

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Husić, A., 2016. Umerjanje hidravličnega modela vodovodnega sistema Šmartno ob Paki. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Steinman, F., somentor Kozelj, D.): 75 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5789/>

Datum arhiviranja: 18-10-2016

University  
of Ljubljana  
Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Husić, A., 2016. Umerjanje hidravličnega modela vodovodnega sistema Šmartno ob Paki. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Steinman, F., co-supervisor Kozelj, D.): 75 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5789/>

Archiving Date: 18-10-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM VODARSTVO IN  
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidatka:

**AMELA HUSIĆ**

**UMERJANJE HIDRAVLIČNEGA MODELA  
VODOVODNEGA SISTEMA ŠMARTNO OB PAKI**

Diplomska naloga št.: 316/VKI

**CALIBRATION OF A HYDRAULIC MODEL OF THE  
WATER SUPPLY SYSTEM ŠMARTNO OB PAKI**

Graduation thesis No.: 316/VKI

**Mentor:**

prof. dr. Franc Steinman

**Somentor:**

asist. dr. Daniel Kozelj

Ljubljana, 13. 09. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVA**

Spodaj podpisani/-a študent/-ka Amela Husić vpisna številka 26300056, avtor/-ica

pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Umerjanje računalniškega hidravličnega omrežja vodovodnega sistema Šmartno ob Paki

IZJAVLJAM,

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: Velenju

Datum: 23. 08. 2016

Podpis študenta/-ke:

AMELA HUSIĆ

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>628. 1 (043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Amela Husić</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Franc Steinman</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. dr. Daniel Kozelj, univ. dipl. inž. vod. in kom.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Umerjanje hidravličnega modela vodovodnega sistema Šmartno ob Paki</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>75 str., 24 tab., 29 graf., 33 sl., 23 en., 1 pril.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>cevovodni sistemi, hidravlični model, umerjanje, pretok, tlak, Aquis 6.1, Šmartno ob Paki</b>

### **Izvleček**

Diplomska naloga obravnava temo umerjanja računalniškega hidravličnega modela za vodovodni sistem Šmartno ob Paki. V okviru diplomske naloge sem se seznanila z lastnostmi vodovodnega sistema Šmartno ob Paki ter s programsko opremo Aquis, s pomočjo katere sem opravila umerjanje pretoka in tlaka.

Vodovodni sistemi predstavljajo dinamičen sistem zgrajen iz več komponent, katere imajo medsebojni vpliv. S pomočjo računalniških programov bolje razumemo statične in dinamične lastnosti vodovodnih sistemov. Pri izdelavi diplomske naloge je bila uporabljena programska oprema Aquis, ki je omogočila spremljanje meritev na sistemu in simulacijo modela. Cilj diplomske naloge je bil primerjati dobljene rezultate simulacije in meritev ter s pomočjo korekcijskega faktorja umeriti model s ciljem povečanja točnosti le-tega.

---

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	<b>628.1 (043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Amela Husić</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>prof. Franc Steinman, Ph. D.</b>
<b>Cosupervisor:</b>	<b>assist. dr. Daniel Kozelj, Ph.D.</b>
<b>Title:</b>	<b>Calibration of a hydraulic model of the water supply system Šmartno ob Paki</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation Thesis – University studies</b>
<b>Notes:</b>	<b>75 p., 24 tab., 29graph., 33 fig., 23 eq., 1 ann.</b>
<b>Key words:</b>	<b>water supply system, hydraulic model, calibration, flow, pressure, Aquis 6.1, Šmartno ob Paki</b>

**Abstract**

The graduation thesis addresses the subject of calibration of computerized hydraulic model of the pipeline system Šmartno ob Paki. In this thesis I got acquainted with the characteristics of the pipeline system Šmartno ob Paki and software Aquis. With software Aquis I have done the calibration of water flow and pressure.

Plumbing systems represent a dynamic system built from multiple components which interact. Computer programs help us to understand better static and dynamic properties of pipeline systems. Software Aquis was used as part of the thesis, with which measurements on the system were monitored and the model simulation was made. The scope of this thesis was to compare the results obtained by simulations and measurements and afterwards to calibrate the model by using the correction factor to increase the accuracy thereof.

## **ZAHVALA**

Za pomoč in koristne napotke pri nastanku diplomske naloge bi se rada zahvalila mentorju prof. dr. Francu Steinmanu in somentorju asist. dr. Danielu Kozelju.

Za vso pomoč in čas, ki so mi ga naklonili pri spoznavanju programske opreme Aquis se zahvaljujem podjetju Petrol d.d., posebna zahvala gre Tomažu Ružiču, Mateju Sili, Blažu Bedenčiču ter Suvadu Bajriću.

Za pomoč in posredovane vse podatke se zahvaljujem Komunalnem podjetju Velenje, d.o.o., posebna zahvala pa gre Petri Stropnik.

Na koncu bi se rada od srca zahvalila staršem, možu in sestri, ki so mi veskozi stali ob strani.

»Ta stran je namenoma prazna«



## KAZALO VSEBINE

### IZJAVA II

### BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....III

### BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....IV

### ZAHVALA.....V

<b>1</b>	<b>UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TEORETIČNA IZHODIŠČA .....</b>	<b>2</b>
2.1	Račun stalnega enakomernega toka v tlačnih cevovodih	2
2.1.1	Pretok in kontinuitetna enačba	2
2.1.1.1	Kontinuitetna enačba – zakon o ohranitvi mase .....	3
2.1.2	Energijska enačba	4
2.1.3	Energijske izgube	6
2.1.3.1	Linijske izgube .....	7
2.1.3.2	Lokalne izgube .....	10
2.1.3.3	Vpliv režima toka na hidravlične izgube .....	11
2.2	Osnovne lastnosti vodovodnega sistema	11
2.2.1	Karakteristike cevovoda	11
2.2.2	Črpalka	13
2.3	Osnovne smernice za postavitev merilne opreme	14
2.4	Računalniško modeliranje	15
2.4.1	Namen uporabe računalniških hidravličnih modelov	16
2.4.2	Sestava računalniškega modela v programu Aquis	17
2.4.2.1	Črpalke .....	18
2.4.2.2	Ventili.....	20
2.4.2.3	Cevi .....	21
2.4.2.4	Vodohran .....	23
2.4.2.5	Vir.....	24
2.4.2.6	Vozlišča .....	25
2.4.2.7	Simulacija .....	27

<b>3</b>	<b>UMERJANJE HIDRAVLIČNIH MODELOV.....</b>	<b>28</b>
3.1	Makrokalibracija	28
3.2	Mikrokalibracija	30
3.3	Osnovni standardi umerjanja	32
3.3.1	Analiza sistema	32
3.4	Enačbe za izračun hidravličnih veličin v programski opremi Aquis	33
3.4.1	Korekcijski faktor	34
<b>4</b>	<b>VODOVODNI SISTEM ŠMARTNO OB PAKI.....</b>	<b>37</b>
4.1	Območje oskrbe s pitno vodo	37
4.2	Zgodovinski oris vodovodnega sistema Šmartno ob Paki	37
4.3	Vodovodno omrežje Šmartno ob Paki do priključitve na centralni vodovod Šoštanj – Velenje	38
4.4	Navezava vodovodnega sistema Šmartno ob Paki na centralni sistem Šoštanj – Velenje	38
4.5	Lastnosti vodnega vira, črpališč, vodohranov in cevi	41
4.5.1	Vodni vir	41
4.6	Črpališča	42
4.7	Vodohrani	42
4.8	Cevi	43
4.9	Poraba vode	45
4.10	Merilna oprema	47
<b>5</b>	<b>REZULTATI UMERJANJA.....</b>	<b>51</b>
5.1	Umerjanje pretočnih razmer za vodovodni sistem Šmartno ob Paki	53
5.2	Umerjanje tlačnih razmer za vodovodni sistem Šmartno ob Paki	58

Husić, A. 2016. Umerjanje hidravličnega modela vodovodnega sistema Šmartno ob Paki.  
Dip. nal. – UNI. Ljubljana, UL FGG, Vodarstvo in komunalno inženirstvo.

---

5.2.1	Prikaz diagramov tlačnih razmer po izvedbi umerjanja na vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki	67
<b>6</b>	<b>ZAKLJUČEK</b> .....	<b>74</b>
<b>VIRI</b>	<b>76</b>	

**KAZALO TABEL**

Tabela 1: Hazen - Williamsov koeficient C za različne materiale (Laroc in sod., 2000)	10
Tabela 2: Elementi računalniškega modela	18
Tabela 3: Vhodni parametri za črpalko	19
Tabela 4: Prikaz rezultatov modela za črpalko	19
Tabela 5: Vhodni parametri za ventile	20
Tabela 6: Prikaz rezultatov za model ventilov	21
Tabela 7: Prikaz vhodnih parametrov za model cevi	22
Tabela 8: Prikaz rezultatov modela za cevi	22
Tabela 9: Prikaz vhodnih parametrov za vodohran	23
Tabela 10: Prikaz rezultatov modela za vodohran	24
Tabela 11: Vhodni parametri za vir	24
Tabela 12: Prikaz rezultatov za vir	25
Tabela 13: Prikaz vhodnih parametrov za vozlišče	26
Tabela 14: Prikaz rezultatov modela za vozlišče	26
Tabela 15: Prikaz možnih napak, ki se lahko pojavijo za elemente hidravličnega modela VS	30
Tabela 16: Prikaz naselij in število prebivalcev v občini Šmartno ob Paki	37
Tabela 17: Karakteristike črpališč	42
Tabela 18: Karakteristike vodohranov	43
Tabela 19: Manningov koeficient hrpavosti glede na material in starost cevi	45
Tabela 20: Prikaz predvidene porabe vode za leto 2015, na podlagi podatkov za porabo vode v prvi polovici leta 2015	46
Tabela 21: Merilna oprema, ki je vgrajena v vodovodni sistem Šmartno ob Paki	48
Tabela 22: Merilna mesta v vodovodnem omrežju Šmartno ob Paki	49
Tabela 23: Merilna območja dotoka/odtoka	51
Tabela 24: Prikaz odstopanja meritev od izračunov za vodovodni sistem Šmartno ob Paki	59

## KAZALO GRAFIKONOV

Graf 1: Delež posameznih materialov cevi v omrežju	44
Graf 2: Delež različnih premerov cevi glede na dolžino	44
Graf 3: Delež dolžine cevi v omrežju glede na leto vgradnje	45
Graf 4: Prikaz porabe vode v odvisnosti od porabnikov občini Šmartno ob Paki	46
Graf 5: Pretočne razmere za »JA_Rudnik-SMP_pretok_v_sistem_KO-1	53
Graf 6: Pretočne razmere za »JA_Gorenje-SMP_pretok_KO-5«	53
Graf 7: Pretočne razmere za »JA_Šmartno-SMP_pretok_RKO-7«	54
Graf 8: Pretočne razmere za »Jašek Paška vas Pretok«	54
Graf 9: Pretočne razmere za »JA_Rečica_1_pretok«	55
Graf 10: Pretočne razmere za »JA_Rečica_3_pretok«	55
Graf 11: Pretočne razmere za »JA_Rečica_4_pretok«	56
Graf 12: Pretočne razmere za »JA_Gavce_pretok_KO-6«	56
Graf 13: Pretočne razmere za »JA_Rečica_2_pretok«	57
Graf 14: Pretočne razmere za »JA_Rečica_5_1_pretok«	57
Graf 15: Pretočne razmere za »JA_Rečica_5_2«	58
Graf 16: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Rudnik-SMP_izhodni_tlak_KO-1«	67
Graf 17: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Gorenje-SMP_vhodni_tlak«	67
Graf 18: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Smartno-SMP_vhodni_tlak_RKO-7«	68
Graf 19: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Gavce_vhodni_tlak_KO-6«	68
Graf 20: Prikaz tlačnih razmer za »jPaskaVas_tlak«	69
Graf 21: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Rečica_1_izhodni_tlak«	69
Graf 22: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Rečica_4_izhodni_tlak«	70
Graf 23: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Rečica_1_vhodni_tlak«	70
Graf 24: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Rečica_4_vhodni_tlak«	71
Graf 25: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Rečica_2_vhodni_tlak«	71
Graf 26: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Rečica_3_vhodni_tlak«	72
Graf 27: Prikaz tlačnih razmer za »CP_Podgora_tlak«	72
Graf 28: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Rečica_3_izhodni_tlak«	73
Graf 29: Prikaz tlačnih razmer za »JA_Rečica_5_1_izhodni_tlak«	73

**KAZALO SLIK**

Slika 1: Prikaz poenostavljene kontinuitetne enačbe	4
Slika 2: Energijska in tlačna črta (Steinman, 2010)	6
Slika 3: Relativna hrapavost cevi	9
Slika 4: Karakteristika cevododa z označenimi doprinosi posameznih členov enačbe	12
Slika 5: Diagram obratovalnih karakteristik za različne hitrosti črpalk	13
Slika 6: Vstavljanje črpalke v Aquisu	19
Slika 7: Vstavljanje ventila v Aquisu	21
Slika 8: Vstavljanje cevi v Aquisu	23
Slika 9: Vstavljanje vodohrana v Aquisu	24
Slika 10: Vstavljanje vira v Aquisu	25
Slika 11: Vstavljanje vozlišča v Aquisu	26
Slika 12: Okno za nastavitev simulacije	27
Slika 13: Prekrivanje kalibracijskih poti (Schneider Electric, 2012)	35
Slika 14: Prikaz vnašanja kalibracijskih poti ter dobljenih rezultatov v Aquisu	36
Slika 15: Del trase povezovalnega cevododa Šmartno ob Paki (obešanje na mostno konstrukcijo)	39
Slika 16: Situacija načrtovane izgradnje vodooskrbnega sistema na območju občin Velenje, Šoštanj in Šmartno ob Paki (Komunalno podjetje Velenje, 2009)	40
Slika 17: Izvir Ljubija (levo) in ultrafiltracija na ČN Grmov vrh (desno)	41
Slika 18: Merilnik nivoja PPI 100 (levo) in Merilnik tlaka PPI 110 (desno)	47
Slika 19: Lokacija merilnih mest na vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki	50
Slika 20: Prikaz merilnih območij v Aquisu	52
Slika 21: Trasa JA Rudnik - JA Gorenje	60
Slika 22: Trasa JA Gorenje – JA Šmartno	61
Slika 23: Trasa JA Gorenje – JA Gavce	61
Slika 24: Trasa JA Gorenje – JA Gavce	62
Slika 25: Trasa JA Rečica 5_1 – JA Rečica 3	62
Slika 26: Trasa Rečica 1 - JA Rečica 2	63
Slika 27: Trasa JA Rečica 2 - JA Rečica 3	64
Slika 28: Trasa JA Rečica 3 – ČP Podgora	64
Slika 29: Trasa JA Gorenje – jPaška vas	65
Slika 30: Trasa JA Rečica 1(izhodni tlak) – JA Rečica 4 (izhodni tlak)	65
Slika 31: Trasa JA Rečica 1 (vhodni tlak) – JA Rečica 4 (vhodni tlak)	66

## 1 UVOD

Voda je ena najpomembnejših dobrin, ki jih človek potrebuje za življenje. Brez vode ni življenja, le ta mora biti prisotna in na razpolago v pravi obliki in biti prave kakovosti v vseh bioloških procesih, ki se odvijajo na Zemlji. Vode v trenutnem času in okolju so zelo obremenjene in izpostavljene onesnaževanju. Vzrok za visoko onesnaženje je zaradi nekontroliranih posegov v okolje. Voda, ki je namenjena za pitje mora ustrezati več kriterijem, in sicer: fizikalnim, kemičnim, biološkim, mikrobiološkim. Varna pitna voda predstavlja dragoceno dobrino za obstanek življenja na Zemlji, ampak jo vse bolj pogosto dojemamo kot dobrino samo po sebi dano.

Uspešni dosežki nadziranja vodnega toka in preusmerjanja toka v namakanje segajo daleč nazaj v zgodovini, in sicer so jih začeli razvijati starodavne civilizacije Egipta in Mezopotamije. Ostanke prazgodovinskih namakalnih del v Egiptu in na območju nekdanje Mezopotamije še obstajajo. V obdobju bronaste dobe so gradili že prve javne vodovode na območju Miken in Krete. V obdobju antike so Rimljani gradili akvadukte v obliki mostu za transport vode v naseljih.

V Sloveniji prevladujejo manjši sistemi za oskrbo s pitno vodo, ki z vodo oskrbujejo skoraj tisoč prebivalcev, na drugi strani pa celo manj kot sto prebivalcev, velikih sistemov za oskrbo s pitno vodo je pa sorazmerno nizek odstotek. Glede na to, da je višji odstotek manjših vodovodnih sistemov je prav tako velik delež vodnih virov, ki se razlikujejo po izdatnosti vode. Manjši vodni viri so praviloma manj zanesljivi glede same oskrbe z vodo, tveganje onesnaženosti vodnega vira je v veliki meri odvisno od samih geografskih razmer. Iz posameznih vodnih virov je sam nadzor kakovosti vode otežen, saj večina manjših vodovodnih sistemov nima vgrajenega sistema za pripravo pitne vode. Prav tako je oteženo izvajanje vzdrževanja in sanacij vodovodnih omrežij. Ko je Slovenija vstopila v EU, se je prilagodila evropskem pravnemu redu in pričela z ukrepi opuščanja majhnih vodnih virov ter z iskanjem večjih vodnih virov, ki bi lahko oskrbovali večji del prebivalstva z varno pitno vodo. (MOP, 2006)

V nadaljevanju je diplomska naloga razdeljena na teoretični in praktični del. V teoretičnem delu je predstavljeno modeliranje cevovodov, osnovne lastnosti cevovodnega sistema, glavne enačbe, postavitev merilne opreme, definicije pojmov cevovodnega sistema, teoretičen opis makro- in mikrokalibracije.

V praktičnem delu je prikazano umerjanje ali kalibracija vodovodnega sistema Šmartno ob Paki v programski opremi Aquis. Umerjanje ali kalibracija je osnovana na primerjavi meritev vodovodnega sistema Šmartno ob Paki in rezultati simulacij, izvedenih s pomočjo programskega orodja Aquis, v istem časovnem obdobju.

Cilj diplomske naloge je prikazati postopek izgradnje hidravličnega modela, analizirati meritve na vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki, izvedba umerjanja modela z računalniško opremo Aquis.

## 2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

Hidrodinamika je veda o pretoku vode in je bolj kompleksna veda od same hidrostatičke. Pri hidrodinamiki je potrebno upoštevati več dejavnikov, in sicer ti dejavniki so: hitrost, smer toka in viskoznost. Mora zagotavljati povezavo med hitrostjo, tlakom in velikostjo cevi ali kanalov, ki prevaja tok. V podpoglavjih bodo predstavljene temeljne enačbe, ki so potrebne pri hidravličnem modeliranju vodovodnega sistema. (Kay, 1998)

### 2.1 Račun stalnega enakomernega toka v tlačnih cevovodih

V posameznih odsekih cevovoda lahko obravnavamo enakomeren tok tekočine. Pretok je posledica razlike energijskih potencialov med dvema točkama sistema. V primerih, ko je tok stalen, tlaki pa po času konstantni uporabljamo naslednje enačbe:

- Kontinuitetno enačbo (Zakon o ohranitvi mase).
- Bernoullijevo enačbo (Zakon o ohranitvi energije).
- Enačba za izračun energijskih izgub (linijske in lokalne izgube).

#### 2.1.1 Pretok in kontinuitetna enačba

Pretok se nanaša na vodni volumen, ki se pretaka vzdolž cevi ali kanala vsako sekundo. Volumen (prostornina) se meri v kubičnih metrih ( $m^3$ ), zato se pretok meri v kubičnih metrih na sekundo ( $m^3/s$ ). Alternativne enote so še liter na sekundo ( $l/s$ ) in kubični meter na uro ( $m^3/h$ ).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

kjer je:

$V[m^3]$  ... volumen,

$Q[\frac{m^3}{s}]$  ... pretok,

$t[s]$  ... čas.

Pretok se lahko določi oz. izračuna, tako da hitrost vodnega toka pomnožimo s površino prereza cevi.

$$Q = v * a \quad (2)$$

kjer je:



$Q \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$  ... pretok,

$v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$  ... hitrost,

$a [\text{m}^2]$  ... površina prereza cevi.

### 2.1.1.1 Kontinuitetna enačba – zakon o ohranitvi mase

Kontinuitetna enačba temelji na enačbi za pretok. Kar preprosto pomeni: količina vode, ki prihaja v sistem mora biti enaka količini vode, ki zapuša sistem. V primeru, da je tok stalen velja, da je VTOK = IZTOKU. Velja tudi v primeru cevovodnega sistema, kjer za vsako vozlišče zapišemo zakon o ohranitvi mase.

$$Q_1 = Q_2 \quad (3)$$

$$v_1 \cdot a_1 = v_2 \cdot a_2 \quad (4)$$

Za kontinuitetno enačbo velja, da je masni pretok skozi površino A enak časovni spremembi mase v volumnu V. (Četina, 2010):

$$\iint_A \rho \vec{v} d\vec{A} = - \frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV \quad (5)$$

kjer je:

$V$  ... volumen [ $\text{m}^3$ ],

$A$  ... površina prereza [ $\text{m}^2$ ],

$v$  ... hitrost [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ],

$t$  ... čas [s],

$\rho$  ... gostota [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ].

V primeru stalnega toka in nestisljive tekočine, kontinuitetna enačba poenostavi obliko v:  
(Larock in sod., 2000):

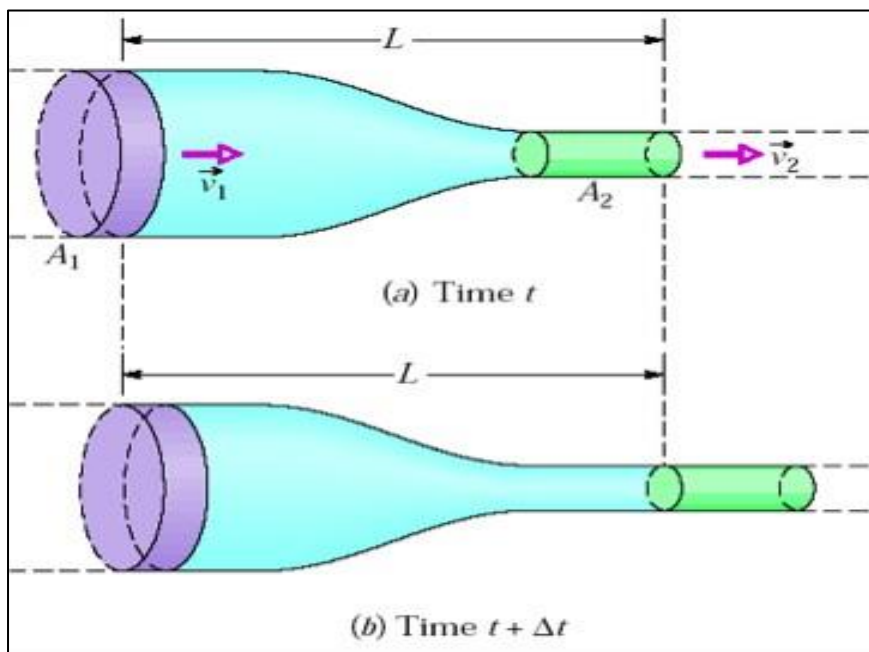
$$Q = \int_A v dA = A_i v_i = \text{konst} \quad (6)$$

kjer je:

$v_i$ ... hitrost toka vode v  $i$ -tem odseku [ $\frac{m}{s}$ ],

$A_i$  ... površina prereza cevi na  $i$ -tem odseku [ $m^2$ ],

$Q$  ... pretok vode [ $\frac{m^3}{s}$ ].



Slika 1: Prikaz poenostavljene kontinuitetne enačbe

### 2.1.2 Energijska enačba

Energija je povezava med višinsko lokacijo, tlakom in hitrostjo v ceveh ali kanalih. Enota energije pri tekočinah je izražena v Nm/N.

V povezavi z vodo poznamo tri vrste energije:

- tlačna energija,
- kinetična energija,
- potencialna energija.

Dovedena oz. odvedena toplota ter odvzeta oz. dodana energija zaradi dela, ki ga sistem opravi na okolico, vplivajo na spremembo celotne energije v sistemu, katera opiše zakon o ohranitvi energije. Spremembo energije lahko zapišemo kot (Steinman, 2010):

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dA}{dt} \quad (7)$$

Energijska enačba:

$$\frac{p_1}{\rho g} + h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \sum \text{vse oblike ireverzibilnih energij} \quad (8)$$

kjer je:

$\frac{p}{\rho g}$  ... tlačna energija,

$\frac{v^2}{2g}$  ... kinetična energija,

$h$  ... višina.

Različne oblike energij se lahko med seboj seštevajo in se s tem določi skupna energija:

$$\frac{p}{\rho g} + z + \frac{v^2}{2g} = \text{skupna energija} \quad (9)$$

kjer je:

$z$  ... potencialna energija

$p$  ... tlak [ $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ],

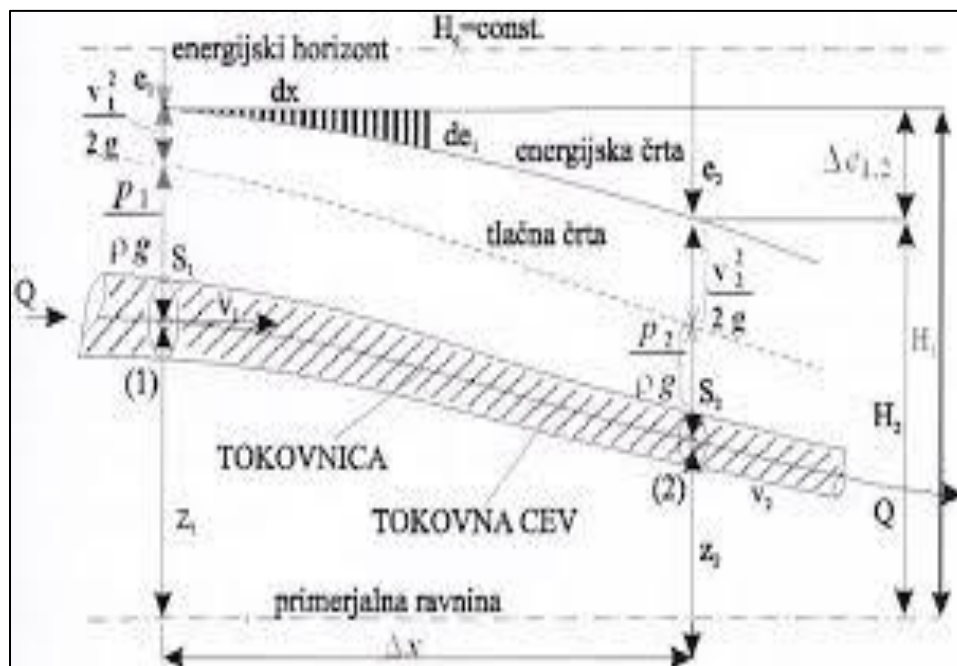
$g$  ... gravitacijski pospešek [ $9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ],

$\rho$  ... gostota vode [ $10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$ ],

$v$  ... hitrost [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ],

$z$  ... geodetska višina [m].

Energijska in tlačna črta se uporabljata za grafičen prikaz tlakov po sistemu. Energijska črta ponazarja vsoto višin v določeni točki sistema od tlačne, kinetične in potencialne energije. V dani točki je višina vodnega stolpca v Pitotovi cevi enaka višini energijske črte. Tlačno črto v sistemu v določeni točki ponazarja vsota višin potencialne in tlačne energije. S pomočjo piezometra merimo vsoto višin, ki jo imenujemo tudi piezometrična višina.



Slika 2: Energijska in tlačna črta (Steinman, 2010)

### 2.1.3 Energijske izgube

Za realno tekočino se celotna energija ohranja. Pomemben je tisti del energije, ki se zaradi trenja pri toku spremeni v ne-povračljivo oz. ireverzibilno energijo.

Energijske izgube so definirane kot ireverzibilne spremembe energije vodnega toka, le te nastanejo zaradi premagovanja hidravličnih uporov. Poznamo linijske energijske izgube in lokalne energijske izgube. Celotne izgube tlaka pa predstavljajo vsoto tlačnih izgub vzdolž cevovoda (linijske) in tlačne izgube zaradi lokalnih uporov.

Izgube energije (oz. pretvorba v nepovračljivo obliko energije) nastajajo pri premagovanju hidravličnih uporov zaradi toka tekočine. Pri analizi energijskih izgub si pomagamo z osnovno delitvijo:

- Izgube energije zaradi premagovanja trenja vzdolž toka. Naraščajo proporcionalno z dolžino toka. Imenujemo jih trenjske ali linijske izgube.
- Izgube energije, kot posledica lokalnih motenj. Pri vsaki spremembi smeri tokovnic (oženje oz. širjenje toka, krivine, tok skozi zaporne elemente, sprememba smeri tokovnic, ipd.) se pojavijo lokalne motnje. Kot posledica sprememb oblik strujanja toka nastanejo izgube, ki zmanjšajo energijo osnovnemu toku in jih imenujemo lokalne izgube.

Vsota linijskih in lokalnih izgub vzdolž opazovanega odseka predstavlja celotne izgube energije na določenem odseku toka. (Steinman, 2010)

$$\Delta E_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \Delta E_{\text{trenje},i} + \sum_{j=1}^m \Delta E_{\text{lok},j} \quad (10)$$

kjer je:

$\sum_{i=1}^n \Delta E_{\text{trenje},i}$  ... vsota linijskih izgub,

$\sum_{j=1}^m \Delta E_{\text{lok},j}$  ... vsota lokalnih izgub.

### 2.1.3.1 Linijske izgube

Linijske izgube lahko definiramo kot izgube, ki so nastale na opravljeni poti. Vzdolž določenega odseka nastajajo trenjske izgube, ki so odvisne od koeficienta hrapavosti, upora in viskoznosti. Naraščajo proporcionalno vzdolž toka. Linijske tlačne izgube označuje proporcionalni padec tlaka glede na dolžino cevovoda.

Za določevanje linijskih izgub uporabljamo naslednje enačbe:

- Darcy-Weissbachova enačba,
- Colebrook-Whiteova enačba in
- Hazen-Williamsova enačba.

Darcy-Weissbachova enačba se uporablja za opis tlačnih izgub, ki nastanejo kot posledica toka v ceveh. Vsebuje faktor trenja, ki opiše oz. definira hrapavost materialov notranjih sten cevi.

Izpeljana je teoretično na podlagi uporabe dimenzijske analize (Larock in sod., 2003). Enačba se glasi:

$$h_L = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{8LQ^2}{gD^5 \Pi^2} = r_{dw} Q^2 \quad (11)$$

kjer je:

$h_L$  ... linijske izgube [m],

$\lambda$  ... Darcy – Weissbachov koeficient trenja [-],

$Q$  ... pretok v cevi [ $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ],

$D$  ... premer cevi [m],

$L$  ... dolžina cevi [m],

$v$  ... hitrost toka vode [ $\frac{m}{s}$ ],

$g$  ... gravitacijski pospešek [ $m/s^2$ ],

$r_{dw}$  ... koeficient linijskega upora za Darcy – Weissbachovo enačbo.

Darcy – Weissbachov koeficient trenja ( $\lambda$ ) je funkcija Reynoldsovega števila in relativne hrapavosti.

$$\lambda = f(Re, \frac{\varepsilon}{D}) \quad (12)$$

kjer je:

$Re$  ... Reynoldsovo število

in

$\frac{\varepsilon}{D}$  ... relativna hrapavost.

Reynoldsovo število zajema hitrost, gostoto, viskoznost in premer cevi, katerega izračunamo z enačbo:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{vD}{\nu} \quad (13)$$

kjer je:

$v$  ... hitrost toka v ceveh [ $\frac{m}{s}$ ],

$D$  ... premer cevi [m],

$\rho$  ... gostota tekočine [ $\frac{kg}{m^3}$ ],

$\mu$  ... dinamični koeficient viskoznosti [ $\frac{Ns}{m^2}$ ] oz. [ $\frac{kg}{ms}$ ],

$\nu$  ... kinematični koeficient viskoznosti [ $\frac{m^2}{s}$ ].

