

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Visokošolski program Gradbeništvo,
Smer operativno gradbeništvo

Kandidat:

Uroš Peklaj

Matematični model vodovodnega omrežja Dravljje

Diplomska naloga št.: 221

Mentor:
prof. dr. Boris Kompare

Somentor:
asist. dr. Matej Uršič

Ljubljana, 14. 4. 2006

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **UROŠ PEKLAJ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»**MATEMATIČNI MODEL VODOVODNEGA OMREŽJA DRAVLJE**«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana, april 2006

.....

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 519.61/.64:628.1(043.2)
Avtor: Uroš Peklaj
Mentor: izr. prof. dr. Boris Kompare
Somentor: Matej Uršič uni.dipl.inž.VKI
Naslov: MATEMATIČNI MODEL VODOVODNEGA OMREŽJA
DRAVLJE
Obseg in oprema: 85 str., 18 pregl., 32 gr., 33 sl., 14 en.
Ključne besede: Hidravlični model, tlak, pretok, EPANET 2.0, ArcView, poraba,
GIS podatki, JP VO-KA Ljubljana, hidravlični izračun, kalibracija

Izveček

V diplomski nalogi sem izdelal hidravlični model naselja Dravlje in Draveljske gmajne in ga primerjal z dejanski meritvami pretoka in tlaka na terenu. Hidravlični model je izdelan na podlagi GIS podatkov iz katastra Javnega podjetja Vodovod-Kanalizacija, Ljubljana (JP VO-KA). S programom EPANET 2.0 sem na podlagi hidravličnega modela območja Dravlje časovno simuliral hidravlične razmere enodnevnih meritve in požarne obremenitve v območju. Podatke iz terena sem pridobil na podlagi umerjanja modela sistema Šentvid. Podatke tlaka in pretoka sem primerjal s podatki, ki jih je izračunal program EPANET 2.0 s hidravličnim izračunom.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/.64:628.1(043.2)
Author: Uroš Peklaj
Supervisor: assoc.prof.dr. Boris Kompare
Cosupervisor: Matej Uršič uni.dipl.inž. VKI
Title: MATEMATICAL MODEL OF DRINKING WATER SUPPLY NETWORK DRAVLJE
Notes: 85 p., 18 tab., 32 gr., 33 fig., 14 eq.
Key words: hydraulic model, pressure, flow, EPANET 2.0, ArcView, demand, GIS data, Javno podjetje Vodovod-Kanalizacija, Ljubljana, hydraulic computation, calibration

Abstract

In my project I have built a hydraulic model of region Dravljje and Draveljska gmajna and compared it with the actual measurement of flow and pressure in this region. Hydraulic model is made on the basis of GIS database from land register of Javno podjetje Vodovod-Kanalizacija, Ljubljana. Using the program EPANET 2.0 I have simulated hydraulic conditions of one-day's measurement and of the fire protection demand, based on the hydraulic model for region Dravljje. Data on actual measurement of flow and pressure in this region have been collected on the basis of calibration of Šentvid system's model. I have compared these actual data with the data, which were calculated with hydraulic computation by program EPANET 2.0.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Borisu Kompare in somentorju Mateju Uršiču uni.dipl.inž. VKI.

Zahvala Javnemu podjetju Vodovod – Kanalizacija pri finančni podpori ob zaključku študija.

Zahvala tudi kolektivu podjetja (posebej merilnemu oddelku pri Službi vzdrževanja vodovodnega omrežja) za skupno sodelovanje pri eksperimentalnem delu diplomske naloge.

Zahvala za vzpodbudo in razumevanje v času študija ob rednem delu in pri pisanju diplomske naloge soprogi Simoni, sinu Nejcju in hčerki Karin.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	ZGODOVINA LJUBLJANSKEGA VODOVODA	3
3	OBMOČJE DRAVELJ	6
3.1	Sistem ljubljanskega vodovodnega omrežja	6
3.2	Sistem Šentvid	8
3.3	Območje Dravelj	9
4	OPIS PROGRAMA EPANET 2.0 IN OSNOVE HIDRAVLIKE TOKA POD TLAKOM	12
4.1	Opis programa	12
4.2	Objekti za mrežni model in njihov kratek opis	12
4.2.1	Opis modela	12
4.2.2	Elementi modela	13
4.2.3	Opis elementov	14
4.2.3.1	Vozlišče	14
4.2.3.2	Cev	14
4.2.3.3	Vodni vir	15
4.2.3.4	Vodohran	15
4.2.3.5	Črpalka	15
4.2.3.6	Ventili, zasuni, lopute - zaporne armature	16
4.3	Osnove hidravlike programa EPANET	17
4.4	Osnove hidravlike v cevovodih	17
4.4.1	Bernoullijeva enačba	17
4.4.2	Hidravlične tlačne izgube	18
5	MODEL OBMOČJA DRAVELJ	21
5.1	Izdelava modela območja Dravelj	21

5.2	Elementi modela območja Dravelj	21
5.3	Priprava posameznih elementov za izdelavo modela	22
5.3.1	Vozlišče	22
5.3.1.1	Dnevno nihanje porabe	24
5.3.1.2	Višina vozlišča - višina merilnika tlaka	26
5.3.2	Cev	28
5.3.2.1	Dolžina	28
5.3.2.2	Premer	28
5.3.3	Vodni vir	30
5.4	Rezultati matematičnega modela programa EPANET	33
5.4.1	Shematski prikaz hidravličnega modela	33
5.4.2	Simulacija 24 ur	34
5.4.3	Simulacija izpusta (požarna obremenitev)	36
6	MERITVE TLAKOV IN PRETOKOV NA OBMOČJU DRAVELJ	38
6.1	Opis merilne opreme	38
6.1.1	Merilnik tlaka	38
6.1.2	Merilnik pretoka KROHNE	39
6.1.3	Merilnik pretoka ABB WP-T-D	40
6.2	Potek meritev tlakov in pretokov na območju Dravelj	40
6.2.1	Meritev tlaka	43
6.2.2	Meritev pretoka	44
6.2.2.1	Meritev pretoka za celotno območje	44
6.2.2.2	Meritev (izračun) pretoka ob izpustu preko ročnika z ustniki	44
6.3	Podatki iz dispečerskega centra Kleče za črpališče Šentvid	51
6.3.1	Tedenski podatki	51
6.3.2	Dnevni podatki	52
6.4	Rezultati terenskih meritev za območje Dravelj	53
6.4.1	Graf terenskih meritev za območje Dravelj	53
6.4.2	Graf dnevne meritve za območje Dravelj	54
6.4.3	Graf meritev ob izpustu vode preko ročnikov (požarna obremenitev)	55

6.4.3.1	Izračuni iztečene vode ob simulaciji požarne meritve	57
7	PRIMERJAVA REZULTATOV MERITEV IN HIDRAVLICNEGA IZRAČUNA	60
7.1	Primerjava 24 urne meritve	60
7.1.1	Tlak	61
7.1.2	Pretok	64
7.2	Primerjava meritev ob izpustu vode preko ročnikov (požarna obremenitev)	66
7.2.1	Tlak	67
7.2.2	Pretok	71
7.3	Preverjanje modela območja Dravelj	71
7.3.1	Rezultati kontrolnih meritev ob preverjanju modela	72
7.3.1.1	Preračun iztečenih količin	72
7.3.1.2	Graf meritve tlaka ob preverjanju modela	73
7.3.1.3	Primerjava tlaka ob preverjanju modela	74
8	ZAKLJUČEK	81
	VIRI	84

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1	Profili in dolžine cevovodov sistema Šentvid	8
Preglednica 2	Pregled materiala profila cevi in njihova dolžina na območju Dravelj	11
Preglednica 3	Elementi modela programa EPANET in njihov opis	13
Preglednica 4	Tipi ventilov glede na njihovo funkcijo	16
Preglednica 5	Povprečna hrpavost e	18
Preglednica 6	Povprečni koeficient lokalnih izgub ξ	19
Preglednica 7	Porabniki v območju vozlišča 96 na Bohinjčevi ulici	22
Preglednica 8	Dnevno nihanje porabe vode za različna območja porabe [% dnevnega volumna]	24
Preglednica 9	Primer izračuna indeksa urne potrošnje	26
Preglednica 10	Kote merilnikov na terenu in v programu EPANET	28
Preglednica 11	Merilniki tlaka na območju Dravelj	43
Preglednica 12	Parametri uporabljeni ob nastavitvi merilnika pretoka Krohne UFM 610 P	44
Preglednica 13	Vrednosti koeficientov izgube	45
Preglednica 14	Vrednosti parametrov na Sliki 26	46
Preglednica 15	Lokalne in linijske izgube	47
Preglednica 16	Potek meritve ob izpustu vode preko ustnikov	55
Preglednica 17	Iztečena voda v času izpustov	57
Preglednica 18	Preglednica iztečene vode ob preverjanju modela	70

KAZALO GRAFIKONOV

Graf 1	Rast dolžine vodovodnega omrežja od leta 1890 do 2005	5
Graf 2	Pregled profilov cevi in njihovo dolžino na območju Dravelj	11
Graf 3	Prikaz dnevnega nihanja porabe vode različnih avtorjev in za različna območja porabe	24
Graf 4	Indeks potrošnje vode glede na merjen pretok	26
Graf 5	Simulacija tlaka s programom EPANET / 24 ur	35
Graf 6	Simulacija pretoka s programom EPANET / 24 ur	35
Graf 7	Simulacija tlaka s programom EPANET / požarna obremenitev	36
Graf 8	Simulacija pretoka s programom EPANET / požarna obremenitev	37
Graf 9	Tedenski graf podatkov iz dispečerskega centra Kleče za sistem Šentvid 20.05. - 27.05.2005	52
Graf 10	Dnevni podatki iz dispečerskega centra Kleče za sistem Šentvid 26.05.2005	53
Graf 11	Tedenska meritev tlakov in pretokov za območje Dravelj	54
Graf 12	Dnevna meritev tlakov in pretokov za območje Dravelj dne 26.05.2005	55
Graf 13	Meritev tlaka ob izpustu vode v območju Dravelj (požarna obremenitev)	56
Graf 14	Podatki za preračun izpustov vode	57
Graf 15	Simulacija programa EPANET tlak in pretok skupaj	60
Graf 16	Primerjava tlaka v vozlišču 110 - merilno mesto Celovška cesta	61
Graf 17	Primerjava tlaka v vozlišču 15 - merilno mesto Plešičeva ulica	62
Graf 18	Primerjava tlaka v vozlišču 48 - merilno mesto Ulica bratov Babnik	62
Graf 19	Primerjava pretoka na cevi 50 - merilno mesto Celovška cesta	64
Graf 20	Podatki tlaka in pretoka programa EPANET ob izpustu (požarna obremenitev)	66
Graf 21	Primerjava tlaka v vozlišču 110 - merilno mesto Celovška cesta	67
Graf 22	Primerjava tlaka v vozlišču 15 - merilno mesto Plešičeva ulica	68
Graf 23	Primerjava tlaka v vozlišču 48 - merilno mesto Ulica bratov Babnik	68

Graf 24	Primerjava tlaka v vozlišču 105 - merilno mesto Kamnogoriška ulica	69
Graf 25	Primerjava tlaka v vozlišču 1 - merilno mesto Korenčanova ulica	70
Graf 26	Primerjava pretoka na dovodni cevi 50 - merilno mesto Celovška cesta	71
Graf 27	Graf meritve tlaka ob izpustu vode ob preverjanju modela	73
Graf 28	Meritev tlaka ob preverjanju modela območja Dravelj	74
Graf 29	Primerjava tlaka ob preverjanje modela v vozlišču 110 - merilno mesto Celovška cesta	75
Graf 30	Primerjava tlaka ob preverjanje modela v vozlišču 15 - merilno mesto Plešičeva ulica	75
Graf 31	Primerjava tlaka ob preverjanje modela v vozlišču 48 - merilno mesto Ulica bratov Babnik	76
Graf 32	Primerjava tlaka ob preverjanje modela v vozlišču 105 - merilno mesto Kamnogoriška ulica	77

KAZALO SLIK

Slika 1	Vodohran Rožnik leta 1890	3
Slika 2	Objekt Kleče leta 1890	3
Slika 3	Ljubljansko vodovodno omrežje leta 1906	4
Slika 4	Sistem ljubljanskega vodovoda - glavni objekti	7
Slika 5	Shema sistem Šentvid	9
Slika 6	Ortofoto posnetek območja Dravelj	10
Slika 7	Shema simbolov elementov programa EPANET	12
Slika 8	Odsek cevi med prerezoma 1 in 2 - s pomočjo Bernoullijeve enačbe izrazimo zakon o ohranitvi energije	18
Slika 9	Zmanjšanje tlačne višine za premagovanje trenja h_f na dolžini cevi v smeri toka	19
Slika 10	Izrez vozlišča 96 na Bohinjčevi ulici iz programa EPANET	23
Slika 11	Izrez območja vozlišča 96 iz katastra JP VO-KA	23
Slika 12	Vzorec porabe 24 ur	26
Slika 13	Prikaz možnih postavitve merilnikov tlaka na terenu	27
Slika 14	Shema k preračunu časovnega vzorca nivoja gladine vodnega vira	31
Slika 15	Časovni vzorec nihanja gladine v vodnem viru nad vozliščem na Celovški cesti	32
Slika 16	Prikaz podatkov za linijski element CEV 50 na podlagi izračuna	33
Slika 17	Shema hidravličnega modela območja Dravelj	34
Slika 18	Merilnik tlaka MEMMY NT	38
Slika 19	Merilnik tlaka MEMMY	38
Slika 20	Merilnik pretoka KROHNE UFM 610P brez senzorjev	39
Slika 21	Prikaz delovanja ultrazvočnega merilnika UFM 610 P	39
Slika 22	Prikaz postavitve merilnih sond ultrazvočnega merilnika UFM 610 P	39
Slika 23	Merilnik pretoka ABB WP-T-D	40
Slika 24	Shema območja Dravelj z lokacijami merilnikov	42
Slika 25	Merilnik KROHNE v jašku na Celovški cesti	44
Slika 26	Prikaz hidravličnih izgub v napravi za izpust vode	46

Slika 27	Priprava za izpust z ustnikom 20 mm	50
Slika 28	Priprava za izpust z ustnikom 32 mm	51
Slika 29	Shema zapore zasunov ob kontrolni meritvi modela območja	72
Slika 30	Ponazoritev hitrosti vode v cevovodih ob preverjanju modela - normalna poraba	78
Slika 31	Ponazoritev hitrosti vode v cevovodih ob preverjanju modela - izpust iz enega hidranta	79
Slika 32	Ponazoritev hitrosti vode v cevovodih ob preverjanju modela - izpust iz dveh hidrantov	79
Slika 33	Prikaz hitrosti vode ob izpustu v območju brez zapore zasunov	80

1 UVOD

Hidravlično modeliranje je orodje, ki nam omogoča ne le spoznavanje in obvladovanje obstoječih tlačnih in pretočnih razmer na vodooskrbnem sistemu, temveč nudi tudi možnost za njegovo optimalno izrabo, ali optimalno zasnovo oziroma širitev vodooskrbnega sistema. Je orodje, ki omogoča simulacije različnih variant širitev v zasnovah idejnih projektov ter izbor optimalne variante za realizacijo. Verificiran hidravlični model obstoječega vodooskrbnega sistema potrjuje ali ovrže smiselnost ukrepov, ki jih želimo privzeti tekom obratovanja, na primer v primerih zelenih reorganizacij pretokov, vključevanja novih vodnih virov, ugotavljanja defektov na omrežju ali napak na merilnih napravah in drugo, kar se kaže v odstopanju rezultatov modela, od realnega stanja - meritev na terenu. Usmeritev razvoja vodooskrbe ni nujna samo v sanaciji, temveč tudi v modernizaciji oziroma posodobitvi obstoječega sistema.

V diplomski nalogi je izdelan hidravlični model dela vodovodnega sistema Šentvid, ki je del vodovodnega sistema, ki ga ima v oskrbi Javno podjetje Vodovod-Kanalizacija d.o.o., Ljubljana (v nadaljevanju: JP VO-KA). Ker je sistem Šentvid za okvir diplomske naloge preveliko območje, je v diplomski nalogi obdelan del šentviškega sistema, in sicer Dravelj in Draveljska gmajna (v nadaljevanju: območje Dravelj). Naloga obravnava le hidravlično modeliranje (program omogoča tudi analizo kvalitete vode), in sicer tlačne razmere ter pretok.

Cilji diplomske naloge so:

- spoznati in v praksi uporabiti hidravlični program EPANET 2.0 (U.S. Environmental Protection Agency, 2000),
- izdelati matematični model merilnega območja Dravelj,
- izvesti meritve tlaka in pretoka na merilnem območju Dravelj,
- primerjati rezultate matematičnega modela z rezultati meritev na terenu in
- preveriti umerjen matematični model območja Dravelj.

V drugem poglavju je predstavljena zgodovina Ljubljanskega vodovoda, ki sega v čas Rimske Emone do danes. V tretjem poglavju je opisano sedanje stanje in delitev ljubljanskega vodovoda. Predstavljeno je delovanje in struktura vodovodnega sistema Šentvid in nato še

opis stanja vodovoda območja Dravelj. V četrtem poglavju so predstavljene in opisane osnovne značilnosti programa EPANET 2.0., postopek nastanka modela iz osnove GIS podatkov do vnosa v modela programa EPANET. V petem poglavju je opisan nastanek modela s vsemi podrobnostmi, ki se vnesejo v program EPANET. V šestem poglavju je predstavljena meritev tlakov in pretokov na območju Dravelj, ki so se izvajale za potrebe umerjanja hidravličnega modela sistema Šentvid. Predstavljen je tudi ves potek meritev, namreč od izračuna do rezultatov meritev. Sedmo poglavje je namenjeno primerjavi in analizi tlaka in pretoka hidravličnega modela z dejanskim stanjem tlaka in pretoka na terenu. Na podlagi umerjenega modela je bila izvedena kontrola matematičnega modela s ponovnimi meritvami tlaka. V osmem poglavju sledi zaključek z nekaj sklepnimi mislimi in mislimi za prihodnost tako hidravličnih modelov, kot tudi terenskih meritev.

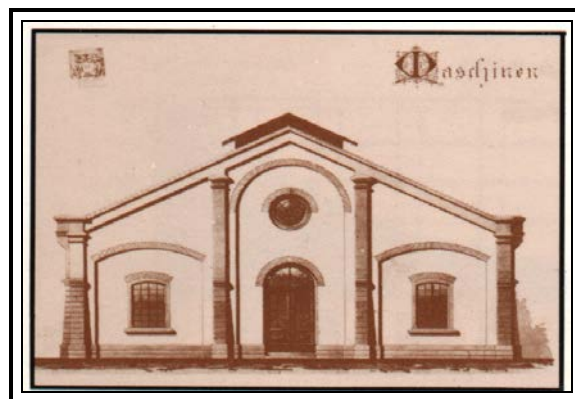
2 ZGODOVINA LJUBLJANSKEGA VODOVODA

Že pred mnogo stoletji je prostor, kjer danes leži mesto Ljubljana, z obiljem vode, s številnimi površinskimi vodotoki in izviri na Ljubljanskem polju in Barju nudil ugodne pogoje za naselitev. V času rimske Emone so prebivalci našli vodni vir v hriboviti okolici njihovih domov, odpadna voda pa je po zbirnih kanalih odtekala v Ljubljanico. Vodovod, ki je tekkel izpod Golovca proti Mestnemu trgu, je bil uporaben dolga stoletja, po nekaterih virih celo do potresa leta 1511. Če smo se kdaj vprašali, zakaj so prav vasi Dravljje, Koseze in Šiška že dolgo naseljene, je odgovor tu. Rimljani so do teh naselij speljali vodovod iz izvira Zlatek v Podutiku, ki je bil v rabi še leta 1737. Pod Rožnikom, za sedanjim Cekinovim gradom, je bilo pomembno zajetje, ki je kasneje napajalo vodnjak na Mestnem trgu. Javna oskrba z vodo nato ni napredovala, tako da se je v srednjeveških zgodovinskih obdobjih in pred njimi mesto oskrbovalo z vodo iz studencev in vaških vodnjakov (Spletna stran JP VO-KA).

V letu 1888 je bila sprejeta odločitev, da se 3 km severno od naseljenih površin mesta izgradi črpališče Kleče (glavna stavba Slika 2) kot galerija s štirimi vodnjaki, primarni vodovod v dolžini 27.326 m in rezervoar na Rožniku (Slika 1) s prostornino 3030 m³. Kopani vodnjaki so bili z natego v podzemnem rovu povezani z jaškom, v katerem je bila batna črpalka na pogon s parnim strojem. Dve leti po odločitvi, 17. maja 1890 je v prvih 606 hiš že pritekla voda. V letu 1910 je bilo na vodovod priključenih že 1368 hiš (Spletna stran JP VO-KA).



Slika 1: Vodohran Rožnik leta 1890 (Mestni vodovod ljubljanski sto let 1890-1990, 1990)



Slika 2: Objekt Kleče leta 1890 (Mestni vodovod ljubljanski sto let 1890-1990, 1990)

Po prvi svetovni vojni je bila vodarna povečana in leta 1928 so v njej obratovale štiri parne črpalke, ki so načrpale 27.000 m³/dan, dolžina vodovodnega omrežja je takrat bila že 127 km. Slika 3 prikazuje razvejanost Ljubljanskega vodovodnega omrežja leta 1906.



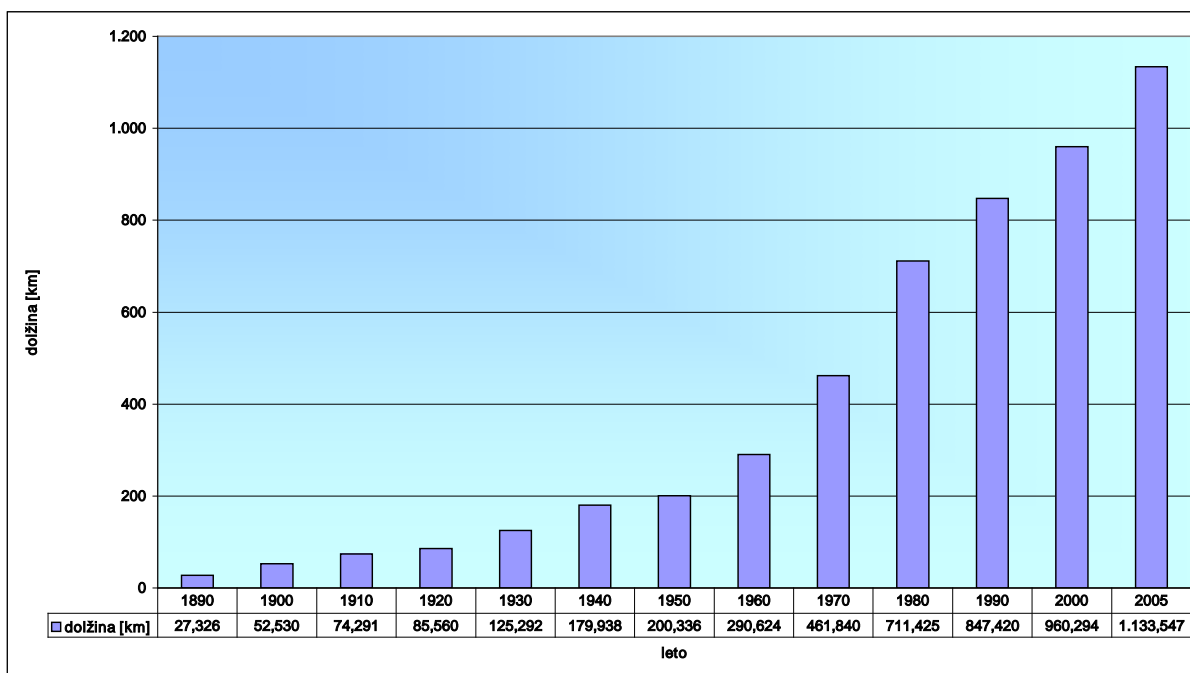
Slika 3: Ljubljansko vodovodno omrežje leta 1906 (Mestni vodovod ljubljanski sto let 1890-1990, 1990)

Leta 1936 sta bili parni črpalke zamenjani za električno centrifugalno črpalko za 250 l/s. Leta 1940 pa so ugasnili parne kotle, ker je bila nameščena druga, rezervna električna črpalka.

Leta 1953 je bilo povezano z otvoritvijo vodarne Hrastje, leta 1955 je pričela obratovati vodarna Šentvida z količino 100 l/s.

Da Ljubljana ne bi dobivala vode le iz enega vodnega vira (podtalnice ljubljanskega polja) in da bi izboljšali oskrbo južnega dela mesta, je bila leta 1981 zgrajena vodarna Brest na vršaju reke Iške. Leta 1982 je bila zgrajena peta vodarna Jarški Brod. Do leta 1990 se je povečalo vodovodno omrežje na 860 km, nanj pa je priključeno 32.000 objektov, v katerih živi in dela 280.000 prebivalcev (Graf 1 prikazuje rast dolžine ljubljanskega vodovodnega omrežja od leta 1890 do danes).

Prebivalci okolice Ljubljane (~ 47.000) se še vedno oskrbujejo z vodo iz lokalnih vodovodnih sistemov, kot so npr.: Rakitna, Zapotok – Golo – Škrilje, Lipoglav, Tomišelj – Vrbljanje – Ig, del Brezovice, Zalog nad Škofljico, Šmartno – Gameljne – Tacen – Rašica, Dolsko – Vinje, katerih večino je v upravljanje prevzelo JP VO – KA.



Graf 1: Rast dolžine vodovodnega omrežja od leta 1890 do 2005

Sistem ljubljanskega vodovoda, kot ga poznamo danes je opisan v poglavju 3, v katerem se iz opisa celotnega ljubljanskega vodovodnega sistema osredotočim na sistem Šentvid, v katerem je območje Dravelj.

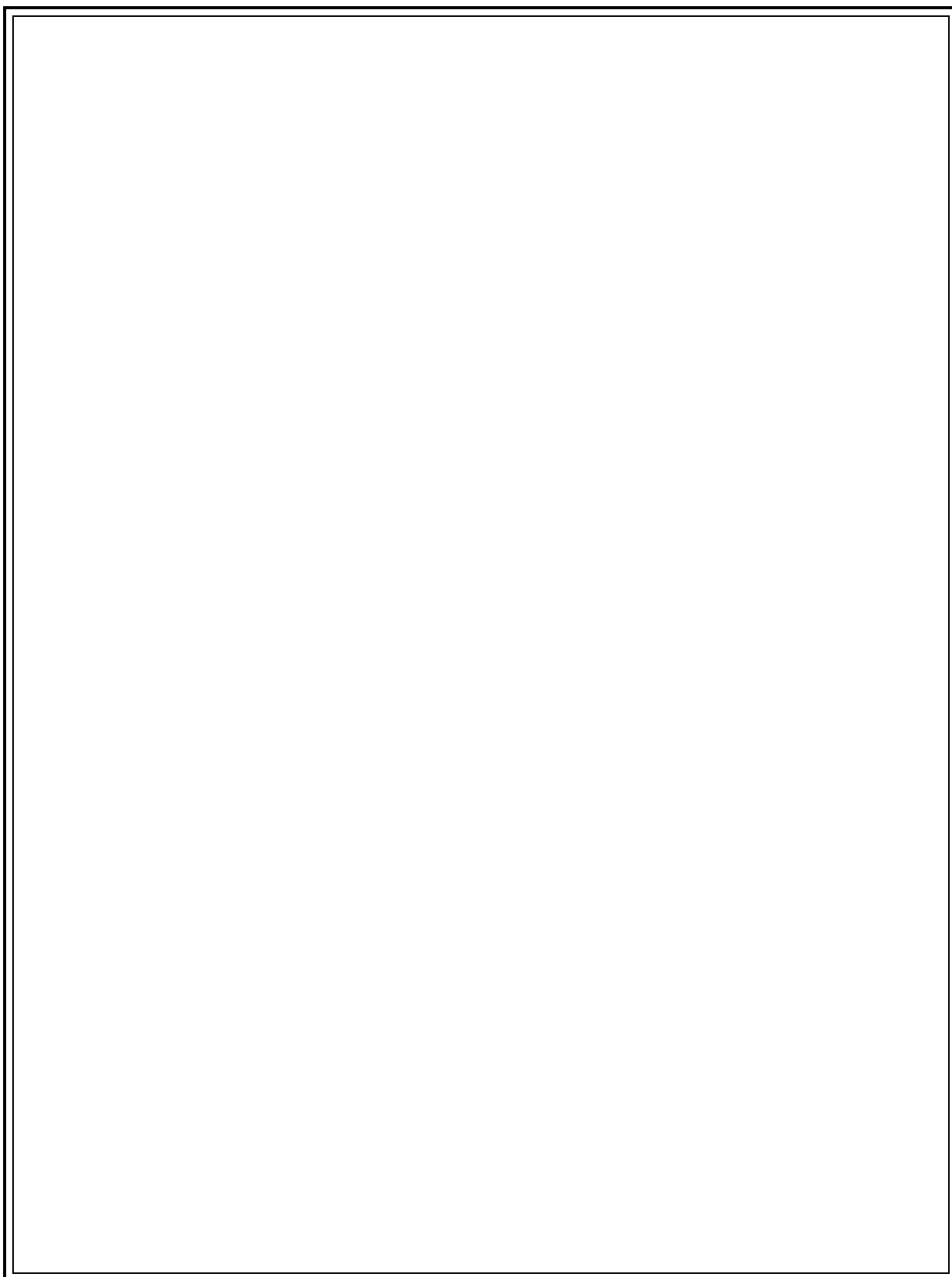
3 OBMOČJE DRAVELJ

3.1 Sistem ljubljanskega vodovodnega omrežja

Zgodovina modernega ljubljanskega vodovoda se je začela, kot je navedeno v drugem poglavju, z zgraditvijo črpališča Kleče, povezovalnim cevovodom do vodohrana Rožnik in povezovalnimi cevovodi iz vodohrana do porabnikov takratne Ljubljane, leta 1890. Od takrat do danes se je vodovodni sistem širil, dograjeval, povezoval z drugimi lokalnimi vodi, itd..

Meje ljubljanskega vodovodnega omrežja (na Sliki 4 so predstavljeni glavni objekti ljubljanskega vodovodnega omrežja) segajo na severu do Mednega in Tacna, na zahodu do Brezovice in Vnanjih Goric, na jugu do Iga in Škofljice. Na vzhodu se oskrbujejo naselja Sadinja vas, Sostro, Kašelj, Zalog, na severovzhodu pa sistem sega vse do Dolskega in Senožeti. Dolžina omrežja znaša več kot 1100 km, oskrbovano je preko 325.000 prebivalcev (Spletna stran JP VO-KA).

Današnji sistem ljubljanskega vodovoda je razdeljen na dva dela in sicer Centralni sistem in sistem Šentvid. Centralni sistem, ki ga z vodo oskrbujejo vodarne Kleče, Jarški prod, Brest in Hrastje ter s pomočjo večjih vodohranov, kjer se hrani višek načrpane vode (VH Rožnik, VH Debeli hib, VH Šeperjev hrib, VH Gmajna, VH Tabor, VH Helena in VH Senožeti), oskrbuje prebivalce Ljubljane z okolico, na vzhodu do Senožeti, na jugo-vzhodu do Podlipoglava, na jugu do Škofljice, na zahodu do Brezovice in na severu do Črnuč. Zaradi naselij oziroma zaselkov na robu ljubljanske kotline je potrebno zaradi razgibanosti oziroma reliefa območja, kjer se nahaja Ljubljana, oskrbovati prebivalce z vodo tudi s pomočjo prečrpalnih postaj (PČ Rudnik, PČ Podmornica (Brdo), PČ Podsmreka, ...)



