

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
za gradbeništvo  
in geodezijo



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

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

To je izvirna različica zaključnega dela.

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

Bakarič, N., 2016. Hidravlična analiza vodovodnega sistema Naklo. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Steinman, F., somentor Kozelj, D.): 70 str.

Datum arhiviranja: 31-08-2016

University  
of Ljubljana

Faculty of  
Civil and Geodetic  
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Bakarič, N., 2016. Hidravlična analiza vodovodnega sistema Naklo. Diplomaska naloga. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Steinman, F., co-supervisor Kozelj, D.): 70 pp.

Archiving Date: 31-08-2016

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM VODARSTVO IN  
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidat:

**NIKOLA BAKARIČ**

**HIDRAVLIČNA ANALIZA VODOVODNEGA SISTEMA  
NAKLO**

Diplomska naloga št.: 301/VKI

**HYDRAULIC ANALYSIS OF WATER DISTRIBUTION  
SYSTEM OF NAKLO**

Graduation thesis No.: 301/VKI

**Mentor:**

prof. dr. Franc Steinman

**Somentor:**

asist. dr. Daniel Kozelj

Ljubljana, 23. 08. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

**IZJAVE**

Spodaj podpisani študent Nikola Bakarič, vpisna številka 26105353, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Hidravlična analiza vodovodnega sistema Naklo

**IZJAVLJAM**

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

V/Na: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Podpis študenta:  
\_\_\_\_\_

## **BIBLIOGRAFSKO - DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>628.143(497.4)(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Nikola Bakarič</b>
<b>Mentor:</b>	<b>prof. dr. Franc Steinman</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. dr. Daniel Kozelj</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Hidravlična analiza vodovodnega sistema Naklo</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomska naloga – Univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>70 str., 28 pregl., 36 sl., 28 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>vodovodni sistem, hidravlična analiza, hidravlični model, QGIS, EPANET 2.0, vtičnik qgis-epanet, vključitev novega vodnega vira</b>

### **Izvleček**

Učinkovita distribucija vode je ena izmed osnov za normalno življenje v sodobni družbi. Le kadar so vodovodni sistemi ustrezno zgrajeni, vzdrževani in pravilno upravljani, omogočajo učinkovito oskrbo z vodo. Vodovodni sistemi so zgrajeni iz številnih medseboj povezanih gradnikov, ki morajo delovati usklajeno. Ker so vodovodni sistemi zelo kompleksni, je določitev tlakov in pretokov težavno. V današnjih časih upravljalci vodovodnih sistemov uporabljajo hidravlične modele za določanje hidravličnih neznank v vodovodnih sistemih. To diplomsko delo opisuje izdelavo hidravličnega modela, njegovo umerjenje in uporabo pri hidravlični analizi vodovodnega sistema Naklo. Komunala Kranj, ki upravlja z vodovodnim sistemom Naklo, je zgradila nov transportni cevovod. V načrtu je povezava tega cevovoda z vodovodnim sistemom Tržič, ki bi zagotavljal pitno vodo in nadomestil obstoječa vodna vira vodovodnega sistema Naklo. Izdelal sem hidravlično analizo, ki preverja priključitev glede na dva robna pogoja tlakov na vtoku v vodovodni sistem Naklo iz vodovodnega sistema Tržič. Tretja hidravlična analiza se je nanašala na dodatno povezavo med vodovodnim sistemom Naklo in vodovodnim sistemom Kranj. Na ta način bi vodovodni sistem Kranj prejemal dodatne količine vode tudi iz vodovodnega sistema Tržič. Za vzpostavitev hidravličnih modelov in izvedbo hidravličnih analiz sem uporabil programsko opremo QGIS, njegov vtičnik qgis-epanet in programsko opremo za izvedbo hidravličnih simulacij EPANET 2.0.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDK:** 628.143(497.4)(043.2)  
**Author:** Nikola Bakarič  
**Supervisor:** prof. dr. Franc Steinman  
**CoSupervisor** assist. dr. Daniel Kozelj  
**Title:** Hydraulic analysis of water distribution system of Naklo  
**Document type:** Graduation Thesis – University studies  
**Notes:** 70 p., 28 tab., 36 fig., 28 eq.  
**Key words:** water distribution system, hydraulic analysis, hydraulic model, QGIS, EPANET 2.0, plugin qgis-epanet, inclusion of a new water source

**Abstract**

Efficient water distribution is one of the basics for a normal living in a modern society. Water distribution systems (WDS) enable efficient water supply, if they are properly constructed, maintained and managed. WDS are made of many components, which are connected together and have to work coordinated. Because of complexity of these systems it is difficult to determine pressures and flows in this networks. Nowadays network operators are using hydraulic models to provide these hydraulic quantities. This graduation thesis is showing how to build a hydraulic model, calibrating it and using it in the hydraulic analysis of WDS of Naklo. The public utility Kranj, which is operating with WDS Naklo, has built a new transport pipeline. The plan is to connect this pipeline with WDS Tržič, which would also become a new and replace the current water source for WDS Naklo. I elaborated hydraulic analyses for two possible pressure boundary conditions on inlet in WDS Naklo from WDS Tržič. The third hydraulic analysis was on the connection between WDS Naklo and WDS Kranj. The WDS Kranj would be supplied by additional water quantities from WDS Tržič. Building these hydraulic models and elaborating the hydraulic analyses was done using the GIS software Qgis, its plugin qgis-epanet and hydraulic simulation software EPANET 2.0.

## **ZAHVALA**

Najprej bi se rad zahvalil mentorju gospodu Steinmanu in somentorju gospodu Kozelju za pomoč in posredovanje znanja pri izdelavi te diplomske naloge. Prav tako bi se rad zahvalil gospodu Dobrovoljcu iz komunale Kranj za vse posredovane podatke in posvetovanja na sestankih. Zahvalil pa bi se tudi družini za vso izkazano podporo tekom študija.

**KAZALO VSEBINE**

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....	IV
ZAHVALA.....	V
KAZALO VSEBINE.....	VI
KAZALO PREGLEDNIC.....	VIII
KAZALO SLIK.....	IX
1 UVOD.....	1
2 OSKRBA S PITNO VODO.....	2
2.1 Zgodovina.....	2
2.2 Osnovni principi oskrbe s pitno vodo.....	2
2.2.1 Vodovodni sistemi za oskrbo s pitno vodo.....	2
2.2.2 Zajetje in priprava vode.....	4
2.3 Masna bilanca vode v vodovodnem sistemu .....	4
2.3.1 Zbiranje podatkov za masno bilanco vode v vodovodnem sistemu .....	5
2.4 Poraba pitne vode .....	5
2.4.1 Zbiranje podatkov o porabi pitne vode.....	5
2.4.2 Kategorije porabe .....	5
2.5 Vodne izgube.....	7
2.5.1 Navidezne izgube .....	7
2.5.2 Dejanske izgube.....	8
3 HIDRAVLIČNO MODELIRANJE CEVOVODNIH SISTEMOV .....	9
3.1 Teoretične osnove toka v cevovodih .....	9
3.1.1 Zakon o ohranitvi mase .....	9
3.1.2 Zakon o ohranitvi energije.....	10
3.1.3 Hidravlične izgube.....	11
3.1.3.1 Linijske izgube .....	11
3.1.3.2 Lokalne izgube .....	13
3.2 Računalniški model vodovodnega omrežja.....	14
3.2.1 Gradniki računalniškega modela vodovodnega omrežja .....	15
3.2.1.1 Vozlišča .....	16
3.2.1.2 Cevi.....	16
3.2.1.3 Vodohran .....	17



3.2.1.4	Rezervoar .....	18
3.2.1.5	Črpalke .....	18
3.2.1.6	Ventili.....	20
3.2.1.7	Krivulje.....	22
3.2.1.8	Časovni vzorci.....	23
3.2.1.9	Pravila.....	24
3.2.2	Sistem enačb za stalni enakomerni tok.....	27
3.2.2.1	Enačba cevi .....	27
3.3	Računalniški programi za izdelavo hidravličnega modela.....	30
3.3.1	EPANET.....	30
3.3.2	Program QGIS.....	30
3.3.3	Vtičnik »qgis-epanet« .....	32
4	HIDRAVLIČNI MODEL VODOVODA NAKLO.....	33
4.1	Občina Naklo .....	33
4.2	Vodovodni sistem Naklo .....	33
4.3	Hidravlični model Naklo.....	36
4.3.1	Pridobljeni podatki in obdelava.....	37
4.3.2	Določevanje porabe v vodovodnem sistemu Naklo .....	38
4.3.3	Izdelava hidravličnega modela obstoječega stanja.....	42
4.3.4	Zagon simulacije .....	44
4.3.5	Rezultati hidravlične simulacije .....	44
4.3.6	Modeliranje vodnih izgub .....	45
4.3.7	Ponovni zagon simulacije in umerjanje modela.....	47
4.3.8	Rezultati simulacije umerjenega hidravličnega modela .....	49
5	HIDRAVLIČNA PRESOJA NOVEGA VODNEGA VIRA V OBSTOJEČEM VODOVODNEM SISTEMU NAKLO.....	52
5.1	Vključitev transportnega vodovoda Zadraga-Naklo .....	52
5.1.1	Hidravlični model obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 2 bara .....	53
5.1.2	Hidravlični model obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 5 barov .....	56
5.1.3	Hidravlični model obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj .....	59
6	ZAKLJUČEK.....	66
7	VIRI.....	68

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Delitev vodnih izgub po standardih DVGW (DVGW, 2003) .....	7
Preglednica 2: Koeficient hrpavosti $\varepsilon$ za nove cevi (Boulos et al., 2006: pog. 3, str.7) .....	13
Preglednica 3: Koeficient lokalne izgube $M$ za različne gradnike (Boulos et al., 2006: pog. 3, str.20) .....	14
Preglednica 4: Gradniki vodovodnega sistema.....	15
Preglednica 5: Gradniki vodovodnega sistema v programu EPANET (Rossman, 2000).....	16
Preglednica 6: Vhodni podatki za vozlišča v programu EPANET (Rossman, 2000).....	16
Preglednica 7: Izhodni podatki za vozlišča v programu EPANET (Rossman, 2000) .....	16
Preglednica 8: Vhodni podatki za cevi v programu EPANET (Rossman, 2000) .....	17
Preglednica 9: Izračunani hidravlični podatki za cevi v programu EPANET (Rossman, 2000) .....	17
Preglednica 10: Vhodni podatki za vodohran v programu EPANET (Rossman, 2000).....	17
Preglednica 11: Izhodni podatki za vodohran v programu EPANET (Rossman, 2000) .....	17
Preglednica 12: Vhodni podatki za rezervoar v programu EPANET (Rossman, 2000).....	18
Preglednica 13: Izhodni podatki za rezervoar v program EPANET.....	18
Preglednica 14: Vhodni podatki za črpalko v programu EPANET (Rossman, 2000).....	19
Preglednica 15: Izhodni podatki za črpalko v programu EPANET (Rossman, 2000).....	20
Preglednica 16: Vhodni podatki za ventile v programu EPANET (Rossman, 2000).....	21
Preglednica 17: Izhodni podatki za ventile v programu EPANET (Rossman, 2000).....	21
Preglednica 18: Primer uporabe kontrolnega pravila .....	25
Preglednica 19: Gradniki, ki jih lahko vstavimo v stavek kontrol na osnovi pravil.....	26
Preglednica 20: Kategorije omrežja vodovoda Naklo .....	35
Preglednica 21: Cevi v vodovodnem sistemu Naklo.....	35
Preglednica 22: Črpalke vodovoda Naklo .....	35
Preglednica 23: Vodohrani vodovoda Naklo.....	36
Preglednica 24: Izračun vtoka vode v model Duplje.....	39
Preglednica 25: Spreminjanje prostornine vodohrana Duplje. ....	40
Preglednica 26: Seštevek sprememb prostornin vodohranov v modelu Duplje .....	40
Preglednica 27: Izračun porabe v modelu Duplje.....	41
Preglednica 28: Izračun porabe v modelu Pivka. ....	41

## KAZALO SLIK

Slika 1: Vejičasta struktura vodovodnega sistema .....	3
Slika 2: Mrežasta struktura vodovodnega sistema .....	3
Slika 3: Kategorije porabe .....	6
Slika 4: Oblike puščanja vodovodnega sistema .....	8
Slika 5: Moodyjev diagram (Beck S., Collins R. 2008).....	12
Slika 6: Črpalna krivulja .....	19
Slika 7: delovno okolje v programu EPANET .....	30
Slika 8: Delovno okolje v programu QGIS .....	31
Slika 9: Nastavitev povezave programa EPANET s programom QGIS .....	32
Slika 10: Občina Naklo .....	33
Slika 11: Vodovodni sistem Naklo.....	34
Slika 12: Ločena dela vodovodnega sistema.....	37
Slika 13: Pogovorno okno vtičnika »qgis-epanet«.....	44
Slika 14: Primerjava iztokov rezervoarja Pivka .....	48
Slika 15: Primerjava gladin v vodohranu Duplje. ....	48
Slika 16: Primerjava gladin v vodohranu Podbrezje. ....	49
Slika 17: Primerjava gladin v vodohranu Strahinj. ....	49
Slika 18: Povprečna hitrost toka v ceveh. ....	50
Slika 19: Višina tlakov v vozliščih.....	51
Slika 20: Povezava med vodovodnim sistemom Naklo in vodovodnim sistemom Tržič .....	53
Slika 21: Višina gladine vodohrana Duplje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 2 bara. ....	54
Slika 22: Višina gladine vodohrana Podbrezje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 2 bara. ....	55
Slika 23: Višina gladine vodohrana Strahinj v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 2 bara.....	55
Slika 24: gladine vodohrana Pivka v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 2 bara.....	56
Slika 25: Višina gladine vodohrana Duplje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov. ....	57
Slika 26: Višina gladine vodohrana Podbrezje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov. ....	58
Slika 27: Višina gladine vodohrana Strahinj v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov. ....	58
Slika 28: Višina gladine vodohrana Pivka v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov. ....	59
Slika 29: Povezava vodovodnih sistemov Tržič, Naklo in Kranj.....	60
Slika 30: Pretoki v rezervoarju Mlaka, kjer pozitivne vrednosti pretokov pomenijo vtok v rezervoar, negativne vrednosti pretokov pa iztok iz rezervoarja.....	61

---

Slika 31: Višina gladine vodohrana Duplje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj. ....	61
Slika 32: Višina gladine vodohrana Podbrezje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj. ....	62
Slika 33: Višina gladine vodohrana Strahinj v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj. ....	62
Slika 34: Višina gladine vodohrana Pivka v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj. ....	63
Slika 35: Povprečna hitrost toka v ceveh v hidravličnem modelu obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj .....	64
Slika 36: Višina tlakov v vozliščih v hidravličnem modelu obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj.....	65

»Ta stran je namenoma prazna.«

»Ta stran je namenoma prazna.«

## 1 UVOD

Načrtovanje in upravljanje z vodovodnimi sistemi zahteva znanje na področju hidravlike in poznavanje računalniških programov za izdelavo hidravličnih analiz. Računalniški programi, ki omogočajo hidravlične analize, se uporabljajo pri načrtovanju novih vodovodnih sistemov, kakor tudi pri upravljanju ter nadgraditvi že obstoječih vodovodnih sistemov.

Pri izdelavi diplomske naloge sem pridobil veščine, ki mi omogočajo praktično uporabo med študijem osvojenega znanja na področju hidravlike vodovodnih sistemov. Ob pomoči mentorjev sem v diplomski nalogi pridobil nova znanja s področja hidravličnega modeliranja. V tej diplomski nalogi bo predstavljena izdelava hidravličnega modela vodovodnega sistema Naklo, z uporabo programskih orodij EPANET in QGIS. Naloga je sestavljena tako, da so na začetku predstavljene osnove vodooskrbe in teorija hidravličnega modeliranja, to znanje pa je potem uporabljeno pri izdelavi hidravličnega modela in izvedbi hidravličnih analiz vodovodnega sistema Naklo.

Komunala Kranj, ki upravlja vodovodni sistem Naklo, namerava v bližnji prihodnosti narediti določene hidravlične spremembe na tem vodovodnem sistemu. Iz evropskih kohezijskih sredstev v projektu »Oskrba s pitno vodo na območju Zgornje Save – 3. sklop« je bil zgrajen nov transportni vodovod Zadruga-Naklo, v načrtu pa je ostala še izdelava povezave med vodovodnim sistemom Naklo in vodovodnim sistemom Tržič. Ta povezava bi za vodovodni sistem Naklo predstavljala nov vodni vir, ki nadomešča obstoječa, tj. vodni vir in črpališče Duplje ter Podbrezje. Dodatno je bila v diplomski nalogi analizirana povezava med vodovodnim sistemom Naklo in vodovodnim sistemom Kranj, kjer bi se manjši del občine Kranj po novem oskrboval tudi iz vodovodnega sistema Naklo. Cilj je bil izdelati hidravlične modele za vsako načrtovano spremembo na vodovodnem sistemu Naklo. To sem storil tako, da sem najprej izdelal hidravlični model za obstoječe stanje vodovodnega sistema Naklo, s tem modelom pa sem nato postopoma uvajal načrtovane spremembe na vodovodnem sistemu Naklo.

## 2 OSKRBA S PITNO VODO

### 2.1 Zgodovina

Minojska civilizacija na otoku Kreta je prva znana civilizacija, ki je imela cevovodni vodovodni sistem, in sicer 1500 let pred našim štetjem. Ostale civilizacije so imele sisteme z odptimi pretoki, med katerimi so verjetno najbolj znani Rimljanski akvadukti, ki so premeščali vodo na velike razdalje. V osemnajstem stoletju se je z odkritjem Pitotove cevi za merjenje hitrosti pretoka in objavo Bernoullijeve Hidrodinamike (*Hydrodynamica*) začela razvijati veda o moderni hidravliki. Leta 1936 je Hardy Cross razvil metodo za ročno računanje hidravličnih neznank v vodovodnem sistemu, iz katere so se nato razvili današnji matematični algoritmi za določanje pretokov v ceveh in tlakov v vozliščih. Te algoritme danes uporabljajo računalniški programi za izdelavo hidravličnih modelov (Walski et al., 2003).

### 2.2 Osnovni principi oskrbe s pitno vodo

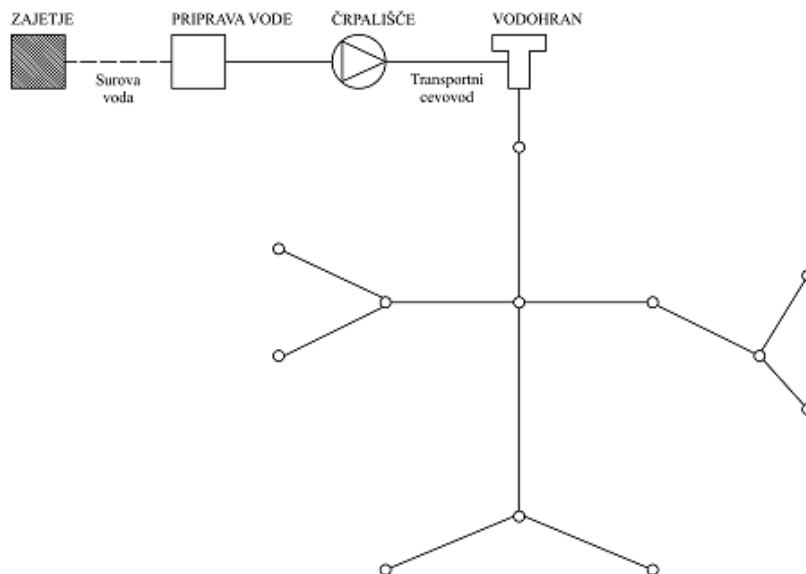
Oskrbo s pitno vodo zagotavljajo vodovodni sistemi. Cilj oskrbe s pitno vodo je, da se dostavi željeno količino vode pridobljeno iz vodnega vira, ki je po obdelavi ustrezne kakovosti, na določeno mesto ob določenem času. Takšno nemoteno distribucijo zagotavljajo ustrezni tlaki v vsaki točki vodovodnega sistema (Mays, 1999).

#### 2.2.1 Vodovodni sistemi za oskrbo s pitno vodo

Naloga vodovodnega sistema je dovajati vodo od vira do končnega cilja, kjer se nahajajo uporabniki. Končni porabniki so običajno eno ali več stanovanjski objekti, komercialni, institucionalni, vladni, industrijski in kmetijski objekti. K vodovodnemu sistemu so priključeni tudi večji uporabniki, kot na primer bolnice, letališča, zapori, vojaške baze in podobno (Boulos et al., 2006).

Vodovodni sistemi morajo biti sposobni zagotoviti maksimalno dnevno porabo ob zadostnih tlakih. Najcenejši način za zagotavljanje tega pogoja je najkrajša razdalja od vira do uporabnikov, poznana kot minimalno vpeto drevo. Takšna struktura ima veliko pomanjkljivosti in zato voda pri takem sistemu ni vedno ustrezna. Kadar pri oddaljenih uporabnikih od vira ni zahtev po vodi, posledično tam ni pretoka in voda zastaja tudi za daljša obdobja, njena kakovost pa upada. V primerih, ko ima vodovodni sistem mrežasto strukturo, vsaka zahteva po vodi sproži pretoke po vseh ceveh. Težava vejičastih sistemov je predvsem zanesljivost dobave vode vsem uporabnikom. Pri opravljanju vzdrževalnih in izrednih del na vodovodnem sistemu, je prekinjena dobava vode vsem uporabnikom dolvodno od prekinitve. Pri mrežastem sistemu se ponavadi pri enakem dogodku izpolni zahtevo po vodi, vendar z zmanjšano zmogljivostjo (Boulos et al., 2006).

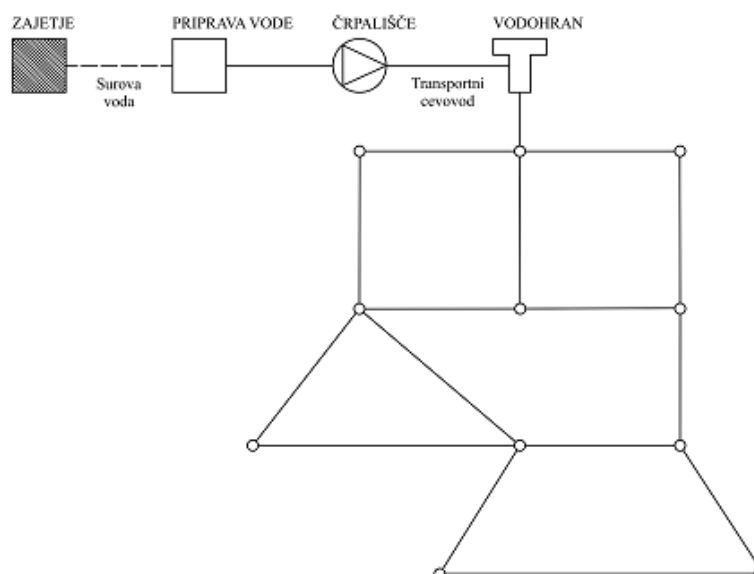




Slika 1: Vejičasta struktura vodovodnega sistema

Ob izrednih situacijah, kot je na primer požar, vejičasta struktura slabo prevaja večje pretoke do takšne lokacije, saj lahko vodo dostavijo samo cevi v tej smeri. Posledično so hitrosti toka višje kot pri mrežastih sistemih, povečajo se energijske izgube, hkrati pa se znižajo tlaki v omrežju. Mrežasti sistemi lahko v takšnih izrednih situacijah vodo dostavljajo z vsemi cevmi hkrati, zato so hitrosti toka nižje kot pri vejičastih sistemih. Manjše so tudi energijske izgube, tlaki v omrežju pa se znižajo manj kot pri vejičastih sistemih (Boulos et al., 2006).

Mrežasto omrežje je zaradi večjega števila cevi povezanih v zanke, zahtevno za dimenzioniranje. Zahtevno je tudi določanje hidravličnih veličin, ker je za ugotavljanje le teh potrebno reševati velike sisteme nelinearnih enačb.



Slika 2: Mrežasta struktura vodovodnega sistema

Poleg vseh omenjenih prednostih mrežastih sistemov so ti pri načrtovanju bistveno manj občutljivi glede natančnosti podatkov o omrežju. Zato manjše spremembe zahtev po vodi in morebitne drugačne lastnosti cevi od predvidenih, nimajo tako močnega vpliva na delovanje vodovodnega sistema. (Boulos et al., 2006).

### 2.2.2 Zajetje in priprava vode

Vodo za vodovodni sistem se lahko pridobi iz podzemnih virov in površinskih virov, kot so jezera, reke, vodonosniki in akumulacijski bazeni. Voda iz zajetja se imenuje surova voda in jo je v večini primerov potrebno pred izpustitvijo v vodovodni sistem obdelati. Stopnja obdelave surove vode je odvisna od kakovosti vodnega vira in mora po končani obdelavi ustrezati predpisanim standardom (Walski et al., 2003). Zahtevana kakovost pitne vode v Republiki Sloveniji je določena v Pravilniku o pitni vodi (UL RS št. 19/04).

### 2.3 Masna bilanca vode v vodovodnem sistemu

Masna bilanca vode v vodovodnem sistemu temelji na pravilu, da je vhodna količina vode enaka izhodni količini vode. To pravilo opisuje naslednja enačba (Walski et al., 2003):

$$Q_{poraba} = Q_{vtok} - Q_{iztok} + \frac{\Delta V_{shranjevanja}}{\Delta t} \quad (1)$$

kjer je:

$Q_{poraba}$	poraba vode v sistemu ( $m^3/s$ ),
$Q_{vtok}$	vhodna količina vode v vodovodni sistem ( $m^3/s$ ),
$Q_{iztok}$	izhodna količina vode iz vodovodnega sistema ( $m^3/s$ ),
$\Delta V_{shranjevanja}$	sprememba prostornine vodohranov ( $m^3$ ),
$\Delta t$	dolžina časovnega intervala med dvema merjenji (s).

Volumen vode, ki se na časovno enoto shrani v vodohranih, se določi po naslednji enačbi (Walski et al., 2003):

$$\Delta V_{shranjevanja} = \sum_i (V_{i,t+\Delta t} - V_{i,t}) \quad (2)$$

kjer je:

$\Delta V_{shranjevanja}$	sprememba prostornine vodohranov ( $m^3$ ),
$V_{i,t+\Delta t}$	prostornina vodohrana $i$ ob času $t + \Delta t$ ( $m^3$ ),
$V_{i,t}$	prostornina vodohrana $i$ ob času $t$ ( $m^3$ ),
$t$	čas ob pričetku merjenja (s),
$\Delta t$	dolžina časovnega intervala med dvema merjenji (s).

### **2.3.1 Zbiranje podatkov za masno bilanco vode v vodovodnem sistemu**

Pri zbiranju podatkov za izdelavo masne bilance vtoka v vodovodni sistem sta ključna dva podatka (Walski et al., 2003):

- Podatki o načrpani vodi v črpališčih,
- Podatki o vodohranih.

Podatki o načrpani vodi v črpališčih so podatki, ki jih zbira upravljalec javnega vodovoda. Ponavadi se meritve opravlja večkrat na uro. Ta podatek pove kolikšna količina vode vstopi v vodovodni sistem. V primeru, da ima vodovodni sistem več virov, kot na primer dodatni vodni vir ali pa, da je oskrbovan z vodo iz sosednjega vodovodnega sistema, se opravlja meritve tudi na teh mestih vtoka vode.

Podatki o vodohranih vsebujejo spreminjanje višine gladine vodohranov in/ali spreminjanje pretokov v vodohranih. Običajno se zabeleži vsaka sprememba v vodohranu, lahko pa se podatke zbira tudi na določen časovni interval.

## **2.4 Poraba pitne vode**

Poraba vode je količina vode, ki je dobavljena odjemalcem in predstavlja samo del celotne količine vode, ki vteče v vodovodni sistem (DVGW, 2003). Pri načrtovnjem izdelavi hidravličnega modela vodovodnega sistema je potrebno določiti kolikšna je potrebna količina vode za oskrbo vseh odjemalcev vodovodnega sistema, kako se poraba vode spreminja v odvisnosti od časa, ter kje se nahajajo odjemna mesta (Walski et al., 2003).

### **2.4.1 Zbiranje podatkov o porabi pitne vode**

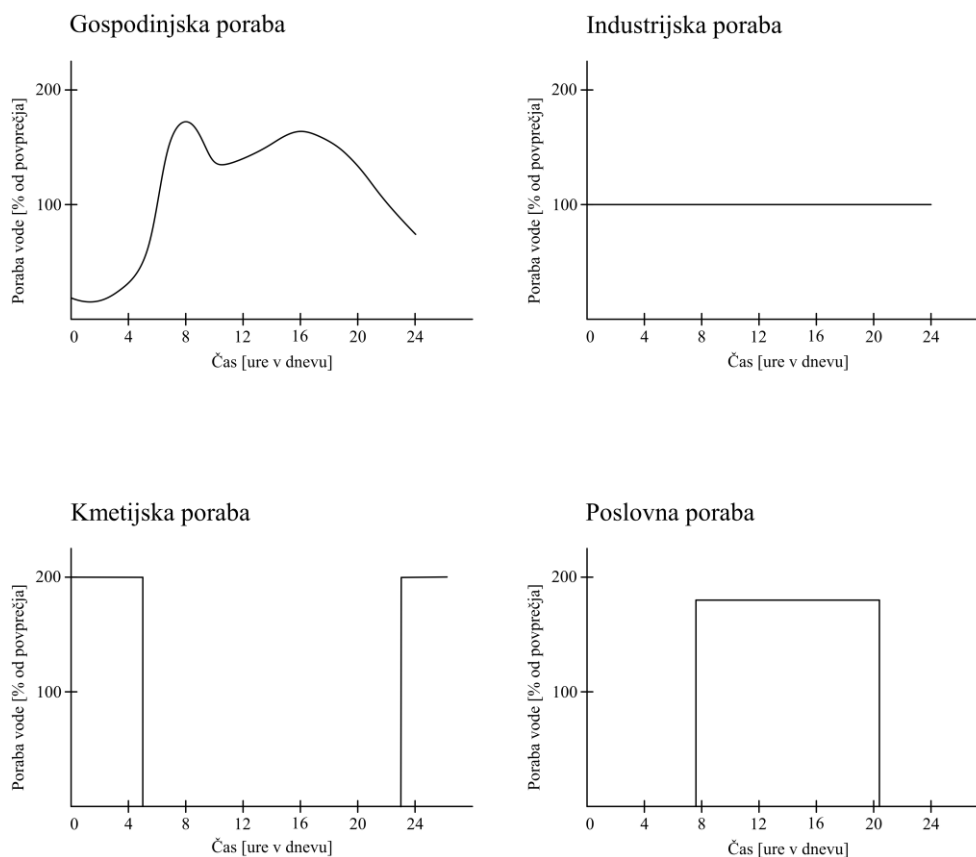
Letna količina obračunane vode je podatek, ki se ga pridobi z obračunskimi vodomeri pri odjemalcih. Uredba o oskrbi s pitno vodo (UL RS št 88/12) določa, da morajo biti stavbe ali gradbeni inženirski objekti priključeni na javni vodovod in opremljeni z obračunskim vodomero za merjenje porabe pitne vode.