Relativno hrapavost določa razmerje med višino hrap na ostenju cevi in premera cevi.

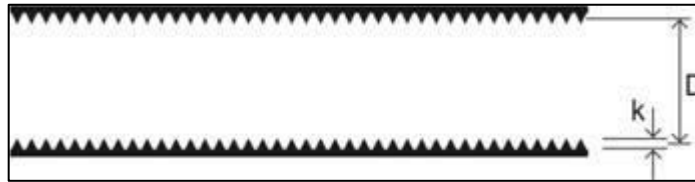
$$\text{Relativna hrapavost} = \frac{\varepsilon}{D} \quad (14)$$

kjer je:

$D$  ... premer cevi [m]

in

$\varepsilon$  ... višina hrap na ostenju cevi [m].



Slika 3: Relativna hrapavost cevi

Colebrook-Whiteova enačba ni namenjena za direktno računanje linijskih izgub, ampak se uporablja za določitev koeficienta trenja. Ker se koeficient trenja kot neznanka pojavlja na obeh straneh enačbe, je potrebno enačbo reševati iterativno, vse dokler ne dobimo vrednosti koeficienta trenja na obeh straneh enaki vrednosti. (Walski in sod., 2003)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -4 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{1,413}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (15)$$

kjer je:

$\lambda$  ... koeficient hrapavosti,

$\varepsilon / D$  ... relativna hrapavost,

$Re$  ... Reynoldsovo število,

$D$  ... premer cevi [m].

Hazen – Williamsova enačba je izpeljana empirično in je v uporabi samo za izračune v turbulentnem režimu toka vode. (Larock in sod., 2000)

Zapiše se:

$$h_1 = \frac{10,67L}{C^{1,852} D^{4,87}} Q^{1,852} = r_{hw} Q^{1,852} \quad (16)$$

kjer je:

$h_L$  ... linijske izgube v cevi [m],

$C$  ... Hazen-Williamsov koeficient hrapavosti,

$D$  ... notranji premer cevi [m],

$Q$  ... pretok v cevi [ $\frac{m^3}{s}$ ],

$L$  ... dolžina cevi [m],

$r_{hw}$ ... koeficient linijskega upora za Hazen – Williamsovo enačbo.

**Tabela 1: Hazen - Williamsov koeficient C za različne materiale (Laroc in sod., 2000)**

Material	Koeficient C
Les	120
Nodularna litina	140
<i>Opeka</i>	100
<i>Beton</i>	120
Lito železo                      novo	130
staro	100
močno korodirano	80
PVC	150

V preglednici so za različne materiale predstavljeni Hazen – Williamsovi koeficienti C, ki predstavljajo sposobnost prevajanja vode skozi cev. Bolj gladke cevi kot so, vsebujejo višji koeficient C, medtem ko cevi z večjo hrapavostjo predstavljajo nižji koeficienti C.

### 2.1.3.2 Lokalne izgube

V cevovodnih sistemih poleg linijskih izgub nastopajo tudi lokalne energijske izgube. Lokalne izgube so posledica lokalnih motenj, ki se pojavijo pri vsaki spremembi tokovnic (širjenje ali ožanje toka, sprememba smeri, ipd.). Izgube tlaka zaradi lokalnih uporov nastanejo pri fazonskih kosih in vodovodnih armaturah, ki spremljajo vsako vodovodno omrežje.

Enačba za določitev lokalne izgube:

$$h_m = K \frac{v^2}{2g} = K \frac{8Q^2}{g\pi^2 D^4} = mQ^2 \quad (17)$$

kjer je:

$h_m$ ... lokalna izguba [m],

$v$  ... hitrost toka vode [ $\frac{m}{s}$ ],

$K$  ... koeficient lokalnih izgub,

$g$ ... gravitacijski pospešek [ $\frac{m}{s^2}$ ].



### 2.1.3.3 Vpliv režima toka na hidravlične izgube

Na enačbe, ki določajo hidravlične izgube neposredno vplivajo spremembe v režimu toka. Na podlagi eksperimentalnih poskusov in posledičnih rezultatov angleškega fizika O. Reynoldsa (1883) so dobljene ugotovitve. (Steinman, 2010)

- Linearna odvisnost med energijskimi izgubami zaradi trenja in srednjo hitrostjo toka velja za laminarni režim toka.
- S kvadratom srednje hitrosti toka naraščajo izgube energije v razvitem turbulentnem toku.
- Prehodni režim toka se pojavlja med obema jasno izraženima režimoma toka. Po svojem karakterju je turbulenten, a ima slabše izražene turbulentne karakteristike.

Reynoldsovo število je pri laminarnem toku manjše od 2300, medtem ko pri turbulentnem toku pa večje od 2300. Režim toka, kjer se tok giblje v vzporednih slojih, je značilen za laminaren tok. Režim toka, kjer se pojavijo pulzacije hitrosti in pride do premešanja v prečni smeri je značilno za turbulenten tok.

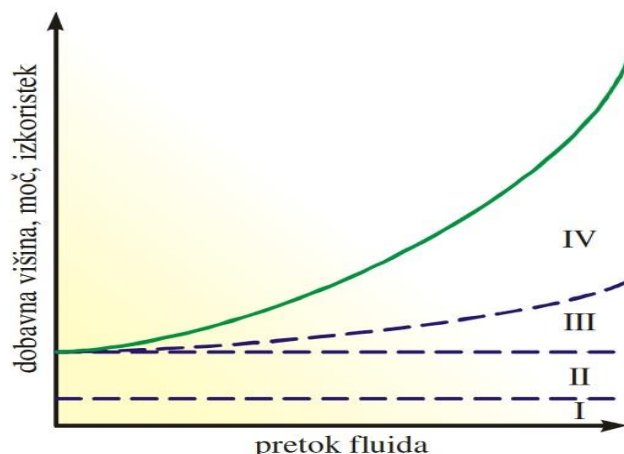
## 2.2 Osnovne lastnosti vodovodnega sistema

Osnovna naloga vodovodnega sistema je zagotovitev zahtevane količine vode pri zadostnem tlaku do posameznega potrošnika. Za distribucijske sisteme je običajno značilno, da distribuirajo pitno vodo do rezidenc, institucij ter do poslovnih in industrijskih obratov. Nekatere občine imajo ločen visokotlačen sistem za gašenje požarov ali predelano nepitno vodo od distribucijskega sistema. Večina komunalnih vodovodnih sistemov morajo biti usposobljeni za zagotavljanje pitne in nepitne vode za namen gašenja požarov ali namakanja zemljišč.

Vodovod je sestavljen iz treh glavnih komponent: distribucijskega omrežja, črpalk in skladiščnih objektov za potrebe distribucije vode. Večina sistemov ima potrebo po črpalki, ki dvigne vodo in premaga višinsko razliko in energijske izgube zaradi trenja. Skladiščne cisterne so vključene v sisteme za primere v sili ali za uravnoteženo shranjevanje, da bi zmanjšali energijske izgube. Cevi lahko vsebujejo naprave za nadzor pretoka, kot so ventili za nadziranje oz. reduciranje tlaka. (Mays, 1999)

### 2.2.1 Karakteristike cevovoda

Količino potrebne energije za pretakanje vode po cevovodu prikazuje karakteristika cevovoda. Dobavna višina pri cevovodu predstavlja potrebno energijo za pretok vode. Le ta je v grafičnem prikazu karakteristike cevovoda odvisna od pretoka vode za točno določen cevovod in pri določenih hidravličnih razmerah. Odvisnost dobavne višine cevovoda od pretoka vode izrazimo z diagramom, ki ga imenujemo karakteristika cevovoda.



Slika 4: Karakteristika cevododa z označenimi doprinosi posameznih členov enačbe

Enačba za dobavno višino:

$$H = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + (z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{\Delta p}{\gamma} \quad (18)$$

kjer je:

$H$  ... dobavna višina,

$v$  ... hitrost vode,

$g$  ... težnostni pospešek,

$z$  ... višina,

$p$  ... tlak,

$\gamma$  ... gostota.

Enačbo za dobavno višino (18) sestavljajo štirje členi. Členi enačbe so lahko zastopani v različnih razmerjih v odvisnosti od cevododa. Lastnosti cevododa ter položaja ventila ne smemo spreminjati pri samem določanju le tega. Za določitev karakteristike cevododa so potrebni različni pretoki, katere dosežemo s spreminjanjem obratovalnih parametrov in s tem karakteristike črpalke. S spremembo ene izmed karakteristik povzročimo spremembo pretoka vode. Z uporabo regulacijskega ventila, katerega naloga je spreminjati pretočne upore v cevododu, spremenimo karakteristiko cevododa. (Drobnič, 2010)

V vodovodnem sistemu, ki ga upravlja Komunalno podjetje Velenje je zahtevana hitrost pri srednji

porabi vode med  $0,8 \frac{m}{s}$  in  $1,4 \frac{m}{s}$ , v primerih požara je dovoljena hitrost pretoka tudi do  $3,5 \frac{m}{s}$ . Tlak v vodovodnem sistemu je odvisen od pretočnih razmer ter porabe vode in je na mestu obračunskega vodomera pri pretoku nič lahko med 2 bar in 8 bar. Minimalni tlak je v izrednih razmerah lahko tudi nižji. (Komunalno podjetje Velenje, 2014)

## 2.2.2 Črpalka

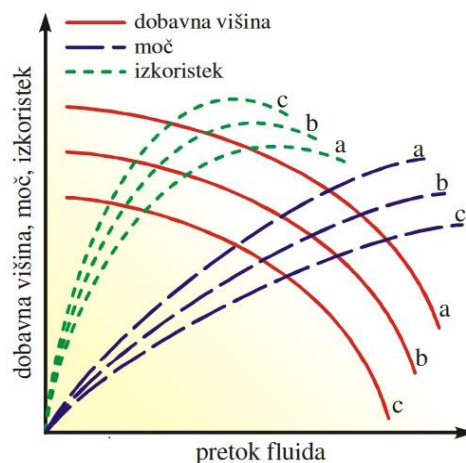
Če ni dovoda ali odvoda energije ostaja celotna energija vode nespremenjena. Za premagovanje uporov pri pretoku voda oz. gibanje vode porablja del energije. S pomočjo črpalke vodi dodajamo dodatno energijo. Karakteristika črpalke prikazuje zmogljivost črpalke. Obratovanje le te je odvisno od izkoristka volumskega toka vode, moči ter dobavne višine za različne vrtiljaje črpalke. Karakteristiko črpalke spreminjamo z vrtilno hitrostjo črpalke. Sposobnost energije črpalke pri določenem pretoku predstavlja dobavno višino črpanja. Istočasno je dobavna višina tudi kriterij, ki nam nakaže ali je cevovodu potrebna črpalka.

$H > 0$  ... Če je dobavna višina črpalke večja od 0, potem za zagotovitev zahtevanega pretoka vode potrebujemo črpalko.

$H = 0$  ... Če je dobavna višina črpalke enaka 0, nastopi samodejna vzpostavitev pretoka ter črpalka ni potrebna.

$H < 0$  ... Če je dobavna višina črpalke manjša od 0, potem za zagotovitev zahtevanega pretoka vode ne potrebujemo črpalke, nastane potreba po »zaviranju« vode.

V obratovalni točki, ki sovpada s točko najvišjega izkoristka, se nahajajo optimalni obratovalni pogoji. Obratovalna točka se določi v točki, kjer se sekata karakteristika cevovoda in karakteristika črpalke. (Drobnič, 2010)



Slika 5: Diagram obratovalnih karakteristik za različne hitrosti črpalke

### 2.3 Osnovne smernice za postavitev merilne opreme

Izbira merilnih mest je optimizacijski problem. V praksi se določa po načelu „ad hoc“, in sicer inženir s pomočjo strokovnega ocenjevanja določi in poda predloge lokacij merilnih mest. Srečamo se s štirimi pomembnimi vprašanji, in sicer:

1. Katere hidravlične veličine opazovati?
2. Kje opazovati?
3. Kdaj opazovati?
4. V kakšnih okoliščinah?

Med temi vprašanji je najzahtevnejše vprašanje pod št. 2, in sicer kje opazovati. Na ostala vprašanja poda inženir odgovor na podlagi svojega strokovnega znanja. Za določevanje najprimernejših merilnih mest je bistvenega pomena občutljivost le teh. Jacobijeva matrika se uporablja za določanje občutljivosti hidravličnih veličin merilnih mest, z ozirom se na spremembe parametrov hidravličnega modela. Koeficiente Jacobijeve matrike ( $i, j$ ) predstavljajo parcialni odvodi, ki izražajo hidravlične veličine v odvisnosti od parametrov modela, ki jih pridobimo z numerično aproksimacijo metodo končnih razlik. Natančnejše vrednosti koeficientov Jacobijeve matrike dobimo od boljše umerjenih parametrov hidravličnega modeliranja. Na podlagi tega je potrebno izvajati umerjanje s pomočjo iterativnega postopka ter določiti merilna mesta vse do sprejemljive natančnosti namenskega hidravličnega modela.

Z vidika izpolnjevanja dveh ciljnih funkcij je obravnavni optimizacijski problem izbire merilnih mest, in sicer z vidika ciljne funkcije natančnosti umerjanja ter z vidika ciljne funkcije stroškov izvajanja meritev. Večje kot je število merilnih mest, večja je tudi natančnost umerjanja parametrov hidravličnega modela. Metoda, ki izhaja s področja teorije regresijske analize, se je izkazala za uspešno uporabljeno pri izbiri merilnih mest modelov podtalnice ter pri razvoju modelov za umerjanje, je uporabljena za vrednotenje prve ciljne funkcije natančnosti umerjanja hidravličnega modela. Prav tako se je za uspešno izkazala še na področju določanja merilnih mest iz razloga umerjanja hidravličnega vodovodnega sistema. Prostornina območja zaupanja parametrov se vrednoti s pomočjo prve ciljne funkcije. Skupne stroške izvedbe meritev na vodovodnem sistemu optimira ciljna funkcija

Upoštevani so :

- stalni ali investicijski strošek ter
- spremenljivi ali operativni strošek.

Zaradi težje določljivosti splošne enačbe za vrednotenje stroškov izvajanja meritev, se predpostavi, da je glavni strošek zbiranja vsakokratnih meritev povezan samo s spremenljivim oz. operativnim delom skupnih stroškov. Ciljna funkcija teži k cilju zniževanja višine stroškov ter posledično tudi znižati

število merilnih mest, sama funkcija se izrazi v odvisnosti od števila merilnih mest. Zaradi protislovnosti ciljnih funkcij, je potrebno pridobiti možno rešitev, katera bo največ zadovoljevala kriterije obeh ciljnih funkcij. Z zbranimi meritvami na vseh možnih merilnih mestih bo izpolnjen najvišji kriterij prve ciljne funkcije. Druga ciljna funkcija se osredotoča na čim manjše število merilnih mest in s tem posledično tudi na najnižje stroške. Cilj prve ciljne funkcije je doseči največjo natančnost umerjanja, pri drugi ciljni funkciji je cilj doseči najnižje stroške in s tem omejiti število merilnih mest. (Banovec in sod., 2006)

Postopek avtomatizacije vodovodnega omrežja se osredotoči v glavnem na primarni del vodovodnega omrežja in nekaj manj na sekundarni del omrežja. Kontrola vodovodnega omrežja se opravlja iz dispečerskega centra, ki mora biti opremljeno z elektromotornimi zasuni, ustreznimi manometri ter z merilci pretokov. V dispečarskem centru se zbirajo vse izmerjene vrednosti in opravi krmiljenje. Za nemoten potek avtomatizacije je potrebna prisotnost čim večjega števila merilnih mest. Strošek avtomatizacije se povečuje z večanjem števila merilnih mest. Izbira merilnih mest je odvisna od specifičnih pogojev posameznega vodovodnega sistema. Izbrana mesta morajo biti reprezentančna, da se na podlagi le teh pridobi zadostna preglednost nad samim sistemom. Če imamo na razpolago le eno reprezentančno točko, nam le ta ne odraža dejanskega stanja v vodovodnem omrežju. Dobra izbira reprezentančnih točk in posledično uspešno opravljena avtomatizacija vodovodnega omrežja omogoča usmerjanje vode po sistemu iz dispečerskega centra glede na trenutne zahteve. (Žerovnik, 2009)

## 2.4 Računalniško modeliranje

Modeliranje vodovodnih sistemov z uporabo računalniške opreme je dokazana, učinkovita in zanesljiva tehnologija za simulacijo in analizo obnašanja vodovodnega sistema v skladu s široko paleto hidravličnih pogojev. Računalniški modeli uporabljajo enačbe oz. zakone o ohranitvi mase in energije, da določijo tlak in porazdelitev pretoka v celotnem omrežju. Računalniško simulacijski modeli so bili razviti, ker ročni numerični pristopi za analizo večjih distribucijskih sistemov niso bili več zadostni. Ti modeli uporabljajo sistem nelinearnih enačb in s pomočjo izračuna le teh, določijo pretok v ceveh in vozliščih. Računalniški hidravlični modeli so zelo priročen pripomoček za upravljavce vodovodnih omrežij, saj z njim lahko preučijo možnost širitve cevovodnega sistema do novih odjemalcev, lažje nadzirajo izgube na sistemu in s tem jih učinkovito zmanjšujejo, v primeru požara lahko preverijo vodne zaloge itd. (Mays, 1999)

Niz sedmih potrebnih korakov za razvoj in uporabo simulacijskega modela (Clark, 1998):

1. Izbira modela.
2. Pokritost omrežja.
3. Kalibracija.
4. Preverjanje rezultatov.

5. Definiranje problema.
6. Aplikacija modela – simulacija problemskega stanja.
7. Prikaz oz. analiza rezultatov.

#### 2.4.1 Namen uporabe računalniških hidravličnih modelov

Pri procesu umerjanja odigra veliko vlogo sam namen, kateri določa parametre modela, ki jih je potrebno umeriti ter natančnost napovedi modela ozirajoč se na realno stanje vodovodnega sistema, da bi lahko hidravlični model označili za umerjen. (Walski, 1995). Obstaja troje smernic, s katerimi si lahko pomagamo postaviti meje umerjenosti modela, s katerimi se lahko zagotovi ustrezna natančnost napovedi namenskega modela. Vse smernice podajajo svoje kriterije umerjenosti v relativni oziroma absolutni obliki razlik med napovedmi hidravličnega modela in meritvami na vodovodnem sistemu. Smernice so objavili:

- Water Research Center (WRc), Velika Britanija, (WRc, 1989)
- American Engineering Computer Applications Committee (ECAC), ZDA (ECAC, 1999) in
- Haestad Methods, ZDA.

WRc je objavil numerične vrednosti, izražene tako v relativni in absolutni obliki odstopanj med napovedmi modela in meritvami na sistemu, ki določajo stopnje umerjenosti pretokov in tlakov pri statičnih simulacijah, poleg omenjenega pa pri dinamičnih simulacijah obravnava tudi odstopanja pri meritvah oziroma simulacij gladin v vodohranih. Vrednosti odstopanj pretokov in tlakov so odvisni od obsega meritev oz. od pokritosti vseh možnih meritev. Velika pomanjkljivost WRc-jevih smernic je v tem, da so podane brez upoštevanja namena uporabe hidravličnega modela.

Smernice natančnosti umerjanja po WRc:

Napovedi modela: PRETOKI

- $\pm 5\%$  odstopanja pretokov v primeru, da meritve vsebujejo več kot 10 % vseh merjenih pretokov .
- $\pm 10\%$  odstopanja pretokov v primeru, da meritve vsebujejo manj kot 10% vseh merjenih pretokov.

Napovedi modela: TLAKI

- $\pm 0,5$  m oz.  $\pm 5\%$  odstopanja tlakov, 85% vseh meritev tlakov,
- $\pm 0,75$  m oz.  $\pm 7,5\%$  odstopanja tlakov, 95% vseh meritev tlakov,
- $\pm 2,0$  m oz.  $\pm 15\%$  odstopanja tlakov, 100% vseh meritev.

Napovedi modela: delovanje vodohranov (EPS – razširjena časovna simulacija)

- $\pm 5\%$  odstopanja delovnega volumna vodohrana (volumen v in iz vodohrana) med dvema časovnima korakoma.

Po končanem umerjanju in ugotovitvi, da hidravlični model predstavlja realni vodovodni sistem v sprejemljivih mejah odstopanja, lahko tako umerjen model začnemo uporabljati za analiziranje stanja sistema ter za iskanje možnih rešitev, ki pripomorejo, da vodooskrbni sistem ustrezno deluje v trenutnem in prihodnjem obratovanju. (Kozelj, 2005)

Kot podpora pri odločanju se v osnovi hidravlični model lahko uporablja v primerih (Orel, 2004):

- preverjanje različnih scenarijev obratovanja ter analizo trenutnega stanja na obstoječem vodovodu,
- obnovo dotrajanih cevovodnih sistemov in planiranje razvoja na dolgi rok,
- analize stroškov obratovanja in porabe energije,
- analize požarne varnosti,
- analize kvalitetne pitne vode.

#### **2.4.2 Sestava računalniškega modela v programu Aquis**

Računalniški hidravlični model nam zagotavlja boljšo dostopnost in razpoložljivost potrebnih podatkov v zvezi z vodovodnim sistemom. Da bi vzpostavili „osnovni“ hidravlični model je potrebno razpolagati z fizičnimi karakteristikami vodovodnega sistema. S pomočjo GIS podpore lahko uvozimo osnovne podatke vodovodnega sistema, ki so potrebni za vzpostavitev hidravličnih modelov. Pred samo uporabo se izvede postopek umerjanja, katerega cilj je čim bolj približati napovedi hidravličnih veličin z meritvami na vodovodnem sistemu. Za vzpostavitev hidravličnega modela sta ključnega pomena fizične in nefizične lastnosti elementov vodovodnega sistema. V odvisnosti od le teh je pogojena natančnost napovedi hidravličnega modela. Sam hidravlični model simulira delovanje vodovodnega sistema in s tem omogoča preverjanje novih posegov v vodovodni sistem. Hidravlični model cevovodnega sistema je prikazan z zbirko med seboj povezanih dolžin cevi v določenih vozliščih, kjer lahko voda vstopa in izstopa iz sistema.

V modelu so spoji, rezervoarji, vodohrani predstavljeni kot vozlišče. Cevi pa so predstavljene kot povezava. Medtem ko sta črpalka in kontrolni ventil lahko predstavljena kot vozlišče ali kot povezava. (Schneider Electric, 2012)

V naslednjih podpoglavjih bo opisano orodje Aquis. Orodje Aquis uporabljamo za hidravlično modeliranje, katero omogoča simulacijo pretoka in tlaka v vodovodnem sistemu. Aquis predstavlja enega izmed vodilnih programov računalniške opreme za modeliranje in upravljanje procesov na vodovodnih distribucijskih sistemih. Aquis predstavlja obsežno platformo za simuliranje vodovodnih

omrežij, s pomočjo le teh pripomore k izboljšanju obratovalne varnosti sistema, kakovosti vode in hidravličnih karakteristik.

**Tabela 2: Elementi računalniškega modela**

Element	Tip	Opis
Črpalka	Vozlišče ali povezava	Črpa vodo v višje ležeče položaje, premagovanje višinske razlike in zmanjšanje vodnih izgub
Kontrolni ventil	Vozlišče ali povezava	Reducira tlak, pretok
Cevi	Povezava	Po njih poteka transport vode
Vodohran	Vozlišče	Vodni zbiralnik, objekt za hranjenje vode
Vir	Vozlišče	Vir vode
Vozlišče	Vozlišče	Spoj dveh ali več cevi, mesto kjer voda lahko vstopa v sistem ali izstopa iz sistema

#### 2.4.2.1 Črpalke

Črpalke so v Aquisu vstavljene na cevi ali vmes med dvema vozliščema. Z vstavljanjem črpalke na cev, se cev razdelili na dve cevi, s črpalko med njima. Vozlišče se vstavi na gor-vodni in dol-vodni strani črpalke. Naloga črpalke je, da dovaja energijo v sistem in „dvigne“ tlak med svojim gor-vodnim in dol-vodnim vozliščem. Smer črpalke je potrebno upoštevati, zaradi pravilnega delovanja modela.

V podatkovni skupini (Data Group) je možno določiti karakteristike črpalke oz. krivuljo črpalke, ki vsebuje pretok, dvig in moč. Krivulja črpalke je definirana pri hitrosti vrtenja črpalke (ferkvenca).

Vnos kontrolnih parametrov za urejanje črpalke vnesemo pod zavihkom Control. Lahko izbiramo med naslednjimi strategijami za nadzor črpalke: Nadzor tlaka – nadzor črpalke s pomočjo kontrolnega pritiska na dol-vodnem ali gor-vodnem vozlišču, ki ga vnesemo v zavihku Control (Dws/Up stream Pressure). Z definicijo kontrolnega vozlišča (Control Node) lahko nadzorujemo delovanje črpalke preko tlaka neposredno v dol-vodnem ali gor-vodnem vozlišču. Nadzor spremembe tlaka – v primeru, da poznamo črpalno višino lahko uporabimo to konfiguracijo nadzora delovanja črpalke. Nadzor črpalne hitrosti – pri konfiguraciji črpalke glede na hitrost le te, je potrebno upoštevati tudi karakteristike črpalke. Nadzor delovanja na podlagi nadzornih pogojev – Določimo lahko pogojni nadzor za ustvarjanje več naprednih nadzorov, glede na rezultate simulacij odvisnih od hidravličnih ali časovnih parametrov.

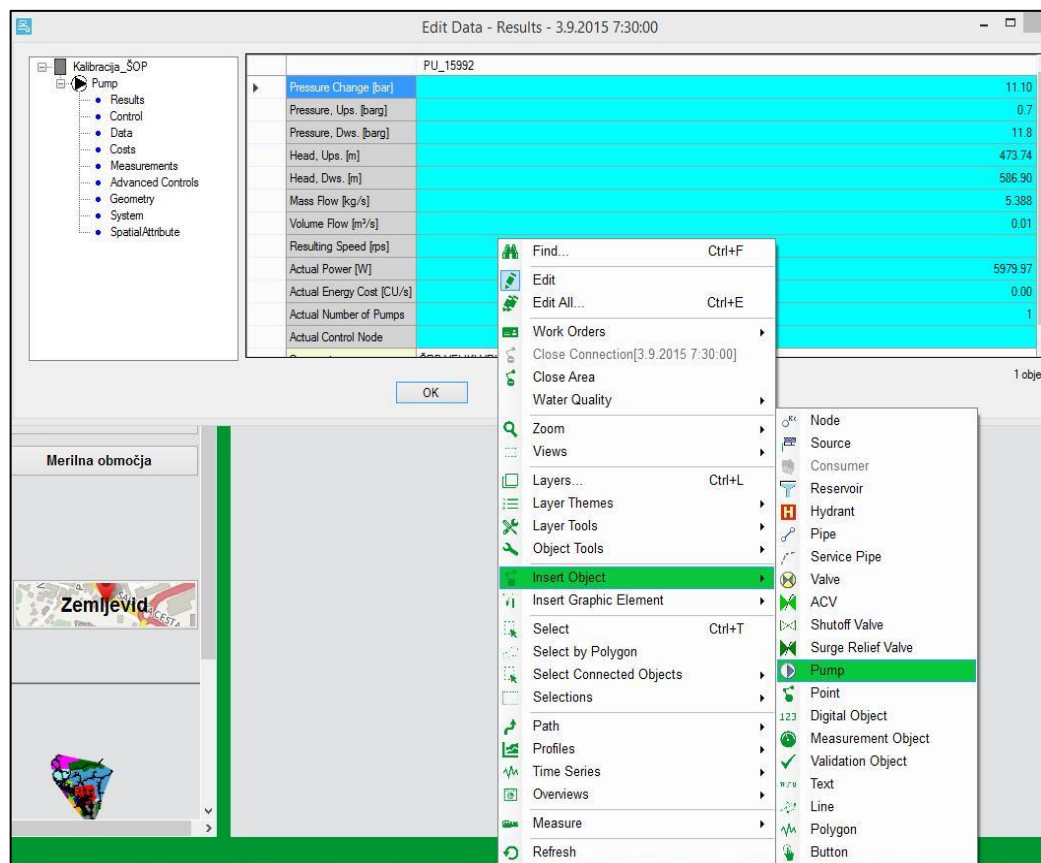


**Tabela 3: Vhodni parametri za črpalko**

ID črpalke	Ime, oznaka črpalke
Hitrost	Hitrost črpanja
Definirana hitrost	Hitrost črpanja pri definirani črpalni krivulji
Nadzor tlaka	Tlak v vozlišču – nadzor črpalke
Nadzor tlaka v dol – vodnem vozlišču	Tlak v dol – vodnem vozlišču
Nadzor v gor – vodnem vozlišču	Tlak v gor – vodnem vozlišču

**Tabela 4: Prikaz rezultatov modela za črpalko**

Tlak gor-vodno/dol-vodno	Prikaz rezultatov tlaka v gor-vodnem in dol vodnem vozlišču
Masni pretok	Masni pretok skozi črpalko
Prostorninski pretok	Prostorninski pretok skozi črpalko
Sprememba tlaka	Sprememba tlaka zaradi črpalke



**Slika 6: Vstavljanje črpalke v Aquisu**

### 2.4.2.2 Ventili

Ventili imajo nalogo reducirati tlak ali pretok v določeni točki v cevovodnem sistemu. Ventil se vstavi na cev, katero prekine in uvede novo vozlišče, kjer cev in vozlišče prideta skupaj.

Poznamo več vrst ventilov, in sicer:

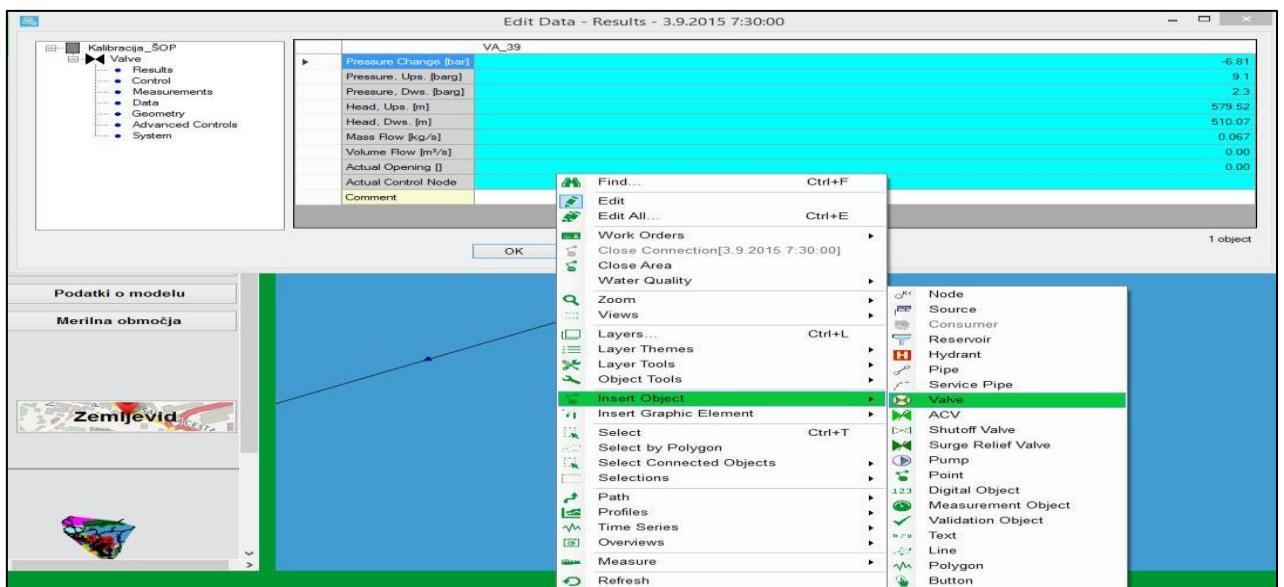
- Nepovratni ventil (NRV) – omogoča pretok vode v cevovodnem sistemu le v eno smer.
- Tlačni reducirni ventil (PRV) – nadzorovan s kontrolo dol-vodnega tlaka. Dol-vodni tlak pomeni tlak na prvem vozlišču navzdol od ventila. Tlak je lahko fiksna vrednost ali pogojna kontrola.
- Krmiljeni ventil – ventil je lahko krmiljen s tlakom v vozlišču, ne direktno pod ventilom.
- Fiksna dušilna loputa – ventil, ki ima nastavitveno točko za fiksno dušilno loputo, se lahko definira z DP kontrolo.
- Ventil za vzdrževanje tlaka (PSV) – ventil za vzdrževanje tlaka skuša zagotoviti, da se vzdržuje gor-vodni tlak. Če se gor-vodni tlak ne more vzdrževati, se mora ventil zapreti in ne sme pustiti, da bi voda tekla nazaj skozi ventil.
- Ventil za omejevanje pretoka (FCV) – FCV bo zagotovil, da bo definirana vrednost pretoka vzdrževana, če je možno brez da bi se tlak povišal ali da bi dovolil nasprotno smer pretoka.
- Nadzor z odpiranjem – stopnja odpiranja ventila tudi lahko nadzoruje ventil. Če je stopnja odpiranja uporabljena kot kontrola, bo  $C_v$ , max karakteristika ventila, ki je konfigurirana v Data group, uporabljena za izračun razmerja omejevanje/pretok tlaka.