Slika 4: Sistem ljubljanskega vodovoda - glavni objekti

3.2 Sistem Šentvid

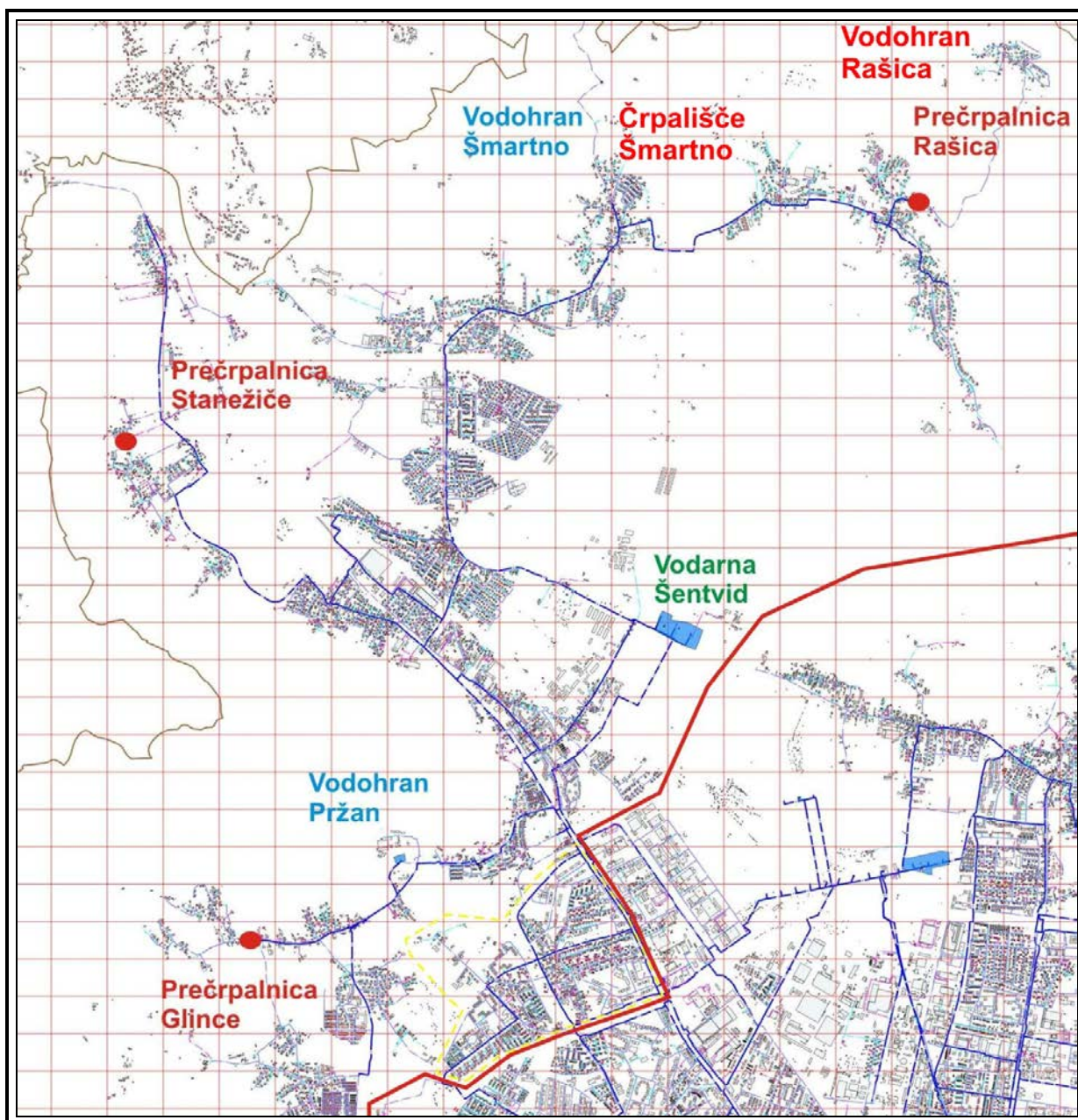
Sistem Šentvid (Slika 5) je popolnoma ločen sistem od centralnega sistema. Oskrbuje se iz črpališča Šentvid, ki se nahaja na območju vzhodnega dela kraja Šentvid. Črpališče višek načrpane vode hrani v vodohranih Pržan (4040 m³) in Šmartno (200 m³). Na sistemu Šentvid se nahajajo tudi prečrpalnice, ki oskrbujejo prebivalstvo na območjih sistema, kjer zaradi prevelike višinske razlike ni možno zagotoviti zadostnega tlaka in količine vode do porabnikov.

Črpališče Šentvid oskrbuje prebivalstvo katastrskih občin Ljubljane: Šentvid, Stanežiče, Dravlje, Glince, Vižmarje, Tacen, Šmartno, Gameljne in Rašice. Sistem Šentvid oskrbuje približno 46.500 prebivalcev. Skupna dolžina cevovodov, brez priključkov od DN 80 do DN 400, je približno 132.3 km. V Preglednici 1 je opisana statistika profilov in dolžin sistema Šentvid.

Preglednica 1: Profili in dolžine cevovodov sistema Šentvid

	Dolžina [m]		Dolžina [m]
DN 80	21470.65	DN 200	5775.52
DN 90	13591.12	DN 225	5731.33
DN 100	31921.66	DN 250	204.52
DN 110	19040.13	DN 280	1095.23
DN 125	1556.18	DN 300	8770.38
DN 150	11015.56	DN 350	1570.02
DN 160	7868.94	DN 400	2717.74

Rdeče označena črta na Sliki 5 prikazuje ločilno mejo med vodovodnim sistemom Šentvid in Centralnim sistemom ljubljanskega vodovoda.

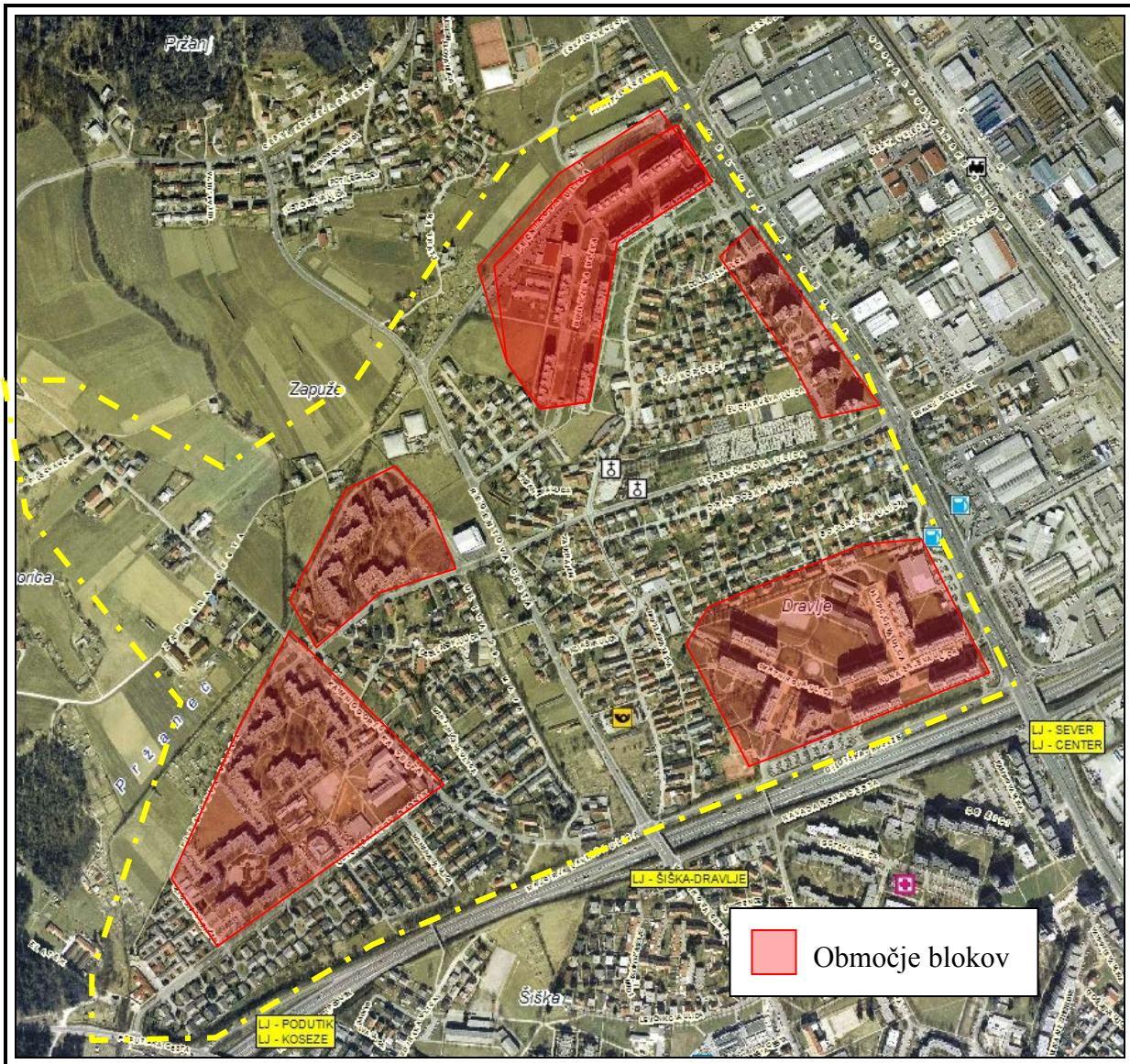


Slika 5: Shema sistem Šentvid

3.3 Območje Dravlje

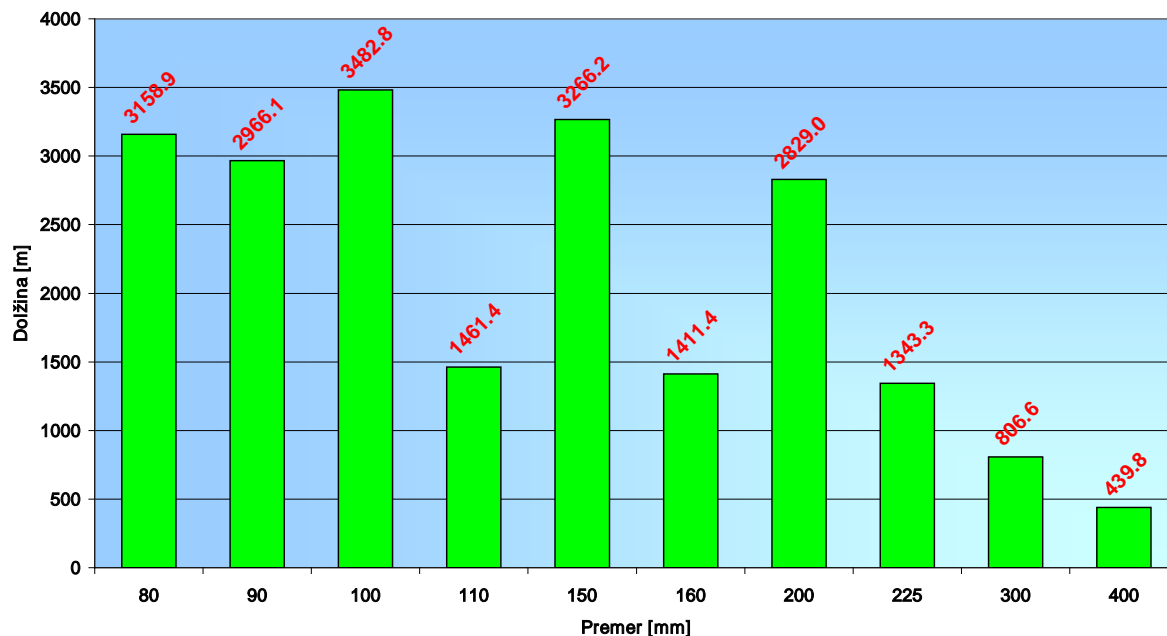
Dravlje predstavlja severni del Ljubljane med Šiško in Šentvidom. Naselje je sredi druge polovice prejšnjega stoletja zraslo kot goba po dežju: od približno 4.000 prebivalcev leta 1964 do 22.000 leta 1985.

Območje Dravelj je črtkano rumeno prikazano na Sliki 5, detajlno pa je prikazano na Sliki 6, kot ortofoto posnetek.



Slika 6: Ortofoto posnetek območja Dravlje

Območje nima velike industrijske proizvodnje. Prebivalci, ki jih je približno 24.000, so nameščeni v individualnih hišah in blokih označenimi na Sliki 6 z rožnato barvo. Območje prepređa okoli 21.200 m vodovodnega omrežja, preseka DN 80 do DN 400 mm (izključeni so vsi cevovodi dimenzije manjši od DN 80). Na Grafu 2 je predstavljen grafikon profilov cevi z njihovimi dolžinami na območju Dravelj.



Graf 2: Pregled profilov cevi in njihovo dolžino na območju Dravljje

Preglednica 2: Pregled materiala profila cevi in njihova dolžina na območju Dravljje

DN	Material	Dolžina [m]
80	AC	16.397
80	LZ	3140.343
80	NL	2.117
90	PE	2966.071
100	LZ	1540.253
100	NL	1942.546
110	PE	873.877
110	PVC	587.517
150	LZ	3239.257
150	NL	26.900
160	PVC	1411.418
200	LZ	2511.065
200	NL	1.940
200	NN	6.625
200	PVC	309.357
225	PVC	1343.330
300	LZ	806.613
400	LZ	392.565
400	PVC	47.189

V Preglednici 2 je pregled trenutno vgrajenega materiala na območju Dravelj glede na profil cevi in njegova dolžina.

4 OPIS PROGRAMA EPANET 2.0 IN OSNOVE HIDRAVLIKE TOKA POD TLAKOM

4.1 Opis programa

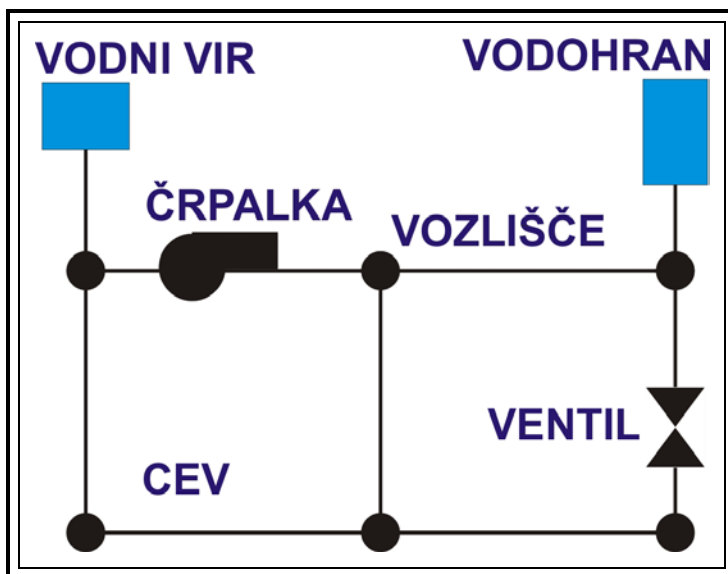
Program EPANET 2.0 je računalniški program, ki simulira hidravliko in kvaliteto vode v omrežju. Omrežje se sestoji iz cevi, vozlišč, črpalk, armatur, vodohranov in vodnih virov (rezervoar). EPANET sledi pretoku vode v vsaki cevi, tlaku v vsakem vozlišču, višini vode v vsakemu vodohranu, in spremlja koncentracijo konservativne kemijske snovi po celem modelu. Program EPANET je uporaben kot raziskovalno orodje za pomoč našemu razumevanju gibanja in usode pitne vode. EPANET lahko pomaga določiti alternativne strategije vodenja za izboljšavo kvalitete vode skozi sistem.

Diplomska naloga je osredotočena samo na modeliranje hidravlike. Program obravnava tudi simulacijo staranja vode.

4.2 Objekti za mrežni model in njihov kratek opis

4.2.1 Opis modela

Schema elementov v hidravličnem modelu programa EPANET



Slika 7: Shema simbolov elementov programa EPANET

Program EPANET modelira sistem za distribucijo vode kot zbirko povezav med vozlišči. Povezave predstavljajo cevi, črpalke, kontrolni ventili. Vozlišča predstavljajo lomne točke na vodovodnem omrežju, rezervoarje in zbiralnike. Na Sliki 7 je shematsko predstavljeno kako navedeni objekti med seboj funkcionalno sestavljajo vodovodni sistem.




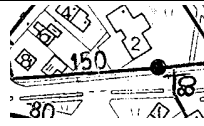




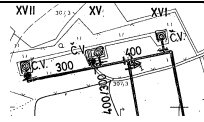

4.2.2 Elementi modela

Osnovni objekti (elementi):

- ❖ vozlišče (junction)
- ❖ vodni vir (rezervoar)
- ❖ vodohran (tank)
- ❖ cev (pipe)
- ❖ črpalka (pump)
- ❖ ventil (valve)

Elementi v modelu predstavljajo objekte v naravi - Preglednica 3.

Preglednica 3: Elementi modela programa EPANET in njihov opis

Element modela	Simbol v EPANET-u	Situacija v naravi	Element v naravi
Vozlišče			Križišče – stičišče cevi
Cev			Niz cevi Od vozlišča do vozlišča
Vodni vir			Zajetje podtalnica
Vodohran			Vodohran
Črpalka			Črpališče - Več posameznih črpalk
Ventil - zasun			

Vsak od elementov zahteva določene podatke, ki morajo biti urejeni v primerno obliko.

4.2.3 Opis elementov

4.2.3.1 Vozlišče

Vozlišča so točke v mreži, kjer se združijo cevi ali končajo cevovodi (slepi cevovod). V vozliščih ponazarjamo porabo porabnikov v območju vozlišča. V vozliščih pa lahko tudi vodo porabljammo ali pa jo dodajamo v mrežo.

Osnovni vstopni podatki:

- ❖ geodetska višina (ponavadi nadmorska višina) (*elevation*)
- ❖ poraba vode (*base demand*)
- ❖ spreminjanja porabe tekom dneva (*demand patern*)

Osnovni izstopni podatki:

- ❖ tlaki (*pressure*)
- ❖ dejanska poraba (*actual demand*)

4.2.3.2 Cev

Cevi so vodovodni objekti, s pomočjo katerih transportiramo vodo iz ene točke v drugo. Smer pretoka je od višje hidravlične višine k nižji višini.

Osnovni vstopni podatki:

- ❖ začetno in končno vozlišče (*start & end point*)
- ❖ premer (*diameter*)
- ❖ dolžina (*length*)
- ❖ koeficient hrapavosti (*roughness coefficient*)
- ❖ stanje (odprto, zaprto, ...) (*status*)

Osnovni izstopni podatki:

- ❖ pretok (*flow rate*)
- ❖ hitrost (*velocity*)
- ❖ hidravlični upor oziroma padec tlačne črte (*headloss*)
- ❖ koeficient trenja (*friction factor*)

4.2.3.3 Vodni vir

Vodni vir v tem programu predstavlja objekt z neomejeno količino vode in s prosto gladino (v naravi npr.: vodnjak, jezero, ...). V naravi ni takega objekta (izdatnost vodnjakov je omejena), se pa v veliki večini praktičnih izračunov vodovodnih sistemov pojavljajo take okoliščine, da brez težav uporabimo to poenostavitev.

Osnovni vstopni podatki:

- ❖ višina gladine vode v rezervoarju (*hydraulic head*)
- ❖ spreminjanja gladine tekom dneva (*head patern*)

4.2.3.4 Vodohran

Vodohran je objekt vodovodnega sistema, v katerem se hrani voda. Vodohran ima določeno kapaciteto sposobnosti hranjenja vode. Volumen vodohrana, ki ga mora vodohran imeti se sestoji iz: volumna požarne vode, volumna rezerve in volumna nihanja vode v vodohranu. Vodohran ima v sistemu delovanja svojo minimalno in maksimalno višino, v območju katerih naj bi deloval v optimalnih pogojih.

Osnovni vstopni podatki:

- ❖ kota dna vodohrana (*bottom elevation*)
- ❖ premer (diameter)
- ❖ minimalna in maksimalna gladina vode (*minimum and maximum water levels*)
- ❖ začetna gladina vode v vodohranu (*initial level*)

Osnovni izstopni podatki:

- ❖ nivo gladine vodohrana (water surface elevation)

4.2.3.5 Črpalka

Črpalke služijo za črpanje vode, ko voda ne more priteči gravitacijsko do mesta porabe, kot tudi za povečanje hitrosti vode. Črpalke so ena od najpomembnejših naprav v vodovodnem sistemu, seveda če jih le ta ima. Obstajajo sistemi, ki delujejo na principu gravitacije. Danes se najpogosteje uporabljajo centrifugalne črpalke.

Osnovni parametri črpalke:

- ❖ koristna moč črpalke







ali

- ❖ Q-H krivulja črpalke

4.2.3.6 Ventili, zasuni, lopute – zaporne armature

Ventil je element v vodovodnem sistemu, ki je lahko zaprt, ali pa do različne stopnje odprt. Glede na odprtost ventila se spreminja oviranost pretoka. Ventile ločimo glede na njihovo funkcijo v sistemu – Preglednica 4.

Preglednica 4: Tipi ventilov glede na njihovo funkcijo

	Slika	Funkcija elementa
Ločevalni ventil		Prekinitev oz. omejitev dotoka vode
Usmerjevalni ventil		Usmerjanje vode v eno smer, onemogoči pa povratni tok.
Višinski ventil		Večinoma vgrajen v vodohranih, razbremenilnikih, da zapre dotok vode, ko je gladina vode v vodohranu, razbremenilniku maksimalna
Pre- in odzračevalni ventil (zračnik)		Izpust zraka iz cevovoda
Reducirni ventil		Zniževanje tlaka na sistemu
Ventil za kontrolo pretoka		Regulira pretok na nastavljeno vrednost ali manj.

4.3 Osnove hidravlike programa EPANET

Metodo, ki jo program EPANET uporablja za reševanje hidravlično nedoločenih vodovodnih sistemov, bi lahko poimenovali hibridna vozliščno-zančna metoda. Todini in Pilati (1987) sta jo poimenovala »gradientna metoda«. Podobno metodo sta opisala že Hamam and Brameller (1971), ki sta jo poimenovala »hibridna metoda«. Obstaja tudi metoda avtorja Osiadacz (1987), ki jo je poimenoval Newtonova zančno-vozliščna metoda. Razlike v metodah so minimalne, program EPANET pa uporablja »gradientno metodo« (Rossman L. A., 2000).

4.4 Osnove hidravlike v cevovodih

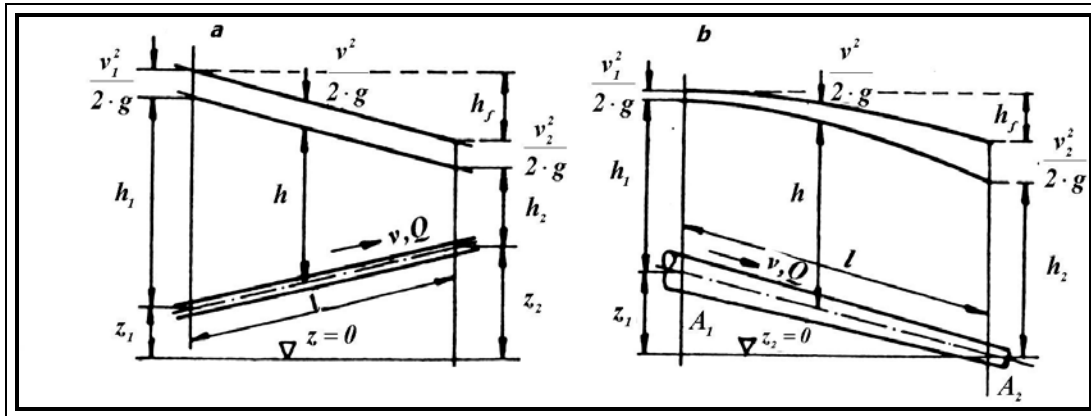
4.4.1 Bernoullijeva enačba

Osnovna Bernoullijeva enačba izraža fizikalni zakon o ohranitvi energije v enakomerno gibajočem se stebru idealne, tj. nestisljive tekočine brez trenja. Po tem zakonu je v vsakem prerezu vzdolž cevi vsota tlačne in kinetične energije konstantna. Ti energijski deleži se navadno izražajo s hidravličnimi višinami z v metrih tekočinskega stebra ali z ekvivalentnimi tlaki p v N/m^2 ($1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$), upoštevajoč gostoto tekočine ρ v kg/m^3 :

položajna višina	z	v m	ali	$g \cdot \rho \cdot z$	v N/m^2
tlačna višina	h	v m	ali	p	v N/m^2
hitrostna višina	$\frac{v^2}{2g}$	v m	ali	$\rho \frac{v^2}{2}$	v N/m^2

Tlačno višino imenujemo tudi piezometrično višino. Bernoullijeva enačba za odsek cevi med prerezoma 1 in 2 lahko pišemo v eni od naslednjih oblik (Slika 8):

$$g \cdot \rho \cdot z_1 + p_1 + \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} = g \cdot \rho \cdot z_2 + p_2 + \rho \cdot \frac{v_2^2}{2} = konst. \quad (\text{vsi členi } \text{N/m}^2)$$
$$z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} = konst. \quad (\text{vsi členi } m) \quad (4.1)$$



Slika 8: Odsek cevi med prerezoma 1 in 2 - s pomočjo Bernoullijeve enačbe izrazimo zakon o ohranitvi energije (Jordan, 1983)

Položajne višine vseh prerezov se morajo nanašati na isto osnovno raven ($z = 0$), ki jo izberemo poljubno. Če so znane veličine z , p (ali h) in v za en prerez, se (s pomočjo enačbe 4.1) lahko določijo njihove vrednosti za poljuben prerez na dani višini z in s prerezom A , ker je v vseh prerezih pretok $Q = A \cdot v$ isti.

V praktičnih primerih (realna tekočina) je potrebno v enačbi 4.2 upoštevati tudi tlačne izgube zaradi trenja. Za pretočno smer 1-2 se te izgube pišejo na desni strani enačbe (Slika 9):

$$g \cdot \rho \cdot z_1 + p_1 + \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} = g \cdot \rho \cdot z_2 + p_2 + \rho \cdot \frac{v_2^2}{2} + g \cdot \rho \cdot h_f \quad \text{ali}$$

$$z_1 + h_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + h_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_f \quad (4.2)$$

4.4.2 Hidravlične tlačne izgube

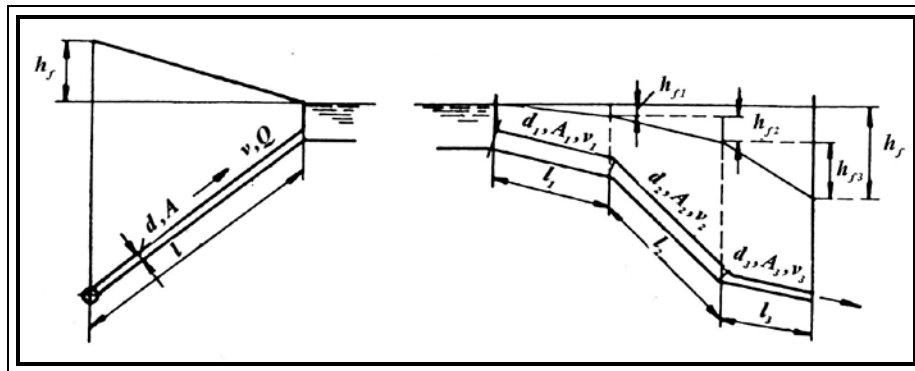
Pri proučevanju dinamičnih tlačnih razmer v vodooskrbnih sistemih je potrebno upoštevati, da imamo opravka z realno, tj. viskozno tekočino. Ta se od »idealne« razlikuje predvsem v tem, da se med tokovnicami pojavljajo odpori proti drsenju druga ob drugo, kakor tudi ob stene cevi. Na določeni dolžini cevi l se zato tlačna višina h tekočine zmanjša v smeri toka za veličino h_f , ki se porabi za premagovanje trenja (Slika 9).

Tlačna izguba h_f na dolžini cevi l , imenovana tudi linijska izguba, znaša v tlačne višine:

$$h_f = \lambda \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \lambda \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \frac{Q^2}{A^2} \quad (4.3)$$

kjer pomenijo:

λ	koeficient trenja	-
d_i	notranji premer cevi	m
v	pretočna hitrost $v = Q/A$	m/s
A	prerez cevi, $A = \pi d^2/4$	m ²
Q	pretok	m ³ /s
g	pospešek gravitacije	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$



Slika 9: Zmanjšanje tlačne višine za premagovanje trenja h_f na dolžini cevi v smeri toka (Jordan, 1983)

Enako kot tlačne višine merimo tudi tlačne izgube v metrih m vodnega stolpca – ekvivalentne dolžine - in iz enačbe 4.3 izhajajo, da je koeficient trenja λ brezdimenzijska veličina.

Koeficient trenja λ upošteva vpliv kinematične viskoznosti (žilavosti) tekočine, pretočne hitrosti in hrapavosti notranje površine cevi.

Za cevovod z istimi karakteristikami na vsej dolžini cevi l se izguba tlačne višine (po enačbi 4.3) izraža krajše:

$$h_f = k_f \cdot Q^2 \quad m \quad (4.4)$$

kjer je k_f koeficient izgube:

$$k_f = \frac{l}{2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l}{d \cdot A^2} \quad m^{-5} s^2 \quad (4.5)$$

Vrednosti za ε so podane v Preglednici 5.

Preglednica 5: Povprečna hrapavost ε (Jordan, 1983)

Material	Darcy-Weisbach ε [mm]
Litoželezo	0.85
Beton	1.0-10
PVC	0.005
Jeklo	0.15

Dodatno k linijskim izgubam se pojavljajo na nekaterih mestih cevovoda lokalne izgube, npr. v cevni razcep, krivinah ali kolenih, pri zožitvah in razširitvah cevovoda, v zasunih, itd. Na takih mestih se tlačna linija zniža skokoma za ustrezno izgubo in se nato nadaljuje z nagibom, ki ustreza trenju v sledečem odseku cevi. Izguba lokalnega upora znaša h_L pri čemer so koeficienti ξ določeni eksperimentalno (Preglednica 6), hitrost v pa se nanaša na prerez pred odporom, oziroma kakor je določeno v navodilih preizkuševalca.

$$h_L = \xi \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{\xi}{2 \cdot g \cdot A^2} \cdot Q^2 \quad (4.6)$$

Preglednica 6: Povprečni koeficient lokalnih izgub ξ (Jordan, 1983)

vtok v cev	0,05 – 1,00	cevni razcep	0,55 - 0,75
krožni lok 90° (r =sredinski polmer)		- ena veja zaprta	1,35
- za $r/d = 2$	0,15	cevni odcep 90°	0,96 - 1,3
- za $r/d = 4$ do 10	0,1	cevni odcep 45°	0,90 - 0,35

Celotna izguba tlačne višine obsega vse linijske izgube (po enačbi 4.4) in lokalne (po enačbi 4.6).

5 MODEL OBMOČJA DRAVELJ

5.1 Izdelava modela območja Dravelj

Osnova vsakega podjetja, ki se ukvarja s komunalno dejavnostjo, je osnovno sredstvo. Osnovno sredstvo JP VO-KA, če se opredelimo samo na vodovod, so vsi objekti od črpališč, cevi, prečrpalnic, vodohranov, itd. Vse te podatke skrbno arhivirajo in vsakodnevno obnavljajo in dopolnjujejo v službi katastra.

Podatke iz katastra je mogoče pregledovati in obdelovati s programom ArcView (Esri GIS and Mapping Software). To je program, ki je namenjen delu z GIS podatkovnimi bazami, vendar pa nam skupaj z dodatnimi programi omogoča pripravo in izdelavo matematičnih modelov.

Program ArcView omogoča izdelavo hidravličnega modela vodovodnega omrežja, kateri se vnese v program EPANET 2.0, ki nato preračuna hidravliko omrežja. Programski dodatek DC Water Design extension (Esri GIS and Mapping Software) omogoča povezovanje programov ArcView in EPANET. S tem dodatkom je mogoče iz GIS podatkovnih baz preko ArcView pripraviti vse podatke za prenos v hidravlični model EPANET 2.0.

V poglavju 4.2.2 je bilo že predstavljeno, kateri elementi in kakšni podatki teh elementov so potrebni za izdelavo modela v programu EPANET. V nadaljevanju pa je predstavljen postopek priprave oziroma pridobitve določenih vstopnih podatkov za elemente v programu EPANET za območje Dravelj.

5.2 Elementi modela območja Dravelj

Elementi, ki so uporabljeni v modelu območja Dravelj:

- vozlišče
- cev
- vodni vir

5.3 Priprava posameznih elementov za izdelavo modela

5.3.1 Vozlišče

Vozlišča se nahajajo na vseh stičiščih in na koncu posameznih cevi, ki se ne končujejo z drugimi točkovnimi vodovodnimi objekti (vodohran, zbiralnik). Vozlišče je točkovni tip elementa, v katerem se določi poraba in izguba vode. Za določitev porabe vode v vozlišču so bili uporabljeni podatki iz inkaso službe podjetja JP VO-KA. Vrednost porabe vode (to je celoletna povprečna vrednost porabe vode v m^3/dan) v vozlišču program določi tako, da povprečno porabo vode potrošnikov (evidentiranih) pripiše najbližjemu vozlišču.

Primer porabe v vozlišču na Bohinjčevi ulici:

Za primer porabe v vozlišču je uporabljeno vozlišče iz modela na Bohinjčevi ulici. Podatki, ki so pridobljeni iz baze inkaso službe, so vstavljeni v Preglednico 7. Izračun porabe v vozlišču je predstavljen na Sliki 10. Osnovni podatki iz baze so povprečje porabe vode posameznega potrošnika v časovnem obdobju, v katerem je bilo stanje vodomera popisano (popisano stanje vodomera) v m^3/dan .