### **2.4.2 Kategorije porabe**

Vsi odjemalci nimajo enakih zahtev po vodi preko dneva. Zato načrtovalci vodovodnih sistemov in upravjalci vodovodnih sistemov odjemalce delijo v naslednje skupine porabe (Boulos et al., 2006):

- Gospodinjstva poraba
- Industrijska poraba
- Kmetijska poraba (namakanje)
- Poslovna poraba

Na sliki 3 so prikazane različne krivulje 24 urne dnevne porabe za različne skupine porabe. Krivulje dnevne porabe prikazujejo, kako se poraba spreminja tekom časa. Za uporabo pri modeliranju imajo ponavadi dnevne krivulje porabe 15, 30 ali 60 minutni časovni interval (Boulos et al., 2006).



Slika 3: Kategorije porabe

Z uporabo dnevne krivulje porabe se lahko opiše spreminjanje porabe vode v vozliščih, ki spadajo v enako skupino porabe. To se naredi tako, da se za vsak časovni korak izhodiščno porabo v vozlišču pomnoži z brezdimenzijskim množiteljem porabe. Množitelje porabe se lahko odčita iz dnevne krivulje porabe oziroma se jih določi po naslednji enačbi (Walski et al., 2003):

$$f_i = \frac{Q_i}{Q_{\text{izhodiščna}}} \quad (3)$$

kjer je:

- $f_i$  množitelj porabe za i-ti časovni korak (-),
- $Q_i$  poraba v i-tem časovnem koraku ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),
- $Q_{\text{izhodiščna}}$  izhodiščna poraba ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

## 2.5 Vodne izgube

Vodne izgube so razlika med odvzeto vodo iz zajetja, ki napaja vodovod, in vodo, ki je dobavljena uporabnikom vodovodnega sistema (UL RS št.88-3498/2012). Po standardih DVGW (nem. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches) se vodne izgube delijo na navidezne izgube in dejanske izgube.

Preglednica 1: Delitev vodnih izgub po standardih DVGW (DVGW, 2003)

Vtok vode v vodovodni sistem $Q_N$ [m <sup>3</sup> /leto]	Ugotovljena poraba $Q_A$ [m <sup>3</sup> /leto]	Obračunana poraba $Q_{AI}$ [m <sup>3</sup> /leto]	Obračunana merjena poraba	Obračunane količine vode $Q_{IR}$ [m <sup>3</sup> /leto]
			Obračunana nemerjena poraba	
		Neobračunana pooblaščen poraba $Q_{AI}$ [m <sup>3</sup> /leto]	Neobračunana merjena poraba	Neobračunane količine vode $Q_{NR}$ [m <sup>3</sup> /leto]
			Neobračunana nemerjena poraba	
	Vodne izgube $Q_V$ [m <sup>3</sup> /leto]	Navidezne izgube $Q_{VS}$ [m <sup>3</sup> /leto]	Nepooblaščen poraba	
			Nenatančnost meritev	
			Kapljično iztekanje (vodomer)	
		Dejanske izgube $Q_{VR}$ [m <sup>3</sup> /leto]	Pušcanje na transportnih in distribucijskih vodih	
			Pušcanje na vodohranih	
			Pušcanje na priključkih do merilnega mesta	

DVGW metodologija izhaja iz IWA (ang. International Water Association) vodne bilance. Razlika je le v tem, da so navidezni izgubam dodali novo kategorijo in sicer kapljično iztekanje iz vodomero.

### 2.5.1 Navidezne izgube

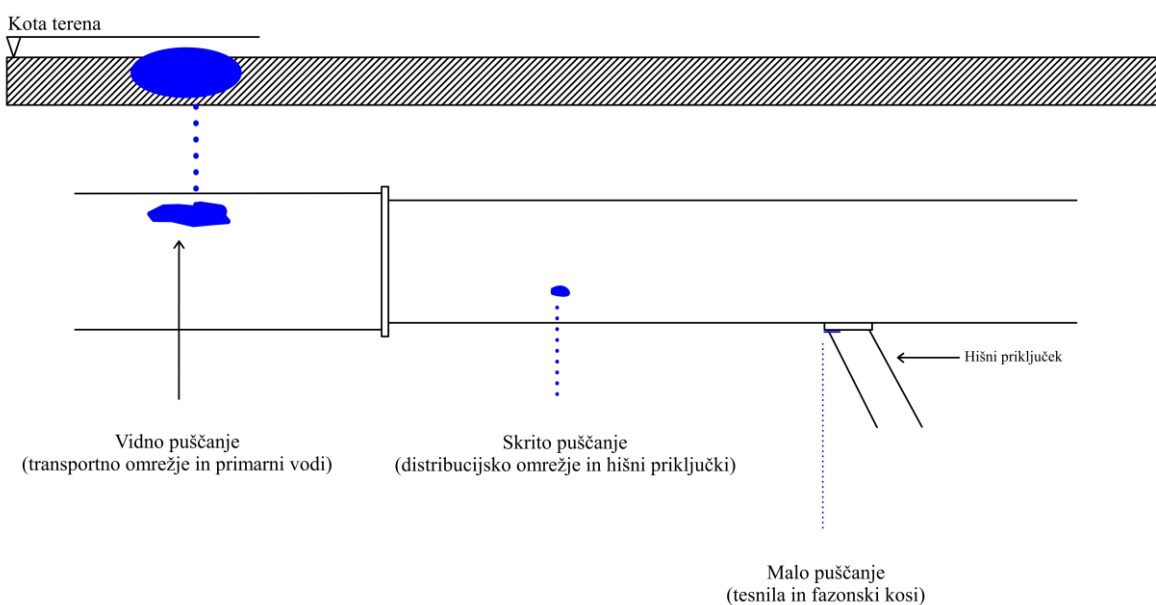
Navidezne izgube ne nastajajo kot posledica puščanja infrastrukture, ampak zaradi kapljičnega iztekanja skozi vodomerne števec, nepooblaščen porabe in nenatančnosti meritev (DVGW, 2003).

Nepooblaščen poraba pomeni predvsem kraja vode. Vodo se lahko nepooblaščen odvzame iz hidrantov, kar se še posebej rado dogaja okoli gradbišč, kjer gradbeni izvajalci potrebujejo vodo. Do kraja vode prihaja tudi pri hišnih priključkih, saj nekateri lastniki stavb nikoli ne namestijo obračunskih vodomero za merjenje porabe pitne vode, nekateri pa jih tudi odstranijo ali pa naredijo obvod okoli njih (Mays, 1999).

Do nenatančnosti meritev prihaja predvsem zaradi starejših obračunskih vodomernih števec, saj z leti tečejo počasneje in posledično namerijo manj vode kot jo je dejansko porabljen. Nenatančni so tudi predimenzionirani vodomerni števec, saj so ti lahko natančni pri meritvah pretokov, za katere so načrtovani, pri manjših pretokih pa postanejo meritve nenatančne (Mays, 1999).

### 2.5.2 Dejanske izgube

Dejanske izgube se pojavljajo kot posledica puščanja vode na transportnih in distribucijskih vodih, puščanja na vodohranih, ter puščanja na priključkih do merilnega mesta (DVGW, 2003). V večini vodovodnih sistemih predstavljajo največji delež celotnih vodnih izgub, iztekanje vode skozi netesnosti v ceveh in/ali stikih. Za iztekanje vode skozi odprtine v ceveh se uporablja izraza okvara/lom cevi in puščanje na cevi. Pri okvarah in lomih gre za tolikšno odtekanje vode iz cevi, da je potrebna takojšnja intervencija in popravilo. Okvare in lome se hitro odkrije saj ponavadi voda priteče do površja in zato ne predstavljajo večjega deleža dejanskih izgub. Večji delež vseh dejanskih izgub pa predstavljajo skrita puščanja, saj pogosto ostanejo neodkrita. Ker jih je težje odkriti lahko že manjša puščanja vodijo do velike količine izgubljene vode skozi obdobje, v katerem ostanejo neodkrita. (Mays, 1999).



Slika 4: Oblike puščanja vodovodnega sistema

Višine tlakov v vodovodnih sistemih imajo pomemben vpliv na dejanske izgube, saj višji tlaki vodijo do večjega števila okvar na cevovodih. Velik vpliv imajo tudi na odsekih cevovodov, kjer se nahajajo mesta puščanja, saj se pri višjih tlakih poveča iztekanje vode na mestih puščanja (Mays, 1999).

### 3 HIDRAVLIČNO MODELIRANJE CEVOVODNIH SISTEMOV

Izdelava hidravličnega modela vodovodnega sistema je zahteven proces, saj vsebuje veliko različnih gradnikov in elementov, ki morajo delovati usklajeno kot celota. Vzpostavitev hidravličnega modela se opravi s pomočjo računalniških programov, pri čemer je pomembno predhodno poznavanje hidravlike cevododnih sistemov. V tem poglavju bodo podane vsebine, ki so potrebne za izdelavo hidravličnega modela vodovodnega sistema. Predstavljene vsebine zajemajo tako osnove hidravlike (turbulentni tok tekočine v cevododih), gradnike vodovodnega sistema, načine zapisa hidravličnega modela (sistem matematičnih enačb) in programska orodja za izdelavo in hidravlično simulacijo vodovodnih sistemov (programi QGIS, vtičnik »qgis-epanet« in EPANET).

#### 3.1 Teoretične osnove toka v cevododih

Osnova hidravličnega delovanja cevododnega sistema sta zakon o ohranitvi mase in zakon o ohranitvi energije. Ta dva zakona opisujeta hidravlične razmere tako v ceveh (pretoki), kot v vozliščih (tlaki).

##### 3.1.1 Zakon o ohranitvi mase

Ohranitev mase zahteva, da je sprememba mase tekočine znotraj volumna  $V$  v času  $\partial t$  enaka količini, ki jo podaja razlika dotoka in iztoka skozi površino  $S$ , ki določa presek preko volumna  $V$  (Rajar, 1997):

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV = - \iint_S \rho \vec{v} d\vec{S} \quad (4)$$

kjer je:

$t$	čas (s),
$\rho$	gostota (kg/m <sup>3</sup> ),
$v$	hitrost (m/s),
$V$	volumen (m <sup>3</sup> ),
$S$	površina (m <sup>2</sup> ).

Za stacionarni tok in nestisljivo tekočino je volumen pretoka v cevi konstanten in se s časom ne spreminja. Pretok  $Q$  pa je v vsakem prerezu mogoče določiti kot produkt hitrosti  $v$  in preseka  $S$  (Steinman, 1999):

$$v_1 * S_1 = v_2 * S_2 = v_i * S_i = Q \quad (5)$$

kjer je:

$v_i$	hitrost na odseku $i$ (m/s),
-------	------------------------------

$S_i$  površina prereza cevi na odseku  $i$  ( $m^2$ ),

$Q$  pretok na odseku  $i$  ( $m^3/s$ ).

### 3.1.2 Zakon o ohranitvi energije

Energija v tekočini se pojavlja v obliki kinetične, potencialne in notranje energije (Boulos et al., 2006):

$$E = mgz + \frac{1}{2}mv^2 + E_u \quad (6)$$

kjer je:

$E$  energija v tekočini,

$mgz$  člen potencialne energije, pri čemer  $m$  predstavlja maso tekočine,  $g$  gravitacijski pospešek in  $z$  višino od primerjalne ravnine do točke meritve,

$\frac{1}{2}mv^2$  člen kinetične energije, pri čemer je  $m$  masa tekočine,  $v$  pa povprečna hitrost čez prerez,

$E_u$  člen prestavlja energijo v molekulah, ki sestavljajo tekočino in se imenuje notranja energija.

Prvi zakon termodinamike navaja, da je sprememba energije v tekočinskem sistemu enaka toploti prenešeni na tekočino, minus delo, ki ga opravi tekočina (Boulos et al., 2006):

$$E_2 - E_1 = \Delta Q_H - \Delta W \quad (7)$$

kjer je:

$E_1, E_2$  energija na vtoku ali iztoku,

$\Delta Q_H$  toplota prenešena na tekočino,

$\Delta W$  delo, ki ga opravi tekočina.

Za stalni enakomerni tok v ceveh lahko zapišemo končno energijsko enačbo med dvema točkama na cevovodu (Steinman, 1999):

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_L \quad (8)$$

kjer je:

$p$  tlak ( $N/m^2$ ),

$\rho$  gostota ( $kg/m^3$ ),

$g$  gravitacijski pospešek ( $m/s^2$ ),

$z$  višina od primerjalne ravnine do točke meritve (m),



$v$  hitrost pretoka (m/s),  
 $\Sigma h_L$  vse oblike ireverzibilnih energij (m).

### 3.1.3 Hidravlične izgube

V hidravličnih sistemih obstajata dve vrsti izgub, in sicer (Boulos et al., 2006):

- linijske oziroma trenjske izgube, pri katerih se zaradi trenja vode ob steno cevi mehanska energija spreminja v toplotno in se tako izgubi iz sistema,
- lokalne izgube, ki nastajajo zaradi spremembe hitrosti pretoka, ali zaradi spremembe smeri pretoka.

#### 3.1.3.1 Linijske izgube

Linijske izgube nastajajo na stiku med premikajočo se tekočino in fiksno mejo cevi v tako imenovani mejni plasti. V turbulentnem toku in prehodnem toku je mejna plast sestavljena iz treh območij (Boulos et al., 2006):

- viskozna podplast<sup>1</sup> ob steni cevi, kjer prevladujejo viskozne sile in se tok obnaša kot laminarni tok,
- sledi turbulentna plast<sup>2</sup>, kjer se moment prenaša z delci tekočine, ki se premikajo proti in v smeri pretoka, viskozne napetosti pa so zanemarljive v primerjavi s strižnimi napetostmi, ki nastajajo zaradi turbulence,
- nad tema območjema se nahaja območje zakona hitrosti, kjer izgube naraščajo s kvadratom srednje hitrosti, strižne napetosti pa prevladujejo nad viskozni napetostmi in so v centru enake nič.

Za izračun linijskih izgub se uporabljajo tri enačbe:

- Darcy-Weisbach enačba,
- Hazen-Williams enačba,
- Chezy-Manning enačba.

Darcy-Weisbachova enačba je teoretično najbolj točna. Uporablja se lahko za vse režime toka in vse vrste tekočin (Rossman, 2000). Darcy-Weisbach enačba se glasi:

$$h_L = \lambda \frac{Lv^2}{D2g} = \lambda \frac{L8Q^2}{\pi^2 D^5 g} \quad (9)$$

---

<sup>1</sup> To območji je del območja zakona stene cevi (Boulos et al., 2006).

<sup>2</sup> To območji je del območja zakona stene cevi (Boulos et al., 2006).

kjer je:

- $h_L$  linijske izgube v cevi (m),  
 $\lambda$  brezdimenzijski koeficient trenja (-),  
 $L$  dolžina cevi (m),  
 $v$  hitrost pretoka (m/s),  
 $D$  premer cevi (m),  
 $g$  gravitacijski pospešek ( $m/s^2$ ),  
 $Q$  pretok v cevi ( $m^3/s$ ).

Brezdimenzijski koeficient trenja  $\lambda$  se določi glede na režim pretoka. Program EPANET uporablja naslednje načine:

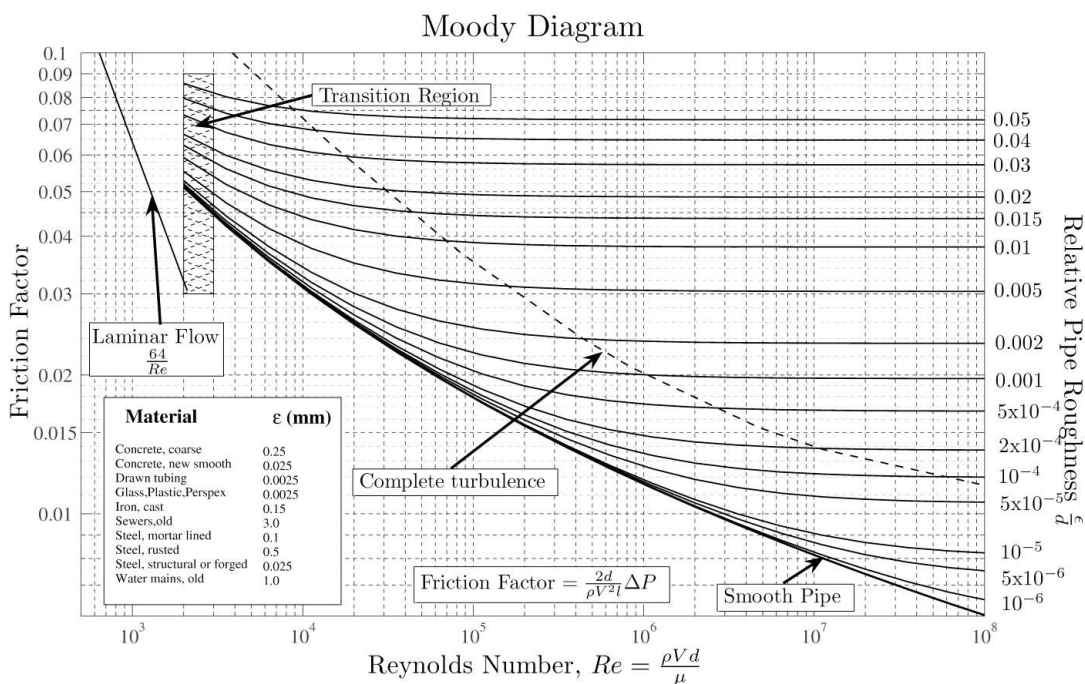
- za laminarni tok uporablja Hagen-Poiseuille enačbo ( $Re < 2000$ ),

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

kjer je:

- $\lambda$  Brezdimenzijski koeficient trenja (-),  
 $Re$  Reynoldsovo število (-).

- za kritično območje uporablja kubično interpolacijo iz Moodyjevega diagrama ( $2000 < Re < 4000$ ) (Dunlop, 1999, cit. po Rossman, 2000),



Slika 5: Moodyjev diagram (Beck S., Collins R. 2008)

- za prehodno območje in območje izrazite turbulence uporablja Swamee-Jain enačbo ( $Re > 4000$ ).

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{e}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (11)$$

kjer je:

$\lambda$  brezdimenzijski koeficient trenja (-),

$e$  ekvivalent hrapavosti cevi (m),

$D$  premer cevi (m),

$Re$  Reynoldsovo število (-).

Ekvivalent hrapavosti se razlikuje glede na material cevi.

Preglednica 2: Koeficient hrapavosti  $\epsilon$  za nove cevi (Boulos et al., 2006: pog. 3, str.7)

Material cevi	Ekvivalent hrapavosti, $\epsilon$ [mm]
Kovano jeklo	0,9 - 90
Beton	0,3 - 3,0
Les	0,18 - 0,9
Lito železo	0,26
Galvanizirano železo	0,15
Komercialno jeklo	0,045
Sestavljene cevi	0,0015

### 3.1.3.2 Lokalne izgube

Lokalne izgube so energijske izgube zaradi turbulenc, ki nastajajo pri omejitvah pretoka, pri spremembi hitrosti ali spremembi smeri pretoka (Boulos et al., 2006). Nastajajo zaradi vgrajenih ventilov, kolen, lokov, vtokov, iztokov in ostalih gradnikov na cevovodih. Običajno so bistveno manjše od linijskih izgub. Za vključitev lokalnih izgub v izračun modela se odločimo glede na željeno natančnost izračuna in glede na velikost modela.

Enačba za izračun lokalnih izgub (Boulos et al., 2006):

$$h_{ML} = \Delta H = M \left( \frac{v^2}{2g} \right) = \left( \frac{8M}{\pi^2 g D^4} \right) Q^2 \quad (12)$$

kjer je:

$h_{ML}$  lokalna izguba (m),

$M$  koeficient lokalne izgube (-),

$v$  hitrost pretoka (m/s),

$g$  gravitacijski pospešek ( $m/s^2$ ),

$D$  premer cevi (m),

$Q$  pretok v cevi ( $m^3/s$ ).

Vsak od imenovanih gradnikov ima svoj koeficient lokalnih izgub.

Preglednica 3: Koeficient lokalne izgube  $M$  za različne gradnike (Boulos et al., 2006: pog. 3, str.20)

Gradnik	Koeficient izgube $M$
Globalni ventil, polno odprt	10,0
Kotni ventil, polno odprt	5,0
Nihalni kontrolni ventil, polno odprt	2,5
Vhodni ventil, polno odprt	0,2
Vhodni ventil, 3/4 odprt	1,15
Vhodni ventil, 1/2 odprt	5,6
Vhodni ventil, 1/4 odprt	24,0
Metuljni ventil, polno odprt	0,3
Membranski ventil, polno odprt	2,3
Membranski ventil, 3/4 odprt	2,6
Membranski ventil, 1/2 odprt	4,3
Membranski ventil, 1/4 odprt	21,0
Redukcijski ventil	10,0
Koleno s kratkim radijem	0,9
Koleno s srednjim radijem	0,8
Koleno z dolgim radijem	0,6
Spojni element z 90° zavojem	1,8
Koleno s kotom 45°	0,4
Zaprta povratni zavoj	2,2
Spojni element v obliki črke t-tok gre v isto smer	0,6
Spojni element v obliki črke t-tok se razcepi	1,8
Okrogel vhod	0,04
Posnet vhod	0,25
Kvadratni vhod	0,5
Navznoter štrleča cev	1,0
Cedilni in nožni ventil	2,5
Iztok iz cevi	1,0

### 3.2 Računalniški model vodovodnega omrežja

Računalniški model vodovodnega omrežja je matematični zapis hidravlike cevovodnega sistema. Uporablja se pri načrtovanju novih sistemov in analiziranju obstoječih. Osnovni cilj je natančno ugotoviti pretok, tlak in parametre kakovosti vode v obstoječem ali načrtovanem vodovodnem omrežju. Pri obstoječih sistemih se z analizo sistema distribucije vode izboljšuje izkoristek obstoječe infrastrukture, zmanjšuje obratovalne stroške, izboljšuje zmogljivost sistema in stanje kakovosti vode. Vodovodni sistemi so dragi za izgradnjo, njihovo upravljanje in vzdrževanje pa je kompleksno, zato lahko z računalniškim modeliranjem ugotovimo nepravilnosti in jih pred izgradnjo odpravimo (Boulos et al., 2006). Analize sistema distribucije vode se izvede s simulacijami, ki posnemajo delovanje obstoječih sistemov. Najbolj tipični sta dve vrsti simulacij, in sicer statična simulacija (ang. Steady State Simulation), ter razširjena časovna simulacija (ang. Extended Period Simulation) (Walski et al.,

2003). Za računalniški model vodovodnega omrežja so potrebni štirje osnovni tipi podatkov (Boulos et al., 2006):

- podatki o cevovodnem omrežju, ki definirajo karakteristike fizičnih gradnikov omrežja, topologijo omrežja, ter povezave med cevovodi in vozlišči,
- podatki o porabi, ki definirajo značilnosti zahtev po vodi,
- podatki o delovanju, ki opisujejo, kako se gradniki omrežja obnašajo oziroma delujejo skozi čas,
- podatki o parametrih kakovosti vode, ki so sestavljeni iz značilnosti kakovosti vode in kinetike kemijskih reakcij.

### 3.2.1 Gradniki računalniškega modela vodovodnega omrežja

Hidravlični model vodovodnega sistema je sestavljen iz končnega števila usmerjenih povezav, ki so povezane in se stikajo v vozliščih.

Ime vozlišče se v slovenski literaturi večkrat uporablja za vrsto gradnika, ki predstavlja točkovne elemente (ang. »node«), pri čemer pa se večinoma nanaša na stičišče cevi (ang. »junction«). Pomembno je razlikovanje med grafičnimi elementi, to je linijskimi in točkovnimi elementi, in hidravličnimi gradniki, ki so opisani v nadaljevanju.

Linijski elementi so cevi, črpalke in kontrolni ventili. Točkovne elemente pa predstavljajo vozlišča, vodohrani in rezervoarji.

Preglednica 4: Gradniki vodovodnega sistema

<b>Gradniki, ki spadajo pod linijske elemente:</b>	<b>Gradniki, ki spadajo pod točkovne elemente:</b>
Cev	Vozlišče
Črpalka	Vodohran
Ventil	Rezervoar

Zasuni in nepovratni ventili se smatrajo kot značilnost cevi, medtem ko se višinski ventil smatra kot značilnost vodohrana. Koeficiente lokalnih izgub se lahko upošteva kot zasun.

V tej diplomski sem za obdelavo podatkov in izdelavo hidravličnega modela uporabil program QGIS, ki preko vmesnika »qgis-epanet« (Oslandia, 2014) uporablja program EPANET za izračun hidravlike. Opisi gradnikov in potrebni vhodni podatki so zato prilagojeni programu EPANET. Program EPANET deli gradnike omrežnega modela na fizične in nefizične (preglednica 5).

Preglednica 5: Gradniki vodovodnega sistema v programu EPANET (Rossman, 2000)

<b>Fizični gradniki:</b>	<b>Nefizični gradniki</b>
Cev	Krivulje
Črpalka	Časovni vzorci
Ventil	Kontrole
Vozlišče	
Vodohran	
Rezervoar	

### 3.2.1.1 Vozlišča

Vozlišča v hidravličnem modelu predstavljajo stičišče linijskih elementov ter točko, v kateri voda vstopa ali izstopa iz sistema. Lahko pa imajo tudi druge funkcije in lastnosti (Rossman, 2000):

- njihove porabe se lahko spreminjajo s časom,
- lahko imajo pripisane različne kategorije porabe,
- negativen predznak porabe pomeni, da voda vstopa v vozlišče,
- uporabi se jih lahko za kontrolo kakovosti vode,
- lahko vsebujejo t.i. elemente »emitter«, ki predstavljajo iztok na prosto skozi šobo ali odprtino.

#### Vhodni podatki za vozlišča v programu EPANETpanet:

Preglednica 6: Vhodni podatki za vozlišča v programu EPANET (Rossman, 2000)

<b>Vhodni podatki</b>	<b>Enota</b>	<b>Primer</b>
ID oznaka	[-]	J1
Višina vozlišča <sup>3</sup>	[m]	328,5
Poraba	[l/s]	0,04

#### Izračunani hidravlični podatki za vozlišča, ki so izračunani za vsa časovna obdobja simulacije:

Preglednica 7: Izhodni podatki za vozlišča v programu EPANET (Rossman, 2000)

<b>Izhodni podatki</b>	<b>Enota</b>	<b>Primer</b>
Tlak	[m VS <sup>4</sup> ]	47,3
Piezometrični tlak <sup>5</sup>	[m VS]	448,5

### 3.2.1.2 Cevi

Cevi so členi, ki služijo za pretok vode med dvema vozliščema. Pretok teče od vozlišča z višjo tlačno črto proti vozlišču z nižjo tlačno črto.

<sup>3</sup> Običajno nadmorska višina oziroma relativna višina nad referenčno koto.

<sup>4</sup> Oznaka m VS pomeni metrov vodnega stolpca.

<sup>5</sup> Združuje člen nadmorske višine vozlišča in tlaka v vozlišču.

### Vhodni podatki za cevi v programu EPANET:

Preglednica 8: Vhodni podatki za cevi v programu EPANET (Rossman, 2000)

<b>Vhodni podatki</b>	<b>Enota</b>	<b>Primer</b>
ID oznaka cevi	[-]	P1
ID začetnega vozlišča	[-]	J1
ID končnega vozlišča	[-]	J2
Premer cevi	[mm]	150
Dolžina cevi	[m]	8,53
Koeficient hrapavosti	[mm]	0,26
Koeficient lokalnih izgub	[-]	0,6
Status cevi	zaprt, odprt, vsebnost kontrolnega ventila	OPEN (odprt)

### Izračunani hidravlični podatki za cevi, ki so izračunani za vsa časovna obdobja simulacije:

Preglednica 9: Izračunani hidravlični podatki za cevi v programu EPANET (Rossman, 2000)

<b>Izhodni podatki</b>	<b>Enota</b>	<b>Primer</b>
Pretok v cevi	[l/s]	0,06
Hitrost toka	[m/s]	0,34
Linijske izgube	[m/km]	3,4

#### 3.2.1.3 Vodohran

V računalniškem modelu je vodohran točkovni element s sposobnostjo shranjevanja vode, kjer se volumen vode spreminja s časom in niha s sistemskimi zahtevami. Nivo višine vode v vodohranu se lahko s časom spreminja v razponu med minimalno in maksimalno dovoljeno višino gladine. Kadar se spusti pod minimalno višino gladine, se iztok iz vodohrana samodejno ustavi, ko pa se gladina vode dvigne nad maksimalno dovoljeno višino, se samodejno ustavi vtok v vodohran (Boulos et al., 2006).

### Vhodni podatki za vodohran v programu EPANET:

Preglednica 10: Vhodni podatki za vodohran v programu EPANET (Rossman, 2000)

<b>Vhodni podatki</b>	<b>Enota</b>	<b>Primer</b>
ID oznaka vodohrana	[-]	VH_1
Višina dna vodohrana	[m]	477,53
Začetna višina gladine vodohrana	[m]	1,8
Premer vodohrana	[m]	4,6
Minimalna višina gladine	[m]	0,5
Maksimalna višina gladine	[m]	2,6
ID krivulje prostornine vodohrana	[-]	Curve_T1

### Izračunani hidravlični podatki za vodohran, ki so izračunani za vsa časovna obdobja simulacije:

Preglednica 11: Izhodni podatki za vodohran v programu EPANET (Rossman, 2000)

<b>Izhodni podatki</b>	<b>Enota</b>	<b>Primer</b>
Tlak	[m VS]	1,26
Piezometrični tlak	[m VS]	489,78

### 3.2.1.4 Rezervoar

V računalniškem modelu je rezervoar vozlišče, ki predstavlja neomejen zunanji vir ali ponor vode v omrežju. Predstavlja zunanji vodni vir, kot na primer jezera, reke, talne vode, vodonosnike in vodnjake. Glavni vhodni podatek za rezervoar je tlačna višina, ki se pod pogojem, da rezervoar ni pod tlakom, ujema z višino površja vode v rezervoarju. Ker je rezervoar robni pogoj v hidravličnem modelu, tlačna višina in kakovost vode nista pod vplivom dogajanja v omrežju. Njegova tlačna višina lahko ostane konstantna ali pa se spreminja z dodeljenim časovnim vzorcem v EPS (ang. Extended Period Simulation) simulaciji. Prvi se imenuje rezervoar s konstantno tlačno višino, drugi pa rezervoar s spremenljivo tlačno višino (Boulos et al., 2006).