**Tabela 5: Vhodni parametri za ventile**

ID ventila	Ime ventila.
Delež odprtosti	Pri ventilu TCV vnesemo delež odprtosti (0-1)
NRV	Dopuščanje toka le v eno smer.
Nadzor tlaka	Nadzor ventila PRV s pomočjo tlaka v izbranem dol-vodnem vozlišču.
Nadzor tlaka dol-vodno	Tlak v dol-vodnem vozlišču (ventil PRV).
Nadzor tlaka gor-vodno	Tlak v gor-vodnem vozlišču (ventil PSV).
Znižanje tlaka	Vrednost znižanega tlaka pri toku skozi ventil PBV.
Nadzor pretoka	Masni pretok, ki teče skozi ventil FCV.

**Tabela 6: Prikaz rezultatov za model ventilov**

Sprememba tlaka (Pressure change)	Sprememba tlak pri toku skozi ventil.
Tlak dol-vodno/gor-vodno (Pressure Up/Dws)	Prikaz tlaka v dol-vodnem in gor-vodnem vozlišču ventila.
Masni pretok (Mass flow)	Masni pretok skozi ventil.
Prostorninski pretok (Volume Flow)	Prostorninski pretok skozi ventil.
Delež odprtosti (Actual Opening)	Delež odprtosti ventila.



**Slika 7: Vstavljanje ventila v Aquisu**

### 2.4.2.3 Cevi

Cevi so linijski objekti po katerih poteka transport vode od točke 1 do točke 2. Vodni tok potuje od višje točke proti točki, ki je nižje. Preden vstavimo cev v Aquisov model, moramo imeti že postavljena dva vozlišča. Prvo izberemo gor-vodno vozlišče, nato kot drugo izberemo dol-vodno vozlišče in tako nadaljujemo z generiranjem novih cevi. Ime cevi (ID) se samodejno ustvari. Z uporabo koordinat se izračunajo dolžine cevi, obstaja pa tudi možnost, da ročno vnesemo dolžino cevi in bo le ta neodvisna od geografske dolžine cevi. Tip cevi lahko izberemo iz kataloga cevi, s čim se bodo pripisale tudi vrednosti za hrapavost in premer cevi. Za zagon simulacije so potrebni vhodni podatki o hrapavosti, premeru in koeficientu lokalnih izgub. Lokalni padec tlačnega koeficienta omogoča padec tlaka (kar predstavlja manjše izgube kot kolena, zavoji, T-kosi), da se uvede v cev. Manjše izgube se izračuna s pomočjo hidravlične enačbe:

$$\Delta H = \frac{1}{2} k v^2 \quad (19)$$

kjer je:

$k$  ... konstanta za vsako vrsto opreme,

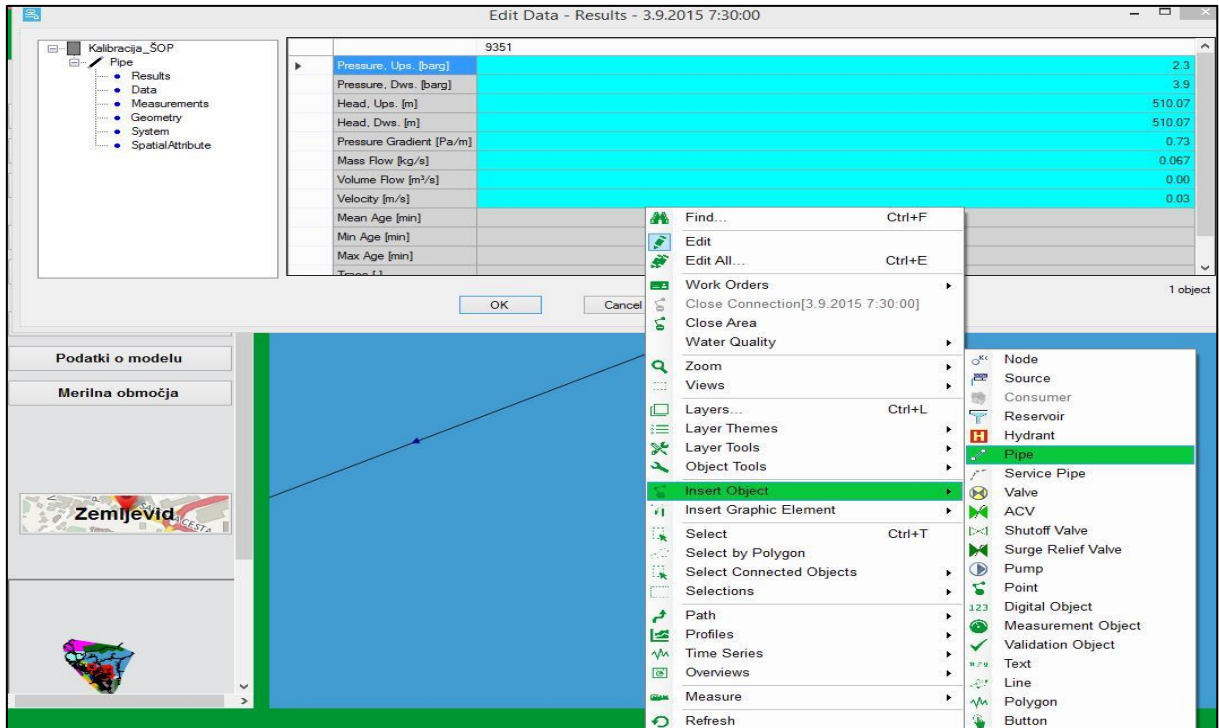
$v$  ... hitrost.

**Tabela 7: Prikaz vhodnih parametrov za model cevi**

ID cevi	Ime cevi.
Notranji premer	Dejanski notranji premer.
Hrapavost	Ključni parameter pri izračunu linijskih izgub s pomočjo Darcy -Weissbahove in Colebrook-Whitove enačbe.
Hazen – Williamsov koeficient C	Ključni parameter pri izračunu linijskih izgub s pomočjo Hazen – Williamsove enačbe.
Koeficient lokalnih izgub – k	Koeficient za izračun lokalnih izgub.
Dolžina	Dolžina cevi.

**Tabela 8: Prikaz rezultatov modela za cevi**

Dol vodni prostorninski pretok	Prostorninski pretok skozi dol vodni del cevi.
Dol vodni masni pretok	Masni pretok skozi dol vodni del cevi.
Tlak gor-vodni	Predstavlja višino tlačne črte v gor vodnem delu cevi, od katere odštejemo višino vozlišča nad primerjalno ravnino.
Tlak dol-vodni	Predstavlja višino tlačne črte v dol vodnem delu cevi, od katere odštejemo višino vozlišča nad primerjalno ravnino.
Gradient tlaka	Sprememba tlaka na določeni razdalji.
Hitrost toka dol vodno	Hitrost toka vode na dol vodnem delu cevi.



Slika 8: Vstavljanje cevi v Aquisu

#### 2.4.2.4 Vodohran

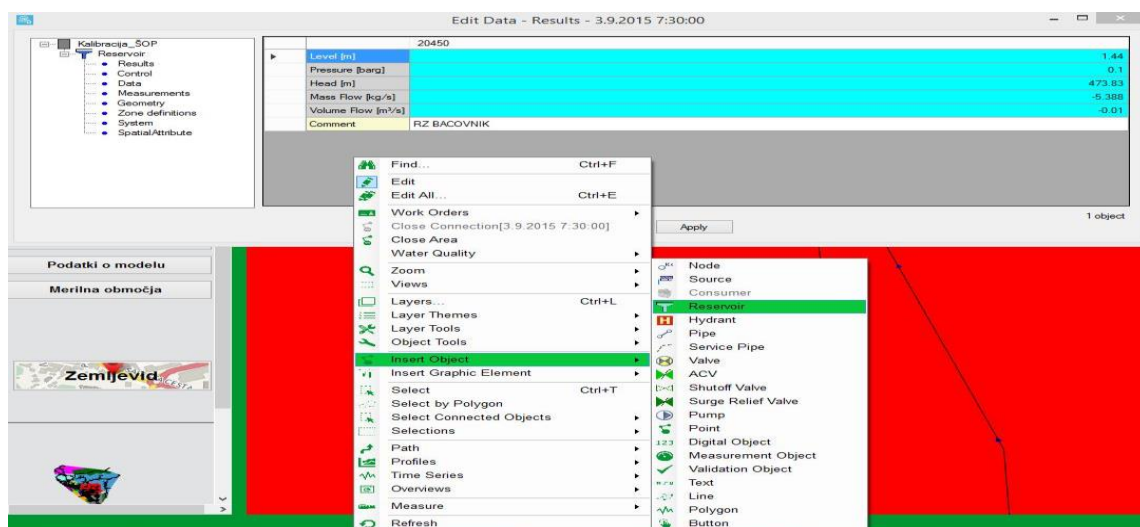
V programu Aquis je vodohran vstavljen kot ločen objekt ali na vrhu vozlišča. Njegova naloga je shranjevanje vode in kritje dnevnega nihanja porabe vode. Najprej je potrebno določiti geometrične attribute, in sicer višino vodohrana ter minimalni in maksimalni nivo vodohrana. V podatkovni skupini maksimalni in minimalni nivoji niso potrebni za zagon modela, lahko pa jih uporabimo za kontrole črpalk in ventilov. Volumenska krivulja nam poda višino vodostaja in volumen vode v vodohranu.

Tabela 9: Prikaz vhodnih parametrov za vodohran

ID vodohrana	Ime vodohrana.
Višina	Oddaljenost priključnega vozlišča od primerjalne ravnine.
Začetni vodostaj	Opisuje nivo vode v vodohranu na začetku simulacije.
Minimalni vodostaj	Prikazana najnižja višina vode v simulaciji.
Maksimalni vodostaj	Prikazana najvišja višine vode v simulaciji.

**Tabela 10: Prikaz rezultatov modela za vodohran**

Prostorninski pretok	Prostornina tekočine, ki priteče iz vodohrana.
Masni pretok	Masa tekočine, ki priteče iz vodohrana.
Tlak	Višina tlačne črte v vodohranu v odvisnosti od zračnega tlaka na dnu vodohrana.
Nivo vode	Izmerjena višina tlačne črte od dna vodohrana.



**Slika 9: Vstavljanje vodohrana v Aquisu**

#### 2.4.2.5 Vir

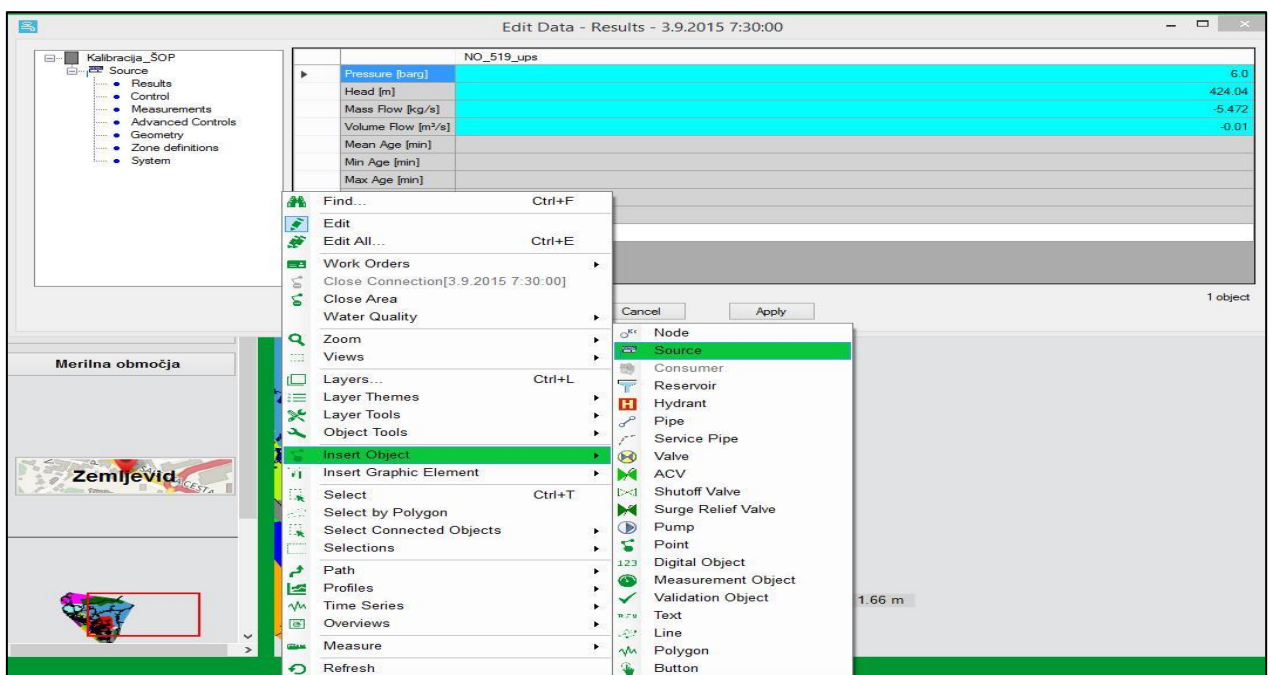
Vir kot objekt v programski opreml Aquis ima dodeljeno točno določeno ikono, da se lahko prepozna, katero vozlišče je vstopno oz. katero pa predstavlja odjemalce. Naloga objekta vir je da predstavlja zalogo vode. Tlak in pretok definirata vir.

**Tabela 11: Vhodni parametri za vir**

ID vira	Ime vira.
Višina (z)	Višina izmerjena nad primerjalno ravnino.
Začetni pretok	Ima negativni predznak, s katerim definira Vtok v sistem.
Začetni tlak	Definira začetni tlak v viru.

**Tabela 12: Prikaz rezultatov za vir**

Tlak	Višina tlačne črte zmanjšana za višino vozlišča nad primerjalno ravnino.
Višina tlačne črte	Izmerjena višina od primerjalne ravnine.
Masni pretok	Masa tekočine, ki v časovni enoti steče skozi vir.
Prostorninski pretok	Prostornina tekočine, ki v časovni enoti steče skozi vir.



**Slika 10: Vstavljanje vira v Aquisu**

#### 2.4.2.6 Vozlišča

Vozlišče ali spoj cevi definirajo točko, v kateri se stikata dve ali več cevi skupaj. Z vozliščem definiramo tudi mesto za vnos oz. odvzem vode v sistem. V Aquisu imajo vozlišča lahko vlogo porabnikov, stičišča cevi brez porabe, virov in točk ohranjanja tlaka.

Kot mejni pogoj se lahko definira tlak ali pretok, torej lahko za eno vozlišče definiramo le enega.

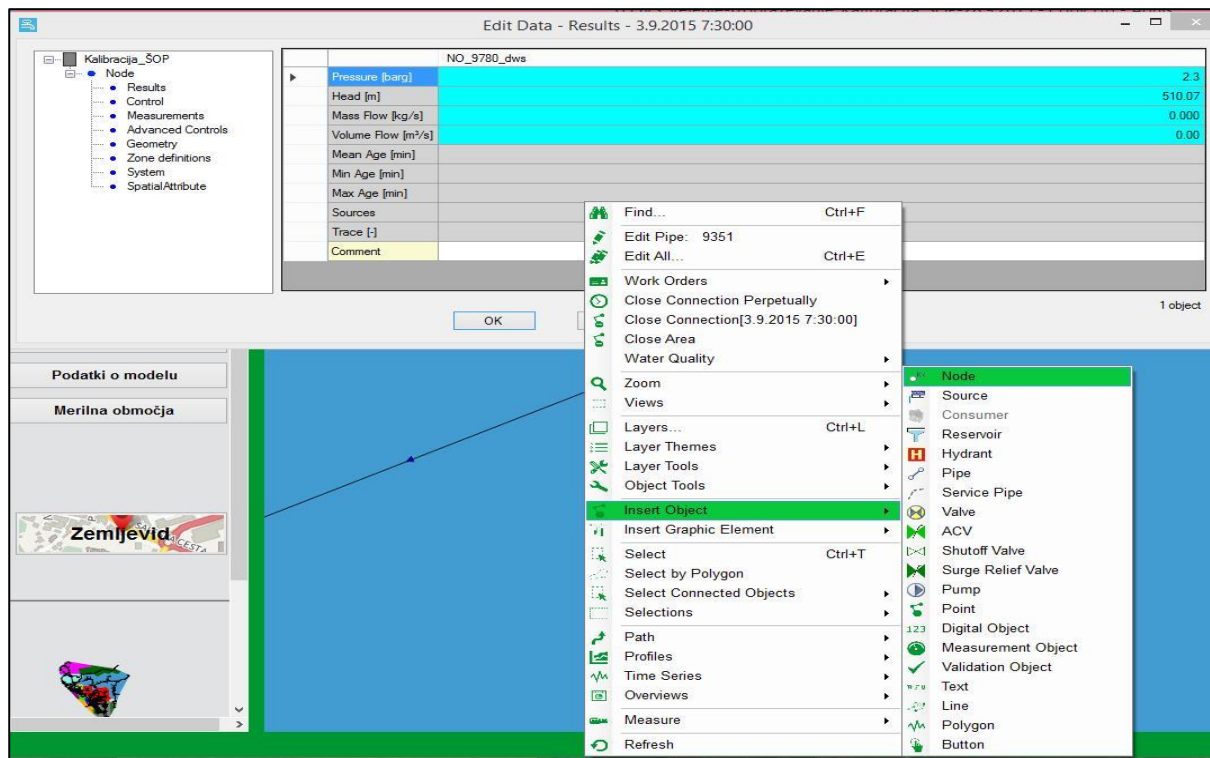
Vozlišče, ki predstavlja vstop v sistem bo imelo za mejni pogoj tlačno polje, pretok bo pa ne znan in s tem izračunan. Začetni pretok omogoča definirati pretok v vozlišču, kjer pozitivna vrednost pomeni porabo in negativna vrednost pa pomeni, da vozlišče predstavlja vir. Pretok je lahko fiksna vrednost, časovna vrsta ali formula.

**Tabela 13: Prikaz vhodnih parametrov za vozlišče**

ID vozlišča	Ime vozlišča.
Višina (z)	Višina izmerjena nad primerjalno ravnino.
Začetni pretok	Definira začetni pretok v vozlišču.
Začetni tlak	Definira začetni tlak v vozlišču.

**Tabela 14: Prikaz rezultatov modela za vozlišče**

Tlak	Višina tlačne črte zmanjšana za višino vozlišča nad primerjalno ravnino.
Višina tlačne črte	Izmerjena višina od primerjalne ravnine.
Masni pretok	Masa tekočine, ki v časovni enoti steče skozi vozlišče.
Prostorninski pretok	Prostornina tekočine, ki v časovni enoti steče skozi vozlišče.



**Slika 11: Vstavljanje vozlišča v Aquisu**

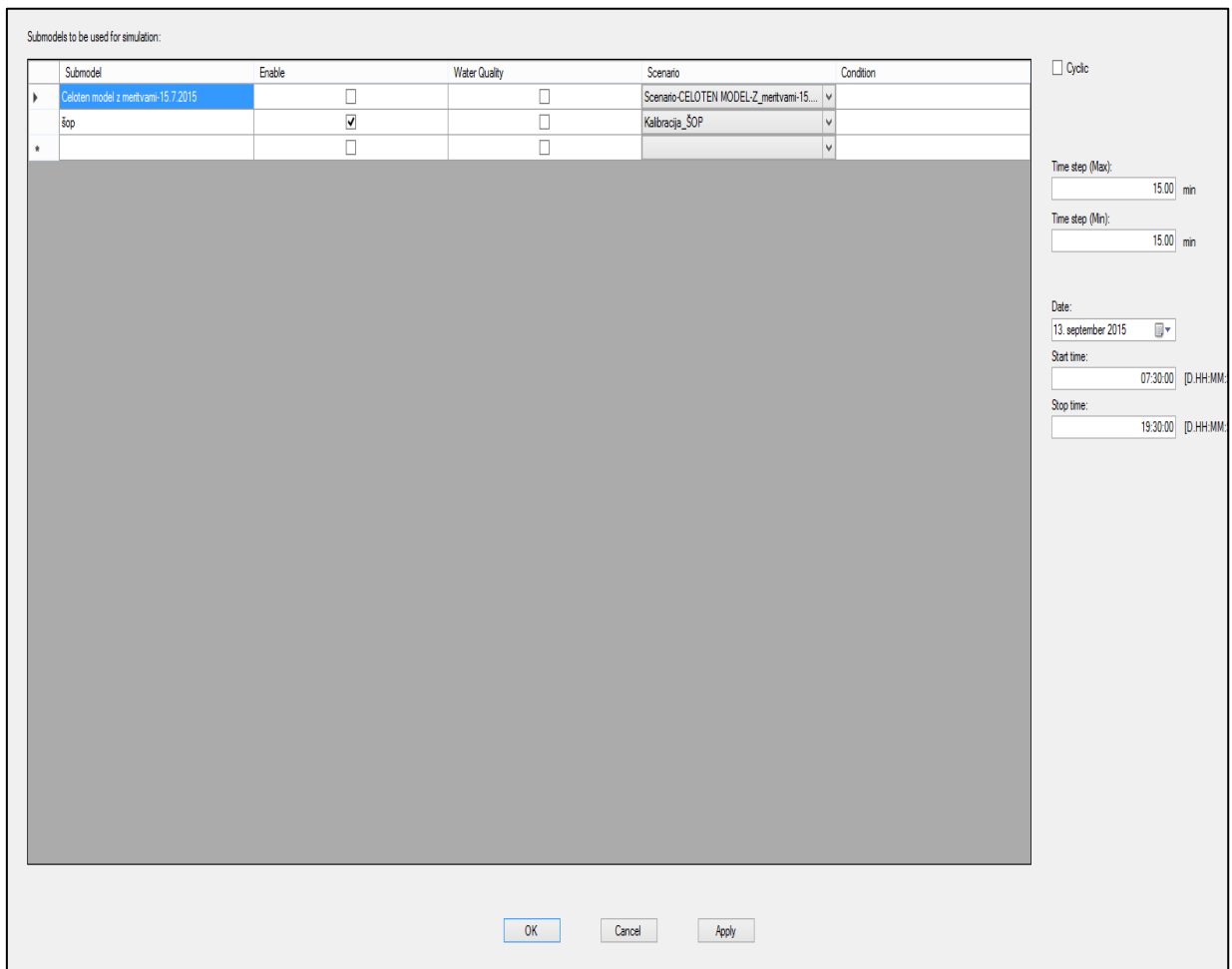


### 2.4.2.7 Simulacija

Po končanem vnosu in definiranju robnih pogojev za vse prisotne elemente vodovodnega sistema, lahko zaženemo simulacijo. Aquis podpira naslednje tipe simulacij:

- Ročna simulacija procesa le v enem koraku. Tudi ko ne deluje v realnem času, simulacija poteka in temelji na spletnih meritvah .
- Ciklična ali avtomatska simulacija poteka v realnem času
- Proces prehodne simulacije (za uporabo potrebna licenca)

Po zaključku simulacije so rezultati lahko prikazani grafično in/ali tabelarično.



**Slika 12: Okno za nastavitve simulacije**

(Schneider Electric, 2012)

### 3 UMERJANJE HIDRAVLIČNIH MODELOV

Hidravlično modeliranje vsebuje več faz, ki se običajno začnejo z vzpostavljanjem neumerjenega hidravličnega modela in oceno hidravličnih parametrov. Da bi vzpostavili umerjen hidravlični model, moramo neumerjen hidravlični model umerjati skozi več faz. Umerjen hidravlični model prikazuje delovanje realnega vodovodnega sistema in omogoča izvedbo natančne analize s področja ocen tveganja ter načrtovanja vodo oskrbe. S pomočjo postopka umerjanja lahko prilagodimo posamezne neznane hidravlične parametre hidravličnega modela tako, da se zmanjšajo razlike med meritvami, ki so opravljene na realnem vodo - oskrbnem sistemu ter napovedmi hidravličnih parametrov modela. (Steinman, Šantl, 2009)

Izraz umerjanje predstavlja veliko postopkov, s katerimi se pri fizičnih in matematičnih modelih zagotovi, da model ponazarja realne razmere v naravi. Na podlagi zbranih meritev na sistemu temelji primerjava modela. Model bo ustrezno simuliral tudi dogodke, ki se še niso zgodili, ko se bo sam model ustrezno odzval na dejanske razmere. Postopek umerjanja je sestavljen iz zbiranja podatkov, umerjanja modela in ocene modela. Da bi zagotovili, da bo kalibracija uspešna, mora število meritev presegati število parametrov, ki so ocenjeni v modelu. Tradicionalno kalibriranje modela z uporabo ročnih procesov je zahtevalo veliko časa. Na področju umerjanja vodovodnega sistema je bilo razvitih več postopkov in metod, ki jih v splošnem delimo na metodo poskus-napaka (trial error method) ter na izrecne in posredne metode. Za zelo učinkovite so se izkazale formulirane posredne metode umerjanja, ki jih lahko rešimo kot optimizacijski problem. Ciljna funkcija je navadno prikazana v obliki, ki omogoča znižanje razlik med meritvami in rezultati modela. Razvoj optimizacijskih modelov za umerjanje je ogromno pripomogel k večji natančnosti hidravličnega modela vodovodnega sistema. Merila natančnosti napovedovanja hidravličnih veličin se nahajajo v različnih smernicah, v katerih so določene meje odstopanj med meritvami in rezultati modela v namene analiz hidravličnega modela. (Banovec in sod., 2006)

#### 3.1 Makrokalibracija

Makrokalibracija predstavlja prvo fazo umerjanja, kjer se odpravijo topološke napake v podatkovnih bazah ter geometrijske napake. Predstavlja tako imenovano »grob« umerjanje. Postopek makrokalibracije zajema predvsem način zagotavljanja med topološko in geometrijsko enakostjo v primerjavi z matematičnim modelom in dejanskimi elementi vodovodnega sistema. (Steinman, Šantl, 2009)

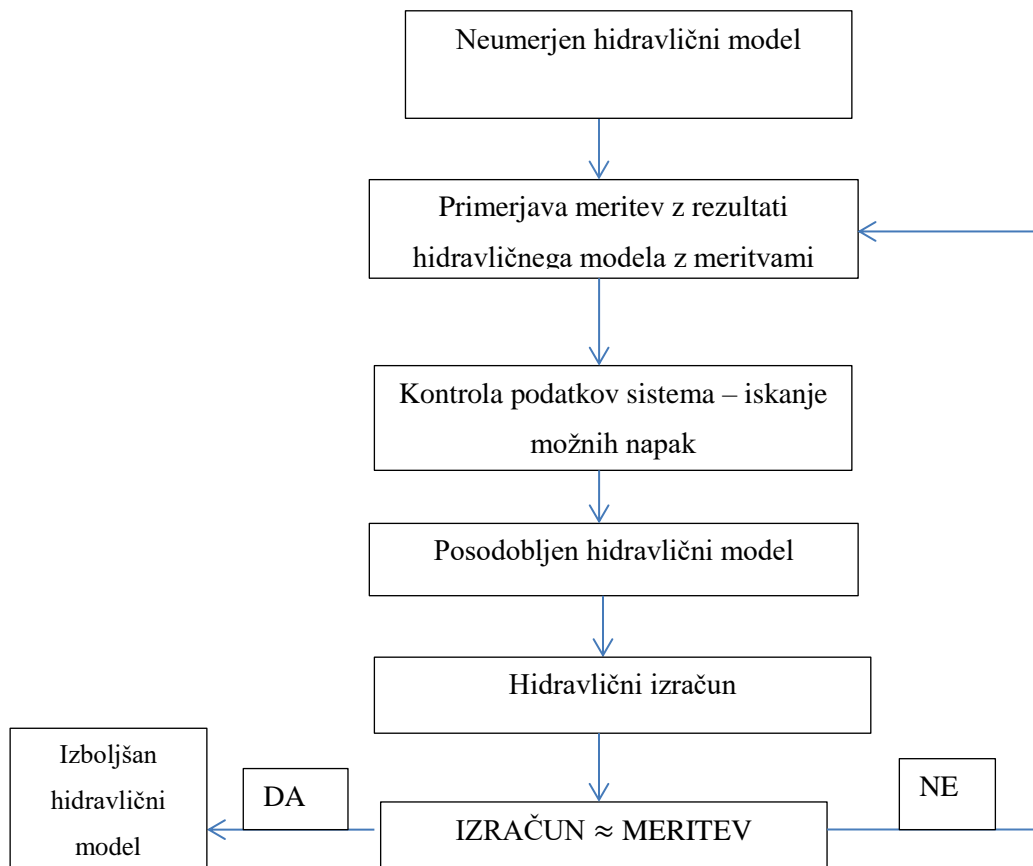
Na samem začetku postopka je potrebno odpraviti grobe napake (Perez, 2003):

- napačno nastavljanje atributov objektov (črpalna krivulja, premer cevi...),
- napačno topologijo sistema (kote vozlišč, povezanost sistema, ...),

– napačne robne pogoje (kote vode v vodohranih, karte zajetij, delovanje ventila, ...).

Pri makrokalibraciji je zaradi izločitve nekonsistentnosti potrebno določiti prioriteto preverjanja posameznih elementov, in sicer:

1. preveritev pravilne povezanosti cevovoda,
2. porazdelitev porabe vode kot elementa obtežbe oz. alokacija
3. preveritev glavnih oskrbovalnih objektov (vodni viri, vodohrani in črpališča), ki zagotavljajo energijski in količinski potencial (tlačna razlika pri različnih pretokih),
4. preveritev elementov, ki prevajajo, tj. zapornih elementov in vodov (cevi in ventili), ki zagotavljajo redukcijo energijskega in količinskega potenciala in transport vode,
5. preveritev atributov samih vozlišč kot nosilcev obtežbe (poraba vode, kote)
6. preveritev pravil obratovanja z objekti.



Shema 1: Primer procesa izvajanja makrokalibracije (Steinman, Šantl, 2009)

Shema 1 prikazuje postopek izvajanja makrokalibracije, kjer se lahko izračun približa meritvi in s tem pridobimo izboljššan hidravlični model, oz. se izračun ne približa vrednosti meritev in je treba postopek ponoviti.

