

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:

Grubar, B., 2016. Hidravlična analiza vodovodnega sistema Kostanjevice na Krki. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Steinman, F., somentor Kozelj, D.): 119 str.

Datum arhiviranja: 25-08-2016

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:

Grubar, B., 2016. Hidravlična analiza vodovodnega sistema Kostanjevice na Krki. Master Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Steinman, F., co-supervisor Kozelj, D.): 119 pp.

Archiving Date: 25-08-2016

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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM DRUGE STOPNJE  
VODARSTVO IN OKOLJSKO  
INŽENIRSTVO**

Kandidat:

**BORIS GRUBAR**

**HIDRAVLIČNA ANALIZA VODOVODNEGA SISTEMA  
KOSTANJEVICE NA KRKI**

Magistrsko delo št.: 10/II.VOI

**HYDRAULIC ANALYSIS OF THE KOSTANJEVICA NA  
KRKI WATER SUPPLY SYSTEM**

Graduation – Master Thesis No.: 10/II.VOI

**Mentor:**

prof. dr. Franc Steinman

**Somentor:**

asist. dr. Daniel Kozelj

Ljubljana, 23. 08. 2016

## ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

Spodaj podpisani študent Boris Grubar, vpisna številka 26410039, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Hidravlična analiza vodovodnega sistema Kostanjevica na Krki

### 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: Ljubljana

Datum: 18.8.2016

Podpis študenta/-ke:

**BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKI**

UDK: 621.867.7:628.1(497.4)(043)  
Avtor: Boris Grubar  
Mentor: prof. dr. Franc Steinman  
Somentor: asist. dr. Daniel Kozelj  
Naslov: Hidravlična analiza vodovodnega sistema Kostanjevica na Krki  
Obseg in oprema: 119 str., 104 sl., 15 tab.  
Ključne besede: Vodovodni sistem, hidravlični model, GIS, vodne izgube

**Izvleček**

Magistrska naloga obsega analizo hidravličnih razmer na območju vodovodnega sistema Kostanjevica na Krki. Večji poudarek v nalogi je bil namenjen metodam iskanja vodnih izgub. Ob zbiranju ustreznih podatkov sem se srečal s pojavom neznanih hidravličnih veličin, ki na vodovodnem sistemu niso merjene ali pa so meritve zgolj približna ocenjena. Izzivi, ki so otežili izdelavo hidravličnega modela, so me usmerile k oblikovanju predlogov in sistema za kakovostnejši zajem podatkov in meritev za potrebe hidravličnega modeliranja vodovodnih sistemov. Tako sem oblikoval mrežo merilnih mest, katera so razporejena na posameznih objektih vodovodnega sistema ali predstavljajo del merilnega območja. Število merilnih mest je lahko poljubno, sam sem se omejil na število mest, ki bi zadostilo pridobitvi zadostnega obsega kakovostnih podatkov, s pomočjo katerih bi bilo moč oblikovati umerjen hidravlični model. S tem bi bilo zagotovljeno, da je na razpolago dovolj meritev za umerjanje hidravličnega modela.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

UDK: 621.867.7:628.1(497.4)(043)  
Author: Boris Grubar  
Supervisor: prof. Franc Steinman, Ph. D  
Assistant: assist. Daniel Kozelj, Ph. D.  
Title: Hydraulic analysis of the Kostanjevica na Krki water supply system  
Notes: 119 p., 104 fig., 15 tab.  
Key words: Water supply system, hydraulic model, GIS, water losses

### **Abstract**

The Master thesis covers the hydraulic analysis of the water supply system of Kostanjevica na Krki. The emphasis of the thesis is on methods for water loss identification. While collecting suitable data several unknown hydraulic quantities of the water supply system that are not measured or are just approximations of true measured values. These challenges, which made it difficult to construct a hydraulic model, led me to elaborating suggestions and a system for quality data collection and measurements for hydraulic modeling of water supply systems. This way I elaborated a measurement scheme that did not involve only the important hydraulic structures on the water supply system, but also the newly proposed DMA zones. The number of measurement locations is can be arbitrary, while I focused on a scheme that would ensure the collection of sufficient quality data to form a calibrated hydraulic model. This would guarantee sufficient measurement data for a calibration process.

## ZAHVALA

Za pomoč in podporo bi se rad zahvalil mentorju prof. dr. Francu Steinmanu in asistentu dr. Danielu Kozelju za pomoč in vse strokovne nasvete v času oblikovanja magistrskega dela.

Zahvaljujem se staršem za omogočen študij in sestrama, ki sta me spodbujali v času študija.

Zahvaljujem se tudi sošolcem in prijateljem, s katerimi smo med študijem sodelovali, si pomagali in se družil tudi izven študijskih klopi. Upam, da se naši odnosi ohranijo in da ostanemo prijatelji.

Posebna zahvala tudi Tadeji, ki me je v času študija, učenja in oblikovanja magistrskega dela vedno vzpodbujala, razveseljevala in vlivala dodatnih moči in elana. Hvala ti, s svojim nasmehom in pozitivnim pristopom si res pravi zgled za vse.

## KAZALO VSEBINE

<b>Jamova cesta 2 .....</b>	<b>1</b>
<b>1000 Ljubljana, Slovenija.....</b>	<b>1</b>
<b><a href="http://www3.fgg.uni-lj.si/">http://www3.fgg.uni-lj.si/.....</a></b>	<b>1</b>
<b>DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG .....</b>	<b>1</b>
<b>V zbirki je izvirna različica izdajatelja .....</b>	<b>1</b>
<b>University .....</b>	<b>1</b>
<b>Jamova cesta 2 .....</b>	<b>1</b>
<b>DRUGG – The Digital Repository .....</b>	<b>1</b>
<b>This is a publisher’s version PDF file.....</b>	<b>1</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 TEORETIČNA IZHODIŠČA .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Vodovodni sistem.....</b>	<b>2</b>
2.1.1 Razdelitev vodovodnih sistemov .....	3
<b>2.2 Osnovne hidravlične zakonitosti vodovodnih sistemov .....</b>	<b>6</b>
2.2.1 Račun stalnega enakomernega toka v tlačnih cevovodih .....	6
2.2.2 Energijske izgube pri toku tekočine v cevovodih .....	8
<b>2.3 Fizikalni robni pogoji (kontrola podtlakov) .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4 Nekaterne inženirske poenostavitve .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5 Karakteristika cevovoda.....</b>	<b>16</b>
<b>2.6 Črpalka kot dodaten izvir energije v sistemu.....</b>	<b>17</b>
2.6.1 Črpalna krivulja in točka obratovanja črpalke.....	18
2.6.2 Moč črpalke.....	20
2.6.3 Izkoristek črpalke .....	20
2.6.4 Sistem več črpalk.....	21
<b>2.7 Nihanje porabe vode.....</b>	<b>22</b>
<b>2.8 Uporabljen programski oprema za izdelavo hidravličnega modela .....</b>	<b>24</b>
2.8.1 GIS okolje.....	24
2.8.2 Vmesnik qgis epanet.....	28
2.8.3 EPANET 2.0 .....	29
<b>2.9 Vodne izgube .....</b>	<b>32</b>
2.9.1 Vodna bilanca.....	34
2.9.2 Nastanek vodnih izgub.....	35
2.9.3 Identifikacija vodnih izgub.....	36
2.9.4 Izvajanje monitoringa .....	38