#### Vhodni podatki za rezervoar v programu EPANET:

Preglednica 12: Vhodni podatki za rezervoar v programu EPANET (Rossman, 2000)

Vhodni podatki	Enota	Primer
ID oznaka rezervoarja	[-]	Vir_1
Tlačna črta <sup>6</sup>	[m]	408,69

#### Izračunani hidravlični podatki za rezervoar, ki so izračunani za vsa časovna obdobja simulacije:

Preglednica 13: Izhodni podatki za rezervoar v program EPANET

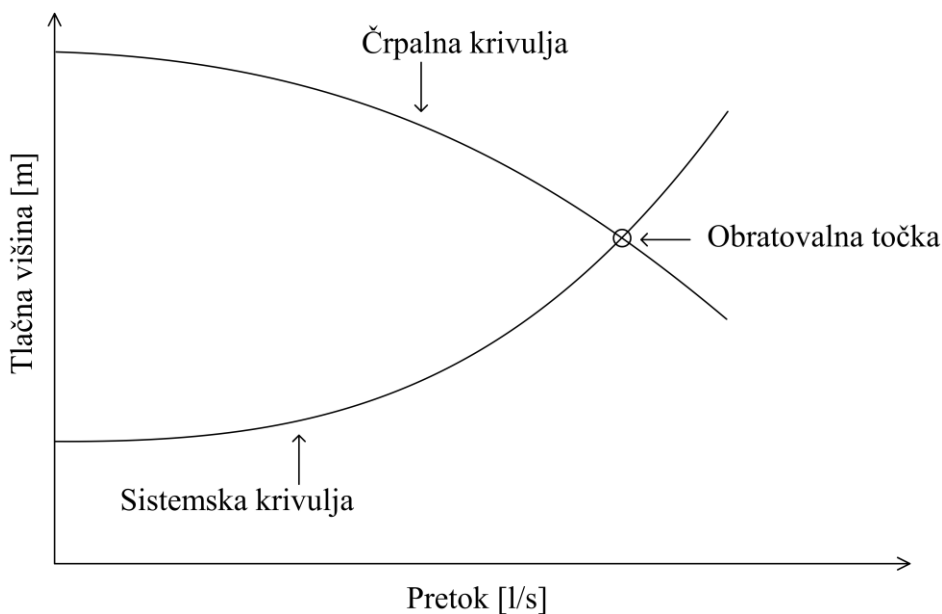
Izhodni podatki	Enota	Primer
Iztok ali vtok	[l/s]	-25,4

### 3.2.1.5 Črpalke

Pretok tekočine po ceveh je možen zaradi potencialne energije, kot posledice višinske razlike v sistemu ali pa zaradi dodanega dela. Dodano delo v vodovodnih sistemih je v večini primerov delo črpalk. Delo črpalk je prišteto energijski enačbi kot dodana energija v sistemu. V vodovodne sisteme se dodaja energijo zaradi hidravličnih izgub in premagovanja višinskih razlik. Razmerje med tlaki v cevovodih in črpalno višino prikazujeta systemska krivulja in črpalna krivulja (slika 6). Systemska krivulja narašča zaradi trenjskih izgub, ki se povečujejo s pretokom tekočine in ima obliko parabole. S primerjavo systemske krivulje in črpalne krivulje se dobi presečno točko, ki predstavlja trenutno obratovalno točko črpalke v določenem sistemu. Ta točka definira obratovanje črpalke (Boulos et al., 2006).

<sup>6</sup> Tlačna črta, ki je enaka prosti gladini rezervoarja, pod pogojem, da vodni vir ni pod dodatnim tlakom.





Slika 6: Črpalna krivulja

Izbrati je potrebno tako črpalke, da se točka obratovanja črpalke nahaja v bližini njene največje učinkovitosti, saj se s tem prihrani poraba energije in zmanjša stroške vzdrževanja. Točka največje učinkovitosti se nahaja na prevoju krivulje učinkovitosti.

Pomembna je tudi pravilna umestitev črpalke v sistem, saj lahko prenizek tlak na vtoku v črpalke sproži pojav kavitacije na črpalke in jo trajno poškoduje. Proizvajalci črpalke zato za črpalke podajo neto pozitivno sesalno višino (ang. NPSH), ki je potrebna tlačna višina na vtoku v črpalke, s katero se izognemo pojavu kavitacije. Lastnosti črpalke vnesemo v program v obliki črpalne krivulje in krivulje učinkovitosti. Črpalke ne deluje izven obsega črpalne krivulje. Pretok skozi črpalke pa je vedno enosmeren.

### Vhodni podatki za črpalke v programu EPANET:

Preglednica 14: Vhodni podatki za črpalke v programu EPANET (Rossman, 2000)

Vhodni podatki	Enota	Primer
ID oznaka črpalke	[-]	Crp_1
ID začetnega vozlišča	[-]	J46
ID končnega vozlišča	[-]	J47
Premer	[mm]	80
Črpalna krivulja	[-]	Krv_P1
Moč črpalke	[kW]	22
Relativna hitrost črpalke	[-]	1,0
ID oznaka časovnega vzorca	[-]	Vzr_P1
Status črpalke	[zaprt, odprt]	CLOSED
Krivulja učinkovitosti	[-]	Ucnk_EP1

**Izračunani hidravlični podatki za črpalko, ki so izračunani za vsa časovna obdobja simulacije:**

Preglednica 15: Izhodni podatki za črpalko v programu EPANET (Rossman, 2000)

<b>Izhodni podatki</b>	<b>Enota</b>	<b>Primer</b>
Pretok	[l/s]	14,53
Dvig tlačne črte <sup>7</sup>	[m]	-85,3

**3.2.1.6 Ventili**

Ventili so linijski elementi, ki omejujejo pretok ali tlak na točno določeni točki v sistemu. Poznamo več vrst ventilov, ki imajo različne namembnosti.

**Reducirni ventil tlakov (angleško Pressure Reducing Valve - PRV)**

Uporablja se pri zniževanju tlaka na nastavljeno vrednost v dolvodni smeri. Vgrajeni so v sistemih z velikim višinskim padcem. Za zagotavljanje točno določenega tlaka dolvodno od ventila se zniževanje tlaka v ventilu spreminja glede na presežen tlak gorvodno od ventila. To omogoča vzmetni mehanizem v ventilu, ki upravlja odpiranje ventila glede na presežene tlake (Boulos et al., 2006). Reducirni ventil tlaka deluje na tri načine:

- ob prevelikem tlaku gorvodno, je delno priprt in tako zagotavlja nastavljen tlak dolvodno,
- kadar je tlak gorvodno nižji od nastavljenega tlaka v ventilu (lahko tudi v določeni točki sistema), je ventil polno odprt,
- če je tlak dolvodno višji od gorvodnega, je ventil popolnoma zaprt in tako preprečuje tok vode v nasprotno smer (deluje kot protipovratni ventil).

**Ventil za vzdrževanje tlaka (angleško Pressure Sustaining Valve - PSV)**

Vzdržuje minimalni tlak gorvodno od ventila, medtem ko se tlak dolvodno spreminja. To stori tako, da ustvarja izgube in s tem zmanjšuje pretok skozi ventil. Kadar je tlak dolvodno nižji od nastavljenega tlaka, se ventil zapira dokler tlak gorvodno ni višji od nastavljenega. Ventil se vgrajuje v dolge cevovode, ki povezujejo dva velika vodna zbiralnika ali pa med dva objekta z različnima tlakoma (Boulos et al., 2006). Deluje lahko na tri načine:

- ventil je delno odprt, če je dolvodno tlak nižji od nastavljene vrednosti in tako vzdržuje tlak gorvodno,
- kadar je tlak dolvodno nad nastavljeno vrednostjo, je ventil popolnoma odprt,
- ventil se zapre, kadar tlak dolvodno preseže tlak gorvodno in tako prepreči spremembo smeri toka.

<sup>7</sup> Dvig tlačne črte je podan z negativnim predznakom, saj je dovedeno delo črpalke predstavljeno kot negativna energijska izguba.

### Ventil za znižanje tlaka (angleško Pressure Breaker Valve - PBV)

Ventil povzroči točno določen nastavljen padec tlaka. Z njim lahko modeliramo primere, pri katerih vemo, da obstaja določen padec tlaka (Boulos et al., 2006).

### Ventil za regulacijo pretoka (angleško Flow Control Valve - FCV)

Ventil omejuje pretok na točno določeno vrednost. Kadar ne more ohranjati pretoka brez dodane energije na ventilu, se obnaša kot navadna cev. Običajno se ti ventili uporabijo na območjih, kjer upravljalec ne želi imeti višjih pretokov v dolvodno ležeča območja (Boulos et al., 2006).

### Dušilni ventil (angleško Throttle Control Valve - TCV)

Dušilni ventil z delnim zapiranjem simulira pretočni upor v obliki lokalne izgube. Z njim povečujemo ali zmanjšujemo pretoke ali uravnavamo tlake v sistemu. Razmerje med zapiranjem in pretočnim uporom poda proizvajalec elementa, ki ga modeliramo, ali pa ga dobimo s testiranjem naprave (Boulos et al., 2006).

### Splošno namenski ventil (angleško General Purpose Valve - GPV)

Ventil lahko uporabimo za simulacijo energijskega padca, ki ga namesto z običajno hidravlično formulo opišemo s točkami na krivulji "energijske izgube - pretok". Uporabimo ga lahko za modeliranje turbin, spremembo energijske črte, pri črpanju iz vodnjaka ali pri ventilih za preprečevanje smeri toka (Boulos et al., 2006).

### Vhodni podatki za ventile v programu EPANET:

Preglednica 16: Vhodni podatki za ventile v programu EPANET (Rossman, 2000)

Vhodni podatki	Enota	Primer
ID oznaka ventila	[-]	Vnt_1
ID začetnega vozlišča	[-]	J55
ID končnega vozlišča	[-]	J56
Premer	[mm]	80,0
Vrsta ventila	[PRV, PSV, PBV, FCV, TCV, GPV]	PBV
Lokalni koeficient izgube	[-]	10,0
Vhodni parametri ventila	[m, l/s, brezdimenzijski, ID]	2,0
Status ventila	[odprt, zaprt]	CLOSED

### Izračunani hidravlični podatki za ventile, ki so izračunani za vsa časovna obdobja simulacije:

Preglednica 17: Izhodni podatki za ventile v programu EPANET (Rossman, 2000)

Izhodni podatki	Enota	Primer
Pretok	[l/s]	0,6
Tlačne izgube	[m]	20,0

### 3.2.1.7 Krivulje

Krivulje so zapis podatkov v parih, med katerima velja določeno razmerje. V EPANET-u si lahko več enakih gradnikov deli isto krivuljo (Rossman, 2000).

#### Črpalna krivulja

Ko postavljamo računalniški model vodovodnega omrežja, moramo za črpalno vnesti enačbo, ki opisuje črpalno krivuljo. Običajno v hidravličnih modelih uporabimo enega izmed naslednjih približkov (Boulos et al., 2006):

- **kvadratno enačbo ocenjene zmogljivosti**

Pri kvadratni enačbi ocenjene zmogljivosti, dobimo tri točke za črpalno krivuljo tako, da pri ničelnem pretoku vzamemo 133% ocenjene vrednosti tlačne višine, pri ničelni tlačni višini pa dvokratnik ocenjenega pretoka.

- **potenčno funkcijo na osnovi treh  $h_p$ - $Q$  točk**

Potenčno funkcijo na osnovi treh  $h_p$ - $Q$  točk opišemo z enačbo:

$$h_p = h_c - K_p Q^b \quad (13)$$

kjer je:

$h_p$  črpalna višina (m),

$h_c$  črpalna višina pri ničelnem pretoku (m),

$Q$  pretok v cevi (l/s),

$K_p$  koeficient, ki definira črpalno krivuljo (s/m<sup>2</sup>),

$b$  koeficient, ki definira črpalno krivuljo (-).

- **odsekovno linearno enačbo z več kot tremi  $h_p$ - $Q$  točkami**

Pri odsekovni funkciji z več kot tremi  $h_p$ - $Q$  točkami, večina programov linearno zapolni prostor med točkami.

- **hiperbolično krivuljo konjskih moči črpalke**

Kadar je poznana samo moč črpalke, se razmerje med višino tlaka in pretokom zapiše z enačbo:

$$h_p = \frac{K_u P}{Q_p} \quad (14)$$

kjer je:

$h_p$  črpalna višina (m),

$P$  moč črpalke (kW),

$K_u$  faktor pretvorbe, ki znaša 0,101,

$Q_p$  pretok v cevi (l/s).

- **krivuljo črpalke z variabilno hitrostjo**

Pri črpalkah z variabilno hitrostjo delovanja se črpalna krivulja spreminja s spreminjanjem hitrosti delovanja (Rossman, 2000). To razmerje lahko opišemo s formulama:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left( \frac{n_{p,1}}{n_{p,2}} \right) \quad (15)$$

$$\frac{h_{p,1}}{h_{p,2}} = \left( \frac{n_{p,1}}{n_{p,2}} \right)^2 \quad (16)$$

kjer je:

$Q$  pretok (l/s),

$n_p$  hitrost delovanja črpalke (obrti na minuto),

$h_p$  črpalna višina (m).

### **Krivulja učinkovitosti**

Učinkovitost črpalke je razmerje med dostavljeno energijo črpalke in energijo, ki jo črpalka pretvori v koristno moč (Boulos et al., 2006). Krivulja učinkovitosti je funkcija učinkovitosti črpalke in pretoka. Krivulja učinkovitosti se uporablja za določanje učinkovitosti črpalke, če je ne podamo za določeno črpalno, pa program EPANET uporabi univerzalno učinkovitost črpalke.

### **Krivulja prostornine vodohrana**

Krivulja prostornine vodohrana opisuje, kako se volumen vodohrana spreminja glede na nivo višine gladine vode v vodohranu. Uporablja se v primerih, ko se prerez vodohrana spreminja z višino gladine vode v vodohranu. Pri izdelavi krivulje je potrebno upoštevati minimalno in maksimalno višino gladine vode, med katerima deluje vodohran.

### **Krivulja tlačne izgube**

Krivulja tlačne izgube opisuje padec tlačne črte na splošno namenskem ventilu (GPV). Opisuje razmerje med tlačno črto in pretokom. Uporablja se pri modeliranju posebnih ventilov in turbin.

#### **3.2.1.8 Časovni vzorci**

Časovni vzorec prikazuje, kako se določena količina oziroma vrednost spreminja s časom. Količina se spreminja tako, da osnovno vrednost vhodne spremenljivke v posameznem časovnem intervalu pomnožimo z določenim množiteljem. Časovni intervali so enako dolgi in imajo znotraj intervala konstantno vrednost. Časovni vzorci se uporabijo lahko pri porabah v vozlišču, gladinah vode v rezervoarju, urnikih delovanja črpalk in vhodnih podatkih parametrov kakovosti vode na izviru.

### 3.2.1.9 Pravila

Pravila so ukazni stavki, s katerimi se določijo povezave med izbranimi gradniki v vodovodnem omrežju in njihovimi stanji. Te povezave in stanja določajo, kako bo omrežje delovalo skozi čas. Delimo jih v dve kategoriji:

- enostavna pravila,
- kontrolna pravila.

#### Enostavna pravila

Uporabljajo se za spremembo stanja ali nastavitve povezave med gradniki glede na:

- nivo gladine vode v vodohranu,
- tlak v vozlišču,
- čas trajanja simulacije,
- čas v dnevu.

Enostavna pravila se lahko zapiše v eni izmed treh možnih oblik<sup>8</sup>:

**LINK x status IF NODE y ABOVE/BELOW z**

**LINK x status AT TIME t**

**LINK x status AT CLOCKTIME c AM/PM**

kjer je:

**LINK** linijski element v sistemu,

**Status** odprt ali zaprt, nastavitev hitrosti delovanja črpalke, nastavitev kontrolnega ventila,

**x** ID oznaka linijskega elementa,

**y** ID oznaka točkovnega elementa,

**z** tlak v vozlišču ali višina vodne gladine v vodohranu,

**t** čas od pričetka simulacije (ura ali ura in minute),

**c** čas v dnevu (24 ur).

Pravila morajo biti zapisana v program EPANET v nespremenjeni obliki kot zgoraj. Če te oblike ne ustrezajo za izdelavo modela, je potrebno uporabiti kontrolna pravila, ki so podana v nadaljevanju.

Primer enostavnega pravila<sup>9</sup>:

**LINK pump4 CLOSED IF NODE V3 ABOVE 3.3**

Pomen: Črpalka pump4 se zapre, ko nivo gladine vode v vodohranu V3 preseže 3,3 metra.

<sup>8</sup> Podano v angleškem jeziku, kot se uporablja v program EPANET

<sup>9</sup> Podano v angleškem jeziku, kot se uporablja v programu EPANET.

### Kontrolna pravila

S kontrolnimi pravili se lahko zapiše stanja in povezave med gradniki hidravličnega modela, glede na kombinacijo pogojev v vodovodnem sistemu. To storimo s serijo izjav v obliki:

**RULE** ID oznaka pravila

**IF** stanje 1

**AND** stanje 2

**OR** stanje 3

**AND** stanje 4

itd.

**THEN** ukrep 1

**AND** ukrep 2

itd.

**ELSE** ukrep 3

**AND** ukrep 4

**PRIORITY** vrednost

kjer je:

ID oznaka pravila            edinstvena oznaka pravila

stanje                        stavek stanja,

ukrep                        stavek ukrepa

vrednost                    z vrednostjo napišemo, katero pravilo je prednostno (številka od 1 do 5)

Stavek, s katerim definiramo stanje in ukrep, ima obliko:

**OBJECT ID ATTRIBUTE RELATION VALUE**

kjer je:

**OBJECT**            omrežni gradnik,

**ID**                    edinstvena oznaka omrežnega gradnika,

**ATTRIBUTE**        značilnost gradnika,

**RELATION**        stanje gradnika, ki je pogoj za ukrep,

**VALUE**            vrednost značilnosti gradnika, ki je pogoj za ukrep.

Primer:

Preglednica 18: Primer uporabe kontrolnega pravila

<b>RULE 1</b> IF TANK V2 LEVEL ABOVE 3.4 THEN PUMP P1 STATUS IS CLOSED AND PIPE 38 STATUS IS OPEN	<b>Pomen:</b> Ko je nivo gladine vodohrana V2 nad višino 3.4, se črpalka P1 zapre in cev 38 odpre
--	--

Za omrežni gradnik (**OBJECT**) se v stavek lahko vstavi (Rossman, 2000):

Preglednica 19: Gradniki, ki jih lahko vstavimo v stavek kontrol na osnovi pravil

NODE (vozlišče)	LINK (člen)	SYSTEM (sistem)
JUNCTION (vozlišče)	PIPE (cev)	
RESERVOIR (rezervoar)	PUMP (črpalka)	
TANK (vodohran)	VALVE (ventil)	

Kadar se v stavku uporabi SYSTEM (sistem) se ID izpusti.

Za značilnost gradnika (**ATTRIBUTE**) se v stavek lahko vstavi (Rossman, 2000):

Za NODE (vozlišče):

- DEMAND (poraba)
- HEAD (višina tlačne črte)
- PRESSURE (tlak)

Za TANK (vodohran):

- LEVEL (nivo vodohrana)
- FILLTIME (čas v urah, v katerem se napolni vodohran)
- DRAINTIME (čas v urah, v katerem se izprazni vodohran)

Za LINK (člen):

- FLOW (pretok)
- STATUS (OPEN-odprt, CLOSED-zaprt, ACTIVE-delujoč)
- SETTING (nastavitev hitrosti črpalke ali nastavitev ventila)

Za SYSTEM (sistem):

- DEMAND (celotna zahteva sistema)
- TIME (ure od začetka simulacije, napisane kot decimalno število ali pa v obliki ure-minute)
- CLOCKTIME (24 urni čas z AM za dopoldne ali PM za popoldne)

Za operatorje razmerij (**RELATION**) se uporabi:

- = IS (je enako)
- <> NOT (ni enako)
- < BELOW (manjše od)
- > ABOVE (večje od)
- <= manjše ali enako
- >= večje ali enako

Stavek stanja se napiše v obliki:

**Object id STATUS/SETTING IS value**



kjer je:

<b>Object</b>	LINK (člen), PIPE (cev), PUMP (črpalka) ali VALVE (ventil)
<b>Id</b>	edinstvena oznaka omrežnega gradnika
<b>Value</b>	stanje izbranega gradnika, ki je lahko OPEN (odprto), CLOSED (zaprto), nastavitvev hitrosti črpalke ali nastavitvev ventila.

Primer:

LINK 38 STATUS IS CLOSED

Povezava 38 je zaprta.

### 3.2.2 Sistem enačb za stalni enakomerni tok

Pri izdelavi hidravlične analize modela obstajata dve vrsti neznank, in sicer tlačne višine v točkovnih in pretoki v linijskih elementih. Za izračun tlakov v vozliščih in pretokov v ceveh je potrebno z iteracijskim procesom rešiti sistem enačb, ki so zaradi energijskih izgub nelinearne. V vozliščih se upošteva zakon o ohranitvi mase, v ceveh pa zakon o ohranitvi energije. Za izračun neznank so razvite štiri metode reševanja (Boulos et al., 2006).

Najstarejša med njim je Hardy Cross metoda, ki je bila razvita za ročno računanje hidravličnih neznank v vodovodnem sistemu. Za vsako zanko se posebej napiše eno energijsko enačbo, v kateri se začetne vrednosti pretokov predvidi in izračuna skupen popravek  $\Delta Q$ . Popravke se odšteje od začetnih pretokov in rezultat porabi za novo iteracijo. Te iteracije pa se ponavljajo, dokler popravki ne dosežejo vrednost nič oziroma se ji ne približajo na predhodno določeno vrednost (tj. tolerančna meja) (Boulos et al., 2006).

Sledi metoda simultane reševanja enačb zanke, pri kateri sta Epp in Fowler razvila simultano računanje popravkov za vse zanke hkrati. Obe metodi spadata pod enačbe zank (Boulos et al., 2006).

Pri metodi enačbe vozlišč-zank, Wood in Charles namesto reševanja popravkov pretokov v zanki, direktno rešujeta nove pretoke cevi. To dosežeta z združitvijo energijskih enačb zank in kontinuitetnih enačb za vozlišča. Metoda enačb vozlišč iz enačbe za energijske izgube cevi izpostavi člen pretoka  $Q$  in ga vstavi v kontinuitetno enačbo vozlišč. S to metodo se rešuje tlake v vozliščih. Program EPANET uporablja za računanje neznank metodo enačb cevi, ki je podrobneje opisana v naslednjem poglavju (Boulos et al., 2006).

#### 3.2.2.1 Enačba cevi

Pri tej metodi sta Todini in Pilati združila enačbe cevi (energijske enačbe) z enačbami vozlišč (kontinuitetne enačbe). Za vsako neznanke je določena ena enačba. Neznanke so pretoki v ceveh in

tlaki v vozliščih. Za vsako cev je napisana enačba energijske bilance cevi, ki skupaj tvorijo nabor *ncevi* enačb. Enako je z vozlišči, le da so tu za vsako vozlišče napisane kontinuitetne enačbe, ki skupaj tvorijo nabor *nvozišč* enačb (Boulos et al., 2006).

Enačba za vozlišče (Boulos et al., 2006):

$$F_{Ql}: Q_i \pm Q_j - q_j = 0 \quad (17)$$

kjer je:

- $F_{Ql}$  kontinuitetna enačba l-te cevi,
- $Q_i$  pretok gorvodnega vozlišča i,
- $Q_j$  pretok dolvodnega vozlišča j,
- $q_j$  poraba v vozlišču j.

Enačba za cev (Boulos et al., 2006):

$$F_{Pl}: K_l [Q_l]^n \pm H_j \pm H_i = 0 \quad (18)$$

kjer je:

- $F_{Pl}$  energijska enačba l-te cevi,
- $H_i$  višina gorvodnega vozlišča i,
- $H_j$  višina dolvodnega vozlišča j,
- $K_l [Q_l]^n$  energijska izguba med vozliščema  $H_i$  in  $H_j$ .

Člen  $[Q_l]^n$  pomeni absolutno vrednost pretoka v cevi  $l$ , na  $n$ -to potenco (Boulos et al., 2006). Predznak pretoka se upošteva pri enačbi energijske izgube. Predznak pretoka se prav tako upošteva pri enačbah vozlišč. Negativni pretoki pomenijo nasprotno smer pretoka od začetnega predvidevanja.

Obe enačbi se z uporabo Newton-Raphsonove metode pretvori v izraza (Boulos et al., 2006):

$$\sum_{l \in J_{in}, J_{out}} \left( \frac{\partial F_Q}{\partial Q_l} \Big|_{\Delta Q=0} \Delta Q^{(m)} \right) = -F_Q(Q^{(m-1)}) \quad (19)$$

$$\frac{\partial F_P}{\partial H_i} \Big|_{\Delta H=0} \Delta H_i^{(m)} + \frac{\partial F_P}{\partial H_j} \Big|_{\Delta H=0} \Delta H_j^{(m)} + \frac{\partial F_P}{\partial Q_l} \Big|_{\Delta Q=0} \Delta Q_l^{(m)} = -F_P(Q^{(m-1)}, H^{(m-1)}) \quad (20)$$

Kjer so odvodi enačbe vozlišč (enačba 19) na levi strani (+1) za iztočno cev v vozlišče, (-1) za vtočno cev v vozlišče in (0) za cevi, ki niso priklopljene na vozlišče. Desna stran enačbe vozlišč je trenutna ocena pretoka, ki se jo pri računanju zamenja z  $dq$ .

Odvodi enačbe cevi (enačba 20) na levi strani so (+1) za dolvodno vozlišče, (-1) za gorvodno vozlišče in (0) za vozlišča, ki nimajo stika s cevjo. Desna stran enačbe cevi je trenutna vrednost pretoka  $Q^{(m-1)}$  in trenutna tlačna višina  $H^{(m-1)}$ , ki se pri računanju zamenja z  $dE$ .

Te enačbe se lahko reši za spremembe tlakov vozlišč in spremembe pretokov. Nove iteracijske vrednosti se lahko izračuna z (Boulos et al., 2006):

$$H^{(m)} = H^{(m-1)} + \Delta H^{(m)} \quad (21)$$

$$Q^{(m)} = Q^{(m-1)} + \Delta Q^{(m)} \quad (22)$$

Todini in Pilati posplošita to formulacijo v obliko matrike. Enačbe o ohranitvi energije in mase se lahko napiše v matrični obliki kot (Boulos et al., 2006):

$$F_P(Q, H) = A_{11}Q^{(m)} + A_{12}H^{(m)} = \mathbf{0} \quad (23)$$

$$F_Q(Q, H) = A_{21}Q^{(m)} - q = \mathbf{0} \quad (24)$$

Matriko  $A_{11}$  se formira z diagonalo členov, ki so odvodi enačb cevi z obliko  $K[Q]^{n-1}$ , ostali členi pa so enaki nič. Matrika  $A_{21}$  je sestavljena iz stolpcev, kjer so odvodi enačb cevi označeni z (+1) za dolvodno vozlišče, (-1) za gorvodno vozlišče in 0 za vozlišča, ki nimajo stika s cevjo. Vrstice v matriki so odvodi enačb vozlišč označeni z (+1) za iztočno cev v vozlišče, (-1) za vtočno cev v vozlišče in (0) za cevi, ki niso priklopljene na vozlišče.  $A_{12}$  je transponirana matrika  $A_{21}$  (Boulos et al., 2006).

Sistem enačb se rešuje z upoštevanjem Newtonove rešitvene sheme (Boulos et al., 2006):

$$dF_P(Q, H) = nA_{11}\Delta Q^{(m)} + A_{12}\Delta H^{(m)} = -dE \quad (25)$$

$$dF_Q(Q, H) = A_{21}\Delta Q^{(m)} = -dq \quad (26)$$

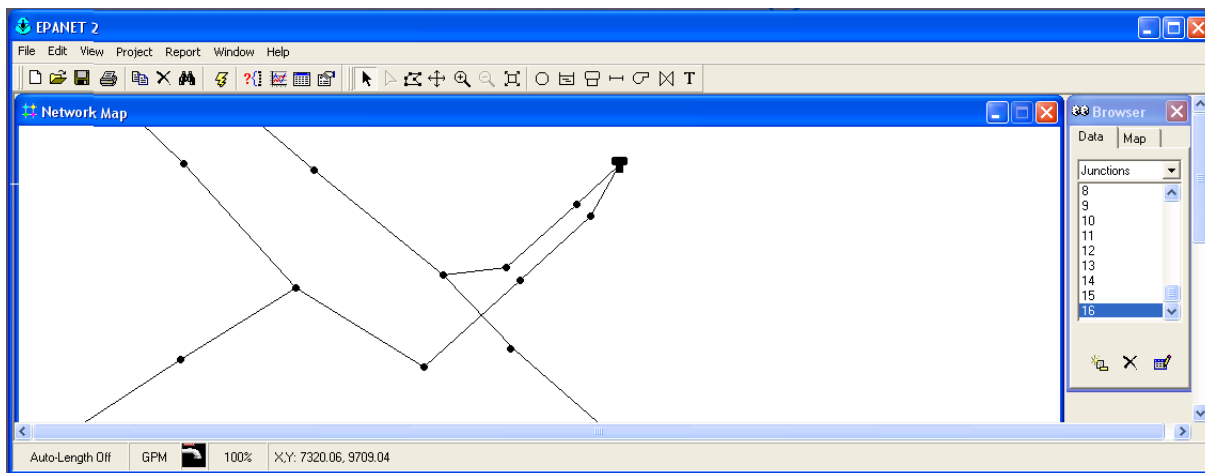
Na desni strani ( $-dE$ ) in ( $-dq$ ) predstavljata ostanke enačb pri iteraciji  $m - 1$ , cilj pa je, da ti ostanke dosežejo vrednost 0 oziroma se ji približajo (Boulos et al., 2006). Na koncu postopka se posodobi tlake v vozliščih in pretoke v ceveh, ter preveri če ustrezajo kriterijem za končanje. Če ne ustrezajo se postopek iteracije ponavlja.

### 3.3 Računalniški programi za izdelavo hidravličnega modela

V tem poglavju so opisani programi EPANET, QGIS in vtičnik »qgis-epanet«.

