato doba je označována jako „stáří vody“, tedy čas, který voda setrvá v distribuční soustavě. Chemikálie, kterými je voda upravena, reagují a s časem jejich účinek mizí (bližší popis v kapitole 2. Cílem řídicího systému tedy je, aby voda po upravení co nejrychleji doputovala ke svému odběrateli; jinými slovy, aby v soustavě byl každý okamžik co nejmenší objem pitné vody. Samozřejmě snížení aktuálního objemu v síti nemůže být na úkor kvality dodávky nebo být v rozporu s místní požární vyhláškou o minimálním objemu vody ve vodojemech.

Voda stárne především v zásobnících – čeká, až bude dopravena k odběrateli. Význam vodojemů byl popsán v kapitole 1. V případě, že špičky odběrů výrazně nepřevyšují možnosti přítoku do vodojemu, není potřeba využívat vodojem jako zásobník vody, ale pouze jako stabilizátor tlaku. Hladina může být udržována v

minimální výšce a i tato výška se může měnit – v nočních hodinách, kdy je odběr malý je možné snížit hladinu pouze na výšku danou místními požárními směrnicemi. Čím je akumulovaný objem menší, tím rychleji se dostává čerstvá voda od zdroje k zákazníkovi – není tolik mísena se starou vodou v zásobnících.

Plánování času plnění vodojemů hraje také velice podstatnou roli. Díky historickým datům a informacím o typu odběratelů lze, jak je popsáno v kapitole 3, stanovit typickou křivku spotřeby pro oblast zásobenou ze zvoleného vodojemu. Před nárůstem odběru je vhodné načerpat čerstvou vodu a tím zabezpečit dostatečnou zásobu na pokrytí špičky spotřeby. Naopak před poklesem na odběrové křivce je důležité nechat hladinu klesnout tak, aby stárl v době nízké spotřeby co nejmenší objem vody.

Řídicí systém má tedy za úkol dynamicky nastavovat minimální a maximální výšky hladin v jednotlivých vodojemech a plánovat časy vhodné pro napouštění vodojemu čerstvou vodou.

Stáří vody, jak bylo uvedeno v kapitole 3, reprezentuje zároveň její kvalitu: obsah chemických desinfekčních látek, počet mikroorganismů atp. Stáří vody je pro zkušené operátory distribuční soustavy vhodnější informace než např. počet kolonií mikroorganismů.

V případě, že řídicí systém dokáže snížit stáří vody v celé soustavě, je možné aplikovat méně chemikálií v úpravnách vody nebo změnit typ chemikálie, což může opět vézt ke snížení provozních nákladů.

3.1.3. Snížení provozních a servisních nákladů

Distribuční soustava vyžaduje neustálou kontrolu a dohled. Havárie je nutné řešit neprodleně, provozovatel musí mít jistotu, že nedojde k přerušení dodávky např. díky nedostatku vody v zásobníku způsobeným nevhodnou regulací. Plně automatizovaný řídicí systém dokáže snížit nároky na lidské zdroje. Dohled je však neustále nutný, i když v menším rozsahu. Naopak složitý řídicí systém vyžaduje odborníky v oboru řízení, kteří v případě změn na soustavě mění nastavení.

Automatizovaný a vhodně navržený řídicí systém může snížit opotřebení akčních členů soustavy. V případě většího počtu čerpadel v čerpací stanici je plánováno jejich spouštění tak, aby byly využívány rovnoměrně. Spouštění je prováděno na delší doby, aby se mohl omezit počet spouštění, které elektrické točivé stroje zatěžuje více než kontinuální provoz. Plánován je také čas, kdy jsou čerpadla spouštěna pro snížení nákladů na elektrickou energii (v případě využívání nízkého a vysokého tarifu). Řízení tlaku, které bylo popsáno výše v této kapitole, také snižuje počty vzniků nových trhlin v potrubí a netěsností a tím snižuje náklady na detekci a opravy úniků.

3.2. Závěr

Tato kapitola byla věnována řídicím systémům distribučních sítí – především jejich cílům a nástrojům, kterými je možné těchto cílů dosáhnout. Veškerý text výše byl věnován především pozitivním ekonomickým vlivům automatizovaného řídicího systému. Dalším pozitivním efektem je snížení zodpovědnosti u operátorů. Řízení je nastaveno tak, aby

systém fungoval v nejlepších možných podmínkách. Běží-li paralelně se skutečným systémem simulace modelu v reálném čase, tak si dispečer může otestovat svá rozhodnutí (např. při haváriích nebo jiných nestandardních případech) na zrychlené simulaci modelu a tím se vyhnout nevhodným úkonům. Pro aplikaci komplexního řídicího systému je však nutný hardware a odborník, který je schopen tento systém udržovat a zavádět případné úpravy při změnách v distribuční síti (v potrubní síti, odběrech atd.).

4. Případová studie – Distribuční soustava pitné vody VAKV

4.1 Obecný popis soustavy

Společnost Vodovody a kanalizace Vsetín (dále jen VAKV) provozuje distribuční soustavu pitné vody pro Vsetín a přilehlé obce. Páteřní distribuční systém soustavy je skupinový vodovod Stanovice, který je tvořen vodovodním řadem včetně vodojemů mezi městy Karolinka, Vsetín, Poteč, Valašské Meziříčí, Rožnov pod Radhoštěm a Kelč. Hlavní zdroje pitné vody jsou shrnuty v tabulce níže spolu s jejich procentuálním vyčíslením využití. VAKV zásobuje pitnou vodou 106 420 obyvatel v okrese Vsetín a částí okresů Přerov a Zlín s průměrnou spotřebou 85 l/den na osobu a disponuje 756 km vodovodního potrubí. Na vodovodních sítích je 85 vodojemů s celkovým akumulačním objemem 49 930 m^3.

Výroba pitné vody v okrese Vsetín za rok 2009 [12]			
Místo:	Výroba vody [tis. m^3]	Podíl na celkové výrobě [%]	Zdroj
ÚV Karolinka	3800	56,1	Povrchová v.
ÚV Val. Meziříčí	502	7,4	Povrchová v.
Vsetín - Ohrada	1759	26,0	Podzemní v.
Rožnov pod Radhoštěm	479	7,1	Povrchová v. Podzemní v.
Kelč	40	0,6	Podzemní v.
Místní zdroje celkem	191	2,8	Podzemní v.

Tab. 4.1 Seznam zdrojů pitné vody VAKV a jejich procentuální využití

Z celé vodárenské soustavy byly vybrány oblasti, které jsou v této práci modelovány. Tato selekce byla nezbytná – distribuční síť okresu Vsetín je příliš rozsáhlá pro jednu diplomovou práci. Modelovaná oblast je tedy část páteřního distribučního systému. Celá soustava je znázorněna na mapě (Obr. 4.2).

Výhodou distribuční soustavy okresu Vsetín je vhodné umístění hlavního zdroje (Karolinka), který je v nadmořské výšce 497.2 m, což je výše než valná většina celého systému. Poloha hlavního zdroje umožňuje ve výrazně větší části soustavy transport vody pouze na bázi gravitace bez přídavných čerpacích stanic – naopak je potřeba tlak v některých místech redukovat redukčními stanicemi.

Obr. 4.2 Mapa distribuční soustavy VAKV [12]

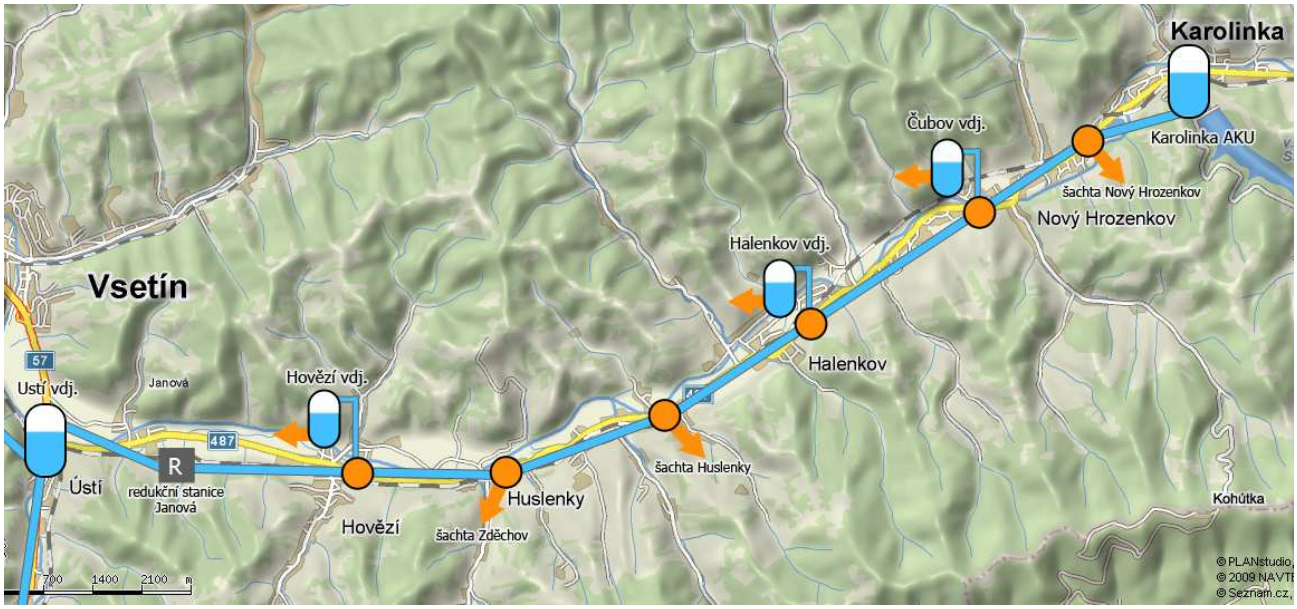
Aktuálně je provoz soustavy řízen pomocí ventilů řízených výškou hladin jednotlivých vodojemů. Vodojemy jsou obecně udržovány plné. Kvalita vody je díky kvalitním zdrojům a úpravnám vody v rámci stanovených mezí. V místech, kde je nutné vodu čerpat do výše umístěných vodojemů, jsou tato čerpadla taktéž ovládána na základě výšky hladiny v cílovém vodojemu. Automatické řízení navržené v této práci si klade za cíl skladovat ve vodojemech co nejmenší množství vody a tím snížit tlak, zkrátit dobu, kterou voda setrvá v distribuční soustavě a minimalizovat spotřebu elektrické energie, respektive minimalizovat tuto spotřebu v časech vysokého tarifu a tím snížit provozní náklady.

4.2 Hydraulický model

Tato kapitola se bude zabývat tvorbou a laděním hydraulického modelu. Zároveň zde bude prověřena funkce modelu a simulace budou porovnány s naměřenými daty z reálného systému.

4.2.1 Tvorba základního hydraulického modelu

Hydraulický model je složen z komponent popsaných dříve v této práci. Podle mapy distribuční soustavy jsou spojeny potrubí, potrubní křižovatky a vodojemy tak, aby proudění vody odpovídalo skutečnosti. Z dodaných dat jsou nastaveny výškové rozdíly mezi jednotlivými vodojemy a potrubními uzly. Výsledný model je velice hrubě nastaven a jeho funkce se s největší pravděpodobností nebude reálné soustavě ani blížit. Na mapě níže (obr. 4.3) je znázorněna část modelované oblasti.



Obr. 4.3 První modelovaná část soustavy VAKV: Karolinka. Oranžové šipky reprezentují místa odběru, oranžová kolečka potrubní uzly

Distribuční soustava VAKV je složena z potrubí z různých materiálů (PVC, ocel, azbestocement); vodojemů, které mají přítok vždy umístěn v horní části a odtok ve dně a ventilů řízených hladinou ve vodojemech. Dalšími prvky, které se v síti vyskytují, je redukční tlaková stanice a čerpací stanice. Umístěním, nastavením a naladěním jednotlivých komponent se budeme zabývat v této kapitole.

Blíže se budeme věnovat modelování první části soustavy nazvané Karolinka podle ústředního objektu celého systému, akumulační nádrže Karolinka. Tato oblast obsahuje mnoho potrubních uzlů, tři nezávislá odběrná místa, pět zásobníků vody včetně nádrže Karolinka a redukční stanici Janová (obr. 4.3).

Celá distribuční soustava je závislá na zdroji pitné vody, který je napojen přímo přes úpravnu vody k akumulační nádrži Karolinka – zásobník s jedním z největších

objemů celé sítě. Z této nádrže tedy vede tzv. páteřní síť s největším průměrným průtokem. Na toto vysokokapacitní potrubí, které vede přímo do druhého největšího vodojemu a také velice podstatného uzlu sítě, Ústí, jsou napojeny tři odbočky k zásobníkům vody pro menší obce ležící v jeho blízkosti (Halenkov, Nový Hrozenkov, Hovězí) a tři odběrná místa (šachta Nový Hrozenkov, šachta Huslenky, šachta Zděchov). Síť je ve skutečnosti ještě rozsáhlejší – na výše zmíněné vodojemy jsou připojeny místní distribuční sítě.

Výše popsané komponenty jsou vybrány z vytvořené knihovny Matlab/Simulink popsané dříve v textu a propojeny podle výše popsaného schématu. Zapojený model této a ostatních oblastí je v příloze 7.7 - 7.9, kde zelené šipky označují směr toku vody a žlutý blok je maska modelu stáří vody. Inicializační hodnoty a parametry všech komponent jsou uloženy v inicializačním souboru. Pro zpřesnění modelu je nezbytné, aby byl naladěn podle naměřených dat. Ladění matematického modelu se budeme věnovat v následujících kapitolách.

4.2.2 Analýza obdržených měřených zaznamenaných dat

Měřená a zaznamenaná data, která jsou ze sítě VAKV k dispozici je nutné před jejich použitím analyzovat. Zaznamenávání ani měření není dokonalý proces a některé z údajů mohou být neplatné nebo nedostupné. Tyto údaje je nutné korigovat nebo brát v úvahu jejich absenci. Samotné měřicí přístroje mohou vykazovat chybu. Opět se zaměříme pouze na analýzu dat (měřených průtoků) v první modelované oblasti, v ostatních částech probíhá analýza analogicky.