<b>2.10</b>	<b>Metode odkrivanja okvar na sistemu .....</b>	<b>41</b>
2.10.1	Akustične metode .....	42
2.10.2	Neakustične metode .....	47
2.10.3	»IN-PIPE« akustična tehnologija.....	49
2.11.4	Ostale tehnologije.....	51
2.10.4	Matematične metode (analize) .....	52
<b>2.11</b>	<b>Upravljanje z vodnimi izgubami.....</b>	<b>55</b>
2.11.1	Upravljanje s tlaki.....	56
<b>2.12</b>	<b>Sanacija okvar .....</b>	<b>60</b>
<b>2.13</b>	<b>Kazalci na vodovodnih sistemih.....</b>	<b>61</b>
<b>2.14</b>	<b>Poslovno upravičena analiza vodnih izgub .....</b>	<b>65</b>
<b>3</b>	<b>OBRAVNAVANO OBMOČJE.....</b>	<b>68</b>
<b>3.1</b>	<b>Opis obravnavanega območja .....</b>	<b>68</b>
<b>3.2</b>	<b>Prostorski razvoj in smernice občine Kostanjevica na Krki na podlagi OPN-ja 69</b>	
<b>3.3</b>	<b>Upravljalca omrežja .....</b>	<b>69</b>
<b>3.4</b>	<b>Obravnavani vodovodni podsystem .....</b>	<b>70</b>
3.4.1	Objekti na obravnavanem vodovodnem sistemu.....	71
3.4.2	Poškodbe cevovoda na obravnavanem vodovodnem sistemu .....	84
3.4.3	Poraba vode na obravnavanem sistemu .....	84
<b>4</b>	<b>Obdelava pridobljenih podatkov, vzpostavitev hidravličnega modela in priprava aktivnosti za pridobitev potrebnih podatkov .....</b>	<b>86</b>
<b>4.1</b>	<b>Obdelava podatkov za potrebe hidravličnega modela .....</b>	<b>86</b>
<b>4.2</b>	<b>Hidravlični model.....</b>	<b>90</b>
4.2.1	Elementi hidravličnega modela.....	90
4.2.2	Vzpostavitev hidravličnega modela.....	93
4.2.3	Rezultati hidravličnega modela.....	93
<b>4.3</b>	<b>Potrebne aktivnosti za podporo hidravličnemu modeliranju.....</b>	<b>103</b>
<b>5</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>116</b>
<b>6</b>	<b>VIRI .....</b>	<b>118</b>

## KAZALO SLIK

Slika 1: Vejičasti vodovodni sistem [8].....	5
Slika 2: Mrežasti vodovodni sistem [8] .....	5
Slika 3: Krožni vodovodni sistem [8] .....	6
Slika 4: Zakon o ohranitvi mase [9].....	7
Slika 5: Zakon o ohranitvi energije [7, str. 23] .....	9
Slika 6: Vpliv radija zaokrožitve na tokovnice pri vtoku v cev [1, str.40] .....	10
Slika 7: Tok v cevi [5, str. 26] .....	11
Slika 8: Moody-jev diagram [2, str. 35] .....	12
Slika 9: Krivulja karakteristike cevovoda [2, str. 48] .....	17
Slika 10: Centrifugalna črpalka [2, str. 95] .....	18
Slika 11: Črpalna krivulja [2, str.35] .....	18
Slika 12:Izkoristek črpalke [2, str.49] .....	21
Slika 13: Zaporedni in vzporedni način vgradnje črpalke [13] .....	22
Slika 14: Vzporedna vgradnja črpalke [14] .....	22
Slika 15: Vpliv velikosti naselja na dnevno nihanje porabe vode [15, str.28] .....	23
Slika 16: Nihanje porabe skozi dan [2, str.156].....	23
Slika 17: Kombinacija različnih grafičnih slojev [2, str.529].....	25
Slika 18: GIS karta [2, str.530].....	25
Slika 19: Organizacija delovanja GIS okolja [2, str. 531].....	26
Slika 20: Vzpostavitev hidravličnega modela [2, str. 544] .....	27
Slika 21: Zahtevani podatkovni in grafični sloji za hidravlični model .....	28
Slika 22: Okno vmesnika qgis epanet .....	29
Slika 23: Nastavitev direktorija programa za hidravlični račun v nastavitvah vtičnika .....	29
Slika 24: Vodna bilanca [1].....	35
Slika 25: Oblike puščanj na ceveh [25] .....	36
Slika 26: Meritve tlaka, pretoka in zvoka na odseku cevi [22, str. 3] .....	40
Slika 27: DMA območja in radij instrumenta za zaznavo zvoka [22, str. 6] .....	41
Slika 28: Časovni razvoj opreme in metod za detekcijo okvar [25, str.20] .....	42
Slika 29: Iskanje mesta okvare nad osjo cevi, z uporabo metode s talnim mikrofonom [25, str.21].....	44
Slika 30: Priključitev logerjev na hidrant, preko posebnega vmesnika [21, str. 7].....	44
Slika 31: Princip delovanja korelatorja za zaznavo šuma [25, str.22] .....	46

Slika 32: Rezultati uporabe GPR metode [25, str.26].....	48
Slika 33: Laboratorijski model [29, str. 8].....	48
Slika 34: Slabljenje oddanega valovanja v različnih zemljinah [30, str.2].....	49
Slika 35: Uporaba metode v cevi [25, str. 32].....	50
Slika 36: »Pametna krogla« [31, str.8].....	50
Slika 37: Notranjost krogle [31, str. 12].....	50
Slika 38: Graf rezultatov opravljenih meritev s kroglo [31, str. 13].....	51
Slika 39: Primer uporabe "in-pipe" metode [25, str.28].....	51
Slika 40: Štirje stebri upravljanja (managementa) z vodnimi izgubami [26].....	56
Slika 41: Avtomatski ventil za redukcijo tlaka [36].....	58
Slika 42: Uravnavanje pretoka na koncu območju s katero se zmanjša tlake na kritičnih točkah območja [35].....	59
Slika 43: Reparturna objemka za sanacijo mesta okvare na cevi [36].....	60
Slika 44: Standardne vrednosti za račun faktorja UARL [35, str.51].....	64
Slika 45: Krivulja stroškov zmanjšanja izgub z uporabo akustičnih tehnik [35, str .151].....	66
Slika 46: Krivulja stroškov za različne strategije zmanjševanja vodnih izgub [35, str .151]....	66
Slika 47: Ekonomska bilanca zmanjševanja izgub [35, str.153].....	67
Slika 48: Shema organiziranosti skupine Kostak [40, str.14].....	70
Slika 49: Zajetje Jama.....	72
Slika 50: Cev iz vrtine z merilcem pretoka.....	73
Slika 51: Merilnik pretoka - trenutni pretok (l/s).....	73
Slika 52: Merilnik pretoka - skupni pretok iz vrtine.....	73
Slika 53: Del črpalne cevi iz vrtine (levo) in sesalni del (desno).....	74
Slika 54: Vrtina s črpalko.....	74
Slika 55: Klorna postaja.....	75
Slika 56: Kloriranje na "stari" način - z merilno cevko in kroglico.....	75
Slika 57: Digitalni način dodajanja klora.....	75
Slika 58: PČR Jama.....	76
Slika 59: Črpalka v prečrpališču Jama.....	76
Slika 60: Merilnik pretoka na iztočni cevi črpalke prečrpališča Jama.....	76
Slika 61: Elektronska oprema za dodajanje klora v cevi z vodo.....	77
Slika 62: VH+PČR Avguštine.....	77
Slika 63: Prečrpališče Avguštine.....	77
Slika 64: Merilnik tlaka v prečrpališču Avguštine.....	78