#### 3.3.1 EPANET

Program EPANET je raziskovalno orodje, s katerim se izvaja statične simulacije in simulacije z razširjeno časovno simulacijo za izračun hidravličnih neznank v vodovodnem sistemu. Uporablja se ga tudi za izvajanje simulacij kakovosti vode v vodovodnem sistemu. Ta prosto dostopni, odprtokodni računalniški program je leta 1993 razvila Ameriška agencija za zaščito okolja (ang. U.S. Environmental Protection Agency). EPANET je zelo zanesljiv in preizkušen računalniški program, njegova pomanjklivost pa je, da ima zastarel grafični vmesnik in je brez integracije v programska okolja geografskih informacijskih sistemov (GIS). Zato se pri izdelavi hidravličnega modela večinoma uporabljajo druga povezovalna programska orodja, ki omogočajo vzpostavitev hidravličnega modela v GIS okolju in zapis hidravličnega modela v obliki EPANET-ove vhodne datoteke. Eden izmed razširjenih GIS programov je QGIS.



Slika 7: delovno okolje v programu EPANET

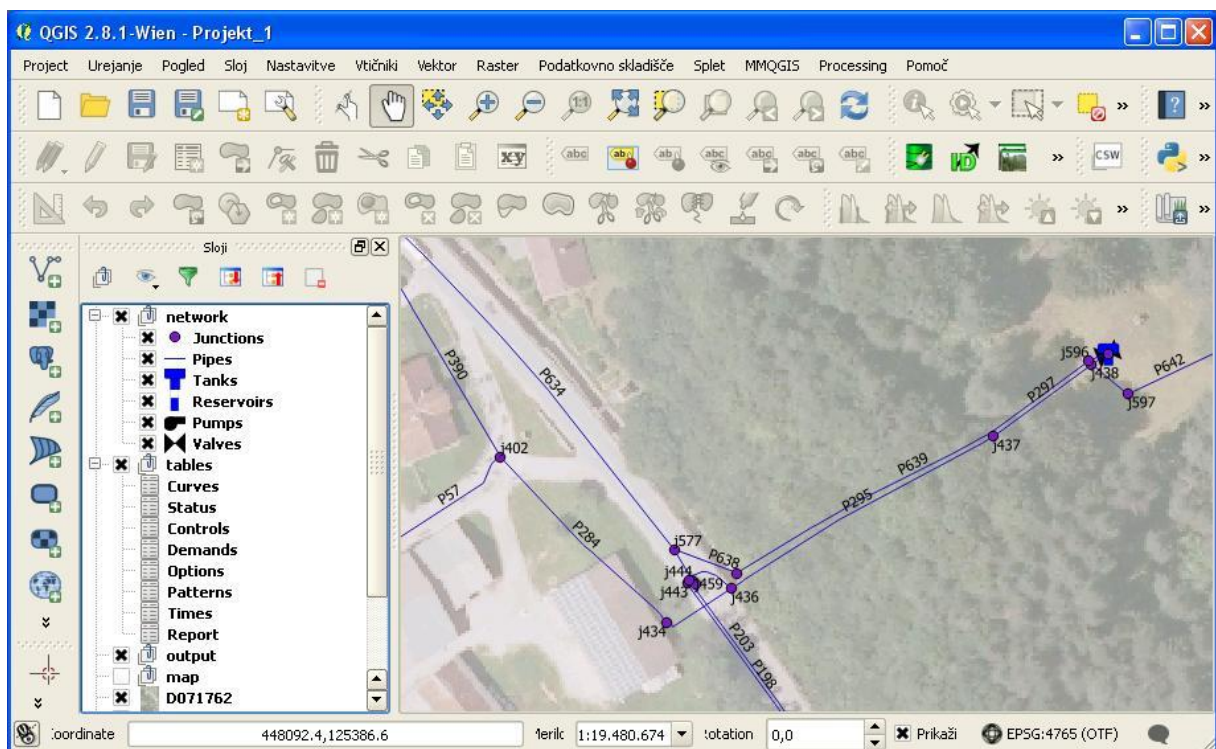
#### 3.3.2 Program QGIS

Program QGIS je prosto dostopni odprtokodni računalniški geografsko informacijski sistem. Izdan je bil pod licenco GNU GPL (General Public License), kar pomeni, da je omogočen vpogled v izvorno kodo in njena sprememba. Za razvoj programa so uporabili platformo Qt in programski jezik C++, ter

s tem dosegli, da je QGIS-ov grafični uporabniški vmesnik (GUI) preprost in uporabniku prijazen (QGIS, 2015).

Podatki v GIS okolju so lahko v vektorski ali rastrski obliki. Rastrski podatki so slikovni format zapisa značilnosti podatkov, kjer je slika sestavljena iz mreže enakih celic (ang. pixel). V QGIS-u imajo celice pravokotno obliko, locirane pa so z robom celice rastrskega sloja s koordinatama x/y. Vektorski podatki pa vsebujejo dva formata zapisa. Geometrijski podatki o lokacijah elementov, ki so lahko točka, črta ali poligon, so definirani s koordinatama x/y in shranjeni posamezno v shape formatu s končnico .shp. Njihove značilnosti pa so shranjene v atributnem delu, katerega datoteka ima končnico .dbf. Posamezno shranjeni elementi v GIS-u tvorijo projekt sestavljen iz slojev, kar močno olajša delo z modelom in omogoča neomejeno posodabljanje obstoječih modelov. Poleg datotečne strukture shranjevanja podatkov, pa se v profesionalnih aplikacijah večinoma uporabljajo različne podatkovne baze (QGIS, 2015).

QGIS poleg osnovnih funkcij omogoča tudi programiranje in izdelavo lastnih programov s programskim jezikom C++ in Python, ali pa namestitev različnih vtičnikov (ang. plugins), ki močno razširijo uporabnost programa. Vtičnike si lahko dodatno naložimo v program QGIS, nekateri pa so ob namestitvi programa že nameščeni, vendar jih je potrebno aktivirati v meniju pod oznako Plugins. Eden izmed vtičnikov, ki sem jih uporabil pri tem seminarju je tudi »qgis-epanet«, ki ga je razvilo podjetje Oslandia, ki se ukvarja z razvijanjem odprtokodnih GIS orodij (Oslandia. 2014.).

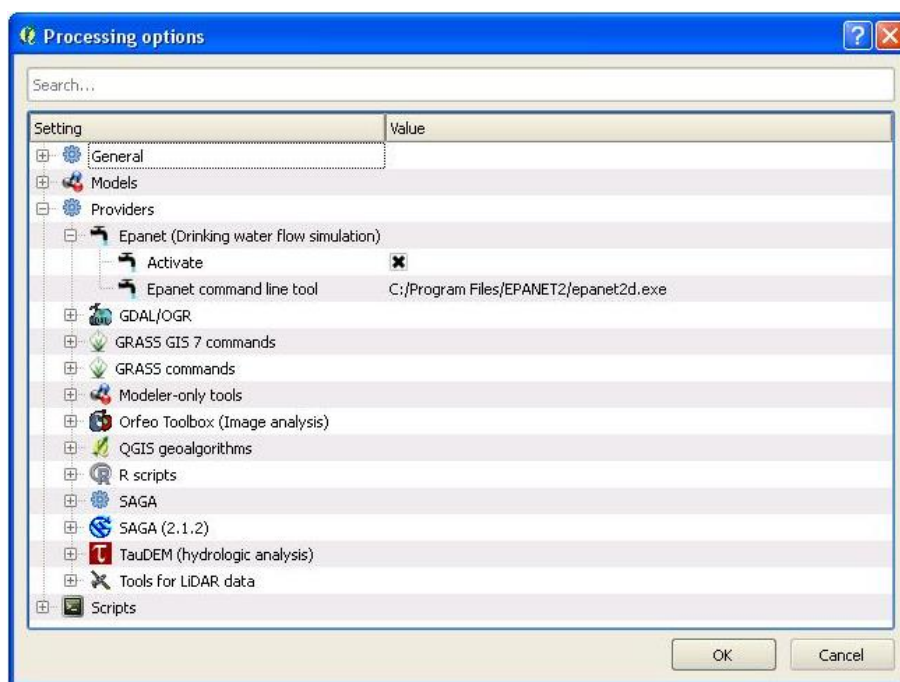


Slika 8: Delovno okolje v programu QGIS

### 3.3.3 Vtičnik »qgis-epanet«

Vtičnik »qgis-epanet« je prosto dostopen vtičnik proizvajalca Oslandia. Vtičnik omogoča zapis EPANET-ove vhodne datoteke iz podatkov, ki so zbrani v QGIS okolju. Z zapisom te vhodne datoteke je vtičniku omogočeno, da izvede hidravlično simulacijo izven EPANET-ovega programskega okolja. To je možno, ker EPANET omogoča zagon simulacije tako, da se vanj podatke vnese samo v tekstovni obliki, ki imajo končnico .inp. Po končani simulaciji v programu EPANET, vtičnik izvozi rezultate iz EPANET-a v QGIS v obliki .dbf datotek (Kozelj et al., 2015).

Vtičnik je na voljo na strani GitHub (Oslandia, 2015), nahaja pa se tudi v programu QGIS. Vtičnik sicer ni na voljo v redni bazi vtičnikov. Za njegovo namestitev, je potrebno najprej v pogovornem oknu Vtičniki (ang. Plugins) pri nastavitvah obkljukati Prikaži tudi poskusne vtičnike, nakar se ga poišče med nenameščenimi vtičniki in namesti v program QGIS. Poleg tega je potrebno v pogovornem oknu Vtičniki obkljukati tudi vtičnik Processing. Nato se v pogovornem oknu Nastavitve paketnih obdelav (ang. Processing options) aktivira vtičnik in nastavi povezavo QGIS-a s programom EPANET (epanet2d.exe) (Oslandia, 2014).



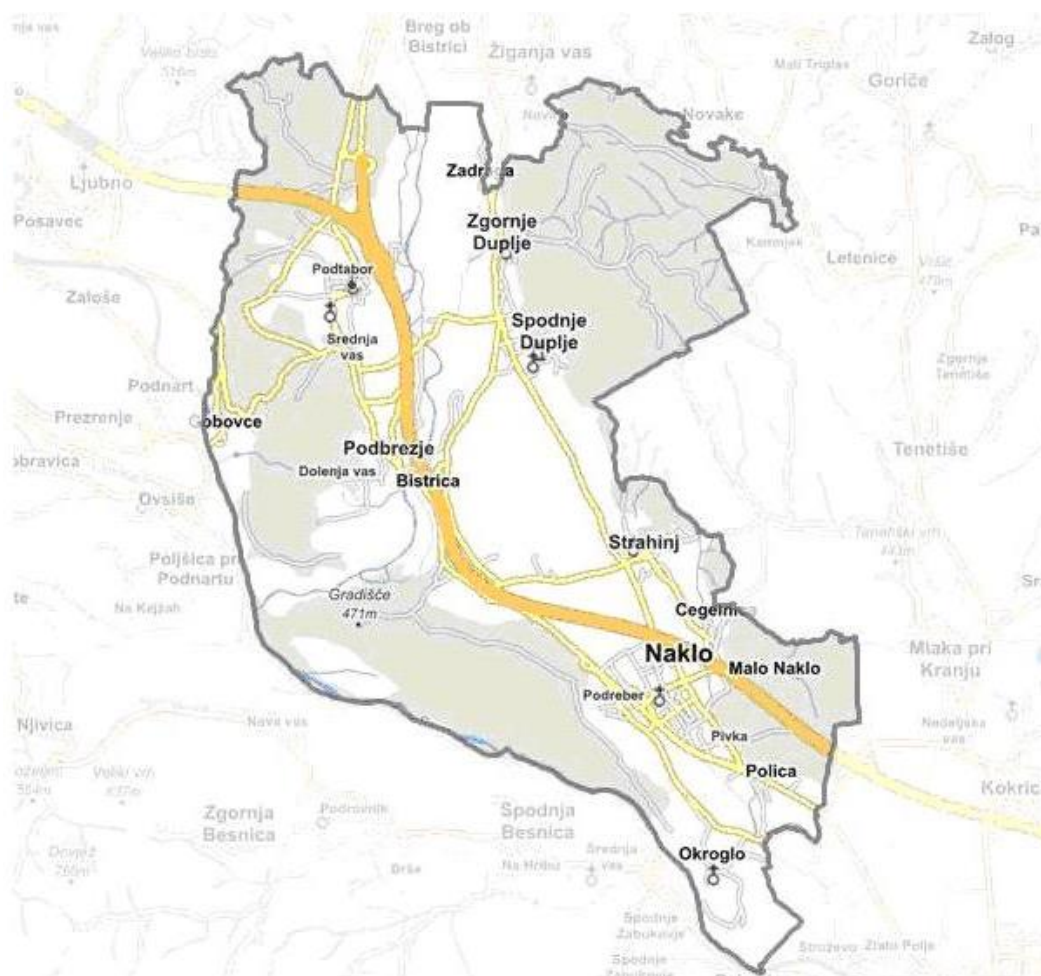
Slika 9: Nastavitev povezave programa EPANET s programom QGIS

Vtičnik se uporablja za zagon simulacije. Najprej je potrebno odpreti njegovo pogovorno okno in v ustrezna polja vnesti .shp sloje in .dbf sloje. Nato se zažene simulacijo. Kot rezultat uspešne simulacije program v QGIS-u, v oknu s sloji izpiše štiri tabele. V dveh tabelah so rezultati za točkovne elemente, v drugih dveh pa za linijske elemente.

## 4 HIDRAVLIČNI MODEL VODOVODA NAKLO

### 4.1 Občina Naklo

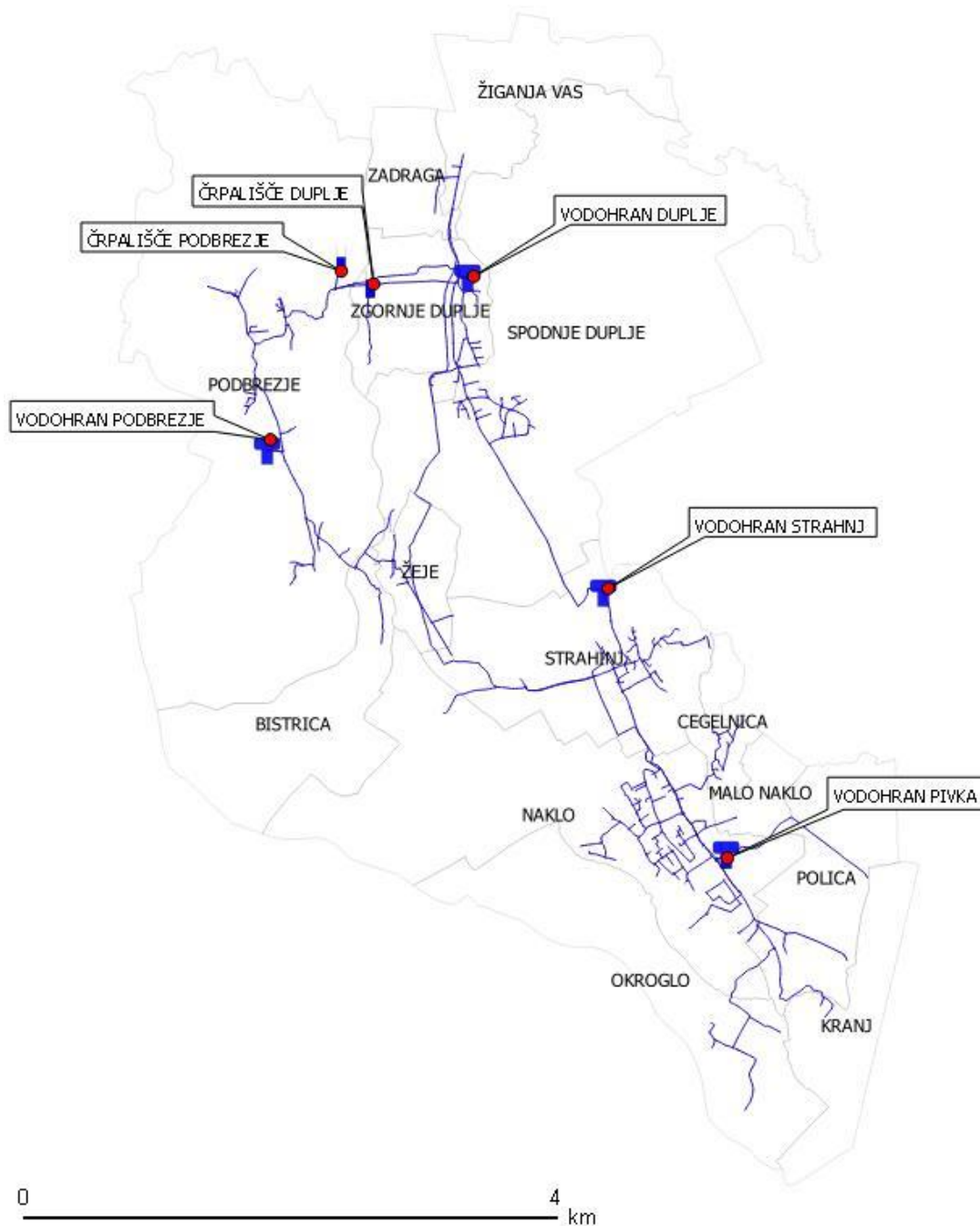
Občina Naklo se nahaja na Kranjsko-Sorškem Polju, severozahodno od Kranja. Površina občine meri 28,3 kvadratnih kilometrov, na katerih živi 5020 ljudi v trinajstih naseljih. Večina stavb leži na ravnem terenu, ki se spušča od severozahoda proti jugovzhodu. Na severu občine imajo stavbe približno nadmorsko višino 498 metrov, na jugu pa 383 metrov.



Slika 10: Občina Naklo  
(PISO, 2015)

### 4.2 Vodovodni sistem Naklo

Vodovod Naklo je vodovodni sistem, ki ga upravlja Javno podjetje Komunala Kranj d.o.o.. Ima približno 1470 odjemnih mest v trinajstih naseljih. Zgradba omrežja ima vejičasto in mrežasto obliko. Naselja Podbrezje, Žeje, Bistrica, Zdravica, Žiganja vas, Okroglo, Polica in Malo Naklo imajo vejičasto omrežje. Zgornje Duplje, Spodnje Duplje, Strahinj, Cegelnica in Naklo pa imajo v osnovi mrežasto omrežje s posameznimi deli, ki imajo vejičasto obliko (Komunala Kranj, 2015a).



Slika 11: Vodovodni sistem Naklo

(vir: Komunala Kranj 2015B)

V Komunali Kranj delijo vodovodni sistem Naklo na magistralno omrežje, primarno omrežje, sekundarno omrežje, interno omrežje, priključno omrežje in priključni vod. Magistralno omrežje pa ni v uporabi. Kategorije omrežja vodovoda Naklo in njeni deleži v omrežju so navedeni v preglednici 20. Kot je razvidno predstavljajo največji delež kategorij omrežja v vodovodnem sistemu Naklo primarno omrežje, sekundarno omrežje, ter priključni vodi, ki skupaj tvorijo 88 procentni delež v omrežju.



Preglednica 20: Kategorije omrežja vodovoda Naklo

Kategorija omrežja	Število cevi	Premer cevi [mm]	Skupna dolžina cevi kategorije [m]	Delež posamezne kategorije v omrežju [%]
Magistralno	60	80-200	577,0	0,73
Primarno	1821	50-200	20276,7	25,63
Sekundarno	3797	32-200	29208,4	36,93
Interno	854	15-80	3635,7	4,60
Priključno	409	20-150	5249,1	6,64
Priključni vod	4229	15-150	20079,3	25,39
Brez podatka	13	80-125	72,8	0,09
<b>Skupaj</b>	<b>11183</b>	<b>15-200</b>	<b>79099,0</b>	<b>100</b>

V vodovodni sistem Naklo so vgrajene cevi različnih materialov, in sicer azbestno cementne cevi (AC), cevi iz nodularne litine (NL), litoželezne cevi (LTŽ), cevi iz polietilena visoke gostote (PEHD), cevi iz pocinkanega železa (POC) in cevi iz polivinil klorida (PVC). Kot je razvidno iz preglednice 21 največji delež cevi v omrežju predstavljajo cevi iz nodularne litine (NL) in cevi iz polietilena visoke gostote (PEHD), in sicer skupaj 75 procentov celotnega deleža.

Preglednica 21: Cevi v vodovodnem sistemu Naklo

Cevi	Starost cevi	Število cevi	Premer cevi [mm]	Skupna dolžina [m]	Delež cevi v omrežju [%]
AC	1960-1968	527	80-125	9250,0	11,69
NL	1996-2011	4010	80-200	31904,9	40,34
LTŽ	1960-2011	265	50-200	149,8	0,19
PEHD	1960-2011	5099	20-125	27233,2	34,43
POC	1961-2008	156	15-50	1398,0	1,77
PVC	1978-1991	166	80-200	3663,3	4,63
NEZNANE	1960-2015	959	[-]	5499,1	6,95

Vodovodni sistem Naklo se oskrbuje z vodo iz treh virov. Dva vira sta črpališči Duplje in Podbrezje, tretji vir pa je vodovod Kranj, ki polni vodohran Pivka. Črpališče Duplje ima dve vrtini, iz katerih s pomočjo dveh črpalk črpa vodo v vodohran Duplje, črpališče Podbrezje pa ima eno vrtino, iz katere ravno tako s pomočjo črpalke črpa vodo v vodohran Podbrezje. V preglednici 22 so navedena vsa tri črpališča s pripadajočim tipom črpalke.

Preglednica 22: Črpalke vodovoda Naklo

Črpališče	Število črpalk	Znamka črpalke	Model črpalke	Moč črpalke [kW]
Duplje 1	1	Grundfos	SP 46-14	22
Duplje 2	1	Grundfos	SP 46-14	22
Podbrezje	1	Grundfos	SP 8A-25	4

Shranjevalne kapacitete vodovoda Naklo predstavljajo štirje vodohrani, ki so razporejeni po omrežju. V preglednici 23 je razvidno da imajo z izjemo vodohrana Pivka vsi vodohrani po dve vodni celici.

Preglednica 23: Vodohrani vodovoda Naklo

Vodohran	Število vodnih celic	Volumen vodne celice [m <sup>3</sup> ]	Celotna kapaciteta [m <sup>3</sup> ]
Duplje	2	50	100
Podbrezje	2	40	80
Strahinj	2	40	80
Pivka	1	200	200

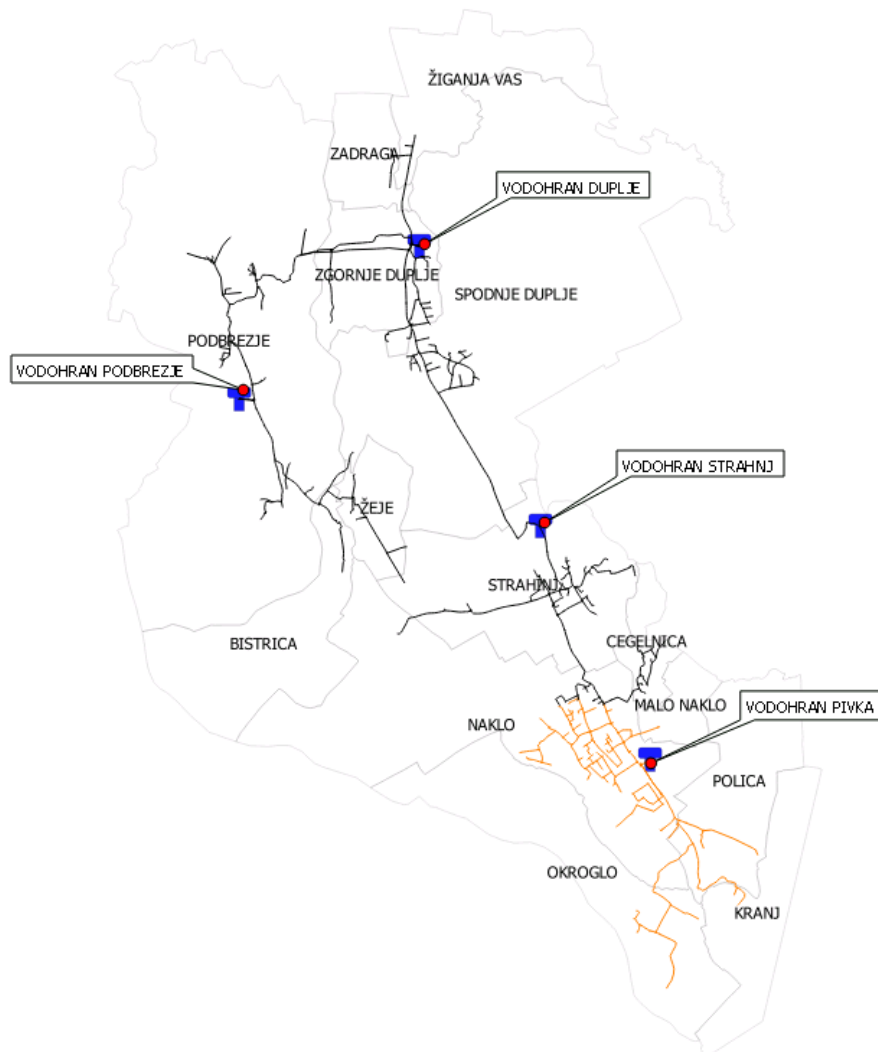
### 4.3 Hidravlični model Naklo

V tem poglavju je opisan postopek izdelave hidravličnega modela Naklo. Model je bil izdelan v programu QGIS, kjer sem uredil vse podatke. S pomočjo vtičnika »qgis-epanet« sem nato urejene podatke prenesel v program EPANET, kjer se je izvedla hidravlična simulacija. Zato je bilo potrebno gradnikom v modelu določiti lastnosti po zahtevah programa EPANET.

Vodovodni sistem Naklo je ločen na dva dela, ki sta sicer povezana, vendar je med njima povezava zaprta, tako da ne pride do izmenjave vode. Celotno omrežje sem najprej uredil kot enoten hidravlični model, nato pa sem ga ločil tako, da sem v .dbf sloju Status v stolpcu nastavitve (setting) zaprl cevi, ki povezujejo dva dela in tako dobil dva ločena modela. Nato sem za vsak model posebej v .dbf sloju Vzorci (ang. Patterns) določil množitelj spreminjanja gospodinjske porabe in množitelj spreminjanja vodnih izgub.

Prvi ločen del vodovodnega sistema sem poimenoval model Duplje. Ta model se oskrbuje z vodo iz črpališča Duplje in iz črpališča Podbrezje, slednji se uporablja le kot rezervni vir in ga zato nisem uporabil v svojem modelu. Črpališče Duplje polni vodohran Duplje, ta pa nato oskrbuje z vodo vodohrana Podbrezje in Strahinj. Naselja, ki se oskrbujejo iz vodohrana Duplje so Žiganja vas, Zadraga, Spodnje Duplje, Zgornje Duplje, in Podbrezje. Vodohran Podbrezje oskrbuje z vodo naselji Žeje in Bistrice. Vodohran Strahinj pa oskrbuje z vodo naselji Strahinj in Cegelnico.

Drugi del vodovodnega sistema Naklo sem poimenoval model Pivka. Ta model se oskrbuje z vodo iz vodovodnega sistema Kranj, ki zagotavlja stalni tlačni dotok vode v vodohran Pivka. Iz vodohrana Pivka se nato z vodo oskrbujejo naselja Malo Naklo, Naklo, Okroglo in Polica.



Slika 12: Ločena dela vodovodnega sistema<sup>10</sup>

#### 4.3.1 Pridobljeni podatki in obdelava

Prvi podatek, ki sem ga prejel iz Komunale Kranj je bila datoteka situacije vodovodnega sistema Naklo, ki je bila v AutoCAD formatu s končnico .dwg. Za pregled prejete datoteke sem uporabil brezplačen pregledovalnik DWG Trueview proizvajalca Autodesk. Načrt je vseboval cevi in ostale objekte na vodovodu. Ker program QGIS ne podpira datotek .dwg sem na spletu našel konverter Teigha proizvajalca ODA (Open Design Alliance. 2015), ki spremeni datoteko .dwg v datoteko .dxf. Datoteka .dxf v programu QGIS obdrži attribute ustvarjene v AutoCAD-u in jo je mogoče pretvoriti v datoteko .shp, vendar se s tem izgubi attribute AutoCAD-a. Zato sem v datoteki .dxf s pomočjo selekcije določil cevi glede na material in za vsak tip cevi naredil svojo .shp datoteko.

<sup>10</sup> Črne cevi predstavljajo model Duplje, oranžne pa model Pivka.

Drugi prejeti podatek iz Komunale Kranj je bila Excel-ova datoteka prodane vode z x/y koordinatami odjemnih mest. Datoteka je vsebovala letno količino prodane vode v kubičnih metrih za obdobje 2010-2014. Na podlagi tega sem določil povprečno letno porabo za vsako odjemno mesto.

Med odjemnimi mesti so bila tudi takšna, ki niso imela x/y koordinat, imela pa so hišni naslov in sem jim na podlagi tega s pomočjo Atlasa Okolja na strani agencije ARSO (Agencija Republike Slovenije za Okolje) določil koordinate. Nekaj odjemnih mest, in sicer 36, pa ni imelo niti x/y koordinat, niti naslova, imela pa so številko odjemnega mesta in ime naselja. Prodano vodo teh odjemnih mest sem razporedil med odjemna mesta po pripadajočih naseljih. Na koncu sem korigirano povprečno letno porabo v kubičnih metrih pretvoril v porabo litri na sekundo. Urejene podatke sem nato shranil kot .csv datoteko, ki jo je mogoče odpreti v QGIS-u in jo nato shraniti kot .shp datoteko.

Tretji podatki so bili pridobljeni od Geodetske Uprave Republike Slovenije. Za določitev višin v vozliščih smo zaprosili za digitalni model višin. Datoteka vsebuje 12 kart v merilu 1:5000 z .xyz končnico. Vsaka karta je sestavljena iz mreže točk, ki določajo nadmorsko višino terena. Razdalja med točkami meri 5 metrov. Z vtičnikom za interpolacijo v QGIS okolju sem nato za vsako karto posebej izvedel triangulacijo z linearno interpolacijo. Rezultat so rastrske karte z višinami, na katerih leži velika večina vozlišč. Z uporabo vtičnika »Point sampling tool«, sem nato vozliščem določil nadmorsko višino. Ker se karte med seboj ne stikajo, je nekaj vozlišč ostalo izven kart in sem jim moral ročno vnesti nadmorske višine.

#### **4.3.2 Določevanje porabe v vodovodnem sistemu Naklo**

Za izdelavo hidravličnega modela je potrebno določiti povprečno porabo trenutnega stanja. Določimo lahko več različnih vrst porab. Za izdelavo mojega modela sem določil samo gospodinjsko porabo, saj v občini Naklo prevladujejo stanovanjski objekti, gospodarskih dejavnosti pa ni toliko, da bi bilo potrebno ločeno določiti njihovo porabo. Porabo sem ločil na porabo modela Duplje in porabo modela Pivka.