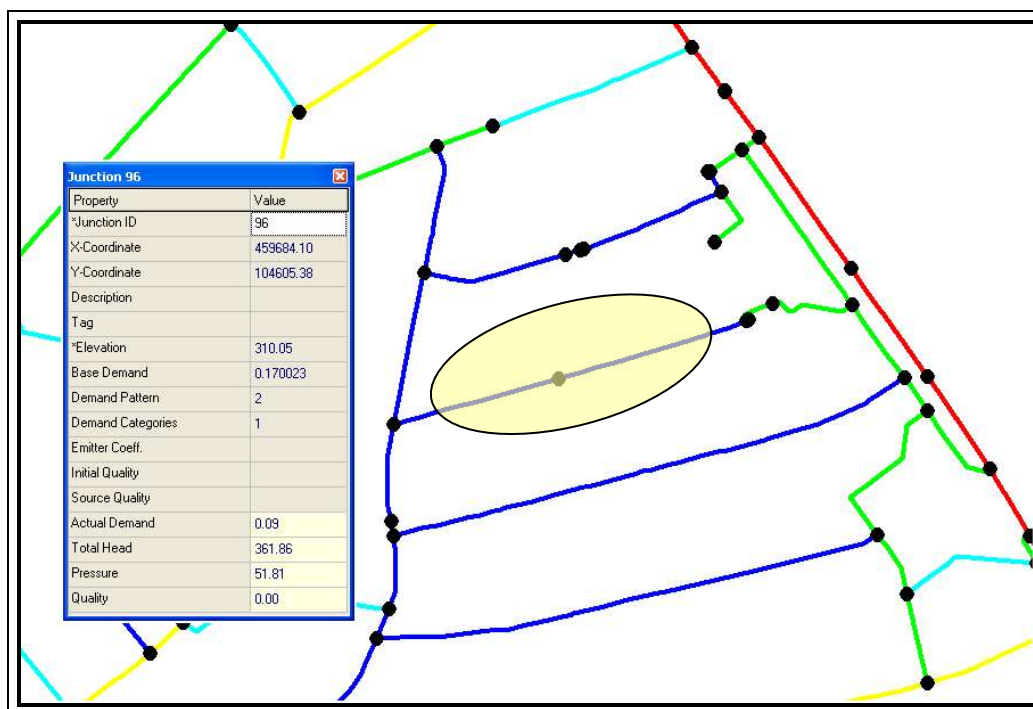
Najprej se izračuna skupno porabo vode v m^3/dan , ki se jo nato pretvori v l/s (v tem vozlišču znaša poraba 0,170 l/s).

Preglednica 7: Porabniki v območju vozlišča 96 na Bohinjčevi ulici

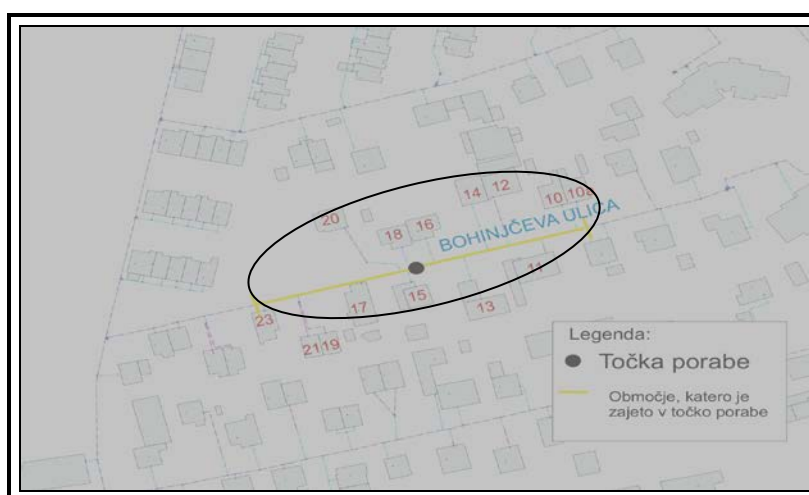
Naslov porabnika	Poraba [m^3/dan]
BOHINJČEVA 10	0,782
BOHINJČEVA 10a	0,784
BOHINJČEVA 11	0,964
BOHINJČEVA 12	2,507
BOHINJČEVA 12	0,667
BOHINJČEVA 13	0,529
BOHINJČEVA 14	0,871
BOHINJČEVA 15	0,513

Naslov porabnika	Poraba [m^3/dan]
BOHINJČEVA 16	0,648
BOHINJČEVA 17	1,522
BOHINJČEVA 18	0,754
BOHINJČEVA 19	0,718
BOHINJČEVA 20	0,536
BOHINJČEVA 21	0,689
BOHINJČEVA 23	0,854
BOHINJČEVA 25	1,452
Skupaj [l/dan]	14790,0
Skupaj [l/h]	616,250
Skupaj [l/s]	0,170

Na Sliki 10, izrez iz programa EPANET, je poleg slike še okno, na katerem so zbrani vsi podatki vozlišča 96. Porabo vozlišča 96 nam da podatek vozliščna poraba (*Base Demand*), ki je pridobljen iz inkaso službe. Slika 11 prikazuje katastrsko podlogo JP VO-KA z hišnimi številkami porabnikov, z ovalom je označeno območje, kateri prispeva porabo v vozlišče 96.



Slika 10: Izrez vozlišča 96 na Bohinjčevi ulici iz programa EPANET



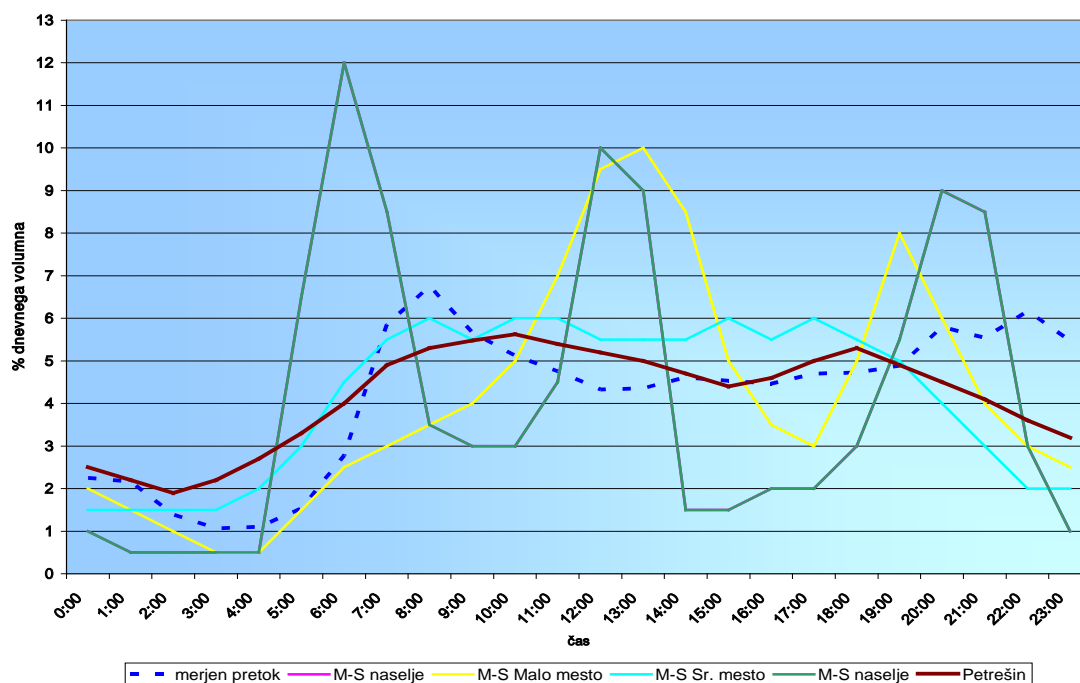
Slika 11: Izrez območja vozlišča 96 iz katastra JP VO-KA

5.3.1.1 Dnevno nihanje porabe

Poleg povprečne porabe v vozlišču je potrebno določiti tudi časovni vzorec porabe. V literaturi obstaja veliko avtorjev, ki so oblikovali časovne krivulje. Časovne krivulje avtorjev Mutschmman – Stimmelmayer in Petrešin so grafično predstavljene v Grafu 2 in številčno v Preglednici 8.

Preglednica 8: Dnevno nihanje porabe vode za različna območja porabe [% dnevnega volumna]

čas	Mutschmman - Stimmelmayer				Petrešin	čas	Mutschmman - Stimmelmayer				Petrešin
	Naselje [%]	Malo mesto [%]	Srednje mesto [%]	Veliko mesto [%]			Naselje [%]	Malo mesto [%]	Srednje mesto [%]	Veliko mesto [%]	
0-1	1	2,5	2	2,7	3,2	12-13	4,5	7	6	5,3	5,4
1-2	1	2	1,5	2,6	2,5	13-14	10	9,5	5,5	5,2	5,2
2-3	0,5	1,5	1,5	2,4	2,2	14-15	9	10	5,5	5,1	5
3-4	0,5	1	1,5	2,2	1,9	15-16	1,5	8,5	5,5	4,9	4,7
4-5	0,5	0,5	1,5	2,1	2,2	16-17	1,5	5	6	4,5	4,4
5-6	0,5	0,5	2	2,2	2,7	17-18	2	3,5	5,5	4,2	4,6
6-7	6,5	1,5	3	4,2	3,3	18-19	2	3	6	4,7	5
7-8	12	2,5	4,5	5,3	4	19-20	3	5	5,5	5	5,3
8-9	8,5	3	5,5	5,7	4,9	20-21	5,5	8	5	5	4,9
9-10	3,5	3,5	6	5,6	5,3	21-22	9	6	4	4,2	4,5
10-11	3	4	5,5	5,4	5,475	22-23	8,5	4	3	3,3	4,1
11-12	3	5	6	5,3	5,625	23-24	3	3	2	2,9	3,6



Graf 3: Prikaz dnevnega nihanja porabe vode različnih avtorjev in za različna območja porabe

Za vsa vozlišča je uporabljen lastni izračun časovnega vzorca porabe vode. Časovni vzorec je določen glede na pretok vode, ki je bil merjen za območje Dravelj in je predstavljen v Grafu 3. Časovni vzorec, je podoben vzorcu avtorjev Mutschman – Stimmelmayer za srednje veliko mesto, kot je razvidno iz Grafa 3. Sicer pa so Dravljje večinoma spalno naselje brez večjih industrijskih objektov, kar je razvidno iz časovne porabe (največja poraba je zjutraj med 6:00 in 8:00 uro, ko ljudje vstanejo in v času med 21:00 in 23:00 uro, ko se ljudje odpravljajo spat).

Izračun indeksa potrošnje vode glede na merjen pretok

Glede na merjen pretok za celotno območje se lahko izračuna indeks urne porabe vode za območje Dravelj (Graf 4). Osnovna meritev pretoka vode za celotno območje Dravelj je bila izvedena na 10 sekund. Indeks urne potrošnje je vzet na vsakih pet minut, tako da je za podatek pet minutnega pretoka vzeti povprečni pretok v petih minutah. Tako se dobi 288 podatkov pretoka za celodnevno meritev. Izračunana je bila povprečna vrednost celodnevne meritve (24_urno) in nato še povprečni dejanski pretok v petih minutah (P) katerega je potrebno deliti s povprečjem 24 urnega pretoka, da tako dobimo I – indeks enačba 5.

$$I = \frac{\bar{P}}{24_urno} \quad (5)$$

kjer pomenijo:

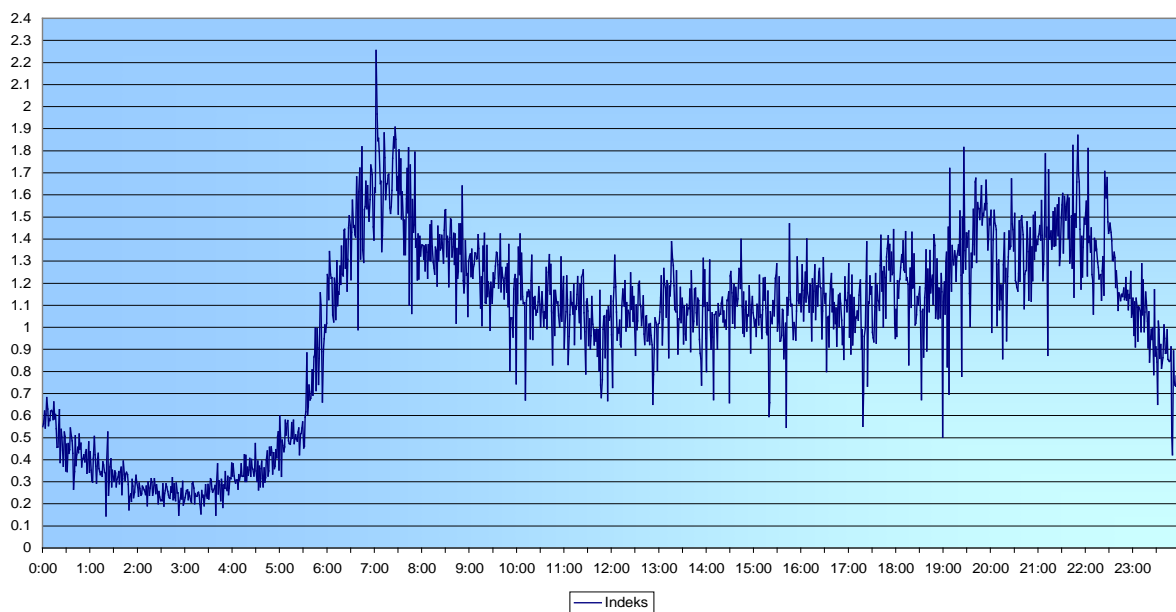
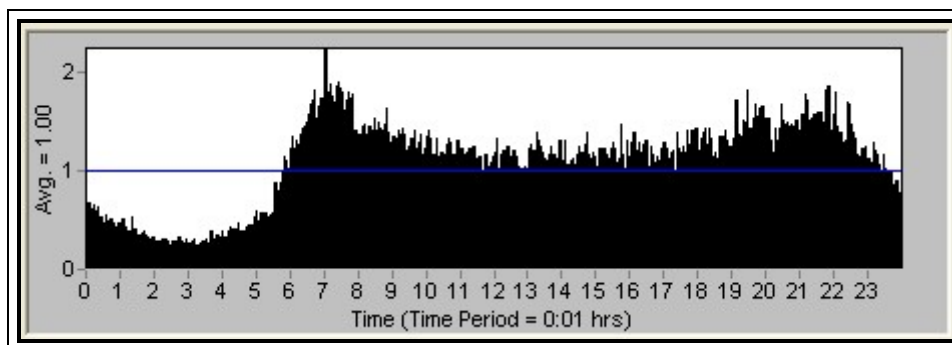
I	indeks urne potrošnje	
P	povprečni pretok v minuti (z vzorčenjem na 10 sekund)	
	dobimo 6 podatkov v minuti in izračunamo povprečje v minuti)	l/s
24_urno	povprečni pretok v 24 urah	l/s

Primer izračuna je predstavljen v Preglednici 9, le ta je izrez iz celotnega izračuna indeksa urne potrošnje.

Preglednica 9: Primer izračuna indeksa urne potrošnje

Čas	Minutni pretok [l/s]	24 urno povprečje [l/s]	Indeks
0:00	14.55	26.50	0.54911
0:05	14.92	26.50	0.56307
0:10	16.45	26.50	0.62081
0:15	14.41	26.50	0.54383
0:20	16.08	26.50	0.60685
.	.	.	.
.	.	.	.

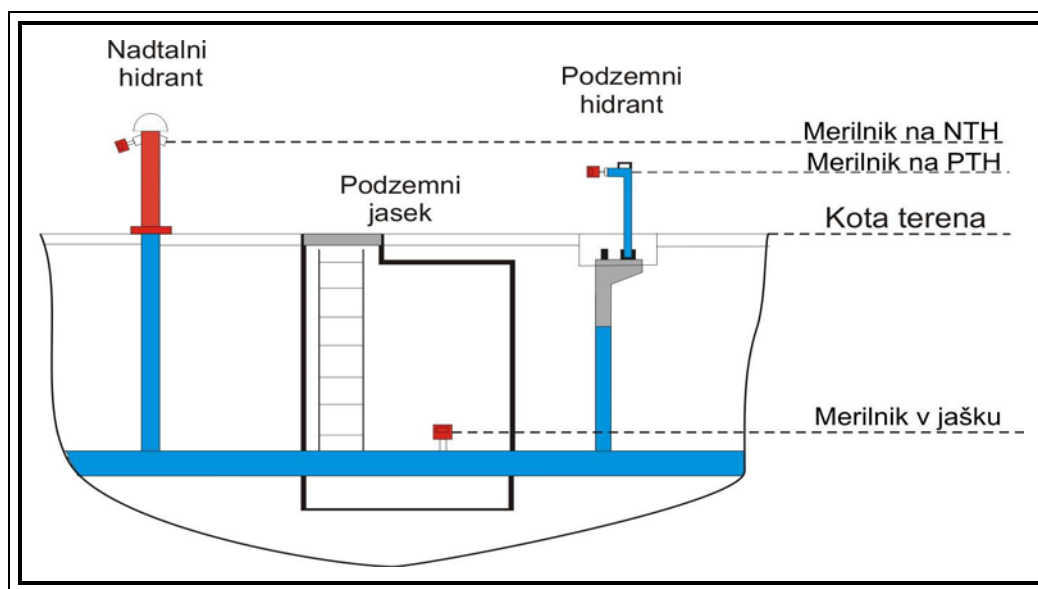
Izračuni indeksi urne potrošnje so vstavljeni v program EPANET, kot časovni vzorec 5 minutne potrošnje (Slika 12).

**Graf 4: Indeks potrošnje vode glede na merjen pretok****Slika 12: Vzorec porabe 24 ur**

5.3.1.2 Višina vozlišča – višina merilnika tlaka

Višine postavitve merilnikov tlaka na terenu in višin pridobljenih iz GIS podatkov, ki so bili preneseni v program EPANET, se med seboj razlikujejo. Razlog je razlika med meritvami na terenu in podatki v modelu. Podatek višine vozlišča, ki ga program EPANET obravnava preko programa ArcView, je nadmorska višina terena na mestu vozlišča (Slika 13). JP VO-KA še nima vektoriziranih višin nivoja poteka cevovodov, zato je bila pri kreiranju višin vozlišč modela v pomoč mreža terena 10m x 10m, na kateri so znane točke višin. Višina vozlišča se je pripisala najbližji točki mreže 10m x 10m.

Meritev na terenu se lahko izvaja na različne načine (meritev v jašku, na nadtalnem hidrantu, na podtalnem hidrantu, itd.), kar pomeni, da se meritev že v osnovi razlikuje glede na postavitev merilnika in je bilo zato potrebno korigirati vozlišče na nadmorsko višino kote merilnika v programu EPANET. Nivo merilnika in nivo vozlišča je postavljen v isto točko, gledano po višini.



Slika 13: Prikaz možnih postavitvev merilnikov tlaka na terenu

Višine merilnikov na terenu so bile prenesene na vozlišča v program EPANET (Preglednica 10), s tem smo dobili višino vozlišča in višino merilnika na isti primerjalni nivo. Tako so sicer

nastale spremembe dejanskega tlaka v cevovodih, ohranila pa se je absolutna (izmerjena) višina tlačne črte.

Preglednica 10: Kote merilnikov na terenu in v programu EPANET

Lokacija	Na terenu [m]	Simulacija Epanet [m]	Vozlišče
Celovška cesta	311	311	110
Plešičeva ulica	309.2	309.2	15
Ulica bratov Babnik	307.0	307.0	48
Kamnogoriška ulica	308.1	308.1	105
Korenčanova ulica	310.1	310.1	1

5.3.2 Cev

Funkcija cevi je transport vode med sosednjima vozliščema v omrežju. Cevi med računskima vozliščema v hidravličnem modelu so v naravi sestavljene iz posameznih med seboj spojenih cevi (dolžina cevi 5-6 m, tudi v kolutih). V model se ne vnaša posameznih cevi, ampak eno samo cev, kot zaporedje cevi med dvema vozliščema. Cevi, ki se jih združi v eno cev, morajo imeti enake tehnične lastnosti (premer, material, hrapavost).

5.3.2.1 Dolžina

Dolžina cevi, ki jo podamo v model, mora predstavljati realno dolžino cevovoda med dvema vozliščema in ne zračne razdalje. Načina, s katerima uvozimo dolžino cevi v model, sta dva. Prvi način je določanje dolžine s pomočjo digitalne karte ali načrta, ki ga uvozimo v model in program sam določi dolžino cevi. V drugem načinu pa uporabnik vsaki cevi sam ročno določi dolžino cevi.

Dolžine cevi je določil program ArcView na podlagi GIS podatkov.

5.3.2.2 Premer

Bistven tehnični podatek za cev je tudi premer cevi. Določanje premera cevi ni tako preprosto. V hidravličnem modelu nas zanima notranji premer cevi, ki je največja razdalja med stenama. Premer cevi se s časom tudi spremeni zaradi korozije in odlaganja oblog na stene cevi - inkrustacije. Zaradi korozije se začno na notranji strani cevi pojavljati (1) tako imenovane grudice, ki lahko močno zmanjšajo notranji premer cevi in/ali (2) vdolbinice, iz

katerih je zaradi elektrokemičnih vplivov odnešen material, kar lahko zmanjša debelino stene cevi in posledično pripelje do loma cevi. Odlaganje pa se pojavlja predvsem zaradi spremembe topnosti v vodi prisotnih trdnih snovi (apnenec), ki se odlagajo na, oz. oblepljajo stene cevi.

Linijske izgube hidravlične energije, oz. tlaka v cevovodu upoštevamo z določitvijo hrapavosti cevi. V primeru tega hidravličnega modela smo vsem cevem določili koeficient hrapavosti $\varepsilon = 0.1$ mm, ki predstavlja dolgoletno povprečno obratovalno hrapavost sistema.

Na podlagi tega parametra program z Darcy-Weissbachovim koeficientom hrapavosti (5.2) izračuna koeficient upora v cevi, ki je odvisen od premera cevi, pretoka v cevi in koeficienta hrapavosti. Enačba 5.1 je splošna enačba za izračun linijskih izgub.

$$h_l = Aq^B \quad (5.1)$$

kjer pomeni:

h_l	linijska izguba	m
A	koeficient upora	
Q	razmerje pretoka (volumen/čas)	
B	eksponent pretoka (2)	

Koeficient upora A za izračun z Darcy-Weissbachovim koeficientom

$$A = 0.0252 f(\varepsilon, d, q) d^{-5} L \quad (5.2)$$

kjer pomeni:

$f(\varepsilon, d, q)$	koeficient trenja (funkcija koeficienta hrapavosti, premera in režima pretoka)
ε	koeficient hrapavosti
d	premer cevi
q	pretok
L	dolžina cevi

Lokalnih izgub hidravlične energije, oz. tlaka večina modelov ne upošteva. Prispevek lokalnih izgub, ki nastanejo na različnih točkah (kolena, zožitve, ventili,...) je v primerjavi s celotnimi energijskimi izgubami običajno tako majhen, da ga lahko brez težav zanemarimo. V EPANET se lahko vnašajo lokalne izgube in sicer v cevi kot Loss Coef.

Premer cevi nam je posredoval program ArcView na podlagi GIS podatkov iz katastra JP VO-KA.

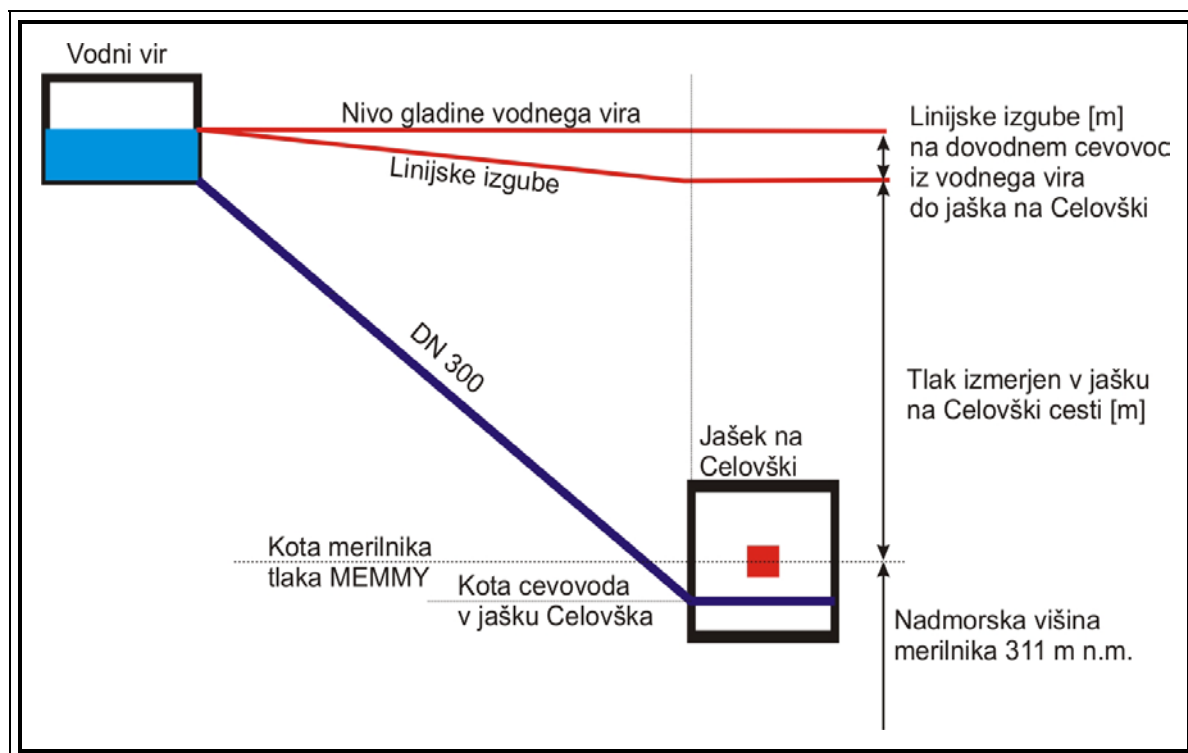
5.3.3 Vodni vir

Vodni vir je v modelu uporabljen zato, ker v programu EPANET vodni vir predstavlja element, ki ima stalno (oz. neodvisno podano) gladino. Zaradi te poenostavitve ni bilo potrebno v model vnašati črpalke in vodohrana. V model oziroma v objekt vodni vir je bilo potrebno vstaviti časovni vzorec nihanja tlaka glede na izmerjene tlake v jašku na Celovški cesti, preko katerega se napaja celotno območje Dravelj.

Časovni vzorec nivoja rezervoarja moramo vnesti zaradi vpliva celotnega sistema Šentvid na območje Dravelj (poraba, črpališče Šentvid).

Postopek izračuna podatkov časovnega vzorca vodnega vira iz meritev na terenu

Za osnovo smo vzeli nadmorsko višina merilnega mesta na Celovški cesti, ki znaša 311 m n.m.. Višini merilnega mesta smo prišteli izmerjen tlak (enota tlaka v metrih) na merilnem mestu Celovška cesta. S tem smo dobili nadmorsko višino gladine vode v »vodnem viru« (brez upoštevanja tlačnih izgub v dovodni cevi), ki nam da takšen tlak, kot smo ga izmerili z meritvami. S tem smo izničili vpliv (porabo) preostalega šentviškega sistema na območje Dravelj. Za upoštevanje tlačnih izgub v dovodni cevi smo na podlagi hitrosti vode (izmerjen pretok vode v cevi DN 300) v dovodni cevi izračunali padec višine in tako korigirali višino vodnega vira. Razliko višine smo prišteli nadmorski višini vozlišča in tlaka (v metrih) v vozlišču (Slika 14).

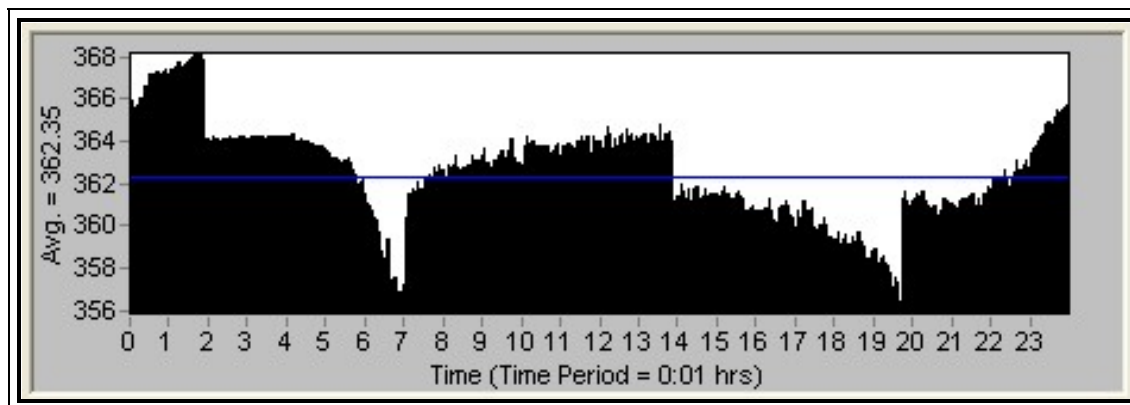


Slika 14: Shema k preračunu časovnega vzorca nivoja gladine vodnega vira

Izračun za en podatek časovnega vzorca nihanja vodnega vira

kota vozlišča - merilnika na Celovski:	311 m
izmerjen tlak merilnika 4.8 bar	48 m
tlačna izguba v dovodni cevi (npr. $v = 0.35$ m/s)	0.5 m
$X = 311 \text{ m} + 48 \text{ m} + 0.5 \text{ m} =$	359.5 m

Rezultati izračuna časovnega vzorca nihanja gladine vodnega vira so vneseni v program EPANET in so predstavljeni na Sliki 15.



Slika 15: Časovni vzorec nihanja gladine v vodnem viru nad vozliščem na Celovski cesti

5.3.4 Dodatna predpostavka v modelu

Na odseku med rezervoarjem je po izračunu za linijske izgube potrebno izračunati dolžino dovodnega cevovoda do prvega vozlišča modela. Na podlagi meritev pretoka in tlaka je pri pretoku 50 l/s v vozlišču pri izpustu, v območju Dravelj, padec tlaka iz 4.9 bar na 4.68 bar (meritve tlaka in pretoka so predstavljene v poglavju 6.2, podatek o padcu tlaka in količini pretoka je pridobljen iz Slike 13 v poglavju 6.4.3). Izračun, ki je predstavljen v nadaljevanju, je pokazal, da je potrebno v modelu predpostaviti za izbran premer cevi (DN 300 mm) in hrapavosti, ki jo program izračuna samodejno glede na predpostavljeno hrapavost cevovoda (Roughness 0.1 mm), dolžino cevi 1295 m med rezervoarjem in prvim vozliščem območja (Slika 16).

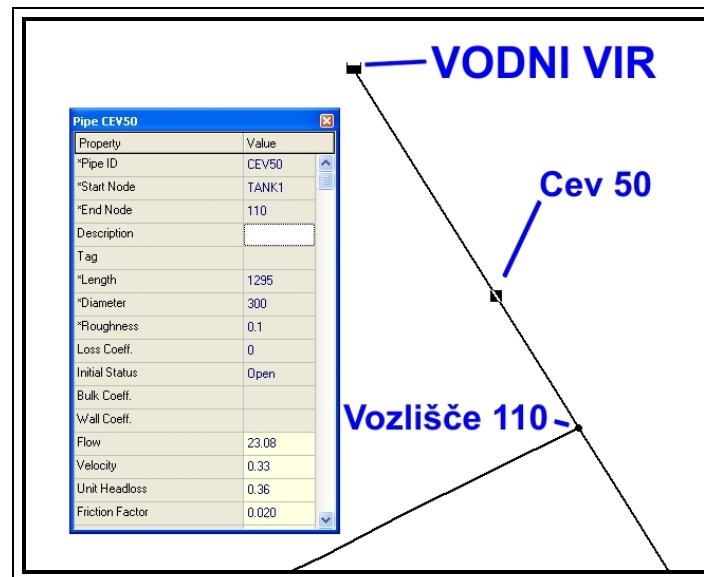
Izračun dolžine cevi med rezervoarjem in prvim vozliščem hidravličnega modela

Izračunati je potrebno razliko tlaka, ki je bila izmerjena v jašku na vstopu v območje, ob pretoku vode 50 l/s skozi litoželezno cev DN 300. Enačbo za izračun dolžine l izpeljemo iz enačbe 4.1 za linijske izgube.

$$\Delta p_{(Q=50l/s)} = 4.8bar - 4.58bar = 0.22bar \Rightarrow h_f = 2.2 m$$

$$l = \frac{2gd_i h_f}{\lambda v^2} = \frac{2 \cdot 9.81m/s^2 \cdot 0.3m \cdot 2.2m}{0.02 \cdot 0.707^2 m^2/s^2} = 1295 m$$

Slika 16 prikazuje vnesene podatke po izračunu dolžine cevi za dovodno cev v območje Dravelj.