Slika 65: Merilnik pretoka .....	78
Slika 66: Dotočna in iztočna cev iz vodne celice .....	78
Slika 67: Prostor s črpalko, merilcem tlaka in merilcem pretoka .....	79
Slika 68: Merilnik pretoka .....	79
Slika 69: VH Bajin vrh .....	80
Slika 70: Vpogled v vodno celico.....	80
Slika 71: VH Črneča vas.....	80
Slika 72: Dovodna cev (levo) in iztočna (desno) pred vodno celico .....	81
Slika 73: VH Jablance .....	81
Slika 74: Vtočna in iztočna cev s talnim izpustom .....	81
Slika 75: VH Orehovec – stari.....	82
Slika 76: Vodna celica.....	82
Slika 77: Košara za odvzem vode in prelivni profil cevi .....	83
Slika 78: Frekvenčni regulator .....	83
Slika 79: Vzorec porabe na obravnavanem območju .....	93
Slika 80: Pretok na črpalki Travnik.....	94
Slika 81: Pretok na črpalki Kamnolom.....	94
Slika 82: Nihanje gladine vode v vodohranu Kamnolom .....	95
Slika 83: Pretok na prečrpališču Orehovec.....	95
Slika 84: Nihanje gladine vode v vodohranu Orehovec .....	95
Slika 85: Pretok na črpališču Jama.....	96
Slika 86: Nihanje gladine vode v vodohranu Bajin vrh.....	96
Slika 87: Pretok na prečrpališču Jama .....	97
Slika 88: Nihanje gladine vode v vodohranu Avguštine.....	97
Slika 89: Pretok na prečrpališču Avguštine .....	97
Slika 90: Nihanje gladine vode v vodohranu Jablance .....	98
Slika 91: Nihanje gladine vode v vodohranu Črneča vas .....	98
Slika 92: Tlačne vrednosti v posameznem vozlišču ob srednji dnevni porabi.....	100
Slika 93: Pretoki po posameznih ceveh ob srednji dnevni porabi.....	103
Slika 94: Merilno območje 1 .....	107
Slika 95: Merilno območje 2 .....	107
Slika 96: Merilno območje 3.....	108
Slika 97: Merilno območje 4 .....	108
Slika 98: Merilno območje 5.....	109

Slika 99: Merilno območje 6.....	110
Slika 100: Merilno območje 7.....	110
Slika 101: Merilno območje 8.....	111
Slika 102: Merilno območje 9.....	112
Slika 103: Ultrazvočni merilnik pretoka [42] .....	113
Slika 104: Prenosni ultrazvočni merilnik pretoka [44] .....	114

## KAZALO TABEL

Tabela 1: Vhodni podatki elementov hidravličnega modela .....	31
Tabela 2: Hitrost potovanja EM valovanja skozi različne plasti [30, str.3] .....	49
Tabela 3: Mejne vrednosti koeficienta ILI [24] .....	65
Tabela 4: Število oskrbovanih prebivalcev .....	68
Tabela 5: Pregled vodovodnega omrežja [40] .....	71
Tabela 6: Izdatnost vodnih virov [40].....	71
Tabela 7: Podatki o dolžinah vodovodnega omrežja in materialu [37].....	83
Tabela 8: Pregled okvar po letih na obravnavanem sistemu [37] .....	84
Tabela 9: Tabela porabe na posameznem odjemnem mestu .....	86
Tabela 10: Del tabele atributov cevi obravnavanega vodovodnega sistema.....	87
Tabela 11: Koeficient hrapavosti za različne materiale cevi [42] .....	88
Tabela 12: Del tabele vozlišč obravnavanega vodovodnega sistema .....	89
Tabela 13: Vodni viri na obravnavanem območju .....	90
Tabela 14: Atributna tabela vodohranov na obravnavanem območju.....	91
Tabela 15: Črpalke na obravnavanem vodovodnem sistemu .....	92



## 1 UVOD

Enostavnejše oblike vodovodnih sistemov lahko najdemo že v prvih zapisih večjih civilizacij, ki so se navadno naselile v porečju večjih rek ali jezer, ki so zagotavljali uspešno rast in razvoj družbe. Skozi čas, so se zahteve in potrebe po pitni vodi spreminjale in rastle. Skupaj s tem pa je raslo tudi znanje in nove iznajdbe, ki so omogočale učinkovitejšo porabo načrpanih ali zajetih količin vode. Voda se z razvojem novih gospodarskih panog ni uporabljala zgolj za higieno, pitje in namakanje polj, vendar se je začela uporabljati v procesih predelave, hlajenja, pranja ali spiranja, ipd. Po številnih boleznih in težavah so začeli večjo pozornost namenjati čiščenju uporabljenih količin vode in zaščiti kakovostnih virov pitne vode, saj so se zavedali, da lahko le tako zagotovijo svoj obstoj. Potrebe po kakovostni pitni vodi rastejo, sami viri pa so količinsko omejeni. Zato se lahko v prihodnje nadejamo dodatnih zakonov na področju varovanja virov pitne vode in oskrbe s pitno vodo.

Veliko pozornost se namenja korigiranju področja vodnih izgub in njihovem zmanjševanju. V zadnjem desetletju se je povečal obseg investicij v iskanje rešitev za zmanjšanje vodnih izgub na vodovodnih sistemih in njihovo odpravo. Te lahko tudi v razvitem svetu, na starejših, slabše vzdrževanih vodovodnih sistemih, predstavljajo več kot 30 % razliko med količino načrpane in prodane vode. Z zmanjšanjem vodnih izgub na vodovodnem sistemu se zmanjša tudi obseg količin načrpane vode. S tem se ohranja dragocene in omejene količine vodnih virov. Zmanjšanje vodnih izgub poteka na področju izboljšav hidravličnega stanja in sanaciji cevovodov in objektov na vodovodnem sistemu. S tem se zagotovi tudi zanesljiva oskrba s pitno vodo, ki je v posameznih delih sveta postala nekaj samoumevnega in splošno pričakovane. V prihodnje bo potrebno oceniti vpliv podnebnih sprememb in predvideti dolgoročne načrte, s katerimi bi se lahko posamezna območja pripravila na povečanje ali zmanjšanje količin padavin. Zmanjšana količina padavin, lahko za določena območja predstavlja veliko težavo z oskrbo, saj je potrebno najti nove vode vire, ki bi jih bilo mogoče potrebno pripeljati tudi z več 10 km oddaljenih virov.

Cilj magistrske naloge zato obsega spoznavanje področja oskrbe s pitno vodo, vodovodnih sistemov in hidravlike ter poznavanje področja vodnih izgub. Ob pomoči upravljalca vodovodnega sistema Kostanjevica na Krki bom zbral ustrezne podatke, za potrebe oblikovanja hidravličnega modela. Primerljivost rezultatov hidravličnega modela in podatkov s terena omogoča, da se lahko hidravlični model uporabi tudi za iskanje mest oziroma območij na cevovodu, z večjim obsegom vodnih izgub. Te se indicirajo v obliki povečanih pretokov in porabe na določenem območju, ta pa so lahko določena s pomočjo hidravličnega modela. S tem se deloma zmanjša obsežno in dolgotrajno terensko delo iskanja mesta vodnih izgub na ceveh. Terensko delo se popolnoma ne odpravi, saj je iskanje specifičnega mesta okvare še vedno plod terenskega iskanja z uporabo različnih akustičnih naprav.

## 2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

Zbrana teoretična poglavja so obdelana z namenom spoznavanja področja vodovodnih sistemov, hidravličnih zakonitosti in vodnih izgub na vodovodnih sistemih. Poleg teh, sem obdelal tudi programsko opremo, ki omogoča urejanje geografskih podlog in programe za hidravlični izračun vodovodnega sistema.

### 2.1 Vodovodni sistem

Za besedno zvezo vodovodni sistem ali krajše vodovod, obstaja več različnih definicij. Prva, bolj splošna, ga razlaga kot sistem za preskrbo z vodo, kjer teče pitna voda od vira do porabnika. V poročilih javnih služb je vodovodni sistem definiran kot sistem elementov vodovoda (cevi, črpališč, vodohranov, hidrantov, itd.) s katerimi upravlja en upravljalec in pretežni del rednega obratovanja deluje kot samostojen sistem, hidravlično ločen od drugih vodovodnih sistemov. Ponekod so označeni tudi z izrazom razdelilno omrežje. Z njim se označuje tiste cevovode, ki dovajajo vodo porabnikom. Pri manjših vodovodih, kjer je porabnikov malo, je vodovodno omrežje preprosto in relativno poceni. V mestih, kjer je pozidava gosta, se uporablja dražje in zanesljivejše sisteme razdeljevanja vode.