SHRNUTÍ	Průměr m^3/den
Přítok – odtok (Karolinka)	513,50
Přítok – odtok (Ústí)	584,56
Odtok Karolinka	10328,69
Součet odběrů	539,56
Přítok Ústí	9649,72
Rozdíl (odtok Karolinka - přítok Ústí - odběry)	139,41

Tab. 4.2 Analýza měřených dat oblasti Karolinka za 11 měsíců

Z dat je patrná jistá nekonzistence. Do hlavního zdroje, Karolinky, přitéká z úpravny v průměru o 513,5 m^3 vody za den více, než odtéká (průměr byl vypočten z dat za 11 měsíců). Podobnou nesrovnalost vykazují i měření přítoku a odtoku z vodojemu Ústí, kde je rozdíl 584,56 m^3 za den. Tento jev je daný nutností několikrát do roka síť pročistit proudem vody s vysokou rychlostí. Tímto úkonem je odstraněn kal, resp. usazeniny v potrubích. Pitná voda využitá k proplachu proteče potrubími s měřicími přístroji, které ji zaznamenají, ale je vypouštěna na různých místech soustavy přímo do kanalizace. Tento typ odběru se nazývá vlastní spotřeba a velice podstatně hýbe spolu s únikem vody při transportu s poměrem produkce pitné vody k objemu fakturované vody zákazníkům (viz tab. 4.3). Je tedy patrné, že dlouhodobě průměrované data nejsou využitelná.

Využití vyprodukované vody v roce 2009 [12]		
	tis. m^3	%
Voda fakturovaná	4945	73
Voda předaná	1021	15
Voda nefakturovaná	805	12

Tab. 4.3 12% veškeré vyrobené vody za rok 2009 bylo vyžito k vlastní spotřebě nebo uniklo při transportu

Dlouhodobé průměry měřených dat byly využity pouze k získání typických křivek spotřeby ve všech odběrných místech pro různá roční období a pracovní dny a víkendy. Pro ladění systému byla využita data jednotlivých dnů bez průměrování pro zajištění kvalitnějšího nastavení, jak bude popsáno v následující kapitole.

4.2.3 Ladění matematického modelu

Pro vytvoření matematického modelu, který se co nejvěrněji podobá skutečnému systému, je zapotřebí měřených dat, která jsou popsána a analyzována v dřívější kapitole.

Každý komponent matematického modelu má nejméně jeden parametr, který nelze určit jinou cestou, než pomocí měřených dat a systematickým laděním, kterému může předcházet hrubý výpočet z dostupných parametrů hydraulického systému. V následujícím odstavci bude uveden postup využití dat pro naladění vodojemů a potrubí, který byl aplikován na celý model.

Potrubí

Základním přímo neměřitelným parametrem, který určuje vlastnosti potrubí v matematickém modelu je koeficient ztráty tlaku vody - velikost tření, které působí proti směru toku vody v potrubí, jak bylo popsáno v kapitole 2. V této kapitole bude popsáno, jak lze koeficient určující snižování tlaku určit. Je nutné mít k dispozici mimo snadno dostupných parametrů typu délka a průměr potrubí i průměrnou rychlost protékající vody a především koeficient hrubosti materiálu, ze kterého má potrubí vnitřní povrch. Tyto koeficienty jsou pro různé materiály obecně známy [13]. Aplikací tabulkových hodnot ovšem nelze považovat model za odpovídající realitě, podobně jako např. průměr potrubí, který se mění působení vodního kamene. Z těchto důvodů je nutné využít měřená data pro upravení koeficientů a přiblížení modelu skutečnosti.

Pro dostatečné naladění modelu je podstatné, jaký typ dat je k dispozici stejně jako jejich kvalita. Model potrubí má dva vstupy a dva výstupy – vstupní a výstupní tlak, vstupní a výstupní průtok. V případě, že jsou k dispozici měřené vstupní a výstupní tlaky v dostatečné granularitě, je identifikace koeficientu, který zahrnuje všechny přímo neměřitelné vlastnosti potrubí přímočará. V případě sítě VAKV byla obdržena velice hrubá data a to především v podobě průtoků v jednotlivých potrubních uzlech spolu s průměrným tlakem na konci každého potrubního

segmentu. K dispozici jsou také informace o materiálu, ze kterého jsou jednotlivá potrubí vyrobena. Detailnější ladění bylo provedeno na prvním modelovaném úseku Karolinka – získané koeficienty byly pak dále použity v ostatních částech modelované sítě (koeficienty pro rozdílné typy materiálů). Ladění probíhalo zadáním hodnoty z výše zmíněných tabulek pro různé typy materiálů a jejich postupným upravováním bylo dosaženo optimálních tlaků, které se shodovaly s obdrženými měřenými hodnotami.

Vodojemy a ventily

Základní hodnotou, která je u vodojemů a jiných typů zásobníků vody měřená je výška hladiny. S touto dostatečně často zaznamenávanou veličinou spolu se zásahy dispečerů či maximálními a minimálními výškami hladin, na které je nastavena proporcionální regulace rozsahu otevření ventilů, lze namodelovat dynamiku otevírání ventilů a vliv ventilů na protékající vodu. Nezbytností je znát tvar a rozměry vodojemu spolu s výškou přepadu, odtoku a přítoku.

K dispozici pro každý modelovaný vodojem sítě VAKV jsou hodinové průměry výšky hladiny a hodinové průměry odtoku z těchto vodojemů. Pro vybrané zásobníky jsou také k dispozici hodinové průměry přítoku vody.

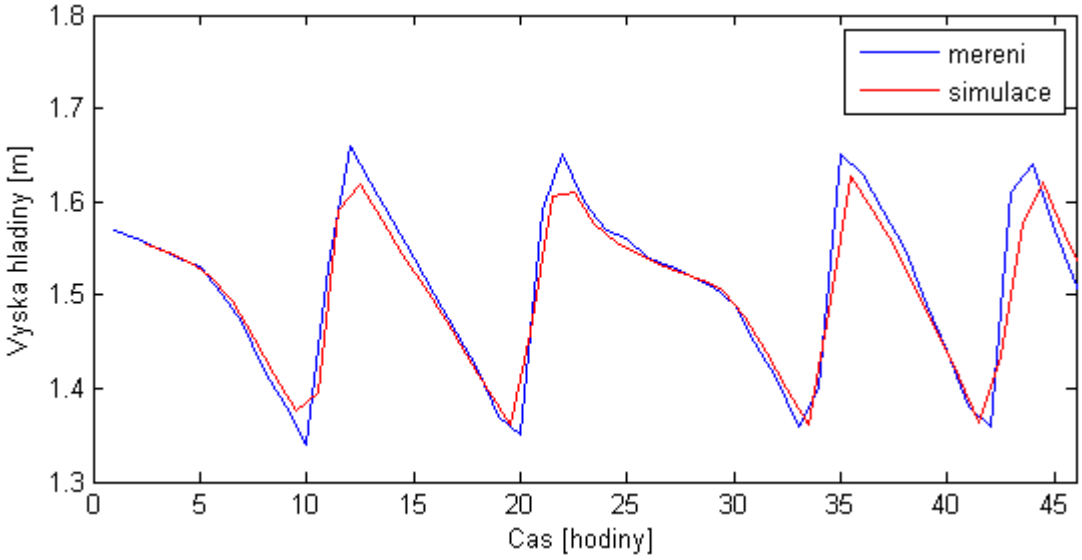
Hlavním parametrem, který je potřeba naladit je objemový průtok vody při různých polohách ventilu vpouštějícího vodu do vodojemu. Z důvodu nedostatku vhodných dat a úplné absence nastavení regulačních ventilů je kvalitní naladění prakticky nemožné, respektive nelze ověřit, zda naladěný systém skutečně odpovídá systému reálnému.

Přivedením známého tlaku na vstup vodojemu a sledování změny výšky hladiny při jeho otevření lze cyklickou optimalizací parametrů dosáhnout průběhu v ideálním případě identického s měřeným. Další korekce a to především v dynamice ventilu lze provádět z měřených průtoků, v případě, že jsou k dispozici data o dostatečné granularitě či data o konkrétních ventilech.

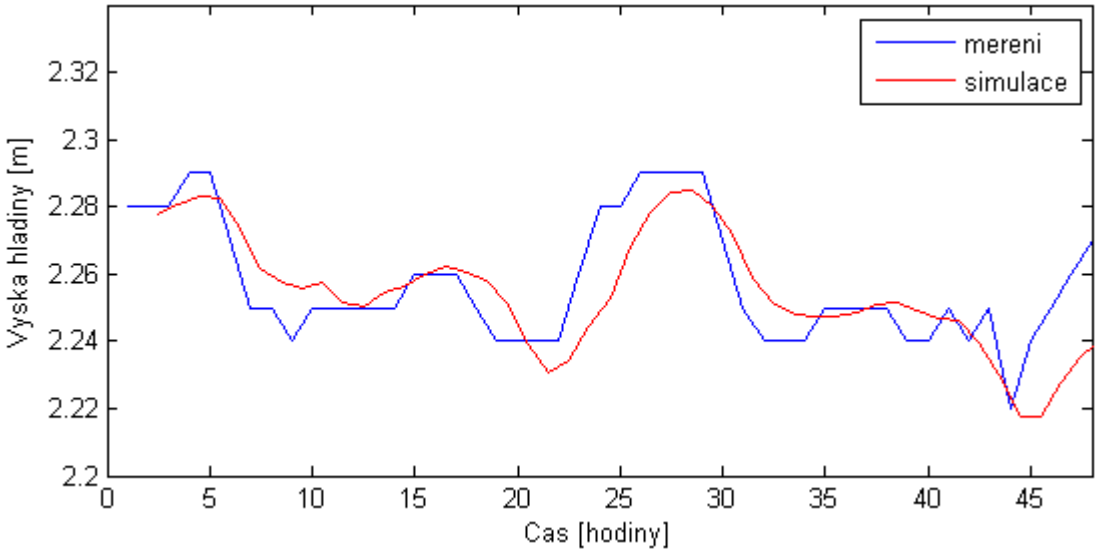
4.2.4 Předvedení funkce

V této části budou prezentovány dosažené výsledky vytvořeného modelu. Simulovány jsou dva dny funkce části distribuční sítě Karolinka (konkrétně 23.4. a 24.4. 2009). Měřené odběry z vodojemů a potrubních uzlů jsou spolu s měřenou hladinou ve vodojemu Karolinka vstupními daty. Následující grafy (obr. 4.4 a-d) zobrazují jak měřenou výšku hladiny skutečného systému ve vodojemech oblasti Karolinka, tak simulované výšky těchto hladin.

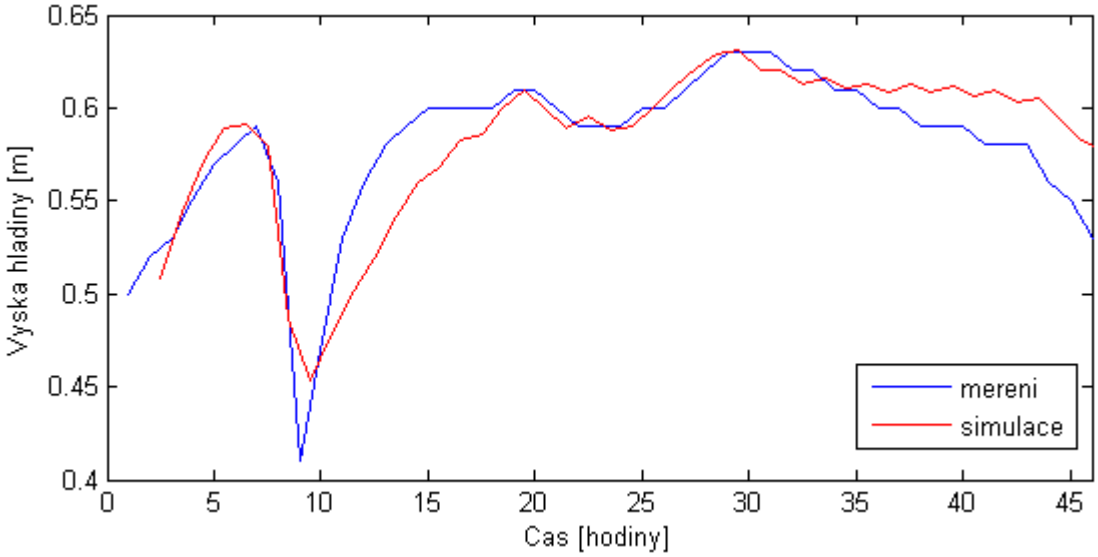
Před spuštěním simulace v programu Matlab/Simulink R2006a je nezbytné nejdříve spustit inicializační soubor INI.m, kterým načteme měřená data, parametry a jiná nastavení nezbytná ke správnému chodu simulace.


mereni
simulace
Vyska hladiny [m]
Cas [hodiny]
1.8
1.7
1.6
1.5
1.4
1.3
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45

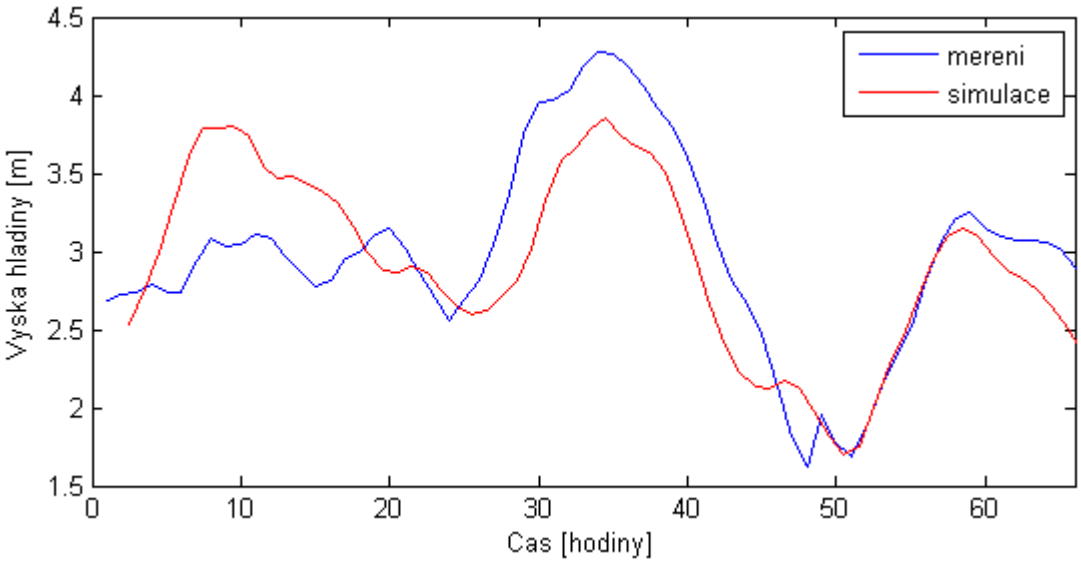
a)


mereni
simulace
Vyska hladiny [m]
Cas [hodiny]
2.32
2.3
2.28
2.26
2.24
2.22
2.2
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45

b)


mereni
simulace
Vyska hladiny [m]
Cas [hodiny]
0.65
0.6
0.55
0.5
0.45
0.4
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45

c)



d)