Po določitvi povprečne letne porabe za vsako odjemno mesto na način, ki je opisan v poglavju 4.3.1 Pridobljeni podatki in obdelava, sem za vsako odjemno mesto določil porabo v litrih na sekundo. Od komunale Kranj sem prejel podatke o načrpani vodi iz črpališča Duplje za leto 2014, podatke o načrpani vodi iz črpališča Podbrezje za leto 2014, podatke o spreminjanju višin gladin vodohranov iz meritev SCADA za leto 2014, ter podatke o pretokih vodohrana Pivka za leto 2014. Vsi podatki so bili podani za vse dni v letu, in sicer za vsakih petnajst minut preko celega dneva.

Nato sem določil povprečen delovni dan v letu in sicer sredo 09.04.2014. Pri izbiri dneva sem moral biti pazljiv, da ni bilo slučajno na tisti dan kakšnih izrednih dogodkov. Ravno tako sem moral

preveriti, da nista na tisti dan delovali črpališči Duplje in Podbrezje hkrati. Iz poslanih podatkov o črpališčih je bilo namreč razvidno, da na vsake toliko (približno dvakrat do trikrat na mesec) zaženejo tudi črpališče Podbrezje. Pomladanski mesec sem izbral zato, ker obstajajo tudi letna nihanja vode. V hladnejših zimskih mesecih se poraba vode zmanjša, v toplejših poletnih pa poveča.

Na podlagi pridobljenih podatkov sem se odločil za simulacijo s časovnim korakom petnajst minut. Izdelal sem masno bilanco pretokov obeh modelov za vsakih petnajst minut za sredo 09.04.2016.

### Model Duplje

Za model Duplje sem izdelal masno bilanco porabe po naslednji enačbi:

$$Q_{poraba} = Q_{vtok} - Q_{iztok} \quad (27)$$

kjer je:

- $Q_{poraba}$  poraba vode v modelu Duplje,  
 $Q_{vtok}$  vtok vode v model duplje iz črpališča Duplje,  
 $Q_{iztok}$  seštevek sprememb višin gladin vodohranov Duplje, Podbrezje in Strahinj.

V modelu Duplje predstavlja črpališče Duplje vtok vode v sistem. Črpališče Duplje vsebuje dve črpalki (preglednica 24), ki se preko dneva po potrebi izmenično vklopljata. Zato sem najprej seštel njuno skupno načrpano vodo, ki v moji enačbi masne bilance porabe ( $Q_{poraba}$ ) predstavlja vtok ( $Q_{vtok}$ ).

Preglednica 24: Izračun vtoka vode v model Duplje

Sreda 09.04.2014	Črpalka 1 [l/s]	Črpalka 2 [l/s]	Črpalke skupaj [l/s]
9.4.2014 0:00	0	0	0
9.4.2014 0:15	0	13.1	13.1
9.4.2014 0:30	0	13.1	13.1
9.4.2014 0:45	0	0	0
9.4.2014 1:00	0	0	0
9.4.2014 1:15	0	0	0
9.4.2014 1:30	0	0	0
9.4.2014 1:45	0	0	0
9.4.2014 2:00	12.7	0	12.7
9.4.2014 2:15	12.7	0	12.7
9.4.2014 2:30	12.7	0	12.7

Iztok vode iz sistema predstavljajo spremembe gladin vodohranov. Voda iz črpališča Duplje teče direktno in samo v vodohran Duplje, od tam pa nato v vodohrana Podbrezje in Strahinj. Člen  $Q_{iztok}$  v enačbi (27) predstavlja seštevek razlik v spremembi prostornine vodohranov. Razliko v spremembi

prostornine sem dobil tako (preglednica 25), da sem odštel višino gladine vodohrana ob začetku časovnega koraka od višine gladine vodohrana na koncu časovnega koraka.

Preglednica 25: Spreminjanje prostornine vodohrana Duplje.

Časovni korak	Duplje [cm]	Razlika višin [cm]	Razlika [m <sup>3</sup> ]	Razlika [l/s]
0:00	196	0	0	0
0:15	196	19	3.157612109	3.508457899
0:30	215	16	2.659041776	2.954490862

Razlika višin je višina podana v centimetrih, zato sem izračunal, za kakšen volumen se spremeni prostornina vodohrana. Nato sem ta volumen spremenil v pretoke v litrih na sekundo. To sem storil za vse tri vodohrane za vsak časovni korak. Vse tri razlike sem nato seštel in seštevek pomnožil z dva (preglednica 26), ker imajo vodohrani dve celici.

Preglednica 26: Seštevek sprememb prostornin vodohranov v modelu Duplje

Sreda 09.04.2014	Duplje [cm]	Razlika [l/s]	Podbrezje [cm]	Razlika [l/s]	Strahinj [cm]	Razlika [l/s]	2x Seštevek razlik [l/s]
9.4.2014 0:00	196	0.000	234	0	197	0.000	0.000
9.4.2014 0:15	196	3.508	234	0	197	0.000	7.017
9.4.2014 0:30	215	2.954	234	0	197	0.000	5.909
9.4.2014 0:45	231	-1.662	234	0	197	0.000	-3.324
9.4.2014 1:00	222	-1.477	234	0	197	0.000	-2.954
9.4.2014 1:15	214	-1.662	234	0	197	0.181	-2.962
9.4.2014 1:30	205	-1.477	234	0	198	0.000	-2.954
9.4.2014 1:45	197	-0.739	234	0	198	0.000	-1.477
9.4.2014 2:00	193	3.508	234	0	198	0.000	7.017
9.4.2014 2:15	212	3.324	234	0	198	0.000	6.648
9.4.2014 2:30	230	-1.108	234	0	198	0.000	-2.216

Razlike višin vodohranov imajo pozitiven in negativen predznak. Kadar je predznak pozitiven, pomeni, da se vodohran polni, ob negativnem predznaku pa se prazni.

Nato sem za vsak časovni korak, seštevke razlik višin vodohranov pomnoženih z dva, odštel od seštevka načrpane vode obeh črpalk in dobil porabo v vodovodnem sistemu za vsak časovni korak, kar je tudi prikazano v preglednici 27.

Preglednica 27: Izračun porabe v modelu Duplje.

Časovni korak	Črpalki skupaj [l/s]	2x Razlika skupaj [l/s]	Poraba
0:00	0	0.000	0.000
0:15	13.1	7.017	6.083
0:30	13.1	5.909	7.191
0:45	0	-3.324	3.324
1:00	0	-2.954	2.954
1:15	0	-2.962	2.962
1:30	0	-2.954	2.954
1:45	0	-1.477	1.477
2:00	12.7	7.017	5.683
2:15	12.7	6.648	6.052
2:30	12.7	-2.216	14.916

Ko sem dobil porabo v vodovodnem sistemu, sem določil njeno povprečno vrednost, ki znaša 9,261 litra na sekundo. Povprečno vrednost porabe sem nato delil z določeno porabo za vsak časovni korak in tako dobil 96 množiteljev porabe.

### Model Pivka

Model Pivka se oskrbuje z vodo iz vodovodnega sistema Kranj. Model ima en vodohran Pivka, ki ima zaradi stalnega tlačnega dotoka vode praktično vedno enako višino gladine, ki znaša 328 centimetrov. Na dan sreda 09.04.2014 je ta gladina samo v dveh časovnih korakih upadla za en centimeter. Iz Komunale Kranj sem prejel podatke o vtoku vode v vodohran Pivka. Ti vtoki v vodohran Pivka so v večini časovnih korakov tudi vtok v model Pivka in hkrati tudi poraba modela Pivka. V dveh primerih, ko je v časovnih korakih upadla višina gladine vodohrana Pivka za en centimeter, sem to upošteval in razliko v spremembi prostornine vodohrana odštel od vtoka v model Pivka (preglednica 28).

Preglednica 28: Izračun porabe v modelu Pivka.

Časovni korak	Pretoki [l/s]	Pivka [cm]	Razlika višin [cm]	Razlika [m <sup>3</sup> ]	Razlika [l/s]	Poraba
6:15	10.500	328	0	0.000	0.000	10.500
6:30	10.100	328	-1	-0.514	-0.571	10.671
6:45	14.600	327	1	0.514	0.571	14.029
7:00	12.100	328	0	0.000	0.000	12.100

Ko sem dobil porabo v vodovodnem sistemu sem določil njeno povprečno vrednost, ki znaša 7,976 litra na sekundo. Povprečno vrednost porabe sem nato delil z določeno porabo za vsak časovni korak in tako dobil 96 množiteljev porabe.

### 4.3.3 Izdelava hidravličnega modela obstoječega stanja

Po ureditvi pridobljenih podatkov, je sledila izdelava hidravličnega modela. Izdelati je bilo potrebno hidravlični model, ki je poenostavljena različica pravega vodovodnega sistema. Poenostavljeno omrežje dobimo z odstranitvijo cevi, ki nimajo pomembnega vpliva na hidravlično analizo. Nato sledi dodajanje gradnikov na vodovodno omrežje hidravličnega modela in urejanje njihovih lastnosti, ki jih program EPANET zahteva za izvedbo simulacije. V tem delu bodo opisani postopki za vsak gradnik posebej.

#### Cevi

Pri ceveh sem najprej opravil proces skeletizacije omrežja. Vodovodno omrežje je sestavljeno iz odsekov cevi. Ti odseki se medsebojno stikajo in tvorijo stičišča. Odseki so sestavljeni iz posameznih cevi. Odseki cevi, ki se stikajo in so narejene iz enakega materiala in imajo enak premer sem združil v eno cev. Združitve sem opravil tudi v primeru, ko je bila na odseku enakih cevi ena posamezna cev drugačnega materiala, verjetno kot posledica popravila okvare. Stičišča med odseki so v večini narejena iz štirih litoželeznih cevi krajših dolžin, zato sem vsak krak združil s cevmi v odseku, ne glede na to, da ni šlo za enak material. Nato sem določil dolžine združenih cevi in na podlagi teh začel odstranjevati krajše cevi na obrobju omrežja, ki so v večini primerov priključki na vodovodno omrežje. S tem ukrepom sem močno zmanjšal število cevi in posledično tudi število vozlišč. Na koncu sem vsaki cevi določil dolžino (m), premer (mm) in vrednost absolutne hrapavosti (mm).

#### Vozlišča

Vsaki cevi v vodovodnem sistemu sem začetek in konec določil z vozliščem. Program EPANET zahteva, da se vozliščem določi lastnosti, ki so potrebne za izvedbo hidravlične simulacije. Vsakemu vozlišču je potrebno določiti višino, kar je že opisano v poglavju 4.3.1 Pridobljeni podatki in obdelava. Nato je potrebno določiti vozliščno porabo v litrih na sekundo. Najprej sem povprečne letne porabe odjemnih mest preračunal v litre na sekundo. Ker imam dva ločena modela, sem vozlišča ustrezno razdelil na dva dela in za vsakega ustvaril nov .shp sloj. Zaradi procesa skeletizacije cevi večina odjemnih mest ni imela več stika s hidravličnim omrežjem. Zato sem za oba .shp sloja vozlišč v QGIS okolju ustvaril Voronoi-jeve poligone za vsako vozlišče. Tako je vsako vozlišče dobilo svoje območje, v katerem so se nahajala odjemna mesta s porabo v litrih na sekundo. Porabo v vozliščih sem nato določil z orodjem "Join Attributes by Location", ki je za vsak Voronoi poligon seštel porabo vseh odjemnih mest in jih pripisal pripadajočem vozlišču. V vsakem sloju sem nato seštel porabo v vseh vozliščih in dobil podatek o porabi modela Duplje, ki znaša 6,426 litra na sekundo in porabo modela



Pivka, ki znaša 5,020 litra na sekundo. Poraba za vsak model se razlikuje od porabe, ki sem jo določil v poglavju 4.3.2 Določevanje porabe v vodovodnem sistemu Naklo. Razlike med temi porabami so vodne izgube, ki pa jih nisem upošteval ob izdelavi prvega hidravličnega modela, ker nisem vedel, kako se spreminjajo tekom dneva.

### **Črpališča**

Sistem vsebuje dve črpališči s tremi vrtinami, in sicer črpališče Duplje in črpališče Podbrezje. Ker se črpališče Podbrezje uporablja kot rezervni vodni vir, ga v svojem modelu nisem uporabil. Črpališče Duplje vsebuje dve vrtini z dvema črpalkama, ki se v osnovi izmenično vklapljata. Za vključitev vrtine kot vira vode sem v EPANETu uporabil gradnik rezervoar. Za tlačno višino rezervoarja sem uporabil višino podtalnice nad črpalko. Višino podtalnice sem določil na podlagi prejetih meritev višine podtalnice (Komunala Kranj, 2015b), in sicer kot povprečje merjenih podatkov za leto 2014. Rezervoar in črpalko sem nato povezal s kratko cevjo ter v vozlišču med cevjo in črpalko določil globino črpalke. Krivuljo delovanja črpalke sem opisal z osmimi točkami, ki sem jih odčital iz črpalne krivulje podane s strani proizvajalca Grundfos in zapisal v tabelo (Lenntech BV, 2015). Za črpalko sem nato nastavil začetni status kot nedelujoč (CLOSED), nato pa sem s kontrolnimi pravili določil njihovo delovanje. Črpalke pričnejo delovati, ko pade gladina vode v vodohranu, ki ga polnijo, pod določen nivo. Delovanje črpalk se ustavi, ko nivo gladine vode doseže določeno višino.

### **Vodohrani**

V omrežju so štirje vodohrani. Vodohran Pivka ima stalni tlačni dotok iz centralnega vodovodnega sistema Kranj in je zato vedno poln. Na podlagi tega je v model vstavljen kot rezervoar s stalno tlačno višino. Za ostale vodohrane sem vnesel podatke o nadmorski višini dna vodohrana, maksimalni in minimalni višini nivoja gladine, premer vodohrana in začetno višino nivoja gladine vodohrana ob pričetku simulacije, ki je enaka višini gladine vodohrana ob pričetku dneva sreda 09.04.2014. Podatke sem prejel s strani Komunale Kranj (2015b).

### **Ventili**

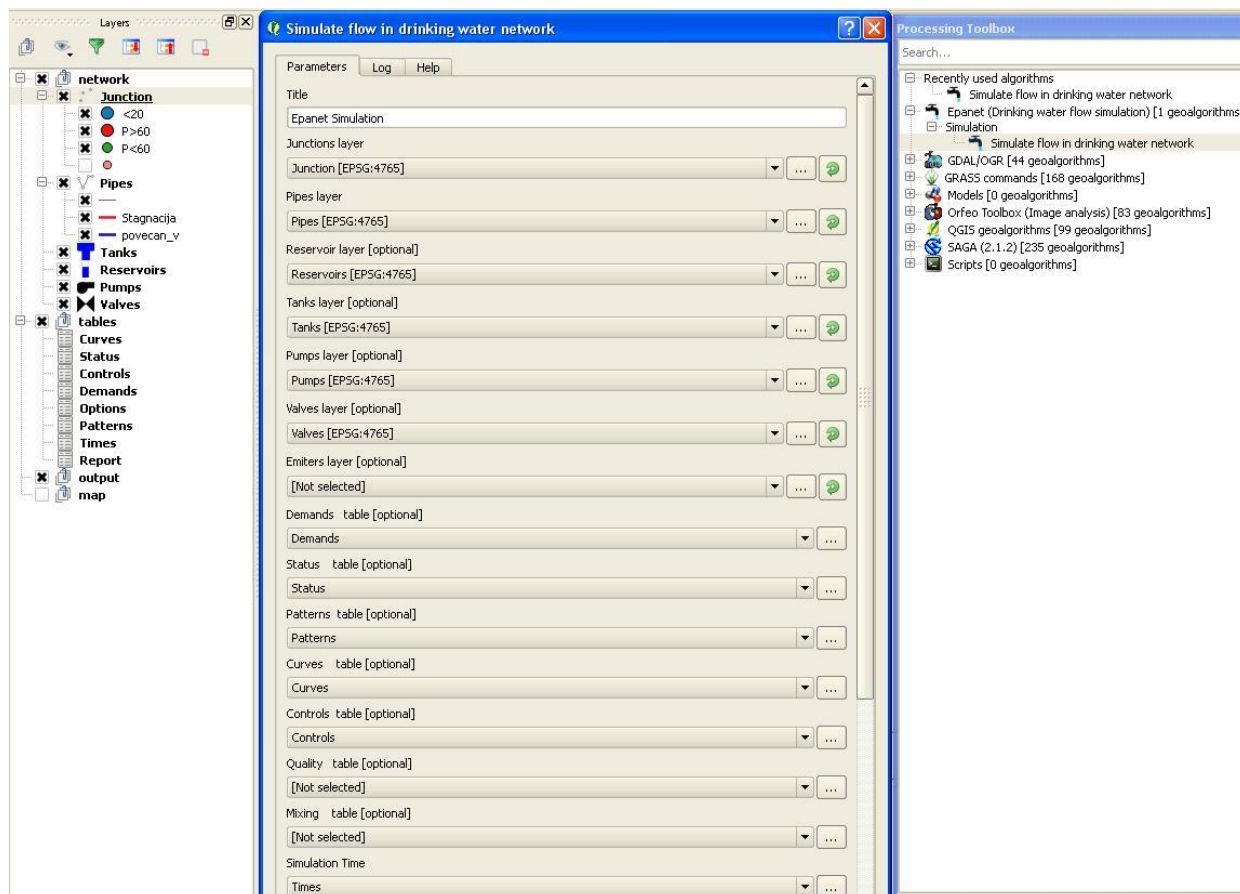
Omrežni hidravlični model vsebuje sedem ventilov. Štirje ventili so dejansko vgrajeni v vodovodni sistem Naklo, dodatni trije pa simulirajo vtok v vodohran na določeno višino. Po podatkih Komunale Kranj (2015b) ventili, ki so dejansko vgrajeni v vodovodni sistem Naklo, znižajo tlake za dva bara. Zato sem za tip ventila izbral PBV (Pressure Breaker Valve). Ker ventil PBV znižuje tlačno črto (m) sem 2 bara pretvoril v 20 metrov vodnega stolpca in podatek vnesel v tabelo. Poleg tega sem vstavil še premer ventila.

Za ventile, ki simulirajo vtok v vodohran na določeno višino sem uporabil ventile PSV (Pressure Sustaining Valve). Ventili so vstavljeni v omrežnem modelu čisto blizu vodohranov, nato pa so z

vodohrani povezani s kratko cevjo. Ventile za vsak vodohran posebej, sem v modelu nastavljal tako, da sem višino vozlišča med ventilom in kratko cevjo, ki vodi do vodohrana, odštel od višine vtoka v vodohran, ki sem jih dobil v podatkih Komunale Kranj (2015b). To razliko med višinama sem nato vstavil v tabelo v stolpec nastavitve (Setting).

#### 4.3.4 Zagon simulacije

Ko sem imel narejen omrežni model, ki je vseboval vse potrebne vhodne podatke, sem odprl pogovorno okno vtičnika »qgis-epanet«. Pogovorno okno vsebuje polja, kamor se vnese .shp sloje in .dbf sloje. Nad vsakim poljem piše, katero vrsto sloja je potrebno vnesti za izvedbo simulacije, na primer sloj, v katerem imamo cevi, je potrebno vstaviti v polje Pipes layer. Če v oknu Sloji (ang. Layers) poimenujemo vektorske sloje in atributna tabele z enakim imenom, kot so poimenovana polja v pogovornem oknu »qgis-epaneta«, se ta ob odprtju pogovornega okna vnesejo avtomatsko. Ko so vsa polja pravilno izpolnjena zaženemo simulacijo s klikom na Run na dnu pogovornega okna.



Slika 13: Pogovorno okno vtičnika »qgis-epanet«.

#### 4.3.5 Rezultati hidravlične simulacije

Ob prvih zagonih simulacije je program javljal napake, ki sem jih odpravljala, dokler simulacija ni bila uspešno izvedena. Kot rezultat uspešne simulacije program v oknu s sloji (Layers) izpiše štiri tabele:

- v prvi tabeli (Link output table (time aggregates)) je za vsak linijski element (cev, črpalko in ventil) navedena povprečna hitrost toka,
- v drugi tabeli (Node output table (time aggregates)) so za vse točkovne elemente (vozlišče, vodohran in rezervoar) navedeni maksimalni tlak in maksimalna tlačna črta ter minimalni tlak in minimalna tlačna črta,
- v tretji tabeli (Link output table) so za vsak linijski element navedeni pretok, hitrost toka in linijske izgube za posamezni časovni korak,
- v četrti tabeli (Node output table) so za vse točkovne elemente navedeni poraba, višina tlačne črte in piezometrični tlak za posamezni časovni korak.

Rezultati štirih tabel se lahko grafično prikažejo v vektorskih slojih preko nastavitve prikaza atributov vektorskih slojev. To lahko naredimo za vsak vektorski sloj posebej v pripadajočem pogovornem oknu Lastnosti sloja (ang. Layer Properties), kjer v zavihku Slog (ang. Style) določimo kateri del rezultata iz dobljenih štirih tabel naj se pokaže na karti.

#### **4.3.6 Modeliranje vodnih izgub**

Kot je razvidno predhodno sem za vsak model določil dve porabi. Najprej sem določil korigirano povprečno letno porabo za vsako odjemno mesto. Nato pa sem to porabo pretvoril v porabo litri na sekundo. Ta poraba je določena na podlagi obračunane količine vode odjemnih mest s strani komunale Kranj. Za model Duplje sem dobil seštevek porabe 6,426 litrov na sekundo, za model Pivka pa seštevek porabe 5,020 litrov na sekundo.

Drugo porabo sem dobil na način kot je opisano v poglavju 4.3.2 Določevanje porabe v vodovodnem sistemu Naklo v vodovodnem sistemu Naklo. Ta poraba predstavlja porabo vode v vodovodnem sistemu Naklo na dan sreda 09.04.2016 in vsebuje obračunano porabo odjemnih mest in neobračunano porabo vode, ki sem jo v mojem modelu uporabil kot vodne izgube. Poraba za model Duplje znaša 9,261 litrov na sekundo, za model Pivka pa 7,976 litrov na sekundo. Ko sem porabe za posamezni model odštel sem dobil vodne izgube. Za model Duplje znašajo 2,835 litrov na sekundo, za model Pivka pa 2,956 litrov na sekundo.

#### **Vključitev izgub v model**

Vodne izgube se lahko vključi v model na različne načine (Kozelj, 2016):

- v model lahko dodamo nova vozlišča in izgube vstavimo kot porabo s pripadajočimi množitelji porabe,
- vstavimo »emitterje«, ki predstavljajo iztok na prosto skozi odprtino s podano Q-H odvisnostjo,
- izgube porazdelimo med obstoječa vozlišča in jih uredimo enako kot porabo.

Sam sem se odločil da porazdelim izgube med obstoječa vozlišča. To sem storil zato, ker nisem dobil podatkov, kje točno v vodovodnem sistemu naj bi se nahajale izgube. Za vsak model posebej sem vodne izgube (model Duplje 2,835 l/s in model Pivka 2,956 l/s) delil s številom vozlišč v modelu in dobil delež izgub, ki sem jih nato pripisal kot porabo obstoječim vozliščem.

Ker se izgube spreminjajo v odvisnosti od tlakov sem iz hidravličnega modela, kjer nisem upošteval izgub, izbral v vsakem modelu po eno povprečno vozlišče (povprečno pri spreminjanju tlakov). Tako sem za vsak model dobil za vsak časovni korak spremembo v višini tlaka. Nato sem za vsak model izračunal povprečno vrednost tlakov v izbranem vozlišču in poiskal enak tlak v tabeli izbranega povprečnega vozlišča. Temu tlaku sem pripisal dobljeno izgubo (model Duplje 2,835 l/s in model Pivka 2,956 l/s), kar mi je nato služilo kot osnova za določanje vodnih izgub za vsak časovni korak, ter izračun množiteljev, ki določajo spreminjanje deleža vodnih izgub za vsak časovni korak.

Nato sem določil izgubo za vsak časovni korak s pomočjo formule:

$$Q_2 = Q_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^N \quad (28)$$

kjer je:

- $Q_1$  Iztok izgub ob tlaku  $P_1$ ,
- $P_1$  Tlak v cevi ob iztoku izgub  $Q_1$ ,
- $Q_2$  Iztok izgub ob tlaku  $P_2$ ,
- $P_2$  Tlak v cevi ob iztoku izgub  $Q_2$ ,
- $N$  eksponent, ki povezuje iztoke izgub in tlake.

Vrednost eksponenta  $N$  se nahaja med 0,50 in 2,5. Na Japonskem so za ugotavljanje razmerij med tlaki in izgubami izvedli 20 kratkih preizkusov na manjših odsekih vodovodnih sistemov (Lambert A., 2000). Med preizkusi so odklopili vsa odjemna mesta in tako ločili porabo odjemalcev od izgub na omrežju. Vsak preizkus je trajal približno 45 minut. Med preizkusom so spreminjali višino tlakov med 0,5 in 4 bari. Vrednosti eksponenta  $N$  so variirale med 0,65 in 2,12, povprečje pa je znašalo 1,15 in je zadnjih 20 let na Japonskem uporabljeno kot standardna vrednost (Lambert A., 2000).

Na podlagi teh preizkusov sem se tudi sam odločil, da za eksponent  $N$  izberem vrednost 1,15. Ko sem po enačbi (28) določil velikost izgub za vsak časovni korak pri obeh modelih posebej, sem ta znesek delil s povprečno vrednostjo izgub za vsak časovni korak in tako dobil množitelj izgub za vsak model posebej. Nato je sledil popravek porabe za vsak model. Porabo, ki sem jo določil v poglavju 4.3.2

Določevanje porabe v vodovodnem sistemu Naklo sem za vsak časovni korak zmanjšal za vrednost vodnih izgub za vsak časovni korak in tako dobil nove količine porabe. Iz novih količin sem nato določil povprečno vrednost in jo delil z novo porabo za vsak časovni korak. Tako sem dobil nove

množitelje porabe. Pri obeh modelih sem dobil po eno srednjo porabo (za model Duplje 6,426 litrov na sekundo in model Pivka 5,020 litrov na sekundo) s pripadajočo tabelo z množitelji, ter po eno srednjo vrednost izgub (za model Duplje 2,835 litrov na sekundo in model Pivka 2,956 litrov na sekundo) s pripadajočo tabelo z množitelji.

#### **4.3.7 Ponovni zagon simulacije in umerjanje modela**

Z na novo določenimi podatki sem ponovno zagnal simulacijo in primerjal rezultate z meritvami iz SCADA. Primerjal sem višine gladin treh vodohranov v modelu Duplje in iztoke iz rezervoarja Pivka v modelu Pivka. V modelu Pivka so se mi podatki popolnoma ujekali, kar je razvidno na sliki 14, pri modelu Duplje pa se niso, zato sem ga dodatno umeril.

##### **Vodohran Duplje**

Kot je razvidno na sliki 15 se višina gladine vodohrana Duplje v hidravličnem modelu ujema z višino gladine vodohrana dobljeno iz podatkov SCADA, vendar z manjšim časovnim zamikom krivulj.

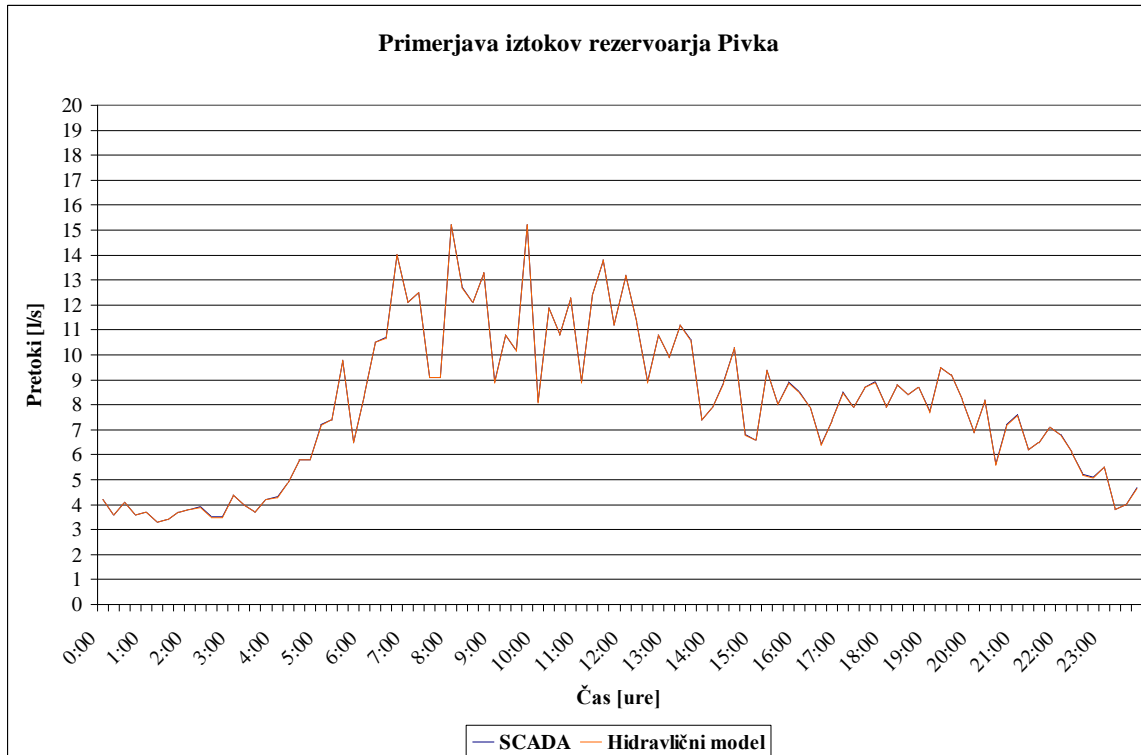
##### **Vodohran Podbrezje**

Krivulja višine gladine vodohrana Podbrezje (slika 16) v hidravličnem modelu se je oblikovno ujemala s krivuljo višine gladine vodohrana dobljeno iz podatkov SCADA, vendar se je nahajala nad njo. Zato sem pri ceveh, ki vodijo do vodohrana Podbrezje povečal koeficient hrapavosti iz 2 milimetra na 4 milimetre. Posledično se je gladina vodohrana spustila za približno dva centimetra in se tako približala višini gladine vodohrana dobljeni iz podatkov SCADA.