Z besedo javni vodovod se v Uredbi o oskrbi s pitno vodo označi »vodovod, ki je kot občinska gospodarska javna infrastruktura namenjen izvajanju javne službe. Del javnega vodovoda je tudi zunanje hidrantno omrežje za gašenje požarov, ki je neločljivo hidravlično povezano z javnim vodovodom. Območje javnega vodovoda je območje, ki vključuje območja poselitve, obstoječa in predvidena poselitvena območja ali njihove dele ter posamezne stavbe ali gradbene inženirske objekte, za katere občina zagotavlja izvajanje javne službe ali je v občinskih predpisih zanje predvideno izvajanje javne službe iz enega javnega vodovoda«. [1]

S cevovodnimi sistemi je možno oskrbeti različne uporabnike. Oskrbujejo se naselja s pitno vodo, s tehnološkimi omrežji zadovoljujejo potrebe industrije po vodi, v kmetijstvu poznamo namakalne sisteme, itd. Kljub temu, da so vodovodni sistemi med seboj različni tako po velikosti omrežja, kompleksnosti izvedbe, številu elementov ki gradijo omrežje, številu in tipu vodnega vira, številu odjemalcev, itd., vse povezuje skupen cilj. Ta je zadovoljitev osnovne potrebe družbe po oskrbi s pitno vodo. Za doseg tega, je potrebno vse porabnike povezati v sistem in jih priključiti na ustrezno velik vodni vir. Tu je poleg zanesljivosti delovanja sistema pomembna tudi kvaliteta vode, zadostno število vodnih virov, zadostna izdatnost vira, zagotavljanje zadostnih količin vode v vsakem trenutku v vsaki točki sistema in zagotavljanje ustreznega in stalnega tlaka v sistemu. Omogočena mora biti tudi možnost priključitve dodatnega odjemalca na skoraj poljubni točki pripadajočega območja sistema. [2]

Zaradi velike porabe pitne vode in vedno večje nevarnosti onesnaženja vodnih virov, si je potrebno prizadevati za varčnejšo uporabo pitne vode in nadomeščanje pitne vode z industrijsko in tehnološko vodo povsod tam, kjer takšna kakovost vode ni nujno potrebna. Vedno višja cena pitne vode in tudi strožji predpisi na področju pitne vode so pripomogli k temu, da vedno več podjetij uporablja predelovalne postopke z zaprtim sistemom uporabe tehnološke vode. [3] Če načrtujemo, gradimo in vzdržujemo vodovode za tehnološke namene v industriji ali javno rabo, veljajo enaka pravila in navodila (razen kakovosti vode), kot za vodovodne sisteme s pitno vodo.



### 2.1.1 Razdelitev vodovodnih sistemov

Na zasnovo vodovodnega omrežja vplivajo faktorji oblike terena, značilnosti porabe vode, razporeditev porabnikov, vodnih virov, naravne (vodotoki,...) ali umetno ustvarjene ovire (ceste, železnice, priključeni objekti,...) in ostalo. Funkcionalnost in vzdrževanje omrežja zahtevata sistematičnost in urejenost pri vzpostavitvi in obratovanju sistema. [4]

V ta namen pri vodovodnem omrežju ločimo vodovodne sisteme: [3]

- a) glede na funkcionalno zasnovo (t.j. po namestitvi vodohrana)
- b) glede na dovod vode od zajetja do vodohrana oziroma porabnika
- c) glede na tlačne cone
- d) glede na najmanjši oskrbovalni tlak pri požaru
- e) glede na zgradbo omrežja

V nadaljevanju bodo vodovodni sistemi razdeljeni na več različnih načinov. Na katere, je opisano v poglavjih, ki sledijo.

#### a) Vodovodni sistemi glede na funkcionalno zasnovo

Razdelijo se lahko glede na različne oblike postavitve vodohrana v vodovodnem sistemu:

- s pretočnim vodohranom: iz črpališča se napaja vodohran, od koder voda odteka do uporabnikov.
- s protiležnim vodohranom za uporabniki: v primeru, da leži naselje v dolini, črpališče in vodohran pa ležita vsak na svojem hribu in sta si protiležna, govorimo o vodovodnem sistemu s protiležnim vodohranom. Pri tej izvedbi vodijo cevi iz črpališča do vodohrana skozi območje vodooskrbe. Ko je v vodovodnem omrežju majhna poraba, napajamo z vodo iz črpališča tako porabnike kot vodohran, kadar pa je poraba na sistemu velika, pa porabniki dobijo vodo delno iz črpališča, delno pa iz zaloge v vodohranu. Tak sistem je boljši od sistema s pretočnim vodohranom, kar se izkaže v izjemnih situacijah, kot so dnevne konice, požar ipd.
- pri kombiniranem sistemu imamo tako pretočne kot protiležne vodohrane: uporabljajo se pri večjih mestnih vodovodnih sistemih.

#### b) Delitev vodovodnih sistemov glede na dovod vode iz zajetja do vodohrana oziroma porabnikov

Glede na dovod vode iz zajetja do vodohrana ter porabnikov delimo vodovodne sisteme v težnostne (gravitacijske), tlačne (črpalne) in kombinirane. Pri težnostnem sistemu leži zajetje nad porabniki, dobavljena količina in tlak pa sta zadostna, zato črpanje vode ni potrebno. Voda teče gravitacijsko do vodohrana in nato enako do porabnikov. Tak sistem je cenejši, saj je brez črpalke. Pri tlačnem sistemu pa je zajetje na višini porabnikov ali celo nižje, zato je potrebno vodo do vodohrana črpati.

#### c) Delitev vodovodnih sistemov glede na tlačne cone

Poznamo enoconske in večconske vodovodne sisteme. Enoconski vodovodni sistem nastopi v uporabo v primeru, da je naselje višinsko raztegnjeno po pobočju, a je višinska razlika manjša od razlike med največjim in najmanjšim dovoljenim tlakom. Vsem porabnikom se lahko iz

enega vodohrana zagotovi ustrezen vodni tlak. Drugi primer pa nastopi, če je naselje višinsko raztegnjeno po pobočju, višinska razlika pa je večja od razlike med največjim in najmanjšim dovoljenim tlakom. V tem primeru se gradi dvoconski ali večconski vodovodni sistem, saj porabnikov ne bi mogli pokriti z eno samo cono.

d) Delitev vodovodnih sistemov glede na najmanjši oskrbovalni tlak pri požaru [3]

- A.  $H_{min} > H_{požar}$ : tlak v cevi je višji od tlaka, zahtevanega v primeru požara
- B.  $H_{min} < H_{požar}$ : dodaten tlak se vzpostavi s pomočjo gasilnih črpalk
- C. Vodo dovajamo od drugod: voda za gašenje se dovaja od drugod (jezero, itd.)

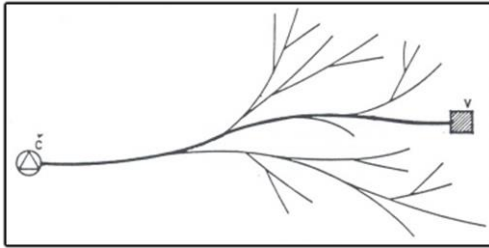
Navadno so vodovodni sistemi zasnovani tako, da je minimalni oskrbovalni tlak pri zagotovljenem pretoku večji ali enak zahtevanemu požarnemu tlaku. Takrat je v sistemu dovolj vode za gašenje požara neposredno iz hidranta (točka A). Pri sistemih, pri katerih je tlak v hidrantu 1,5 – 2,5 dinamičnega tlaka, se lahko požar gasi iz hidranta s pomočjo gasilskih črpalk (točka B). Tretja vrsta sistemov (točka C) pa zajame tiste vodovodne sisteme, v katerih je tlak tako majhen ( $< 1,5$  bara), da je v primeru požara potrebno vodo dovajati od drugod oz. jo priskrbeti iz drugih vodnih virov (npr. vodotok, jezero).