**Tabela 15: Prikaz možnih napak, ki se lahko pojavijo za elemente hidravličnega modela VS**

Element	Napaka
Vozlišča	Topografija (karta, lokacija) Poraba
Cevi	Povezanost z omrežjem in objekti Premer Hrapavost
Ventili	Nastavitve redukcije, odpiranja Smer delovanja Kota izhodiščne točke
Vodohrani	Topografija (kota, lokacija) Prostornina
Črpališča	Črpalna krivulja Kota izhodiščne točke (vozlišče, vodnjak)
Vodni viri	Topografija (kota, lokacija) Nihanje gladine (zajetje, vodnjak)

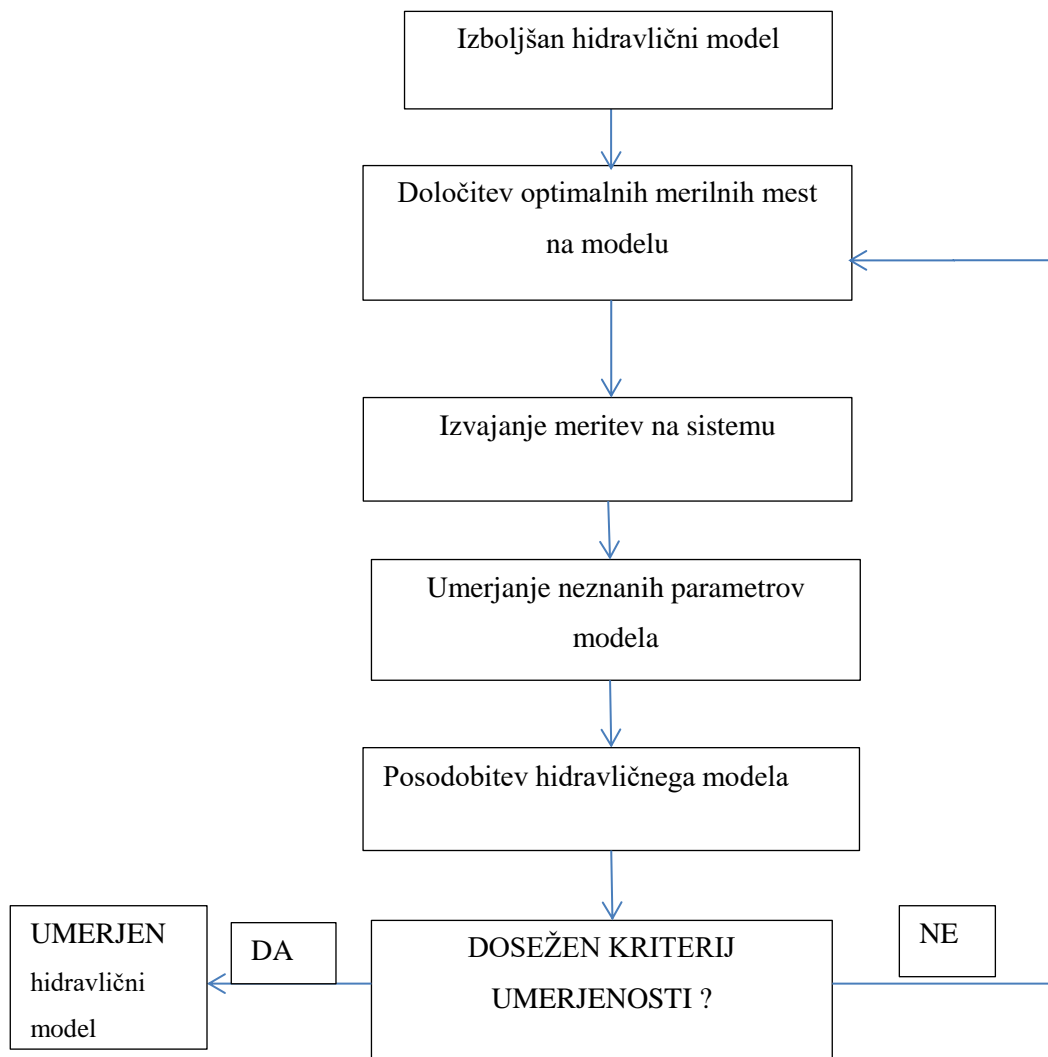
(Steinman, Šantl, 2009)

### 3.2 Mikrokalibracija

Ko je doseženo določeno ujemanje med izračuni in meritvami, tako da so odpravljene vse topološke in geometrijske napake, lahko preidemo v drugo fazo umerjanja, in sicer v mikrokalibracijo.

Mikrokalibracija predstavlja drugo fazo umerjanja hidravličnih parametrov koeficienta hrapavosti cevi, porazdelitev porabe po sistemu. Predstavlja tako imenovano fino umerjanje. Postopek mikrokalibracije zajema pravilno določitev hidravličnih parametrov. Osredotoči se predvsem na določitev hrapavosti cevi in porabo v vozliščih. Priporočljivo je izvesti analizo občutljivosti hidravličnega modela pred samo mikrokalibracijo, in sicer s pomočjo postopnega variriranja parametrov modela ter primerjave med že dobljenimi rezultati. S pomočjo občutljivostne analize se lahko določijo hidravlični parametri, kateri se bodo v samem postopku mikrokalibracije določili za umerjanje. Za izvedbo analize občutljivosti pri optimalnem izboru merilnih mest hidravličnega modela se uporablja postopek mikrokalibracije. Postopek mikrokalibracije zagotavlja reprezentativne vzorce

meritev, s katerimi lahko umerimo hidravlični model zelo natančno ob pogoju, da stroški izvajanja meritev ne bodo previsoki. (Steinman, Šantl, 2009, Šantl, 2007)



Shema 2: Primer procesa izvajanja mikrokalibracije (Steinman, Šantl, 2009)

Shema 2 prikazuje postopek mikrokalibracije, kjer v primeru, da dobimo umerjen hidravlični model mora biti izpolnjen kriterij umerjenosti, v nasprotnem primeru torej, če kriterij umerjenosti ni izpolnjen je potrebno ponoviti izbor optimalnih merilnih mest na modelu in postopek ponoviti.

### 3.3 Osnovni standardi umerjanja

Umerjanje modela je zaželeno, da poteka v dveh fazah. Namen prve faze je, da se opravi obširna študija realnega modela in se zagotovijo razumni podatki ter postavijo predpostavke. Najbolj pogoste napake se pojavljajo pri zahtevani porabi in koeficientu hrapavosti, saj je poraba zelo spremenljiva v kratkem časovnem obdobju, koeficient hrapavosti pa se s časom spreminja in ni neposredno merljiv. Namen druge faze umerjanja modela je, da se prilagodijo posamezni parametri v modelu. Da bi bilo umerjanje uspešno, je najprej potrebno zbrati niz meritev, katere se pridobijo s pomočjo zbiranja podatkov o hidravličnih veličinah pri obratovanju na izbranih mestih na vodo – oskrbnem sistemu. Na natančnost umerjanja hidravličnega modela vpliva kakovost pridobljenih informacij iz meritev. Večjo stopnjo zaupanja v model pa pripomore večje število informacij. (Steinamn, Šantl, 2009)

#### 3.3.1 Analiza sistema

Umerjeni model predstavlja osnovo za spremljanje in analiziranje dane situacije. Izvajanje simulacij dejanskega stanja raznih obtežbenih in obratovalnih stanj, lahko opravimo z umerjanjem hidravličnega modela. Hidravlično obnašanje sistema lahko opazujemo s pomočjo spreminjanja hidravličnih parametrov ter vključitvijo novih elementov in povezav. S pomočjo hidravličnega modela vodovodnega sistema lahko posredno ugotavljamo izpolnjevanje robnih pogojev (pravni, tehnični in ekonomski vidiki) in s tem analiziramo vodovodni sistem. Razsežnosti opravljenih analiz so odvisne od različnih namenov, kjer v odvisnosti od namena preverjamo več različnih parametrov, in sicer:

- tlaki v vozliščih,
- energijske izgube v odvisnosti od hitrosti vode v ceveh,
- stroški obratovanja, ki so sestavljeni iz energijskih in obratovalnih stroškov.

Pod optimizirane spremenljivke štejemo povečano število cevi, nastavitve črpalk, kote vodohranov. Z večanjem le teh se prav tako eksponentno veča število možnih rešitev ter število lokalnih optimalnih rešitev. Vsak optimizacijski primer je sam za sebe drugačen od predhodnega in s tem je tudi težko izbrati deterministični pristop.

Genetski algoritmi spadajo pod nedeterministične metode, ki so se na področju umerjanja hidravličnih modelov vodo-oskrbnih sistemov bolj uveljavile od pristopa „poizkus – napaka“, ki je zelo počasen in nezanesljiv. Uporaba genetskih algoritmov se je na področju umerjanja hidravličnih modelov vodo-oskrbnih sistemov izkazala za dosti bolj učinkovito na različnih področjih, kot so umerjanje, coniranje, obratovanje vodooskrbnih sistemov ter iskanje optimalne rešitve za dimenzioniranje cevovoda. (Šantl, 2007)

### 3.4 Enačbe za izračun hidravličnih veličin v programski opremi Aquis

V programski opremi Aquis sta med pomembnejšimi izračuni izračun spremembe tlaka ( $\Delta P$ ) in izračun korekcijskega faktorja ( $f$ ).

Skupno spremembo tlaka ( $\Delta P$ ) v ceveh predstavlja vsota izgub zaradi trenja, spremembe višine in lokalnih izgub. Lokalni koeficient spremembe tlaka omogoča sprememba tlaka v fazonskih kosih kot dodatkih na ceveh, kjer so izgube manjše. Manjše izgube se izračunajo s pomočjo standardne hidravlične enačbe (19).

Skupek vseh vrednosti  $k$  na cevi se vpiše kot lokalni koeficient spremembe tlaka, če je v uporabi. Izkušnje kažejo, da ni možno ugotoviti kako zelo posamezni faktorji hrapavosti, premera in lokalnega tlačnega padca v praksi prispevajo k izmerjeni spremembi tlaka v cevi. V ceveh se faktor uporablja, kjer je znano, da lokalna sprememba tlaka ima vpliv. Podatki kot to so tlačni razred, leto vgradnje, material, obloge in premer se pri simulaciji ne uporabljajo. Ti podatki se lahko uporabijo kot filter in se uporabijo v formulah za hrapavost. Sprememba tlaka ( $\Delta P$ ) se izračuna s pomočjo Colebrook – Whiteove enačbe.

Colebrook – Whiteova enačba za izračun spremembe tlaka ( $\Delta P$ ) (Schneider Electric, 2012):

$$\Delta P = -\rho \frac{2\phi}{D} |V| VL + g(Z_D - Z_U)\rho - \frac{1}{2}\zeta\rho \dot{M}/V \quad (20)$$

kjer je:

$\Delta P$  ... sprememba tlaka,

$\rho$  ... gostota tekočine v cevi,

$L$  ... dolžina cevi,

$\phi$  ... korekcijski faktor,

$D$  ... notranji premer cevi,

$Z_D$ ... dolvodna višina,

$Z_U$  ... gorvodna višina,

$\zeta$ ... koeficient lokalne izgube tlaka,

$V$  ... hitrost,

$g$  ... gravitacijski pospešek.

Aquis v zgornjo enačbo vpelje korekcijski faktor ( $\phi$ ), ki nadomešča Colebrook – White-ov faktor trenja ( $f$ ). Pri postopku kalibracije Aquis v bistvu spreminja vrednost korekcijskega faktorja ( $\phi$ ) toliko časa, da se izračunane vrednosti približajo vrednostim merjenih rezultatov. Razlog za vpeljavo korekcijskega faktorja je v tem, da se nam odstopanja med meritvami in izračunom pojavijo zaradi razlike med dejanskimi in predpostavljenimi hidravličnimi razmerami. V realnem sistemu je skoraj nemogoče zagotoviti povsem točne podatke o hrapavosti cevi, pretoku in dejanski legi cevi. Saj se v realen sistem s časom spreminja in bi za natančno posnemanje vseh lastnosti potrebovali ogromno meritev, kar je skoraj nemogoče zagotoviti.

Koeficient trenja izračunan s pomočjo Colebrook - Whiteove enačbe, ki je podobna enačbi (15), le da Aquis ima z drugo oznako označuje koeficient trenja ( $f$ ) ter za hrapavost stene ( $k$ ).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log_{10} \left( \frac{k}{3.7 D} + \frac{1.413}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (21)$$

kjer je:

$k$  ... hrapavost stene cevi (za nove (gladke) cevi je določen koeficient hrapavosti 0,05mm),

$Re$  ... Reynoldsovo število,

$V$  ... hitrost,

$D$  ... notranji premer cevi,

$f$  ... faktor trenja.

Za manjša Reynoldsova števila ( $< 2300$ ), je faktor trenja določen s formulo:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (22)$$

### 3.4.1 Korekcijski faktor

Umerjanje ali kalibracija je postopek umerjanja hidravličnih parametrov. Osnovano je na podlagi primerjav meritev iz vodovodnega omrežja in rezultati simulacij, izvedenih s programskim orodjem Aquis, v istem časovnem obdobju. Umerjanje predstavlja več faz, ki v določenih pogojih postavljajo razmerje med izmerjenimi vrednostmi ter v programskem orodju izračunanimi vrednostmi. V



programu Aquis se umerjanje izvaja med dvema vozliščema, tako da se naredi primerjava poti med dvema vozliščema. Kot rezultat umerjanja dobimo korekcijski faktor, ki se zapiše k cevi na kalibracijski poti. Umerjanje ne upošteva prisotnost ventilov ali črpalk. Korekcijski faktor za pot se izračuna kot dejavnik, ki se pomnoži s faktorjem izgub tlaka oz. kalibracijskim tlakom. Korekcijski faktor se izračuna na podlagi naslednje formule:

$$\phi = \frac{\Delta X_{\text{Measured}}}{\Delta X_{\text{Simulated}}} \quad (23)$$

kjer je:

$\phi$  ... korekcijski faktor,

$\Delta X_{\text{Measured}}$  ... merjena sprememba tlaka zaradi trenja,

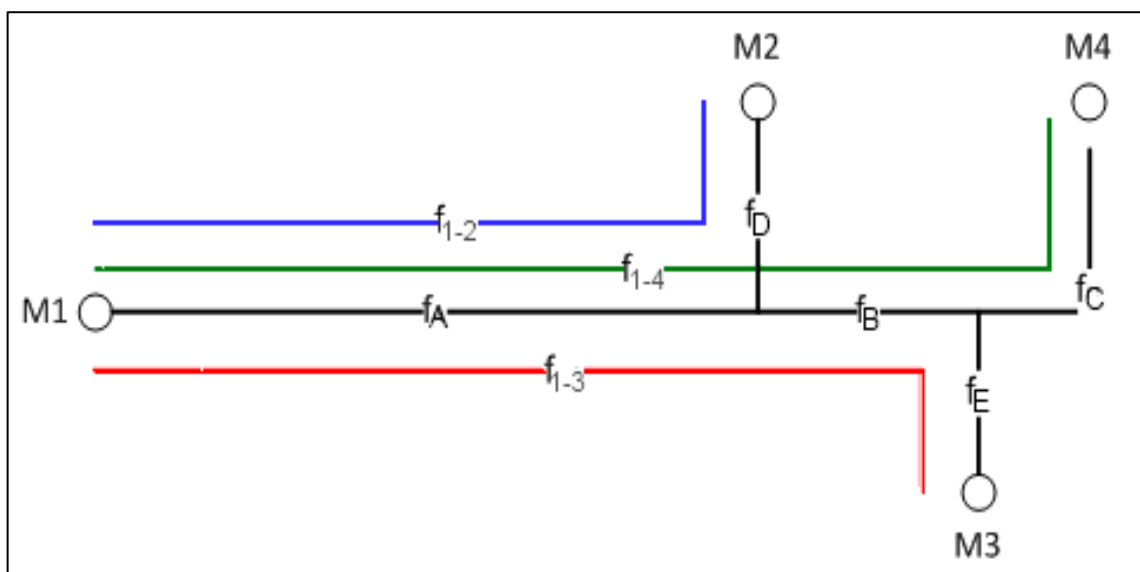
$\Delta X_{\text{Simulated}}$  ... simulirana sprememba tlaka zaradi trenja.

V primeru, da se prekriva več kalibracijskih poti, ne moremo uporabiti korekcijskega faktorja na splošno. V tem primeru, poteka umerjanje kot je prikazano na sliki 13.

Slika 13 prikazuje:

$f_{i-j}$ : faktorji, ki so povezani s potmi.

$f_k$ : faktorji, ki so povezani z določenimi odseki poti.



Slika 13: Prekrivanje kalibracijskih poti (Schneider Electric, 2012)

Postopek umerjanja za določeno pot lahko večkrat ponovimo, dokler rezultati ne ustrezajo danim kriterijem. Izračunane faktorje lahko pretvorimo kot popravek za fizikalne lastnosti cevi. Takšen popravek tlaka lahko prenesemo v:

- premer,
- hrapavost,
- lokalno izgubo,
- pretok.

Ta način umerjanja omogoča, da se uporabijo različna časovna obdobja za različne poti v istem modelu. Drugi korak umerjanja oz. pretvorbe pa uporabniku omogoča, da posodobi določene fizikalne parametre, ki ponazarjajo dejansko stanje v mreži. (Schneider Electric, 2012)

Calibration Pressure														
Mea1	Avg Value [bar]	Node1	Avg Value [bar]	Mea2	Avg Value [bar]	Node2	Avg Value [bar]	Distance [m]	$\Delta$ Head Mea [bar]	$\Delta$ Head Calc [bar]	Difference [bar]	Correction Factor [%]	Start	Dev
JA_Rudnik-SMP_izhodni_tlak_KO-1	5.84	NO_519_ups	5.83	JA_Gorenje-SMP_vhodni_tlak_KO-5	9.97	NO_12239	9.96	6316.91	-0.14	-0.14	0.00	0.00	0.98	10628
JA_Gorenje-SMP_vhodni_tlak_KO-5	9.97	NO_12239	9.96	JA_Smartno-SMP_vhodni_tlak_RKO-7	10.05	NO_3053_ups	10.04	1786.32	-0.10	-0.10	0.00	0.00	1.00	9840
JA_Gorenje-SMP_vhodni_tlak_KO-5	9.97	NO_12239	9.96	JA_Gavce-SMP_vhodni_tlak_KO-6	9.68	NO_3131	9.67	872.20	-0.01	-0.01	0.00	0.00	0.83	10888
JA_Smartno-SMP_izhodni_tlak_RKO-7	5.38	NO_3053	5.38	JA_Recica_1_vhodni_tlak	5.68	NO_408	5.69	556.44	-0.11	-0.10	-0.01	0.00	1.08	23732
JA_Recica_5_izhodni_tlak_1	5.48	NO_10877_dws	5.20	JA_Recica_3_izhodni_tlak	4.65	NO_10629_ups	5.63	1368.99	-1.27	-0.01	-1.26	138.28	4858	
JA_Recica_1_vhodni_tlak	5.68	NO_408	5.69	JA_Recica_2_vhodni_tlak	5.46	NO_399	5.50	384.92	-0.06	-0.02	-0.03	2.49	2419	
JA_Recica_2_vhodni_tlak	5.46	NO_399	5.50	JA_Recica_3_vhodni_tlak	6.21	NO_10629	6.25	1071.13	-0.01	-0.01	0.00	0.92	23822	
JA_Recica_3_vhodni_tlak	6.21	NO_10629	6.25	CP_Podgora_Tlak_Dovod	2.90	NO_3741	2.87	1125.04	0.03	-0.04	0.07	-0.98	2789	
JA_Gorenje-SMP_izhodni_tlak_KO-5	4.56	NO_12239_dws	4.56	jPaskaVas_Tlak	5.29	NO_3349	5.36	342.21	-0.09	-0.01	-0.08	10.92	14562	
JA_Recica_1_izhodni_tlak	5.42	NO_408_dws	5.00	JA_Recica_4_izhodni_tlak	5.43	NO_12083_dws	5.05	319.17	-0.05	0.00	-0.05	32.12	16868	
JA_Recica_1_vhodni_tlak	5.68	NO_408	5.69	JA_Recica_4_vhodni_tlak	5.82	NO_12083	5.72	318.28	0.10	-0.01	0.11	-6.68	23962	

Adjust Factors      Calculate      OK      Cancel

Slika 14: Prikaz vnašanja kalibracijskih poti ter dobljenih rezultatov v Aquisu

#### 4 VODOVODNI SISTEM ŠMARTNO OB PAKI

V tem poglavju je predstavljen vodovodni sistem Šmartno ob Paki. Predstavljena je zgodovina samega sistema, katere začetek sega v leto 1964. Opisano je omrežje, ki je nastalo leta 2014, in sicer ko se je omrežje priključilo na glavni cevovod Šoštanj – Velenje ter območja oskrbe. V podpoglavjih je opisano stanje omrežja pred priključitvijo ter po priključitvi.

##### 4.1 Območje oskrbe s pitno vodo

Občina Šmartno ob Paki je manjša občina in je del savinjske statistične regije, ki je nastala na stičišču treh dolin: Šaleške ter Zgornje in Spodnje Savinjske doline. Njena površina meri 18,2 km<sup>2</sup> in po svoji površini se uvršča na 203. mesto med slovenskimi občinami. Občina Šmartno ob Paki je bila ustanovljena leta 1994. Središče občine Šmartnega ob Paki leži na nadmorski višini 313m. Sestavlja jo približno 1000 gospodinjstev, katero šteje 3232 prebivalcev. V tabeli 18 je prikaz desetih naselij, ki sestavljajo občino Šmartno ob Paki.

**Tabela 16: Prikaz naselij in število prebivalcev v občini Šmartno ob Paki**

IME NASELJA	ŠT. PREBIVALCEV	Št. prebivalcev*
GAVCE	391	391
GORENJE	168	76
MALI VRH	387	356
PAŠKA VAS	233	226
PODGORA	265	188
REČICA OB PAKI	511	305
SKORNO	223	172
SLATINA	247	56
ŠMARTNO OB PAKI	659	659
VELIKI VRH	278	275

\*št. prebivalcev, ki se s pitno vodo oskrbujejo v okviru javne službe

<http://www.smartnoobpaki.si/predstavitev/demografski-podatki> (Pridobljeno 8.10.2015.), (Komunalno podjetje Velenje, 2009)

##### 4.2 Zgodovinski oris vodovodnega sistema Šmartno ob Paki

Do leta 1964 so se v naseljih Šmartno ob Paki, Paški vasi in Gorenju oskrbovali s pitno vodo iz podtalnice in kopalnih vodnjakov. V ostalih naseljih: Podgora, Gavce, Slatina. Mali Vrh in Skorno so bile razmere slabše, kjer so po večini uporabljali kapnico. Prva razmišljanja o izgradnji vodovodnega omrežja so se utrnili leta 1959, ko se je začela izgradnja osnovne šole in širitev podjetja VINO. V Šmartnem ob Paki se je zgradil prvi vodohran s prostornino 100 m<sup>3</sup> ter črpališče. Posledica razdrtja

zajezitev na reki Paki je bila, da so skoraj povsod ostali brez vode, saj je nivo podtalnice v Rečici zelo upadel. Leta 1965 so krajani z udarniškim delom pripeljali vodovod iz Šmartnega ob Paki v Rečico, nato pa še v Paško vas, v spodnje Gavce in Gorenje. Sledila je izgradnja vodovoda z dvakratnim prečrpavanjem in vodohrana prostornine 100 m<sup>3</sup> na Velikem Vrhu. S to pridobitvijo so lahko z vodo oskrbeli tudi Mali Vrh, Veliki Vrh, in Gavce. Zaradi prekomerne porabe iz črpališča Šmartno ob Paki, se je Komunalno podjetje Velenje, ki je upravljavec vodovodnega omrežja, odločilo za izgradnjo novega vodohrana s prostornino 250 m<sup>3</sup> in črpališča v Rečici in leta 1994 povezali oba vodovoda s cevovodom. Novo nastali cevovod imenovan Šmartno ob Paki je oskrboval: Gorenje, Paško vas, Podgoro, Gavce, Veliki Vrh, Mali Vrh, , Rečico ob Paki in Skorno, Šmartno ob Paki. (Komunalno podjetje Velenje, 2009)

#### **4.3 Vodovodno omrežje Šmartno ob Paki do priključitve na centralni vodovod Šoštanj – Velenje**

V letu 2014 se je spremenilo delovanje vodovodnega sistema Šmartno ob Paki. Zaradi problematike vodo - oskrbe s pitno vodo v občini Šmartno ob Paki je upravljavec izvedel priključitev obstoječega omrežja na centralni vodovodni sistem Šoštanj – Velenje, ki se napaja iz vodnega vira Ljubija. Problematika vodovodnega omrežja Šmartno ob Paki pred navezavo na centralni sistem Šoštanj – Velenje, je bila v nižji učinkovitosti in visokih stroških obratovanja sistema. Problematika se je pokazala tudi pri vodnih virih Šmartnega ob Paki, ki so postali nezadostni in vodna kakovost je bila dokaj nizka. Nizka kakovost vodnih virov je bila posledica prekomernega onesnaževanja pitne vode zaradi uporabe pesticidov, prav tako pa so bile prekoračene dovoljene mejne vrednosti nitratov v vodi. Sama izdatnost vodnih virov v poletnih mesecih (sušna obdobja) je bila prenizka in so količine načrpane vode komaj zadostovale potrebam.

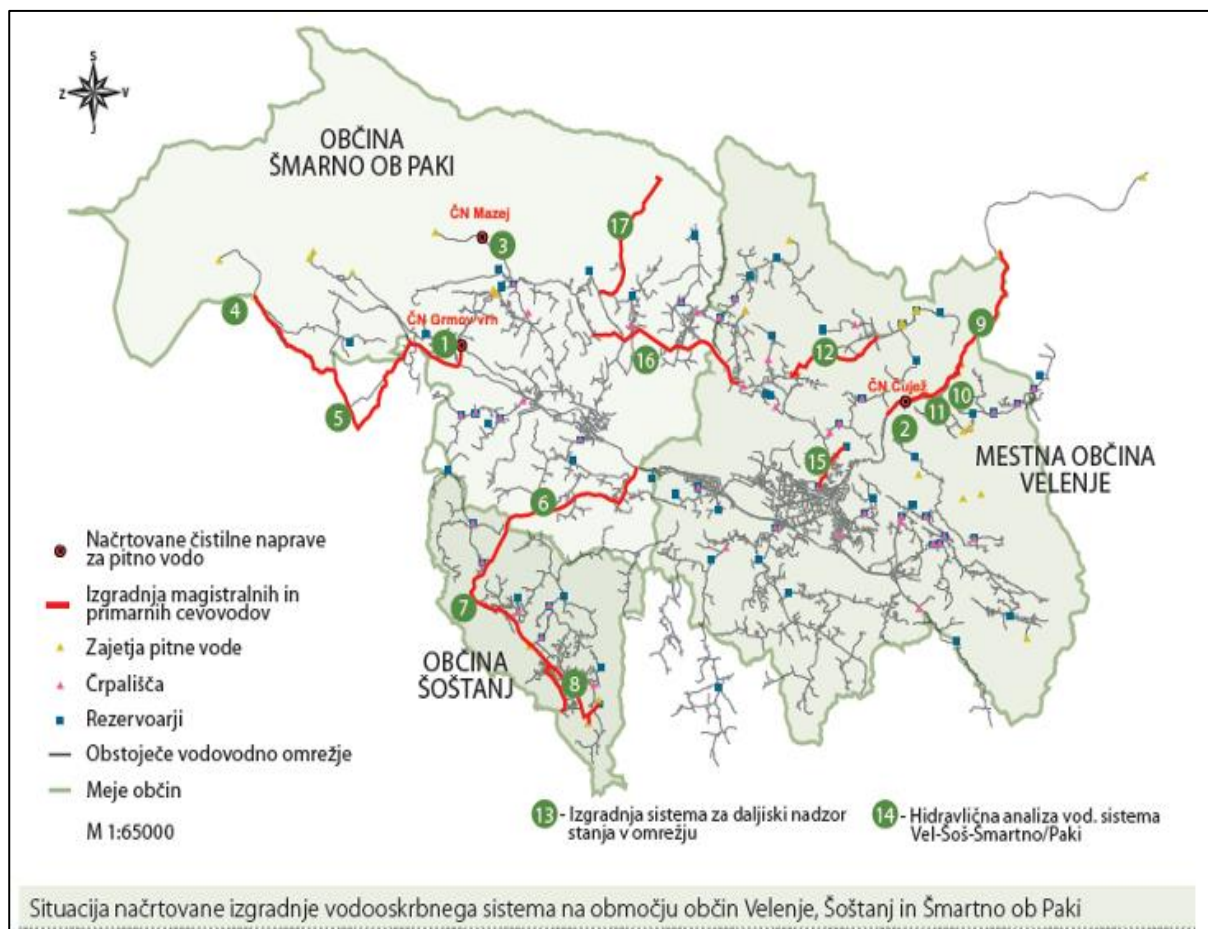
#### **4.4 Navezava vodovodnega sistema Šmartno ob Paki na centralni sistem Šoštanj – Velenje**

Glede na to, da so se vodni viri pri vodo-oskrbnem sistemu Šmartno ob Paki bili izpostavljeni okolici, katera je povzročala škodo le tem in posledično uporabnikom, je nastala potreba po dodatnih virih pitne vode za kvalitetno in zadostno oskrbo tamkajšnjih uporabnikov. Izgradnja povezovalnega cevovoda se je pričela leta 2014 s priključitvijo novega cevovoda na magistralni cevovod v Prelogah pri Šoštanju, trasa nato nadaljuje 400 m vzdolž lokalne ceste in prečka naselje Lokovica do Šaleške magistrale. Na križišču Šaleške magistrale je speljano naprej s podvrtanjem cestišča in od tu naprej poteka povezovalni cevovod tik ob cestišču proti Šmartnemu ob Paki. Cevovod prečka obstoječo železnico in reko Pako, tako da je cevovod obešen na mostno konstrukcijo in ustrezno izoliran. Na ta način se gravitacijsko oskrbuje veliki del obravnavanega območja.