Slika 16: Prikaz podatkov za linijski element CEV 50 na podlagi izračuna

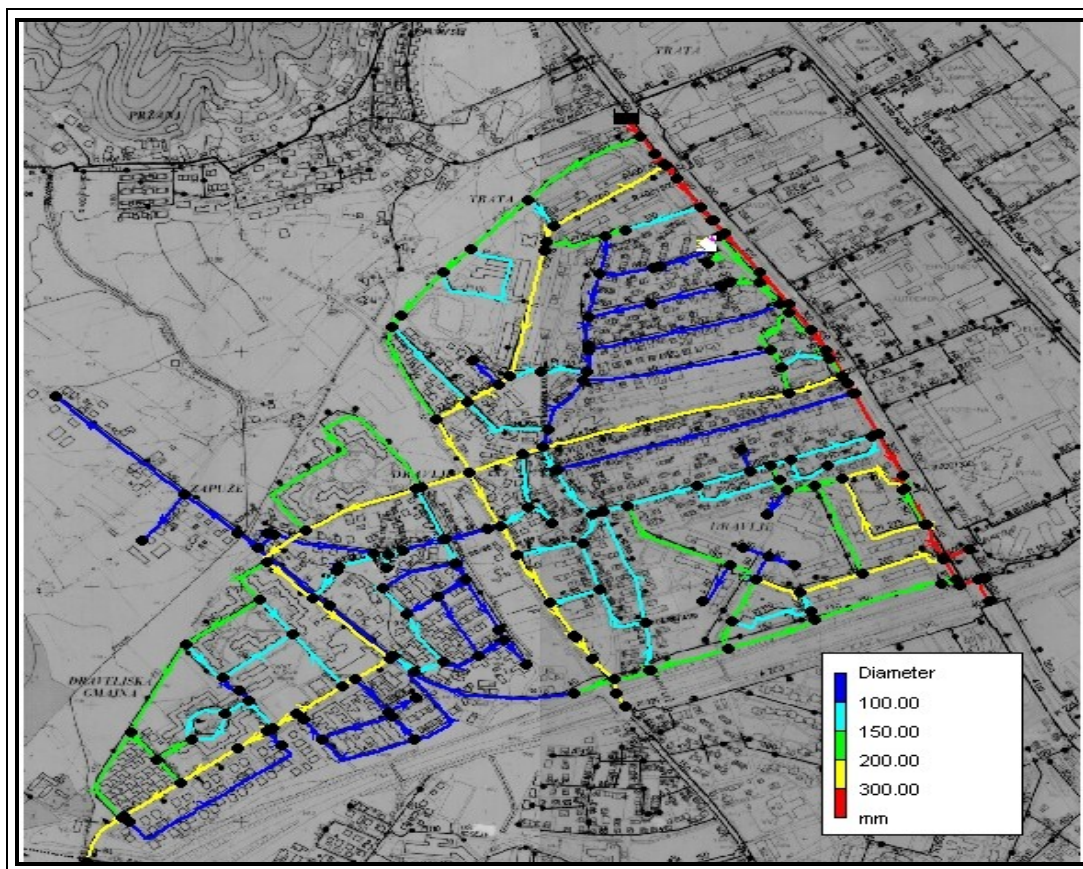
5.4 Rezultati matematičnega modela programa EPANET

5.4.1 Shematski prikaz hidravličnega modela

Na Sliki 17 je na osnovni karti 1:5000 predstavljen shematični prikaz hidravličnega modela, ki je bil izdelan za območje Dravelj. Legenda (barvna skala) na Sliki 17 opisuje premere cevi po območju.

Podatki s katerimi je opisan matematični model območja Dravelj:

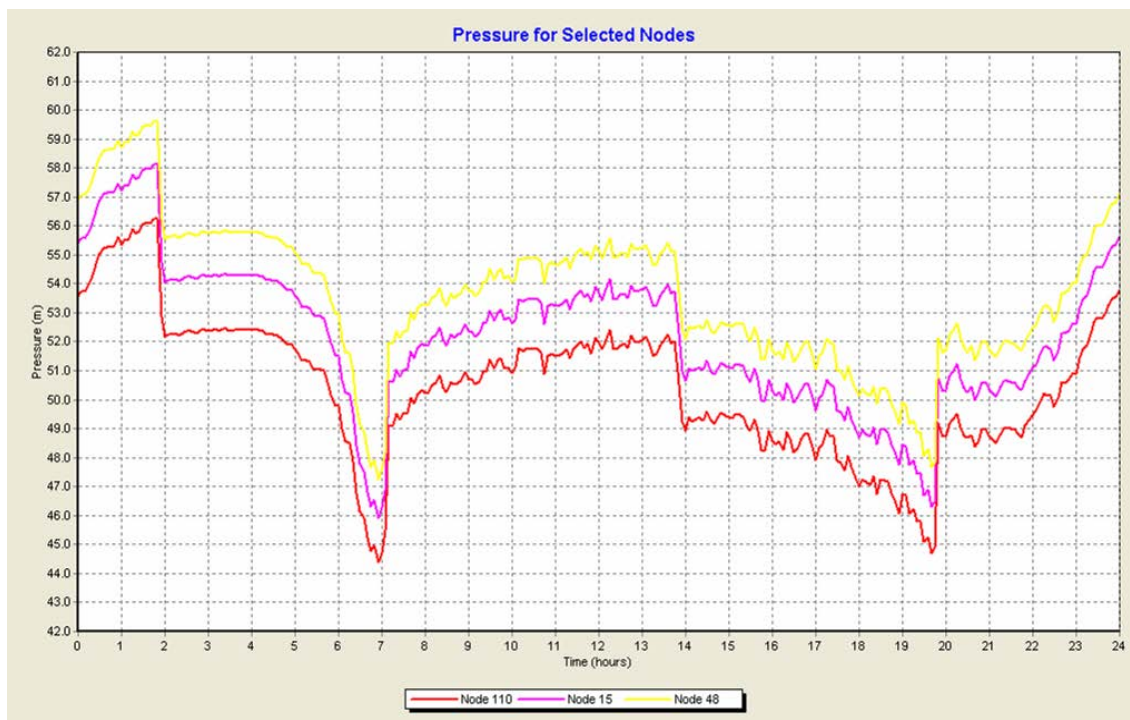
- 197 vozlišč
- 251 cevi
- 1 vodni vir



Slika 17: Shema hidravličnega modela območja Dravlje

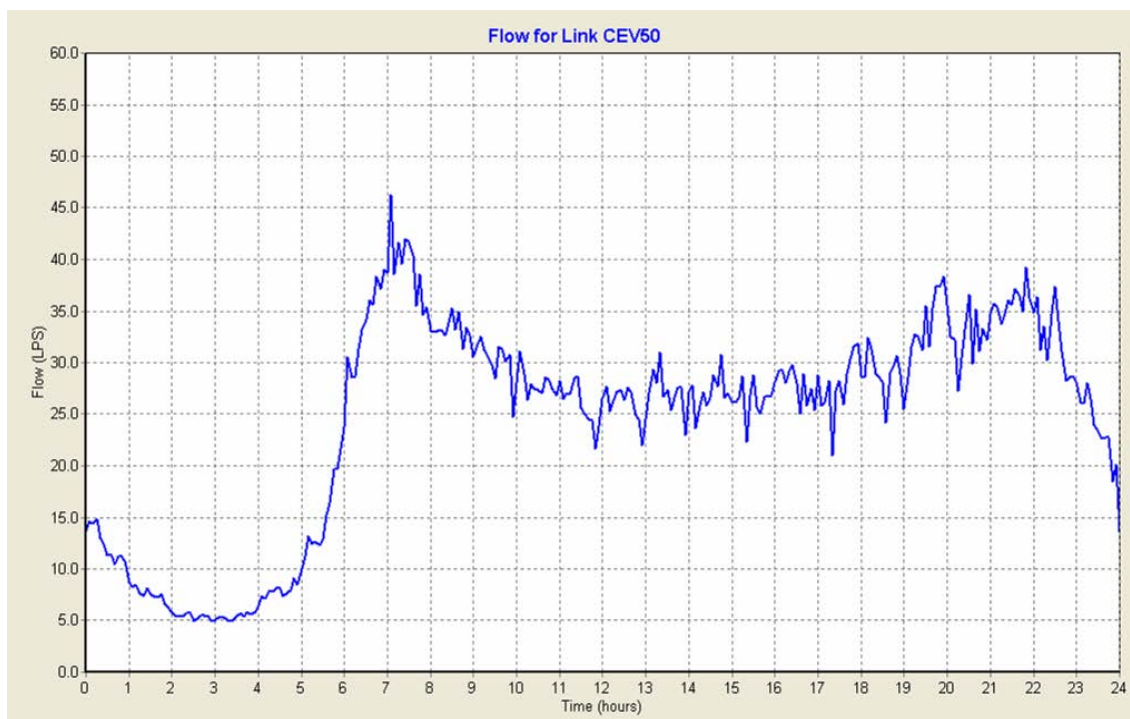
5.4.2 Simulacija 24 ur

Glede na vse predpostavke, omenjene v poglavju 5.3, je bil pognan program EPANET. Najprej za območje Dravelj, simulacija 24 urne meritve tlaka in pretoka. V drugem delu simulacije pa je bilo območje obremenjeno z dvema dodatnima izpustoma vode preko dveh hidrantov. Na ta način smo simulirani hidravlično ekstremne razmere v območju Dravelj (požarna obremenitev). Primerjava rezultatov je opisana v poglavju 7.



Graf 5: Simulacija tlaka s programom EPANET / 24 ur

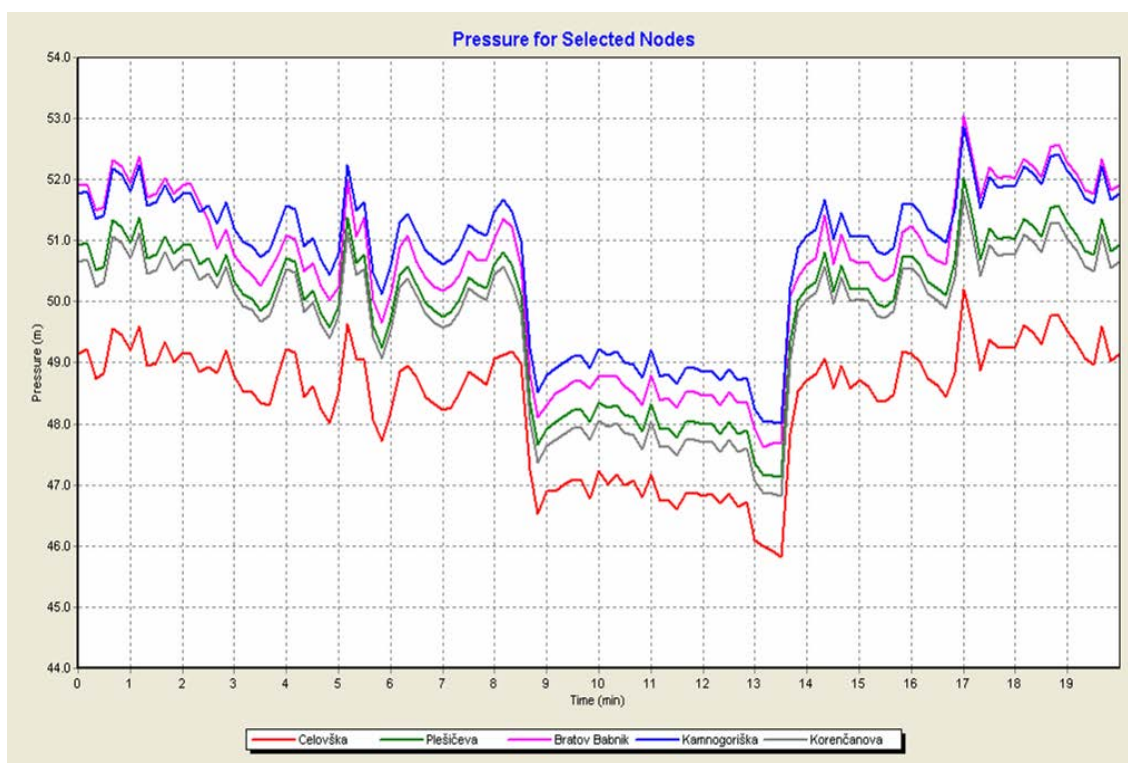
Graf 5 prikazuje simulacijo tlaka na izbranih lokacijah območja Dravelj. Lokacije so izbrane na podlagi terenskih meritev v samem območju.



Graf 6: Simulacija pretoka s programom EPANET / 24 ur

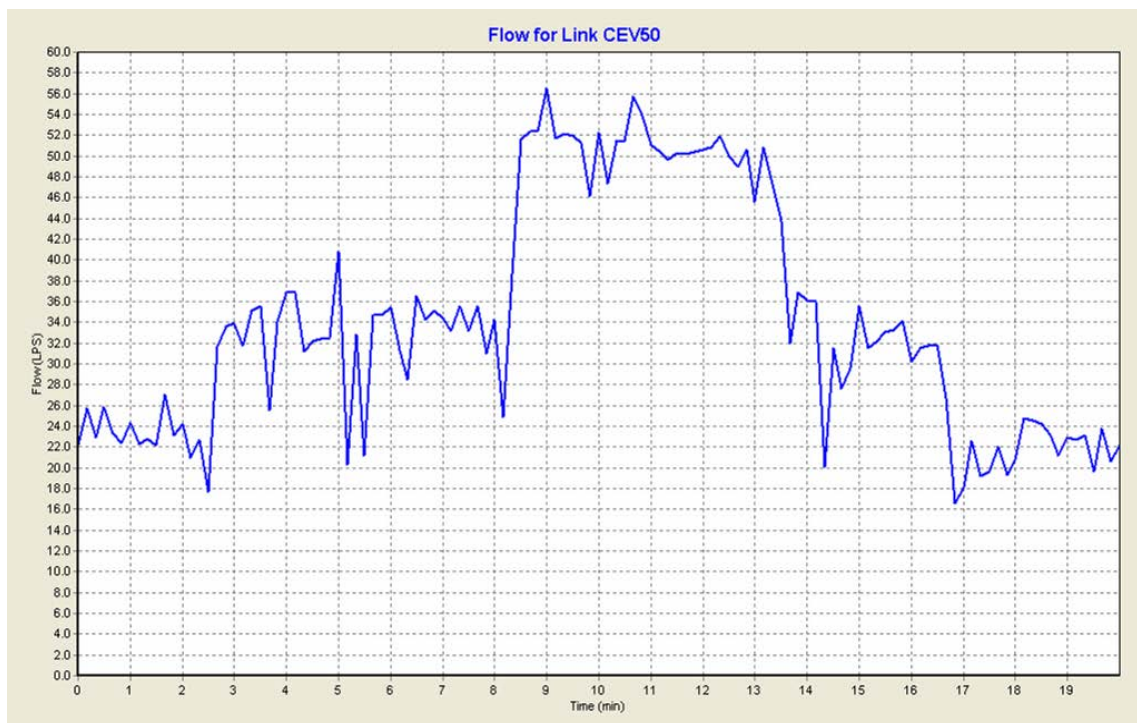
Graf 6 prikazuje simulacijo pretoka na dovodni cevi za celotno območje Dravlj.

5.4.3 Simulacija izpusta (požarna obremenitev)



Graf 7: Simulacija tlaka s programom EPANET / požarna obremenitev

Graf 7 prikazuje simulacijo tlaka na izbranih vozliščih, kjer so bile izvedene meritve tudi na terenu. Graf prikazuje razmere, katere nastopijo v primeru požarne obremenitve območja.



Graf 8. Simulacija pretoka s programom EPANET / pozar na obremenitev

Simulacija pretoka na dovodni cevi je prikazana na Grafu 8. Simulacija je bila izvedena z namenom, da se območje ekstremno obremeni z izpustom velike količine vode.

6 MERITVE TLAKOV IN PRETOKOV NA OBMOČJU DRAVELJ

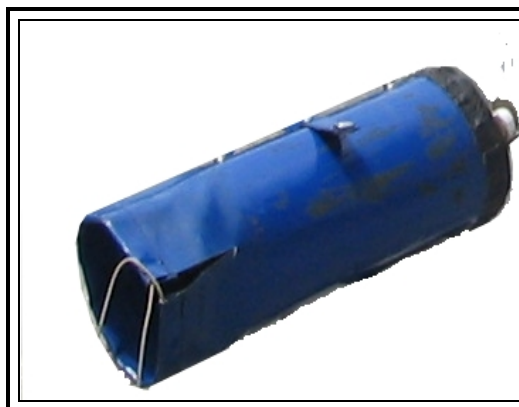
6.1 Opis merilne opreme

6.1.1 Merilnik tlaka

Pri podjetju JP VO-KA se za izvajanje meritve tlaka, kot tudi za meritev pretoka na impulznih vodomerih, uporablja merilna oprema za merjenje tlaka MEMMY NT (Slika 18) in MEMMY (Slika 19), ki se pri podjetju JP VO-KA uporabljajo za izvajanje meritev tlaka, kot tudi za meritev pretoka na impulznih vodomerih.



Slika 18: Merilnik tlaka MEMMY NT



Slika 19: Merilnik tlaka MEMMY

Merilnik deluje na osnovi piezo-elektične celice, ki kot posledica dinamičnih obremenitev proizvaja električno napetost, ki se ustrezno pretvori v tok od 4 – 20 mA. Natančnost merilnika je 0.5 % glede na celotno območje, ki je od 0 – 20 bar.

Merilniki tlaka MEMMY so starejše izdelave, ki jih je podjetje JP VO-KA uporabljalo do vključno z letom 2005. Sedaj pa so se že uveljavili novi merilniki tlaka MEMMY NT (NT - nova tehnologija), ki jih je podjetje dobilo v letu 2002. Sedaj ima podjetje na razpolago 25 kosov merilnikov tlaka MEMMY NT, ki jih uporablja za meritve po vodovodnem sistemu, za opravljanje meritev požarne varnosti in reševanje problemov tlaka v stavbah (zamašitve, visok tlak in podobno).

6.1.2 Merilnik pretoka KROHNE

Merilnik KROHNE UFM 610 P (Slika 20) je namenjen merjenju pretoka tekočin v polnih ceveh s pomočjo pritrditve merilnih sond neposredno na cev, torej brez poseganja v sistem.

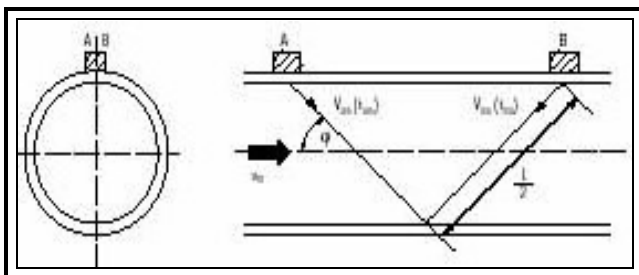


Slika 20: Merilnik pretoka KROHNE UFM 610 P brez senzorjev

Karakteristike merilnika KROHNE UFM 610 P:

- za premere od 13 mm do 5000 mm
- merilno območje: pretok 0.1 – 100.000 m³/h oziroma hitrost 0.2 – 7 m/s
- natančnost $\leq \pm 2\%$ od vrednosti meritve
- zaščita IP 65
- za procese do temperature 60°C
- izhod 4 - 20 mA
- za tekočine z $Re > 10000$

Merilnik uporablja metodo razlike časovnega prehoda. Metoda uporablja dejstvo, da je hitrost potovanja ultrazvočnega signala odvisna od povprečne hitrosti pretoka medija, po katerem signal potuje. Kakor plavalec plava proti toku, tako je ultrazvočni signal, ki potuje v nasprotni smeri toka tekočine počasnejši kot v smeri pretoka.



Slika 21: Prikaz delovanja ultrazvočnega merilnika UFM 610 P



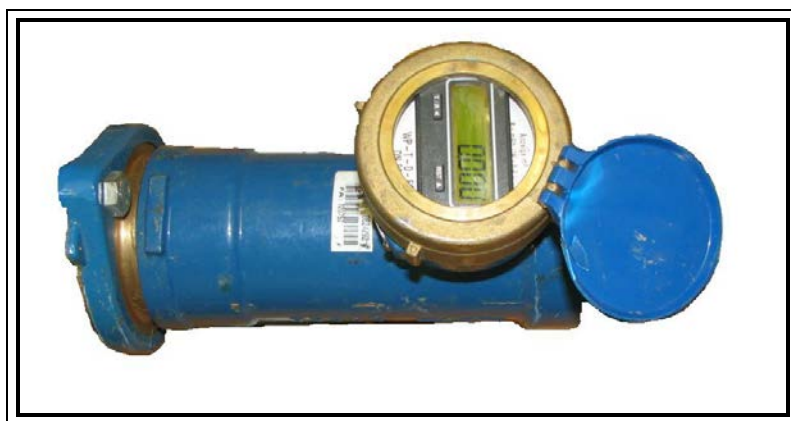
Slika 22: Prikaz postavitve merilnih sond ultrazvočnega merilnika UFM 610 P

Princip delovanja ultrazvočnega merilnika

Za meritev sta poslana skozi medij dva ultrazvočna pulza, eden v smeri pretoka (Slika 21), drugi pa v nasprotni smeri pretoka. Senzorji izmenično delujejo kot oddajnik in sprejemnik. Postavitev senzorjev merilnika Krohne UFM 610 P na cev refleksne meritve pretoka je prikazana na Sliki 22.

6.1.3 Merilnik pretoka ABB WP-T-D

Merilnik pretoka ABB WP-T-D (Slika 23) je bil prvotno nameščen na hidrantsni nastavek (za meritev porabe vode iz podtalnih hidrantov). Ker pa je bil neroden in nevaren za uporabo, kakršne smo se posluževali pri podjetju JP VO-KA, smo zaradi lažjega in bolj varnega dela napravo predelali in je sedaj uporabniku prijaznejša in uporabnejša kot prej.



Slika 23: Merilnik pretoka ABB WP-T-D

Karakteristike merilnika pretoka ABB WP-T-D:

- nominalni pretok $Q_n = 40 \text{ m}^3/\text{h}$
- maksimalni pretok $Q_{\max} = 130 \text{ m}^3/\text{h}$
- minimalni pretok $Q_{\min} = 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$
- napaka za pretok večji od $Q_{\max} \pm 2\%$
- napaka za pretok manjši od $Q_{\min} \pm 5\%$

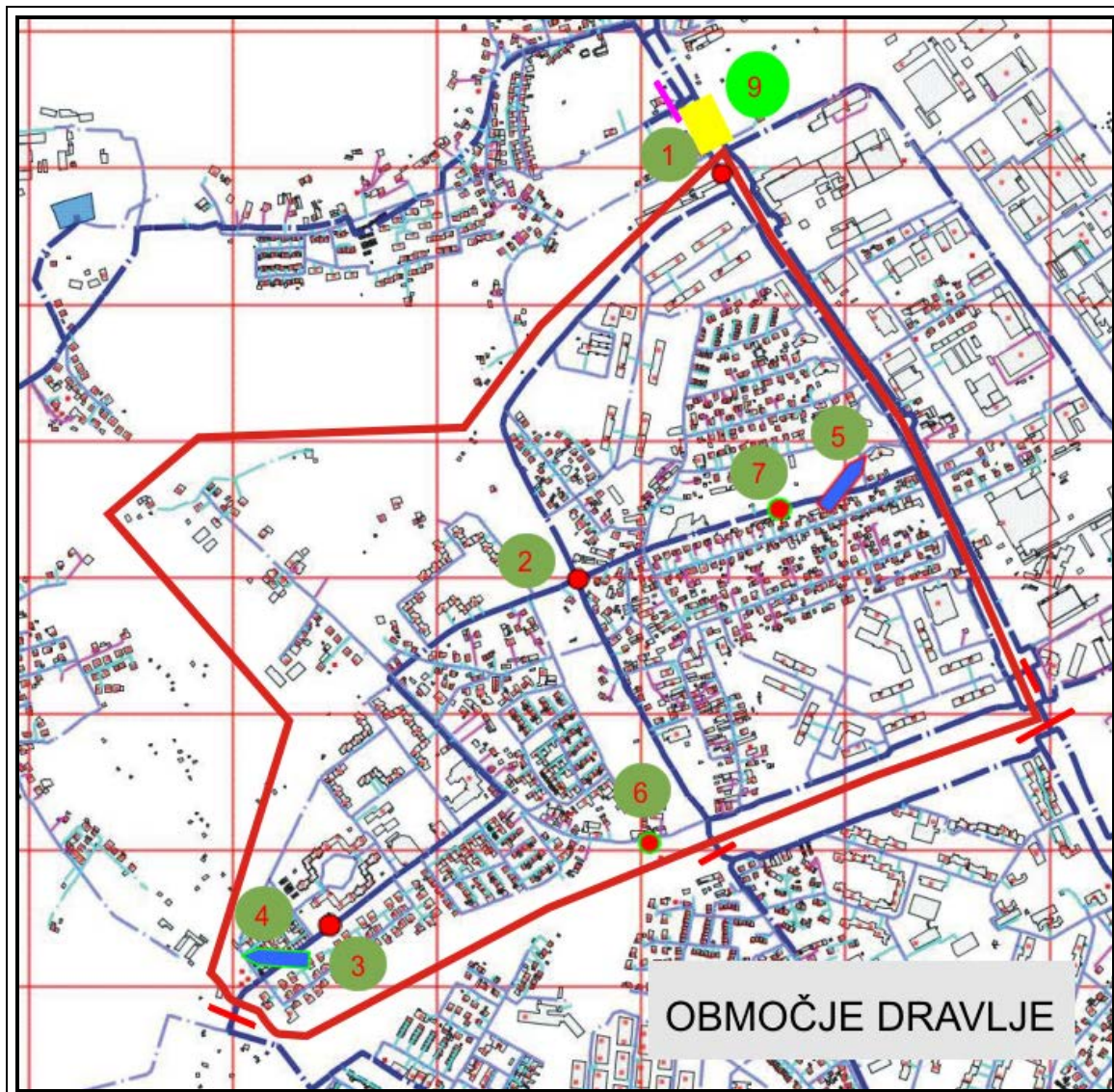
6.2 Potek meritev tlakov in pretokov na območju Dravelj

Meritve tlaka in pretoka so se izvajale za potrebe umerjanja matematičnega modela, in sicer za razvojno službo podjetja JP VO-KA. Meritve so se izvajale na celotnem območju vodovodnega sistema Šentvid. Sistem Šentvid je bil razdeljen na območja, na katerih je bilo možno merjenje celotnega pretoka za zaključeno območje. Meritev tlaka pa se je izvajala na 16 lokacijah sistema Šentvid. Meritve so se izvajale od dne 20.05.2005 do 27.05.2005.

Na Sliki 24 je shematsko prikazano območje Dravelj, na katerem so se izvajale meritve tlakov in pretokov. Na sliki so lokacijsko predstavljena merilna mesta merilnikov, ki so bili postavljeni za tedensko meritev in hkrati uporabljeni za meritev požarne obremenitve območja. Slika tudi prikazuje lokacije merilnikov, ki so bili postavljeni za potrebe meritev tlaka za požarno obremenitev in lokacije merilnikov (naprav) za simulacijo izpusta. Prav tako je na Sliki 24 prikazana postavitve merilnika pretoka.

Za območje Dravelj so se izvedle meritve tlakov in pretokov na območju, ki je bilo enostransko oskrbovano z vodo. Slika 24 prikazuje zapore zasunov za meritev območja Dravelj. Rdeče označeni zasuni ločujejo Centralni sistem od sistema Šentvid in so vedno zaprti. Modro označeni zasuni so bili zaprti samo v času, ko so se izvajale meritve v območju Dravelj.

Meritve za območje Dravelj so se izvajale, kot je bilo že omenjeno, v sklopu meritev ob umerjanju matematičnega modela sistema Šentvid. Postopek meritve je bil v naprej določen in sicer dva izpusta vode preko dveh hidrantov (podroben opis v poglavju 6.4.3). Poleg merilnikov tlaka, ki so bili nastavljeni za celotedensko meritev (na območju Dravelj so bili postavljeni trije stacionarni merilniki tlaka) smo postavili dva dodatna merilnika tlaka. Podatki o lokacijah merilnikov tlaka, mesto meritve in številka merilnega mesta (Slika 24) so opisani v Preglednici 11.



Slika 24: Shema območja Dravelj z lokacijami merilnikov

Legenda k Sliki 24:

-Meritev tlaka MEMMY NT tedenska
-Meritev tlaka MEMMY NT v času izpusta
-Izpust z ustnikom 20 mm
-Izpust z ustnikom 32 mm
-Meritev pretoka KROHNE UFM 610 P
-Zaprti zasuni
-Zapora zasunov ob meritvi

6.2.1 Meritev tlaka

Meritev tlaka so se izvajale s pomočjo digitalnih merilnikov tlaka proizvajalca podjetja ESO tip MEMMY NT (opis merilnika je v poglavju 6.1.1).

Preglednica 11: Merilniki tlaka na območju Dravelj

oznaka na Sliki 23	Lokacija	Kota merilnika [m n.m.]	Slika lokacije	OPIS
1	Celovška cesta - Žibert	311		Meritev tlaka v podzemnem jašku 1.2 m pod nivojem terena
2	Plešičeva ulica	309.2		Meritev tlaka v podzemnem jašku 1.7 m pod nivojem terena
3	Ulica bratov Babnik	307.0		Meritev tlaka v podzemnem jašku 1.2 m pod nivojem terena
4	Ulica bratov Babnik 73	308.5		Meritev tlaka - pretoka na podtalnem hidrantu s hidrantnim nastavkom 0.5 m nad nivojem terena IZPUST USTNIK 20 mm
5	Korenčanova za Dražgoško 20	310.0		Meritev tlaka - pretoka na podtalnem hidrantu s hidrantnim nastavkom 0.5 m nad nivojem terena IZPUST USTNIK 32 mm
6	Kamnogoriška cesta 8	308.1		Meritev tlaka na podtalnem hidrantu s hidrantnim nastavkom 0.5 m nad nivojem terena
7	Korenčanova za Dražgoško 30	310.1		Meritev tlaka na podtalnem hidrantu s hidrantnim nastavkom 0.4 m nad nivojem terena

6.2.2 Meritev pretoka

6.2.2.1 Meritev pretoka za celotno območje

Meritev pretoka se je izvajala z opremo proizvajalca KROHNE tip merilnika UFM 610 P. Ob zapori dveh zasunov na omrežju (Slika 24) je možna meritev pretoka (na Sliki 24 označeno s številko 9) skozi eno cev za celotno območje. Meritev pretoka se je izvajala v podzemnem jašku, kjer je bil nameščen ultrazvočni merilnik pretoka (Slika 25). Podatki o nastavljenih parametrih za meritev pretoka z merilnikom Krohne UFM 610 P so podani v Preglednici 12.

Preglednica 12: Parametri uporabljeni ob nastavitvi merilnika pretoka Krohne UFM 610 P

Premer	300 mm
Debelina stene	8.7 mm
Material	Litoželezo
Medij v cevi	voda



Slika 25: Merilnik KROHNE v jašku na Celovški cesti

6.2.2.2 Meritev (izračun) pretoka ob izpustu preko ročnika z ustniki

➤ Meritev pretoka preko ročnika z ustnikom 20 mm

V primeru iztoka preko ročnika z ustnikom 20 mm (Slika 27) izračunamo pretok na podlagi izmerjenega tlaka ob iztoku iz ročnika, ki ga merimo z merilnikom tlaka MEMMY NT. S pomočjo Bernoullijeve enačbe (6.1) izpeljemo enačbo za izračun trenutne hitrosti vode ob

upoštevanju dimenzije ustnika. Iz dimenzije ustnika izračunano površino prereza in iz teh dveh parametrov izračunamo pretok Q .

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + p = konst \quad (6.1)$$

kjer pomenijo:

ρ	gostota tekočine	kg/m^3
v	hitrost	m/s
g	gravitacijski pospešek	$9,81 \text{ m/s}^2$
h	višina nad izbrano ničelno ravnino	m

Izračun pretoka preko ročnika (približna metoda):

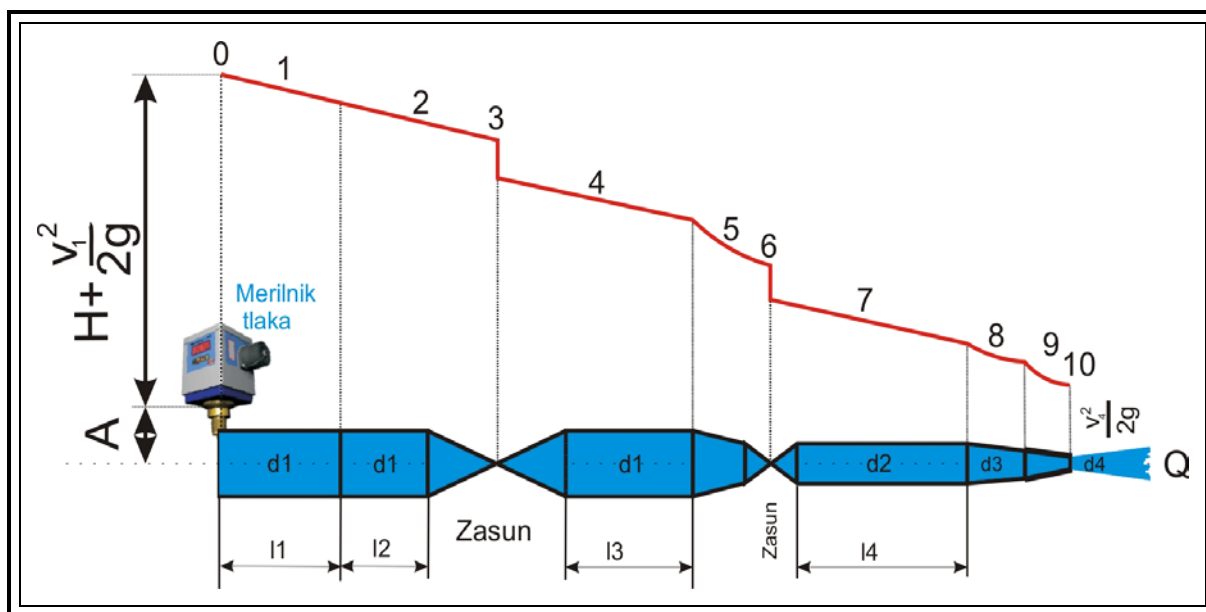
Za izračun pretoka skozi ustnik smo uporabili postopek, ki se uporablja za merjenje oziroma preizkušanje hidrantnega omrežja. Postopek, ki ga uporabljamo pri izvajanju preizkušanja hidrantov se sklicuje na Uradni list RS 22/1995 (Pravilnik o preizkušanju hidrantnih omrežji), v njem je opisan celoten postopek preizkusa hidrantnega omrežja. Za preračun izpustne količine vode je podana tabela iz katere se na podlagi izmerjenega tlaka odčita vrednost izpuščene vode. Za preračun količin izpuščene vode se uporablja Torricellijeva enačba.