Pravilnik o tehničnih normativih za hidrantna omrežja za gašenje požarov (Uradni list SFRJ, št. 30/91) je predstavljal prvi tehnični predpis na naših tleh, ki je vseboval čemu vse mora hidrantno omrežje ustrezati, da se ga lahko spozna kot tehnično ustrezno hidrantno omrežje. Pravilnik je bil leta 2005 omejili, oziroma so nekaj členov preklicali s sprejetjem Tehnične smernice o požarni varnosti v stavbah. [6] Ta določa ukrepe, ki jih je potrebno izvesti, da stavba izpolnjuje zahteve glede zagotavljanja požarne varnosti. Objekti morajo biti projektirani tako, da se prepreči širitev požara na sosednje objekte in da za del časa trajanja požara ohranijo svojo projektirano nosilnost in s tem omogočijo varno evakuacijo ljudi. Definira tudi naprave za gašenje v objektih in pot. Ki jo je potrebno zagotoviti gasilskim enotam.

e) Delitev vodovodnih sistemov glede na zgradbo omrežja

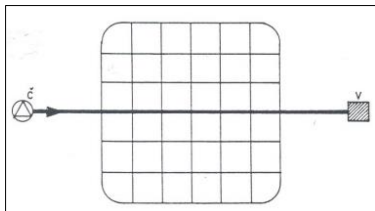
Navedeni sistemi se med seboj razlikujejo po tem, kako je izdelan razdelilni cevovod oziroma kako dobavljamo vodo porabnikom. V uporabi so trije načini tipi zgradbe: [3]

- Vejičasti sistem je najcenejši in hidravlično jasen vodovodni sistem. Voda po eni cevi priteka iz vodohrana in se razveji do posameznih uporabnikov. Oskrba z vodo ni povsem zanesljiva, saj je potrebno v primeru sanacije na cevi zapreti vodo odjemalcem, ki ležijo v nadaljevanju tiste veje cevi. Vejičasti sistem se uporabljajo pri manjših ali raztegnjenih naseljih z redko pozidavo. Za vsako vejo cevi in za vsak obtežni primer se lahko enolično določi velikost in smer toka vode v cevi. Govorimo o hidravlično določenem vodovodnem sistemu. Za vsak odsek med takimi točkami veljajo osnovne enačbe enodimenzijskega gibanja. Pri obdelavi cevovoda mora vedno veljati kontinuitetna enačba, saj morajo imeti vse cevi v skupnem vozlišču enako energijo. Enačbe se uporabi za vsak odsek posebej, povezujejo pa jih pogoji v skupnih vozliščih. [3]



Slika 1: Vejičasti vodovodni sistem [8]

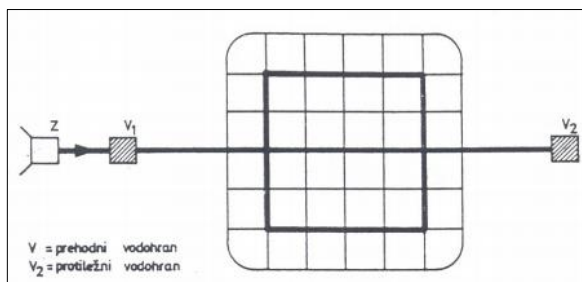
- Mrežasti sistem se uporablja v srednje velikih mestih. So boljša, dražja in zanesljivejša izvedba od prejšnjega, saj je tu vodovodno omrežje sklenjeno. Kadar se določena veja zapre, voda priteče po drugih ceveh, po daljši poti, zato se vodni tlak zmanjša, toda dobava vode se ne prekine. Te oblike omrežij so zaželena in tudi uporabnejše. V primeru okvaro na cevi, se lahko okvara osami in sanira, ne da bi pri tem motili večje število porabnikov. Druga prednost te oblike sistema je, da se enostavneje zagotovi nižje hitrosti v ceveh, ob tem pa se poveča kapaciteta sistema. [2]



Slika 2: Mrežasti vodovodni sistem [8]

- Najboljši, najdražji in najbolj zanesljiv je krožni sistem. Oblikuje se krožni, primarni cevovod večjega premera tako, da obkroža mesto. Iz njega se napajajo sekundarni cevovodi, ki oskrbujejo posamezne porabnike oziroma posamezne predele mesta. Cevi so povezane v posamezne zaprte krogotoke, ki so medsebojno povezani. V primeru zaprtja posamezne cevi, voda priteka do hiš po ceveh z druge strani, pretok in tlak se ne zmanjšata.

Sprememba v posamezni točki lahko vpliva tako na količino kot smer toka tudi v drugih prstanih. Govorimo o hidravlično »nedoločenem sistemu«. Hidravlični račun poteka s pomočjo iteracij, kjer se najprej predpostavi porazdelitev pretoka tako, da je kontinuitetna enačba izpolnjena. Po izračunu energijskih izgub (upoštevata se smer toka in robne pogoje), se preveri bilanco energije in nato z ustreznimi popravki še prvotno predpostavljene pretoke. Zahtevnost izračuna narašča s številom krogov (cevi) in z zahtevami po robnih pogojih. [3]



Slika 3: Krožni vodovodni sistem [8]

V praksi so navadno uporabljene kombinacije vseh naštetih sistemov. Razlog za to je moč iskati v (razpršeni) poselitvi, topografiji terena, ekonomični izvedbe projekta vodovoda, vzdrževanja vodovodnega sistema, logistike in obratovanja oziroma zagotavljanje stalnih pogojev pri vodooskrbi. [2]

## 2.2 Osnovne hidravlične zakonitosti vodovodnih sistemov

V tem poglavju so zbrane lastnosti in enačbe toka v cevovodih, ki so ključne pri hidravličnem modeliranju. Služijo kot osnova za samo razumevanje delovanja računalniških programov, interpretacijo izdelanih modelov in pravilno vrednotenje dobljenih rezultatov. Pri tem se vpelje določene predpostavke, kot ta, da je voda nestisljiva tekočina, da voda nima površinske napetosti, tok v cevi je stacionaren (hitrost in tlak se s časom ne spreminjata), ipd. Za hidravliko vodovodov je značilno, da je tok v ceveh pod tlakom in voda zapolnjuje celoten prečni prerez cevi, torej tok vode nima proste gladine. Praviloma je tak tok turbulenten in nestacionaren. [7]

Za optimalno dimenzioniranje vodovodnega sistema, je potrebno izdelati primerljiv hidravlični model obravnavanega omrežja, kar je možno z ustreznim poznavanjem in razumevanjem teoretične podlage. S pomočjo teh znanj, se lahko ugotavlja zveza med posameznimi hidravličnimi parametri in določa skladnost dejanskih vrednosti z dovoljenimi maksimalnimi oziroma minimalnimi vrednostmi. V začetni fazi se spremlja predvsem hitrost toka vode v cevi in velikost obratovalnega tlaka na vodovodnem sistemu.

### 2.2.1 Račun stalnega enakomernega toka v tlačnih cevovodih

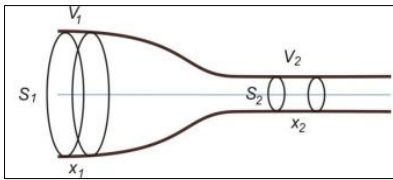
Premeri (prerezi) cevi se lahko na stikih hipoma spremenijo. Zato se lahko na posameznih odsekih obravnava tok tekočine kot enakomeren. Pretok je posledica razlike energijskih potencialov med dvema točkama sistema. Obravnavamo le primere, ko je možno privzeti, da je energija oziroma so tlaki v sistemu (po času) konstantni. [7]

Osnovne enačbe za hidravlični račun so: [7]

- Zakon o ohranitvi mase – bilanca mase
- Zakon o ohranitvi energije – bilanca energije
- Enačba za izračun energijskih izgub (linijske, lokalne)
- Fizikalne omejitve – kontrola podtlakov

### 2.1.1.1 Zakon o ohranitvi mase (kontinuitetna enačba)

Enačba o ohranitvi pretoka temelji na tem, da enači vtok in iztok na kontrolnem prečnem prerezu, kjer je masa tekočine v tem volumnu nespremenljiva.