Obr. 4.4 Porovnání simulované a měřené výšky hladiny (interpolované hodinové průměry) ve vodojemech: a) Hovězí b) Halenkov c) Nový Hrozenkov Čubov d) Ústí

Výšky hladin ve vodojemech v oblasti Karolinka neodpovídají měřeným průběhům v plné míře. Následuje výpočet střední hodnoty chyby $\bar{e}$, směrodatné odchylky σ a variačního koeficientu v podle vzorců (4.1).

$$\bar{e} = \frac{1}{N}\sum_{T=1}^{N}|y_{mT} - y_{sT}| \qquad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{T=1}^{N}(y_{mT} - y_{sT})^2} \qquad v = \frac{\sigma}{\overline{y_m}} \qquad (4.1)$$

Kde N = počet vzorků
y_m = hodinové měřené průměry výšky hladiny v čase *T*
y_s = hodinové simulované průměry výšky hladiny v čase *T*

Vodojem	$\bar{e}$ * [m]	$\bar{e}$ * k průměrné výšce ** [%]	σ * [m]	$v \cdot 100$ * [%]
Nový Hroznekov	0,0225	4,06	0,0326	5,88
Halenkov	0,0071	0,31	0,0089	0,39
Hovězí	0,0587	3,92	0,0813	5,42
Ústí	0,3736	12,55	0,4339	14,58

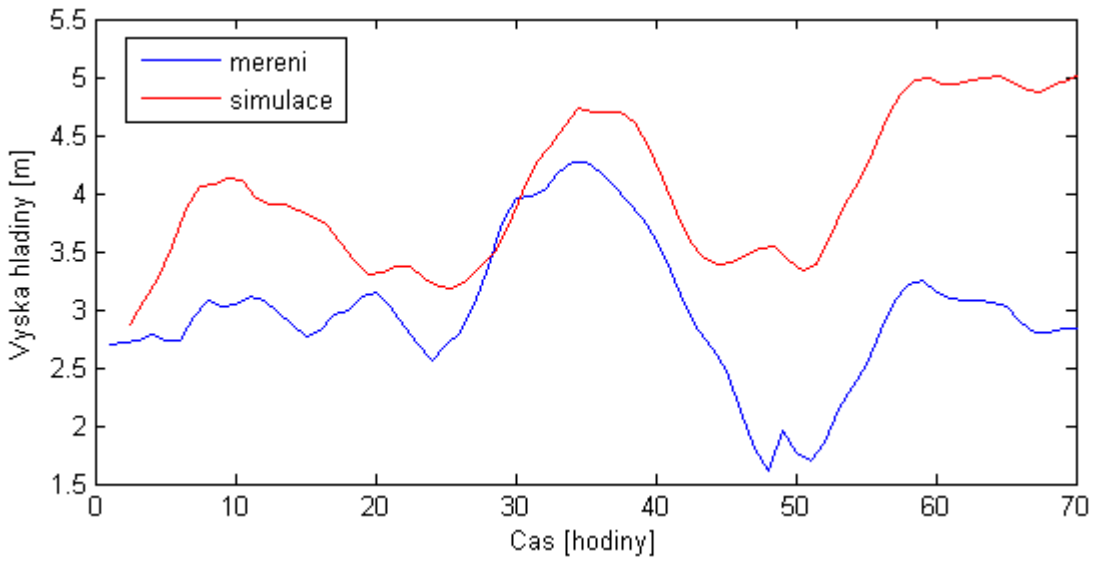
Tab. 4.4 Matematické srovnání simulovaných a měřených výšek hladin ve vodojemech

* Pro simulované dva dny na obr. 4.4, tedy N=48
** Vztaženo k měřené průměrné výšce hladiny ve vodojemu

Rozdíly mezi měřenými a simulovanými výškami hladin jsou dány mnoha rozdíly mezi reálným systémem a modelem. Kvůli nedostatečným informacím o

jednotlivých komponentech a samotném řízení výšek hladin byl model naladěn pouze z obdržených hodinových průměrů výšek hladin a všechny nezbytné parametry byly odhadnuty. Zejména simulace výšky hladiny vodojemu Ústí s liší od výšky měřené. V tomto případě se však může jednat i o chybu měření, jak je popsáno v následujícím odstavci a zobrazeno na obr. 4.5.

Model dokáže s obdobnou přesností simulovat funkci i v ostatních dnech, nezbytné je ovšem přenastavit minimální a maximální výšky hladin, na které je aktuálně regulováno. Shodnost modelu s měřenými daty je však velice relativní. U vodojemu Ústí disponujeme jak měřeními na přítoku, tak na odtoku a zároveň je zaznamenávána výška hladiny. Graf na obr. 4.5 zobrazuje porovnání průběhů výšek hladin, kdy jedna (modrá) je výška měřená na reálném systému a druhá (červená) je simulovaná. Při této simulaci do vodojemu přitéká měřený přítok a odtéká měřený odběr během stejného časového úseku. Teoreticky by se tedy měly průběhy do značné míry shodovat, což se ovšem neděje. Vysvětlením může být nepřesnost v měření průtoku (ať už na přítoku nebo odtoku) nebo vnitřní spotřeba, další neměřený odběr či únik. V delším časovém úseku je tato nekonzistence markantní (více v kapitole 4.2.2).



Obr. 4.5 Výška hladiny ve vodojemu Ústí: modrá – měřené hodinové průměry, červená – simulované hodinové průměry se vstupními měřenými daty

4.2.4 Závěr

Úkolem této podkapitoly bylo vytvořit model části sítě VAKV Karolinka a naladit ho pomocí naměřených dat tak, aby se co nejvíce blížil reálnému systému a byl využitelný pro návrh nového řízení. Simulované průběhy odpovídají do značné míry těm měřeným. Podobnost modelu s reálným systémem byla vypočítána pomocí střední hodnoty chyby, která u většiny pozorovaných vodojemů nepřesáhne 5% z celkové výšky hladiny. Pouze u jednoho vodojemu, Ústí, se měřená výška hladiny od té simulované značně liší. Tento rozdíl může být dán i nepřesným měřením na skutečném systému, jak je výše v textu blíže popsáno. Stav naladění a nastavení

modelu se tedy dá považovat za dostatečný pro využití k návrhu řízení; pravděpodobně by však nebyl vhodný pro sledování průběhů tlaků a průtoků během dlouhodobé simulace. Pro zpřesnění modelu by bylo nutné získat kvalitnější měřená data (větší granularita, více měřených veličin) a detailnější popis celé soustavy. Získávání dat a úprava modelu bude předmětem další práce. Hydraulický model bude v následujících kapitolách využit k sestavení modelu stáří vody a návrhu řídicího systému.

4.3 Model stáří vody

Model stáří vody je složen z bloků popsaných ve 2. kapitole**,** kdy sledovaným atributem pitné vody je právě stáří – tedy doba, kterou voda setrvá v distribuční soustavě, respektive v modelované části soustavy. Bloky jsou propojeny svými vstupy a výstupy stejně jako bloky hydraulického modelu, na kterém je tento diskrétní model závislý. Pro správnou funkci modelu stáří vody je tedy nezbytné disponovat kvalitně naladěným hydraulickým modelem. Model stáří vody je modelem diskrétním a je tedy nutné vhodně volit periodu, se kterou budou prováděny výpočty ve všech blocích. Samotný postup tvorby modelu stáří vody pro část distribuční sítě Karolinka je popsán v následujících odstavcích.

4.3.1 Popis tvorby

Po zapojení jednotlivých bloků knihovny podle mapy modelované sítě je nezbytné propojit hydraulický model a sestavený model stáří vody. Toto propojení je realizováno pomocí průtoků jednotlivými částmi potrubní sítě a odběry z vodojemů a potrubních uzlů – každé sledované místo je osazeno integrátorem, který po dobu časového kroku diskrétního modelu stáří integruje průtok. Naintegrovaný průtok je přiveden k odpovídajícímu prvku v modelu stáří vody. Tímto způsobem je prakticky veškerá potřebná dynamika hydraulického systému převedena do modelu stáří vody.

V této modelované části VAKV se nenachází žádné potrubí, ve kterém by mohla proudit voda oběma směry. V takovémto případě by byl průtok integrován dvěma integrátory – jeden pro tok kladný a druhý pro záporný.

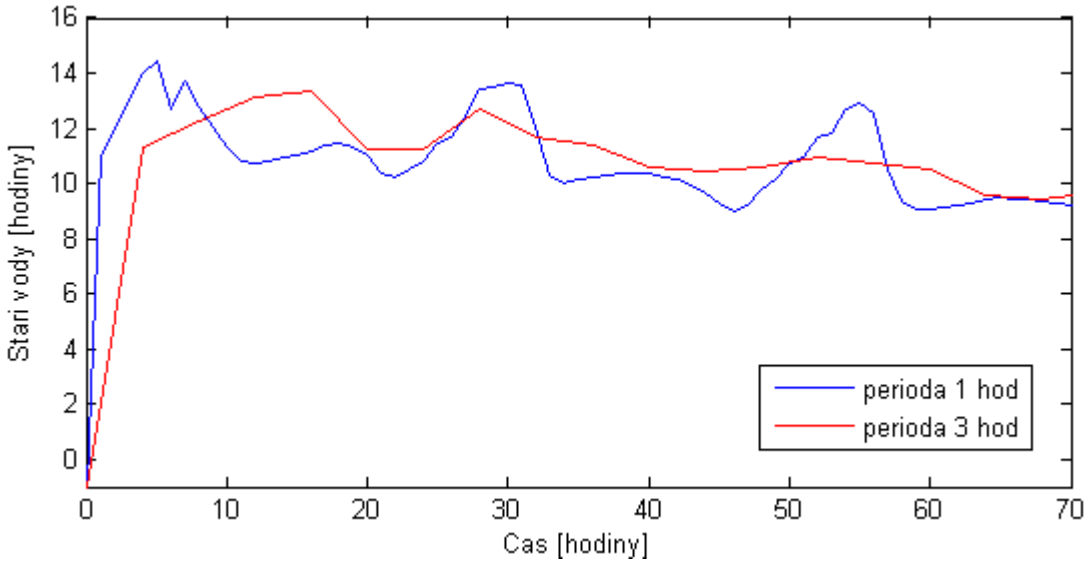
Nyní je nutné každému potrubí a vodojemu přiřadit inicializační stáří vody a v případě vodojemu ještě počáteční výšku hladiny, respektive objem. V této fázi je model stáří vytvořen a musí být ještě pro správnou funkčnost a lepší výsledky naladěn. Veškeré inicializační hodnoty jsou čerpány z inicializačního souboru stejně jako u modelu hydraulického.

4.3.2 Ladění

Na rozdíl od modelu hydraulického, je proces ladění diskrétního modelu stáří vody značně jednodušší. Jedinými parametry, kterými můžeme výrazně ovlivnit výsledek modelování je perioda vzorkování a počet segmentů v jednotlivých

potrubích. Důležitým nastavením je také správná volba počátečního stáří vody v jednotlivých komponentech.

Počet segmentů v potrubí je nutné volit a definovat podle obvyklé křivky průtoku tímto potrubím, kterou lze obdržet z naladěného hydraulického modelu. Při vysokém průtoku v krátkém potrubí je zbytečné navyšovat počet segmentů – voda jimi proteče za jeden časový krok. Naopak při nízkém průtoku, kdy voda setrvává v potrubí delší dobu a také v případě, že se často mění směr toku, je vhodné navýšit počet segmentů tak, aby se minimalizovalo průměrování stáří přitečené vody a vody již obsažené v potrubí. S navyšováním počtu segmentů, stejně jako se snižováním periody výpočtu roste časová náročnost simulace. Na obr. 4.6 je znázorněno, jak se mění výstupní stáří vody stejného potrubí při změně periody výpočtu. Z důvodu slévání větších objemů vody dochází ke zploštění křivky stáří vody.



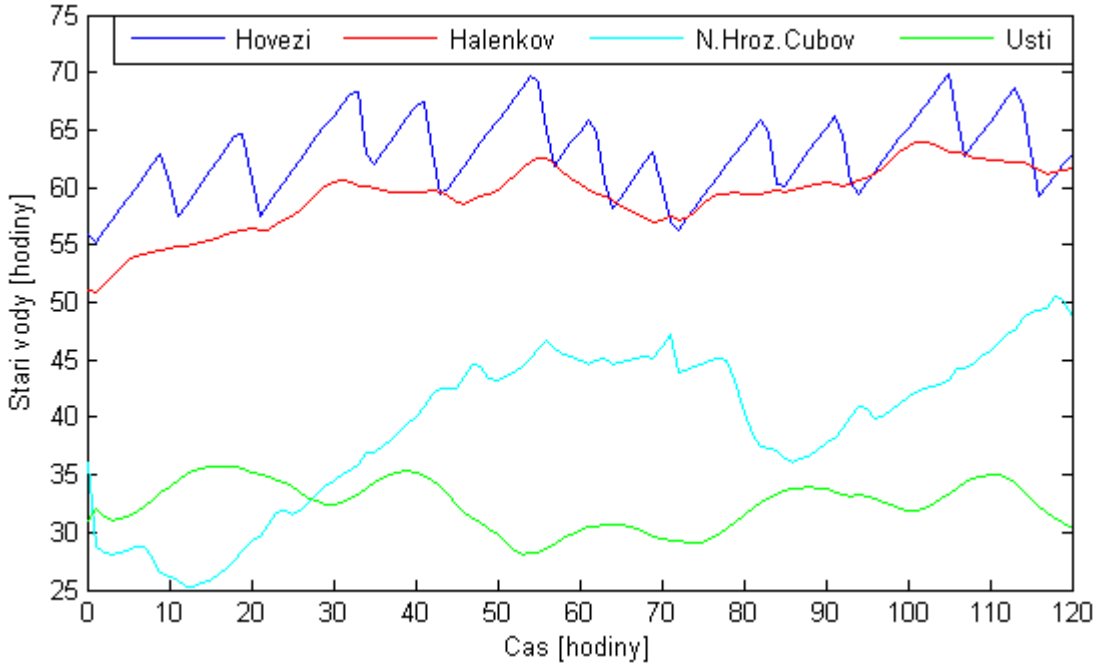
Obr. 4.6 Stáří vody vytékající z potrubí

Počáteční stáří vody v potrubí a vodojemech, které bylo zvoleno při samotné tvorbě modelu, musí být upraveno podle stáří, ke kterému se během simulace blíží. Toto naladění není nezbytně nutné – nevhodně zvolená hodnota během simulace odezní, ale bude trvat mnohem delší dobu, než bude model při simulaci poskytovat relevantní data.