Teoretični izračun iztečene vode z upoštevanjem lokalnih in linijskih izgub

Zaradi izgub, ki nastanejo (Slika 25) od merilnika tlaka pa do izpusta se je izračunala teoretična količina vode skozi ustnik 20 mm. Prikazana je sistemska napaka, ki se pojavi ob preizkušanju hidrantnih omrežij in se za izračun iztečene vode uporablja tabela, ki temelji na Torricellijevi enačbi (za izračun hitrosti vode); preko te enačbe se izračuna pretok skozi znano površino ustnika. Preglednica 13 opisuje koeficiente za linijski in lokalne izgube.

Preglednica 13: Vrednosti koeficientov izgube

<u>Vrsta izgube</u>	<u>Vrednost</u>
<u>Linijska izguba na cevi λ</u>	<u>0.02</u>
<u>Lokalna izguba konusa ξ_{kon}</u>	<u>0.06</u>
<u>Lokalna izguba zasuna ξ_{zas}</u>	<u>0.05</u>



Slika 26: Prikaz hidravličnih izgub v napravi za izpust vode

Podatki k Sliki 26:

l_1	0.10 m	d_1	0.052 m	A	0.1 m
l_2	0.05 m	d_2	0.032 m	H	46.9 m
l_3	0.10 m	d_3	0.022 m		
l_4	0.15 m	d_4	0.020 m		

Številke od 0 do 10 na Sliki 25 so označeni prerezi ročnika uporabljeni v Preglednici 14.

Izračun:

Osnova za preračun sta enačbi za linijske izgube (enačba 4.1 – poglavje 4.4.1) in lokalne izgube (4.4 – poglavje 4.4.1). V Preglednici 14 je opisana vsaka hidravlična izguba posebej – vezana na Sliko 26.

Uporabili bomo kontinuitetni pogoj, ki pravi da je pretok (Q) konstanten.

$$Q = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = S_3 \cdot v_3 = S_4 \cdot v_4$$

Iz kontinuitetnega pogoja izrazimo vse hitrosti, ki se pojavijo v ročniku za izpust vode zaradi različnih notranjih prevezov le-tega, v_1, v_2, v_3, v_4 in jih vstavimo v enačbe v Preglednico 14.

Nastavljena energijska enačba izpeljana iz Slike 26 je takšna:

$$\begin{aligned}
 A + H + \frac{v_1^2}{2g} - \sum_{i=1}^9 \Delta E_i - \frac{v_4^2}{2g} &= 0 \\
 A + H + \frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2 \cdot g} - \frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot (l_1 + l_2)}{d_1} - \frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \xi_{zas1} - \frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_3}{d_1} - \\
 - \left(\frac{Q^2}{S_2^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon1}}{d_2} \cdot \frac{S_2^2}{S_1^2} + \frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon1}}{d_1} \cdot \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} \right) \right) - \\
 - \frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \xi_{zas2} - \frac{Q^2}{S_2^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_4}{d_2} - \left(\frac{Q^2}{S_3^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon2}}{d_3} \cdot \frac{S_3^2}{S_2^2} + \frac{Q^2}{S_2^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon2}}{d_2} \cdot \left(1 - \frac{S_3^2}{S_2^2} \right) \right) - \\
 - \left(\frac{Q^2}{S_4^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon3}}{d_4} \cdot \frac{S_4^2}{S_3^2} + \frac{Q^2}{S_3^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon3}}{d_3} \cdot \left(1 - \frac{S_4^2}{S_3^2} \right) \right) - \frac{Q^2}{S_4^2 \cdot 2 \cdot g} = 0
 \end{aligned}$$

V konusih (nehipnih zožitvah) se ne upošteva lokalnih izgub (če so zožitve pod manjšim kotom kot 10°) ampak upoštevamo linijske izgube, ki jih lahko aproksimiramo z upoštevanjem faktorja razmerja prerezov.

Izračun površin prerezov:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.052^2}{4} = 0.00212 \text{ m}^2$$

$$S_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.032^2}{4} = 0.0008 \text{ m}^2$$

$$S_3 = \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.022^2}{4} = 0.00038 \text{ m}^2$$

$$S_4 = \frac{\pi \cdot d_4^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.02^2}{4} = 0.00031 \text{ m}^2$$

Preglednica 14: Pregled izračuna energijskih izgub za ročnik z ustnikom 20 mm

Prerez	Enačba in podatki	Rezultat
0	$A + H + \frac{v^2}{2 \cdot g} = H + \frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2 \cdot g} = 0.1 + 46.7 + \frac{Q^2}{0.00212^2 \cdot 2 \cdot 9.81} =$	47 + 11.340Q²

»se nadaljuje...

... nadaljevanje«

1,2	$\Delta E_{1,2} = \frac{v_1^2}{2g} \cdot \frac{\lambda \cdot (l_1 + l_2)}{d} = \frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot (l_1 + l_2)}{d_1} =$ $\frac{Q^2}{0.00212^2 \cdot 2 \cdot 9.81} \cdot \frac{0.02 \cdot (0.1 + 0.05)}{0.052} =$	654 Q²
3	$\Delta E_3 = \frac{v_1^2}{2g} \xi_{zas} = \frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2g} \xi_{zas} = \frac{Q^2}{0.00212^2 \cdot 2 \cdot 9.81} \cdot 0.05 =$	567 Q²
4	$\Delta E_4 = \frac{v_1^2}{2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_3}{d} = \frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_3}{d_1} = \frac{Q^2}{0.00212^2 \cdot 2 \cdot 9.81} \cdot \frac{0.02 \cdot 0.15}{0.052} =$	654 Q²
5	$\Delta E_5 = \frac{v_1^2}{2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon1}}{d_2} \cdot \frac{S_2^2}{S_1^2} + \frac{v_2^2}{2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon1}}{d_1} \cdot \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}\right) =$ $\frac{Q^2}{S_1^2 \cdot 2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon1}}{d_2} \cdot \frac{S_2^2}{S_1^2} + \frac{Q^2}{S_2^2 \cdot 2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon1}}{d_1} \cdot \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}\right) =$ $\frac{Q^2}{0.00212^2 \cdot 2 \cdot 9.81} \cdot \frac{0.02 \cdot 0.03}{0.032} \cdot \frac{0.0008^2}{0.00212^2} +$ $+ \frac{Q^2}{0.0008^2 \cdot 2 \cdot 9.81} \cdot \frac{0.02 \cdot 0.03}{0.052} \cdot \left(1 - \frac{0.0008^2}{0.00212^2}\right) =$	806 Q²
6	$\Delta E_3 = \frac{v_2^2}{2g} \xi_{zas} = \frac{Q^2}{S_2^2 \cdot 2g} \xi_{zas} = \frac{Q^2}{0.0008^2 \cdot 2 \cdot 9.81} \cdot 0.05 =$	3.982 Q²
7	$\Delta E_7 = \frac{v_2^2}{2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_4}{d} = \frac{Q^2}{S_2^2 \cdot 2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_4}{d} = \frac{Q^2}{0.0008^2 \cdot 2 \cdot 9.81} \cdot \frac{0.02 \cdot 0.15}{0.032} =$	7.466 Q²
8	$\Delta E_8 = \frac{v_3^2}{2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon2}}{d_3} \cdot \frac{S_3^2}{S_2^2} + \frac{v_2^2}{2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon2}}{d_2} \cdot \left(1 - \frac{S_3^2}{S_2^2}\right) =$ $\frac{Q^2}{S_3^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon2}}{d_3} \cdot \frac{S_3^2}{S_2^2} + \frac{Q^2}{S_2^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon2}}{d_2} \cdot \left(1 - \frac{S_3^2}{S_2^2}\right) =$ $\frac{Q^2}{0.00038^2 \cdot 2 \cdot 9.81} \cdot \frac{0.02 \cdot 0.03}{0.022} \cdot \frac{0.00038^2}{0.0008^2} +$ $+ \frac{Q^2}{0.0008^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{0.02 \cdot 0.03}{0.032} \cdot \left(1 - \frac{0.00038^2}{0.0008^2}\right) =$	3.327 Q²

»se nadaljuje...

... nadaljevanje«

9	$\Delta E_9 = \frac{v_4^2}{2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon3}}{d_4} \cdot \frac{S_4^2}{S_3^2} + \frac{v_3^2}{2g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon3}}{d_3} \cdot \left(1 - \frac{S_4^2}{S_3^2}\right) =$ $\frac{Q^2}{S_4^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon3}}{d_4} \cdot \frac{S_4^2}{S_3^2} + \frac{Q^2}{S_3^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{\lambda \cdot l_{kon3}}{d_3} \cdot \left(1 - \frac{S_4^2}{S_3^2}\right)$ $\frac{Q^2}{0.00031^2 \cdot 2 \cdot 9.81} \cdot \frac{0.02 \cdot 0.02}{0.02} \cdot \frac{0.00031^2}{0.00038^2} +$ $+ \frac{Q^2}{0.00038^2 \cdot 2 \cdot 9.81} \cdot \frac{0.02 \cdot 0.02}{0.022} \cdot \left(1 - \frac{0.00031^2}{0.00038^2}\right) =$	9.206 Q²
10	$\Delta E_{10} = \frac{v_4^2}{2g} = \frac{Q^2}{S_4^2 \cdot 2g} = \frac{Q^2}{0.00031^2 \cdot 2 \cdot 9.81} =$	530.368 Q²

SKUPAJ: 47 + 568.370 Q²

Rezultat iz Preglednice 14 in izračun pretoka vode:

$$A + H + \frac{v_1^2}{2g} - \sum_{i=1}^9 \Delta E_i - \frac{v_4^2}{2g} = 47 + 568370Q^2 = 0 \Rightarrow$$

$$Q^2 = \frac{47}{568370} = 8.26 \cdot 10^{-5} \Rightarrow Q = \sqrt{8.26 \cdot 10^{-5}} = 0.00909 \text{ m}^3/\text{s} = 9.09 \text{ l/s}$$

Primerjava rezultata med izračunom z vsemi energijskimi izgubami in Torricellijevo enačbo je prikazana v nadaljevanju in sicer v poglavju 6.4.3.1.

Izračun hitrosti iztečene vode:

- izpeljava hitrosti vode iz Bernoullijeve enačbe 6.1 - dobimo Torricellijevo enačbo 6.3

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = \rho g h \tag{6.2}$$

$$v = \sqrt{2 \times g \times h} \tag{6.3}$$

Izračun površine prereza ustnika

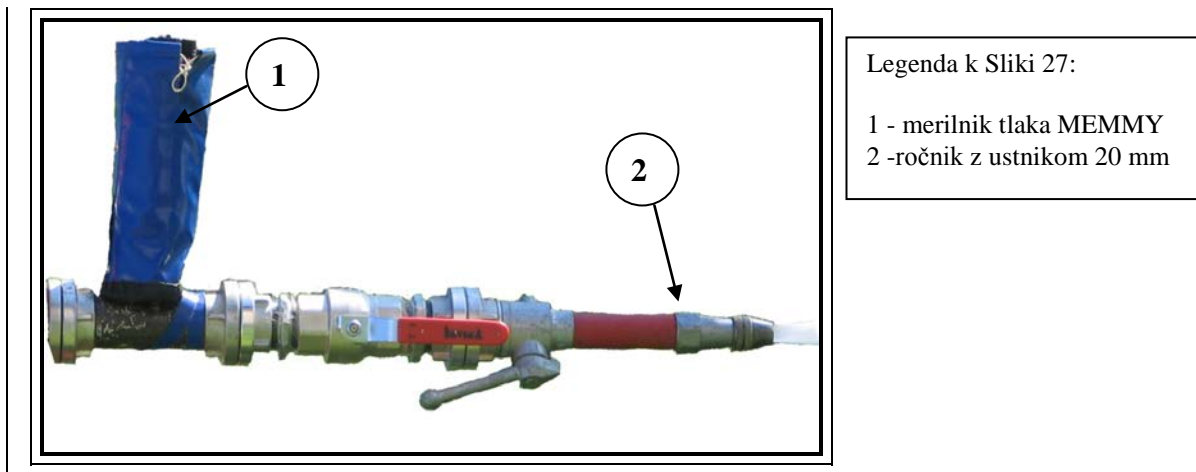
$$S = \frac{\pi \times d^2}{4} \tag{6.4}$$

Izračun pretoka

$$Q = S \times v = \frac{\pi \times d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (6.5)$$

kjer pomenijo:

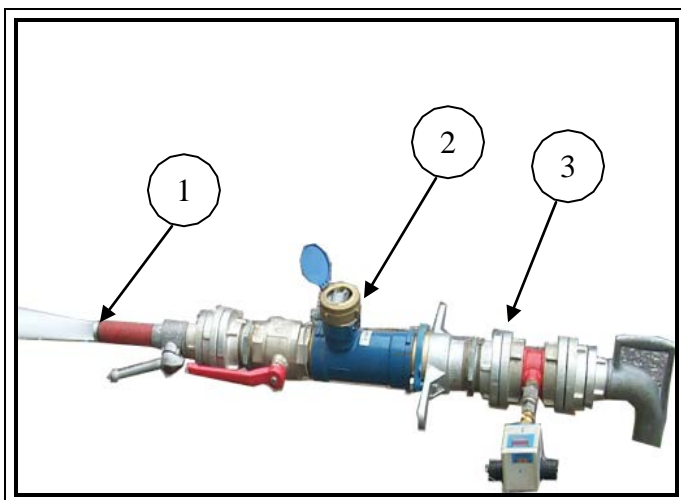
Q	pretok	l/s
S	površina prereza	m
v	hitrost vode ob iztoku	m/s
d	premer ustnika	m
g	gravitacijski pospešek	9,81 m/s ²
h	iz tlaka izražena višina	m



Slika 27: Priprava za izpust z ustnikom 20 mm

➤ **Meritev pretoka preko ročnika z ustnikom 32 mm**

V primeru iztoka preko ročnika z ustnikom 32 mm (Slika 28) je bil izmerjen pretok s pomočjo merilnika pretoka proizvajalca ABB, s katerim smo izmerili skupno količino iztečene vode; s pomočjo merilnika tlaka smo odčitali čas iztoka vode. Iz teh dveh podatkov dobimo povprečje iztečene vode v l/s.



Legenda k Sliki 28:

- 1 - ročnik z ustnikom 32
- 2 - merilnik pretoka
- 3 - merilnik tlaka MEMMY NT

Slika 28: Priprava za izpust z ustnikom 32 mm

Prikaz izračuna na podlagi meritev tlaka in sam izračun iztokov vode preko ročnikov je podrobneje predstavljen v poglavju 6.3.4.1.

6.3 Podatki iz dispečerskega centra Kleče za črpališče Šentvid

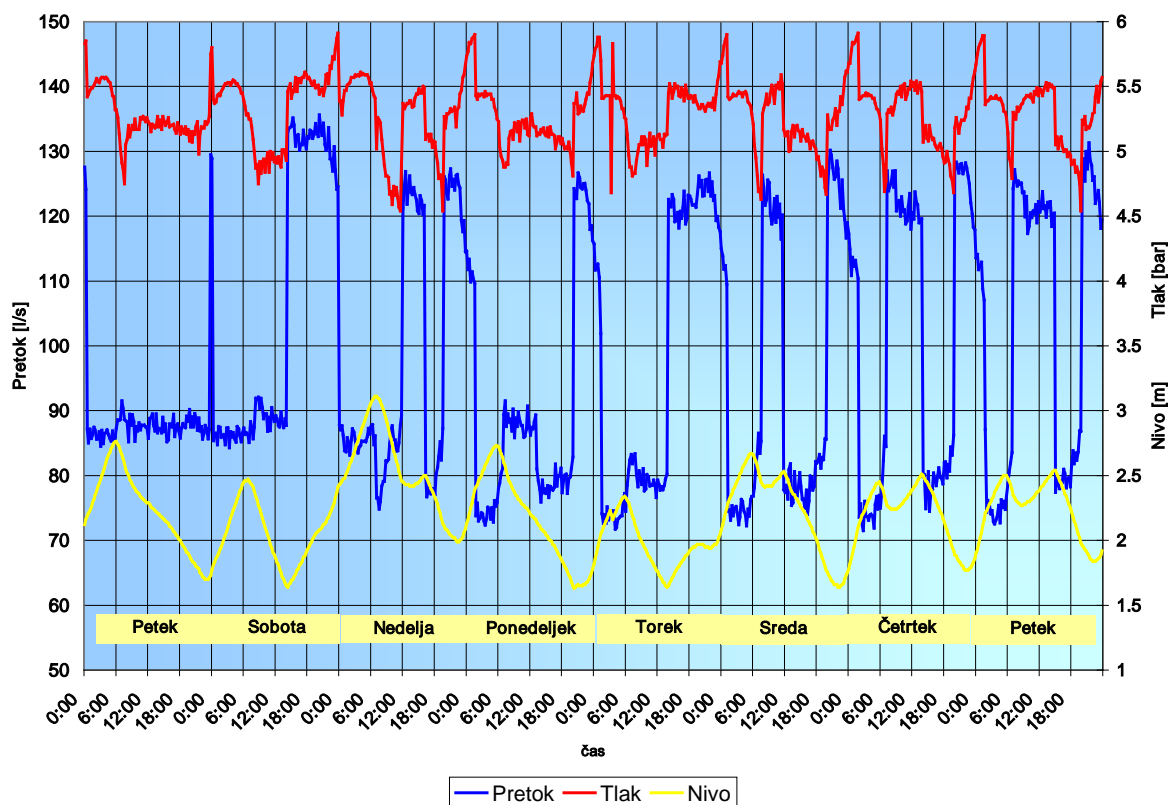
Podatki, ki so uporabljeni v Grafu 9 in Grafu 10, so pridobljeni iz dispečerskega centra Kleče. V dispečarskem centru se zbirajo podatki iz vodarn (tlak, pretok), vodohranov (nivo vode, pretok), prečrpalnic (tlak tlačna in sesalna, pretok), itd. Podatke spremlja računalnik s programom SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), katerega JP VO-KA uporablja za upravljanje in nadzor ljubljanskega vodovodnega sistema. Program, v katerem je baza podatkov za kontrolo posameznih podatkov, spremlja pridobljene podatke in v kolikor se podatek razlikuje od podatka v bazi (v meji določenega odstopanja), se sproži alarm, ki opozori na spremembo.

Pridobivanje podatkov v dispečerski center Kleče poteka preko krmilnikov in radijske povezave med objekti.

6.3.1 Tedenski podatki

Graf 9 nam prikazuje tedensko zgodovino delovanje črpališča Šentvid pridobljeno iz dispečerskega centra Kleče v času med 20.05. in 27.05.2005. Modra črta pomeni skupni

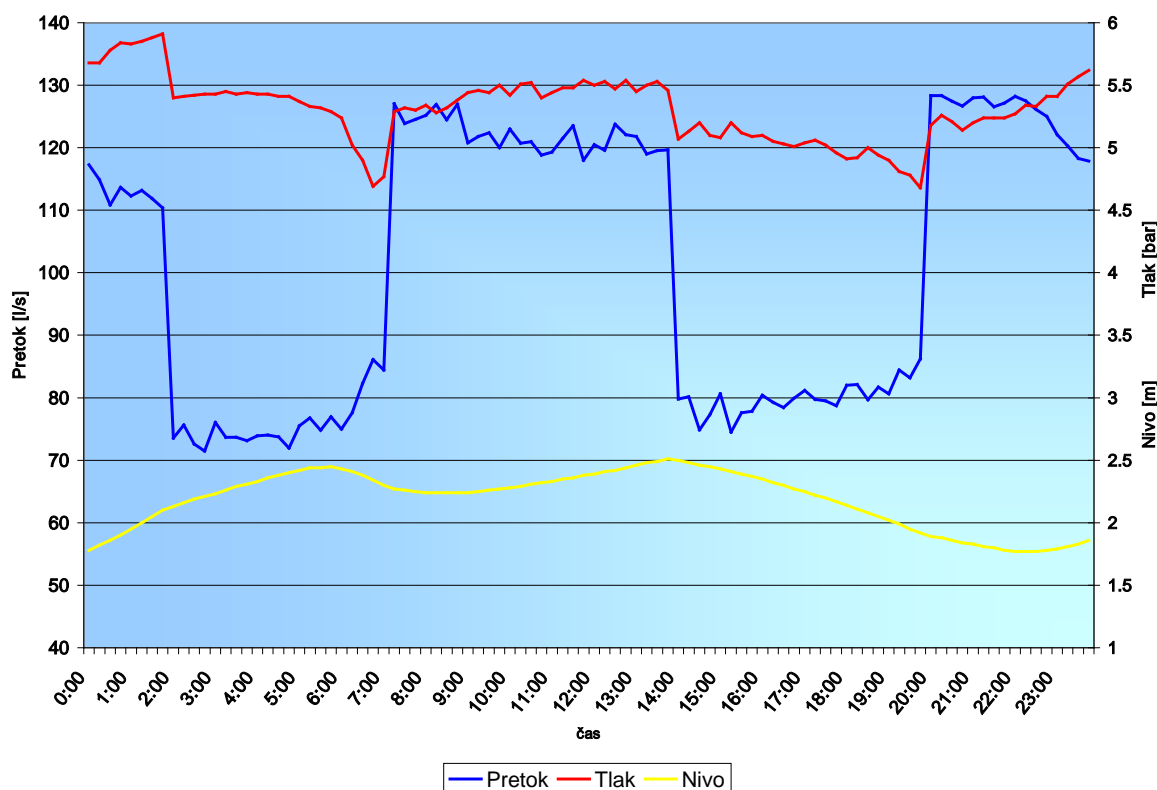
pretok iz črpališča, rdeča črta tlak na izhodu iz črpališča in rumena črta nivo vode v vodohranu Pržan. Iz Grafa 9 je lepo razvidna odvisnost tlaka od pretoka na črpališču - ko se poveča pretok, se dvigne tudi vrednost tlaka. Prav tako pa je opaziti odvisnost nivoja vodohrana Pržan od tlaka in posledično tudi od pretoka – vodohran se prazni oz. polni.



Graf 9: Tedenski graf podatkov iz dispečerskega centra Kleče za sistem Šentvid 20.05. – 27.05.2005

6.3.2 Dnevni podatki

Graf 10 je izrez podatkov iz Grafa 9 na dan 26.05.2005. Graf nam prikazuje dnevno nihanje tlaka in pretoka na črpališču Šentvid ter nivo višine vode v vodohranu Pržan. V Grafu 9 je še razločneje razvidna medsebojna odvisnost tlaka in pretoka, kot že omenjeno v poglavju 6.3.1. Vkllop črpalke na črpališču s kapaciteto cca. 45 l/s poveča tlak za vrednost 0,5 bara na črpališču. Iz grafa je razvidno tudi da se pri tlaku pod vrednostjo 5,3 bara, na črpališču Šentvid, vodohran Pržan prazni oziroma nad vrednostjo 5,3 bara polni.

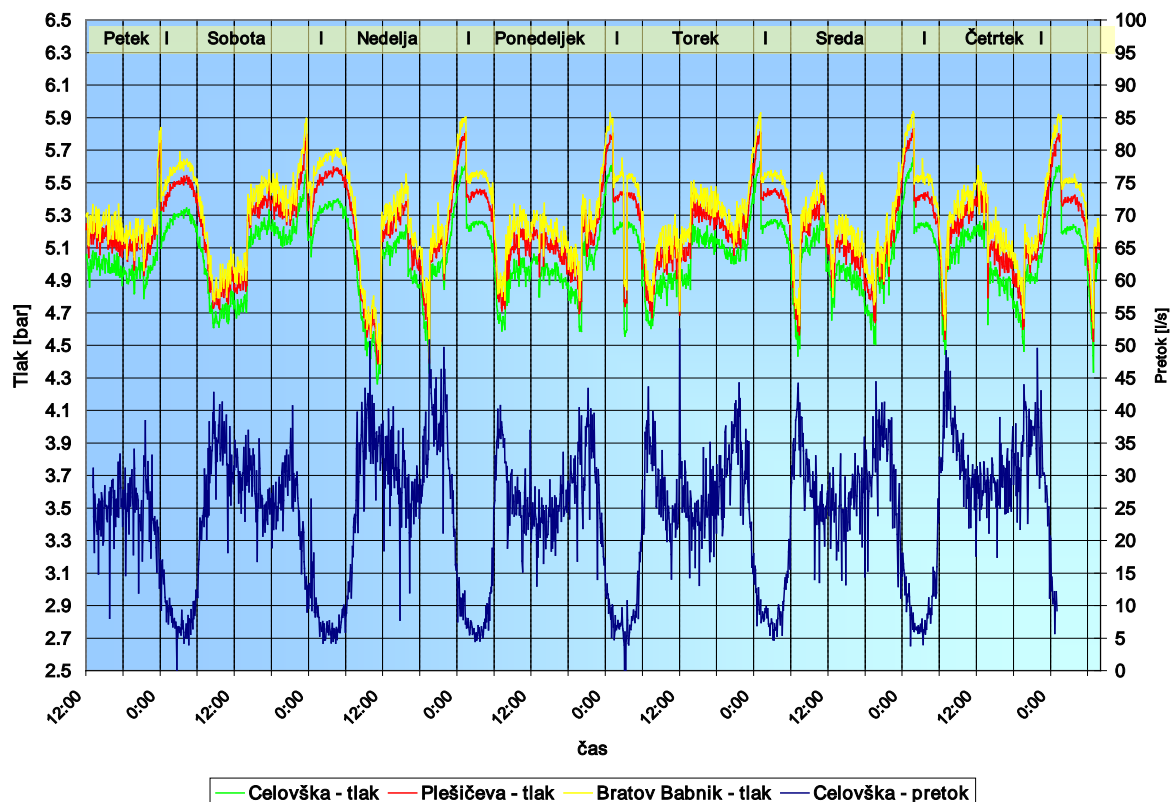


Graf 10: Dnevni podatki iz dispečerskega centra Kleče za sistem Šentvid 26.05.2005

6.4 Rezultati terenskih meritev za območje Dravlje

6.4.1 Graf terenskih meritev za območje Dravlje

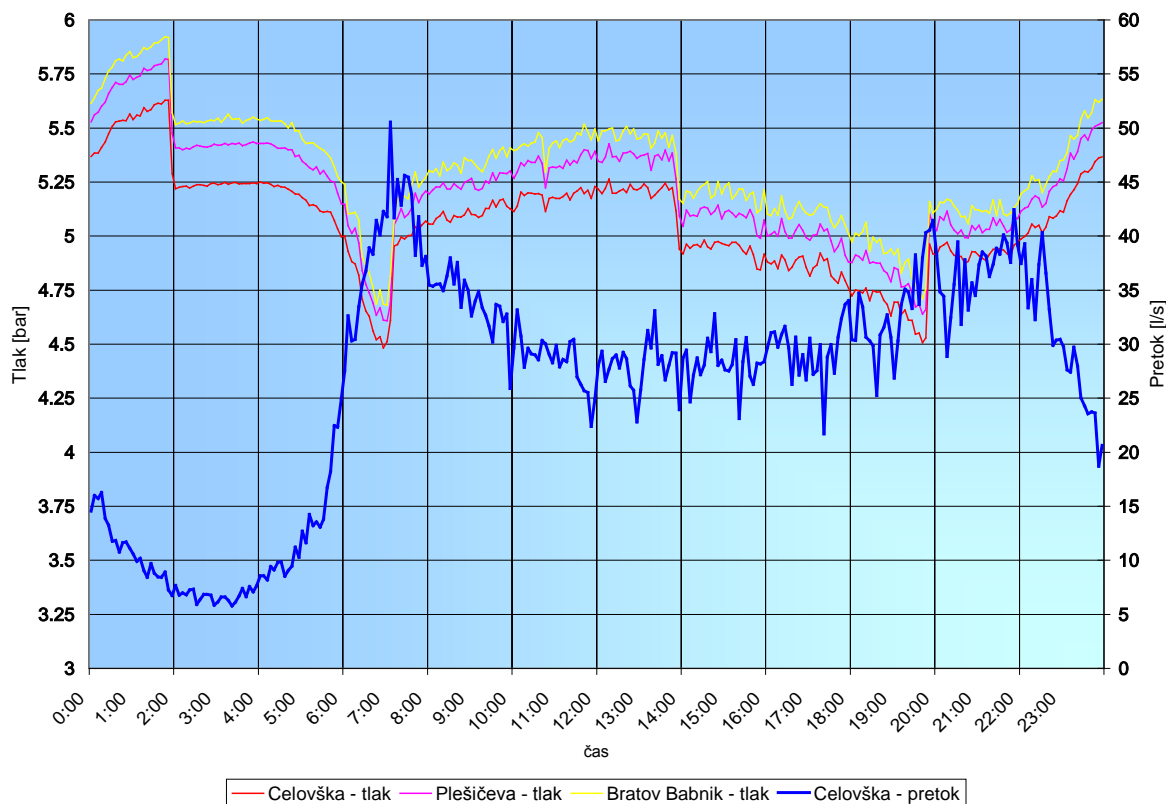
Meritev se je izvajala od 20.05.2005 do 27.05.2005. Vzorčenje je bilo na 10 sekund. Iz Graf 11 je razvidno nihanje tlaka in pretoka skozi teden, ter tudi razlika porabe vode med delovnimi dnevi in vikendom. Opazimo dnevni vzorec nihanja tako porabe vode, kot tudi tlaka. Razviden je vsakodnevni nočni padec porabe vode med 2:00 in 3:00 uro zjutraj (minimum porabe vode) potem pa še dva porasta porabe vode med 7:00 in 8:00 uro ter med 21:00 in 23:00 uro (maksimum porabe vode). Opaziti je, da je največja dnevna poraba, za obdobje v katerem je bila meritev izvedena, nedelja. To kaže na dejstvo, da je bilo ta dan v merjenem območju več ljudi doma kot na primer med delavnikom.



Graf 11: Tedenska meritev tlakov in pretokov za območje Dravelj

6.4.2 Graf dnevne meritve za območje Dravelj

Meritev se je izvajala 26.05.2005. Ta meritev je izrez tedenske meritve, vzorčenje meritve je bilo na 10 sekund. Iz Grafa 12 je razvidno 24 urno nihanje tlaka in pretoka. Kot tudi pri tedenskih meritvah se izkaže, da ponoči zaradi nizke porabe vode (6.5 l/s) tlak v sistemu naraste. V jutranji konici (med 7:00 in 8:00), ko je pretok v območje velik (tudi do 45 l/s), pa tlak v sistemu pade. Iz Grafa 12 je viden tudi vpliv črpališča Šentvid - ko se na črpališču Šentvid vključi črpalka (primerjamo Graf 10 – podatki črpališče Šentvid in Graf 12 – meritve območje Dravlje), se na območju Dravelj opazi dvig (skok) vrednosti tlaka in obratno.



Graf 12: Dnevna meritev tlakov in pretokov za območje Dravljje dne 26.05.2005

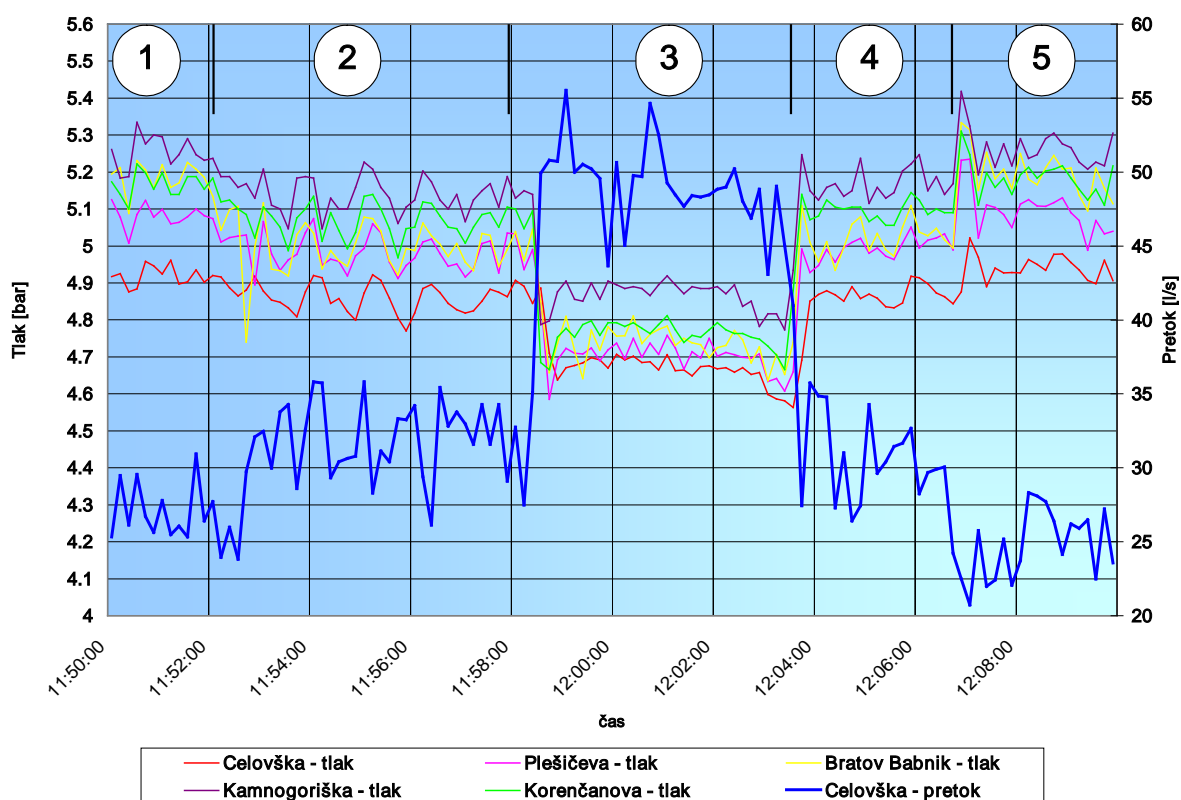
6.4.3 Graf meritev ob izpustu vode preko ročnikov (požarna obremenitev)

Meritev se je izvajala dne 24.05.2005. Vzorčenje merilnikov, ki so bili uporabljeni za izvajanje izpustov, je bilo na 1 sekundo. Ti podatki so se priredili na vzorčenje 10 sekund, ker je bilo vzorčenje »stacionarnih« merilnikov na 10 sekund.