Slika 4: Zakon o ohranitvi mase [9]

Če se ob tem upošteva predpostavki o nestisljivosti vode ( $\rho = \text{konst.}$ ) in o stacionarnem toku ( $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$ ) velja, da je pretok konstanten: [7]

$$\frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \rightarrow Q = \text{konst.}$$

$$Q = v * S \tag{1}$$

$$v_1 * S_1 = v_2 * S_2 = \dots = v_i * S_i$$

kjer je:

$v$ ...hitrost vode v cevi [m/s]

$S$ ...prečni prerez cevi [m<sup>2</sup>]

$Q$ ...pretok v cevi [m<sup>3</sup>/s]

Kontinuitetna enačba se uporablja v primeru enostavnih cevovodov na mestih, kjer se stikajo cevi z različnimi premeri. Zgoraj podani izraz je merodajen za enodimenzijski izračun. Kontinuitetna enačba se lahko zapiše tudi v drugi obliki. Zakon o ohranitvi mase namreč trdi, da v vsakem vozlišču vodovodnega sistema (v primeru nestisljive tekočine) celotni masni dotok v nek določen volumen načeloma enak iztoku iz tega volumna, h kateremu je potrebno prišteti morebitno spremembo, do katere v tem volumnu lahko pride. Če se te tokove razdeli na priključne cevovode, potrošnje in skladiščenje, se lahko dobljeno izrazi na naslednji način: [7]

$$\sum Q_{vt} * \Delta t - \sum Q_{iz} * \Delta t = \Delta V_{spr} \tag{2}$$

kjer je:

$Q_{vt}$  ... celotni dotok v vozlišče,

$Q_{iz}$  ... celotna potrošnja v vozlišču,

$\Delta t$  ... časovni interval, v katerem pride do spremembe volumna vode,

$\Delta V_{spr}$  ...sprememba volumna vode.

### 2.1.1.2 Zakon o ohranitvi energije

Zakon o ohranitvi energije govori o vplivu celotne dovedene energije na sistem. V sistemu gre za dovedeno toploto in odvzeto energijo, ki je posledica dela, ki ga sistem opravi za okolico.

[5] V hidrotehnični praksi spremembe energije zaradi dodane ali odvzete toplote in mehanskega dela niso običajne, zato se za enodimenzijski tok ob upoštevanju predpostavke o stacionarnem toku uporablja t.i. energijska enačba: [7]

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \sum \Delta E \quad (3)$$

ali krajše:

$$E_1 = E_2 + \sum \Delta E \quad (4)$$

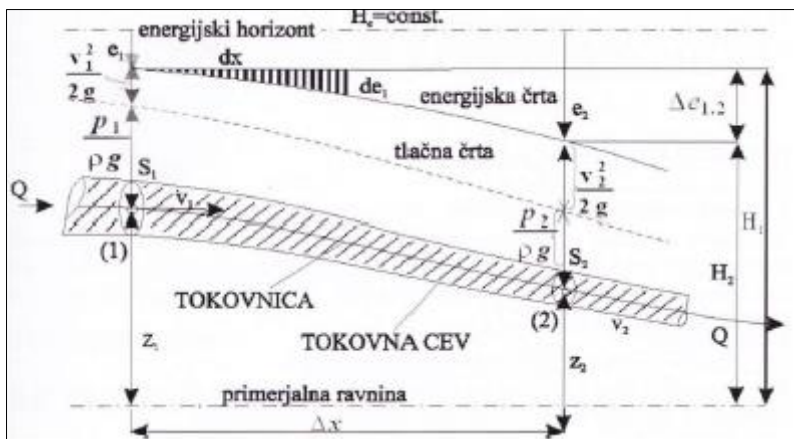
S komponentami energijske enačbe lahko izrazimo dve uporabni količini, piezometrično in energijsko višino. Piezometrična višina je vsota tlačne energijske višine ( $\frac{p}{\rho g}$ ) in višine potencialne energije ( $z$ ). To je višina, do katere se dvigne vodni stolpec v piezometru. V skicah le-to pogosto označujemo kot tlačno črto (ang. *Hydraulic Grade Line* - HGL). Energijska višina pa je vsota tlačne in potencialne energije ter kinetične energije ( $\frac{v^2}{2g}$ ). To je višina, do katere se dvigne vodni stolpec v pitotovi cevi. V diagramih jo pogosto imenujemo energijska črta (ang. *Energy Grade Line* - EGL). Ker se skupni prispevek teh členov med opazovanima prerezoma zmanjša, je potrebno upoštevati tudi preostali del energije ( $\sum \Delta E$ ), ki je v nadaljevanju opisan kot energijske izgube.

### 2.2.2 Energijske izgube pri toku tekočine v cevovodih

Energijska enačba pove, da se celotna energija ohranja. Če se v zaporednih prerezi primerja energijo posameznega prereza, se lahko ugotovi, da se energija v zaporednih primerjalnih točkah v smeri toka manjša. Ta energija ne gre v nič, ampak se spreminja v nepovratno obliko energije. Slednja se ujema s pojmom energijskih izgub.

Celotna energija sistema se po zakonu o ohranitvi energije ohranja ne glede na pretvorbe iz ene oblike energije v drugo. Določenih oblik energije v hidrotehniko ni moč izkoristiti, zato se energijo deli na povratni in nepovratni del. Povratni del predstavlja energija v obliki tlaka, potencialna in kinetične energije, nepovratni del pa predstavlja notranja energija. Ker nepovratnega dela energije ne moremo več izkoristiti, je v hidrotehničnem smislu izgubljen, zato se te oblike energije imenujejo tudi »energijske izgube«. [7]

Na sliki 5 je prikazano označevanje energijskih členov na primeru toka v cevi. Povratni del energije je prikazan s členi od primerjalne ravnine do energijske črte, nepovratni del pa se nahaja med energijsko črto in energijskim horizontom. Črta primerjalne ravnine in energijski horizont sta vzdolž toka med prerezoma 1 in 2 vzporedni, torej se je energija v tem delu sistema ohranila. Energijska črta je od primerjalnega prereza 1 do primerjalnega prereza 2 padajoča, torej se vzdolž toka povratni del energije manjša, nepovratni pa večja. Na ta račun se energijske izgube na opazovanem odseku večajo.



Slika 5: Zakon o ohranitvi energije [7, str. 23]

Ločimo dve vrsti energijskih izgub:

- Lokalne izgube, ki nastanejo zaradi lokalnih motenj (vtok, iztok, razširitve, zožitve, kolena,...).
- Linijske ali trenjske izgube, ki nastanejo zaradi premagovanja trenja vzdolž toka.

### Lokalne izgube

Pri daljših vodovodih in večjih vodovodnih omrežjih večinski delež energijskih izgub predstavljajo linijske izgube, zato se lahko v hidravličnem računu lokalne izgube zanemarijo. V cevovodnih omrežjih, ki vsebujejo relativno veliko spojnih členov glede na celotno dolžino cevi, pa imajo lokalne izgube pomemben vpliv na izgubo energije. Vzrok za lokalne izgube so lokalni elementi, ki povzročijo povečanje turbulence v toku vode. Med te elemente uvršča vse spojne elemente in ventile na ceveh. Za merilce (npr. tlaka), ki so nameščeni na ceveh velja, so te izgube minimalne ali jih sploh ni. Ti so vzrok za izgubo energije in skoke hidravlične črte v spojnih točkah sistema. Velikost teh izgub je primarno odvisna od oblike spojnih elementov, ki direktno vplivajo na obliko tokovnic v cevi. [2]

Prispevek lokalne izgube označimo z:

$$\Delta E_{\text{lok}} = \xi_{\text{lok}} \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

kjer je:

$\Delta E_{\text{lok}}$ ...lokalne izgube elemente [m vodnega stolpca]

$\xi_{\text{lok}}$ ...koeficient izgub za lokalne (spojne) elemente [-]

$v$ ...hitrost vode v cevi [m/s]

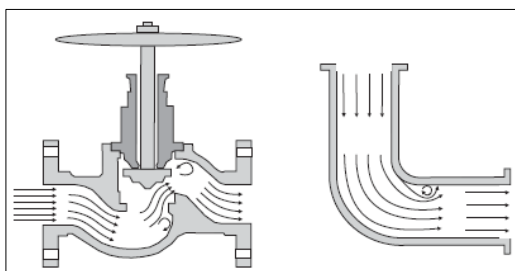
$g$ ...gravitacijska konstanta [m/s<sup>2</sup>]

Lokalne izgube lahko nastopijo:

- v krivinah
- zaradi nagle razširitve ali nagle zožitve cevi
- pri vtoku v sesalno košaro
- pri vtoku (iz vodohrana v cev)
- na iztoku (iz cevi v vodohran)

- na mestu zaslonke v cevovodu (t.j. element za merjenje pretoka v cevovodu)
- na mestu zapornih elementov (ventili, zasuni)
- pri popolnoma odprtih ventilih
- na mestih vgrajene rešetke (grabelj), itd.