4.3.3 Předvedení funkce

Na grafu obr. 4.7 jsou simulované průběhy stáří vody v jednotlivých vodojemech v modelované části Karolinka. Samotná akumulační nádrž Karolinka zde uvedena není, protože je považována jako zdrojové místo se stářím vody 1 hodina. Ke spuštění simulace modelu stáří vody je nezbytné disponovat modelem hydraulickým a před samotným zahájením simulace spustit inicializační soubor INI.m. Tento soubor načte veškerá nastavení a parametry nezbytná pro chod simulace jak hydraulického modelu, tak modelu stáří vody. Zapojení modelu stáří vody a prostředí

Matlab/Simulink je zobrazeno v příloze 7.10 – 7.12, kde jsou fialově zbarveny tagy průtoků propojující tento model s hydraulickým a zelené šipky značí směr toku vody.



Obr. 4.7 Stáří vody v jednotlivých vodojemech oblasti Karolinka

Model se v prvních okamžicích inicializuje i přes to, že každý z komponentů v modelu má své počáteční stáří vody. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, tak i hydraulický model vyžaduje určitou dobu simulace pro své ustálení. Relevantní data je tedy z modelu možné čerpat až po jeho úplném ustálení. Čas potřebný k ustálení modelu se liší pro každý model (v závislosti na jeho rozsahu a složitosti) a je nutné jej stanovit orientačně ze simulovaných průběhů.

4.3.4 Závěr

Simulované stáří vody v distribuční soustavě nelze porovnat s měřenými hodnotami, jako je tomu u modelu hydraulického – jedná se o neměřitelnou veličinu. Nelze tedy říci, do jaké míry odpovídá model skutečnosti. Kontrolu správnosti lze provést orientačními výpočty, ale u komplexních a rozsáhlých modelů, kterými je například modelovaná síť VAKV správnost ověřit nelze.

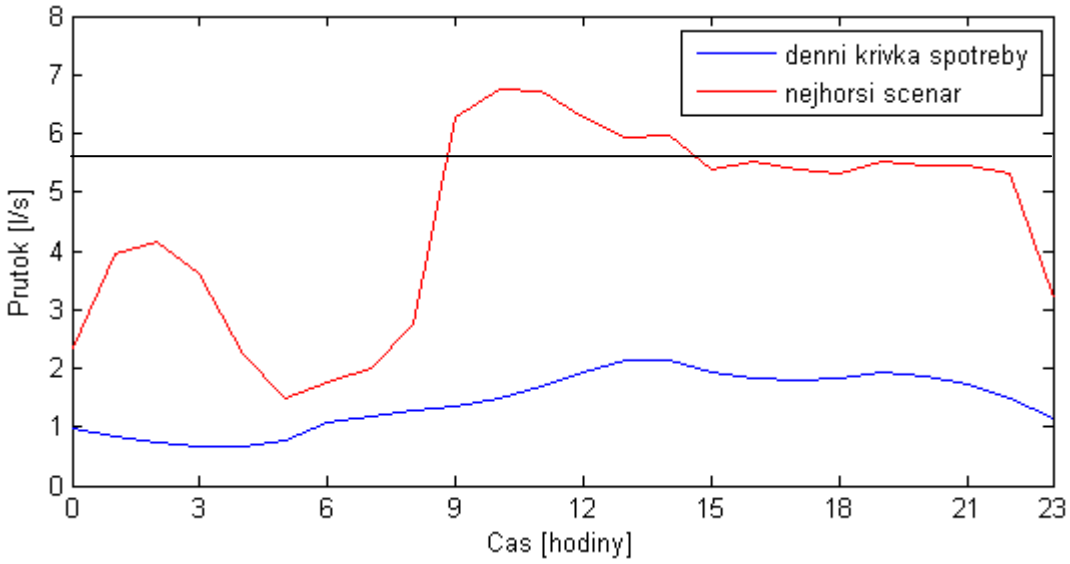
Model, jak je vytvořen nyní, informuje dispečera o stáří vody ve všech modelovaných vodojemech. Dalším možným rozšířením je například informovat o stáří vody v potrubí – upozorňovat na nejstarší balík vody atp. Tato vylepšení jsou vhodná realizovat pouze v místech, kde je průtok nestálý a může docházet k výraznějšímu nárůstu stáří vody.

4.4 Návrh řízení části distribuční soustavy VAKV

Cíle a prostředky řízení distribuční sítě pitné vody byly shrnuty v kapitole 3. V této sekci se budeme věnovat konkrétnímu řešení změny stávající regulace jednoho významného vodojemu, Horní Lideč Stráň, ve vsetínské distribuční síti. Tento vodojem byl zvolen z několika důvodů: jedná se o zásobník vody, do kterého je nutné vodu čerpat čerpadlem z důvodu jeho umístění, je značně vzdálen od zdroje pitné vody (Karolinka) a jedná se o koncový vodojem (neleží na páteřní síti – voda z něj putuje přímo ke spotřebitelům přes koncovou distribuční síť). Nové řízení si klade za hlavní cíl snížit stáří vody ve vodojemu. Následuje stručný popis zvoleného vodojemu a jeho okolí spolu s představením stávajícího stavu a porovnáním s nově navrženou regulací.

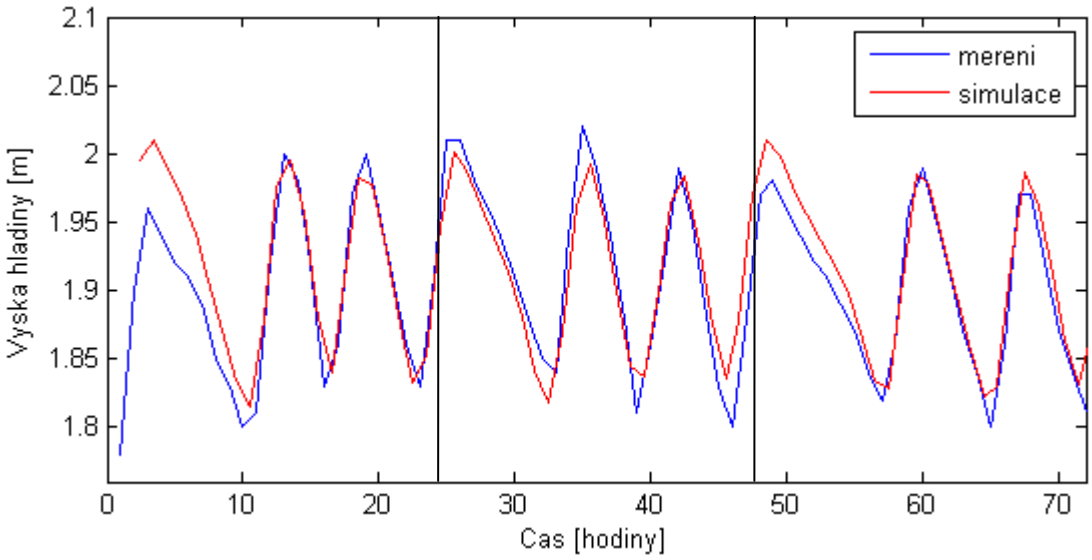
Vodojem Horní Lideč Stráň a jeho model

Vodojem Horní Lideč Stráň (dále jen Stráň) je umístěn výše než vodojem Horní Lideč, ze kterého je do Stráně čerpána voda. Stráň má tedy jeden přítok a dva odběry (síť Střelná a síť Študlov). Voda je čerpána do vodojemu čerpadlem s maximálním průtokem 5,6 l/s. Maximální průměrný hodinový zaznamenaný odběr z vodojemu byl 6,75 l/s, průměrně se však odebírá pouhých 1,43 l/s (vyčteno z historických dat za 11 měsíců). Vodojem tedy plní především funkci stabilizátoru tlaku v odběrných distribučních sítích, jeho sekundární funkce je pokrývání špiček spotřeby – za posledních 11 měsíců při nejhorším možném scénáři přesáhne odběr maximální možný přítok pouze o necelých 17% a to na velice krátkou dobu, jak je patrné z grafu 4.8 pod tímto textem.

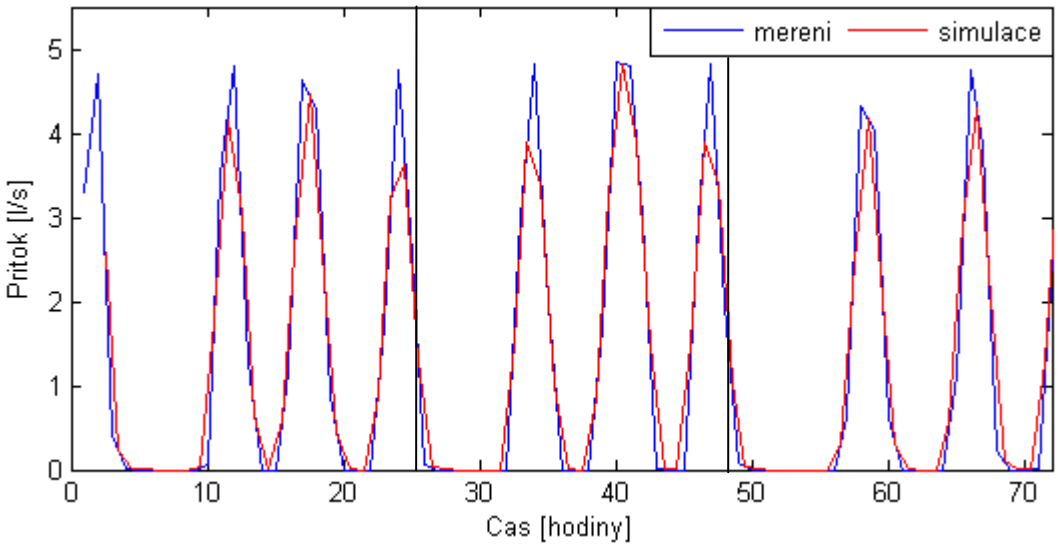


Obr. 4.8 Průměrná denní spotřební křivka (modrá) a nejhorší možný scénář odběrů – maximální průměrné hodinové odběry za 11 měsíců historických dat (červená)

Na následujících grafech jsou průběhy hodinových průměrů výšky hladiny a přítoku do vodojemu (porovnání měřených dat a dat získaných simulací modelu). Při simulaci byly použity měřené průměrné hodinové odběry.



Obr. 4.9 Výška hladiny ve vodojemu Horní Lideč Stráň: modrá – měřené hodinové průměry, červená – simulované hodinové průměry



Obr. 4.10 Přítok do vodojemu Horní Lideč Stráň: modrá – měřené hodinové průměry, červená – simulované hodinové průměry

Návrh řízení

Základním cílem této práce je navrhnout řídicí systém, který sníží stáří vody a zároveň se pokusí o dosažení dalších cílů podrobněji popsaných v kapitole 3 (minimalizace opotřebení komponent, snížení úniků, snížení spotřeby drahé elektrické energie). Aktuální regulace, jak je patrné z grafů obr. 4.9 a obr. 4.10, je založena na zadání maximální a minimální výšky hladiny ve vodojemu. V případě poklesu pod minimální výšku je spuštěno čerpadlo, které dočerpá vodu na hladinu maximální – v tomto okamžiku se čerpadlo opět zastaví.

Navržená regulace ovládání čerpadla je založena na podobném principu s několika rozdíly. Čerpadlo doplní vodojem na stanovenou maximální hladinu prioritně v době, kdy je předpokládán levnější tarif elektrické energie (konkrétně v kapitole 4.5). Během doby nízkého odběru je snížen tlak v navazujících distribučních soustavách snížením hladiny ve vodojemu. Tímto úkonem se také sníží úniky vody. Jsou tedy stanoveny dvě minimální a maximální hladiny pro řízení čerpadla – noční a denní chod. Během nočního chodu je minimální hladina tak nízko, aby byl pokryt případný nouzový požární odběr. V případě poklesu hladiny pod tuto mez je spuštěno čerpadlo, které dopouští vodu na maximální hladinu, která je ovšem také znatelně nižší než při denním chodu. Denní chod má minimální a maximální hladinu výše, avšak výrazně níže než je tomu nyní. Shrnutí výšek hladin je v následující tabulce (tab. 4.5).