Za meritev »požarne obremenitve« sistema smo delali po vnaprej predpisanem postopku, ki je opisan v Preglednici 15, na Grafu 13 pa je predstavljen postopek izpusta od začetka do konca.

Preglednica 15: Potek meritve ob izpustu vode preko ustnikov

Oznaka na Grafu 12	Potek meritve	Časovni potek
1	⇒ 5 minut brez izpusta (»stacionarni« tlak s porabo naselja)	11:50 – 11:54
2	⇒ 5 minutni izpust preko ročnik z ustnikom 20 mm	11:54 – 11:58
3	⇒ po 5 minutah odprt še ročnik z ustnikom 32 mm	11:58 – 12:03
3	⇒ po 5 minutah zaprtje ročnika z ustnikom 32 mm	11:58 – 12:03
4	⇒ po 3 minutah zaprtje še ročnika z ustnikom 20 mm	12:03 – 12:07
5	⇒ 3 minute brez izpusta (»stacionarni« tlak s porabo naselja)	12:07 - 12:10

**Graf 13: Meritev tlaka ob izpustu vode v območju Dravelj (požarna obremenitev)**

Meritev je pokazala, kako se območje Dravelj odziva na dodaten večji izpust. Lahko rečemo, da smo kratkotrajno simulirali izpust vode za gašenje požara na dveh mestih.

6.4.3.1 Izračuni iztečene vode ob simulaciji požarne meritve

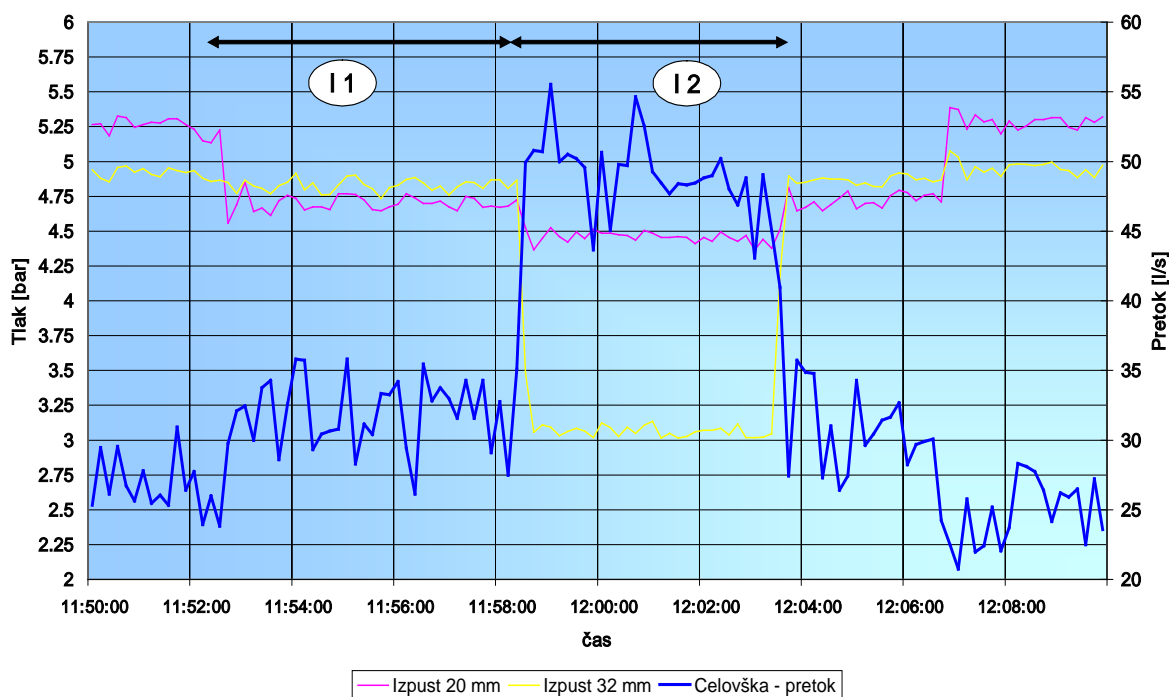
S pomočjo Grafa 14, na katerem je predstavljen rezultat meritve pretoka in dveh merilnikov tlaka, ki sta bila nameščena pri izpustih z ustnikom, smo izračunali trenutne iztoke ob meritvi požarne obremenitve območja Dravljje in jih kontrolirali s pomočjo merilnika pretoka.

○ Izpust 1

Izpust 1 (I 1) je bil izveden z ustnikom 20 mm. Tlak izpusta je 4.69 bar \Rightarrow odčitek iz Grafa 13.

- izračun:

$$Q = \sqrt{2gH} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 46.9} \cdot \frac{\pi(0.02)^2}{4} = 9.53 \text{ l/s}$$



Graf 14: Podatki za preračun izpustov vode

Legenda k Grafu 14:

I 1 ... Izpust 1 (preko ustnika 20 mm)

I 2 ... Izpust 2 (preko ustnika 32 mm)

Primerjava izračuna količine izpusta: Torricelli : Upoštevanje linijskih izgub

Primerjava količine iztoka izračunane z energijskimi izgubami (poglavje 6.2.2.2) skozi ročnik z ustnikom 20 mm (9.09 l/s) in količine iztoka, ki jo izračunamo s pomočjo Torricellijeve enačbe (izmerjen tlak na merilniku tlaka) 9.54 (l/s), pokaže razliko 0.45 l/s in relativno napako 4.7 %. Na meritve, ki se izvajajo za potrebe požarne varnosti, razlika v količini izpuščene vode (0.45 l/s) nima velikega vpliva.

○ **Izpust 2**

Izpust 2 (I 2) je bil izveden z dvema sočasnim izpustoma in sicer z ustnikom 20 mm in ustnikom 32 mm.

- izračun za ustnik 20 mm. Tlak izpust je bil 4.46 bara ⇒ odčitek iz Grafa 14.

$$Q = \sqrt{2gH} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 44.6} \cdot \frac{\pi(0.02)^2}{4} = 9.29 \text{ l/s}$$

- izračun za ustnik 32 mm

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{5589}{289} = 19.34 \text{ l/s}$$

kjer pomenijo:

V..... volumen iztečene vode ⇒ odčitek iz Merilnika pretoka ABB.

t..... čas iztoka ⇒ odčitek iz Grafa 14

Če izračunamo po postopku, s katerim se računa izpust preko ustnika 20 mm (Toricclijeve enačba), dobimo naslednji rezultat:

$$Q = \sqrt{2gH} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 31.0} \cdot \frac{\pi(0.032)^2}{4} = 0.01982 \text{ m}^3 / \text{s} = 19.82 \text{ l/s}$$

Pretok, ki ga izračunamo s pomočjo tlaka na izpustu nam izračuna 2.5 % večjo vrednost, kot jo dobimo, če izračunamo pretok s pomočjo impulznega merilnika pretoka.

V Preglednici 16 (Ogrin I, Peklaj U, 2005, str 28) so zbrani osnovni parametri preračuna in končni rezultati računa izpuščene vode.

Preglednica 16: Iztečena voda v času izpustov

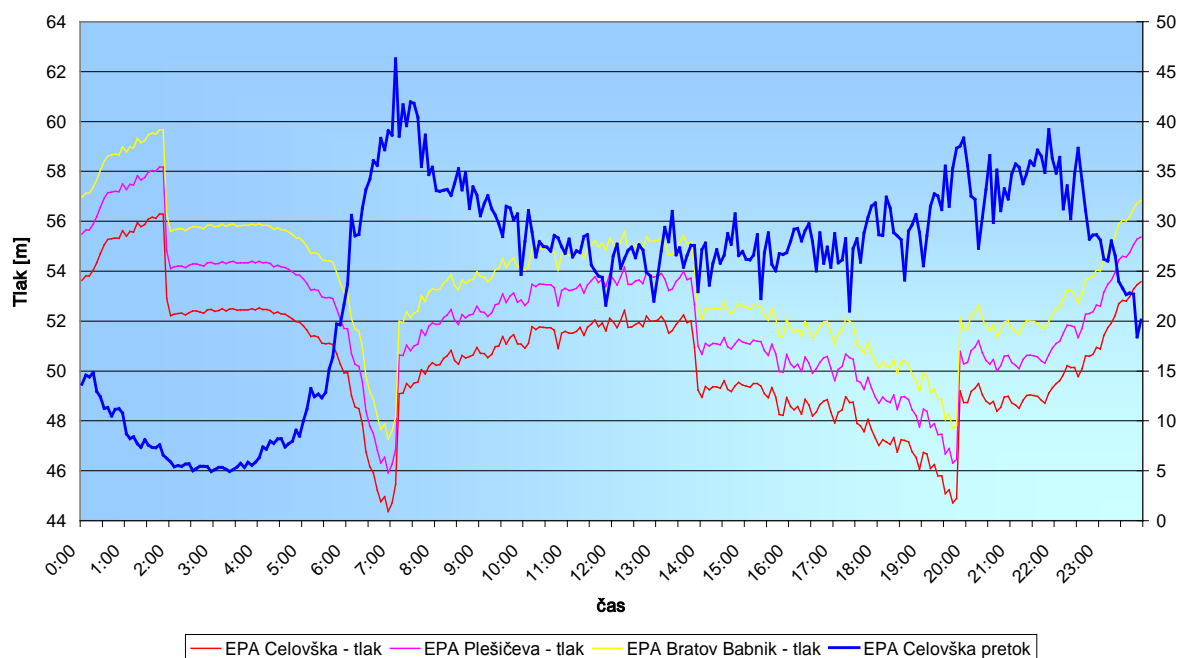
Kraj izpusta		Izpust 32 mm			Izpust 20 mm			
		Iztok [l]	čas [s]	Q_3 [l/s]	p_1 [bar]	Q_1 [l/s]	p_2 [bar]	Q_2 [l/s]
Ulica bratov Babnik 73	I 1 [20 mm]				4,69	9,53	4,46	9,29
Korenčanova za Dražgoško 20	I 2 [32 mm]	5589	289	19.34				

7 PRIMERJAVA REZULTATOV MERITEV IN HIDRAVLIČNEGA IZRAČUNA

7.1 Primerjava 24 urne meritve

Za primerjavo rezultatov 24 urne meritve smo predhodno podatke pridobljene na terenu in podatke iz programa EPANET uredili. Uredili smo jih na sledeč način: 24 urno meritev, katere vzorčenje je bilo na 1 minuto smo spremenili tako, da smo dobili vzorec podatkov v intervalu 5 minut. V programu EPANET za izpis nastavimo funkcijo, ki nam omogoča poljubni časovni izpis rezultatov.

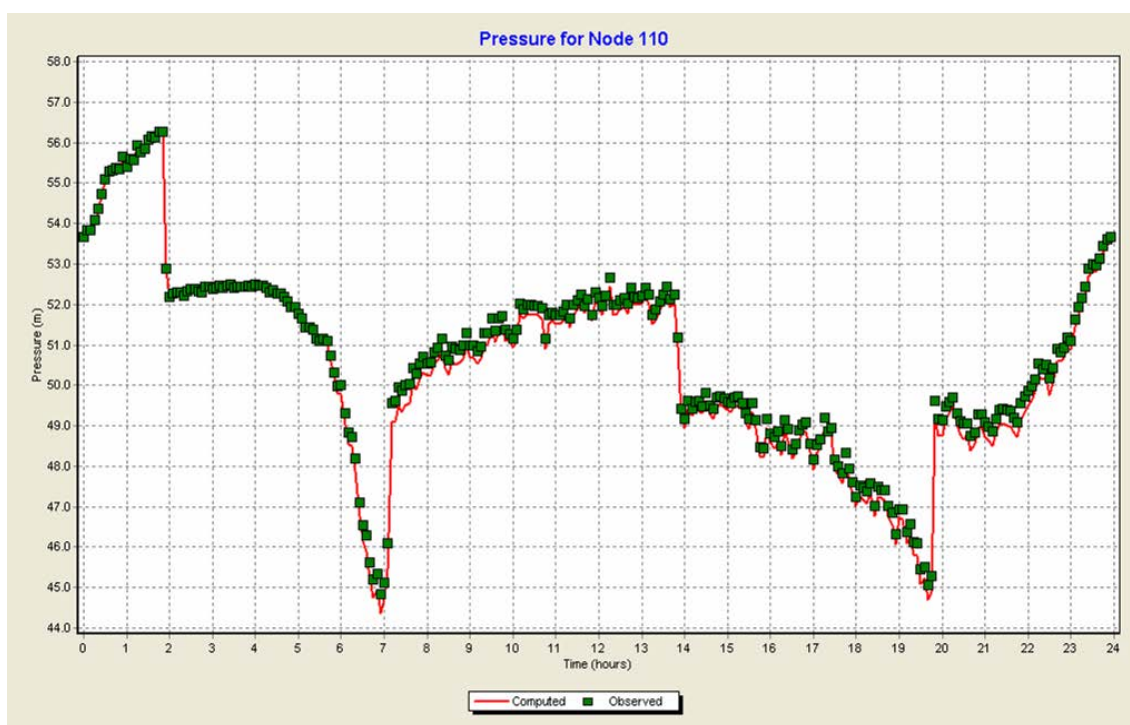
Podatke iz Grafa 5 in Grafa 6 (grafa sta izpis programa EPANET) smo izvozili iz programa EPANET v program Excel in tako dobili en graf (Graf 15), na katerem so vsi parametri, tako tlak kot tudi pretok (program EPANET nam grafa s tlakom in pretokom ne omogoča). Graf 15 prikazuje skupno simulacijo tlaka in pretoka v območju Dravelj.



Graf 15: Simulacija programa EPANET tlak in pretok skupaj

V nadaljevanju je na grafih 16, 17, 18 in 19 predstavljena primerjava vrednosti tlaka oziroma pretoka. Z rdečo linijo in oznako v legendi grafa *Computed* je označena izračunana vrednost s simulacijo. Z zelenimi kvadrati in oznako v legendi grafa *Observed* pa je označena merjena vrednost na terenu.

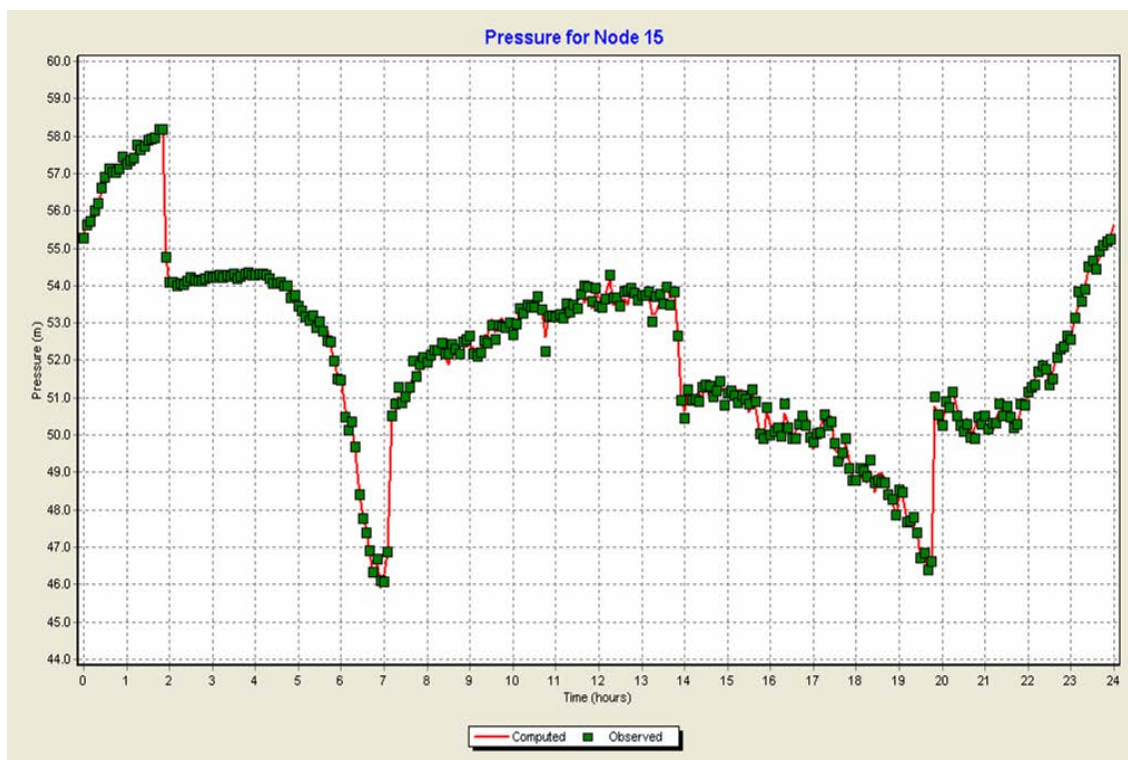
7.1.1 Tlak



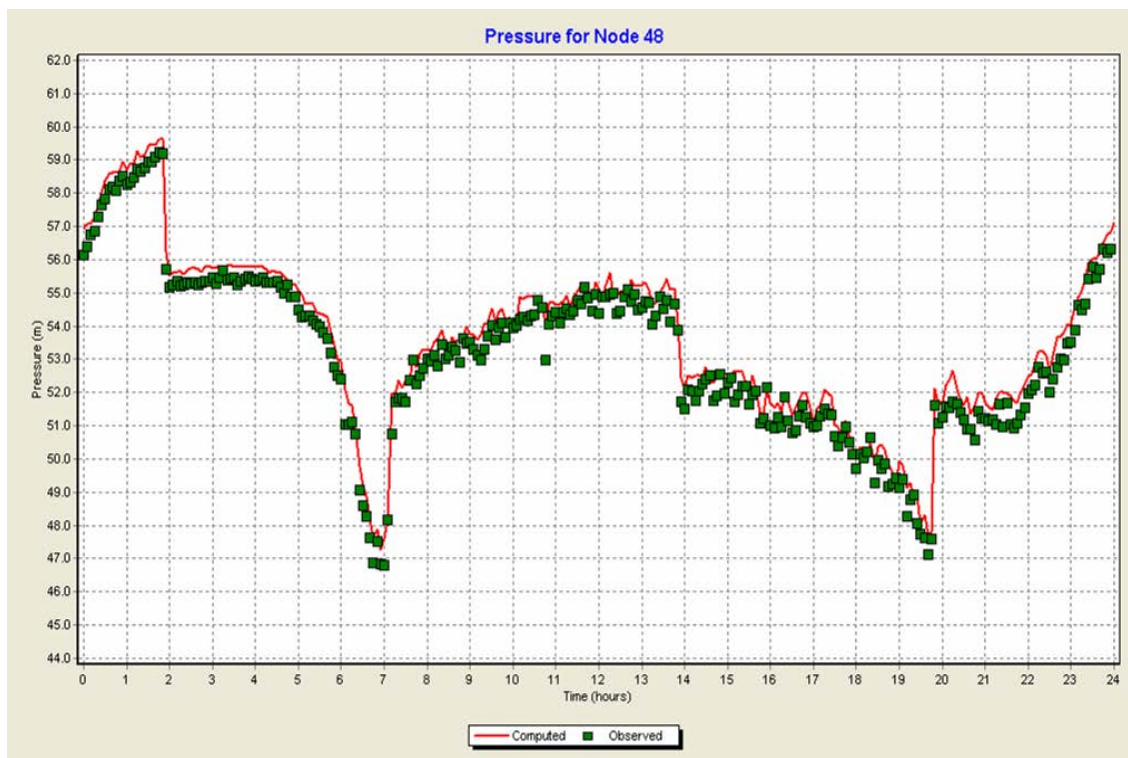
Graf 16: Primerjava tlaka v vozlišču 110 – merilno mesto Celovška cesta

Primerjava merjenega in izračunanega tlaka na lokaciji Celovška cesta (Graf 16) nam pokaže dobro ujemanje, kar je posledica dobro predpostavljene časovnega vzorca vodnega vira (poglavje 5.3.3). Vzorec je bil narejen na podlagi meritve tlaka na tem vozlišču – merilno mesto Celovška cesta.

Primerjava tlaka na Plešičevi ulici (Graf 17) nam pokaže skoraj identično sliko ujemanja s tlakom, kot na Celovski cesti.



Graf 17: Primerjava tlaka v vozlišču 15 - merilno mesto Plešičeva ulica



Graf 18: Primerjava tlaka v vozlišču 48 - merilno mesto Ulica bratov Babnik

Primerjava tlaka na Ulici bratov Babnik (Graf 18) pokaže že večje odstopanje tlaka med simulacijo in terenskimi meritvami. Razlogov za nastanek razlike med izmerjeno in izračunano vrednostjo je lahko več in sicer:

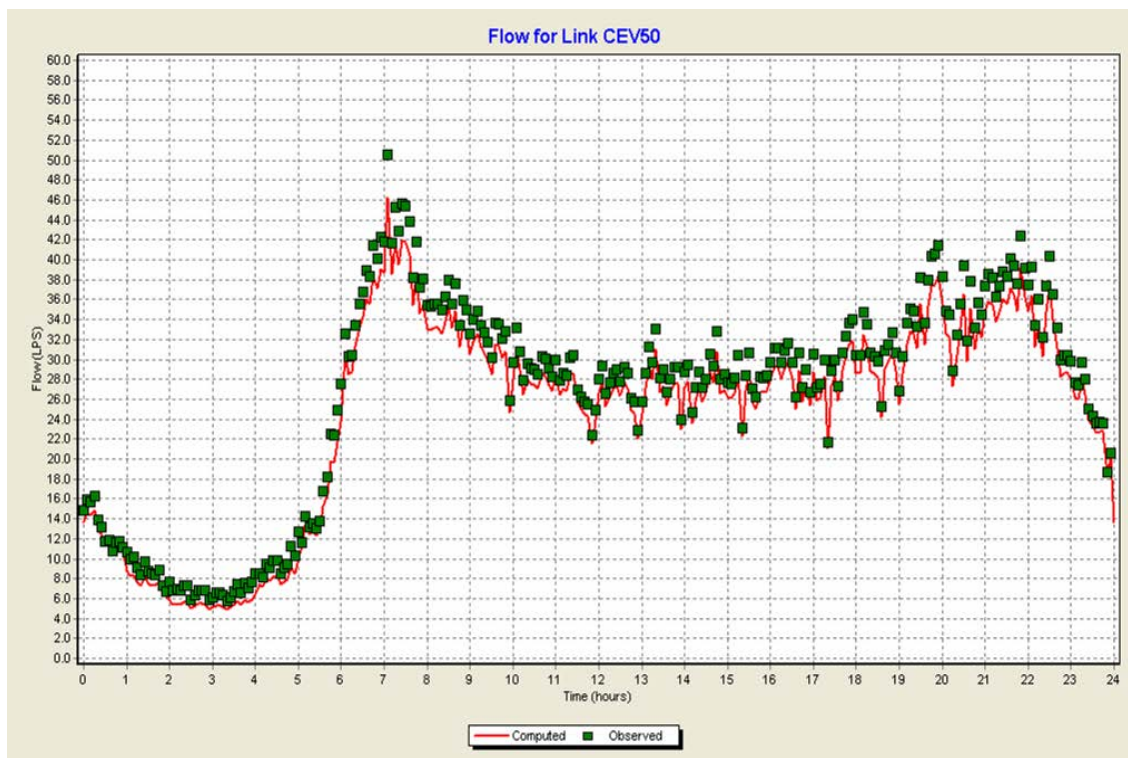
- napaka merilnika tlaka (0.5 % na merilno območje 20 bar),
- nekontroliran iztok vode v bližini merilnega mesta,
- zaprta oziroma priprta zaporna armatura v območju.

Razlika v primerjavi simulacije s terenskimi meritvami je zelo majhna in sicer če pogledamo Graf 18, v času 3 ure zjutraj, je odstopanje meritve približno 0.3 m ali 0.03 bara, relativno odstopanje vrednosti tlaka je 0.5%.

Problem območja Dravelj se kaže tudi v previsokem tlaku po celotnem območju, zlasti ponoči, ko se vklopijo črpalke v črpališču Šentvid. Takrat se tlak dvigne tudi do 6 barov (zaradi konfiguracije celotnega sistema Šentvid, se tlaka na črpališču Šentvid ne da zmanjšati). To je za območje in cevovod velik problem še posebej takrat, ko v območju pride do preloma cevi. Teren, na katerem leži območje Dravelj, je prodnat in vsa voda iz preloma ponikne skozi prodnato podlago. Iztekanje vode iz preloma cevi pri manjših tlakih je manjše (manjše izgube vode) in zato je v takem območju bolj primerno znižati tlak. V območju je možno znižati tlake, ker je območje razmeroma ravno, višinska razlika med najvišjo točko Celovška cesta – Žibert (312.7 m n.m.) in Ulico bratov Babnik (307.7 m n.m.) je v tlaku le 0.5 bara.

Plan o postavitvi merilnega jaška z reducirnim ventilom (s telemetrijsko povezavo za spremljanje dogajanja za območje – tlak in pretok) je v planu podjetja JP VO-KA in je izvedljiv v bližini merilnega mesta Celovška cesta. Realizacija merilnega jaška je pa zaradi velikega finančnega vložka velik problem.

7.1.2 Pretok



Graf 19: Primerjava pretoka na cevi 50 merilno mesto Celovška cesta

Primerjava pretoka na lokaciji Celovška cesta (Graf 19) pokaže minimalno odstopanje pretoka v času minimalne porabe v območju. Razlogov za nastanek razlike med izmerjeno in izračunano vrednostjo je lahko več, dva pa sta nedvomno prisotna in sicer:

- napaka v meritvi pretoka, kot posledica neustreznih hidravličnih razmer v merilnem jašku in (možno ampak malo verjetno)
- nekontroliran ali neevidentiran iztok vode zaradi okvare v območju (bolj verjetno).

Za oceno vodnih izgub v območju Dravelj smo uporabili naslednjo izmed mnogih metodologij:

- minimalne urne porabe, DVGW W 392 (2003), str. 21,

DVGW W 392 podaja minimalno urno porabo v nočnem času na vsakih 1000 prebivalcev z vrednostjo $Q_{min} = 0.4 - 0.8 \text{ m}^3/\text{h}$, brez upoštevanja večje industrijske porabe. Spodnjo vrednost je moč dosežati v manjših merilnih območjih (do 10 km omrežja) stanovanjskega značaja (primestna naselja). Pri oceni vodnih izgub smo na območju Dravelj upoštevali za

minimalno urno porabo na 1000 prebivalcev srednjo vrednost ($0.6 \text{ m}^3/\text{h}$), ker gre v obravnavanem območju večinoma za bolj stanovanjsko poselitev (stanovanja, gostinski lokali, trgovine, obrt), dolžina vodovodnega omrežja (brez priključkov) v merilnem območju pa presega 10 km.

Izračun minimalne porabe za območje Dravlj po DVGW W392 (2003), str 21

$$Q_{\min(1000)} = 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{\min(24000)} = A \cdot Q_{\min(1000)} = 24000 \text{ preb} \cdot \frac{0.6 \text{ m}^3 / \text{h}}{1000 \text{ preb}} \quad (7.1)$$

$$Q_{\min(24000)} = 14.4 \text{ m}^3 / \text{h} = 4 \text{ l} / \text{s}$$

kjer pomenijo:

A število prebivalcev merjenega območja

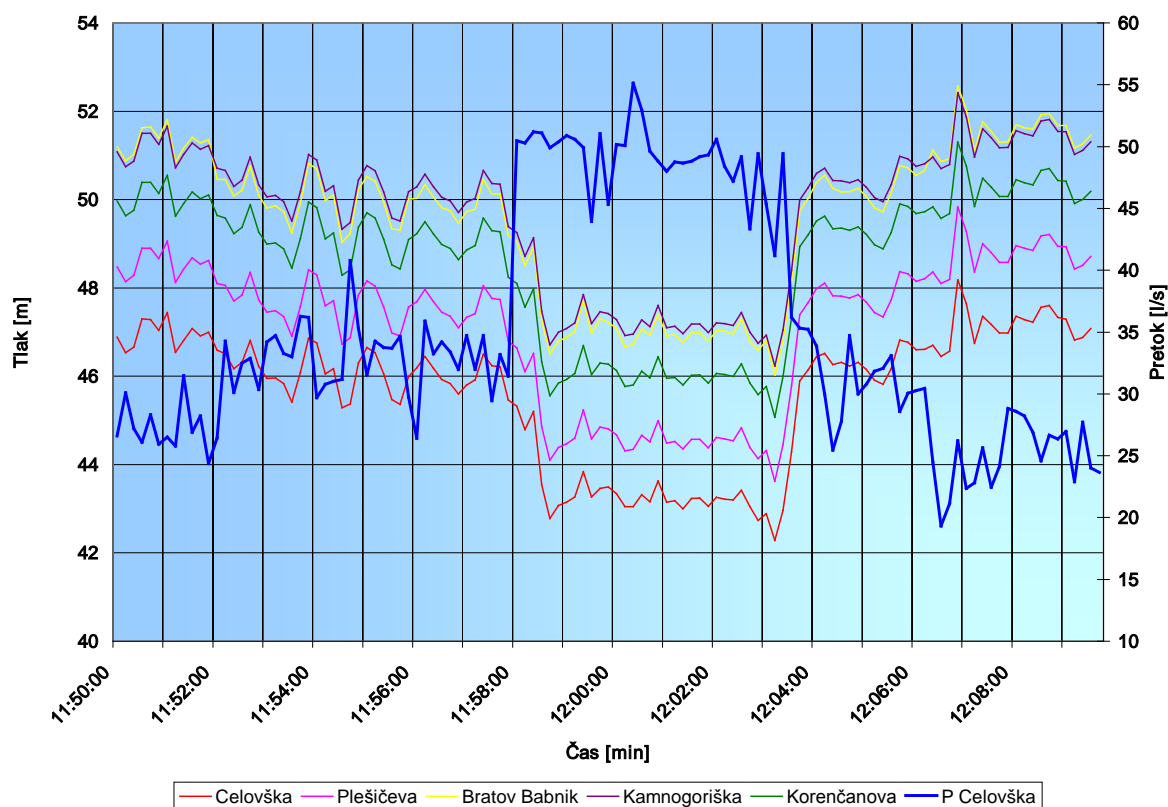
Q_{\min} minimalna urna poraba na 1000 prebivalcev m^3/h

Minimalna urna poraba v območju Dravelj je po izmerjenih vrednostih v času minimalne porabe (okoli 3 h ponoči) znaša 23 m^3 (6.5 l/s). V simulaciji s programom EPANET znaša vrednost minimalne urne porabe v območju 18 m^3 (5 l/s – odčitek iz Grafa 19). Po izračunu minimalne urne porabe po DVGW W392 znaša minimalna urna poraba 14.4 m^3 (4 l/s).

Z izračunom, ki ga DVGW W392 podaja, smo želeli preveriti oceno izgub na območju Dravelj, ki jo nemški DVGW podaja za izgube na območju Nemčije. Razlika med merjeno in izračunano (DVGW) je 2.5 l/s . Verjetnost, da je 4 l/s idealna minimalna urna poraba vode za območje Dravelj, je zelo velika. Za doseg idealne minimalne porabe je potrebno oziroma bi bilo potrebno veliko dela, predvsem v odkrivanju in odpravljanju okvar, saj je povprečna starost vodovodnega omrežja Dravelj 30 let. Razlogi za razlike so omenjeni pri komentarju Grafa 19.