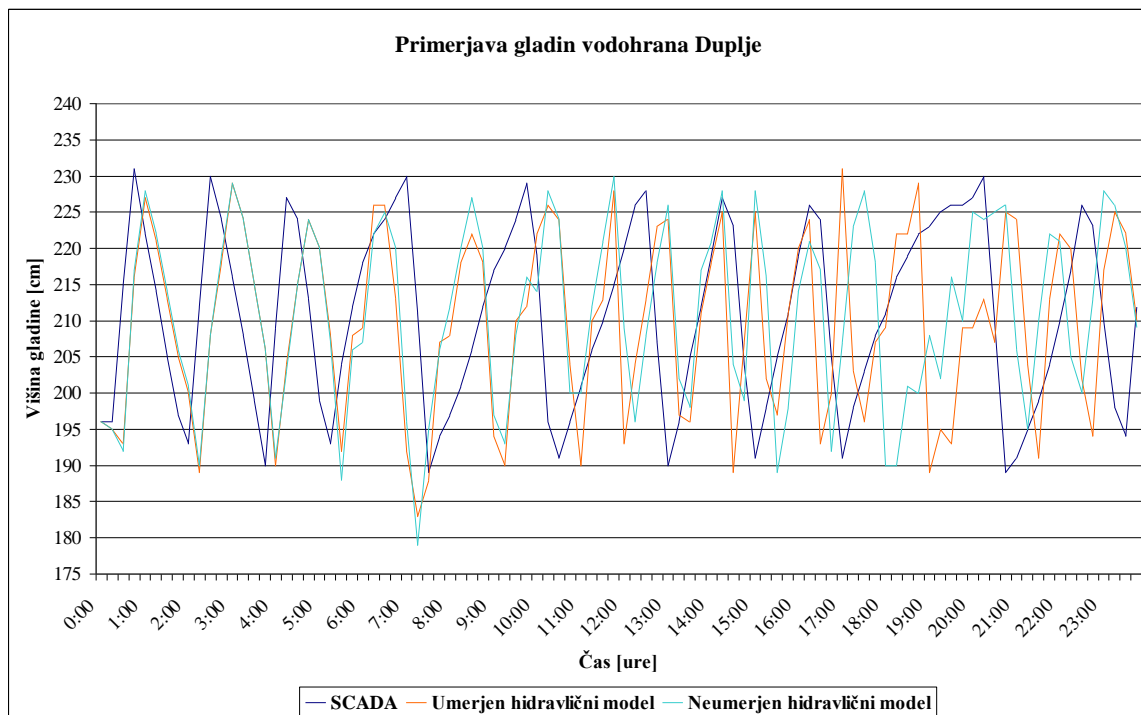
##### **Vodohran Strahinj**

Vodohran Strahinj (slika 17) je imel najslabše ujemanje gladin med vsemi tremi vodohrani. Gladina vodohrana v modelu se ni ujemala niti po obliki krivulje niti po višini gladine glede na podatke iz SCADA. Rezultat simulacije je kazal na to, da ima vtok v vodohran preveč energije in se zato stalno polni. Enako kot pri vodohranu Podbrezje, sem tudi tu povečal koeficient hrapavosti iz 0,05 milimetra na 4 milimetre vendar še zmeraj nisem dobil željenih rezultatov. Zaradi pomankanja podrobnejših podatkov o vodovodnem omrežju, sem s tem zaključil z umerjanjem modela. Razlogov za neujemanje gladin vodohrana je lahko več:

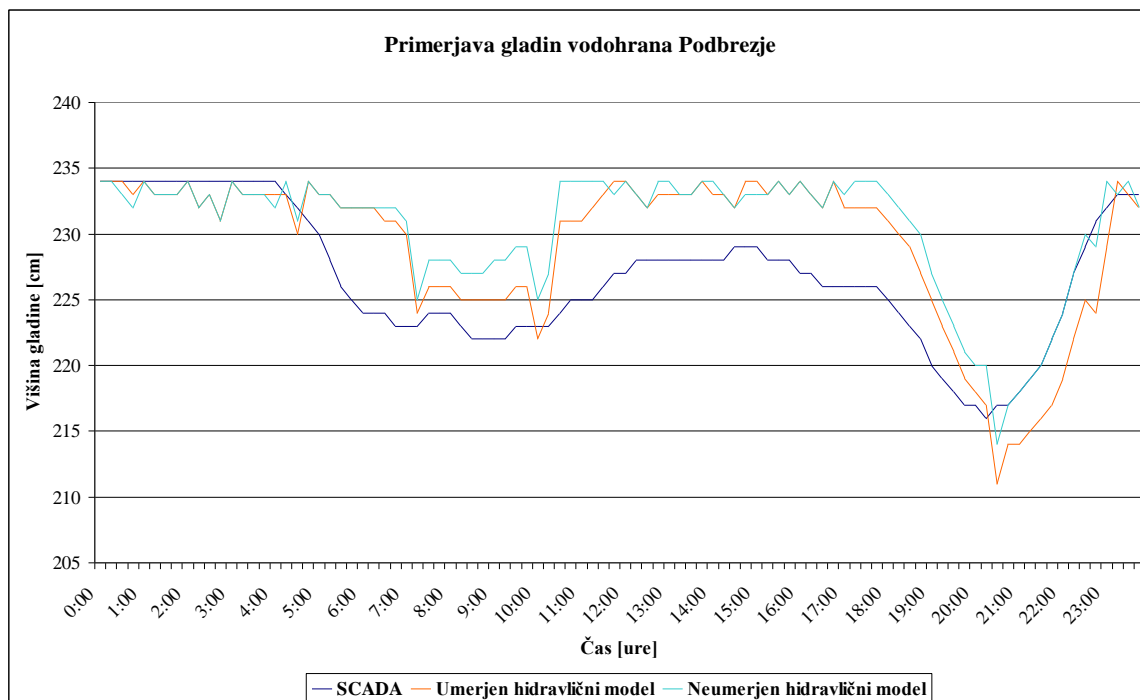
- gorvodno od vodohrana so večje energijske izgube, kot sem jih upošteval,
- gorvodno od vodohrana se nahaja točka v vodovodnem sistemu, ki zniža energijsko, črto (na primer, nekje pred vodohranom Strahinj se nahaja priprt zasun),
- dolvodno od vodohrana so večje vodne izgube, kot sem jih upošteval.



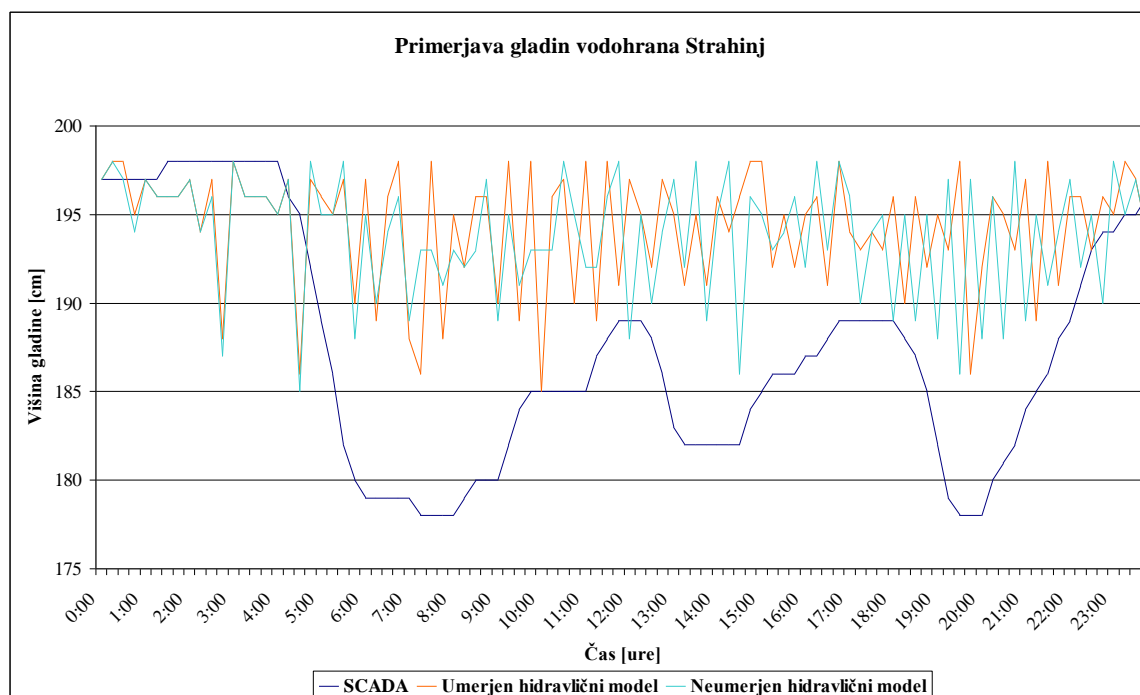
Slika 14: Primerjava iztokov rezervoarja Pivka



Slika 15: Primerjava gladin v vodohranu Duplje.



Slika 16: Primerjava gladin v vodohranu Podbrezje.



Slika 17: Primerjava gladin v vodohranu Strahinj.

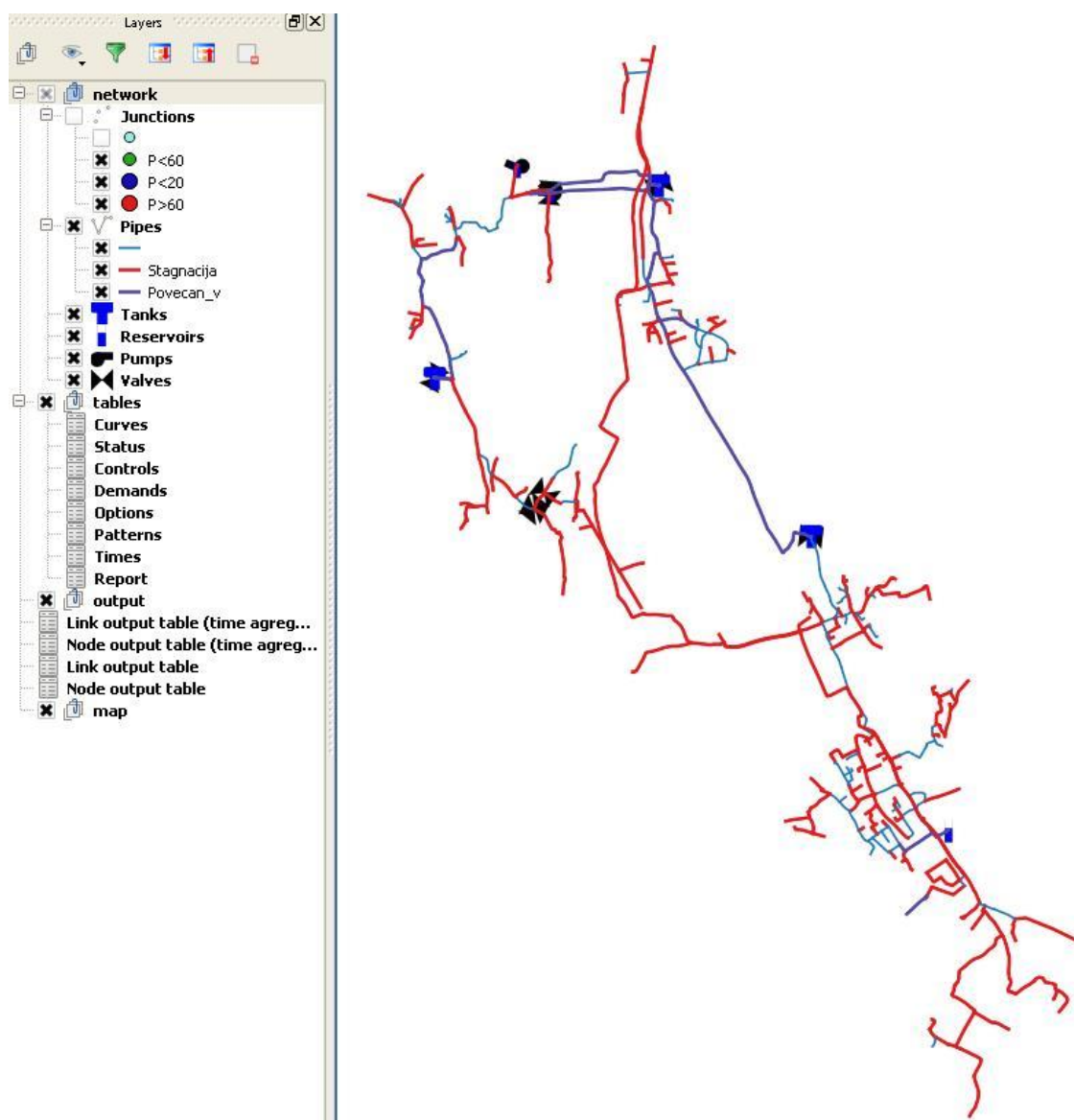
#### 4.3.8 Rezultati simulacije umerjenega hidravličnega modela

Tabele, ki jih dobimo kot rezultat simulacije, lahko združimo s tabelami atributnih podatkov za posamezne gradnike ter jih prikažemo v grafični obliki. Za linijske elemente sta možni samo tabeli, ki predstavljata njune rezultate. Enako pa velja tudi za točkovne elemente. Sam sem to storil za cevi in

vozišča in jih v oknu lastnosti slojev (ang. Layer Properties) s pomočjo pravil porazdelil na željene kategorije. Pri ceveh sem naredil dve kategoriji:

- v prvi so cevi s povprečno hitrostjo toka manjšo od 0,1 m/s, označene z rdečo barvo,
- v drugi pa so cevi s povprečno hitrostjo toka večjo od 1,0 m/s označene s temno modro.

Na ta način lahko že s pogledom na karto (slika 18) vidim, v katerih ceveh voda stagnira (rdeče obarvane) in v katerih so dosežene velike hitrosti (temno modro obarvane).



Slika 18: Povprečna hitrost toka v ceveh.

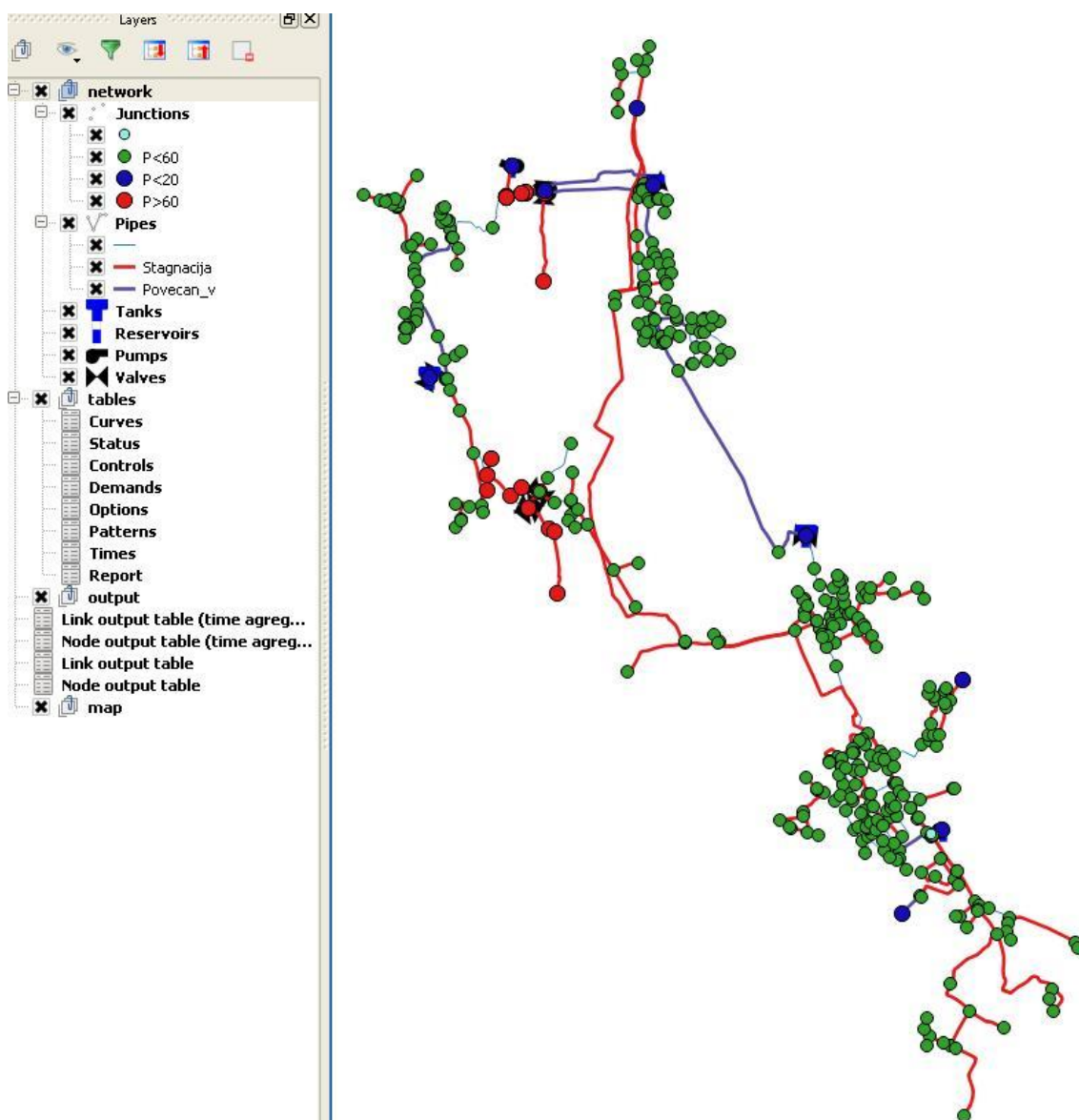
Pri voziščih sem naredil tri kategorije:

- v prvi so vozišča, ki imajo maksimalni tlak nižji od 20 metrov vodnega stolpca (2 bara) in so označena z modro,



- v drugi so vozlišča, ki imajo maksimalni tlak višji od 60 metrov vodnega stolpca (6 barov) in so označena rdeče,
- v tretji pa so vozlišča, ki imajo maksimalni tlak nižji od 60 metrov vodnega stolpca (6 barov), ta pa so označena z zeleno.

Podobno kot pri ceveh lahko tudi tu na karti (slika 19) vidimo, katera vozlišča imajo ugodne tlake (zeleno vozlišča) in katera neugodne tlake (modra vozlišča prenizke in rdeča vozlišča previsoke).



Slika 19: Višina tlakov v vozliščih.

## 5 HIDRAVLIČNA PRESOJA NOVEGA VODNEGA VIRA V OBSTOJEČEM VODOVODNEM SISTEMU NAKLO

Občina Naklo je del projekta Oskrba s pitno vodo na območju Zgornje Save – 3. sklop (pitnavoda-zgornjasava, 2015). V projektu poleg občine Naklo sodelujeta še občini Kranj in Preddvor. V sklopu projekta so bili zgrajeni transportni vodovod Bašelj-Kranj z vodohranom Zeleni hrib ter objektom ultrafiltracije Bašelj in transportni vodovod Zadruga-Naklo. Za vse novo zgrajene objekte so že pridobljena pravnomočna uporabna dovoljenja. Projekt so financirali Mestna občina Kranj, Občina Naklo, Občina Preddvor, Kohezijski sklad EU in Ministrstvo Republike Slovenije za okolje in prostor. Strošek izdelave celotnega projekta je znašal 13.576.477,49 evrov brez vključenega DDV (pitnavoda-zgornjasava, 2015).

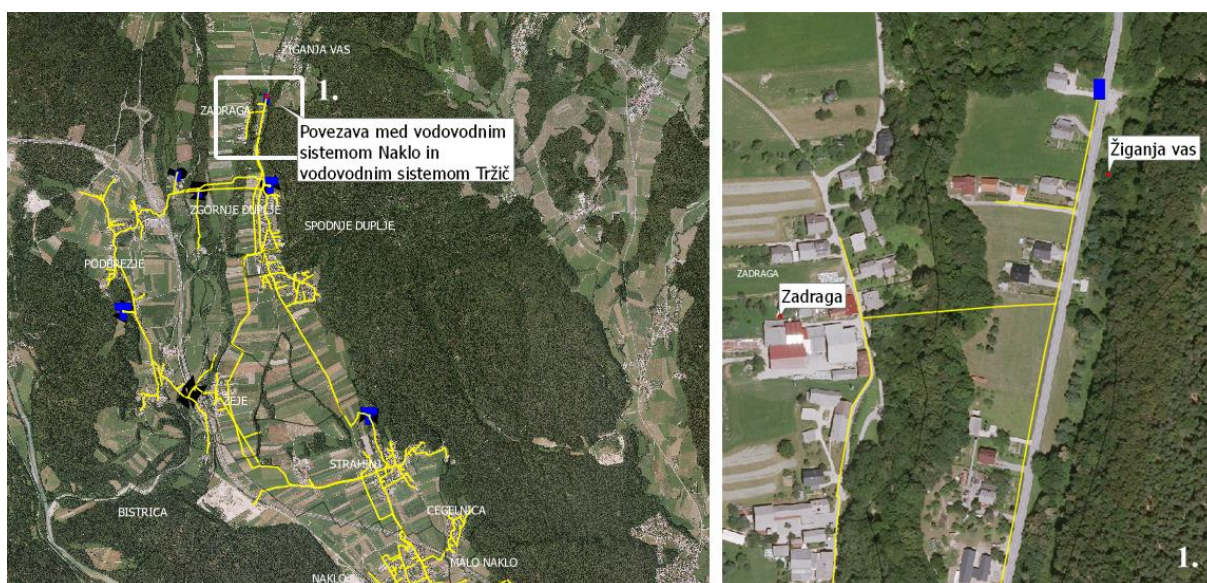
Občine so se projekta lotile zaradi dotrajanosti obstoječih sistemov za vodooskrbo. Z dograditvijo novih objektov in hidravličnimi izboljšavami so želeli povečati zanesljivost oskrbe s pitno vodo, ter izboljšati njeno kakovost (pitnavoda-zgornjasava, 2015).

Novi transportni vodovod Zadruga-Naklo je dolg 6882 metrov. Zgrajen je bil z namenom, da zagotovi zanesljivejšo oskrbo s pitno vodo v občini Naklo, hkrati pa je ob potrebi lahko tudi rezervni vodni vir za vodovodni sistem občine Kranj (pitnavoda-zgornjasava, 2015). Trenutno je transportni vodovod Zadruga-Naklo samo del vodovodnega sistema Naklo, v prihodnosti pa ga nameravajo povezati z vodovodnim sistemom občine Tržič in vodovodnim sistemom občine Kranj. V vodovodnem sistemu občine Tržič imajo novo vrtino Smolekar (Komunala Kranj 2015b), iz katere bi lahko oskrbovali vodovodni sistem Naklo, ter po potrebi tudi manjši del vodovodnega sistema Kranj. Povezavo med Naklom in Tržičem je potrebno še dograditi, medtem ko povezava med Naklom in Kranjem že obstaja, bi pa potrebovala dodatne spremembe in prilagoditve.

### 5.1 Vključitev transportnega vodovoda Zadruga-Naklo v hidravlični model Naklo

Za vključitev transportnega vodovoda Zadruga-Naklo, sem moral spremeniti moj hidravlični model. Ker je v načrtu, da se vodovodni sistem Naklo in vodovodni sistem Tržič povežeta (slika 20), pri čemer bi slednji postal tudi nov vodni vir, sem pri naselju Žiganja vas, na skrajni severni točki vodovodnega sistema Naklo, postavil nov rezervoar. Ta rezervoar bo simuliral vir vode iz vodovodnega sistema Tržič. Ker je v načrtu izgradnja nove povezave med vodovodnim sistemom Naklo in vodovodnim sistemom Tržič z debelino cevi 200 milimetrov, sem obstoječo cev s premerom 125 milimetrov, ki povezuje nov rezervoar s transportnim vodovodom, zamenjal z 200 milimetrsko. Na novo sem naredil tudi jašek, kjer se križata transportni vodovod in cevovod, ki povezuje črpališče Duplje in vodohran Duplje. Po novem se bo vodohran Duplje napajal z vodo iz vodovodnega sistema Tržič, črpališče Duplje pa ostaja kot rezervni vir. Črpališča Duplje zato nisem uporabil v novih

modelih. Sprememba je tudi pri vodni oskrbi naselja Cegelnica. Ta se je doslej z vodo oskrbovala iz vodohrana Strahinj, po novem pa se bo z vodo oskrbovala direktno iz transportnega vodovoda Zadruga-Naklo. Zato sem naredil novo povezavo med transportnim vodovodom in naseljem Cegelnica, hkrati pa sem prekinil povezavo med tem naseljem in vodohranom Strahinj. Konec transportnega vodovoda Zadruga-Naklo naj bi se v prihodnjem povezal z vodohranom Pivka z novo cevjo debeline 200 milimetrov, zato sem jo dodal v hidravlični model. V hidravličnem modelu obstoječega stanja je bil vodohran Pivka vstavljen kot rezervoar, v novem modelu pa je vstavljen kot vodohran, ki se polni iz vodovodnega sistema Tržič. Nov hidravlični model tako ni več sestavljen iz dveh ločenih modelov.



Slika 20: Povezava med vodovodnim sistemom Naklo in vodovodnim sistemom Tržič

Od Komunale Kranj sem prejel podatek, da imajo na voljo dve različici novega vtoka v vodovodni sistem. Prva različica naj bi imela višino tlaka na vtoku v vodovodni sistem Naklo 2 bara, druga pa 5 barov. Za vsako posebej sem izdelal nov hidravlični model in primerjal rezultate.

### 5.1.1 Hidravlični model obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 2 bara

Pri novi različici modela z novim vtokom s tlačno višino dva bara, sem na novo dodanemu rezervoarju, ki predstavlja nov vir vode iz občine Tržič, nastavil tlačno višino na 493,2 metra, kar je 20 metrov nad koto terena. Ker znaša nadmorska višina dna vodohrana Duplje 500 metrov, sem že pred zagonom simulacije predvideval, da vtok v vodohran Duplje ne bo imel dovolj energije, da bi se ta vodohran polnil, rezultati simulacije pa so to domnevo tudi potrdili.

### Vodohran Duplje

Zaradi prenizke tlačne višine na novo dodanega rezervoarja, vtok v vodohran Duplje (slika 21) ni imel dovolj energije da bi se polnil, zato se je v 24 urni simulaciji začetni volumen spraznil ob 4:30.

### Vodohran Podbrezje

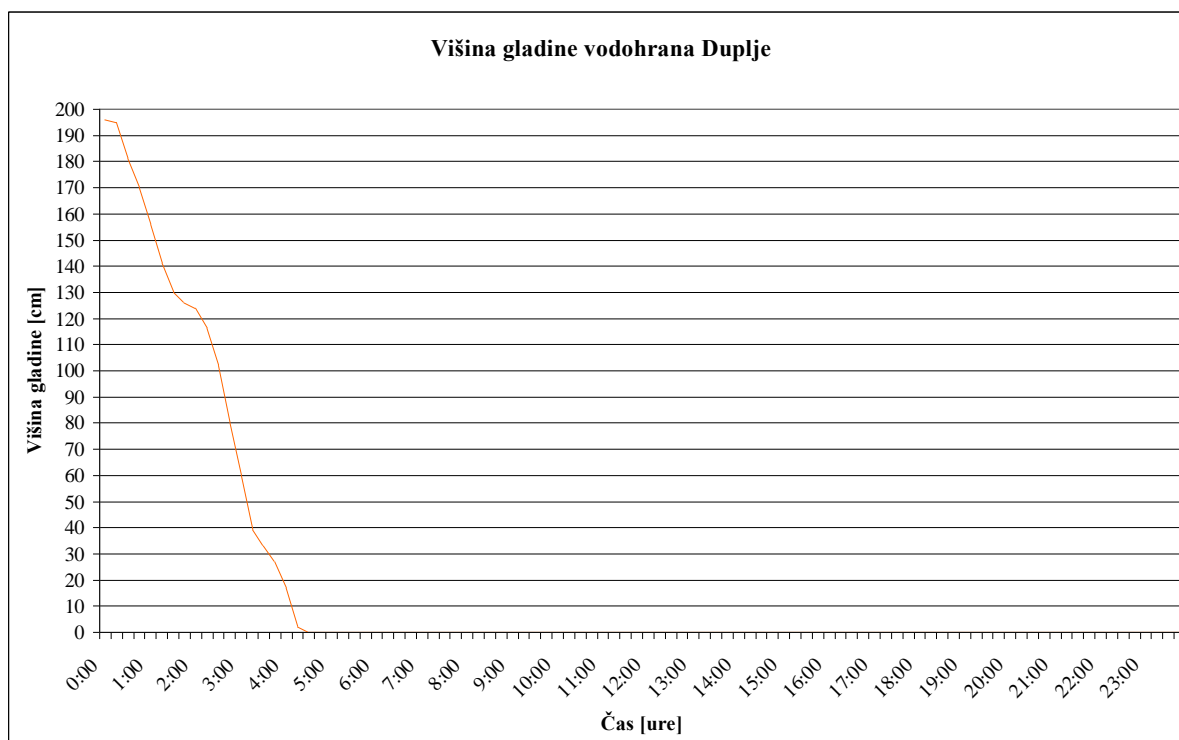
Vodohran Podbrezje (slika 22) se je tekom simulacije polnil iz vodohrana Duplje do trenutka, ko se je začetni volumen vodohrana Duplje izpraznil (ob 4:30). Nato se je začel vodohran Podbrezje prazniti in se je popolnoma izpraznil ob 12:30.