**Slika 15: Del trase povezovalnega cevovoda Šmartno ob Paki (obešanje na mostno konstrukcijo)**

Izgradnja povezovalnega in obnova obstoječega vodovoda sta potekali v dveh delih. V prvem delu je na centralni cevovod Šoštanj – Velenje (DN 500 mm) priključil povezovalni cevovod dolžine 6237 m, (duktil DN 200 mm) do obstoječega vodovoda (DN 100 mm) v vasi Gorenje. Predelala se je vodna armatura iz razloga, da je obstoječi vodohran postal proti ležni ter tako zagotovil akumulacijo za vodovodno omrežje Šmartno ob Paki do izgradnje načrtovane akumulacije na Grmovem vrhu. V drugem delu je potekalo nadaljevanje povezovalnega cevovoda, dolžine 1904 m (duktil DN 200 mm), in sicer od vasi Gorenje do povezave na obstoječi cevovod (DN 160 mm) v Šmartnem ob Paki. Potekala je tudi izgradnja tlačno regulacijskega jaška z navezavami na obstoječe dovode in odvode za vodohran Šmartno ob Paki in vodohran Rečica z možnostjo vključevanja obstoječega črpališča Šmartno ob Paki v sistem oskrbe z vodo. V drugi fazi je prav tako potekala tudi izgradnja dodatne postaje za dezinfekcijo vode s plinskim klorom in izgradnja priključitve cevovoda Gavce dolžine 118 m (duktil DN 100 mm). (Komunalno podjetje Velenje, 2007)



**Slika 16: Situacija načrtovane izgradnje vodooskrbnega sistema na območju občin Velenje, Šoštanj in Šmartno ob Paki (Komunalno podjetje Velenje, 2009)**

Poleg povezovalnega cevovoda, sta zgrajena še dodatna dva nova cevovoda, z namenom dobave zadostne količine pitne vode do novih porabnikov, zaradi predvidenega povečanja gostote prebivalstva. Prvi cevovod se je po svoji celotni dolžini priključil na obstoječe cevovode na šestih mestih. Predstavlja rešitev za širitev vodovodnega sistema v smeri naselja Polzela. Cevovod je sestavljen iz duktilnih cevi z notranjo cementno prevleko premera 150 mm in meri v dolžino 2204 m. Začne se pri vodarni Šmartno ob Paki, kjer je priključen na povezovalni cevovod, nato pot nadaljuje proti vodarni Rečica, kjer se nov cevovod priključi na obstoječi vod. Drugi cevovod predstavlja rešitev za predvideno širitev vodovodnega sistema v smeri naselij Braslovč in Letuša. Zgrajen je iz duktilnih cevi z notranjo cementno prevleko premera 150 mm in meri v dolžino 1010 m. Začne se od centra naselja Šmartno ob Paki, kjer se priključi na obstoječ vod premera 150 mm do mostu čez reko Pako. (Komunalno podjetje Velenje, 2007, 2010)

## 4.5 Lastnosti vodnega vira, črpališč, vodohranov in cevi

### 4.5.1 Vodni vir

Rečica Ljubija se nad samim izvirom Ljubija na severno-vzhodnem robu planote Golte združi s Kramarico in skupaj tečeta v smeri Mozirja v reko Savinjo. Izvir se nahaja na višini 720 m, kjer se voda pojavlja iz tolmana, ki je zasut s podornim skalovjem in je odprtega tipa. Zajetje Ljubija je bilo zgrajeno leta 1983 in se nahaja cca. 100 m nižje od izvira. Rekonstrukcija le tega je bila izvedena leta 2014 v okviru izvedbe kohezijskega projekta Celovita oskrba s pitno vodo v Šaleški dolini, kjer so bile določene tudi vodovarstvene cone. Skupno zaledje izvira meri 9m<sup>2</sup>, kjer padavinsko zaledje znaša okoli 8 m<sup>2</sup>. Neposredna zaščita zajema ob samem zajetju prostor v izmeri od 100 – 150 m, kateri je tudi ograjen. V prvo vodovarstveno cono spada območje Julijskega grabna med Konečkimi pečinami in Brložskimi ter seže do ravnice pod Leskovškovo kmetijo, kjer pod apneno pečino ponikuje del potokov s pobočij pod Mršnim vrhom, Vranjim in Črnim vrhom. Prav tako je v prvo cono uvrščeno območje Zaloke, saj voda, ki ponikuje na tem področju izdajanja v izviru Ljubija. Od Golške planote do Smrekovca se razprostira druga vodovarstvena cona ter tretja vodovarstvena cona seže od Ljubijskega grabna do Mršnega, Črnega in Vranjega vrha ter do Kalskega grebena. Minimalna izdatnost vodnega vira je 36 l/s in maksimalna izdatnost pa 180 l/s. Voda se ne črpa, ampak zajema preko tirolskega zajetja. Količina zajete vode za Ljubijo za leto 2014 znaša 1.488.347 m<sup>3</sup>. Voda se na zajetju Ljubija samo zajame preko tirolskega zajetja in nato pot nadaljuje preko transportnega vodovoda do čistilne naprave Grmov vrh, kjer poteka proces priprave pitne vode, na koncu se kot dezinfekcijsko sredstvo doda plinski klor. Iz Grmovega vrha voda teče neposredno v vodohrane Šoštanj, Nove Preloge, Hartl in R2 Velenje. Iz vodohrana Šoštanj se voda črpa v vodohran Lokovica, iz vodohrana Hartl gre voda v vodohran Pesje ter v vodohran Podgorje. Iz R2 Velenje se črpa v vodohran Kavče, iz katerega gre v vodohran Roperče in Šentilj, iz vodohrana Roperče pa v do vodohrana Andraž. Naprava za pripravo pitne vode Grmov vrh je bila rekonstruirana leta 2014 in v njej poteka podoben proces priprave pitne vode kot v stari napravi, le da se za filtriranje po novem uporablja postopek ultrafiltracije. (Stropnik, 2006, Komunalno podjetje Velenje, 2009)



Slika 17: Izvir Ljubija (levo) in ultrafiltracija na ČN Grmov vrh (desno)

## 4.6 Črpališča

Vodovodni sistem Šmartnega ob Paki napaja z vodo objekte v nižinskem delu občine ter tudi v višje ležečih predelih občine. Vodo do višje ležečih porabnikov je potrebno tudi prečrpavati. V prilogi A1 je shematsko predstavljen obravnavan vodovodni sistem in. Na obravnavanem delu je 7 črpališč. In sicer iz vodohrana Gorenje – Skorno 1 se voda prečrpava preko črpališča Gorenje – Skorno 1 do vodohrana Gorenje – Skorno 2 in do vodohrana Gorenje – Skorno 3 preko črpališča Gorenje – Skorno 2. Višinska razlika med najnižjim in najvišjim vodohranom znaša 250 m. Sistem je enocevni in ob izklopu črpalk voda gravitacijsko teče nazaj. Iz jaška Šmartno teče voda v vodohran Šmartno in se preko črpališča Šmartno črpa voda v vodohran Bačovnik in nato se naprej prečrpava do vodohrana Veliki Vrh, kjer se voda gravitacijsko spusti do črpališča Gora Oljka 1 in se prečrpava do črpališča Gora Oljka 2 in nato še v vodohran Gora Oljka. Iz jaška Rečica priteče voda v vodohran Rečica, kjer se voda prečrpava preko črpališča Podgora v vodohran Podgora. V preglednici so predstavljene karakteristike črpališč na vodovodnem omrežju Šmartno ob Paki.

**Tabela 17: Karakteristike črpališč**

ID ČRPALIŠČA	Višina terena [m]	Višina dovoda [m]	Višina odtoka	Leto izgradnje	Skupna moč [kW]	Kapaciteta [l/s]	Število črpalk
ČRP VELIKI VRH 1	360	0	360,5	1989	22	8,1	2
ČRP VELIKI VRH 2	473	0	472,4	1989	5,5	2,8	1
ČRP GOR – SKOR 1	352	0	350	1990	4	1,8	1
ČRP GOR – SKOR 2	484	0	482	1990	5,5	0,6	1
ČRP PODGORA	338	0	337	1998	2,2	2	2
ČRP GORA OLJKA 1	563	561,4	560,3	2013	2,2	0,83	2
ČRP GORA OLJKA 2	625	623,5	622,3	2013	4	1,7	2

(Komunalno podjetje Velenje, 2015)

## 4.7 Vodohrani

Na obravnavanem vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki je postavljenih 10 vodohranov. Vodohrani so povečini pretočni in se polnijo s pomočjo prečrpavanja, in sicer: ko sistem zazna, da se vodohran prazni in pride gladina vode pod določeno vrednostjo se vklopijo črpalke in prečrpavajo vodo preko danih črpališč v vodohran. V tabeli 20 so predstavljene karakteristike vodohranov v Šmartnem ob Paki.



**Tabela 18: Karakteristike vodohranov**

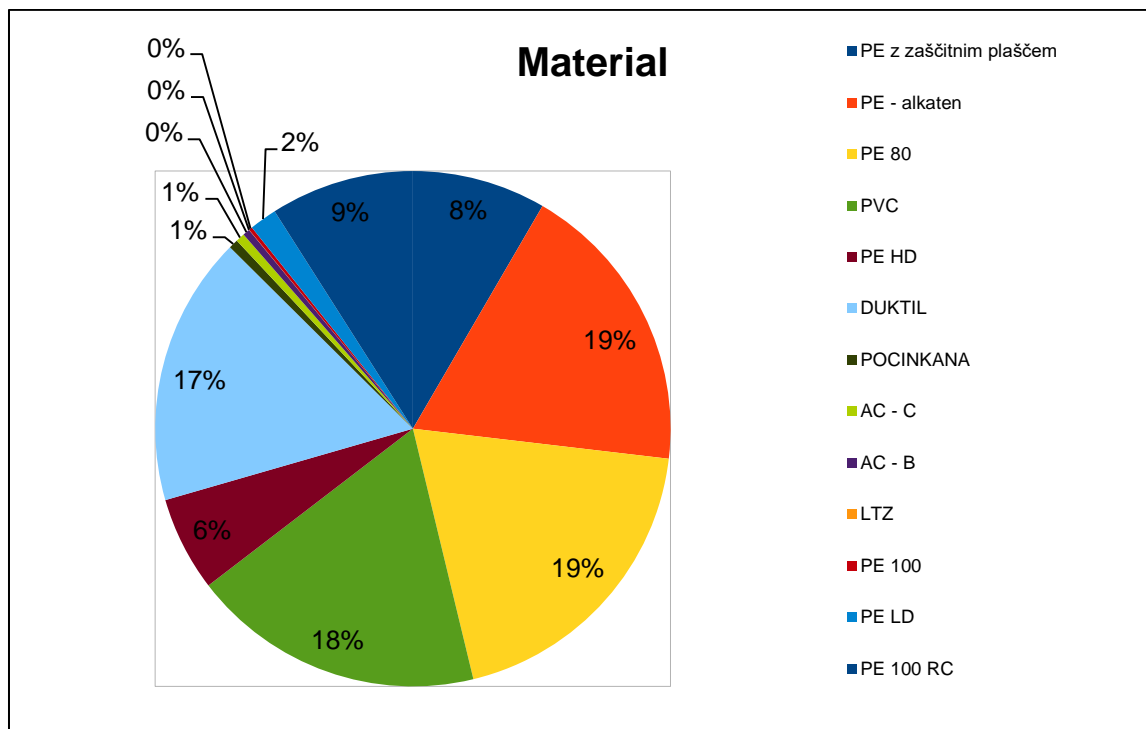
Naziv (ID)	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Leto izgradnje	Višina terena [m]	Višina dotoka [m]	Višina iztoka [m]	Višina preliva [m]
RZ Gavce	100	1983	400	399,2	397,13	399
RZ ŠoP	90	1964	363	363	360	362,8
RZ Rečica	250	1995	368	367	365	368,5
RZ Veliki Vrh	200	1986	581	581	578,6	580,6
RZ Bačovnik	20	1989	474	474,2	472,4	474,1
RZ Podgora	70	1996	410	409,7	406,3	408,1
RZ Gor-Skorno 1	11	1994	355	355	353	355,2
RZ Gor-Skorno 2	35	1994	481	481,5	478,9	481,5
RZ Gor-Skorno 3	35	1994	600	600	597	599,6
RZ Gora Oljka 1	5	2013	734,9	733,6	732,7	733,5

(Komunalno podjetje Velenje, 2015)

#### 4.8 Cevi

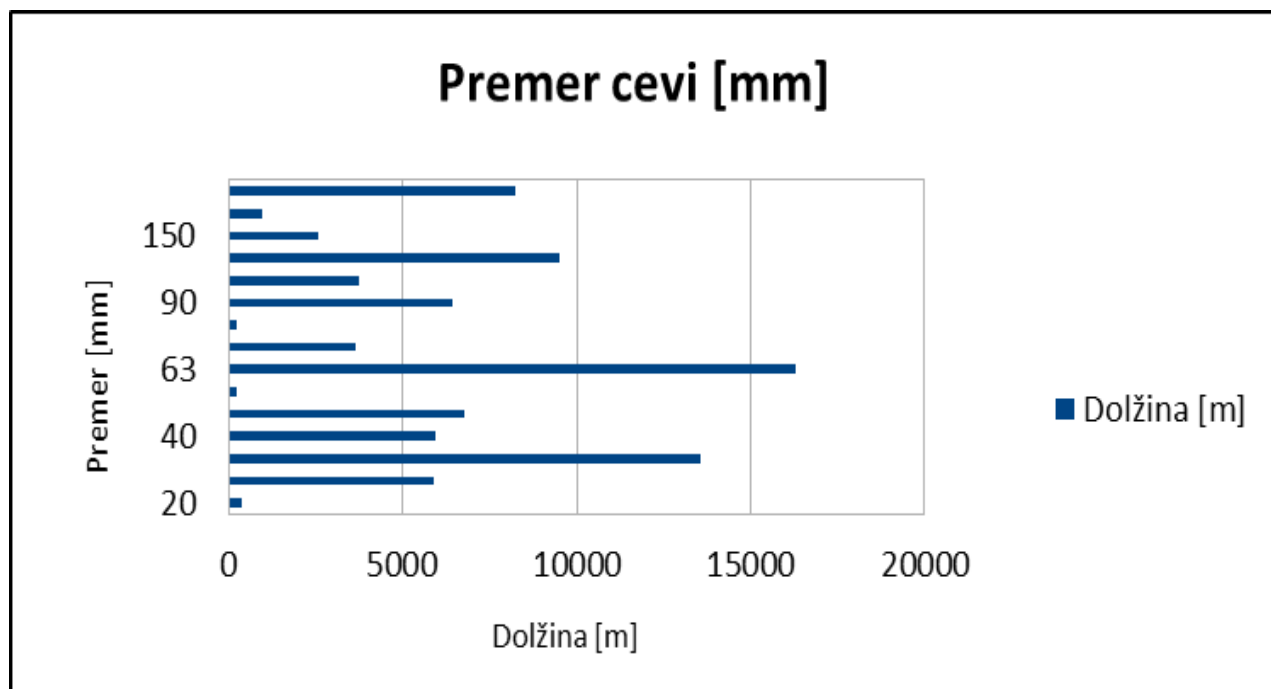
Začetno stanje cevi je ocenjeno glede na dimenzijo in starost. Za vsako cev se predpostavlja hrapavost. Razlika v hrapavosti je posledica kontinuiranega pojava turbulentnega toka v ceveh skozi leta uporabe cevi, zaradi česar se hrapavost veča. (Benedik, Bedenčič, 2013)

Cevovodni sistem se začne pri zajetju Ljubija do ČN Grmov vrh, od koder pot nadaljuje po ceveh različnih dolžin, dimenzij, materialov in vse tako do jaškov, vodohranov, črpališč in porabnikov. Skupna dolžina cevovoda znaša 84.495 m, in sicer je to dolžina skupaj s povezovalnim cevovodom, merjeno od odcepa Šoštanj – Velenje. Lastnosti cevovodnega sistema Šmartno ob Paki so v nadaljevanju prikazane tabelarično in grafično.

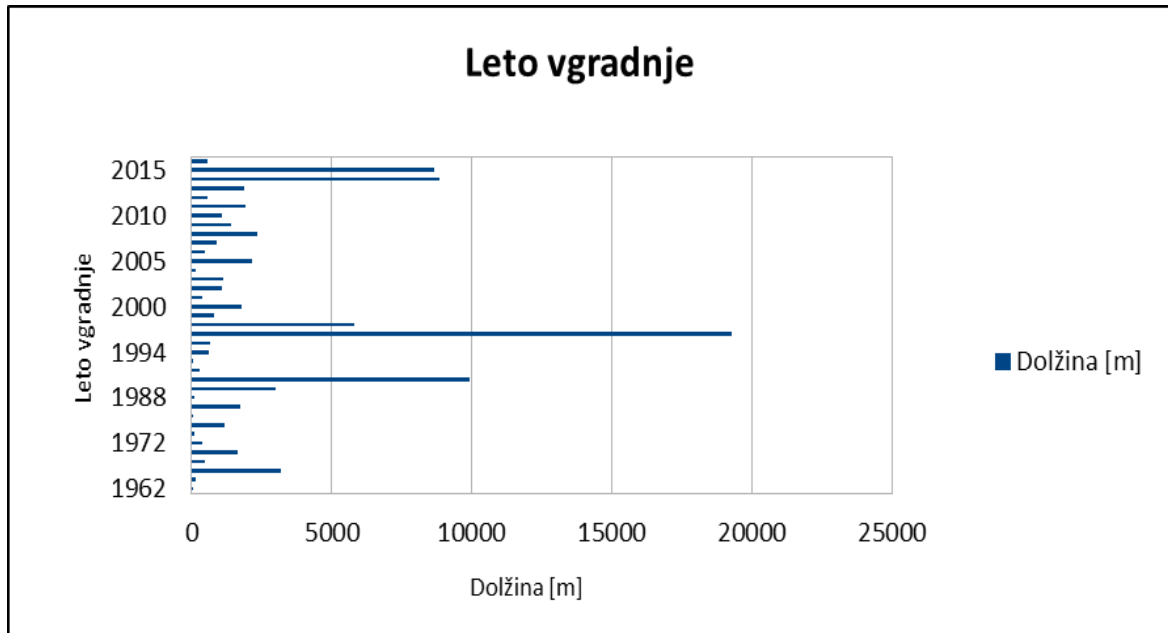


Graf 1: Delež posameznih materialov cevi v omrežju

Iz grafa 1 je razvidno, da v omrežju Šmartnega ob Paki odločno prevladujejo cevi iz polietilena (PE) in cevi iz polivinilklorida (PVC) ter cevi iz duktilne litine. Material cevi nam nudi izhodišče pri določanju koeficienta hrapavosti, ki je seveda odvisen tudi od starosti cevi, saj se z leti na ostenju cevi nalagajo obloge in s tem povečujejo koeficient hrapavosti.



Graf 2: Delež različnih premerov cevi glede na dolžino



Graf 3: Delež dolžine cevi v omrežju glede na leto vgradnje

Graf 2 in graf 3 prikazujeta delež dolžine cevi v omrežju glede na leto vgradnje in delež različnih premerov cevi glede na dolžino cevi. Starost in dimenzije cevi lahko prav tako vplivata na določanje koeficienta hrapavosti. Najstarejša cev sega v leto 1961, ki meri v dolžino 28 m. Iz grafikona 2 je razvidno, da omrežje sestavlja največ cevi premera 63 mm, nato cevi premera 32 mm, visoko zastopani cevi sta še cev premera 110mm in cev premera 200mm.

Tabela 19: Manningov koeficient hrapavosti glede na material in starost cevi

Material	kratka oznaka	izhodišče za nove cevi	Do 10 let	10-20 let	20-30 let	30-40 let	40-50 let	50-60 let	60-70 let	70-100 let
Svinčene	PB	0,011	0,0143	0,0186	0,0242	0,0314	0,0408	0,0531	0,069	0,0897
Pocinkane	PC	0,016	0,0208	0,027	0,0352	0,0457	0,0594	0,0772	0,1004	0,1305
Azbestcimentne	AC	0,011	0,0143	0,0186	0,0242	0,0314	0,0408	0,0531	0,069	0,0897
Jeklene	JE	0,012	0,0156	0,0203	0,0264	0,0343	0,0446	0,0579	0,0753	0,0979
Litoželezne	LZ	0,012	0,0156	0,0203	0,0264	0,0343	0,0446	0,0579	0,0753	0,0979
Nodularna litina	NL	0,011	0,0143	0,0186	0,0242	0,0314	0,0408	0,0531	0,069	0,0897
Polivinilklorid	PVC	0,009	0,0117	0,0152	0,0198	0,0257	0,0334	0,0434	0,0565	0,0734
Polietilen	PE	0,009	0,0117	0,0152	0,0198	0,0257	0,0334	0,0434	0,0565	0,0734

(Benedik, Bedenčič, 2013)

#### 4.9 Poraba vode

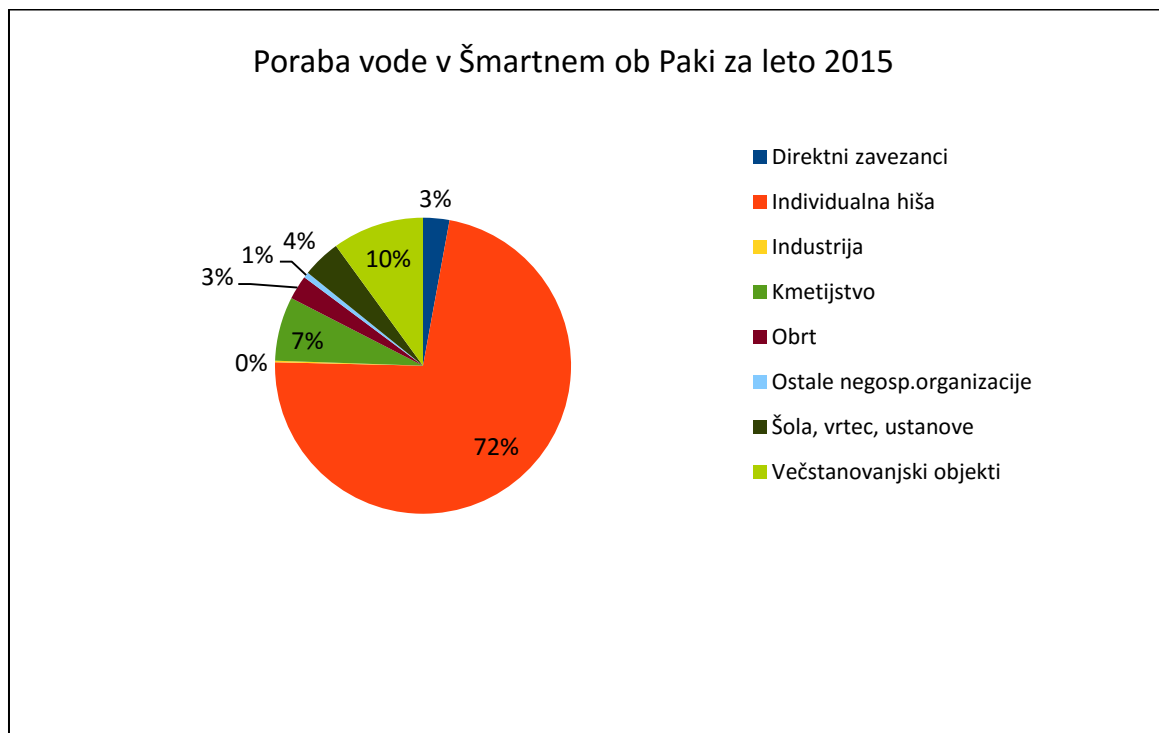
V tabeli 22 so podani podatki za porabo pitne vode na vodovodnem omrežju Šmartno ob Paki. Prikazani so porabniki, poraba na letni ravni [ $m^3$ /leto] in srednja dnevna poraba [ $m^3$ /dan] oz. [l/s]. Sama poraba pitne vode je odvisna od vrste in deleža porabnikov oz. objektov ter navad oz. potreb porabnikov. Objekti so lahko gospodarski, negospodarski in stanovanjski. Podatke o letni porabi vode

se pridobijo s strani upravljavca (Komunalno podjetje Velenje), in sicer z odčitavanjem števca vode na odjemnem mestu, medtem ko srednjo dnevno porabo določimo s pomočjo podatkov o letni porabi vode, katerega razdelimo na 365 oz 366 dni, da dobimo srednjo dnevno porabo vode. Poraba vode se spreminja s časom in se ustvarijo določeni vzorci porabe, ki opisujejo stanje porabe skozi teden. Vzorci se dobijo tako, da nameščeni merilniki pretoka beležijo porabo v določenem časovnem intervalu.

Tabela 20: Prikaz predvidene porabe vode za leto 2015, na podlagi podatkov za porabo vode v prvi polovici leta 2015

uporabniki	celoletna vsota [m3/leto]	srednja dnevna poraba [m3/dan]	Srednja dnevna poraba [l/s]
Direktni zavezanci	3442	9,43	0,11
Individualna hiša	86785	237,77	2,75
Industrija	202	0,55	0,01
Kmetijstvo	8390	22,99	0,27
Obrt	3159	8,65	0,10
Ostale negosp.organizacije	736	2,02	0,02
Šola, vrtec, ustanove	5021	13,76	0,16
Večstanovanjski objekti	11976	32,81	0,38
<b>Skupna vsota</b>	<b>119710</b>	<b>327,97</b>	<b>3,80</b>

(Komunalno podjetje Velenje, 2015)



Graf 4: Prikaz porabe vode v odvisnosti od porabnikov občini Šmartno ob Paki

Iz Grafa 4 je razvidno, da so glavni porabniki vode stanovanjski objekti in da je industrija najmanjši porabnik.

#### 4.10 Merilna oprema

Vgrajena stacionarna merilna oprema je prednost, ki jo imajo novozgrajeni in dobro premišljeni vodovodni sistemi. Preden se je vgradila stacionarna merilna oprema na novozgrajenem vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki, so se izvedle meritve z mobilno opremo. Merilna oprema vsebuje komplete za merjenje pretokov vode, tlaka, temperature in nivoja, ki ji glede na zahteve pripada krmilni del in spominska enota za shranjevanje podatkov ter vmesnik za prenos podatkov na izbrani strežnik. Krmilni del in spominska enota sta vgrajena v ustrezni omarici. Merilna oprema, ki je nameščena v lokalnem centru merjenja, mora biti stalno dosegljiva za potrebe vzdrževanja. Izvedba meritev poteka sinhronizirano z ustrezno frekvenco vzorčenja, s katero omogoča prikaz tedenskih, dnevnih in urnih profilov obratovanja vodovodnega sistema. Oprema vgrajena v objektih je parametrirana do takšnega nivoja, da je omogočen takojšnji odvzem podatkov na lokalnem nivoju in prenos podatkov na izbrani strežnik.



Slika 18: Merilnik nivoja PPI 100 (levo) in Merilnik tlaka PPI 110 (desno)

**Tabela 21: Merilna oprema, ki je vgrajena v vodovodni sistem Šmartno ob Paki**

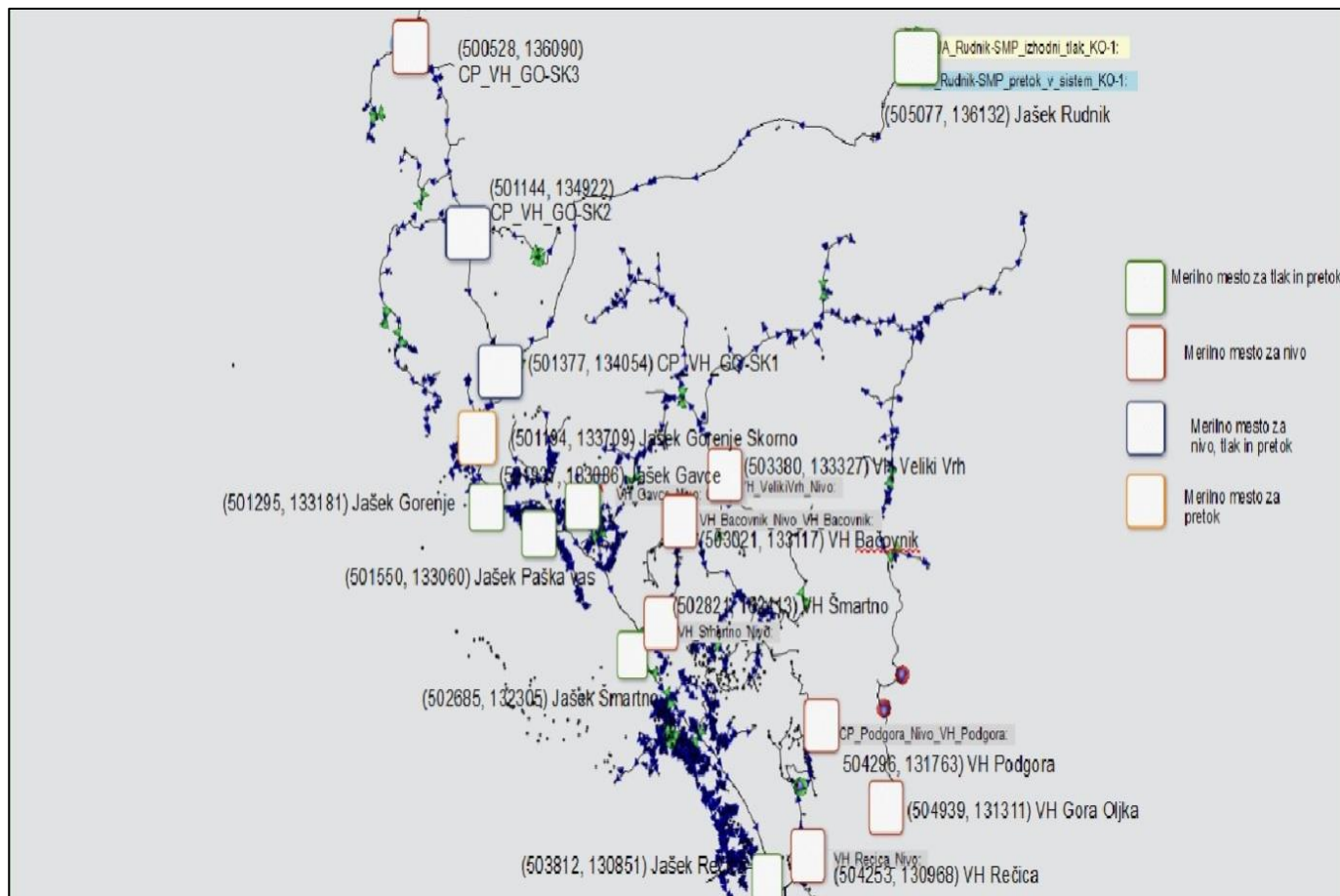
MERILNA OPREMA	UPORABA	LASTNOSTI
Merilnik nivoja PPI 100 (Eltratec)	Meritev nivoja v vodovodih.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meritev nivoja tekočin,</li> <li>- natančen (male merske napake),</li> <li>- časovna stabilnost,</li> <li>- odpornost na vibracije,</li> <li>- odporen na korozivne medije.</li> </ul>
Merilnik tlaka PPI 110 (Eltratec)	Meritev tlaka v vodovodih	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meritev in registracija tlaka.</li> </ul>
MQ 100 (Eltratec)	Meritev trenutnega pretoka v obe smeri. Nadzor pretočne obremenjenosti cevovoda. Nadzor vodnih izgub.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Premer cevovoda 50 – 650 mm.</li> <li>- Široko merilno območje.</li> <li>- Programibilno merilno območje.</li> </ul>
MQ 200-2 - zaščita IP68 (Eltratec)	Meritev in registracija pretoka v cevovodu .	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Registrator pretoka.</li> <li>- Premer cevovoda 50- 650 mm.</li> <li>- Široko merilno območje.</li> </ul>
OCTAVE ultrazvočni merilec pretoka	Meritev pretoka s pomočjo ultrazvočnega senzorja.	
PSR 301 (Eltratec) mobilna oprema	Monitoring v vodovodnih objektih in cevovodih.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meritev in registracija tlaka, temperature in pretoka.</li> <li>- Prenos podatkov s pomočjo osebnega računalnika.</li> <li>- Montaža na cevni priključek.</li> </ul>
Obračunski vodomer ITRON (Enerkon)	Obračunski vodomer do DN500.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enostavno ga integriramo v radijsko mrežo.</li> </ul>

(Komunalno podjetje Velenje, 2015), <http://www.eltratec.com> (Pridobljeno 10.11.2015)

V spodnji tabeli so predstavljena merilna mesta na vodovodnem omrežju Šmartno ob Paki.

**Tabela 22: Merilna mesta v vodovodnem omrežju Šmartno ob Paki**

<i>Merilno mesto</i>	<i>merjena količina</i>
CP_VH_GO-SK 1	nivo, tlak, pretok
CP_VH_GO-SK 2	nivo, tlak, pretok
CP_VH_GO-SK 3	nivo
VH Rečica	nivo
VH Veliki Vrh	nivo
VH Šmartno	nivo
VH Podgora	nivo
VH Bačovnik	nivo
VH Gora Oljka	nivo
Jašek Gorenje	tlak, pretok
Jašek Gavce	tlak, pretok
Jašek Šmartno	tlak, pretok
Jašek Rečica	tlak, pretok
Jašek Rudnik	tlak, pretok
Jašek Gorenje Skorno	pretok
Jašek Paška vas	tlak, pretok



**Slika 19: Lokacija merilnih mest na vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki**

Slika 18 prikazuje lokacijo merilnih mest za tlak, pretok in nivo, določenih s koordinatami v hidravličnem modelu vodovodnega sistema omrežja Šmartno ob Paki. Na vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki obstaja 9 merilnih mest, kjer se izvajajo meritve pretoka, 8 merilnih mest, kjer se izvajajo meritve tlaka ter 9 merilnih mest, kjer se izvajajo meritve nivoja vode.