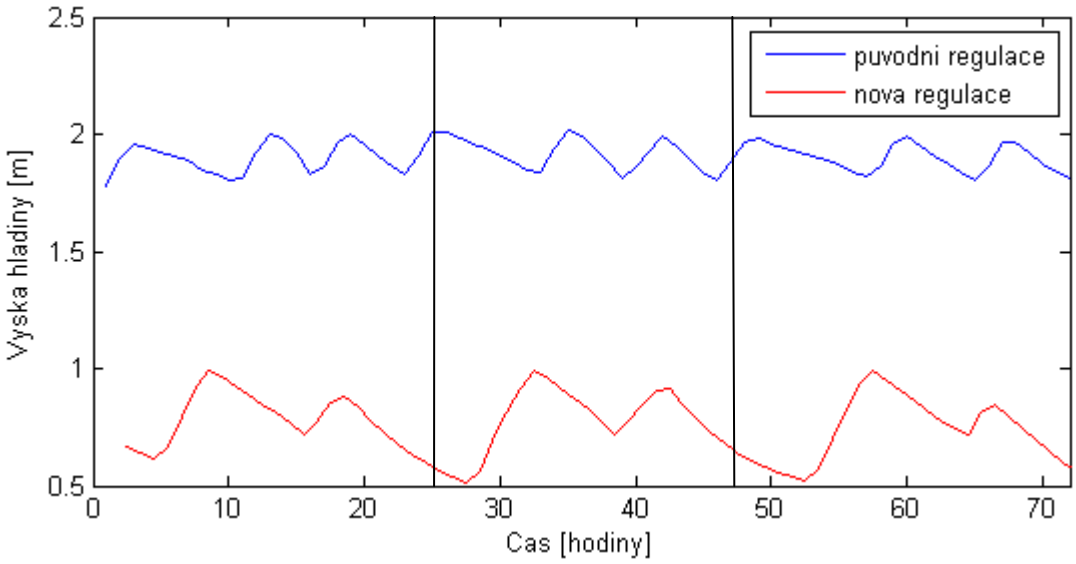
	Stávající stav	Návrh	
		Noční režim	Denní režim
Minimální hladina [m]	1.8	0.5	0.7
Maximální hladina [m]	2	0.7	1
Průměrný průtok zapnutého čerpadla [l/s]	-	4.8	4.5

Tab. 4.5 Stávající natavení řídicího systému a návrh nového řízení

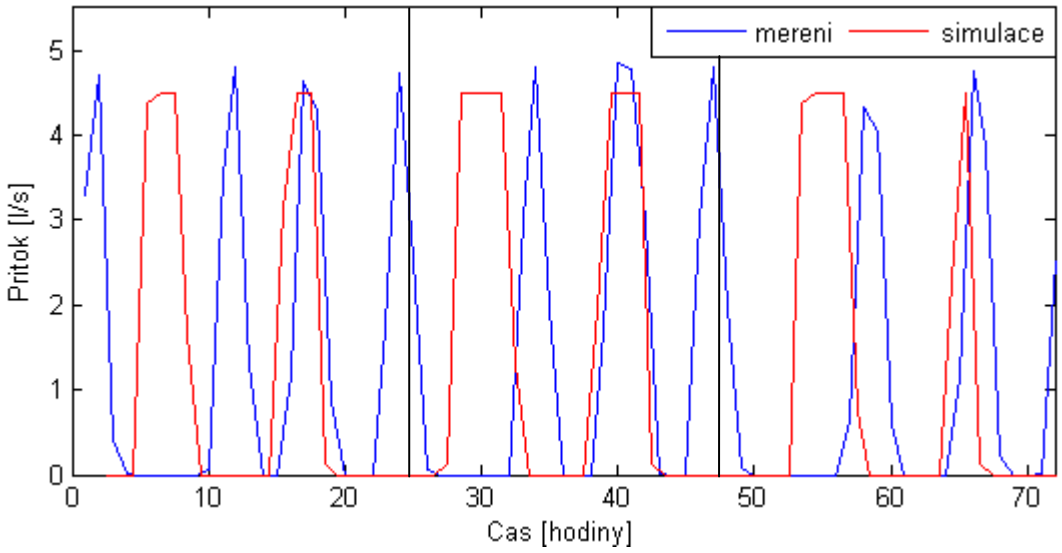
Vyšší hladina ve vodojemu má za následek vyšší tlak v síti na vodojem připojené. Při zvýšeném odběru, tedy při větším průtoku vody v potrubích, je tlak snižován (z důvodu vzniku třecích sil a vírů, kapitola 3). Vyšší hladina je udržována pouze v době, kdy je zároveň vyšší odběr, respektive průtok. Toto nastavení má za následek zmenšení rozdílu tlaku u odběratelů v koncové distribuční síti mezi denním a nočním provozem. Nastavení řídicích algoritmů pro úplné vyrovnání tlaků by vyžadovalo dokonalý odhad spotřeby vody.

Kladen je také důraz na minimalizaci četnosti spouštění čerpadla. Rozběhy opotřebovávají motor řízený měničem nebo připojený přímo na síť více než delší méně četné chody.

Všechna výše popsaná nastavení se projeví na průbězích výšky hladiny a přítoku vody do vodojemu, které jsou zobrazeny na grafech obr. 4.11 a obr. 4.12 (při stávajícím a novém řízení).



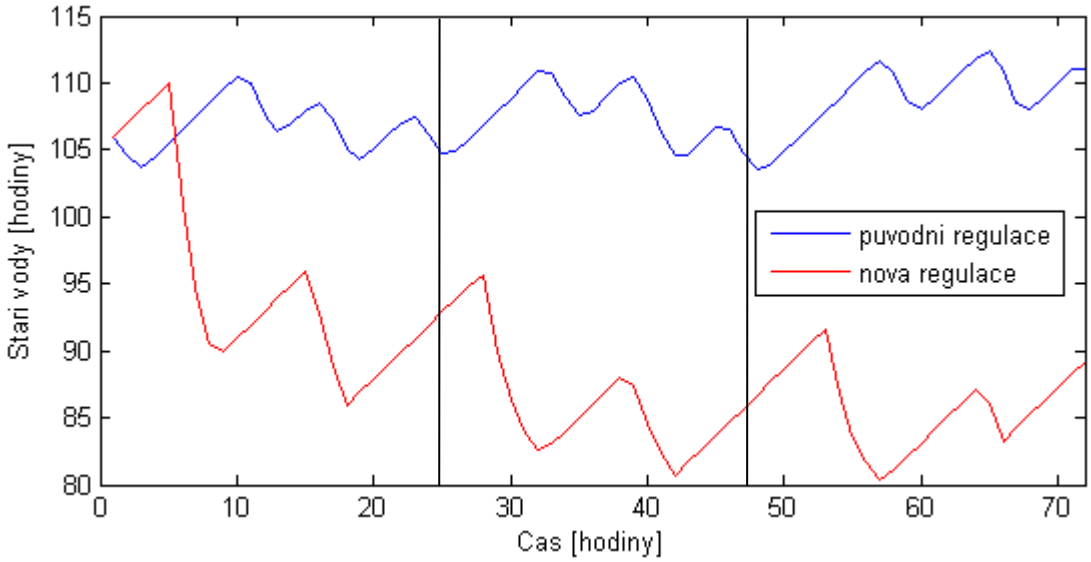
Obr. 4.11 Simulovaná výška hladiny ve vodojemu Horní Lideč Stráň: modrá – simulované stávající řízení, červená – nové řízení



Obr. 4.12 Simulovaný přítok do vodojemu Horní Lideč Stráň: modrá – stávající řízení, červená – nové řízení

Počáteční stáří vody je v obou případech pro lepší porovnání voleno stejné: 105 hodin. Při simulaci 72 hodin je průměrné stáří po celou dobu simulace u stávajícího řízení 107 hodin, při novém typu řízení je to 89 hodin. Vypočítáme-li tento průměr za posledních 24 hodin, kdy je simulace již ustálená a počáteční podmínky odezněly, dobereme se ke stáří 109 při stávajícím nastavení, respektive 86 hodin při novém nastavení. Nutno podotknout, že voda čerpaná z vodojemu Horní Lideč je při simulaci se stávajícím i novým řízením počítána identicky a má průměrnou hodnotu 65 hodin (stáří zdroje vody Karolinka je nastaveno na 1 hodinu). Průměrně tedy voda ve vodojemu Stráň zestárne o 44 hodin (109-65) při stávajícím nastavení, respektive o 21 hodin (86-65) při novém nastavení. Navržené řízení tedy snižuje ve vodojemu Stráň stárnutí vody na méně než polovinu.

Důležitým poznatkem u nového návrhu řízení je také fakt, že voda ve vodojemu dosahuje maximálního stáří pouze v okamžicích, kdy je nejméně distribuována ke spotřebitelům (mezi 3. a 5. hodinou ranní). V ostatních hodinách, kdy je odebírána výrazně více má stáří o poznání nižší. Z tohoto vyplývá, že průměrná hodnota stáří vody je v tomto ohledu velice zavádějící. Vyšší vypovídající hodnotu by měl vážený průměr odebrané vody a jejího stáří.



Obr. 4.13 Stáří vody vodojemu Horní Lideč Stráň: modrá – stávající řízení, červená – nové řízení

Nově navržené řízení tedy splňuje všechny požadavky a cíle, které byly stanoveny v kapitole 3. Následuje stručné ekonomické zhodnocení, které podtrhuje význam navrženého programového řízení.

4.5 Ekonomické srovnání

Výše uvedené programové řízení může představovat snížení nákladů hned v několika oblastech:

- Elektrická energie
- Úniky vody při transportu
- Stáří vody (možnost redukce použitých chemických prostředků)
- Opotřebení čerpadla

Spotřeba elektrické energie se nesníží, protože odběr pitné vody je stále stejný a tedy stále stejný objem musí být přepraven od zdroje k zákazníkům. Ekonomicky výhodné může být využití tzv. dvoutarifové sazby kdy je po určitou dobu během dne elektřina levnější. Pro maloodběratele tato doba není distributorem předem stanovena. Výrobní i nevýrobní firmy se stálým odběrem mají podle typu produktu přesně stanovenou dobu pro nízký tarif (dále jen NT) a vysoký tarif (dále jen VT). V případě maloodběratele je možné provoz energeticky náročných spotřebičů (jako například čerpadel) řídit pomocí HDO

(hromadné dálkové ovládání), které zamezuje jejich spouštění ve VT. Čerpadlo tedy může být primárně ovládáno pomocí HDO a v případě nedostatku vody ve vodojemu nouzově spuštěno i ve VT. Dvoutarifové produkty pro maloodběratele a domácnosti s řízením pomocí HDO jsou však primárně určeny pro spotřebitele využívající elektrickou energii k ohřevu a vytápění. Vhodné je tedy využít produktů (např. Dvoutarif od ČEZ a.s.) pro firmy s pevně danými časy VT (8:00-20:00) a NT (20:00-8:00, celý víkend). Ceny jsou určovány podle rozsahu spotřeby, pro ilustraci tedy využijeme ceny dvoutarifové sazby pro domácnosti s 8 hodinami NT. Během dne je rozdíl v ceně za kWh mezi VT (1677 Kč / MWh) a NT (51 Kč/ MWh) 1,6 Kč [14]. Spočítáme-li tuto úsporu pro modelovaný vodojem s tím, že noční/ranní čerpání je v NT, dojdeme k úspoře 3000 Kč / rok. Tato úspora je pouze pro jediné čerpadlo celého systému a v místě, které není příliš vytíženo (relativně malé 4kW čerpadlo spouštěné na několik hodin denně). Při aplikaci podobného řízení na všechny čerpadla by úspora byla nezanedbatelná.

V distribuční síti pitné vody VAKV je přibližně 10% vody ztraceno úniky (tabulka 4.3), při produkci přibližně 6,8 mil. m^3 za rok se jedná o nezanedbatelnou ztrátovou položku, která se promítá do ceny pitné vody. Snížením tlaku v koncové distribuční síti o přibližně 0,12 baru (snížením hladiny vody ve vodojemu v průměru o 1,2m) a s předpokladem, že únik tvoří aktuálně 10% odebírané vody, bude únik snížen z nynějších 4,34 m^3/den na přibližně 3,97/m^3 na den. Tento výpočet byl proveden s pomocí vzorce (3.2). Tlak u spotřebitele při původním nastavení byl uvažován v průměru 1,4 baru a konstanta N_1 = 1.

$$L_1 = 43{,}4 \cdot 0{,}1 \left(\frac{1{,}4 - 0{,}12}{1{,}4}\right)^1$$

$$L_1 = 3{,}97\ m^3/den$$

L_0 reprezentuje odhad původních úniků a L_1 predikci úniků po snížení tlaku z P_0 na P_1. Toto snížení úniku uspoří přibližně 135 m^3 za rok pouze řízením jednoho vodojemu, což je při nynější sazbě vodného [12] asi 4300 Kč. Vzhledem k tomu, že podobných vodojemů je v celé síti přes 80 může takováto regulace ušetřit pouze na úniku vody nezanedbatelnou částku.

Dalším možným dopadem aplikace řídicího systému je možnost snížení použití desinfekčních látek v úpravně vody. Tento krok může nastat pouze v případě, že se podaří snížit stáří vody, podobně jako v modelovém případě v této kapitole, ve všech zásobnících vody v celé distribuční soustavě. Po dosažení tohoto cíle by byla kvalita na stejné úrovni jako před aplikací řídicího systému, ale byl by ušetřen materiál na úpravu vody. Tato úspora rozhodně nepřinese výrazně nižší náklady na výrobu pitné vody, ale snížení využívání chemických látek nebo změna stávající metody úpravy za méně agresivní je především šetrné k životnímu prostředí.

Opotřebování jednotlivých komponent distribuční soustavy vyžaduje jejich častý servis. Čerpadlo v čerpací stanici je u modelovaného vodojemu Stráň spouštěno tak, aby udržovalo hladinu vody mezi dvěma mezemi, které jsou relativně blízko u sebe. Tento přístup vyžaduje časté spouštění čerpadla pouze na krátké intervaly. Řídicí algoritmus, který byl navržen, čerpadlo spouští pouze několikrát během dne a to na výrazně delší intervaly, což může přispět ke snížení servisních nároků této komponenty. V čerpacích

stanicích s více čerpadly je možné nastavením řídicího systému využívat jednotlivá čerpadla tak, aby jejich spouštění bylo optimalizováno a servisní intervaly maximalizovány.

Automatické řízení může nahradit, podobně jako ve většině jiných výrobních odvětví a službách, lidské zdroje. Několika úrovňové řízení s vhodným nastavením alarmů a krizových scénářů vyžaduje pouze dohled zkušeného operátora, který s pomocí modelu běžícího v reálném čase dokáže při relativně malé rozloze distribuční sítě jakou VAKV je, řešit veškeré nestandardní události. Běžný provoz je tedy plně zajišťován řídicím systémem. Dospět však do této fáze vyžaduje značné investice do výpočetní a regulační techniky.

4.6 Závěr

Úkolem kapitoly 4 bylo vytvořit hydraulický model a model stáří vody a navrhnout novou regulaci s primárním cílem snížit stáří vody a tedy zvýšit její kvalitu. Spolu se snížením stáří vody měly být sníženy provozní náklady. Oba typy modelů pro všechny modelované oblasti jsou uvedeny v příloze (7.6 – 7.12).

Porovnáme-li měřené průběhy a průběhy modelované (výšky hladin a průtoky) a vypočítané statistické ukazatele (tab. 4.4) můžeme říci, že model v tomto ohledu odpovídá reálnému systému. Tato podobnost je zcela dostačují pro návrh řízení s cílem minimalizovat stáří vody, kde je podstatný pouze její rámcový pohyb. Tento model však nemůže být využit např. pro odhad neměřených veličin a to především proto, že nemohl být dostatečně naladěn. V naladěném modelu výše souhlasí průtoky vody potrubími a výšky hladin, nemůžeme však říci, že souhlasí i tlaky v jednotlivých uzlech. V případě měření tlaků na různých místech sítě by bylo možné tyto hodnoty při simulaci v reálném čase porovnat a model případně upravit, aby kopíroval realitu. Stejně tak stávající model lze využít k paralelnímu běhu s reálným systémem v reálném čase pouze v omezené míře s častou synchronizací pomocí skutečných hodnot.