7.2 Primerjava meritev ob izpustu vode preko ročnikov (požarna obremenitev)

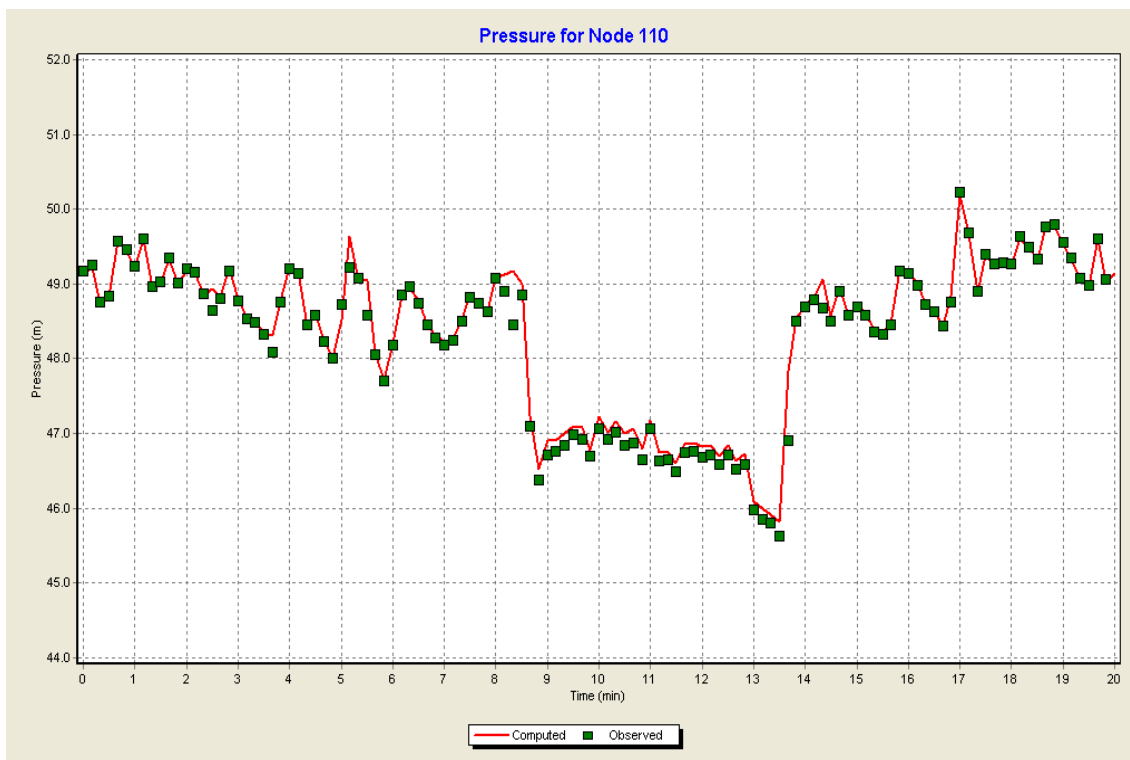
Vzorčenje tako rezultatov simulacije programa EPANET kot terenskih meritev smo priredili na 10 sekund. V programu Excel smo združili rezultate Grafa 7 in Grafa 8 programa EPANET in naredili skupni Graf 20 tlaka in pretoka.



Graf 20: Podatki tlaka in pretoka programa EPANET ob izpustu (požarna obremenitev)

V nadaljevanju je na grafih 21, 22, 23, 24, 25 in 26 predstavljena primerjava vrednosti tlaka oziroma pretoka. Z rdečo linijo in oznako v legendi grafa *Computed* je označena izračunana vrednost s simulacijo. Z zelenimi kvadrati in oznako v legendi grafa *Observed* je označena merjena vrednost na terenu.

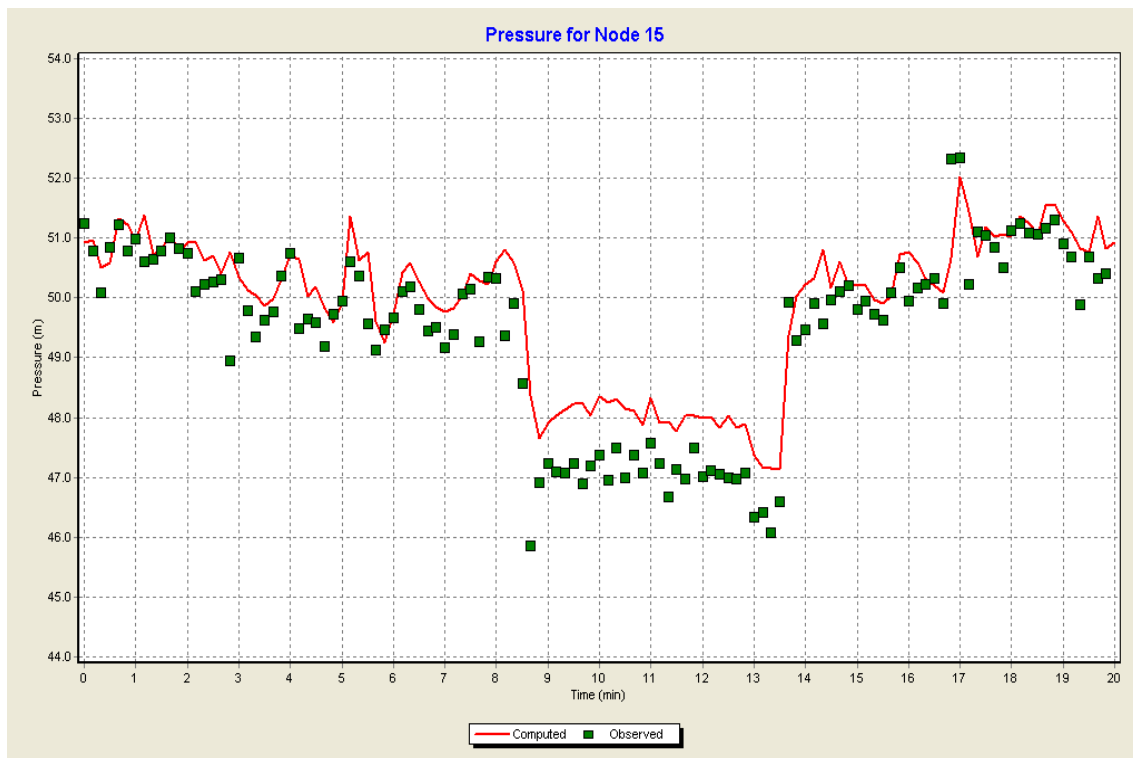
7.2.1 Tlak



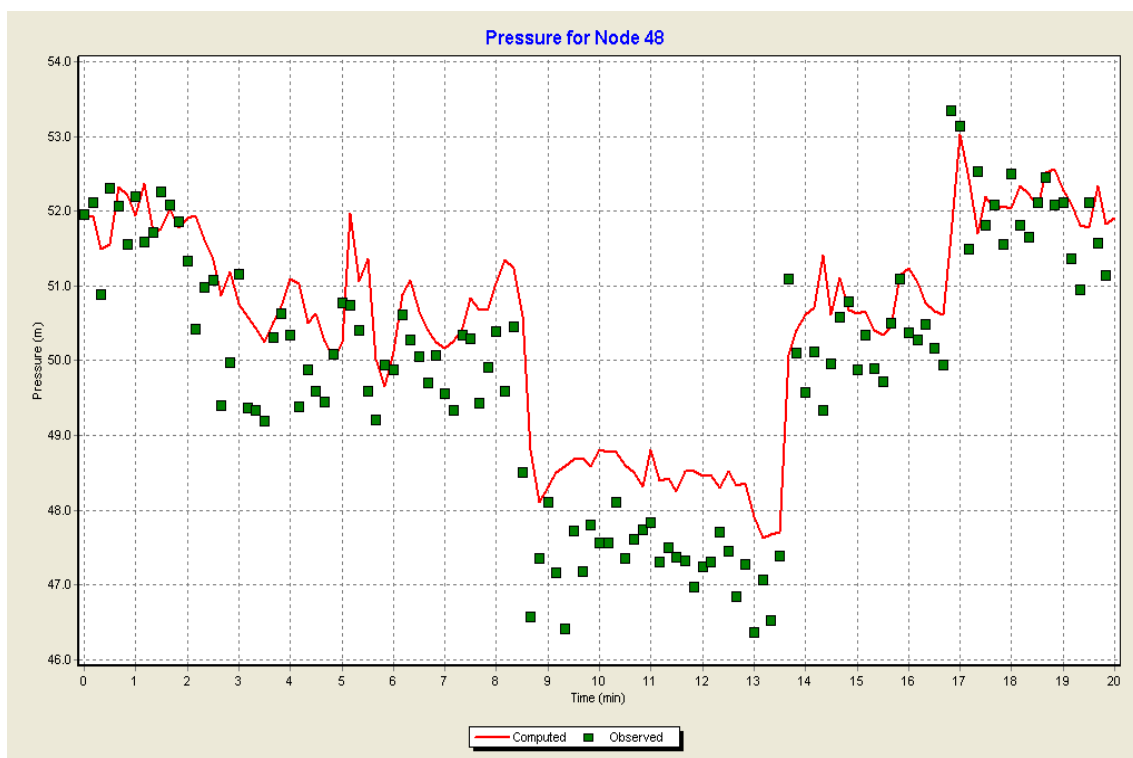
Graf 21: Primerjava tlaka v vozlišču 110 - merilno mesto Celovška cesta

Primerjava tlaka na lokaciji Celovška cesta (Graf 21) pokaže odlično ujemanje tlaka, kar je posledica predpostavk v modelu (poglavje 5.3), saj je bil na to merilno mesto prirejen časovni vzorec nihanja gladine vodnega vira s tem posledično nihanja tlaka.

Primerjava tlaka na lokaciji Plešičeva ulica (Graf 22) že pokaže odstopanje tlaka med meritvijo na terenu in simulacijo matematičnega modela, vendar je to odstopanje majhno. Pri izpustu vode (28.5 l/s) pride do razlike v padcu tlaka na merilnem mestu za manj kot 1 m oziroma 0.1 bara. Razlika tlaka, ki se pojavi med meritvijo in simulacijo je lahko posledica napake merilnika tlaka (± 0.1 bar), saj je napaka v meritvi dokaj konstantna čez celo meritev. Možnost napake se pojavi lahko v vnosu hrapavosti cevi (predpostavljena je bila enaka hrapavost cevovodov in sicer 0.1 mm), saj se v cevovodu po celem omrežju pri izpustu pojavijo velike hitrosti, ki vplivajo na tlačne izgube v cevovodu.

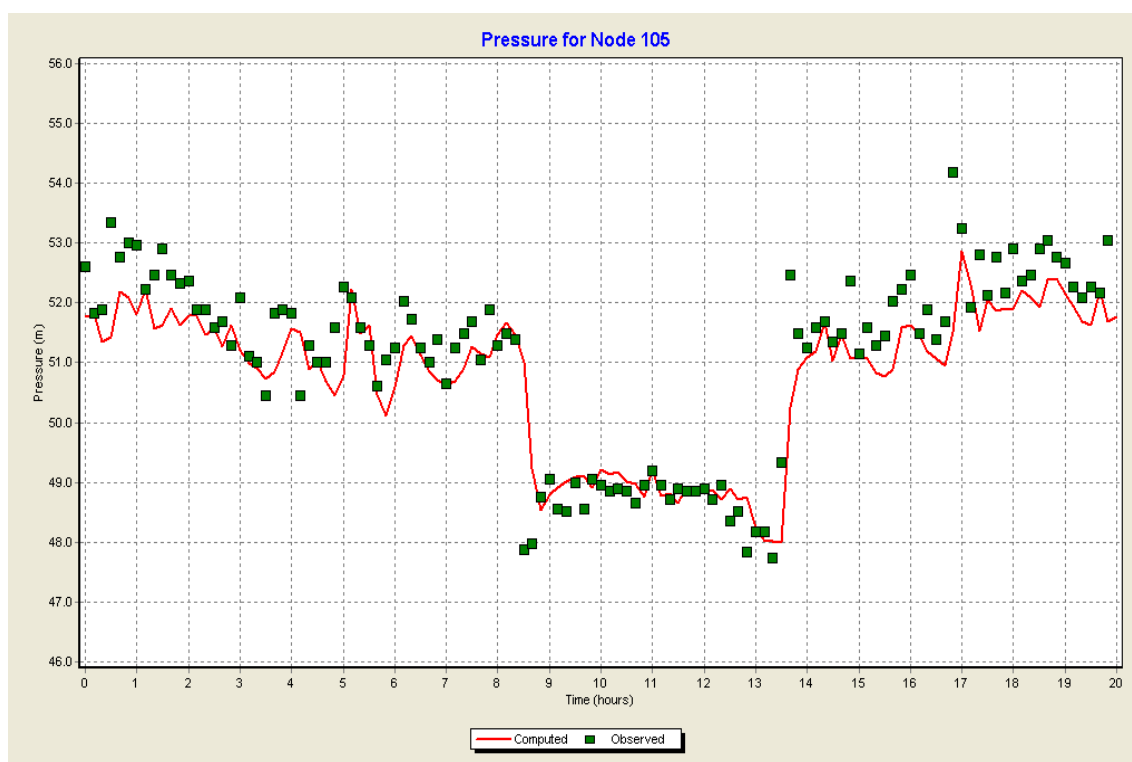


Graf 22: Primerjava tlaka v vozlišču 15 – merilno mesto Plešičeva ulica



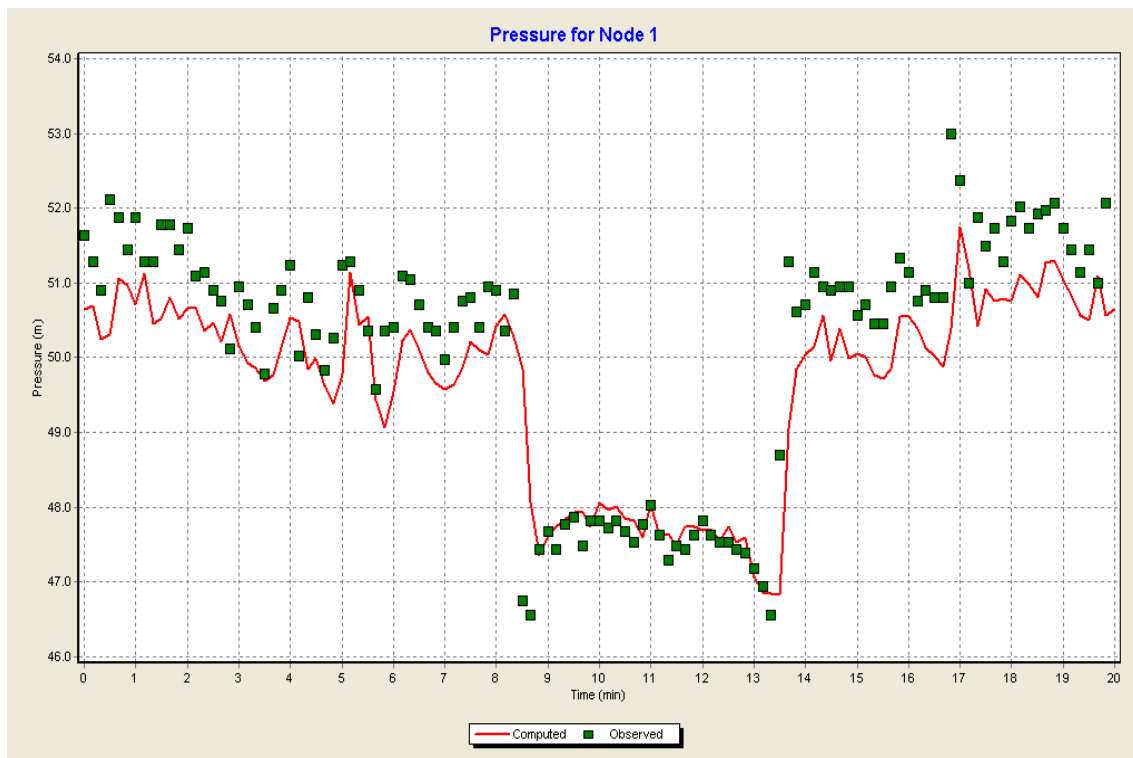
Graf 23: Primerjava tlaka v vozlišču 48 – merilno mesto Ulica bratov Babnik

Primerjava tlaka na lokaciji Ulica bratov Babnik (Graf 23) prav tako pokaže odstopanje tlaka med meritvijo na terenu in simulacijo matematičnega modela, vendar je to odstopanje ponovno majhno. Pri izpustu vode (28.5 l/s) pride do razlike v padcu tlaka na merilnem mestu za manj kot 1 m oziroma 0.1 bara (relativna napaka meritve med simulacijo in meritvijo je 2%). Prav tako lahko tu rečemo, da je razlog za razliko v merilniku tlaka. Prav tako je lahko napaka pri določanju hrapavosti cevi, saj je merilno mesto na lokaciji Ulica bratov Babnik najbolj oddaljeno merilno mesto v območju Dravelj.



Graf 24: Primerjava tlaka v vozlišču 105 - merilno mesto Kamnogoriška ulica

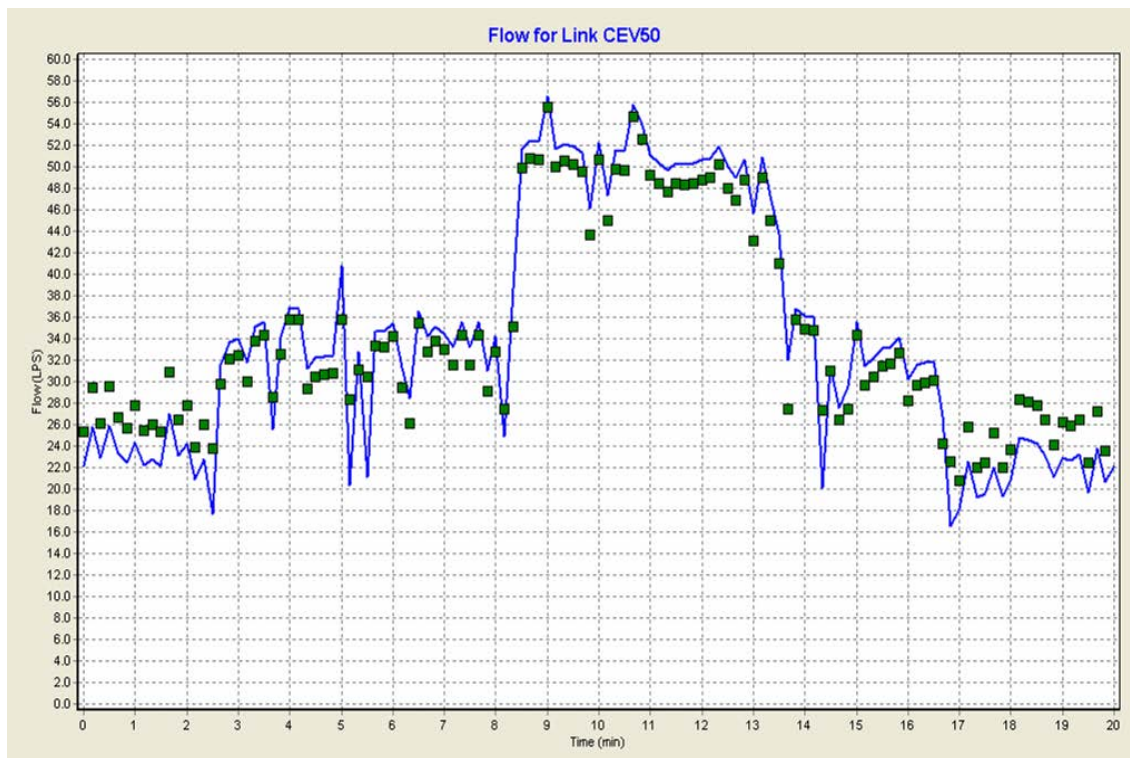
Primerjava tlaka na lokaciji Kamnogoriška ulica (Graf 24) presenetljivo pokaže dobro ujemanje tlaka med meritvijo na terenu in simulacijo matematičnega modela. Pri izpustu vode (28.5 l/s) se meritev na terenu in simulacija ujmeta v vrednostih. Posledica tega je odmaknjenost merilnega mesta na obrobju območja, kjer je območje dobro oskrbovano in so hitrosti vode majhne. Zato ne pride do velikih padcev tlaka zaradi linijskih izgub in lokalnih izgub v cevovodu.



Graf 25: Primerjava tlaka v vozlišču 1- merilno mesto Korenčanova ulica

Graf 25 prikazuje primerjavo tlaka na merilnem mestu Korenčanova ulica prav tako pokaže dobro ujemanje tlaka med meritvijo in simulacijo, saj se pri izpustu vode iz hidrantov cca 28.5 l/s tlaka čisto ujemata.

7.2.2 Pretok

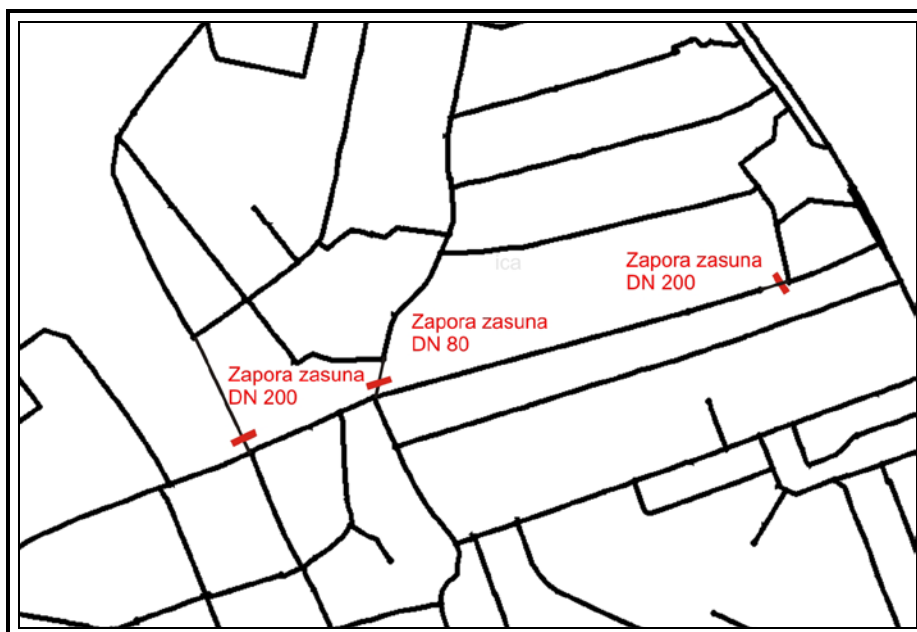


Graf 26: Primerjava pretoka na dovodni cevi 50 – merilno mesto Celovška cesta

Primerjava pretoka ob simuliranju izpusta vode v območju Dravelj (Graf 26) pokaže dobro ujemanje pretoka, kar je posledica dobrih predpostavk, ki smo jih vnesli v program EPANET, kot vhodne podatke. Vhodni podatki so izračunani v poglavju 6.4.3.1.

7.3 Preverjanje modela območja Dravelj

Na podlagi dobrih rezultatov primerjanih meritev modela in terenskih meritev so se dne 02.02.2006 izvedle ponovne meritve tlaka. Meritve so se izvajale v drugačnem hidravličnem režimu kot osnovne meritve, z namenom preveriti umerjenost matematičnega modela območja Dravelj. Na Sliki 29 je prikazana zapora treh zasunov v času ponovnih meritev. Meritve so se izvajale po podobnem postopku, kot so se izvajale na dan umerjanja matematičnega modela v maju 2005 (poglavje 6.4.3).



Slika 29: Shema zapore zasunov ob kontrolni meritvi modela območja

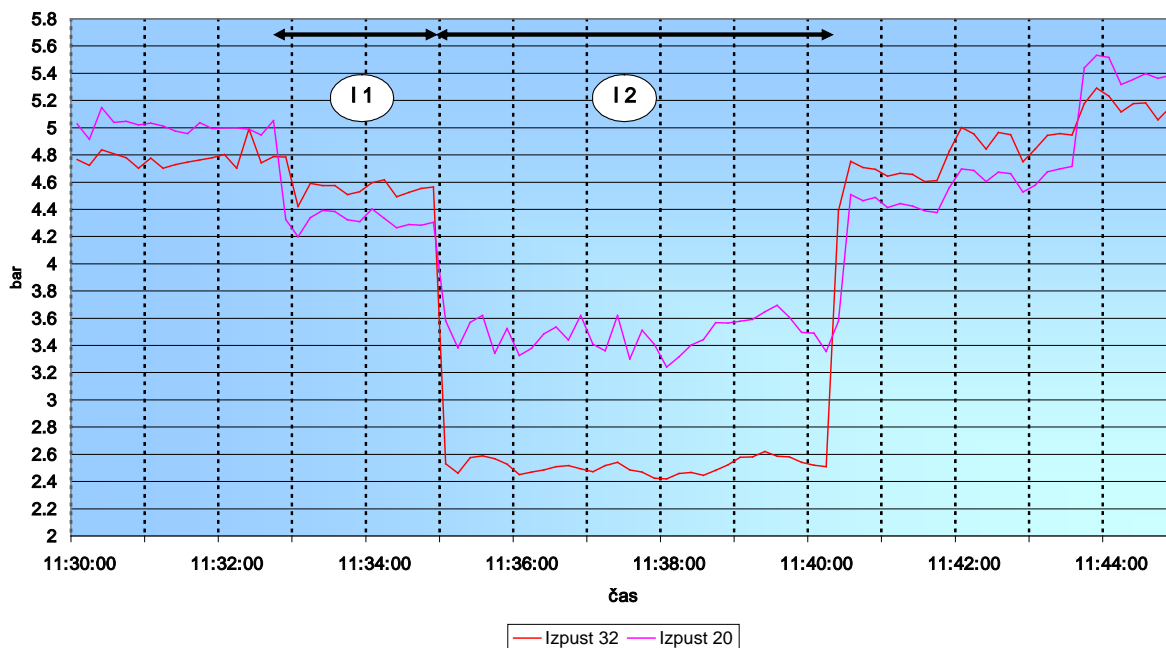
7.3.1 Rezultati kontrolnih meritev ob preverjanju modela

7.3.1.1 Preračun iztečenih količin

Na podlagi Grafa 27 je potrebno ponovno izračunati iztečene količine vode, ki je iztekla ob ponovnem izpustu iz hidrantov ob preverjanju modela območja Dravelj. Izračunane vrednosti so predstavljene v Preglednici 17. Lokacije izpustov so potekale na istih lokacijah, kot pri prvi meritvi Slika 24.

Preglednica 17: Preglednica iztečene vode ob preverjanju modela

Kraj izpusta	Iztok	Izpust 32 mm			Izpust 20 mm			
		čas [s]	Q ₃ [l/s]	Q ₃ [l]	p ₁ [bar]	Q ₁ [l/s]	p ₂ [bar]	Q ₂ [l/s]
Ulica bratov Babnik 73	I 1 [20 mm]				4,38	9,11	3,48	8,2
Korenčanova za Dražgoško 20	I 2 [32 mm]	4986	318	15.68				

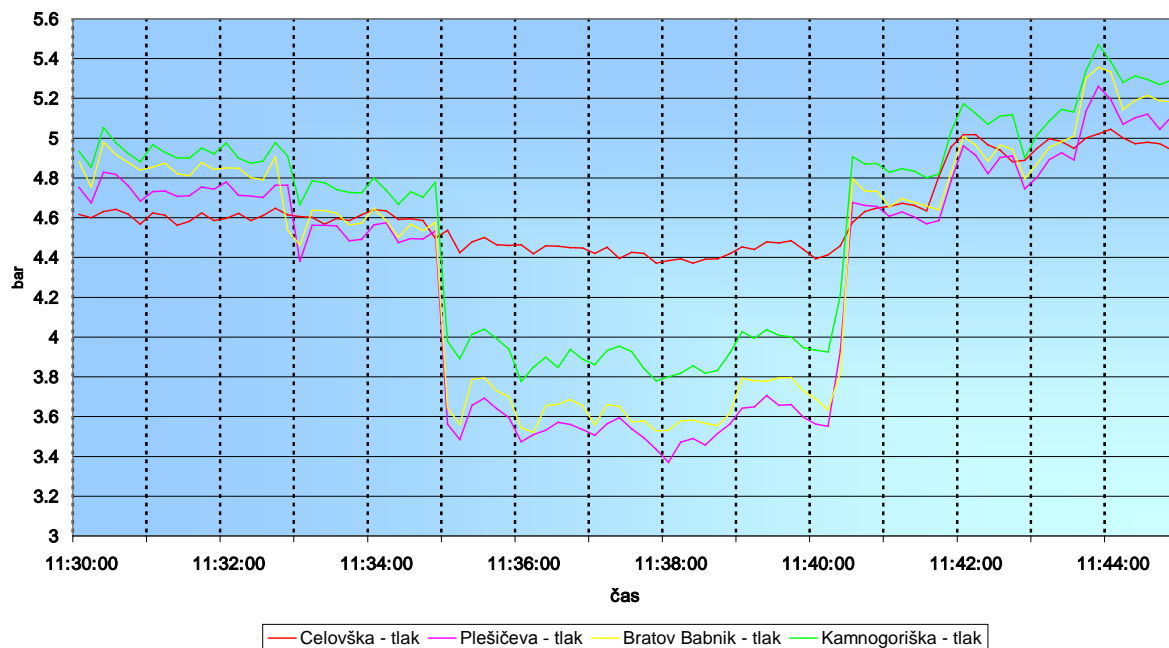


Graf 27: Graf meritve tlaka ob izpustu vode ob preverjanju modela

7.3.1.2 Graf meritve tlaka ob preverjanju modela

Meritev je bila izvajana z vzorčenjem podatkov tlaka na 10 sekund.

Rezultat meritev na terenu je predstavljen na Grafu 28. Zaradi zaprtosti zasunov (Slika 29) je opaziti velik padec ob hkratnem izpustu iz dveh hidrantov (24 l/s). Zato je v nadaljevanju predstavljena primerjava tlakov računanih s simulacijo in merjenih vrednosti na izbranih lokacijah. V grafu je na zadnjem delu opaziti nenaden skok tlaka, kar je posledica vključitve ene črpalke na črpališču Šentvid.



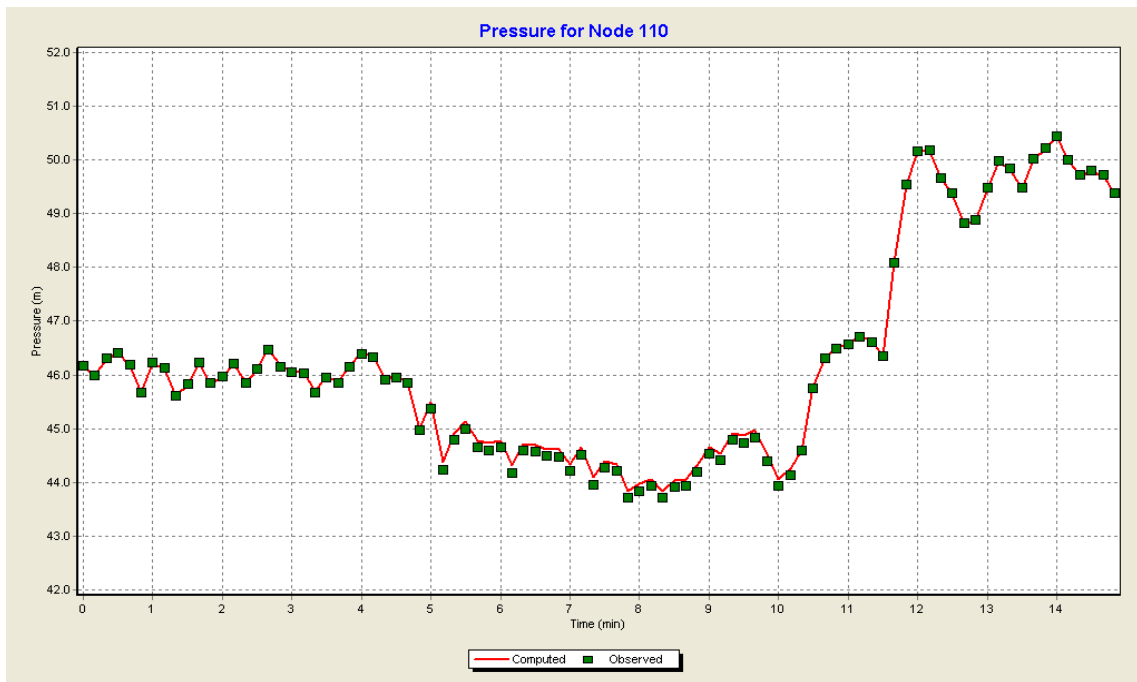
Graf 28: Meritev tlaka ob preverjanju modela območja Dravelj

7.3.1.3 Primerjava tlaka ob preverjanju modela

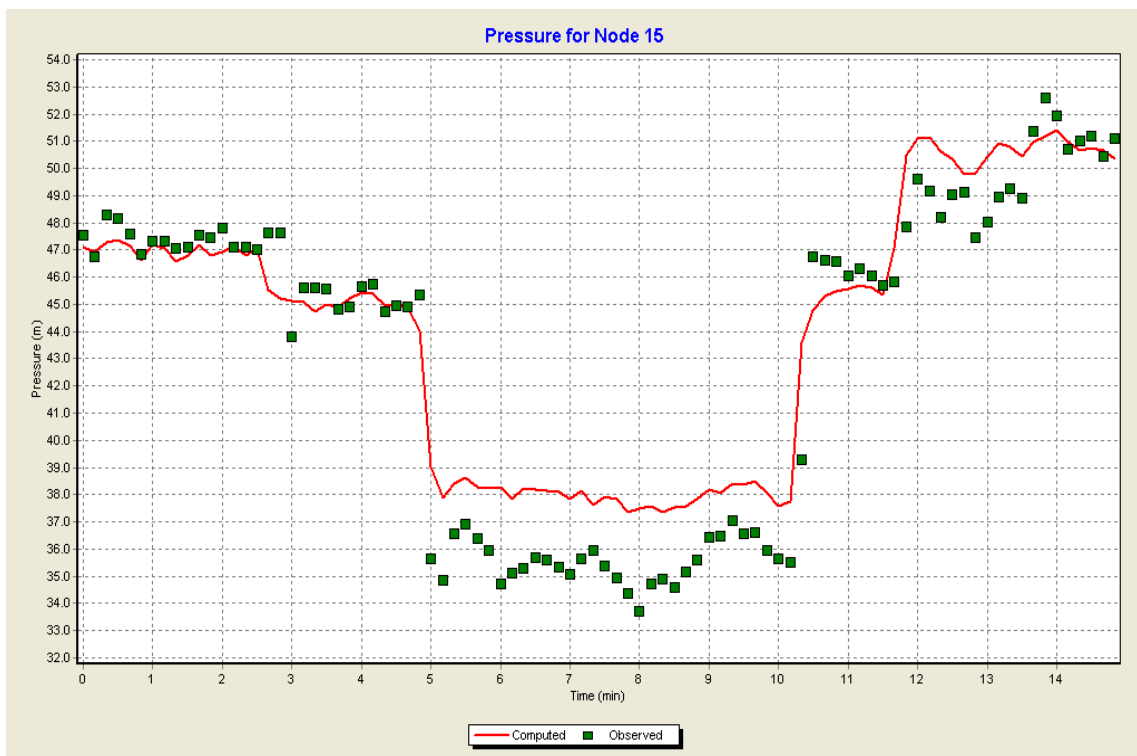
V nadaljevanju je predstavljena primerjava tlaka s simulacijo modela na lokacijah, kjer so se izvajale meritve tlaka na terenu. Za vnos podatkov je bilo potrebno uvesti vse predpostavke, katere so bile že omenjene v prejšnjih poglavjih. Ponovno je bilo potrebno predpostaviti v začetnem vozlišču časovni vzorec nihanja gladine vodnega vira (tlak v vozlišču 110 – Celovška cesta) in predpostaviti konstantno porabo vode po vozliščih. Na lokacijah, kjer je bil izveden izpust, smo v modelu predpostavili porabo vode v vozlišču, katera je izračunana v Preglednici 15.