## 5 REZULTATI UMERJANJA

Model, ki smo ga uporabili v diplomski nalogi, so izdelali v podjetju Petrol, d.o.o. (Petrol, 2015) v sodelovanju s Komunalni podjetjem Velenje. Model vsebuje celotni centralni vodovodni sistem Šoštanj – Velenje ter pripadajoče cevovode, ki jih upravlja Komunalno podjetje Velenje. Obstoječi model smo zmanjšali tako, da vsebuje samo podatke o cevovodih v občini Šmartno ob Paki. Povezavo vodovodnega sistema Šmartno ob Paki s centralnim sistemom Šoštanj – Velenje smo omogočili z dodajanjem robnega pogoja, in sicer z vstavljanjem dodatnega vira v modelu ter mu pripisali dane meritve. Vir je bil vstavljen v jašku Rudnik, kjer so bile vzpostavljene obstoječe meritve v SCADA sistemu, in sicer meritvi tlaka pred in za reducirnim ventilom ter meritev pretoka za reducirnim ventilom. Pri izvedbi kalibracije so dane meritve omogočile, da vodovodni sistem Šmartno ob Paki obravnavamo kot ločen sistem. Za vzpostavitev modela Šmartno ob Paki so uporabljeni procesni podatki iz obstoječih merilnih mest iz SCADA sistema, kombiniranih z novozgrajenimi merilnimi mesti po omrežju. Programska oprema Aquis z numeričnim postopkom umerjanja prek modula omogoča izvedbo umerjanja omrežja, ga pripravi za izvajanje simulacij v realnem času. Postopek umerjanja se prične s prenosom meritev v program, s pomočjo katerih se pripravi model za nadaljnji nadzor vodovodnega sistema.

Prvi korak umerjanja modela je bil določanje pretočnih con, ki jih spremljamo z meritvami pretoka na vstopu v posamezno cono. Rezultati meritev pretoka za določeno merilno območje, prikazujejo dejanske količine vode, ki vstopa v dano območje. Na osnovi merjenih pretokov smo vodovodni sistem Šmartno ob Paki razdelili na štirinajst merilnih območij. Merilna mesta so definirana z naslednjimi meritvami pretokov:

**Tabela 23: Merilna območja dotoka/odtoka**

Merilno območje	Dotok	Odtok
1	JA_Rečica_1_pretok, JA_Rečica_4_pretok, JA_Rečica_2_pretok.	/
2	JA_Rečica_5_pretok_1	JA_Rečica_3_pretok
3	JA_GOS- SMP_pretok Gorenje Skorno RKO-4	CP-VH_GOS_1_pretok_na_dovodu
4	JA_Smartno- SMP_pretok_Smartno_RKO-7	JA_Rečica_1_pretok, JA_Rečica_2_pretok, JA_Rečica_3_pretok, JA_Rečica_4_pretok, JA_Rečica_5_pretok_1, JA_Rečica_5_pretok_2, VH_Rečica_pretok_dotok/odtok, CP_Podgora_Odtok

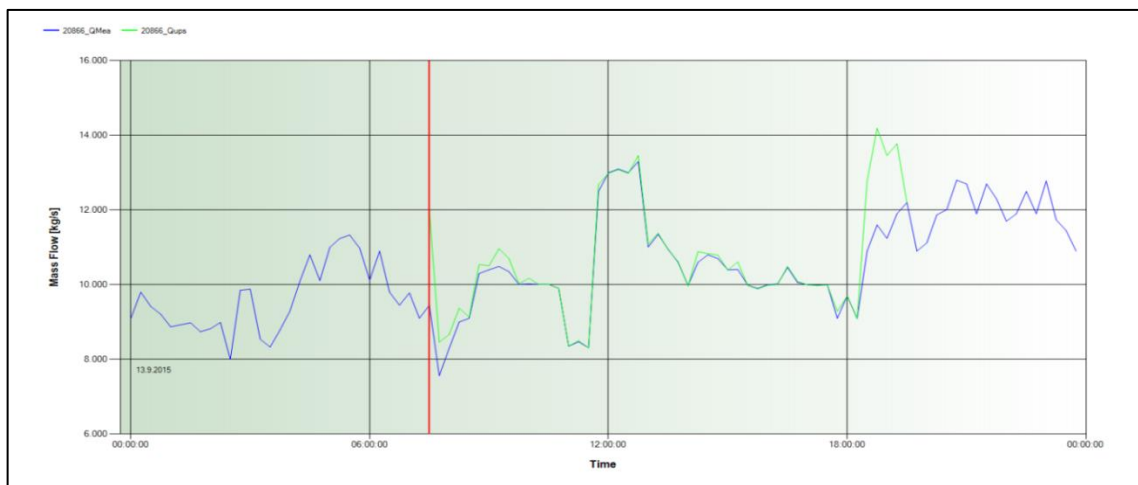
se nadaljuje...



## 5.1 Umerjanje pretočnih razmer za vodovodni sistem Šmartno ob Paki

Izvedba simulacije z vklopljeno funkcijo »Flow adaption« odraža dejansko stanje pretočnih razmer. Program Aquis izračuna neto pretok cone in na ta način določi porabo odjemalcev v vsakem časovnem koraku. Za simulacijo je vzeto obdobje 13.9.2015 od 7:30 – 19:30.

S primerjavo merjenih in izračunanih pretočnih vrednosti na vsakem merilnem mestu preverimo pretočne razmere. Zelena linija predstavlja izračun, modra linija predstavlja meritev.



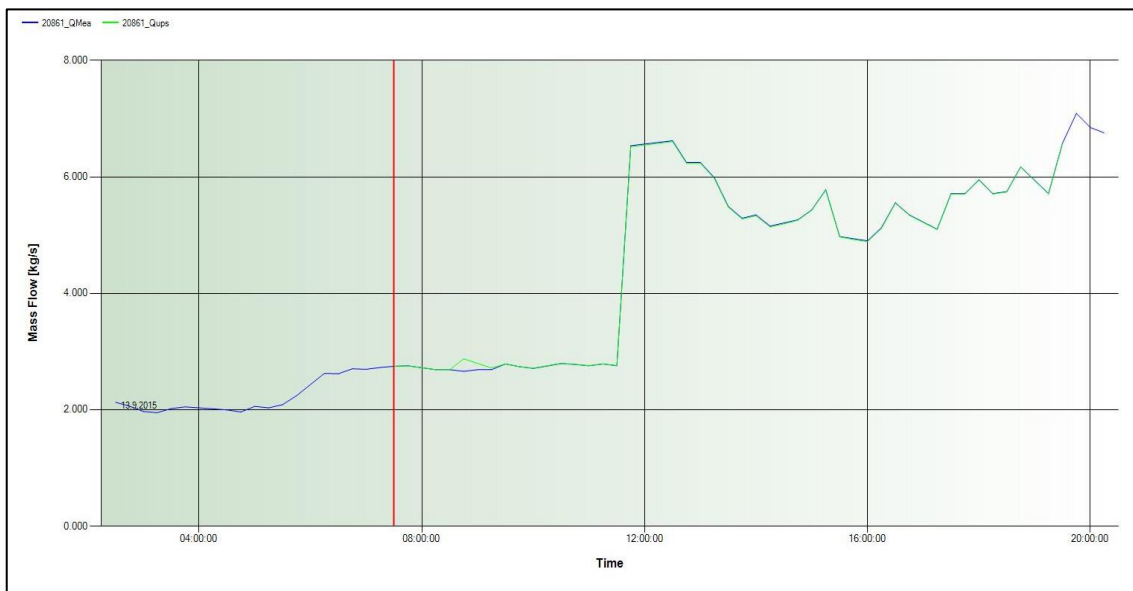
Graf 5: Pretočne razmere za »JA\_Rudnik-SMP\_pretok\_v\_sistem\_KO-1

Graf 5 predstavlja pretočne razmere v jašku Rudnik (KO-1). Linija izračunanih pretokov se relativno dobro prekriva z linijo merjenih pretokov. Do odstopanja pride v obdobju med 18:30 in 20:00, vendar zelena linija sledi obliki modre linije.



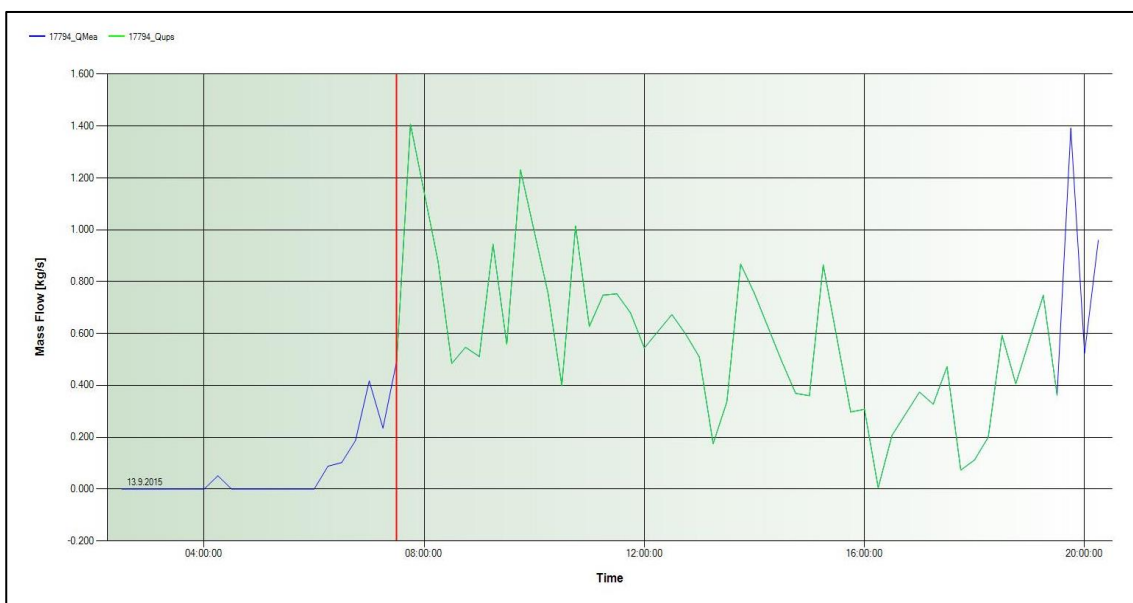
Graf 6: Pretočne razmere za »JA\_Gorenje-SMP\_pretok\_KO-5«

Graf 6 predstavlja pretočne razmere v jašku Gorenje (KO-5). Iz grafa 6 je razvidno da se linija izračunanih pretokov relativno dobro prekriva z linijo merjenih pretokov oz. da zelena linija sledi obliki modre linije.



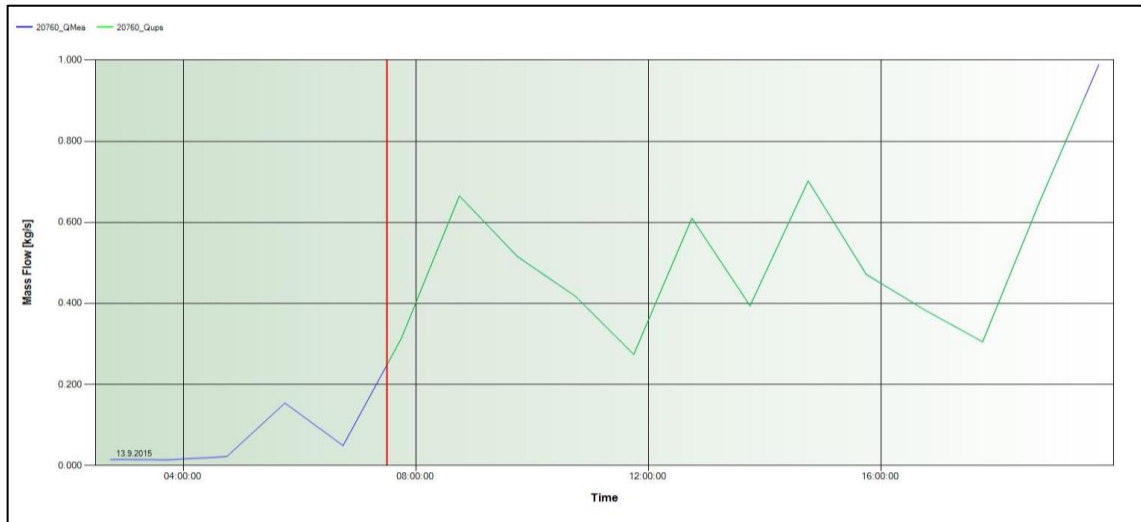
**Graf 7: Pretočne razmere za »JA\_Šmartno-SMP\_pretok\_RKO-7«**

Graf 7 prikazuje pretočne razmere v jašku Šmartno (RKO-7). Iz grafa 7 je razvidno, da se izračunani in merjeni pretok relativno dobro ujemata.



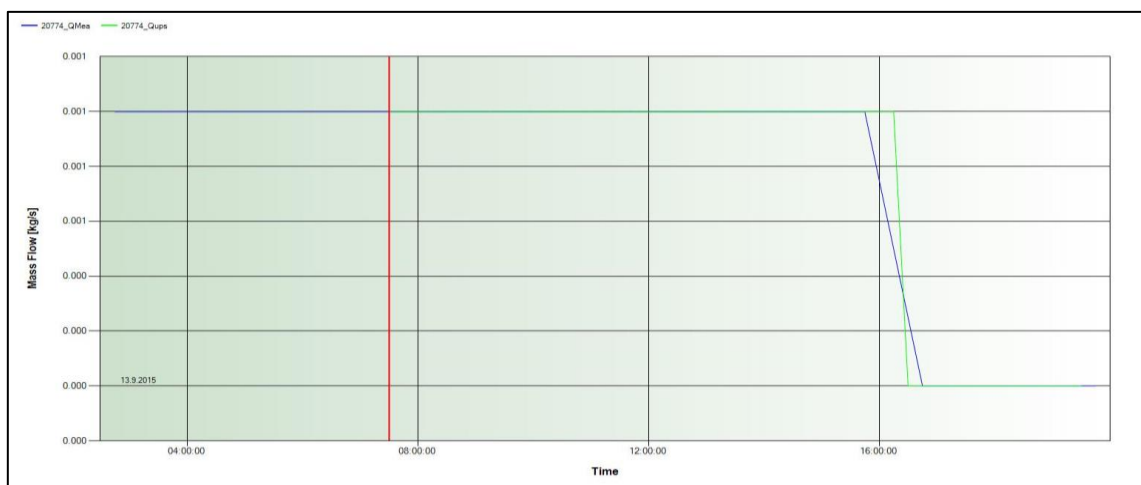
**Graf 8: Pretočne razmere za »Jašek Paška vas Pretok«**

Graf 8 prikazuje pretočne razmere v jašku Paška vas. Iz grafa 8 je razvidno, da se liniji merjenega in izračunanega pretoka popolnoma prekrivata, kar pomeni, da sta v vsaki točki merjenega obdobja merjeni in izračunani pretok identična.



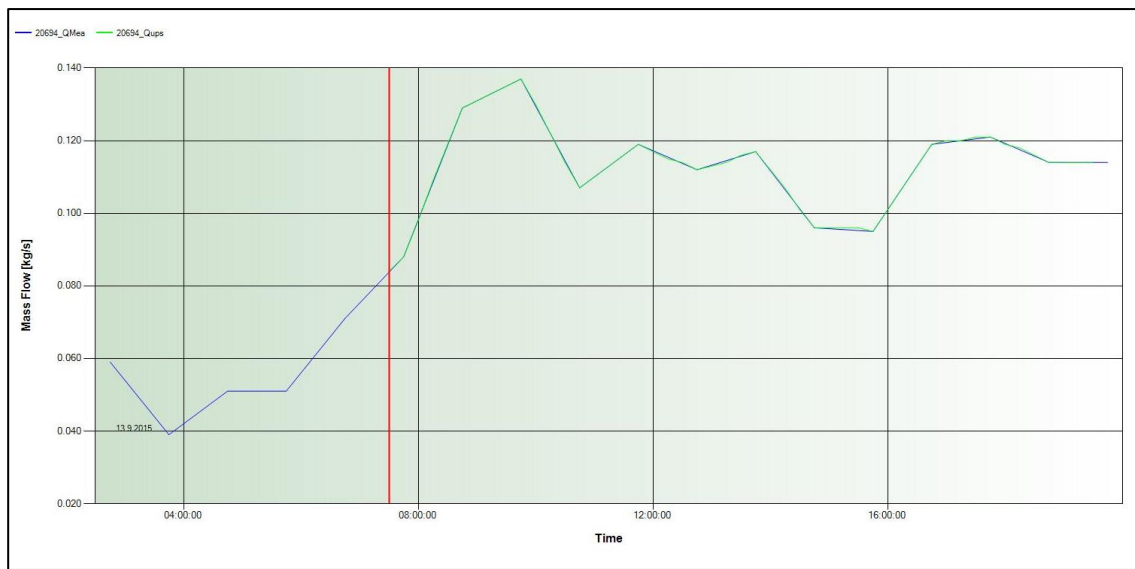
**Graf 9: Pretočne razmere za »JA\_Rečica\_1\_pretok«**

Graf 9 prikazuje pretočne razmere za jašek Rečica 1. Iz grafa 9 je razvidno, da se liniji merjenega in izračunanega pretoka popolnoma prekrivata, kar pomeni, da sta v vsaki točki merjenega obdobja vrednosti merjenega in izračunanega pretoka identični.



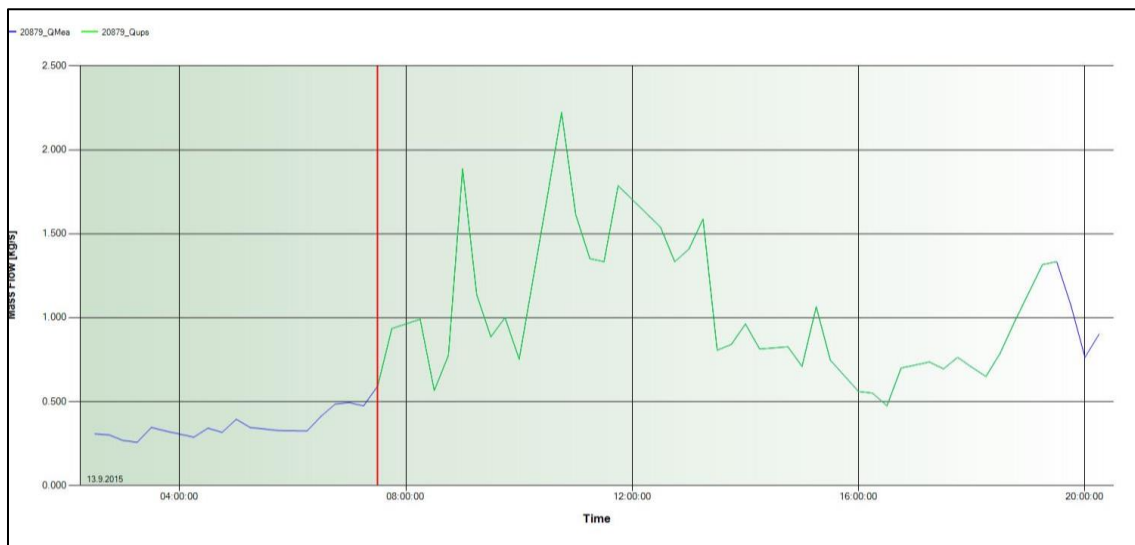
**Graf 10: Pretočne razmere za »JA\_Rečica\_3\_pretok«**

Graf 10 prikazuje pretočne razmere za jašek Rečica 3. Iz grafa 10 je razvidno, da se liniji merjenega in izračunanega pretoka relativno dobro ujameta.



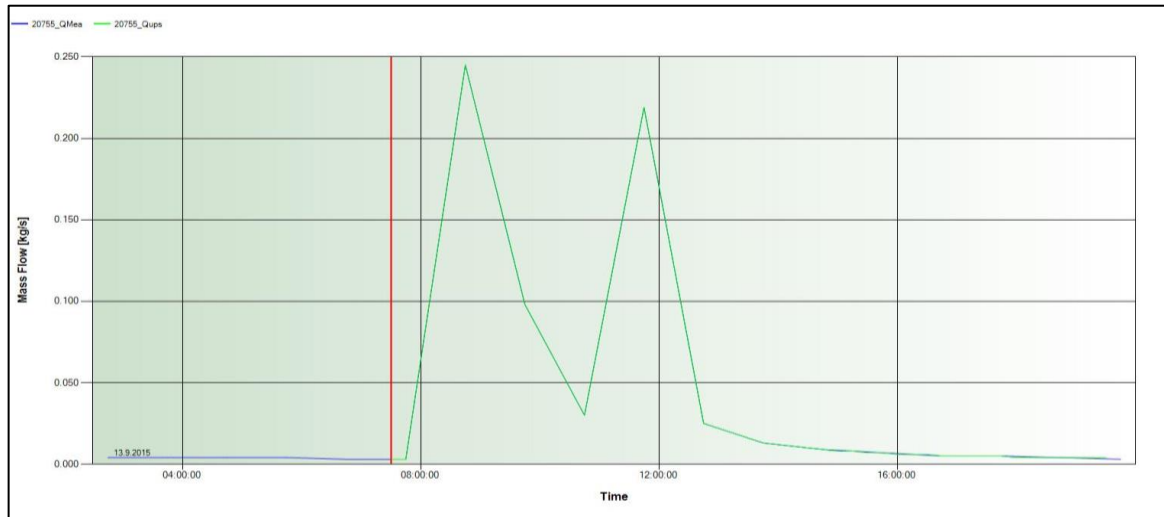
**Graf 11: Pretočne razmere za »JA\_Rečica\_4\_pretok«**

Graf 11 prikazuje pretočne razmere za jašek Rečica 4. Iz grafa 11 je razvidno, da se liniji merjenega in izračunanega pretoka popolnoma prekrivata, kar pomeni, da sta v vsaki točki merjenega obdobja merjeni in izračunani pretok identična.



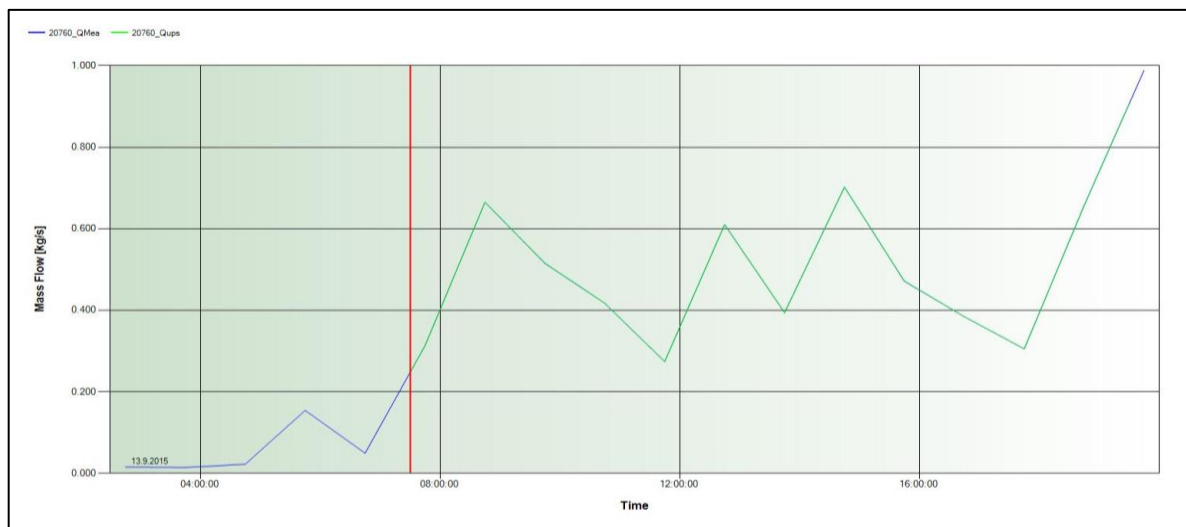
**Graf 12: Pretočne razmere za »JA\_Gavce\_pretok\_KO-6«**

Graf 12 prikazuje pretočne razmere za jašek Gavce. Iz grafa 16 je razvidno, da se liniji merjenega in izračunanega pretoka popolnoma prekrivata, kar pomeni, da sta v vsaki točki merjenega obdobja merjeni in izračunani pretok identična.



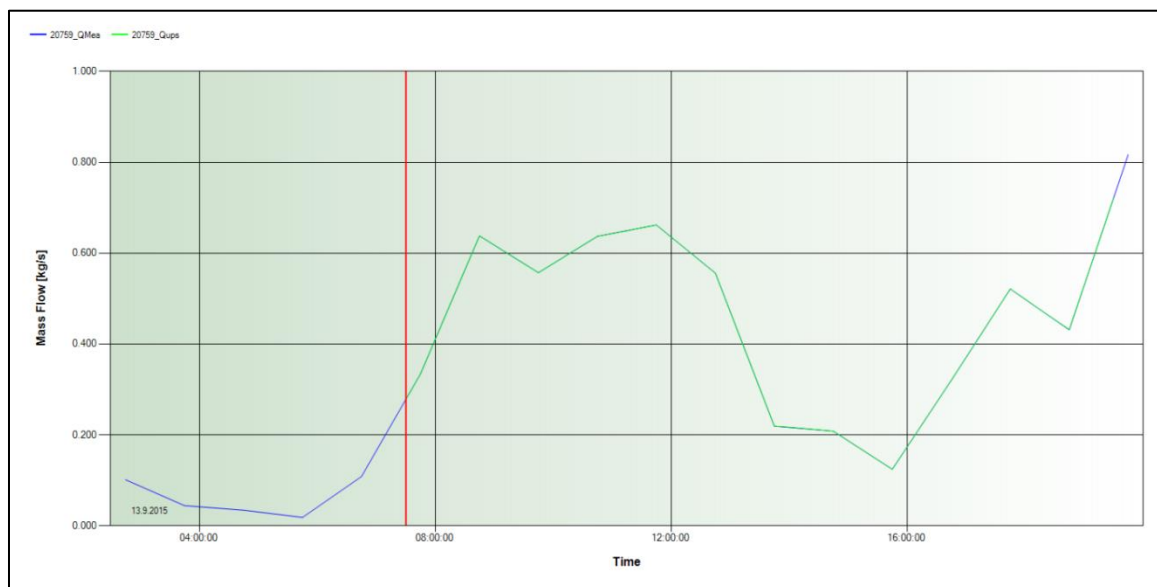
**Graf 13: Pretočne razmere za »JA\_Rečica\_2\_pretok«**

Graf 13 prikazuje pretočne razmere za jašek Rečica 2. Iz grafa 13 je razvidno, da se liniji merjenega in izračunanega pretoka popolnoma prekrivata, kar pomeni, da sta v vsaki točki merjenega obdobja merjeni in izračunani pretok identična.



**Graf 14: Pretočne razmere za »JA\_Rečica\_5\_1\_pretok«**

Graf 14 prikazuje pretočne razmere za jašek Rečica 5\_1. Iz grafa 14 je razvidno, da se liniji merjenega in izračunanega pretoka popolnoma prekrivata, kar pomeni, da sta v vsaki točki merjenega obdobja merjeni in izračunani pretok identična.



Graf 15: Pretočne razmere za »JA\_Rečica\_5\_2«

Graf 15 prikazuje pretočne razmere za jašek Rečica 5\_2. Iz grafa 15 je razvidno, da se liniji merjenega in izračunanega pretoka popolnoma prekrivata, kar pomeni, da sta v vsaki točki merjenega obdobja merjeni in izračunani pretok identična.

Iz zgornjih diagramov je razvidno, da se pri večini grafov liniji merjenega in izračunanega pretoka relativno dobro prekrivata oz. popolnoma prekrivata, kar pomeni, da so izračunani pretoki v Aquisu približno enaki oz. enaki danim meritvam pretoka. Relativno dobro ujemanje merjenega in izračunanega pretoka na vseh grafih pomeni, da smo imeli na sistemu dovolj merilnih mest, ki so podala zadostno število meritev. Takšen model je pripravljen za umerjanje tlačnih razmer.

## 5.2 Umerjanje tlačnih razmer za vodovodni sistem Šmartno ob Paki

Pregled izvedbe dinamične simulacije za obdobje 13.9.2015 v času od 7:30 do 19:30 med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi tlaka po posameznih merilnih mestih. Odstopanje največje vrednosti med



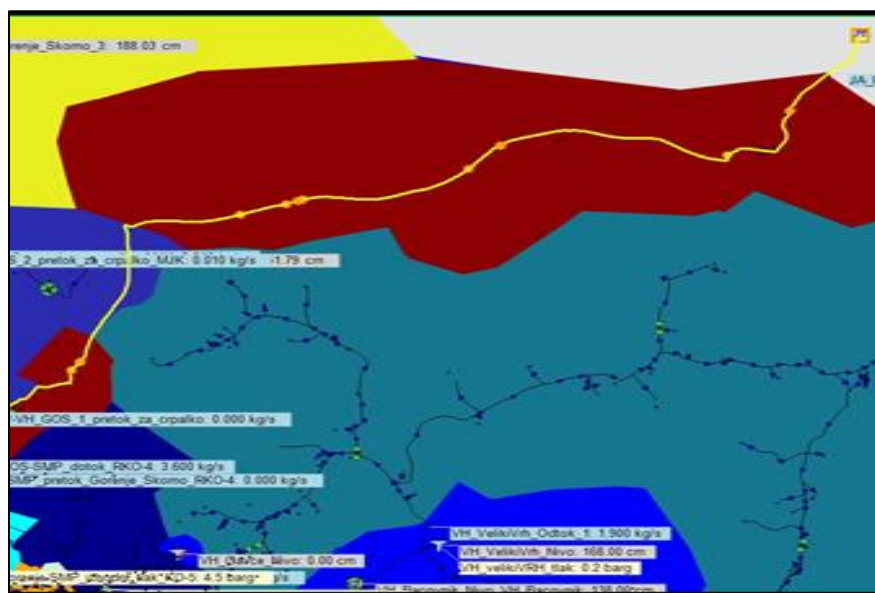
meritvami in rezultati je  $\pm (0,01 - 0,15)$  bar. Pregled odstopanja meritev od izračunov za vodovodni sistem Šmartno ob Paki je prikazan v tabeli.