Programové řízení, které bylo navrženo pro jeden vodojem (Stráň) v distribuční soustavě, je aplikovatelné na ostatní koncové vodojemy (vodojemy nepřímo napojeny na páteřní síť). Ekonomický význam by se tedy znásobil.

Pro zobrazení a spuštění simulace modelu části sítě VAKV je nutné disponovat softwarem Matlab/Simulink R2006a a operačním systémem Windows 2000 / XP / Vista / 7. Před započetím simulace je nezbytné model inicializovat pomoci INI.m.

5. Závěr

Tato práce vznikla za účelem seznámení se s modelováním distribučních sítí pitné vody v reálném čase a návrhu jejich řízení s cílem minimalizovat stáří vody – dobu, kterou voda v soustavě setrvá. Po seznámení s funkcemi a komponentami distribuční sítě v kapitole 1 byly představeny typy modelování a popis vývoje knihovny komponent hydraulického modelu v prostředí Matlab/Simulink. K modelu hydraulickému, který zajišťuje namodelování dynamiky celého systému, byla vytvořena diskrétní knihovna bloků pro model stáří vody. Algoritmus pro výpočet stáří vody v prostředí Matlab/Simulink byl v této práci vyvinut. S využitím této knihovny lze po drobných úpravách sledovat i jiné atributy vody jako např. jejích chemismu či původ (zdroj, ve kterém byla vyrobena). Poslední kapitola teoretické části se věnovala důvodům vývoje řídicích systémů a nástrojům, kterými dosahují svých cílů: zvyšování kvality dodávané vody, snižování úniků vody při transportu, minimalizace opotřebení komponent distribuční sítě a celkové snižování provozních nákladů. V případové studii je uveden vývoj hydraulického modelu a modelu stáří vody části distribuční soustavy zásobující pitnou vodou okres Vsetín a části okresů Přerov a Zlín. Modely byly vytvořeny na základě informací o soustavě a jejích jednotlivých prvcích a s pomocí měřených dat. Následovalo naladění modelů a návrh řízení. Veškeré postupy užity v případové studii byly čerpány z teoretické části této práce.

Naladění modelu v této práci je dostatečné pouze pro návrh řízení s cílem snížit stáří pitné vody. Pro operativní řízení v reálném čase či sledování tlakových špiček v páteřní síti je stávající model nevhodný. Pro přiblížení dynamiky modelu k reálnému systému by bylo nezbytné disponovat detailnějšími informaci o jednotlivých komponentech sítě (především o ventilech a čerpadlech), nadmořskými výškami potrubních uzlů pro výpočet převýšení a také vhodnějšími daty (např. hodinovými průměry s maximem a minimem během této uplynulé hodiny). Pouze některé měřené průtoky a výšky hladin pro kvalitní naladění nejsou dostačující – nezbytností je měření a zaznamenávání tlaků. Po kvalitnějším naladění by model mohl běžet paralelně se skutečným systémem v reálném čase a operátor by mohl sledovat např. nové úniky nebo neměřené veličiny.

Návrh řízení s primárním cílem snížit stáří vody v síti byl úspěšně testován na modelu skutečné soustavy a jeho ekonomický dopad vyčíslen. Vytvořený model části distribuční sítě i návrh řízení v této práci jsou pouze prvním krokem k vyvinutí kvalitního plně funkčního softwarového nástroje pro zlepšení využívání stávající soustavy. Toto zlepšení by mělo přinést jak pozitivní ekonomické výsledky, tak poukázat na místa, která by bylo vhodné hardwarově upravit.

6. Literatura a zdroje

Citované zdroje

[1] Ministerstvo zdravotnictví. *252/2004 Sb. Vyhláška ze dne 22. 4. 2004*

[2] T.M. WALSKI. A History of Water Distribution*. Journal AWWA*. 2006, March 2006

[3] R. D. Hansen. *Water and Wastewater Systems in Imperial Rome* [online]. Dostupné na: http://www.waterhistory.org/histories/rome/

[4] M. HAESTAD, T.M. WALSKI a kolektiv. *Advanced Water Distribution Modeling and Management*, první vydání. Waterbury, CT USA: HAESTAD PRESS, 2004.

[5] *United Nations Environment Programme* [online]. Dostupné na: http://www.unep.org

[6] L. A. Rossman. EPANET 2: Users manual. Cincinnati, OH USA: EPA, 2000.

[7] Epanet. *Wikipedie: The free encyclopedia* [online] http://en.wikipedia.org/wiki/Epanet

[8] P. A. Sleigh. An Introduction to Fluid Mechanics. Leeds, UK: School of Civil Engineerig, 2009. Dostupné na: http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/FluidsLevel1/Unit04/T1.html

[9] Z. M. Lahlou. *Leak Detection and Water Loss Control*. A National Drinking Water Clearinghouse Fact Sheet:Tech Brief. Dostupné na: http://www.nesc.wvu.edu/pdf/dw/publications/ontap/2009_tb/leak_detection_DWFSOM38.pdf

[10] J. Thornton. *Managing leakage by managing pressure: a practical approach*. Water21, 2003

[11] *Intellignet Water Control. Leakage reduction* [online]. Dostupné na: http://www.i2owater.com/leakage-reduction.aspx

[12] Vodovody a kanalizace Vsetín a.s. [online]. Dostupné na: http://www.vakvs.cz

[13] *Pipe friction losses*. EDUR-Pumpenfabrik. Germany, 2006. Dostupné na: http://www.edur-pumpen.de/imgs/service/projekt/english/WA9_E.pdf

[14] ČEZ a.s., Produkty Akumulace 8 pro podnikatele a Dvoutarif [online]. Dostupné na: http://www.cez.cz

[15] B. Clarke. *Water loss Reduction Through Pressure Management* [online]. Singer Valve Inc., 2008. Dostupné na: http://www.singervalve.com/Products/Leakage/LeakagePresenation2008.pdf

[16] P.Fanner. *Assessing Real Losses, including Component Analysis and Economic Considerations: A Practical Approach*. Water21, 2003

Ostatní použité zdroje

Formula home: *Bernoulli* [online]. Dostupné na: http://www.efunda.com/formulae/fluids/bernoulli.cfm

Formula home: *Pipe friction example* [online]. Dostupné na: http://www.efunda.com/formulae/fluids/calc_pipe_friction.cfm

R. McKenzie. *WaterLoss Group: IWA Task Force* [online]. Dostupné na: http://www.findmoreleaks.com/downloads/Water21-8.pdf

How to calculate pressure drop and friction losses in a pipe [online]. Dostupné na: http://knol.google.com/k/how-to-calculate-pressure-drop-and-friction-losses-in-a-pipe

Rockwell Automation. *Knihovna komponent hydraulického modelu.*

7. Přílohy

7.1 Tabulka koeficientů C různých materiálů pro metodu Hazen-Williams

	C-factor Values for Discrete Pipe Diameters					
Type of Pipe	1.0 in. (2.5 cm)	3.0 in. (7.6 cm)	6.0 in. (15.2 cm)	12 in. (30 cm)	24 in. (61 cm)	48 in. (122 cm)
Uncoated cast iron - smooth and new		121	125	130	132	134
Coated cast iron - smooth and new		129	133	138	140	141
30 years old						
Trend 1 - slight attack		100	106	112	117	120
Trend 2 - moderate attack		83	90	97	102	107
Trend 3 - appreciable attack		59	70	78	83	89
Trend 4 - severe attack		41	50	58	66	73
60 years old						
Trend 1 - slight attack		90	97	102	107	112
Trend 2 - moderate attack		69	79	85	92	96
Trend 3 - appreciable attack		49	58	66	72	78
Trend 4 - severe attack		30	39	48	56	62
100 years old						
Trend 1 - slight attack		81	89	95	100	104
Trend 2 - moderate attack		61	70	78	83	89
Trend 3 - appreciable attack		40	49	57	64	71
Trend 4 - severe attack		21	30	39	46	54
Miscellaneous						
Newly scraped mains		109	116	121	125	127
Newly brushed mains		97	104	108	112	115
Coated spun iron - smooth and new		137	142	145	148	148
Old - take as coated cast iron of same age						
Galvanized iron - smooth and new	120	129	133			
Wrought iron - smooth and new	129	137	142			
Coated steel - smooth and new	129	137	142	145	148	148
Uncoated steel - smooth and new	134	142	145	147	150	150

Zdroj: [4]

C-factor Values for Discrete Pipe Diameters						
Type of Pipe	1.0 in. (2.5 cm)	3.0 in. (7.6 cm)	6.0 in. (15.2 cm)	12 in. (30 cm)	24 in. (61 cm)	48 in. (122 cm)
Coated asbestos cement - clean		147	149	150	152	
Uncoated asbestos cement - clean		142	145	147	150	
Spun cement-lined and spun bitumen- lined - clean		147	149	150	152	153
Smooth pipe (including lead, brass, copper, polyethylene, and PVC) - clean	140	147	149	150	152	153
PVC wavy - clean	134	142	145	147	150	150
Concrete - Scobey						
Class 1 - Cs = 0.27; clean		69	79	84	90	95
Class 2 - Cs = 0.31; clean		95	102	106	110	113
Class 3 - Cs = 0.345; clean		109	116	121	125	127
Class 4 - Cs = 0.37; clean		121	125	130	132	134
Best - Cs = 0.40; clean		129	133	138	140	141
Tate relined pipes - clean		109	116	121	125	127
Prestressed concrete pipes - clean				147	150	150

Lamont (1981)

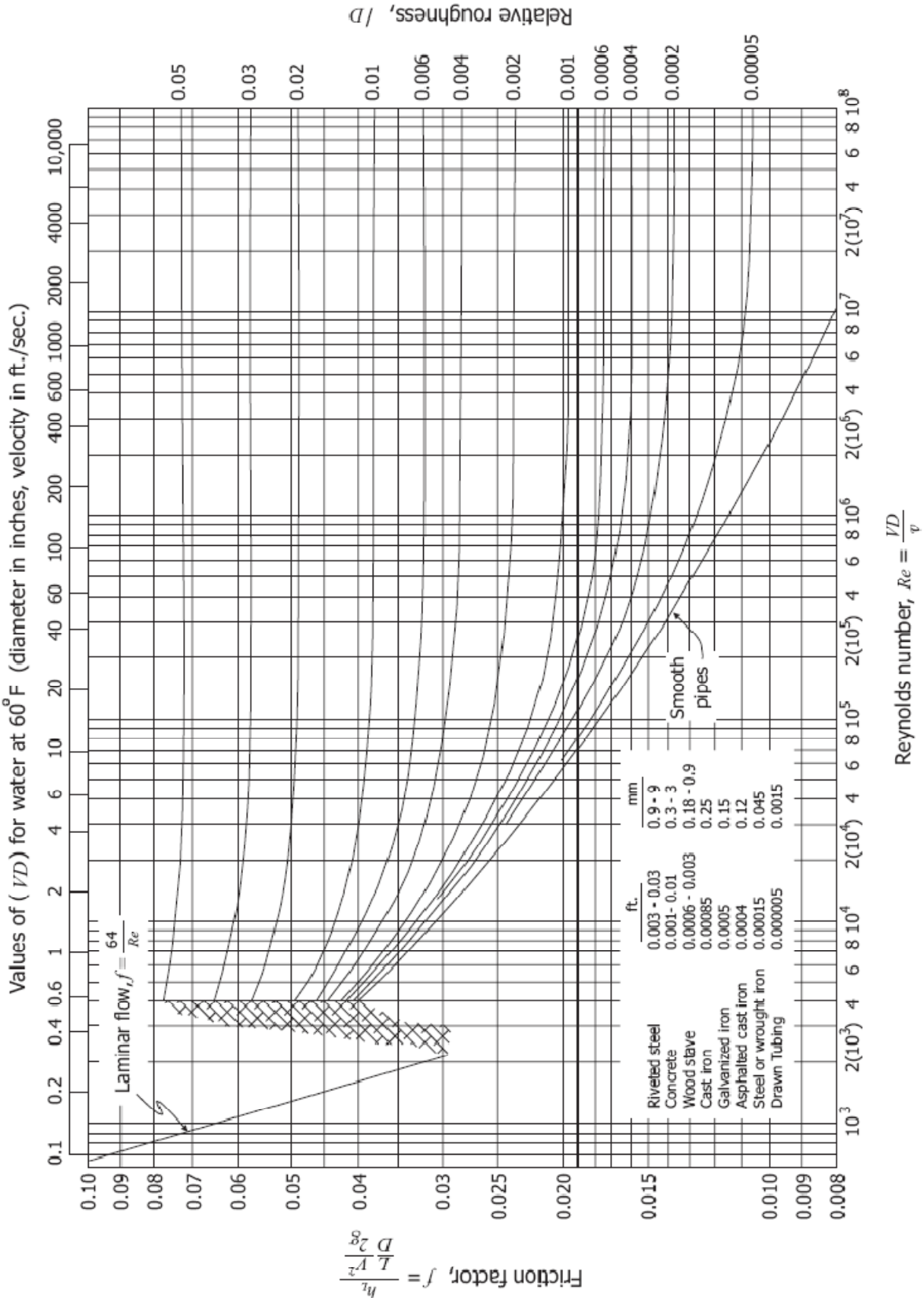
Zdroj: [4]

7.2 Tabulka relativní hrubosti různých materiálů

Materiál	Relativní vnitřní hrubost potrubí ε [mm]
Litina (asfaltovaná)	0,1220
Litina	0,4000
Beton	0,3000
Měď	0,0015
PVC	0,0050
Ocel	0,0450
Ocel (galvanizovaná)	0,1500

Zdroj: http://knol.google.com/k/how-to-calculate-pressure-drop-and-friction-losses-in-a-pipe

7.3 Graf závislosti koeficientu tření f metody Darcy-Weisbach v závislosti na Reynoldsově čísle a relativní hrubosti materiálu



Zdroj: [4]