V nadaljevanju je na grafih 29, 30, 31 in 32 predstavljena primerjava vrednosti tlaka. Z rdečo linijo in oznako v legendi grafa *Computed* je označena izračunana vrednost s simulacijo. Z zelenimi kvadrati in oznako v legendi grafa *Observed* je označena merjena vrednost na terenu.

Graf 29 prikazuje primerjavo tlaka na Celovski cesti v času meritve ob preverjanju modela območja Dravelj. Primerjava pokaže dobro ujemanje, kar je posledica vnesenih robnih pogojev. Robne pogoje smo prenesli iz meritve tlaka na Celovski cesti v program EPANET.

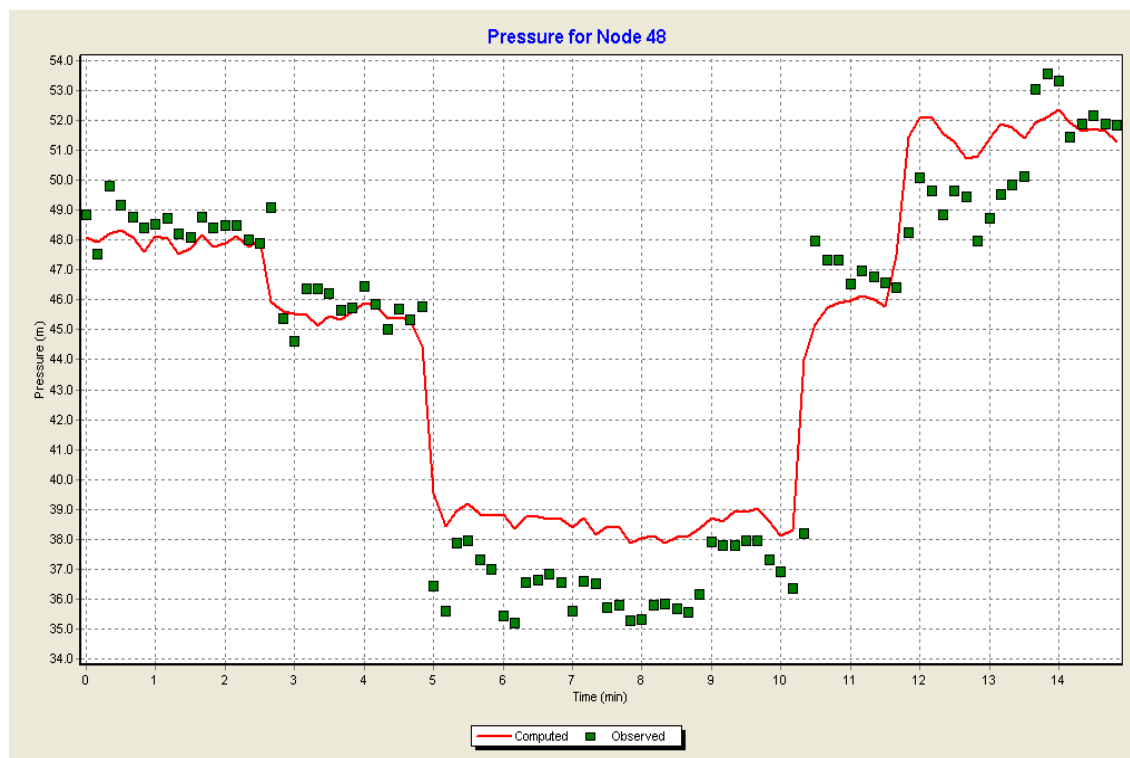


Graf 29: Primerjava tlaka ob preverjanje modela v vozlišču 110 – merilno mesto Celovška cesta



Graf 30: Primerjava tlaka ob preverjanje modela v vozlišču 15 – merilno mesto Plešičeva ulica

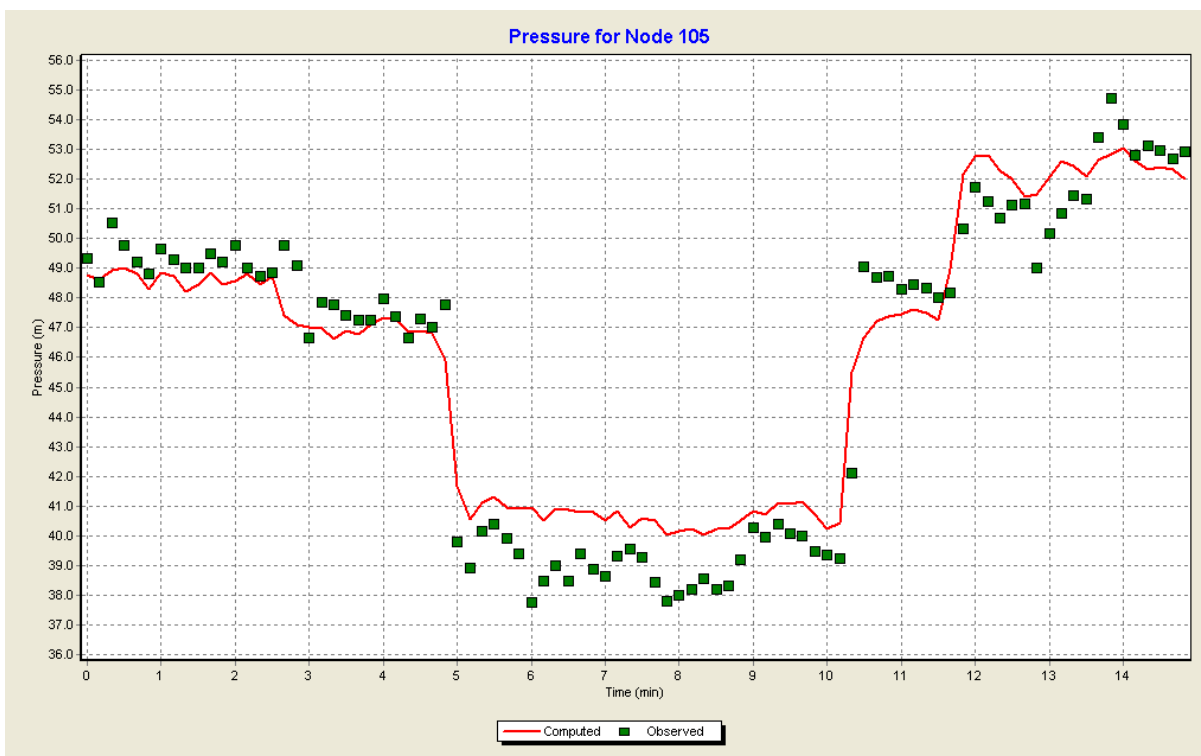
Primerjavo tlaka na Plešičevi ulici nam prikazuje Graf 30. Iz grafa je razviden odziv tlaka na Plešičevi ulici ob izpustu vode iz hidrantov. V času ko ni bilo izpusta in pri izpustu iz enega hidranta 8 l/s se tlaka simulacije in meritve ujemata. Ob izpustu dveh hidrantov pa se pojavi razlika med simulacijo in meritvijo. Relativno odstopanje v času izpusta iz dveh hidrantov je 4 %



Graf 31: Primerjava tlaka ob preverjanje modela v vozlišču 48 – merilno mesto Ulica bratov Babnik

Graf 31 prikazuje primerjavo tlaka na lokaciji Ulica bratov Babnik. Primerjava tlaka na Ulici bratov Babnik nam pokaže podobno sliko primerjave tlaka kot pri primerjavi na Plešičevi ulici. Tudi tu se pojavi razlika pri izpustu iz dveh hidrantov, vrednost relativnega odstopanja je 4 %.

Primerjavo tlaka na Kamnogoriški ulici nam prikazuje Graf 32. Boljšo sliko primerjave tlaka nam prikaže merilno mesto na Kamnogoriški ulici, kjer je relativno odstopanje tlaka pri izpustu iz dveh hidrantov 2.5 %. V času brez izpusta in izpusta iz enega hidranta pa se simulacija tlaka in meritev dobro ujameta.

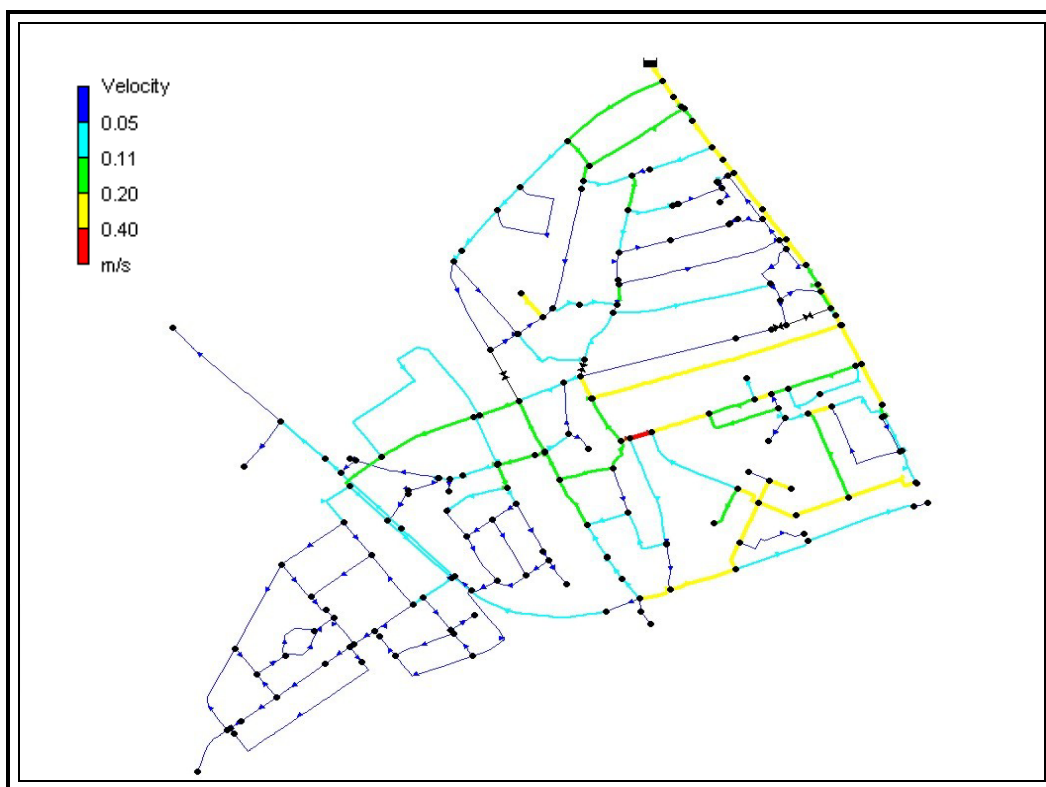


Graf 32: Primerjava tlaka ob preverjanje modela v vozlišču 105 – merilno mesto Kamnogoriška ulica

Na podlagi zaprtih zasunov v območju Dravelj so se hidravlične razmere zelo spremenile, sicer ne v stanju normalne porabe, kar je razvidno iz grafov preverjanja tlakov. V stanju, ko je v območju normalna potrošnja, ob zapori zasunov ni opaziti padca tlaka v območju. Ko pa naredimo prvi izpust, se tlak v območju že vidno odzove in pade za 2 m v celotnem območju. Pri izpustu iz dveh hidrantov (24 l/s) v območju Dravelj tlak pade za 2 bara oziroma 20 m. Posledica padca je gotovo zaprtost treh zasunov v območju, saj se v območju pojavijo velike hitrosti po cevovodih in to je posledica padca tlaka (linijske izgube in lokalne izgube so odvisne od hitrosti medija).

V nadaljevanju je na slikah 30, 31 in 32 predstavljena mreža območja Dravelj, na kateri so grafično ponazorjene hitrosti vode v ceveh pri različnih obremenitvah, ki smo jih izvajali ob preverjanju matematičnega modela Dravelj.

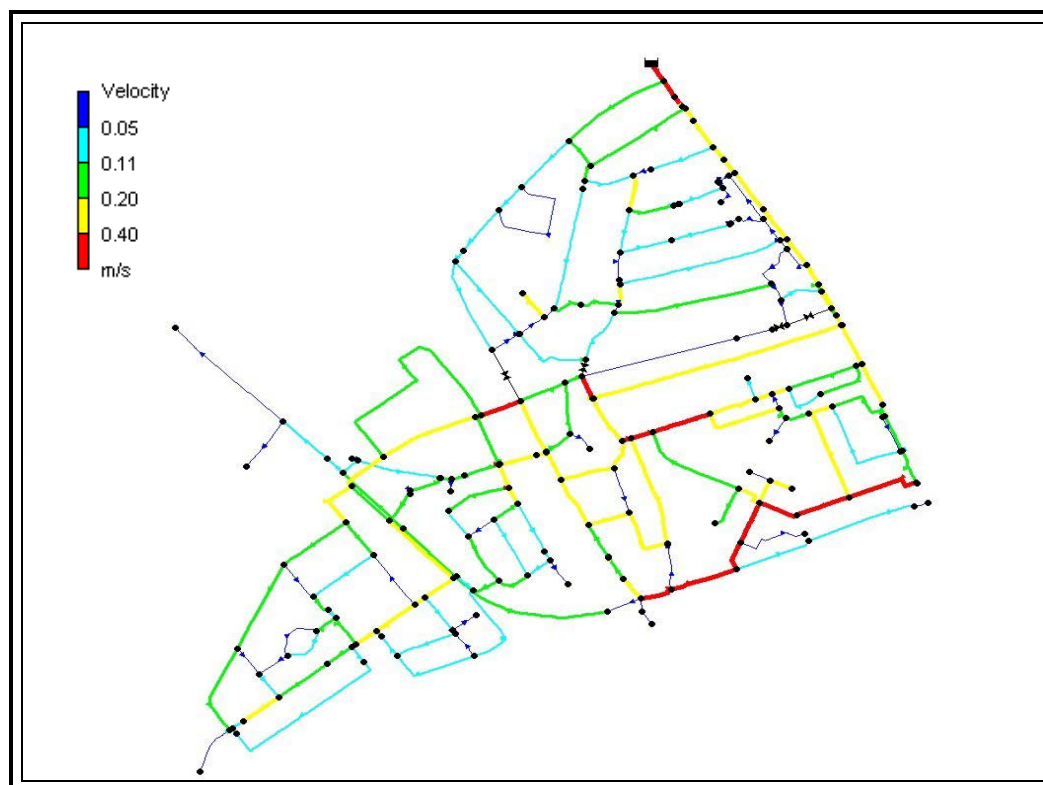
Legenda na slikah 30, 31 in 32 predstavlja hitrost vode (m/s) v cevi.



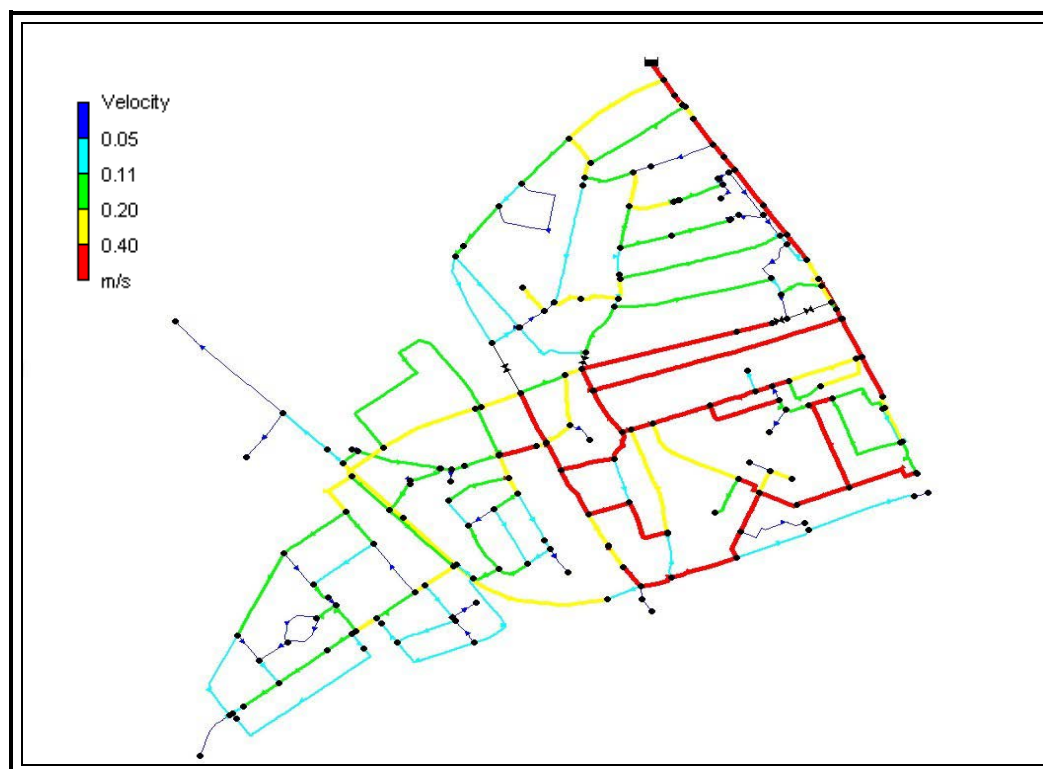
Slika 30: Ponazoritev hitrosti vode v cevovodih ob preverjanju modela – normalna poraba

Slika 30 predstavlja hitrosti vode v cevovodih pri stanju normalne porabe, opaziti je veliko črt (cevovodov), ki so obarvani modro s tankimi črtami (hitrost vode v cevovodu je manjša od 0.05 m/s, rumene črte, ki se pojavijo predstavljajo hitrost vode med 0.2 do 0.4 m/s v cevovodu, rdeče črte, ki predstavljajo hitrosti vode nad 0.4 m/s se v tem stanju, ko je normalna poraba brez dodatnega izpusta ne pojavljajo.

Slika 31 predstavlja hitrosti vode v cevovodih na območju Dravelj ob izpustu iz enega hidranta (8 l/s) na lokaciji Ulica bratov Babnik. Povečalo se je število rumeno in rdeče obarvanih črt, kar pomeni, da se je hitrost vode zaradi izpusta na Ulici bratov Babnik v cevovodih povečala.

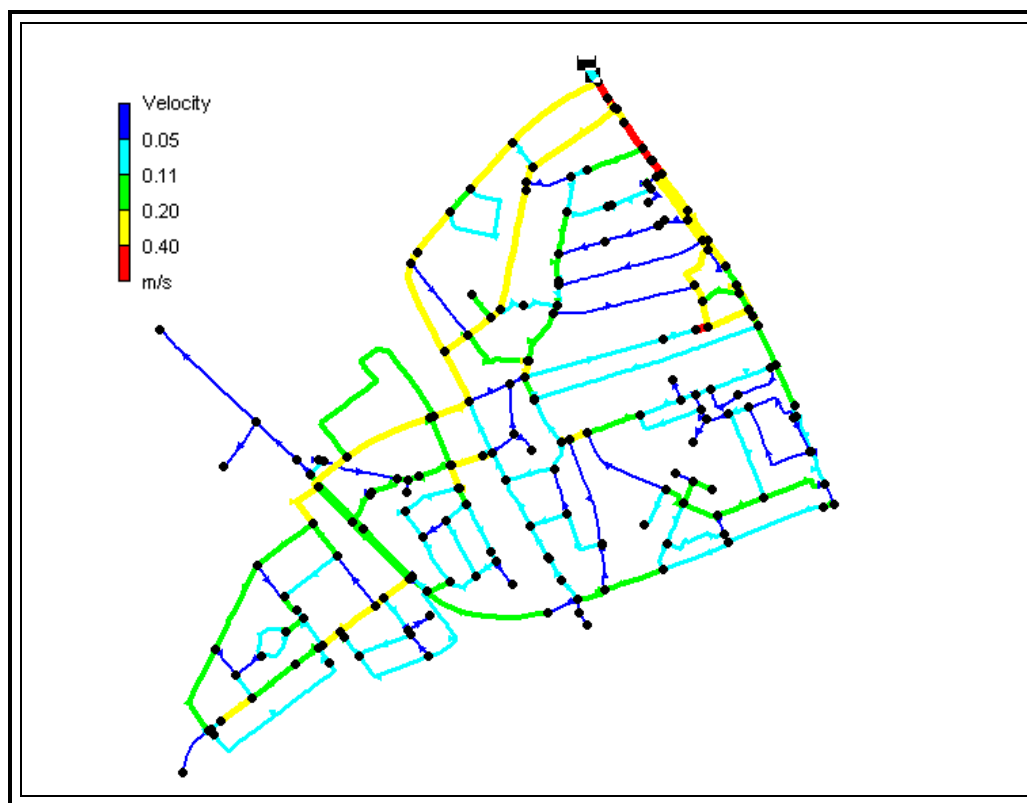


Slika 31: Ponazoritev hitrosti vode v cevovodih ob preverjanju modela – izpust iz enega hidranta



Slika 32: Ponazoritev hitrosti vode v cevovodih ob preverjanju modela – izpust iz dveh hidrantov

Slika 32 ponazarja hitrosti vode v območju Dravelj, ko je bil narejen dvojni izpust vode iz hidrantov (24 l/s). Iz slike je razvidna pot distribucije vode v območje Dravelj ob zapori treh zasunov na območju. Količina vode z veliko hitrostjo (večja od 0.4 m/s) priteče po cevovodu DN 300, ki poteka ob Celovski cesti vse do obvoznice, ozko grlo pretoka vode (zaradi zapore zasunov) je v križišču Celovške ceste in Korenčanove ulice.



Slika 33: Prikaz hitrosti vode ob izpustu v območju brez zapore zasunov

Primerjava Slike 33 (brez zapore zasunov) in Slike 32 (zapora zasunov) pokaže, da je območje predimenzionirano, saj se v cevovodih kljub ekstremni obremenitvi območja v cevovodih ne pojavijo velike hitrosti vode po cevovodih v območju. Hitrosti po območju se gibljejo večinoma med vrednostmi 0.05 m/s do 0.40 m/s ob izpustu vode iz hidrantov (28.5 l/s) in normalni porabi v območju.

8 ZAKLJUČEK

Cilji, ki sem si jih zastavil v tej diplomski nalogi, so doseženi.

Zastavljeni cilji na začetku diplomske naloge:

- spoznati hidravlični program EPANET 2.0,
- izdelati matematični model območja Dravelj,
- izvesti meritve tlaka in pretoka na območju Dravelj,
- primerjati rezultate matematičnega modela z rezultati meritev na terenu in
- preveriti umerjen matematični model območja Dravelj.

Spoznal sem se s računalniškim programom EPANET 2.0, ki je kot program za simulacijo hidravlike zelo koristno orodje za modeliranje vodovodnih sistemov. S pomočjo GIS podatkovnih baz podjetja JP VO-KA je izdelan matematični model vodovodnega sistema območja Dravelj. Meritve na terenu so mi olajšale delo, saj so bile izvedene z namenom umerjanja matematičnega modela. Meritve so se izvajale s pomočjo merilnikov tlaka in pretoka, ki jih uporablja Služba vzdrževanja vodovodnega omrežja podjetja JP VO-KA. Primerjava rezultatov je pokazala, da se rezultati matematičnega modela dobro ujemajo z rezultati terenskih meritev, kar pomeni, da (poenostavljeni) hidravlični model zelo dobro ponazarja stanje in delovanje dejanskega vodovodnega sistema. Po ponovnih meritvah, ko se je preverjalo umerjenost modela, se je le ta izkazal za dobro opravljeno delo in je uporaben za analiziranje hidravličnih razmer v območju Dravelj.

Glede na vse predpostavke, uporabljene v hidravličnem modelu programa EPANET, ki sem jih moral upoštevati, in to so:

- časovni vzorec nihanja tlaka rezervoarja,
- dolžina povezovalne cevi med rezervoarjem in vozliščem na začetku območja Dravelj,
- korekcija višin vozlišč (lokacij merilnih mest),
- 24 urni časovni vzorec porabe vode v naselju,

je primerjava rezultatov pokazala, da se rezultati matematičnega modela dobro ujemajo z rezultati terenskih meritev, kar pomeni, da se hidravlični model zelo dobro ujema z eksperimentalnimi meritvami na terenu.

Rezultat primerjave pretoka, tako v primeru 24 urne, kot tudi pri meritvi z izpusti iz hidrantov (požarne obremenitve), je pokazal dobro ujemanje vrednosti pretoka. Opaziti pa je, da vrednosti pretoka, ki jih je izračunal model, odstopajo od merjenih vrednosti pretoka (manjšo vrednost pretoka izračuna model). Razlogov za odstopanje rezultatov je lahko več, dva pa sta nedvomno prisotna, in sicer:

- nenatančne meritve pretoka, kot posledica neustreznih hidravličnih razmer v merilnem jašku, in
- nekontroliran ali neevidentiran iztok vode zaradi okvare v območju.

Primerjava tlaka v primeru 24 urne meritve pokaže zelo dobro ujemanje na dveh lokacijah (Celovška cesta in Plešičeva ulica), na lokaciji Ulica bratov Babnik pa pride do odstopanja vrednosti tlaka. Možni razlogi za nastanek razlike:

- napaka merilnika tlaka (0.5 % na merilno območje 20 bara),
- nekontroliran iztok vode v bližini merilnega mesta in
- zaprta oziroma priprta zaporna armatura v območju.

Pri meritvi požarne obremenitve območja se pri primerjavi pretoka izkaže dobro ujemanje vrednosti simuliranega in dejanskega pretoka na Celovski cesti za celotno območje Dravelj.

Pri primerjavi vrednosti tlaka ob simulaciji požarne obremenitve pa se izkaže, tako kot pri 24 urni meritvi, dobro ujemanje vrednosti na lokacijah Celovška cesta. Na ostalih lokacijah Plešičeva ulica, Ulica bratov Babnik, Kamnogoriška ulica in Korenčanova ulica pa prihaja do odstopanj vrednosti tlaka. Možni razlogi za nastanek razlik so enaki kot pri 24 urni meritvi.

Tako meritev na terenu, kot tudi priprava hidravličnega modela zahteva od človeka znanje, predvsem pa veliko izkušenj s posameznih področij. Priprava hidravličnega modela (iz GIS podatkov do vnosa v program EPANET), bi mi brez pomoči sodelavcev vzela veliko časa. S pomočjo zelo dobro napisanih uporabniških navodil je bilo spoznavanje programa EPANET dokaj enostavno in hitro.

Prihodnost vsakega podjetja, ki se ukvarja s dejavnostjo črpanja vode ter distribucijo vode in na koncu prodajo vode porabnikom, je tudi v hidravličnem modelu, kajti model je pripomoček in mora delovati tako, da omogoča uporabniku vpogled tako v teoretične kot tudi

v realnem okolju izmerjene vrednosti pretoka in tlaka, ter jih medsebojno primerjati. Hkrati mora na osnovi izkustvenih vrednosti iz preteklega obdobja zagotavljati operaterju napoved scenarija dogodkov in temu primerno ukrepanje.

Matematični model vodovodnega omrežja mora biti osnovno orodje vsakega projektanta javnega vodovodnega omrežja, kot tudi projektanta internih vodovodnih omrežij, ko le-te poleg oskrbe s sanitarno in pitno vodo zagotavljajo tudi požarno varnost. V današnjem času se pojavlja veliko problemov prav iz zagotavljanja požarne varnosti (na obrobju mest, lokalnih vodovodih, visoko ležečih omrežij, v objektih,...) z zadostno količino požarne vode, ampak to je že drugo poglavje.

Hidravlični model bi se morali v prihodnosti vzpostaviti tako, da bi se vršila t.i. »on-line« kontrola stanja po vodovodnem sistemu. Po vodovodnem sistemu bi morali biti razporejeni merilni jaški za kontrolo pretoka in tlaka omrežja, podatki pa bi se zbirali v center in se primerjali s hidravličnim modelom.

Kot merilni tehnik sem si v dobi 6 let, kolikor sem zaposlen pri podjetju JP VO-KA, pridobil kar nekaj izkušenj s področja meritev tlaka in pretoka. Zato pa sem si v tej diplomski nalogi za izziv vzel obdelavo hidravličnega modela, da ugotovim, kaj pomeni fizično delo meritev na terenu in simulacija hidravličnega programa za pisalno mizo.

Iz rezultatov diplomske naloge lahko zaključim, da bo hidravlični model območja na razpolago šele takrat, ko bodo opravljene meritve na terenu, in model umerjen. Umerjen model je potrebno ponovno kontrolirati in sicer s ponovnimi meritvami na terenu. Podatke hidravličnega modela moramo periodično kontrolirati na kontrolnih mestih, zaradi kontrole omrežja in kontrole modela. Kakršna koli sprememba enega od podatkov je opozorilo, ki nas opomni o morebitni napaki v simulaciji (nežuriranje sprememb v modelu: cevovodi – dolžine, premeri, porabniki, itd.) ali pa na omrežju (prelom, zaprtost zasuna, in podobno).

VIRI

Uporabljeni viri

Samostojne publikacije

Rossman L. A. 2000 *Epanet 2 users manual*, Water Supply and Water Resources Division

Steinman F. 1992 *Hidravlika*, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana

Kraut B. 1981 *Strojniški priročnik* Strojniški vestnik

Mutschmann, J., Stimmelmayer, F. (1983) Taschenbuch der Wasserversorgung, 8. Auflage, Frankhische Verlagshandlung, W. Keller & Co., Stuttgart, 1983

Jordan, V., 1983. Prehodni režimi v hidravličnih cevni sistemih, Ljubljana

DVGW W 392. Rohrnetzinspektion und Wasserverluste; Maßnahmen, Verfahren und Bewertungen, Mai 2003

Karpe F. 1990. Mestni vodovod Ljubljanski sto let 1890-1990, Ljubljana

Ogrin I., Peklaj U. 2005. Poročilo o meritvah za potrebe umerjanja matematičnega modela vodovodnega sistema Šentvid, Ljubljana, JP VO-KA

Elektronski viri:

Program EPANET 2.0 (15.10.2005)

<http://www.epa.gov/ORD/HRMRL/wswrd/epanet.html>

Navodila k programu EPANET 2.0. (15.10.2005)

<http://www.epa.gov/ORD/HRMRL/wswrd/EN2manual.pdf>

Podatki o merilni napravi Krohne UFM 610 P (10.01.2006)

http://www.krohne-mar.com/UFM_610_600_Clamp-on_Ultrasonic_Flowmeters_en.1141.0.html

Podatki o zgodovini ljubljanskega vodovoda (05.01.2006)

www.jh-lj.si/index.php?p=3&k=304

Pravni viri

Pravilnik o preizkušanju hidrantnih omrežij (Ur. List RS, št. 22/95)

Ostali viri

Petrešin, E. 1988. Vodovod, Ljubljana

Headest, Walski, Chase, Savič. 2001. Water Distribution Modeling. Heastad Methods, Inc. Waterbury, U.S.A.