**Tabela 24: Prikaz odstopanja meritev od izračunov za vodovodni sistem Šmartno ob Paki**

ID	Meritev 1	Meritev 2	Dolžina poti (m)	Razlika merjenega tlaka (bar)	Razlika izračunanega tlaka (bar)	Razlika tlakov (bar)	Pripisan korekcijski faktor
1	JA_Rudnik-SMP_izhodni tlak_KO-1	JA_Gorenje-SMP_vhodni_tlak_KO-5	6316,9	-0,14	-0,14	0,00	0,41
2	JA_Gorenje-SMP_vhodni_tlak_KO-5	JA_Smartno-SMP_vhodni_tlak_RKO-7	1786,3	-0,10	-0,10	0,00	3,42
3	JA_Gorenje-SMP_vhodni_tlak_KO-5	JA Gavce-SMP_vhodni_tlak_KO-6	872,2	-0,01	-0,01	0,00	0,36
4	JA_Smartno-SMP_izhodni_tlak_RKO-7	JA_Recica_1_vhodni_tlak	556,4	-0,11	-0,10	-0,01	3,82
5	JA_Recica_5_izhodni_tlak_1	JA_Recica_3_izhodni_tlak	1368,99	/	/	/	/
6	JA_Recica_1_vhodni_tlak	JA_Recica_2_vhodni_tlak	384,9	-0,06	-0,02	-0,03	3,30
7	JA_Recica_2_vhodni_tlak	JA_Recica_3_vhodni_tlak	1071,1	-0,01	-0,01	0,00	/
8	JA_Recica_3_vhodni_tlak	CP_Podgora_Tlak_Dovod	1125,04	0,03	-0,04	0,07	0,50
9	JA_Gorenje-SMP_izhodni_tlak_KO-5	jPaskaVas_Tlak	342,2	/	/	/	/
10	JA_Recica_1_izhodni_tlak	JA_Recica_4_izhodni_tlak	319,2	/	/	/	/
11	JA_Recica_1_vhodni_tlak	JA_Recica_4_vhodni_tlak	318,3	0,10	-0,01	0,11	/

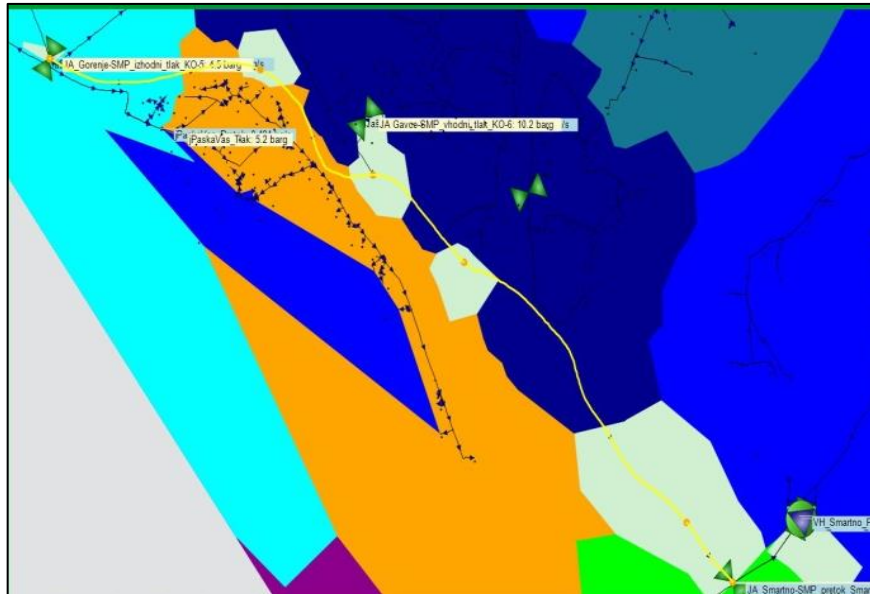
Tabela 24 prikazuje 11 kalibracijskih poti, za vsako pot je napisano ime vstopne in izstopne meritve, dolžina kalibracijske poti, razlika merjenega tlaka, razlika izračunanega tlaka ter pripadajoči izračunani korekcijski faktor. Iz zgornje table je razvidno, da smo pri 1,2,3,4,6 in 8 kalibracijski poti umerili tlačne razmere s pomočjo korekcijskega faktorja, da smo dobili razliko tlakov v dovoljenem območju  $\pm (0,01 - 0,15)$  bar. Prav tako je iz tabele razvidno, da pri kalibracijskih poteh 7 in 11 umerjanja s kalibracijskim faktorjem nismo izvedli, ker je razlika tlakov po opravljeni simulaciji že bila v dovoljenem območju in ni bilo potrebe po dodatnem umerjanju. Pri preostalih kalibracijskih poteh, in sicer pri 5, 9 in 10 kalibracijski poti, se umerjanje ni dalo izvesti zaradi prevelikih odstopanj, katera bomo tudi v nadaljevanju pojasnili.

Umerjanje vodovodnega sistema Šmartno ob Paki je izvedeno ločeno po kalibracijskih poteh, in sicer med dvema merilnima mestoma. Rezultati umerjanja so prikazani v nadaljevanju.



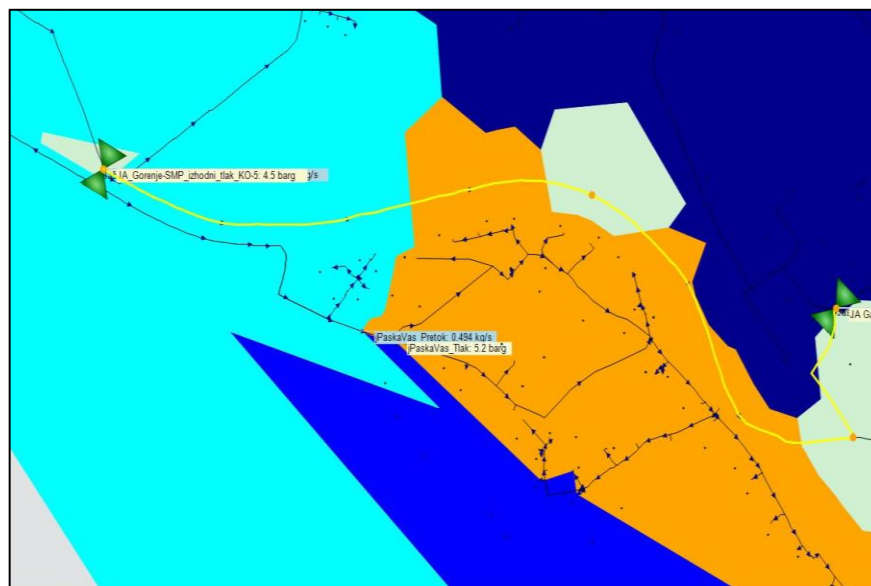
Slika 21: Trasa JA Rudnik - JA Gorenje

Pri umerjanju prve kalibracijske poti na trasi, med jaškom Rudnik in jaškom Gorenje, ni potrebe za dušenjem tlaka, saj je razlika med merjenim in izračunanim tlakom 0 bar in ustreza zgoraj določenemu pogoju. Umerjanje smo izvedli s pomočjo izračunanega korekcijskega faktorja, ki znaša 0,41. Korekcijski faktor v Aquisu se izračuna po formuli, ki je opisana v poglavju 3.4.1.



Slika 22: Trasa JA Gorenje – JA Šmartno

Pri umerjanju druge kalibracijske poti na trasi, med jaškom Gorenje in jaškom Šmartno, ni potrebno dušiti tlaka, saj je razlika med merjenim in izračunanim tlakom enaka 0 bar in ustreza zgoraj podanem pogoju. Umerjanje smo izvedli s pomočjo izračunanega korekcijskega faktorja, ki znaša 3,42.



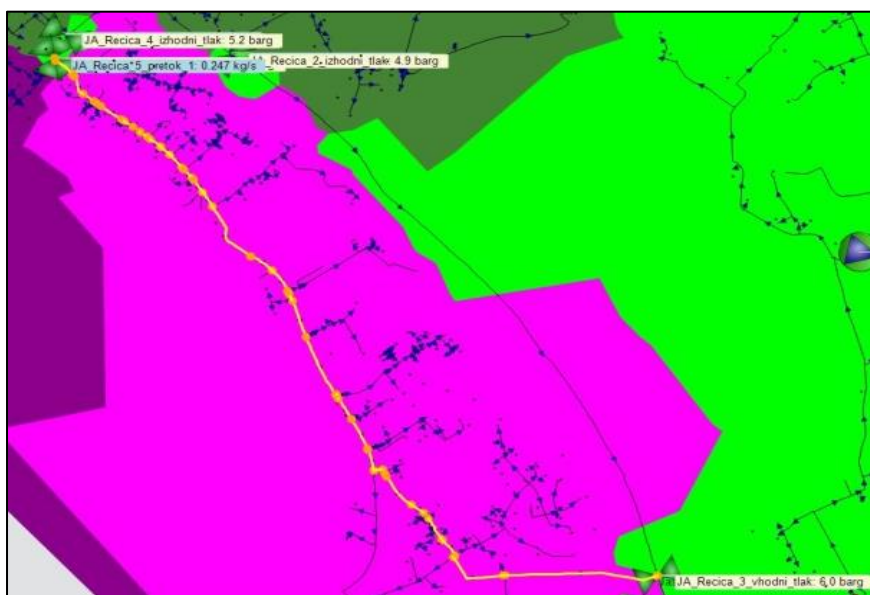
Slika 23: Trasa JA Gorenje – JA Gavce

Pri umerjanju tretje kalibracijske poti na trasi, med jaškom Gorenje in jaškom Gavce, je razlika med merjenim in izračunanim tlakom enaka 0,00 bar in ustreza zgoraj podanem pogoju. Umerjanje smo izvedli s pomočjo izračunanega korekcijskega faktorja, ki znaša 0,36.



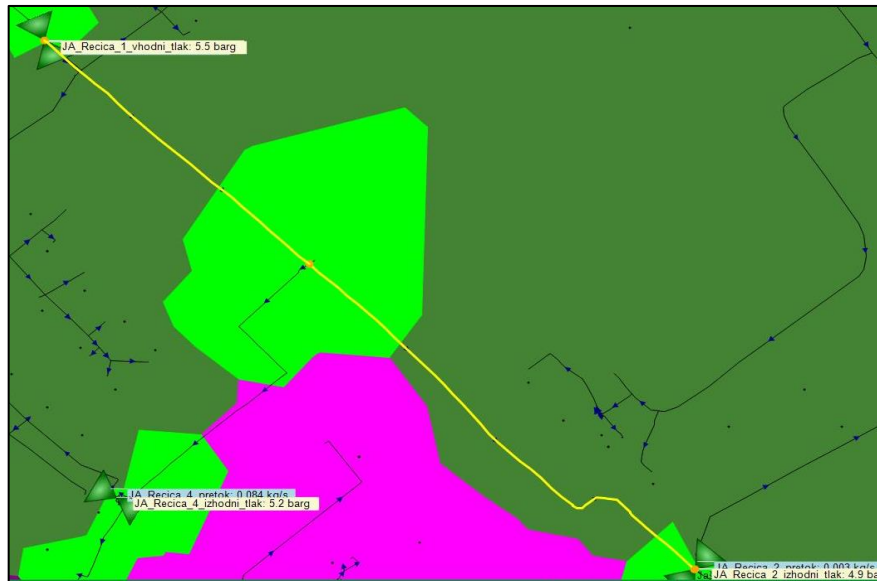
Slika 24: Trasa JA Gorenje – JA Gavce

Pri umerjanju četrte kalibracijske poti na trasi, med jaškom Šmartno in jaškom Rečica, znaša razlika med merjenim in izračunanim tlakom 0,01 bar. Razlika med merjenim in izračunanim tlakom ustreza zgoraj podanemu pogoju. Umerjanje smo izvedli s pomočjo izračunanega korekcijskega faktorja, ki znaša 3,82.



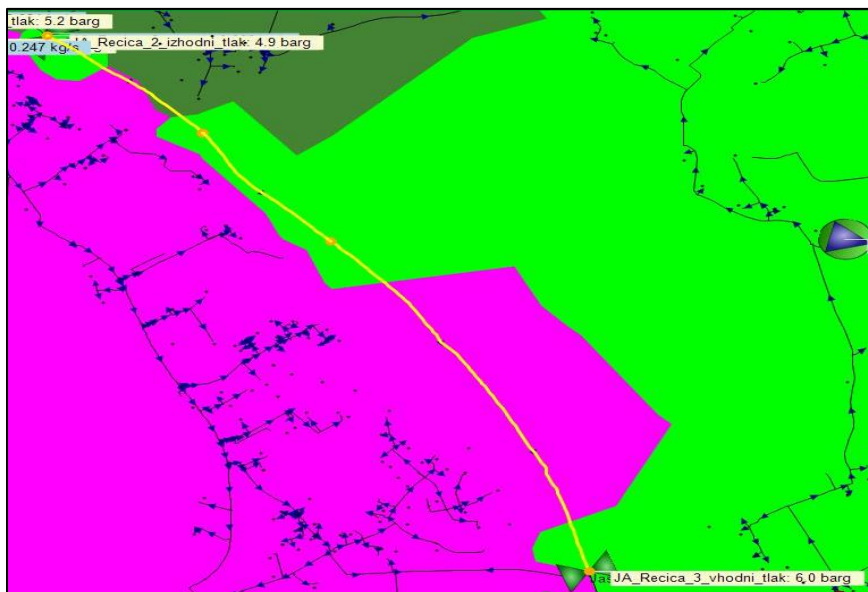
Slika 25: Trasa JA Rečica 5\_1 – JA Rečica 3

Pri umerjanju pete kalibracijske poti na trasi, med jaškom Rečica 5\_1 in jaškom Rečica 3, smo ugotovili, da se umerjanja ne da izvesti, ker sta meritvi tlaka med seboj neodvisni, zaradi mešalne točke toka, ki se pojavi med meritvama V točki mešanja se srečata tokova iz nasprotnih smeri, kar je podoben efekt kot če bi na cevi med dvema merjenima točkama imeli zaprt ventil. Dodatno umerjanje bi se dalo izvesti ob dodatni vgradnji prenosnih merilnikov tlaka znotraj merilnega območja.



**Slika 26: Trasa Rečica 1 - JA Rečica 2**

Pri umerjanju šeste kalibracijske poti na trasi, med jaškom Rečica 1 in jaškom Rečica 2, je razlika med merjenim in izračunanim tlakom  $-0,03$  bar. Razlika med merjenim in izračunanim tlakom ustreza zgoraj podanemu pogoju. Umerjanje smo izvedli s pomočjo izračunanega korekcijskega faktorja, ki znaša 3,30.



Slika 27: Trasa JA Rečica 2 - JA Rečica 3

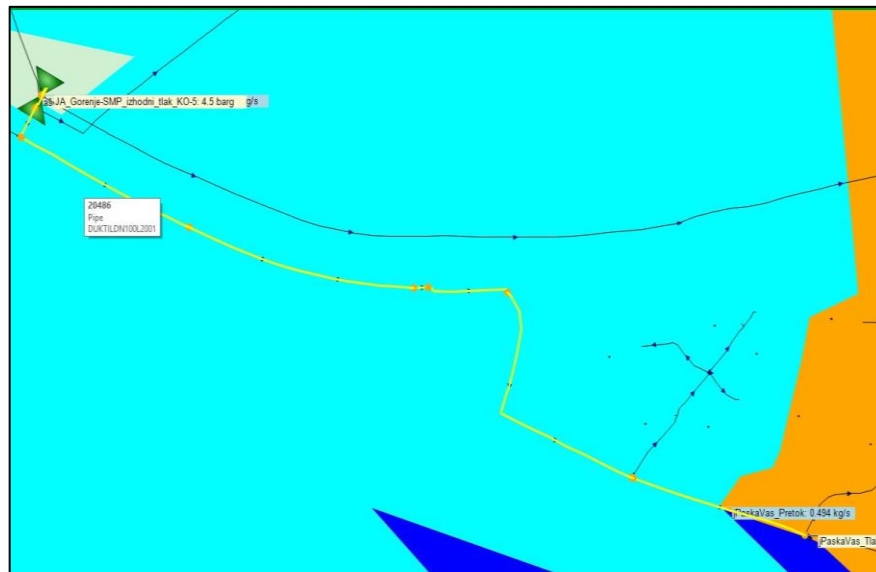
Pri sedmi kalibracijski poti na trasi, med jaškom Rečica 2 in jaškom Rečica 3, umerjanja s korekcijskim faktorjem ni bilo potrebno izvesti, saj po opravljeni simulaciji je razlika med merjenim in izračunanim tlakom znašala 0,00 bar in ni bilo potrebe po dodatnem umerjanju, zato je korekcijski faktor ostal 1.



Slika 28: Trasa JA Rečica 3 – ČP Podgora

Pri umerjanju osme kalibracijske poti na trasi, med jaškom Rečica 3 in črpališčem Podgora je razlika med merjenim in izračunanim tlakom 0,07 bar. Razlika med merjenim in izračunanim tlakom ustreza

zgoraj podanem pogoju. Umerjanje smo izvedli s pomočjo izračunanega korekcijskega faktorja, ki znaša 0,5.



Slika 29: Trasa JA Gorenje – jPaška vas

Pri umerjanju devete kalibracijske poti na trasi, med jaškom Gorenje in jaškom Paška vas, smo ugotovili, da umerjanja ni možno izvesti, ker pride do previsokega odstopanja pri tlaku v jašku Paška vas. Izračunani tlaki namreč visoko odstopajo od merjenih, in sicer za več kot 1 bar. Glede na to, da gre za osamljeno napako, lahko predpostavimo, da se je zgodila napaka pri izvajanju meritev v danem obdobju. Dodatno umerjanje bi se dalo izvesti ob dodatni vgradnji merilnikov tlaka znotraj merilnega območja.



Slika 30: Trasa JA Rečica 1(izhodni tlak) – JA Rečica 4 (izhodni tlak)

Pri umerjanju deste kalibracijske poti na trasi, med jaškom Rečica 1 (izhodni tlak) in jaškom Rečica 4 (izhodni tlak) smo ugotovili, da se umerjanja ne da izvesti, ker sta meritvi tlaka med seboj neodvisni, zaradi mešalne točke, ki se pojavi na kalibracijski poti. V točki mešanja se srečata tokova iz nasprotnih smeri, kar je podoben efekt kot če bi na cevi med dvema merjenima točkama imeli zaprt ventil. Dodatno umerjanje bi se dalo izvesti ob dodatni vgradnji merilnikov tlaka na kalibracijski poti.



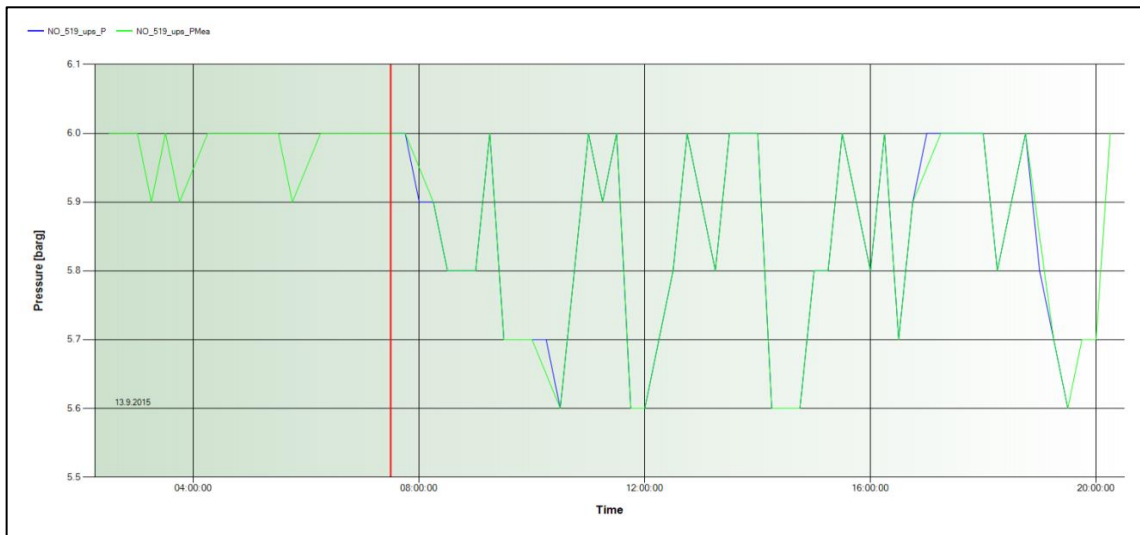
Slika 31: Trasa JA Rečica 1 (vhodni tlak) – JA Rečica 4 (vhodni tlak)

Pri enajsti kalibracijski poti na trasi, med jaškom Rečica 1 (vhodni tlak) in jaškom Rečica 4 (vhodni tlak), umerjanja s korekcijskim faktorjem ni bilo potrebno izvesti, saj po opravljeni simulaciji je vrednost razlike med merjenim in izračunanim tlakom znašala 0,11 bar, kar je zadoščalo dovoljenim kriterijem odstopanja. Potrebe po dodatnem umerjanju ni bilo, zato je korekcijski faktor ostal 1.



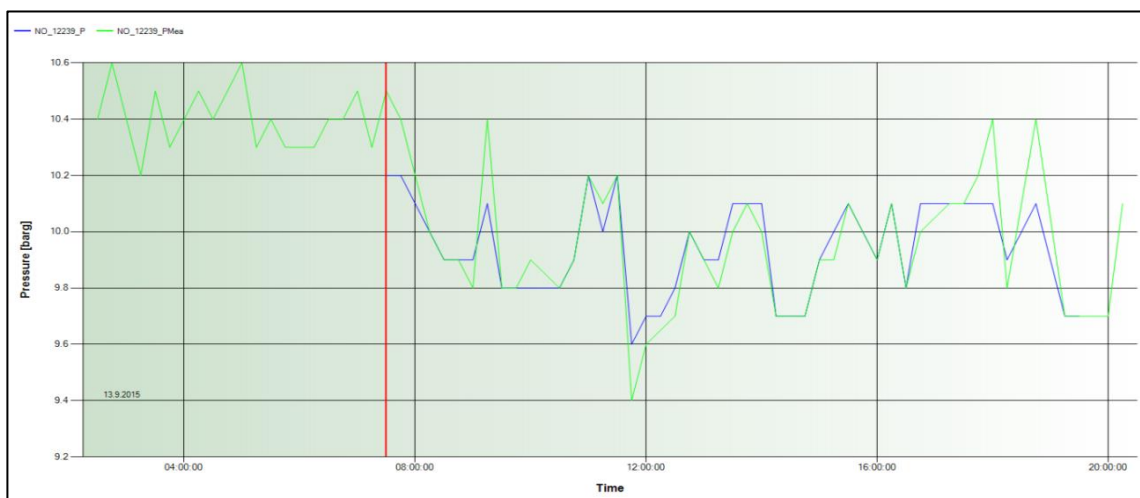
### 5.2.1 Prikaz diagramov tlačnih razmer po izvedbi umerjanja na vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki

Umerjanje je izvedeno za vodovodni sistem Šmartno ob Paki. Rezultati tlačnih razmer so prikazani v nadaljevanju. Kot pogoj je določena največja vrednost odstopanja med meritvami in rezultati, in sicer  $\pm (0,01 - 0,15)$  bar. Zelena linija predstavlja meritev, modra linija predstavlja izračun.



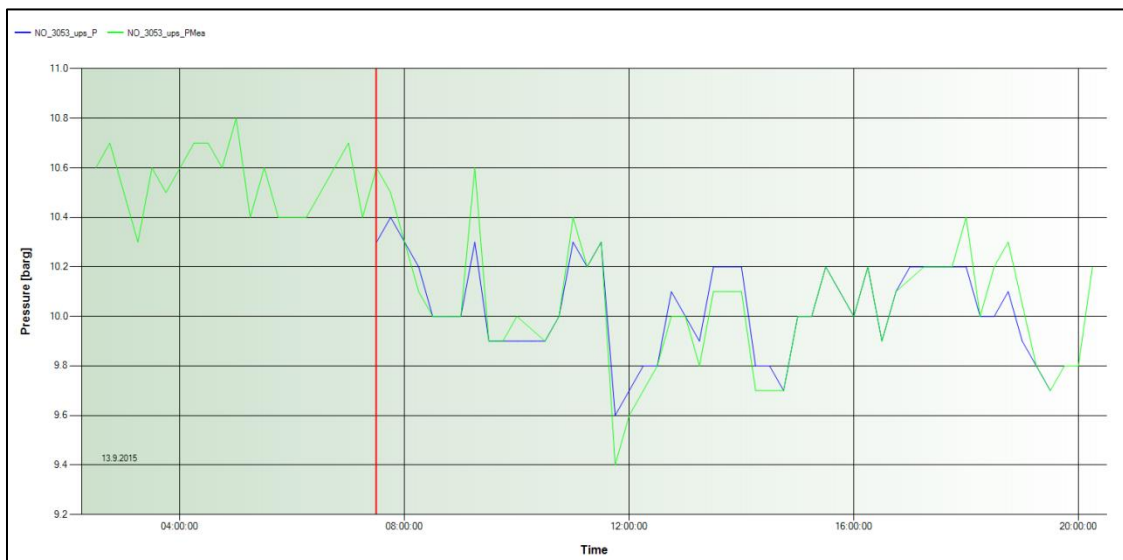
Graf 16: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Rudnik-SMP\_izhodni tlak\_KO-1«

Graf 16 prikazuje izhodne tlačne razmere v jaški Rudnik (KO-1) po opravljenem umerjanju s pomočjo korekcijskega faktorja 0,41. Iz grafa 16 je razvidno, da se liniji merjenega tlaka in izračunanega tlaka relativno dobro prekrivata.



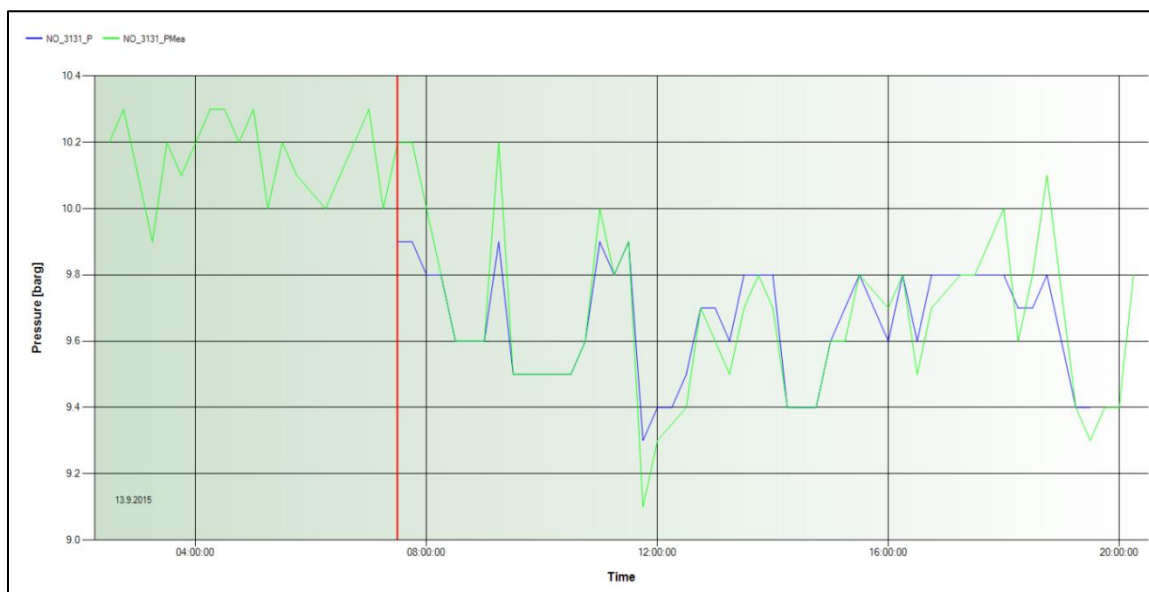
Graf 17: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Gorenje-SMP\_vhodni tlak«

Graf 17 prikazuje vhodne tlačne razmere v jašku Gorenje po opravljenem umerjanju s pomočjo korekcijskih faktorjev 3,42 ter 0,36. Iz grafa 17 je razvidno, da linija izračunanih vrednosti tlaka sledi liniji merjenih vrednosti tlaka.



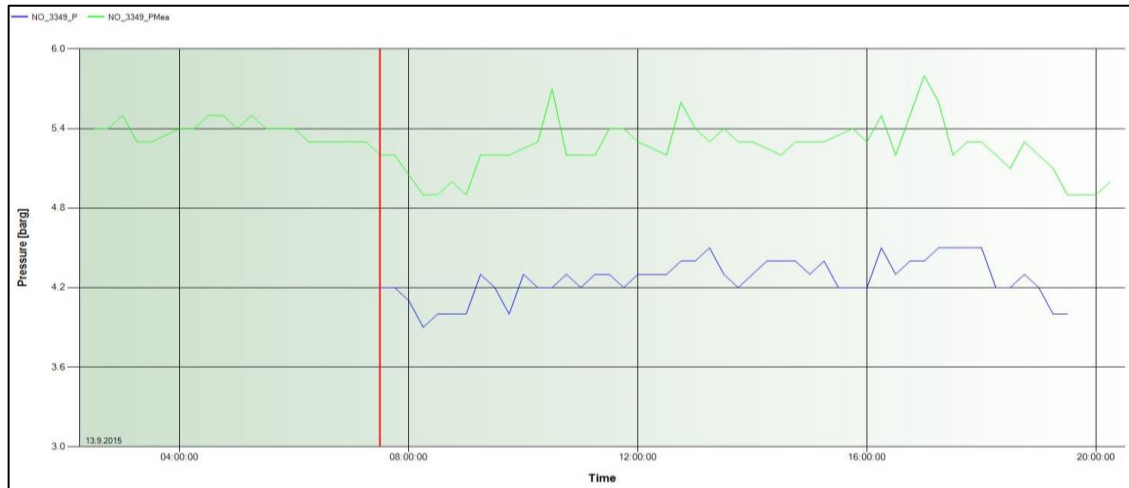
**Graf 18: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Smartno-SMP\_vhodni\_tlak\_RKO-7«**

Graf 18 prikazuje vhodne tlačne razmere v jašku Šmartno (RKO-7) po opravljenem umerjanju s pomočjo korekcijskega faktorja 3,42. Iz grafa 18 je razvidno, da linija izračunanih vrednosti tlakov sledi liniji merjenih vrednosti tlakov.



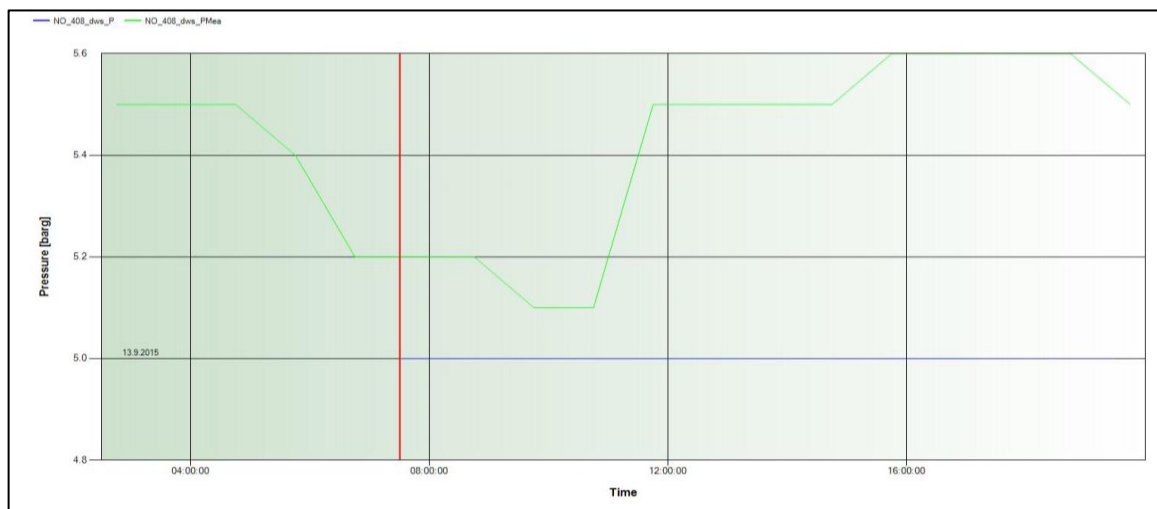
**Graf 19: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Gavce\_vhodni\_tlak\_KO-6«**

Graf 19 prikazuje tlačne razmere v jašku Gavce po opravljenem umerjanju s pomočjo korekcijskega faktorja 0,36. Iz grafa 19 je razvidno, da linija izračunanih vrednosti tlakov sledi liniji merjenih vrednosti tlakov.