### Vodohran Strahinj

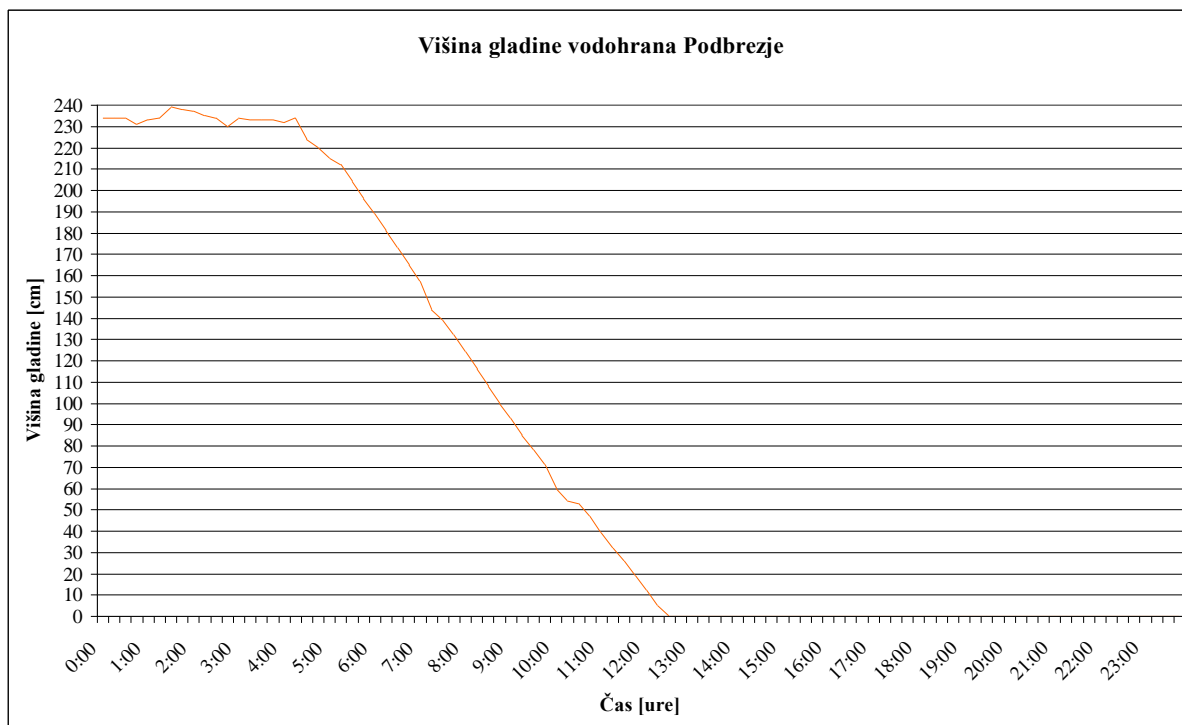
Tudi vodohran Strahinj (slika 23) se je tekom simulacije polnil iz vodohrana Duplje do trenutka, ko se je začetni volumen vodohrana Duplje izpraznil (ob 4:30). Nato se je začel vodohran Podbrezje prazniti in se je ob 9:15 popolnoma izpraznil.

### Vodohran Pivka

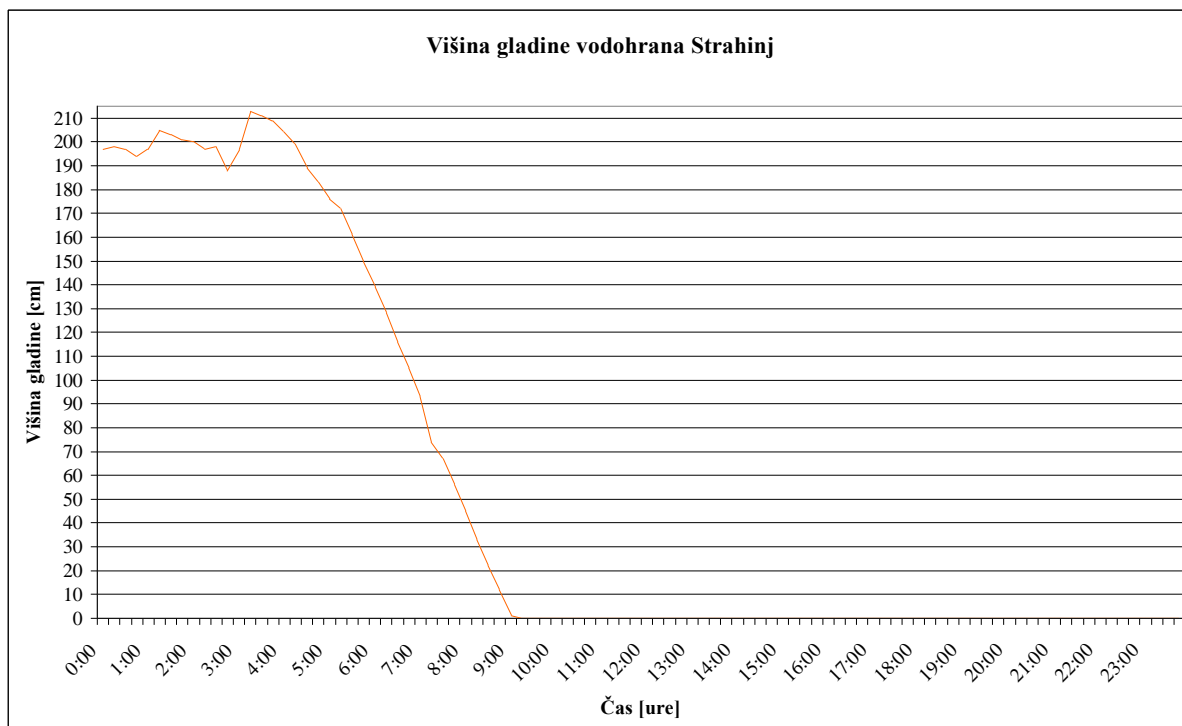
Vodohran Pivka (slika 24) je edini vodohran, ki je imel tekom simulacije stalni tlačni dotok vode iz novega vira in se zato polni med celotno simulacijo. Na sliki 24 je razvidno, da kljub temu, da je vodohran Pivka poleg naselja Cegelnica edini prejemnik vode, višina gladine vodohrana ne dosega višine 328 centimetrov, kolikor znaša višina gladine vodohrana Pivka v obstoječem stanju vodovodnega sistema Naklo.



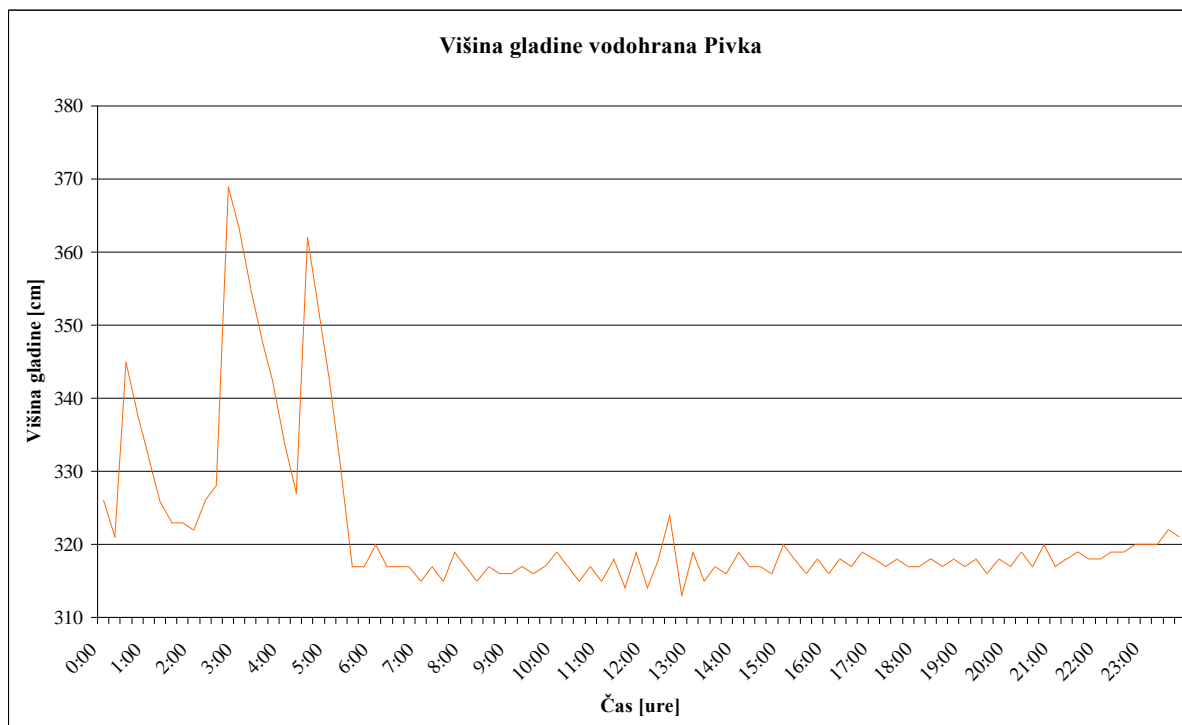
Slika 21: Višina gladine vodohrana Duplje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 2 bara.



Slika 22: Višina gladine vodohrana Podbrezje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 2 bara.



Slika 23: Višina gladine vodohrana Strahinj v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 2 bara.



Slika 24: gladine vodohrana Pivka v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 2 bara.

### 5.1.2 Hidravlični model obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 5 barov

Pri novi različici modela z novim vtokom s tlačno višino pet barov, sem na novo dodanemu rezervoarju, ki predstavlja nov vir vode iz občine Tržič, nastavlil tlačno višino na 523,2 metra, kar je 50 metrov nad koto terena. To je dovolj, da se polni vodohran Duplje in posledično tudi vodohrana Podbrezje in Strahinj.

#### Vodohran Duplje

Vodohran Duplje ima z novim tlačnim virom 5 barov, večji dotok vode kot v obstoječem vodovodnem sistemu Naklo. Na sliki 25 je razvidno, da se višina gladine vodohrana nahaja med 210 in 300 centimetri, medtem ko se po podatkih iz meritev SCADA v obstoječem vodovodnem sistemu višina gladine nahaja med 180 in 230 centimetri.

#### Vodohran Podbrezje

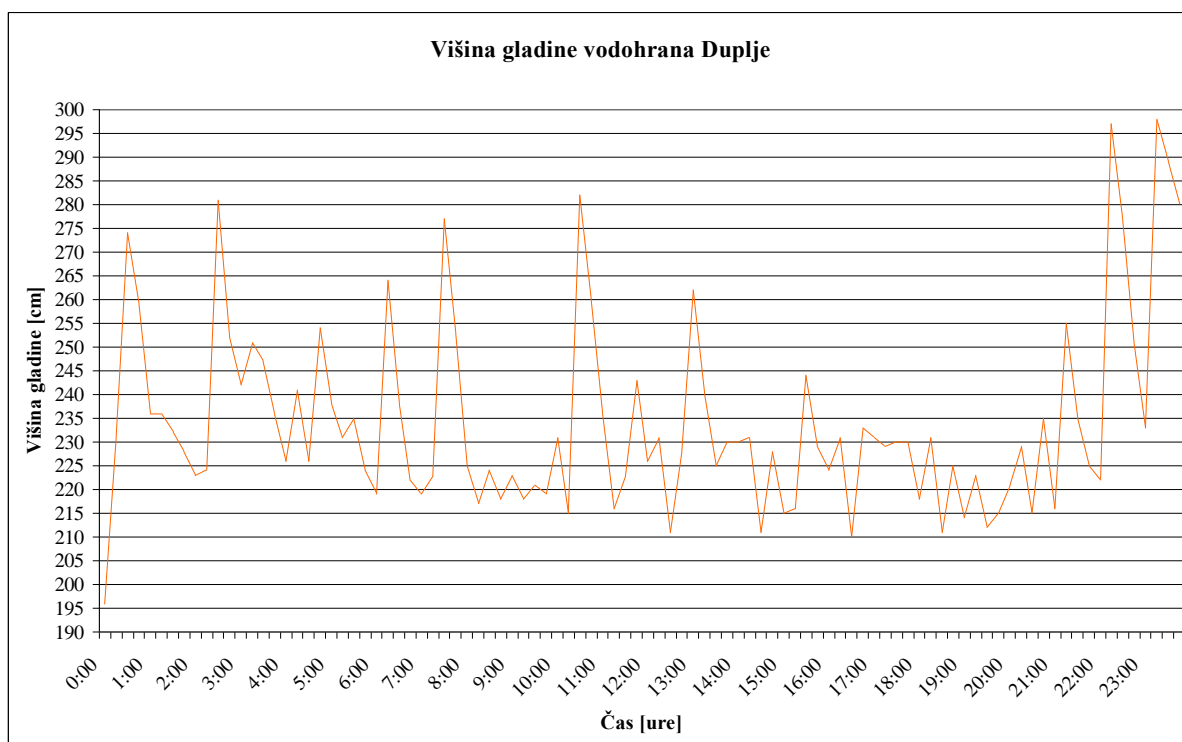
Ker ima vodohran Duplje zadosten dotok vode, je višina gladine vodohrana Podbrezje (slika 26) zelo podobna višini gladine dobljeni v simulaciji hidravličnega modela obstoječega stanja in hkrati tudi višini gladine izdelane na podlagi podatkov iz meritev SCADA.

### Vodohran Strahinj

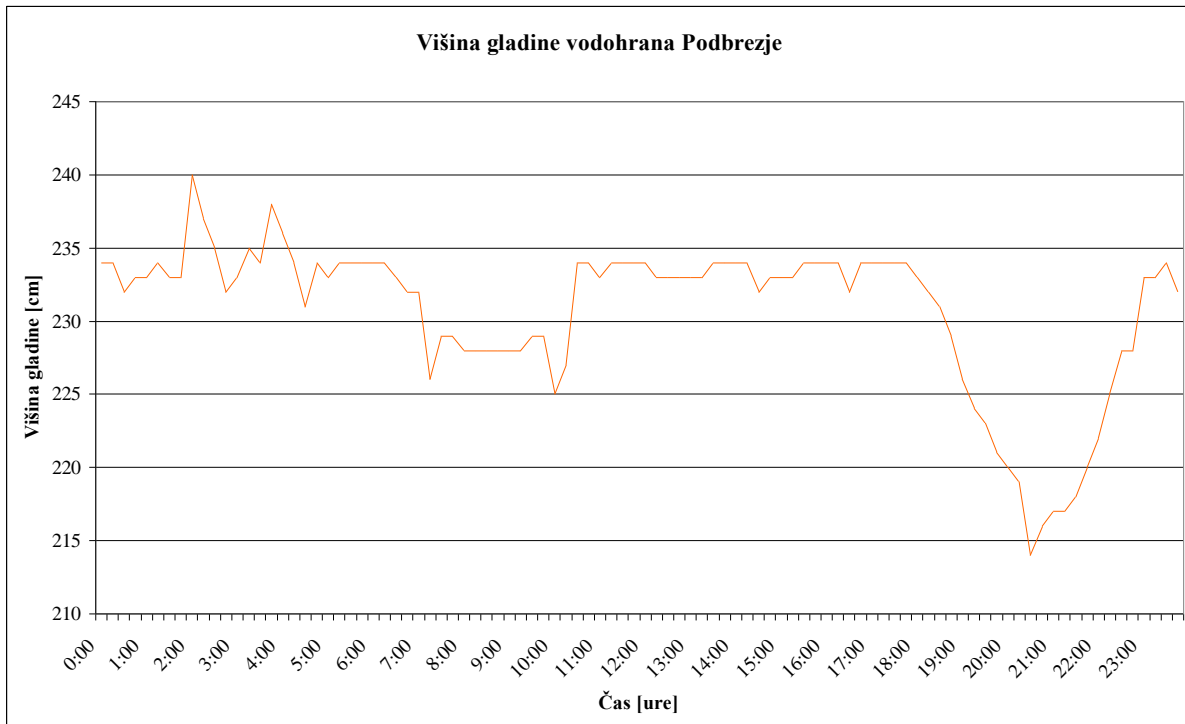
Podobno kot pri vodohranu Podbrezje je tudi pri vodohranu Strahinj (slika 27) višina gladine vodohrana podobna tisti iz simulacije hidravličnega modela obstoječega stanja. Razlika pa je v tem, da se v posameznih časovnih korakih vodohran bolj napolni.

### Vodohran Pivka

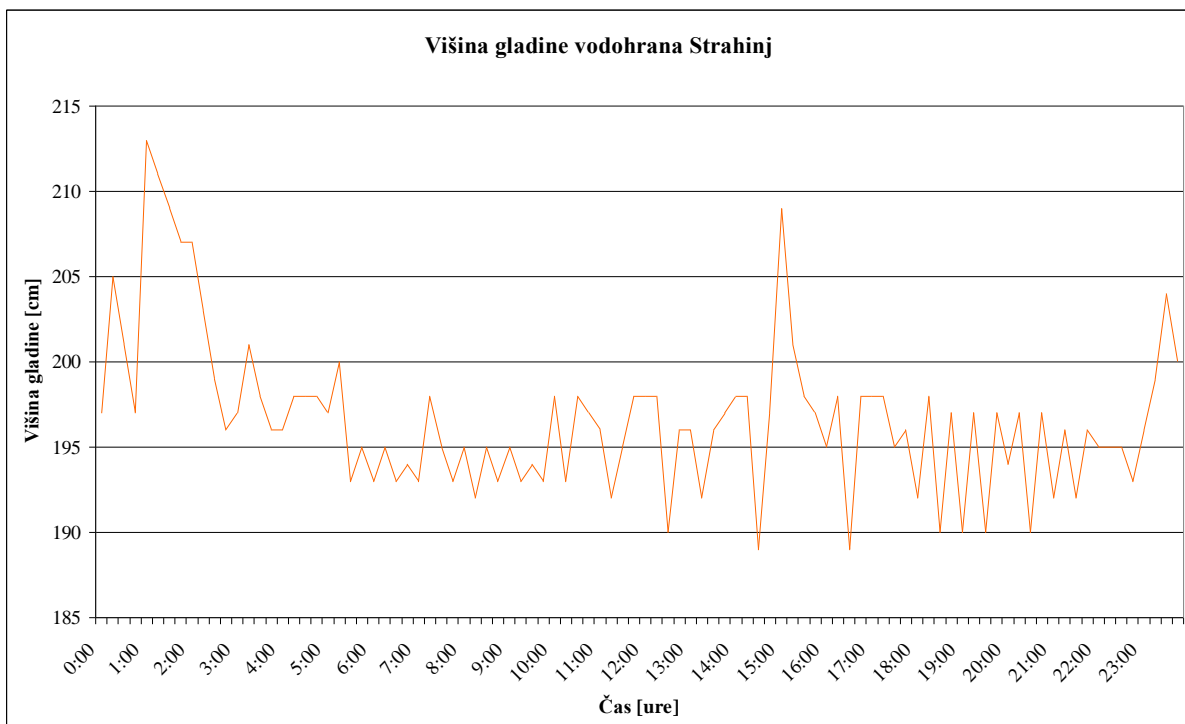
V obstoječem stanju vodovodnega sistema Naklo ima vodohran Pivka stalni tlačni dotok in zato stalno višino gladine vodohrana, ki znaša 328 centimetrov. Iz grafa na sliki 28 je razvidno, da se pri novem stanju višina gladine vodohrana Pivka spreminja tekom dneva. Nov vir očitno zagotavlja zadosten dotok vode, saj gladina vodohrana v nobenem časovnem koraku ne pade pod 305 centimetrov in se v večini primerov nahaja med 315 in 340 centimetrov.



Slika 25: Višina gladine vodohrana Duplje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov.

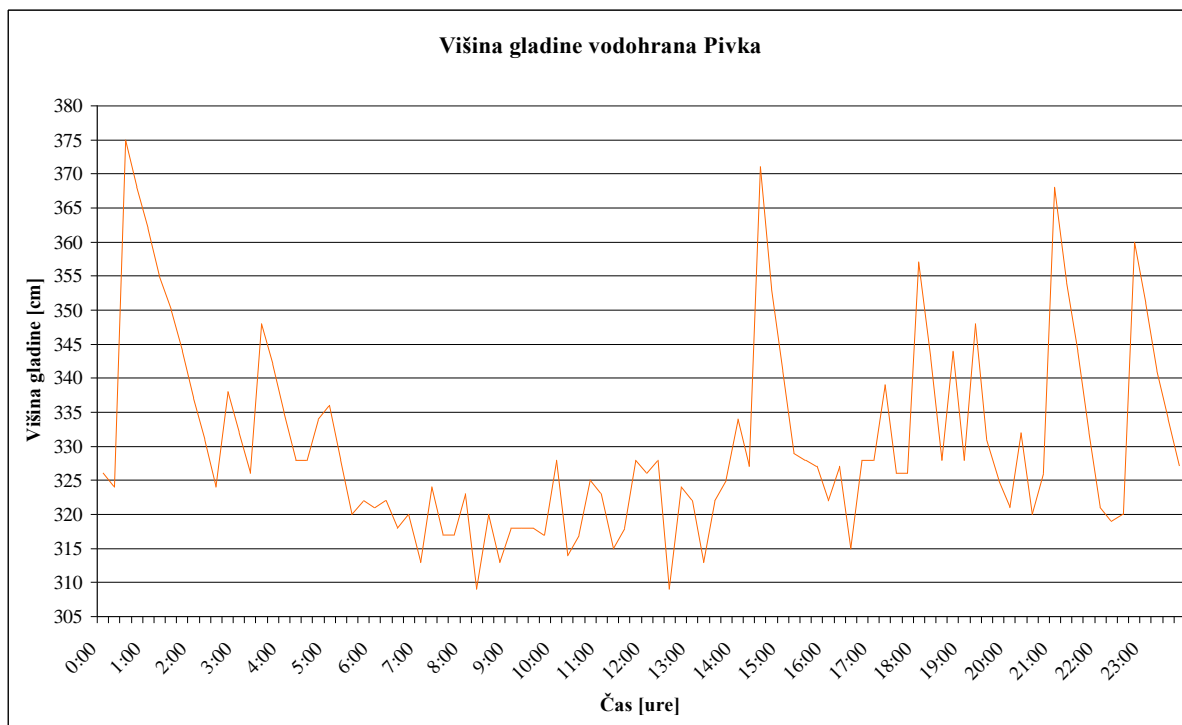


Slika 26: Višina gladine vodohrana Podbrezje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov.



Slika 27: Višina gladine vodohrana Strahinj v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov.

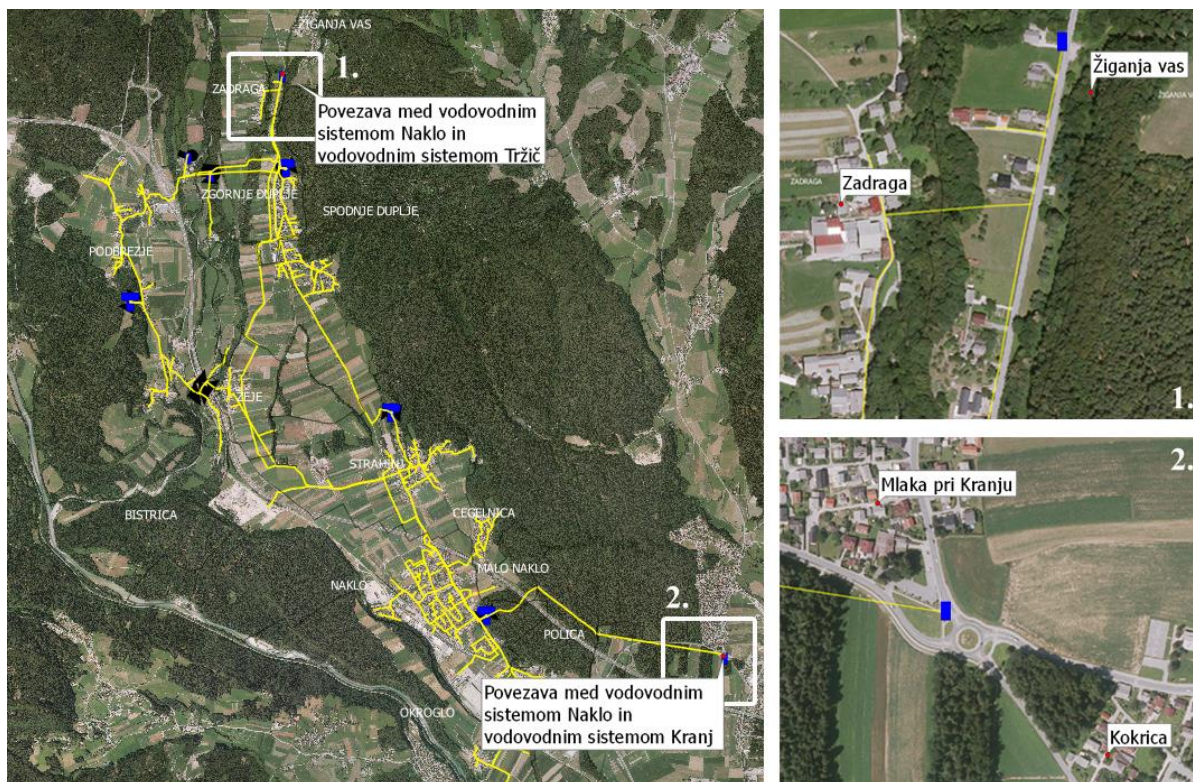




Slika 28: Višina gladine vodohrana Pivka v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov.

### 5.1.3 Hidravlični model obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj

Pri tem modelu sem naredil dodatne prilagoditve hidravličnega modela obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 5 barov. Območje občine Kranj, ki bi se z vodo oskrbovalo iz vodovodnega sistema Naklo, bi se hkrati še vedno oskrbovalo tudi z vodo iz vodovodnega sistema Kranj. Zato sem moral na novem stiku med vodovodnim sistemom Naklo in vodovodnim sistemom Kranj upoštevati tudi tlake v sistemu Kranj. Od Komunale Kranj(2015b) sem prejel podatke o višinah tlaka v vozlišču, kjer bi se lahko združila vodovodni sistem Naklo in vodovodni sistem Kranj. Vozlišče se nahaja v občini Kranj, podatki o višinah tlaka pa so pridobljeni iz obstoječega hidravličnega modela vodovodnega sistema Kranj za obdobje med 7.5.2016 in 7.6.2016. Podatki so zbrani za vsakih 15 minut tekom dneva. Na podlagi teh podatkov o višinah tlaka sem določil povprečno vrednost višine tlaka v vozlišču, ki znaša 4.68 bara. Na mestu vozlišča sem nato v svojem hidravličnem modelu postavil rezervoar Mlaka (slika 29) in mu za višino tlačne črte določil seštevek nadmorske višine kote terena in povprečne višine tlaka vozlišča v metrih.



Slika 29: Povezava vodovodnih sistemov Tržič, Naklo in Kranj

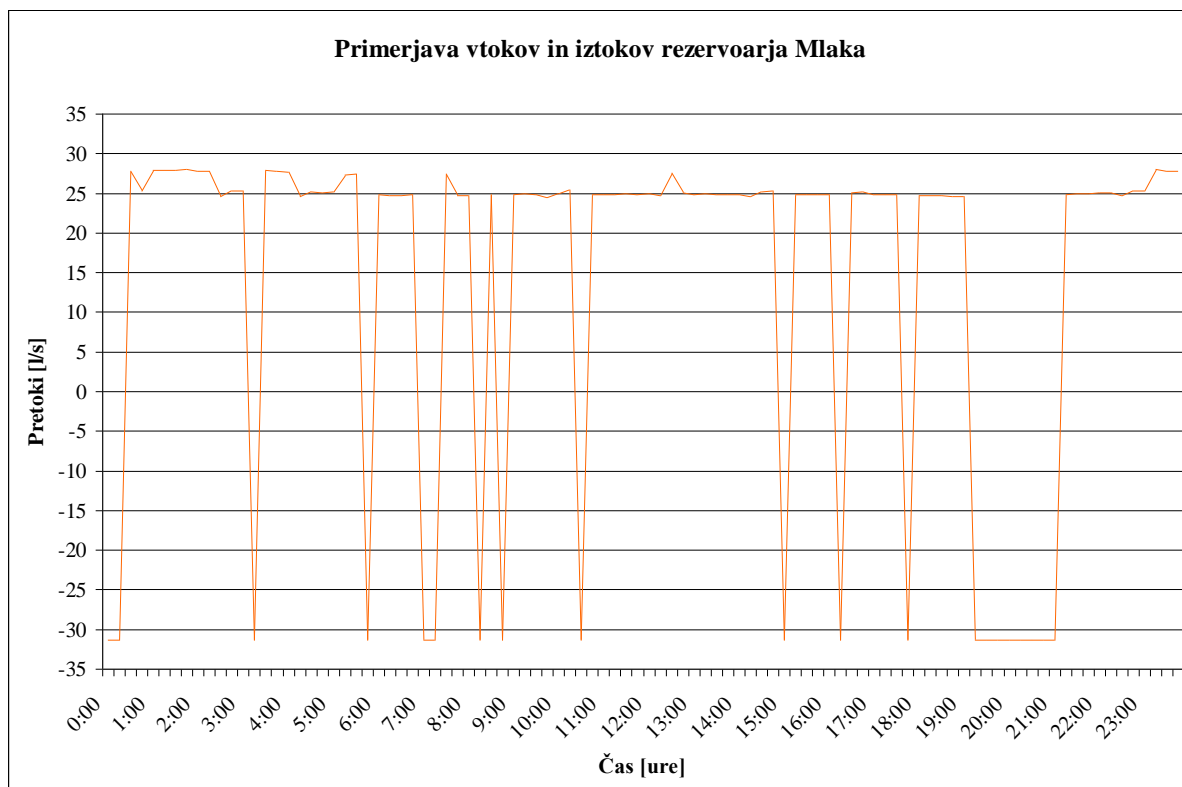
Po zagonu simulacije sem v rezultatih opazil, da se voda v večini časovnih korakov steka v rezervoar Mlaka, v dvajsetih časovnih korakih pa voda teče iz rezervoarja Mlaka v vodovodni sistem Naklo.

### Višine gladin v vodohranih

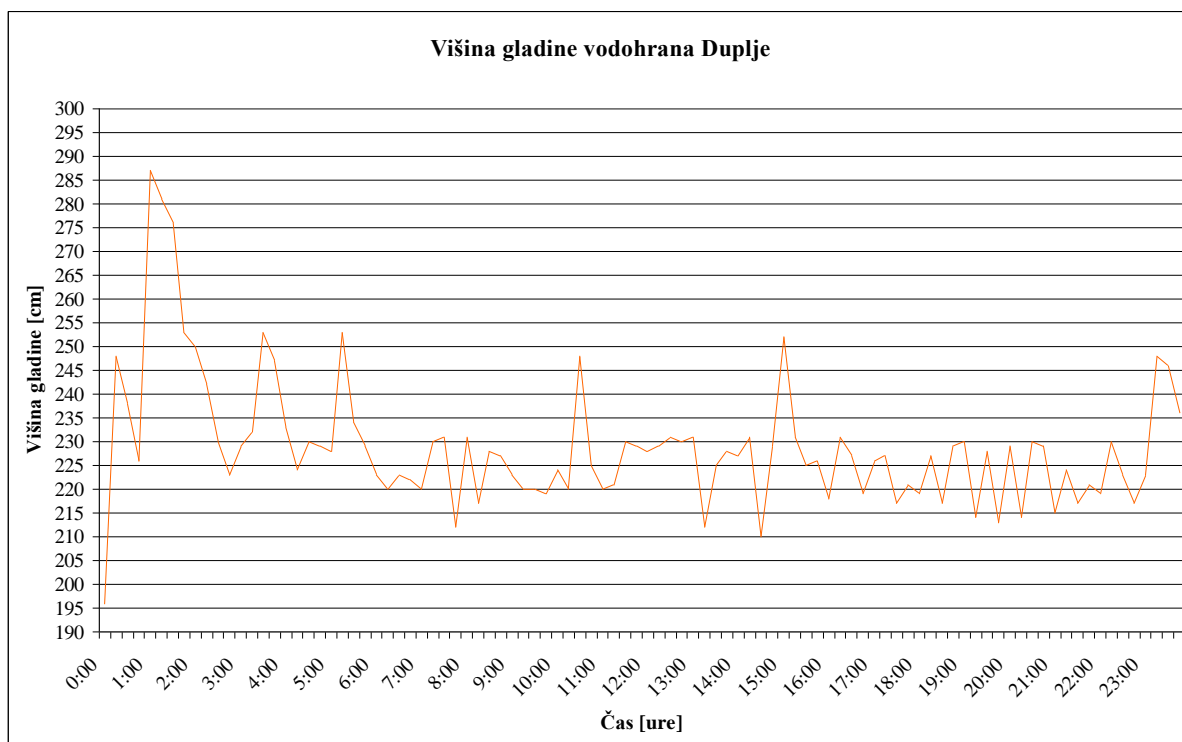
Višine gladin v vodohranih Duplje (slika 31), Podbrezje (slika 32) in Strahinj (slika 33) so podobne tistim iz simulacije hidravličnega modela obstoječega stanja. Vodohran Pivka (slika 34), pa ima v vseh časovnih korakih zadosten dotok vode.