Zaokroženi prehodni elementi povzročajo gladkejše (ravnejše) tokovnice in manjše izgube. Večji radij zaokrožitve pomeni tudi bolj zaokrožen prehod. Da so izgube v zaokroženih elementih res manjše, nam dodatno potrjuje vrednost koeficienta  $\xi$ , ki je podana kot empirična vrednost v številnih preglednicah. Vrednost koeficienta  $\xi$  je za podobne spojne člene močno odvisna od radija zaokrožitve prehodov, razmerja zožitev itd.



Slika 6: Vpliv radija zaokrožitve na tokovnice pri vtoku v cev [1, str.40]

Pri zapornih in regulacijskih elementih se vrednosti koeficienta  $\xi$  spreminjajo, saj so lahko v času toka tekočine po cevi v različni poziciji (faza zapiranja ali odpiranja lopute).

### Linijske izgube

Velikost trenjskih oziroma linijskih izgub je tesno povezanih z režimom toka v cevi. Za laminarni režim toka je značilno, da se sloji tekočine med seboj ne mešajo. Pri tem nastaja notranje trenje na stičnih ploskvah slojev, ki se gibljejo z različnimi hitrostmi. S tem povezane energijske izgube, so v laminarnem režimu toka linearno odvisne od hitrosti gibanja tekočine. Laminarni režim toka je v naravi zelo redek pojav, saj se lahko izrazi le pri majhnih hitrostih toka vode, kot je na primer tok podtalnice. V praksi se pri toku vode izrazi turbulentni režim, za katerega je značilno mešanje slojev tekočine in posledično povečano trenje zaradi dodatnih strižnih sil med ploskvami. Zato so energijske izgube v enačbi označene s kvadratom hitrosti. Turbulentni režim toka je značilen za obravnavani tok v vodovodnih sistemih. Ob steni cevi se ohrani ozek mejni sloj laminarnega toka, preostali presek cevi pa zapolnjuje turbulentno jedro. Tak režim toka se definiramo s pomočjo Reynoldsovega števila: [7]

$$Re = \frac{v d}{\nu}, \quad (7)$$

kjer je:

v...hitrost gibanja tekočine v cevi [m/s]

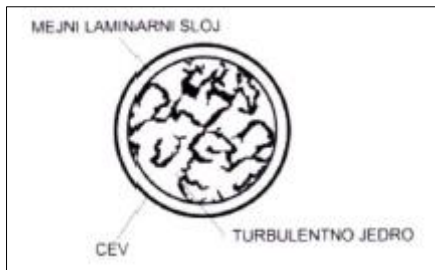
d...premer cevi [m]

$\rho$ ...gostota tekočine (v tem primeru pitne vode in je enaka  $\rho = 1$  [kg/m<sup>3</sup>])

$\nu$ ...kinematični koeficient viskoznosti tekočine



V območju  $Re < 2300$ , je režim toka laminaren, v območju  $Re > 2300$ , je režim turbulenten. Med obema režimoma obstaja prehodno območje ali prehodni režim, ki je podoben turbulentnemu, vendar s slabše izraženimi karakteristikami. [7]



Slika 7: Tok v cevi [5, str. 26]

Linjske izgube v tlačnih cevovodih se lahko prikaže z uporabo nekaj različnih enačb.

Najpogosteje uporabljene metode so: [10]

- a) Darcy-Weisbachova enačba,
- b) Chezy,
- c) Hazen-Williamsova enačba.

Vse enačbe določajo linijske izgube kot funkcijo hitrosti tekočine in vpliva hrapavosti cevi.

- a) Darcy-Weisbachova enačba

Enačba je izpeljana teoretično, vsi neznani vplivi so zajeti s pomočjo koeficienta  $\lambda$ . Uporablja se pri analizi tlačnih cevovodov in velja za vse pretoke in nestisljive tekočine. Prispevek linijske izgube za krožne cevi po Darcy-Weisbach-u zapišemo z enačbo:

$$\Delta E_{tr} = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}, \quad (8)$$

kjer je:

$\Delta E_{tr}$ ...linjske izgube v cevi [m vodnega stebra]

l...dolžina cevi [m]

D...premer cevi [m]

v...hitrost tekočine v cevi [m/s]

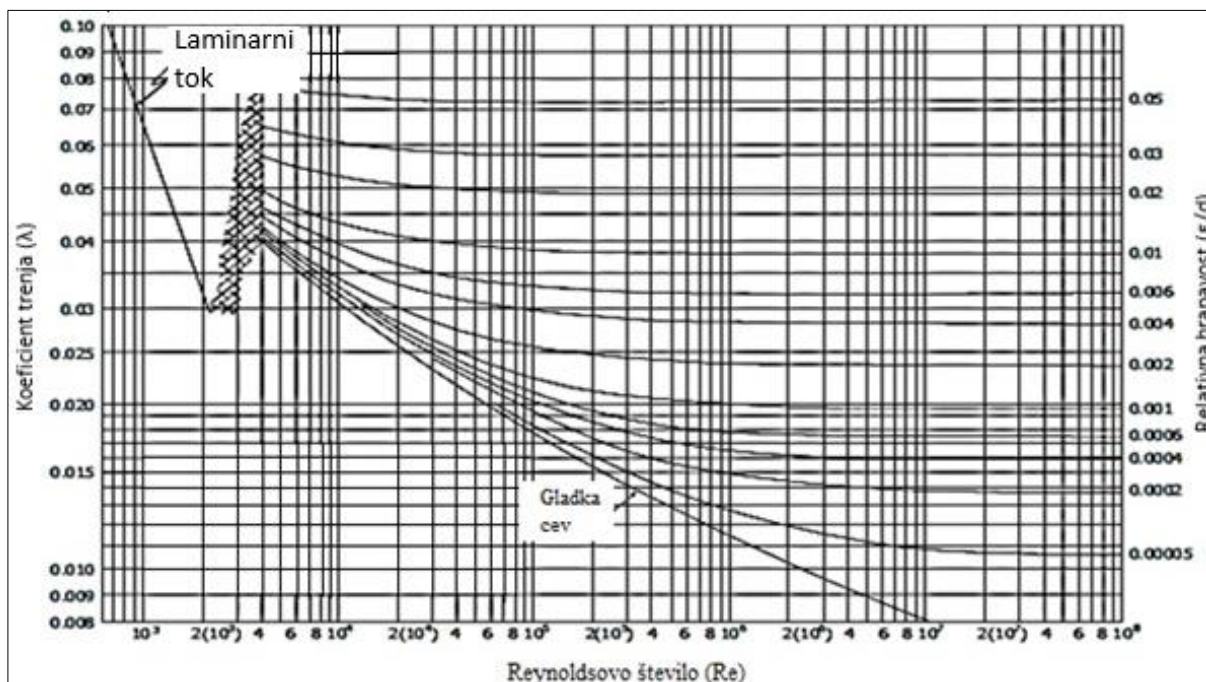
$\lambda$ ...Darcy-Weissbachov koeficient trenja [-]

g...gravitacijski pospešek [m/s<sup>2</sup>]

Brezdimenzijski koeficient trenja  $\lambda$  je v splošnem funkcija Reynoldsovega števila ( $Re$ ) in relativne hrapavosti cevi ( $\frac{\epsilon}{d}$ ). Spreminja se zveza med koeficientom  $\lambda$  in obema brezdimenzijskima številoma ( $Re, \frac{\epsilon}{d}$ ). Povezava med koeficientom trenja, Reynoldsovim številom in relativno hrapavostjo je podana s pomočjo druge enačbe, enačbe Prandtl-Colebrook: [4]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -0,86 \ln\left(\frac{\epsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}}\right) \quad (9)$$

Iz te enačbe  $\lambda$  ni mogoče direktno izraziti, zato si pomagamo z grafično različico enačbe, ki je predstavljena v obliki Moodyjevega diagrama. Lahko pa  $\lambda$  določimo tudi iterativno. Diagram se lahko razdeli na štiri območja, glede na katera se  $\lambda$  različno izraža. Na abscisi so v logaritmičnem merilu nanešena Reynoldsova števila, na ordinatni osi pa relativna hrapavost  $\epsilon$  in  $\lambda$ .