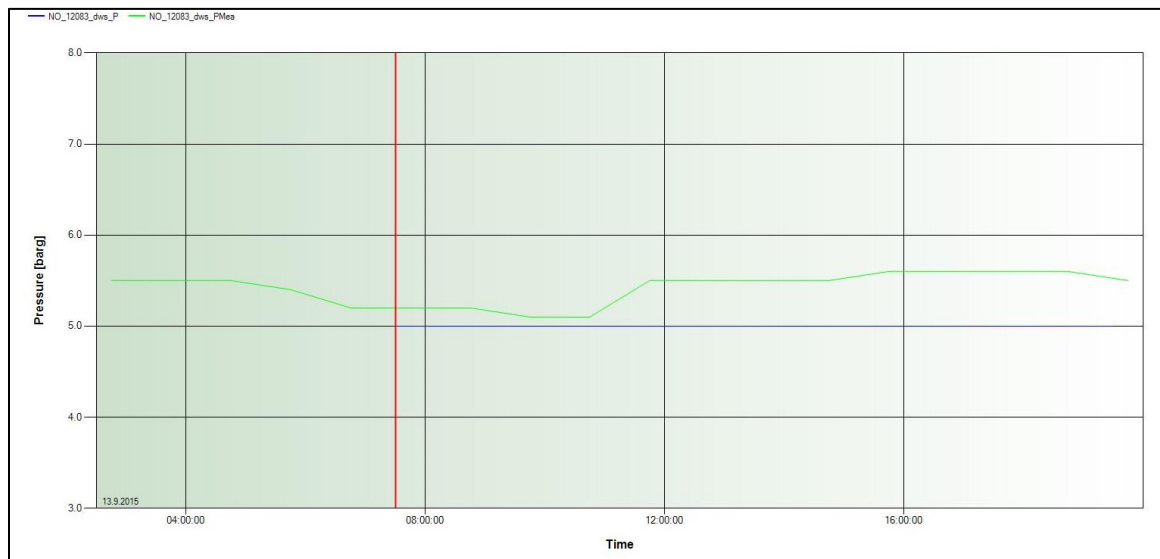


**Graf 20: Prikaz tlačnih razmer za »jPaskaVas\_tlak«**

Graf 20 prikazuje tlačne razmere v jašku Paška vas, kjer ni bilo opravljeno umerjanje. Iz Grafa 20 je razvidno, da vrednosti tlaka v jašku Paška vas niso umerjene. Umerjanja s korekcijskim faktorjem se ni dalo izvesti, zaradi previsoke razlike med vrednostjo merjenega in izračunanega tlaka, ki znaša več kot 1 bar.

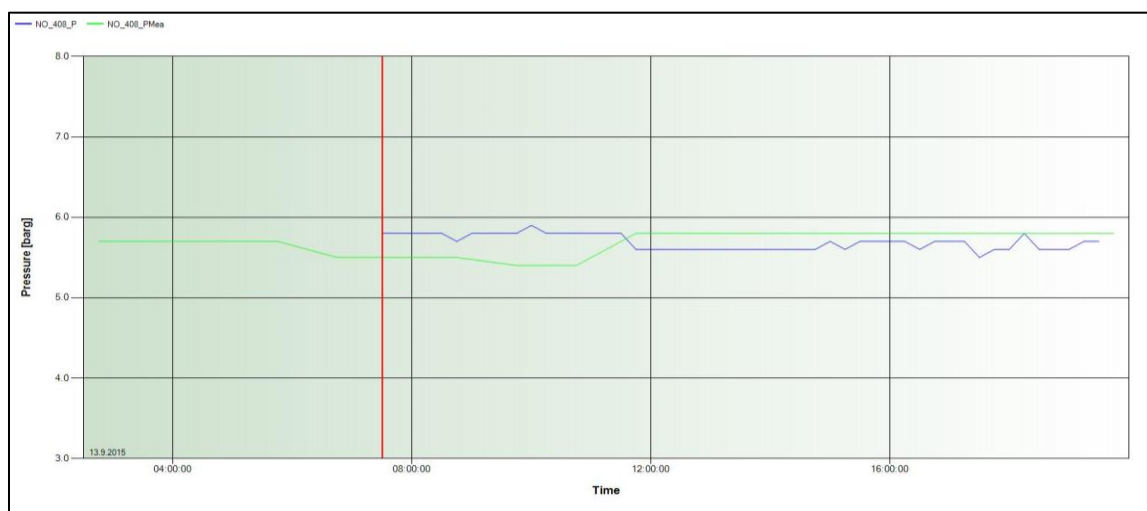


**Graf 21: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Rečica\_1\_izhodni\_tlak«**

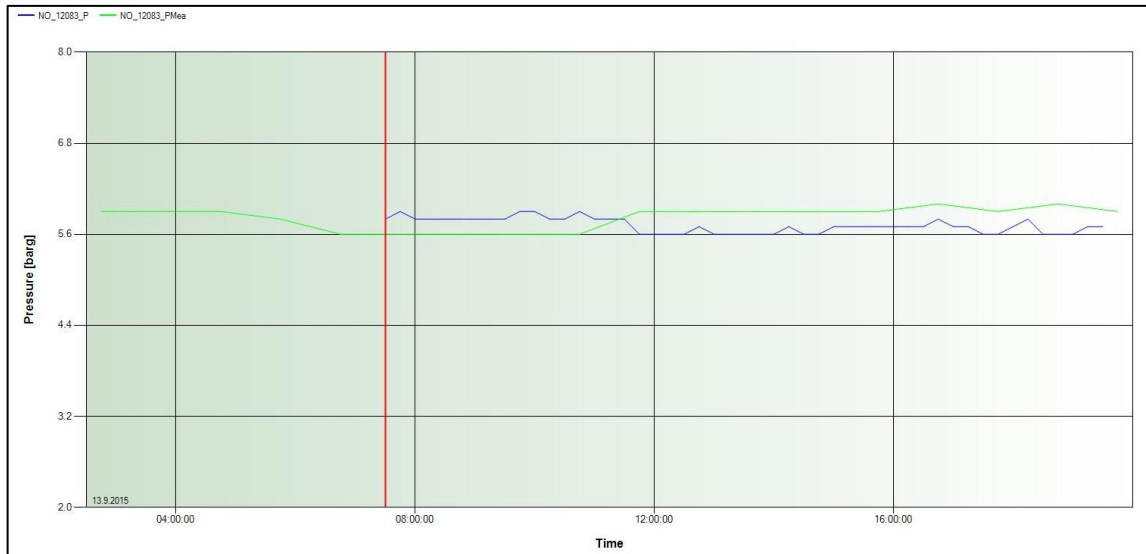


Graf 22: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Rečica\_4\_izhodni\_tlak«

Grafa 21 in 22 prikazujeta izhodne tlačne razmere v jašku Rečica 1 in jašku Rečica 2, kjer umerjanja nismo izvedli. Iz grafov 21 in 22 je razvidno, da tlačne vrednosti niso umerjene. Umerjanja ni bilo možno izvesti, ker sta meritvi tlaka med seboj neodvisni, zaradi pojava mešalne točke na kalibracijski poti.

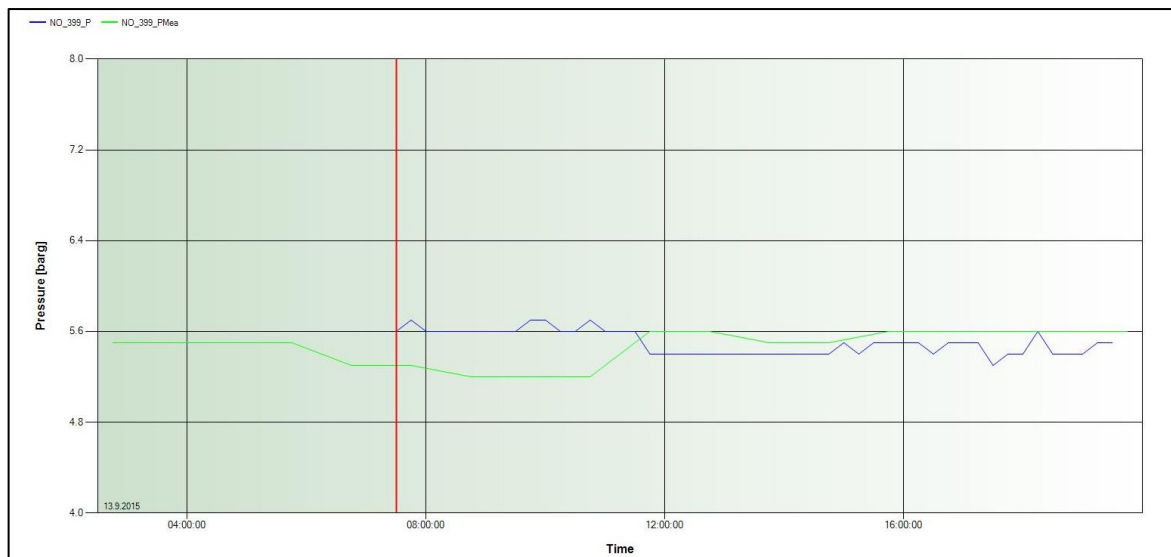


Graf 23: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Rečica\_1\_vhodni\_tlak«

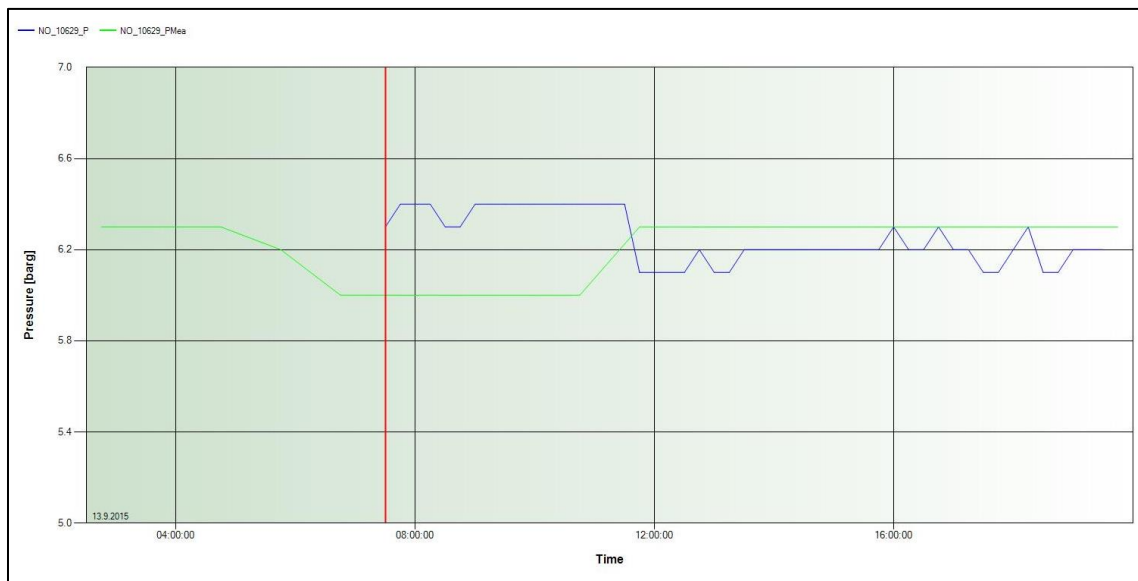


**Graf 24: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Rečica\_4\_vhodni\_tlak«**

Grafa 23 in 24 prikazujeta vhodne tlačne razmere v jašku Rečica 1 in jašku Rečica 4, kjer umerjanje s korekcijskim faktorjem ni bilo potrebno izvesti, saj je razlika med merjenim in izračunanim tlakom zadostila kriteriju dovoljenega območja, in sicer:  $\pm (0,01 - 0,15)$  bar.

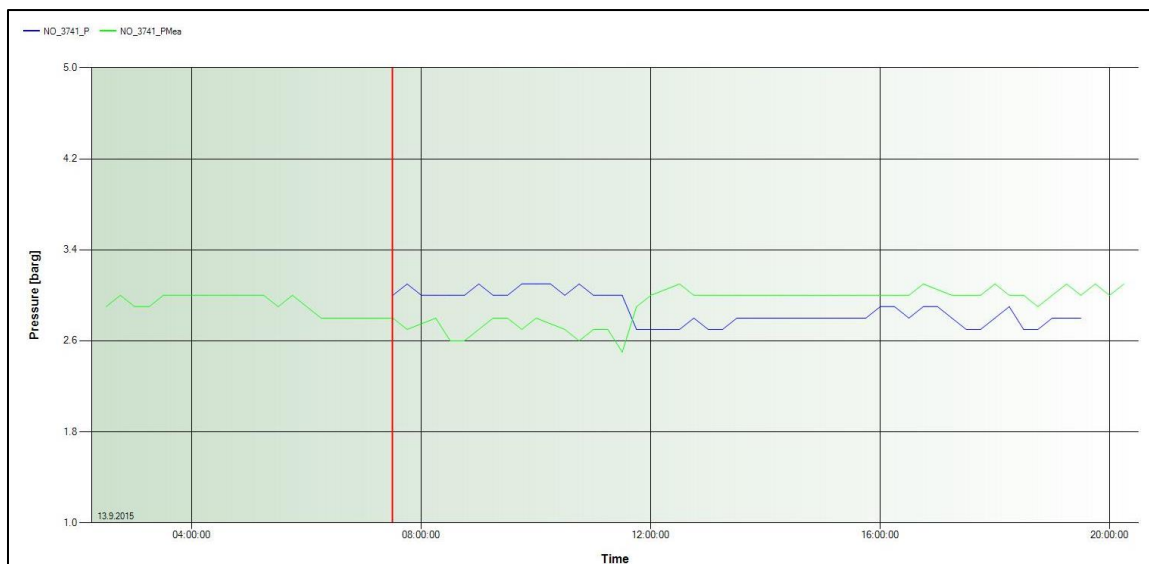


**Graf 25: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Rečica\_2\_vhodni\_tlak«**



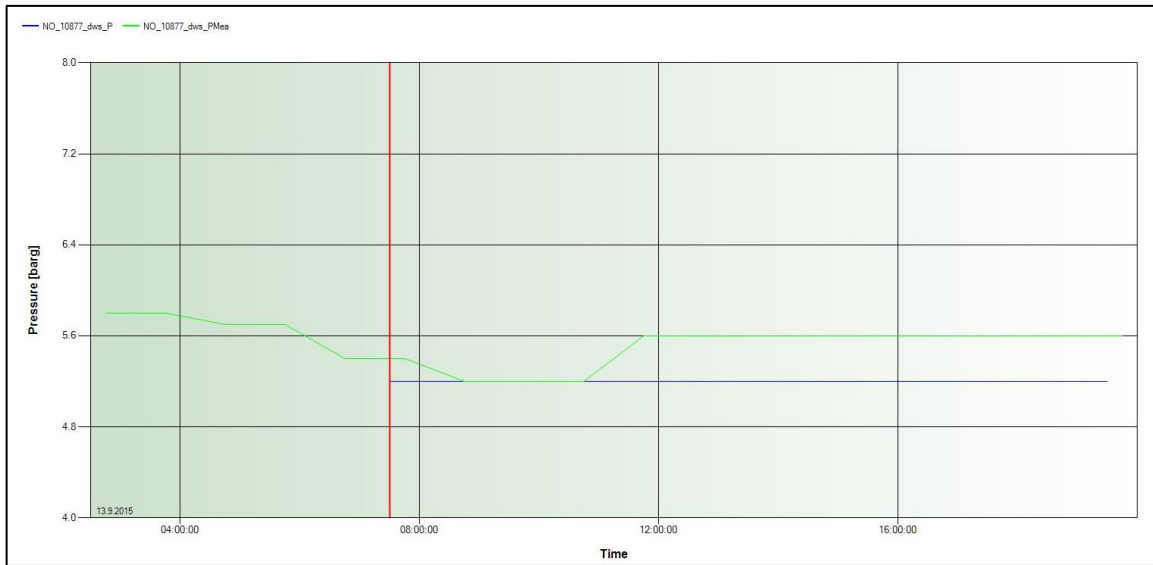
**Graf 26: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Rečica\_3\_vhodni\_tlak«**

Grafa 25 in 26 prikazujeta vhodne tlačne razmere za jašek Rečica 2 in jašek Rečica 3, kjer umerjanja s korekcijskim faktorjem ni bilo potrebno izvesti, saj je razlika med merjenim in izračunanim tlakom zadostila kriteriju dovoljenega območja, in sicer:  $\pm (0,01 - 0,15)$  bar..

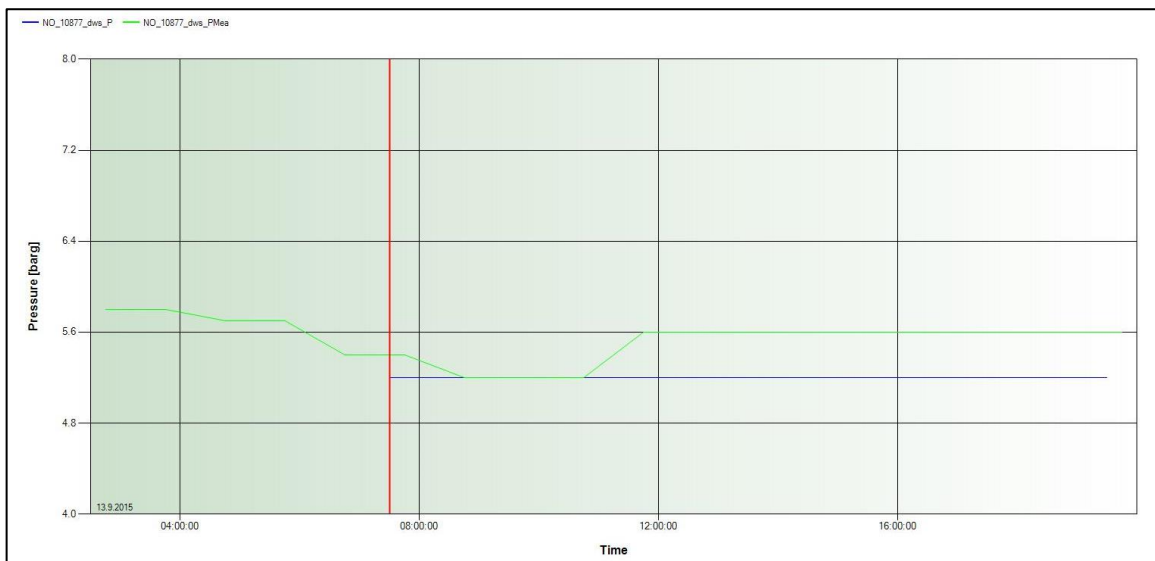


**Graf 27: Prikaz tlačnih razmer za »CP\_Podgora\_tlak«**

Graf 29 prikazuje tlačne razmere za črpališče Podgora po opravljenem umerjanju s pomočjo korekcijskega faktorja 0,5.



**Graf 28: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Rečica\_3\_izhodni\_tlak«**



**Graf 29: Prikaz tlačnih razmer za »JA\_Rečica\_5\_1\_izhodni\_tlak«**

Grafa 25 in 26 prikazujeta izhodne tlačne razmere v jašku Rečica 5\_1 in jašku Rečica 3. Umerjanja ni bilo možno izvesti, ker sta meritvi tlaka med seboj neodvisni, zaradi pojava mešalne točke na kalibracijski poti.

## 6 ZAKLJUČEK

Namen diplomske naloge je bil prikazati postopek umerjanja vodovodnega sistema ter izvesti umerjanje računalniškega modela vodovodnega sistema Šmartno ob Paki. Ob ustvarjanju le-te smo se seznanili z hidravličnimi razmerami vodovodnega sistema Šmartno ob Paki ter njegovim delovanjem. V prvem delu diplomske naloge so bile obdelane teoretične osnove, nato v drugem delu le-te pa računalniško modeliranje in umerjanje vodovodnega sistema Šmartno ob Paki s programsko opremo Aquis. Opisali smo postopke makrokalibracije in mikrokalibracije, podroben postopek kalibracije z računalniškim orodjem Aquis, kjer smo opisali enačbe za spremembo tlaka ter za korekcijski faktor.

Umerjanje modela je v veliki meri odvisno od samih meritev ter od razporeditve pretoka po omrežju. Za boljše rezultate umerjanja je potrebno imeti vsaj letne podatke o porabi posameznih odjemalcev ter omrežje razdeliti na več merilnih območij na podlagi postavljenih stacionarnih merilnikov pretoka. Za doseganje dobrega rezultata je ključnega pomena izbira merilnega mesta in merilne opreme, ki mora biti kvalitetna, verodostojna in certificirana.

Po pridobitvi procesnih podatkov pretoka in tlaka iz vseh novozgrajenih merilnih mest po omrežju v kombinaciji z obstoječimi meritvami v SCADA sistemu. Pridobljene meritve smo predhodno obdelali, saj v realnih sistemih zaradi objektivnih razlogov (izpad meritev, okvara merilnikov ipd.) lahko pride do izpadov ter se odrazi v napačnih podatkih. V Aquisu, smo opravili postopek umerjanja. Na modelu smo določili 11 kalibracijskih poti, kjer so na začetku in na koncu vsake poti postavljene meritve tlaka, v ceveh pa meritve pretoka, katere smo v nadaljevanju umerjali.

Najprej smo umerili pretočne razmere na vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki. Izvedena je bila simulacija z vklopljeno funkcijo »Flow adaption«, kjer je Aquis izračunal neto pretok cone in s tem določil porabo odjemalcev v vsakem časovnem koraku. Za simulacijo je bilo vzeto obdobje 13. 9. 2015 od 7:30 – 19:30. Pri preverjanju pretočnih razmer preverjamo merjene in izračunane vrednosti pretoka za vsako merilno mesto. Rezultate pretočnih vrednosti smo prikazali z diagrami, kjer modra linija predstavlja meritve in zelena linija predstavlja izračun. Iz diagramov je razvidno, da so izračunani pretoki približno enaki meritvam. Na tako pripravljenem modelu smo nato še umerili tlačne razmere na vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki. Umerjanje smo izvedli ločeno po kalibracijskih poteh in rezultate prikazali z diagrami. Določena je bila tudi največja dovoljena vrednost odstopanja med meritvami in rezultati, in sicer  $\pm (0,01 - 0,15 \text{ bar})$ .

Na določenih kalibracijskih poteh (JA\_Rečica\_1\_vhodni\_tlak – JA\_Rečica\_4\_vhodni\_tlak in JA\_Rečica\_2\_vhodni\_tlak – JA\_Rečica\_3\_vhodni\_tlak) umerjanje s korekcijskim faktorjem ni bilo potrebno, saj je razlika med merjenim in izračunanim tlakom na merilnem mestu bila zanemarljiva oz. je ustrezala pogoju največje dovoljene vrednosti odstopanja.

Na kalibracijskih poteh (JA\_Rečica1\_izhodni\_tlak – JA\_Rečica\_4\_izhodni\_tlak, JA\_Rečica\_3\_izhodni\_tlak – JA\_Rečica\_5\_1\_izhodni\_tlak) se umerjanja ni dalo izvesti, ker sta meritvi tlaka med seboj neodvisni, ker se na kalibracijski poti pojavi mešalna točka. Potrebno bi bilo dodatno vgraditi merilnike tlaka in tako razdeliti trenutno kalibracijsko pot na dva dela in merjenje ponoviti.

Na kalibracijski poti (JA\_Gorenje-SMP\_izhodni\_tlak – jPaskaVas) se umerjanja prav tako ni dalo izvesti, zaradi meritev v jašku Paška vas, ki so visoko odstopale od izračuna, in sicer za več kot 1 bar. Obstaja velika verjetnost, da so meritve nezadovoljive točnosti in je v prihodnje potrebno preveriti natančnost vgrajene merilne opreme ter ponoviti umerjanje.



Na preostalih kalibracijskih poteh se je umerjanje izvedlo s pomočjo izračunanega korekcijskega faktorja, ki se je prepisal v dotično cev.

Po umerjanju smo dobili model z natančnostjo 0,15 bara, ki nam lahko v bodoče služi za izračun hidravličnih razmer na omrežju. Kot rezultat umerjanja je nastal hidrodinamični model vodovodnega sistema Šmartno ob Paki, ki predstavlja aproksimacijo realnega stanja v naravi. Tako umerjen model predstavlja osnovo za spremljanje parametrov na omrežju tudi na mestih, kjer ni meritev, in sicer s pomočjo podatkov, ki se pošiljajo v realnem času iz SCADA sistema v Aquis.

S časoma bo v vodovodnem sistemu Šmartno ob Paki dostopno vse več meritev za daljše časovno obdobje, kar bo privedlo do čedalje kvalitetnejšega računalniškega hidravličnega modela. Takšen model nam bo omogočil kvalitetne analize in optimizacijo bodisi pri načrtovanju obnove omrežja in pri obratovanju le tega.

**VIRI**

Benedik, T., Bedenčič, B. 2013. Poročilo o umerjanju hidravličnega modela vodovodnega sistema Šmartno ob Paki: 27 str.

Banovec, P., Kozelj, D., Steinman, F., Šantl, S. 2006. Izbira merilnih mest v vodovodnih sistemih z genetskimi algoritmi, Strojniški vestnik volume 52, issue 12. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: str. 817 – 834.

Kay, M. 1998. Practical hydraulics: 253 str.

Komunalno podjetje Velenje. 2007. PZI Povezovalni vodovod Velenje – Šmartno ob Paki

Komunalno podjetje Velenje. 2009. Investicijski program Celovita oskrba s pitno vodo v Šaleški dolini: 51 str.

Komunalno podjetje Velenje. 2009. Program oskrbe s pitno vodo za obdobje od l. 2014 – 2017: 51 str.

Komunalno podjetje Velenje. 2010. PZI Izgradnja primarnega cevovoda Šmartno ob Paki\_Rečica. Velenje, Komunalno podjetje Velenje.

Komunalno podjetje Velenje. 2014. Pravilnik o tehnični izvedbi in uporabi vodovodnih objektov in naprav. Velenje, Komunalno podjetje Velenje.

Komunalno podjetje Velenje, 2015. Čista in zdrava pitna voda – Naš zaklad in naš ponos.

Kozelj, D. 2005, Umerjanje hidravličnega modela cevovodnega omrežja z uporabo genetskih algoritmov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Larock, B.E., Jeppson, R.W., Watters, G.Z. 2000. Hydraulics of Pipeline Systems. Boca Raton, C, RC: 533 str.

Mays, W. L. 1999. Hydraulic design handbook: Chapter 24.

Ministrstvo za okolje in prostor, 2006. Operativni program oskrbe s pitno vodo. Ljubljana: 84. str.

Steinman, F., Šantl, S. 2009. Postopek makrokalibracije hidravličnega modela vodooskrbnih sistemov, Gradbeni vestnik, letnik 58. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: str. 194 – 203.

Steinman, F. 2010. Hidravlika. Drugi ponatis. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 294 str.

Husić, A. 2016. Umerjanje hidravličnega modela vodovodnega sistema Šmartno ob Paki. Dip. nal. – UNI. Ljubljana, UL FGG, Vodarstvo in komunalno inženirstvo.

---

Stropnik, P. 2006. Hidravlična analiza vodovodnega sistema Šmartno ob Paki. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Schneider electric, 2012. Aquis. User guide: 820 str.

Šantl, S. 2007, Makrokalibracija pri hidravličnem modeliranju vodooskrbnih sistemov. Magistrska naloga št. 196. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

UL, 2010. Zapiski s predavanj predmeta hidravlika (Steinman).

UL, 2010. Zapiski s predavanj predmeta hidromehanika (Četina).

Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A. in sod. 2003. Advanced Water Distribution Modelling and Management. Prva izdaja. Waterbury, haestad methods: 800 str.

Žerovnik, P. 2009, Oskrba z vodo. EDC Kranj, Višja strokovna šola: 89 str.

### **Elektronski viri:**

A Drobnič B., Mori M 2010, Karakteristike centrifugalnih črpalk in cevovoda. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo. <http://lab.fs.uni-lj.si/kes/laboratorijske/crpalke.pdf> (Pridobljeno 10.12.2015).

B Meritve nivoja in tlaka. [www.eltratec.com](http://www.eltratec.com) (Pridobljeno 10. 11. 2015.)

C Šmartno ob Paki 2009. <http://www.smartnoobpaki.si/predstavitev/demografski-podatki> (Pridobljeno 8.10.2015).

D Picture Slovenia. <http://www.pictureslovenia.com> (Pridobljeno 15.1.2016).

E Celovita oskrba s pitno vodo v Šaleški dolini 2012. <http://www.saleska-dolina.si/> (Pridobljeno 15.1.2016).

F The continuity equation 2012.

[http://umdborg.pbworks.com/w/page/60652869/The%20continuity%20equation%20\(2012\)](http://umdborg.pbworks.com/w/page/60652869/The%20continuity%20equation%20(2012))

(Pridobljeno 15. 9. 2015.).



A

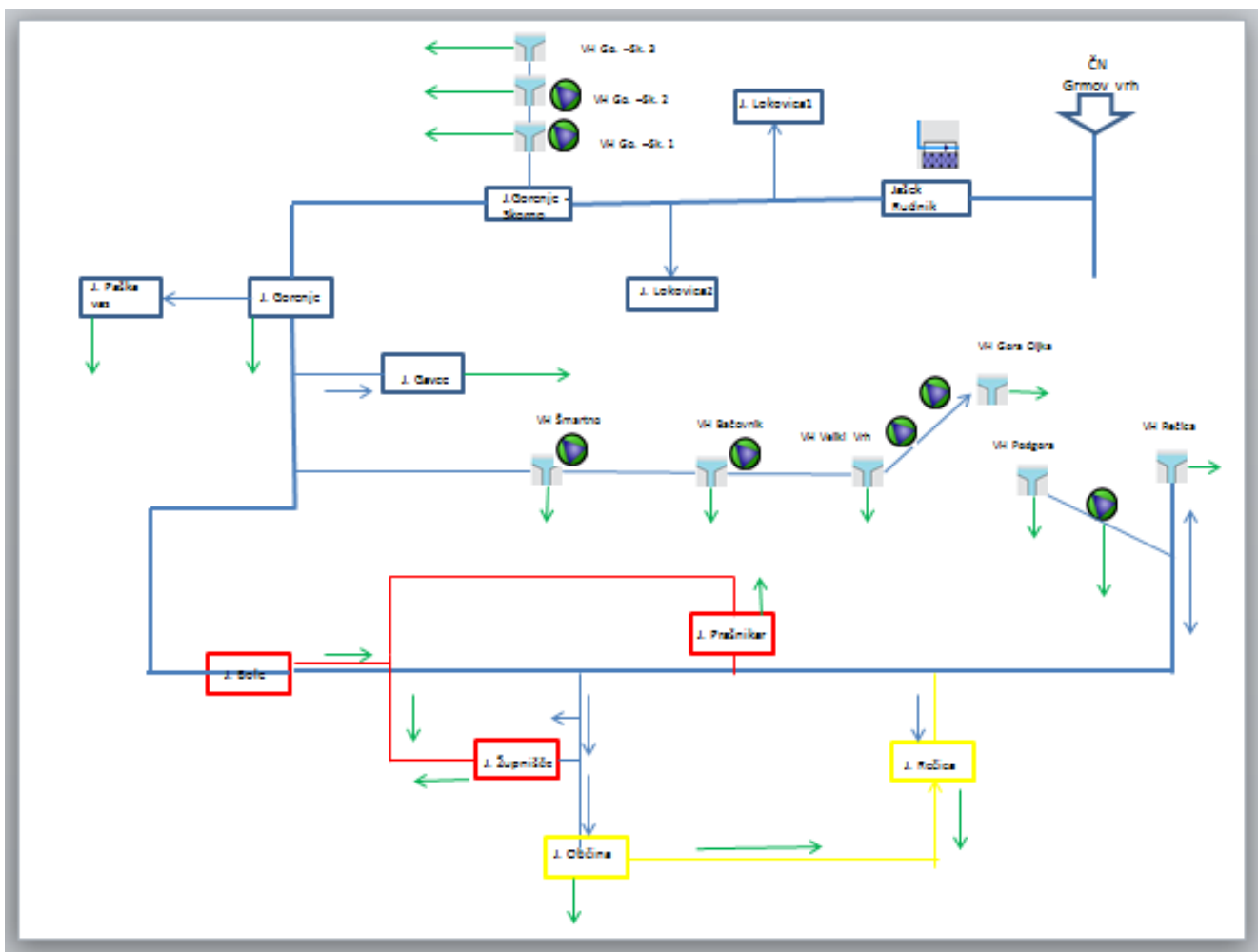
Husić, A. 2016. Umerjanje hidravličnega modela vodovodnega sistema Šmartno ob Paki.  
Dip. nal. – UNI. Ljubljana, UL FGG, Vodarstvo in komunalno inženirstvo.

---








## **SEZNAM PRILOG**

PRILOGA A: Shematski prikaz vodovodnega sistema Šmartno ob Paki

PRILOGA A: Shematski prikaz vodovodnega sistema Šmartno ob Paki



Legenda:

	Jašek
	Vir
	Vodohran (VH)
	Črpališče
	Poraba vode
	Smervode
	Magistralni vod