7.4 Koeficient hrubosti n pro metodu Chezy-Manning

Material	Manning Coefficient	Material	Manning Coefficient
Asbestos cement	.011	Corrugated metal	.022
Brass	.011	Galvanized iron	.016
Brick	.015	Lead	.011
Cast iron, new	.012	Plastic	.009
Concrete		Steel	
Steel forms	.011	Coal-tar enamel	.010
Wooden forms	.015	New unlined	.011
Centrifugally spun	.013	Riveted	.019
Copper	.011	Wood stave	.012

Zdroj: [4]

7.5 Koeficient K_L pro vedlejší ztráty tlaku

Fitting	K_L	Fitting	K_L
Pipe entrance		90° smooth bend	
Bellmouth	0.03-0.05	Bend radius/D = 4	0.16-0.18
Rounded	0.12-0.25	Bend radius/D = 2	0.19-0.25
Sharp-edged	0.50	Bend radius/D = 1	0.35-0.40
Projecting	0.78	Mitered bend	
Contraction – sudden		θ = 15°	0.05
D_2/D_1=0.80	0.18	θ = 30°	0.10
D_2/D_1=0.50	0.37	θ = 45°	0.20
D_2/D_1=0.20	0.49	θ = 60°	0.35
Contraction – conical		θ = 90°	0.80
D_2/D_1=0.80	0.05	Tee	
D_2/D_1=0.50	0.07	Line flow	0.30-0.40
D_2/D_1=0.20	0.08	Branch flow	0.75-1.80
Expansion – sudden		Tapping T Branch	
D_2/D_1=0.80	0.16	d = tapping hole diameter D = main line diameter	$1.97/(d/D)^4$
D_2/D_1=0.50	0.57	Cross	
D_2/D_1=0.20	0.92	Line flow	0.50
Expansion – conical		Branch flow	0.75
D_2/D_1=0.80	0.03	45° Wye	
D_2/D_1=0.50	0.08	Line flow	0.30
D_2/D_1=0.20	0.13	Branch flow	0.50
Gate valve – open	0.39	Check valve – conventional	4.0
3/4 open	1.10	Check valve – clearway	1.5
1/2 open	4.8	Check valve – ball	4.5
1/4 open	27	Cock – straight through	0.5
Globe valve – open	10	Foot valve – hinged	2.2
Angle valve – open	4.3	Foot valve – poppet	12.5
Butterfly valve – open	1.2		

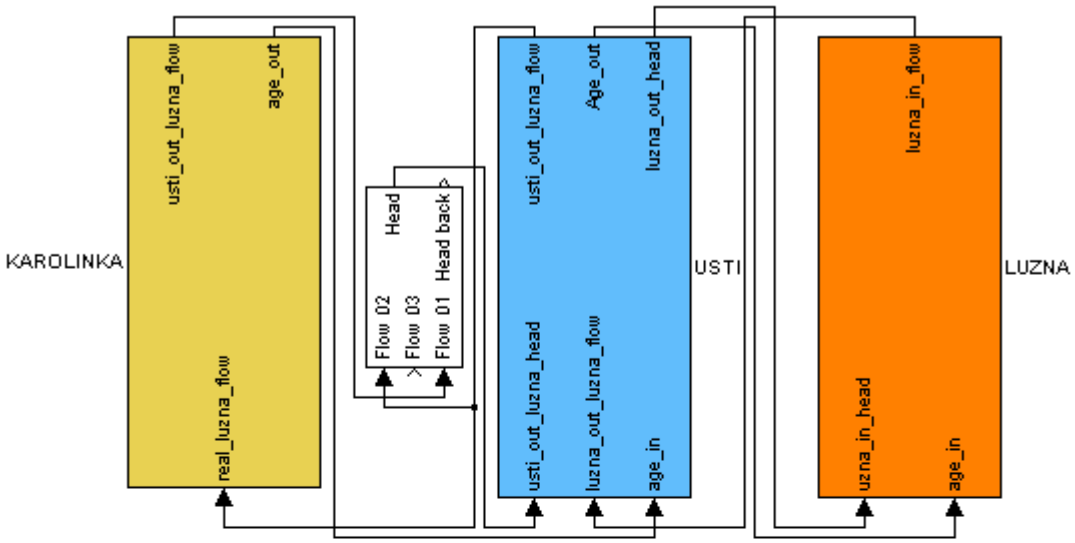
Walski (1984)

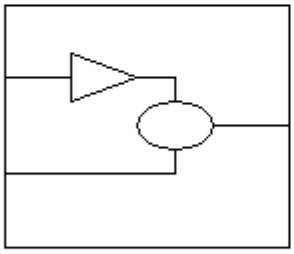
$$K_L = C_f D^4 / C_v^2 \qquad (2.25)$$

where D = diameter (in., m)
C_v = valve coefficient [gpm/(psi)$^{0.5}$, (m^3/s)/(kPa)$^{0.5}$]
C_f = unit conversion factor (880 English, 1.22 SI)

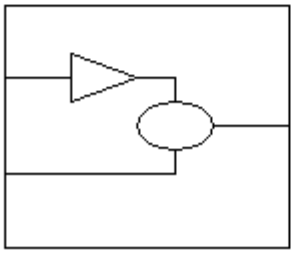
Zdroj: [4]