### Rezervoar Mlaka

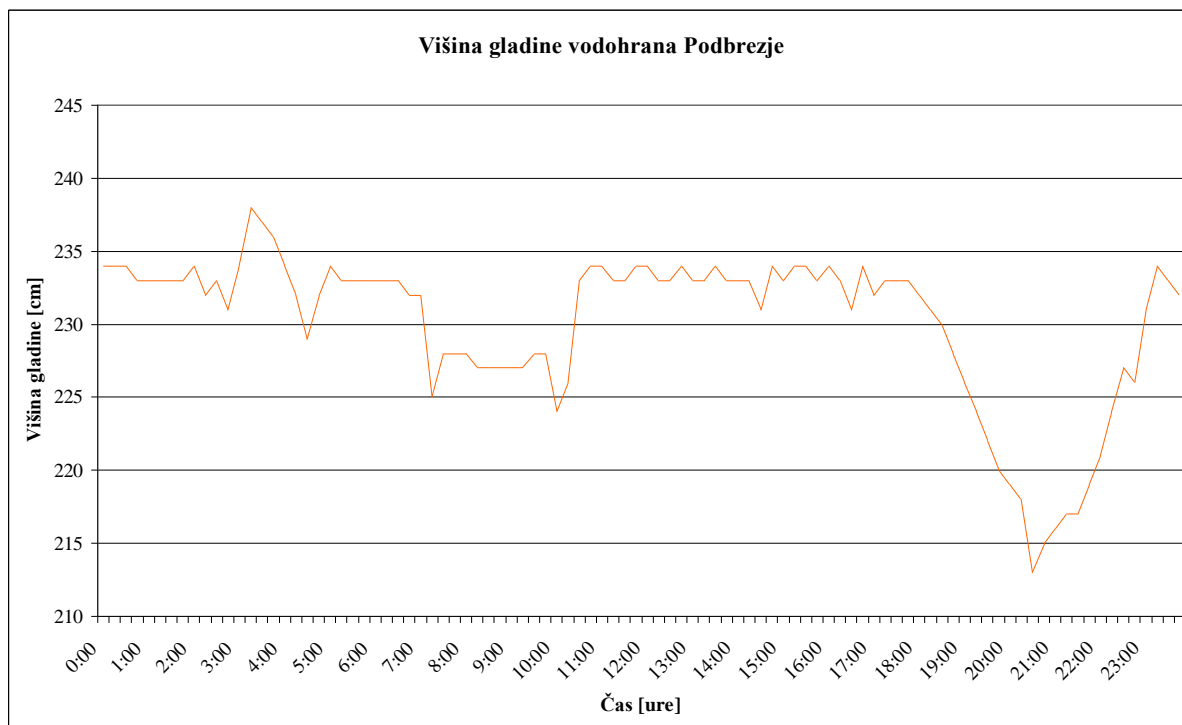
Pozitivne vrednosti pretokov predstavljajo vtok v rezervoar Mlaka (slika 30), negativne vrednosti pretokov pa iztok iz njega. V obstoječem stanju vodovodnega sistema Naklo je eden izmed virov vode vodovodni sistem Kranj. Tako bi bilo tudi v primeru, da bi naredili samo povezavo med sistemoma Naklo in Kranj. Novi vodni vir iz vodovodnega sistema Tržič s tlakom pet barov ni dovolj, da voda ne bi tekla tudi iz sistema Kranj v sistem Naklo.



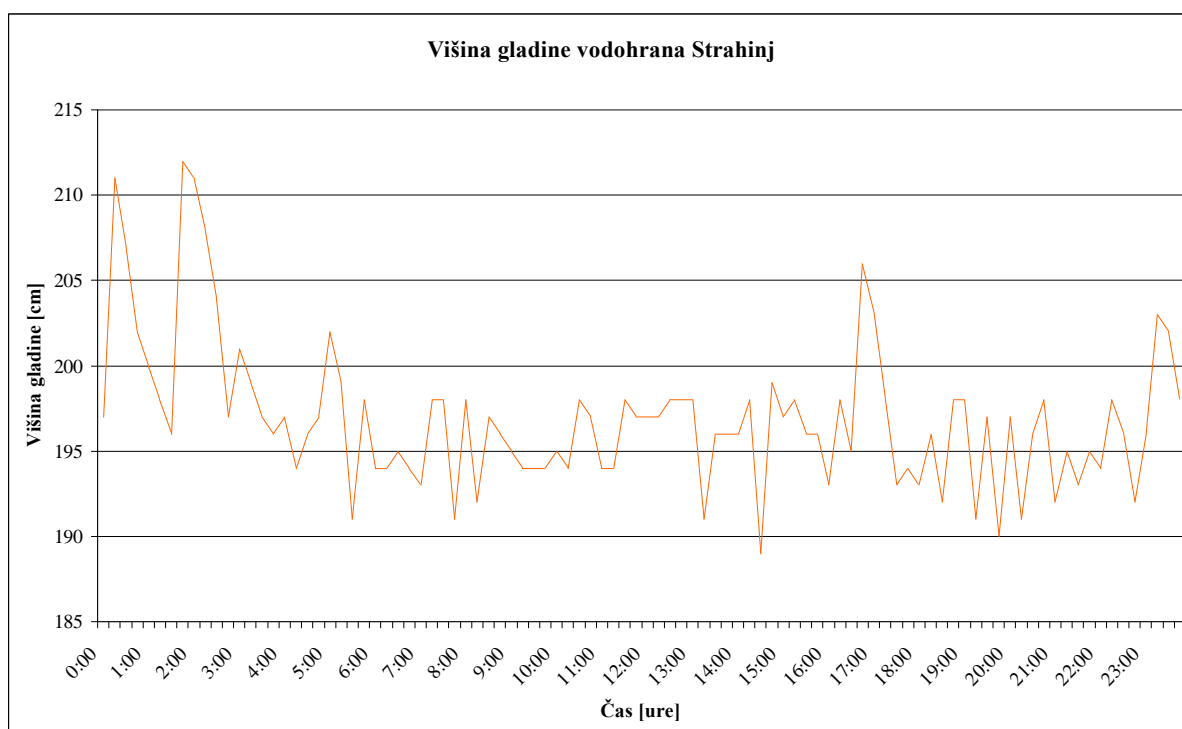
Slika 30: Pretoki v rezervoarju Mlaka, kjer pozitivne vrednosti pretokov pomenijo vtok v rezervoar, negativne vrednosti pretokov pa iztok iz rezervoarja



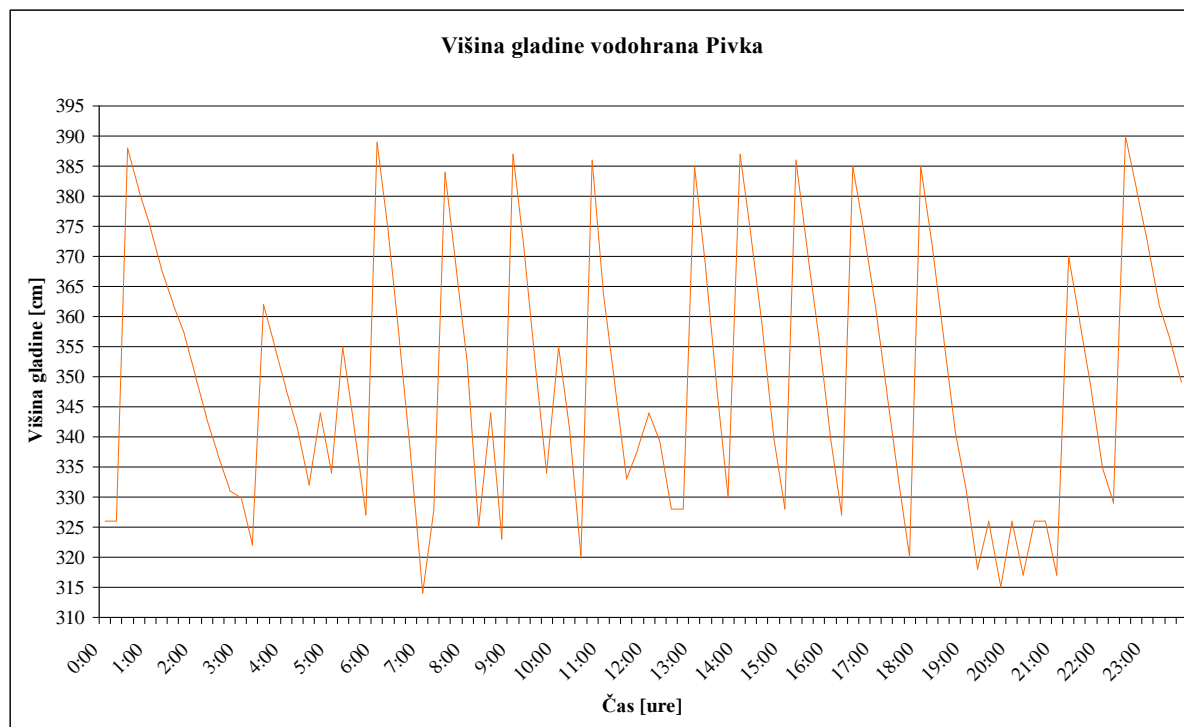
Slika 31: Višina gladine vodohrana Duplje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj.



Slika 32: Višina gladine vodohrana Podbrezje v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj.



Slika 33: Višina gladine vodohrana Strahinj v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj.



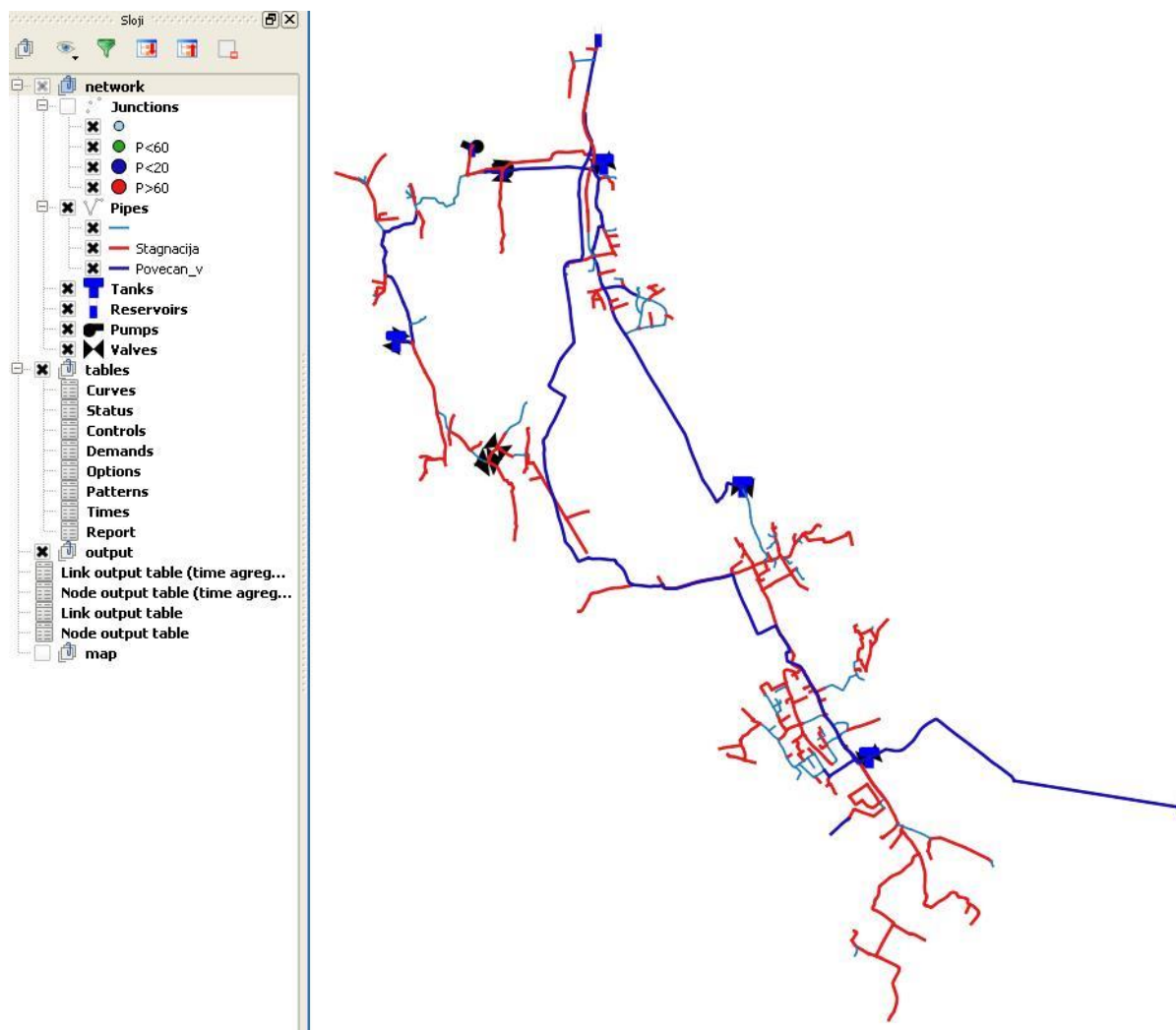
Slika 34: Višina gladine vodohrana Pivka v hidravličnem modelu z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj.

### Grafični prikaz rezultatov hidravlične simulacije

Na sliki 35 so prikazani grafični rezultati za povprečne hitrosti toka v ceveh. Naredil sem dve kategoriji hitrosti toka v ceveh:

- v prvi so cevi s povprečno hitrostjo toka manjšo od 0,1 m/s, označene z rdečo barvo,
- v drugi pa so cevi s povprečno hitrostjo toka večjo od 1,0 m/s označene s temno modro.

V rdeče označenih ceveh voda stagnira. Kot je razvidno iz slike 35 so to predvsem cevi, ki so del vejčaste strukture vodovodnega sistema Naklo. Voda v tem delu stagnira, ker se voda v teh ceveh pretaka samo v primeru dolvodne zahteve po vodi. V ceveh označenih s temno modro barvo so hitrosti tokov povišane. V to kategorijo spadajo nov transportni vodovod Zadruga-Naklo, povezava med vodovodnim sistemom Naklo in vodovodnim sistemom Kranj ter povezava med vodohranom Duplje in vodohranom Strahinj. Ti trije odseki cevi imajo skupno to, da je med njihovimi začetnimi in končnimi točkami velika višinska razlika, hkrati pa na te odseke niso priključena odjemna mesta. Na sliki 35 lahko opazimo tudi cevi označene s svetlo modro barvo. To so cevi, ki ne spadajo v nobeno od določenih kategorij. Njihova povprečna hitrost toka se nahaja med 0,1 m/s in 1,0 m/s. To so predvsem odseki cevi, ki se nahajo znotraj naselij v občini Naklo in so del mrežaste strukture vodovodnega sistema Naklo.

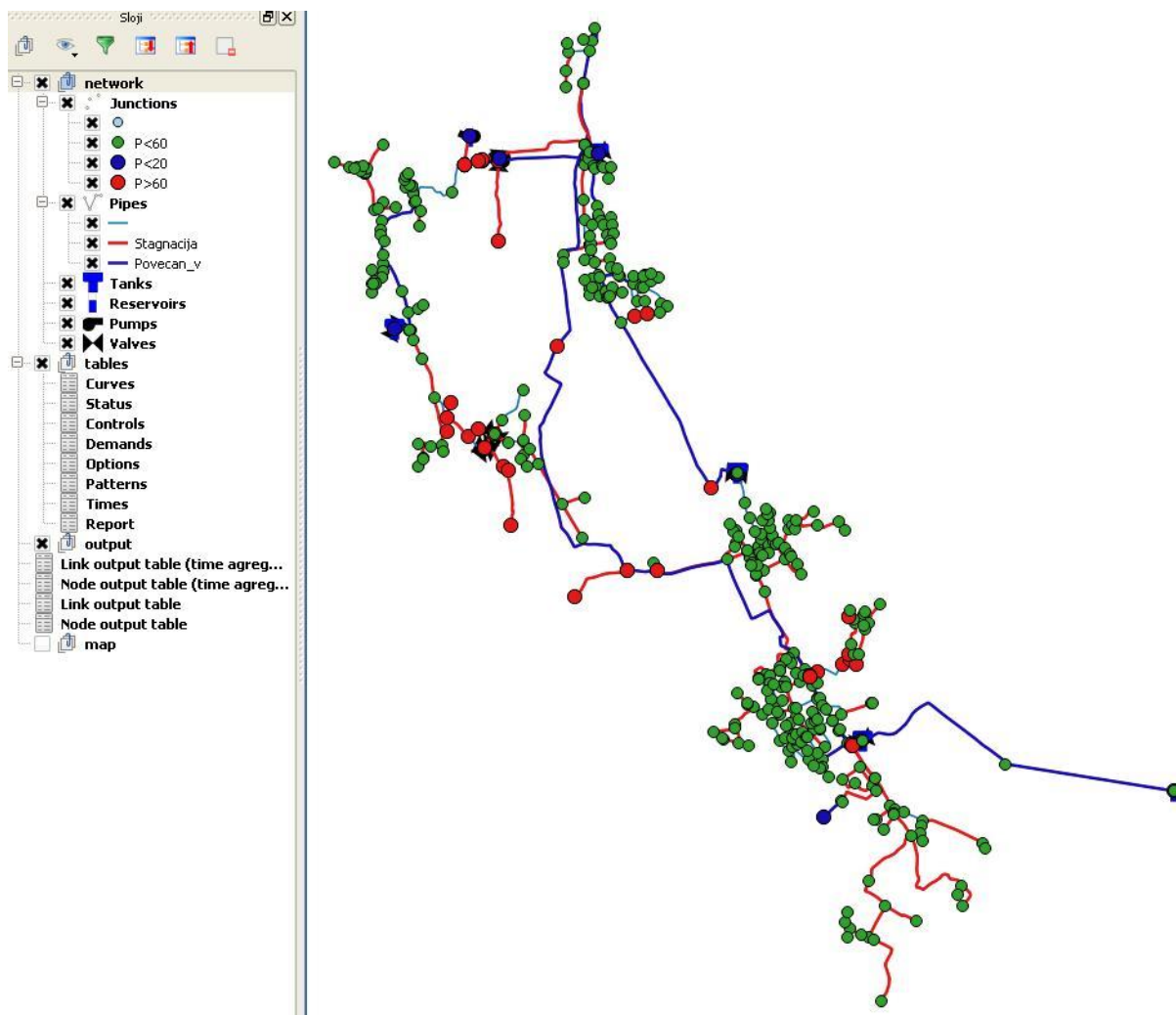


Slika 35: Povprečna hitrost toka v ceveh v hidravličnem modelu obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj

Na sliki 36 so prikazani grafični rezultati za maksimalne tlake v vozliščih. Naredil sem tri kategorije maksimalnih tlakov v vozliščih:

- v prvi so vozlišča, ki imajo maksimalni tlak nižji od 20 metrov vodnega stolpca (2 bara) in so označena z modro,
- v drugi so vozlišča, ki imajo maksimalni tlak višji od 60 metrov vodnega stolpca (6 barov) in so označena rdeče,
- v tretji pa so vozlišča, ki imajo maksimalni tlak nižji od 60 metrov vodnega stolpca (6 barov), ta pa so označena z zeleno.

Kot je razvidno iz slike 36 je večina vozlišč označenih z zeleno, kar pomeni, da imajo ugodne tlake. Manjši del vozlišč je označenih z modro (prenizki tlaki) in rdečo (previsoki tlaki).



Slika 36: Višina tlakov v vozliščih v hidravličnem modelu obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj

V primerjavi z ostalimi hidravličnimi modeli ima hidravlični model obstoječega vodovodnega sistema Naklo z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj najbolj ugodne rezultate. Vsi vodohrani imajo v vsakem časovnem koraku zadosten dotok vode, kar je enako kot pri modelu obstoječega stanja in modelu z novim tlačnim virom 5 barov. Razlika je v tlakih v vozliščih. Model z novim tlačnim virom 5 barov in povezavo z vodovodnim sistemom Kranj ima najbolj ugodne tlake v vozliščih. To je najbolj očitno v kraju Cegelnica, kjer ima večina vozlišč ugodne tlake, v modelu obstoječega stanja pa so imela najvišje ležeča vozlišča prenizke tlake. V modelu z novim tlačnim virom 5 barov brez povezave s Kranjem so imela skoraj vsa vozlišča v naselju Cegelnica previsoke tlake.

## 6 ZAKLJUČEK

Pri izdelavi diplomske naloge sem poleg nadgradnje znanja na področju hidravlike, pridobljenega tekom študija, dobil še novo praktično znanje o hidravličnem modeliranju vodovodnih sistemov. Da bi lahko izdelal hidravlični matematični model vodovodnega sistema Naklo sem se moral najprej spoznati z gradniki, ki tvorijo vodovodne sisteme, ter njihovimi lastnostmi in funkcijami. Na novo sem pridobil teoretično in praktično znanje o izdelavi hidravličnega modela, ki je poenostavljena verzija pravega vodovodnega sistema.

Za izdelavo modela je potrebno znanje različnih računalniških programov. Med procesom izdelave diplomske naloge sem nadgradil svoje znanje o programu EPANET, ter se poleg tega naučil delati še s programom QGIS. Oba programa sta odprtokodna in brezplačna za uporabo. Razlog za uporabo dveh programov pri izdelavi hidravličnega modela je v tem, da je EPANET dober program za izvajanje hidravličnih simulacij, ni pa grafično dovolj zmožljiv. Zato sem ga pri izdelavi hidravličnega modela kombiniral z GIS programom. Program QGIS sem izbral, ker se dobro dopolnjuje s programom EPANET in je relativno preprost za uporabo. Učenja uporabe programa QGIS sem se lotil sam, saj je program na spletu dobro podprt z informacijami. Tu bi še posebej rad poudaril stran na spletu, ki se imenuje QGIS Tutorials and Tips (<http://www.qgistutorials.com/en/>), saj ta poleg navodil za izvajanje posameznih funkcij programa QGIS, vsebuje še praktične primere, ki jih lahko prenesemo na svoj računalnik in preizkusimo. Veliko informacij o uporabi QGIS-a se najde tudi na strani Stack Exchange - GIS (<http://gis.stackexchange.com/>), kjer so posamezni uporabniki strani že postavili vprašanja o programu in dobili odgovore izkušenejših kolegov. Vsa vprašanja, ki sem jih imel sam, so bila že postavljena, ter imela tudi odgovore. Povezavo med programoma EPANET in QGIS omogoča vtičnik »qgis-epanet« proizvajalca Oslandia. Poleg vtičnika je na strani GitHub (<https://github.com/Oslandia/qgis-water-management-cookbook>) na voljo tudi izdelan hidravlični model za portugalsko mesto Coimbra. Hidravlični model je izdelek podjetja Águas de Coimbra, ki upravlja vodovodni sistem mesta Coimbra. Hidravlični model je narejen do te mere, da lahko po prenosu na svoj računalnik zaženemo simulacijo in dobimo rezultate. Ta model sem uporabil kot osnovo za moj model, saj morajo biti .shp sloji in .dbf sloji za uspešen zagon simulacije izdelani po točno določenih pravilih.

Cilj moje diplomske naloge je bil izdelati delujoči hidravlični model vodovodnega sistema Naklo, ki bo posnemal obstoječe stanje vodovodnega sistema Naklo. Hidravlični model sem uspešno izdelal, tako da sem lahko izvedel simulacijo in dobil rezultate hidravličnih neznank v vodovodnem sistemu. Rezultati višin gladin vodohranov so se mi v večini primerov ujemali z višinami gladin iz meritev SCADA. Problematičen je bil edino vodohran Strahinj, ker se mi gladina vodohrana, kljub umerjanju,



ni najbolj ujemala s podatki iz SCADE. Za boljšo umeritev bi potreboval več podrobnejših podatkov o vodovodnem sistemu Naklo, katere bi pridobil z meritvami na vodovodnem sistemu.

V Komunali Kranj imajo zgrajen nov transportni cevovod, v prihodnosti pa nameravajo svoj sistem povezati z vodovodnim sistemom Tržič, ki bo hkrati postal tudi nov in edini vodni vir vodovodnega sistema Naklo. Ker naj bi imeli na voljo dva različna vhodna tlaka novega vodnega vira, sem za vsako različico izdelal svoj hidravlični model, ter ugotovil, da različica s tlakom petih barov ustreza medtem, ko tista z dvema baroma ni ustrežna. Nova modela tako služita za ugotavljanje ustrežnejšega novega vodnega vira. Če bi želeli modela uporabiti kot pomoč pri odločitvah o fizičnih spremembah na vodovodnem sistemu Naklo, bi bilo potrebno modela izboljšati z uporabo natančnejših podatkov.

Četrty izdelan hidravlični model je poleg novega vira s tlakom pet barov vseboval tudi povezavo med vodovodnim sistemom Naklo in vodovodnim sistemom Kranj. S tem modelom sem želel pokazati kaj se zgodi, če se vodovodna sistema samo poveže brez dodatnih posegov. Rezultat hidravlične simulacije je pokazal, da v večini časovnih korakov voda teče iz sistema Naklo v sistem Kranj. V dvajsetih korakih pa teče voda iz sistema Kranj v sistem Naklo. Ta hidravlični model lahko služi kot osnova za nadaljnje raziskave, saj bi ga lahko z manjšimi prilagoditvami nastavili tako, da bi voda lahko tekla samo iz sistema Naklo v sistem Kranj, obratno pa ne.

## 7 VIRI

Boulos, P.F., Lansey, K.E., Karney, B.W. 2006. Comprehensive water distribution system analysis handbook for engineers and planners. 2nd Edition. Pasadena, MWH Soft: 490 str.

Kozelj, D., TT, GM, KM, ŽP, RM, KU, JŠ, BV, JP, Ružič, T., Zver, B., Jerše, G., Steinman, F. 2015. Razvoj orodij za celovito upravljanje vodovodnih sistemov. Razpis – Po kreativni poti do praktičnega znanja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 103 str.

Lambert, A. 2000 What do we know about pressure:leakage relationships in distribution systems?. V: System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management, Specialized Conference Proceedings, IWA, May, Brno (Czech Republic): 8 str.

Mays, L.W., 1999. Water distribution systems handbook. New York, McGraw-Hill Education: 912 str.

Pravilnik o pitni vodi 2004. Uradni List RS št.19-865/2004: 2155.

Rajar, R. 1997. Hidromehanika. Ponatis. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Formatisk: 235 str.

Rossman, L.A. 2000: EPANET 2 Users Manual. Cincinnati, U.S Environmental Protection Agency: 200 str.

Steinman, F. 1999. Hidravlika. Prvi ponatis. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 295 str.

Tahir, A.J., Ganc, M., Kunšek, J., Bunčič, G., Kovač, M., 2014. Operativni program oskrbe s pitno vodo. Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor: 100 str.

Uredba o oskrbi s pitno vodo 2012. Uradni List RS št.88-3498/2012: 9038.

Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A., et al. 2003. Advanced Water Distribution Modelling and Management. Prva izdaja. Waterbury, Heastad Methods: 751 str.

### *Elektronski viri*

ARSO. 2015. Atlas okolja.

[http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas\\_Okolja\\_AXL@Arso](http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso)

(Pridobljeno 9. 11. 2015.).

Beck, S., Collins, R. 2008. Moody diagram. Wikimedia.

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Moody\\_diagram.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Moody_diagram.jpg)

(Pridobljeno 30. 7. 2016.)

DVGW, 2003. DVGW-Arbeitsblätter W 392 Entwurf und W 400-3-B1 Entwurf – Wasserverlust, Inspektion und Wartung von Netzen. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V..

<http://www.dvgw.de/wasser/netze-und-speicherung/rohrleitungssysteme/wasserverlust-in-rohrnetzen/>

(Pridobljeno 12. 6. 2016.)

Lenntech BV. 2015. Catalogue of Grundfos centrifugal pumps – SP 46.

<http://www.lenntech.com/Data-sheets/Grundfosliterature-SP-46-L.pdf>

(Pridobljeno 22. 12. 2015.)

Open Design Alliance. 2015. Teigha File Converter.

<https://www.opendesign.com/guestfiles/TeighaFileConverter>

(Pridobljeno 12. 07. 2015.)

Oslandia. 2014. QGIS plugin for water management. Oslandia, objavljeno 19.02.2014.

<http://www.oslandia.com/qgis-plugin-for-water-management-en.html>

(Pridobljeno 15. 6. 2015.)

Oslandia. 2015. Qgis-epanet.

<https://github.com/Oslandia/qgis-epanet>

(Pridobljeno 15. 6. 2015.)

PISO. 2015. Prostorski informacijski sistem občin.

<http://www.geoprostor.net/piso/ewmap.asp?obcina=NAKLO>

(Pridobljeno 19. 1. 2016.)

Pitnavoda-zgornjasava. 2015

<http://www.pitnavoda-zgornjasava.si>

(Pridobljeno 2. 3. 2016.)

QGIS. 2015. QGIS User Guide – Release 2.6.

[http://docs.qgis.org/2.8/en/docs/user\\_manual/](http://docs.qgis.org/2.8/en/docs/user_manual/)

(Pridobljeno 12. 6. 2015.)

### ***Neobjavljeni viri***

Komunala Kranj. 2015a. Zasnova vodovodnega sistema Naklo. Javno podjetje Komunala Kranj d.o.o. Osebna komunikacija. (17. 11. 2015.)

Komunala Kranj. 2015b. Podatki o vodovodnem sistemu Naklo. Javno podjetje Komunala Kranj d.o.o. Osebna komunikacija. (26. 11. 2015.)

Kozelj, D., 2016. Osebna komunikacija. (22. 3. 2016.)