7.6 Hydraulický model Karolinka – Ústí – Lužná celek

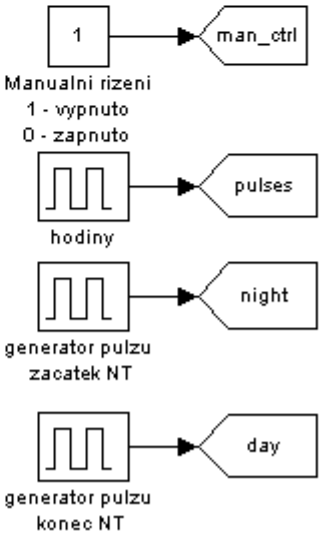




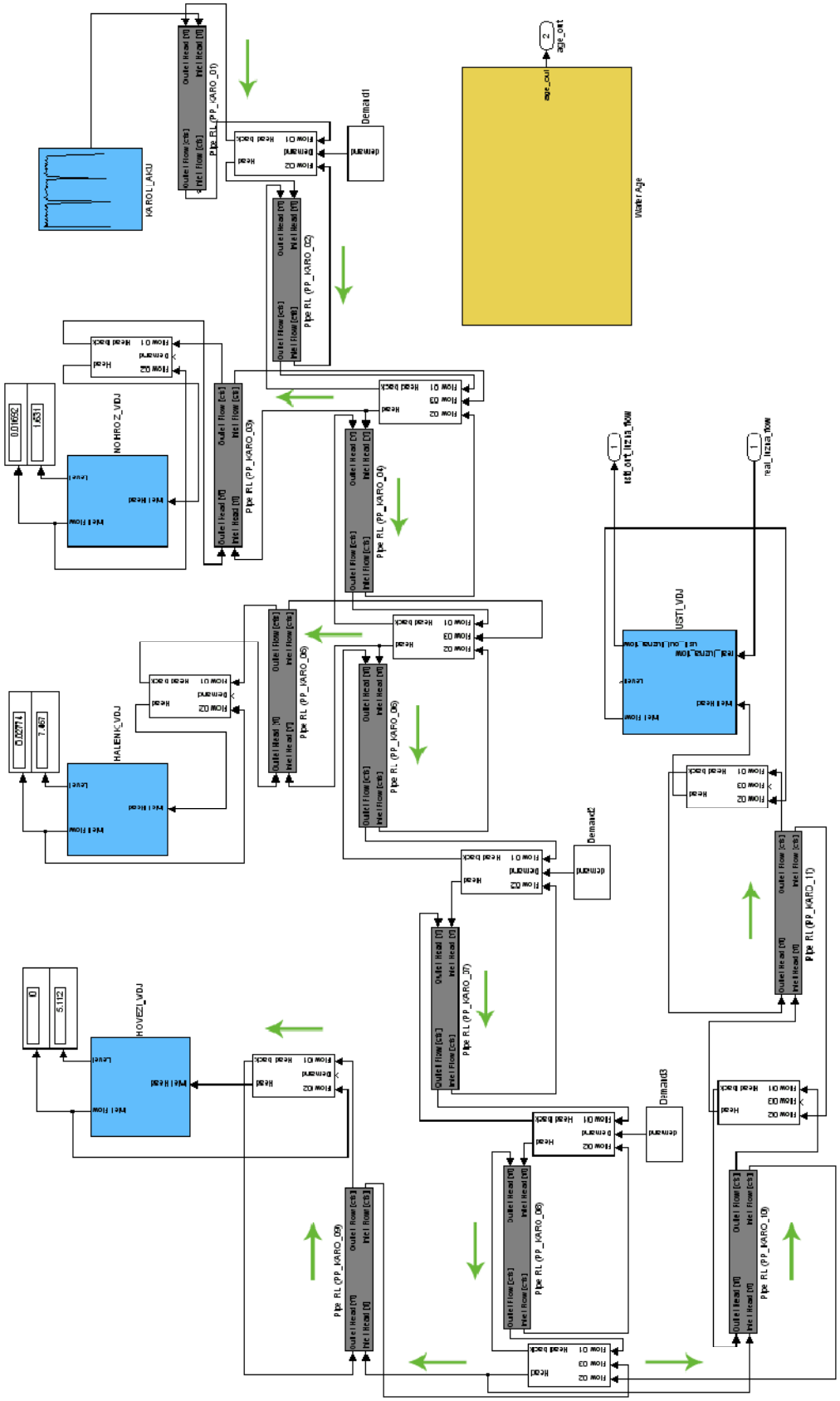
Vysky hladin ve vodojemech



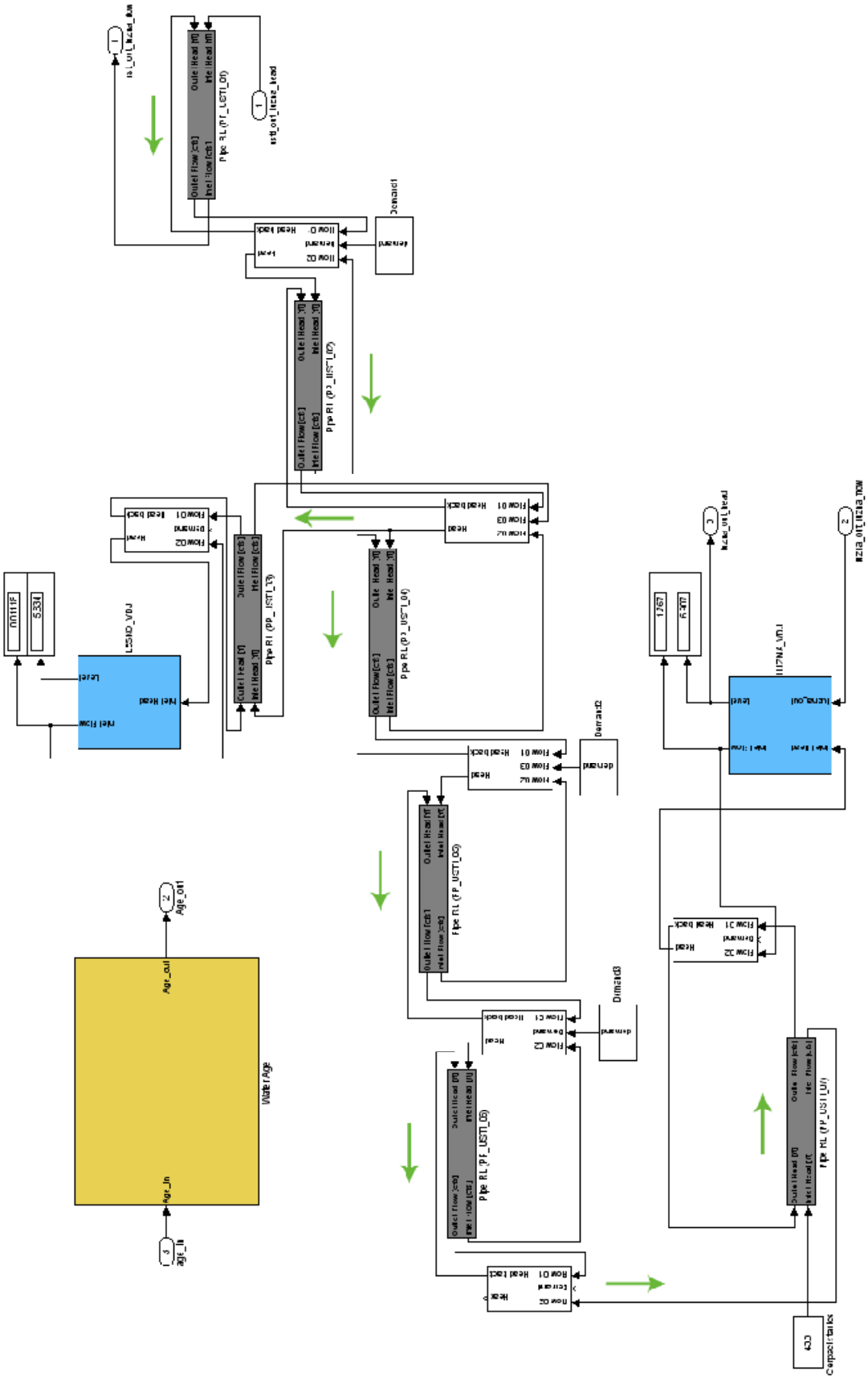
Stari vody ve vodojemech



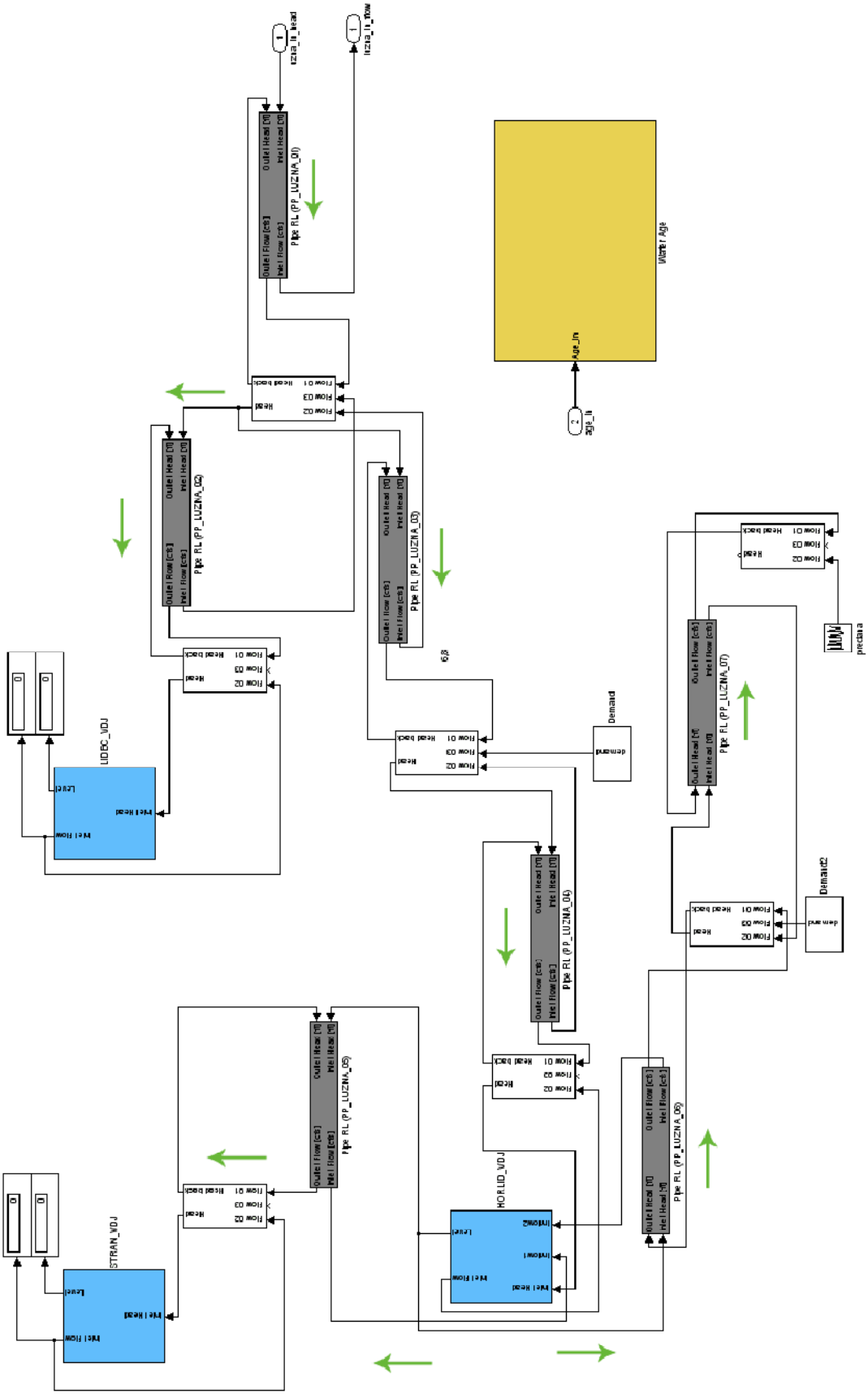
7.7 Hydraulický model oblasti Karolinka



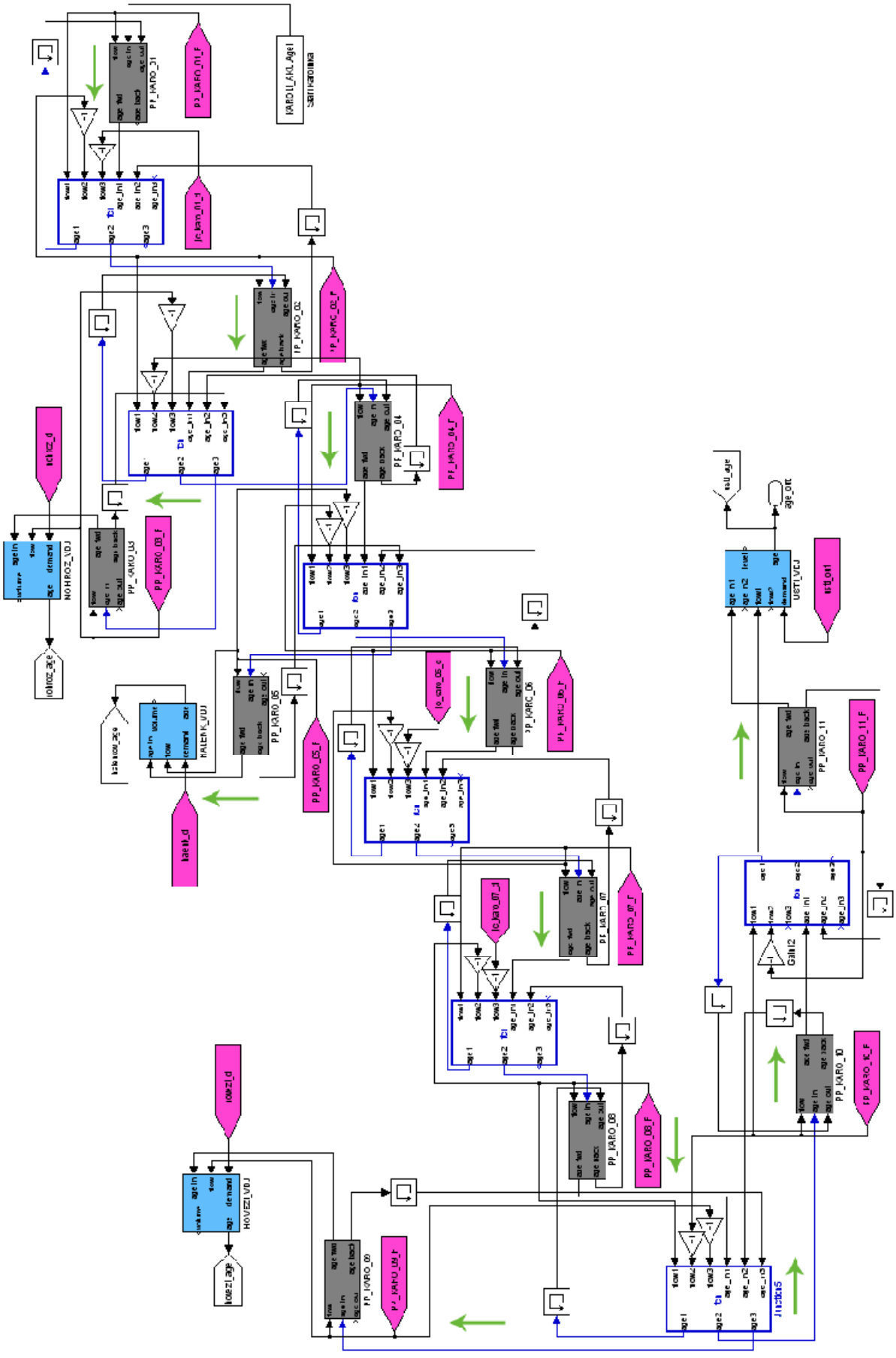
7.8 Hydraulický model oblasti Ústí



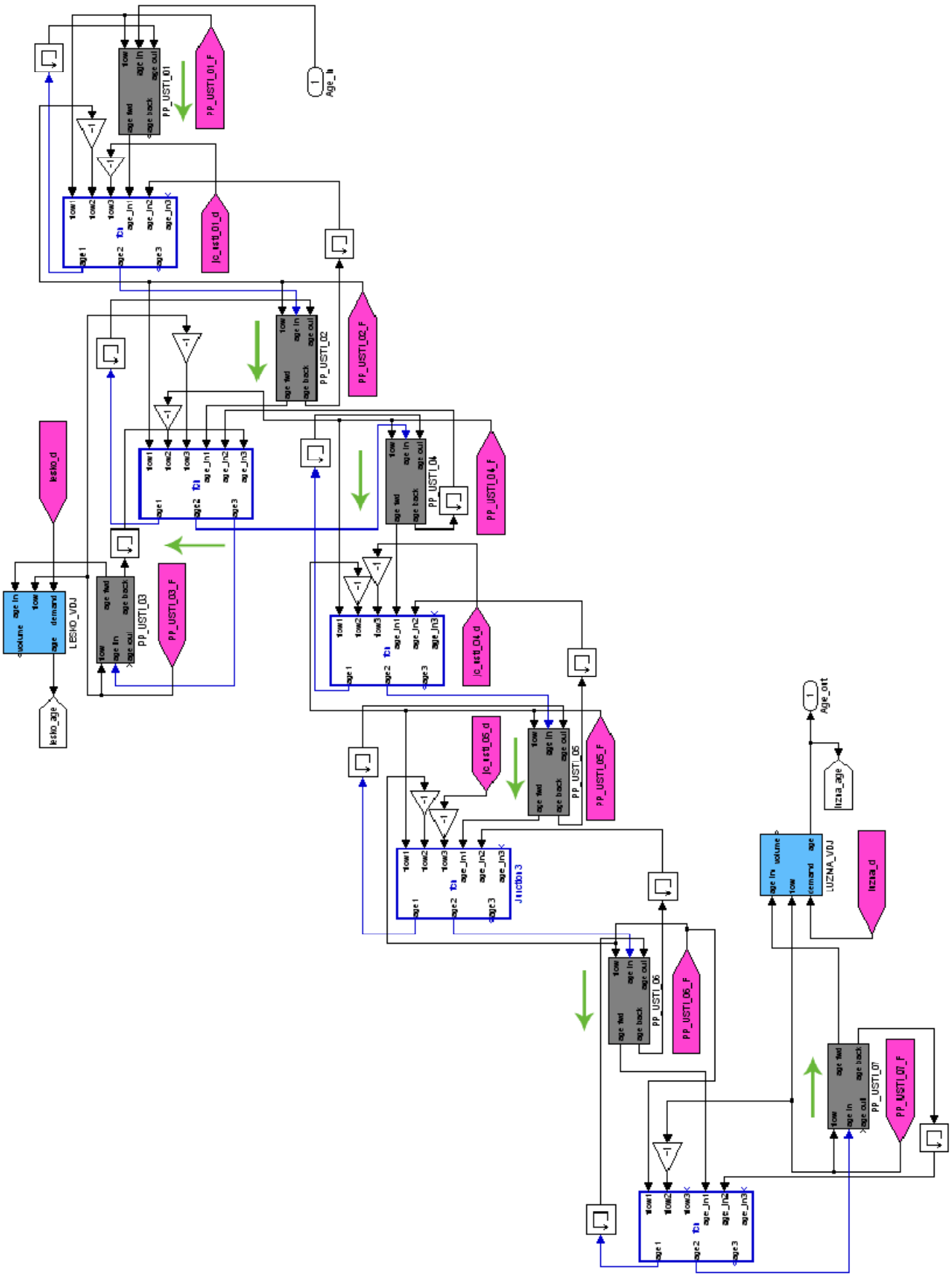
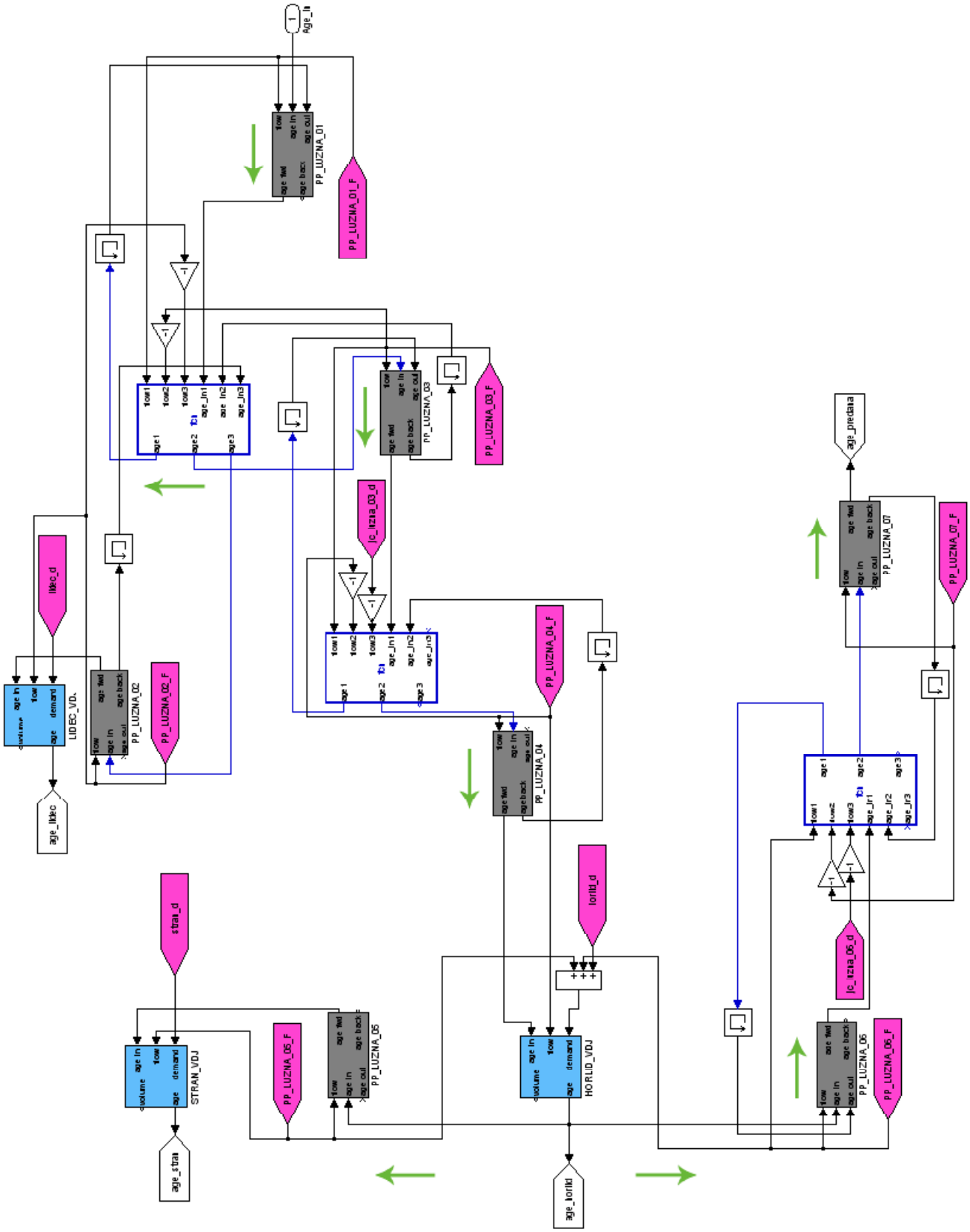
7.9 Hydraulický model oblasti Lužná



7.10 Model stáří vody oblasti Karolinka



7.11 Model stáří vody oblasti Ústí



7.12 Model stáří vody oblasti Lužná