Slika 8: Moody-jev diagram [2, str. 35]

Glede na režim toka (določen z  $Re$ ) in relativno hrapavost, lahko koeficient  $\lambda$  preprosto odčitamo. Kot je razvidno z Moodyjevega diagrama, so krivulje v območju hidravlično hrapavih cevi vodoravne. Torej sledi sklep, da v tem območju koeficient trenja ni odvisen od Reynoldsovega števila, temveč le od relativne hrapavosti. V območju hidravlično hrapavih cevi koeficient trenja ni odvisen od  $Re$ . Pri hidravlično gladkih ceveh relativna hrapavost nima več vpliva, saj je razmerje  $\frac{\epsilon}{d}$  enako nič. V laminarnem režimu je koeficient trenja prav tako odvisen le od Reynoldsovega števila.

#### b) Chezy-jeva enačba

Za račun linijskih izgub hidravlično hrapavem območju toka, se lahko poleg prejšnje, uporabi še druge oblike enačb. Za odprte sisteme se je uveljavila de Chezy-jeva enačba:

$$v = C\sqrt{R * I} \quad (10)$$

kjer je:

C...de Chezyjev koeficient trenja

R...hidravlični radij

I...hidravlični padec

c) Hazen – Williamsova enačba

Ta oblika enačbe se uporablja predvsem na območju ZDA, medtem ko se pri nas linijske izgube ocenjujejo predvsem z Darcy-weissbachovo enačbo. Enačba je bila oblikovana eksperimentalno in velja le za vodo.

Enačba je bila oblikovana eksperimentalno in velja le za vodo. Hazen-Williamsova enačba vpelje lasten, eksperimentalno oblikovan, koeficient hrapavosti  $C$ . Konstanten je samo v območju turbulentnih tokov, vsebuje pa tudi empirično konstanto. Enačba za določitev linijskih izgub po tej metodi ima obliko (velja za SI enote):

$$\Delta E = \frac{10,67Q^{1,85}}{C^{1,85} d^{4,87}} \quad (11)$$

kjer je:

$\Delta E$ ...energijska izguba [m vodnega stolpca]

$Q$ ...Pretok v cevi [m<sup>3</sup>]

$d$ ...premer cevi [m]

$C$ ...Hazen-Williamsov koeficient trenja [-]

Značilne vrednosti koeficienta hrapavosti ( $C$ ) so prikazane v spodnji tabeli.

**Tabela 1: Koeficienti hrapavosti ( $C$ ) za različne materiale snovi [11]**

Material	Koeficient hrapavosti $C$
azbestni cement	140
medenina, bron	135
opeka	100
lito železo	130
beton	120 – 140
baker	135
pocinkano jeklo	120
steklo	140
svinec	135
plastika	150
jeklo	110 – 145
les	120

Izraz za skupno vrednost lokalnih in linijskih izgub

V ceveh nastanejo tako linijske izgube energije (zaradi trenja med tekočino in steno cevi), kot tudi lokalne (zaradi trenja in vrtinčenja vode povsod tam, kjer je tok moten). Skupna izguba energija se lahko zato izrazi:

$$\Delta E_{\text{izgub}} = \Delta E_{\text{lin}} + \Delta E_{\text{lok}} = \frac{v_i^2}{2g} \sum (\xi_{\text{lin}} + \xi_{\text{lok}}) \quad (12)$$

Najnatančnejša enačba za določevanje linijskih izgub je enačba Darcy-Weisbach. Ta oblika je tudi najpogosteje uporabljena oblika računa pri nas. Enačba upošteva trenjske izgube s

trenjskim koeficientom  $\lambda$ . Ta velja v vseh območjih režimov toka v Moodyjevem diagramu. Preostale našteje enačbe (de Chezy, Hazen-Williams) pa so osnovane na de Chezyjevem koeficientu C. Vse so empirične narave ter veljajo le v hidravlično hrapavem območju toka. [7]

### 2.3 Fizikalni robni pogoji (kontrola podtlakov)

Cevovode se dimenzionira na maksimalni in nični pretok ter na prehodne pogoje. V primeru pojava prehodnih pogojev na sistemu, se mora oceniti amplitudo in frekvenco (pogostost) tega pojava. Cevovod mora zdržati prehodni podtlak 80 kPa (0,8 bar, cca. 20 kPa absolutnega tlaka – 0,2 bar). Določen mora biti računski tlak in največji računski tlak. Upoštevati je treba tudi velikost preizkusnega tlaka. ob tem ne sme nastaviti večja trajna deformacija elementa vodovodnega sistema od 8%. [12]

Robni pogoji so pogoji kritični točki, ki jih lahko projektirano vodovodni sistem zadrži brez nastanka poškodb na ceveh, stikih ali objektih vodovodnega sistema. Če se na točki cevovoda približamo robnim razmeram, se lahko v sistemu pojavi embolija. Pojav opisuje nastanek mehurja vodne pare, ki bi se razširil po celotnem prerezu in tako preprečil pretok vode po cevi. Drugi pojav, do katerega bi lahko prišlo zaradi krajevnega znižanja tlaka v cevovodu, je pojav kavitacije. To je proces, pri katerem prihaja do izmeničnega nenadnega uparevanja in nato nenadne kondenzacije vode, zato ob tem nastajajo značilne velike pulzacije lokalnih tlakov. Take obremenitve pa materiali, iz katerih so običajno narejene cevi, ne prenesejo. Tako se na ostenju pojavijo številne poškodbe, dejanska hrapavost ostenja pa tak proces le še pospeši.

Podtlaki so še posebej velik problem na mestih vgrajenih črpalk. Če v primeru napačno izračunane črpalne višine ali kakšnih drugih razlogov (npr. višje temperature tekočine ali povečanega pretoka) vseeno pride do kavitacije pri vhodu v črpalko, bi lahko nastali mehurji vodne pare. Ti bi lahko prišli v rotor črpalke, kjer se poveča tlak, ki povzroči kondenzacijo teh parnih mehurčkov. Zaradi nenadnih trkov delcev tekočine nastopi kratkotrajni, toda zelo povečan tlak, ki naraste tudi do več 10 barov. Ta se širi v obliki udarnih valov skozi tekočino na vse strani, njegov učinek pa lahko povzroči intenzivno erozijo materiala črpalke ter zmanjšanje pretoka skozi črpalko. Posledica tega lahko povzroči tudi hude poškodbe, da postane črpalka povsem neuporabna in jo je potrebno nadomestiti z drugo. [7]

### 2.4 Nekateri inženirske poenostavitve

Da bi si olajšali hidravlično analizo, se lahko poslužujemo nekaterih inženirskih poenostavitev. [7]

- **Princip superpozicije energijskih izgub**

S principom superpozicije energijskih izgub velja predpostavka, da je celotna izguba enaka vsoti posameznih izgub. Omenjeni princip se lahko uporabi, kadar se izvajajo hidravlični preračuni nekega cevovoda, ki je pod določenim tlakom, vendar le, če se lokalne motnje med seboj ne prepletajo. V tem primeru morajo biti izvori motenj na zadostni medsebojni razdalji, da se cone, kjer nastanejo motnje toka, ne prekrivajo.

Princip superpozicije energijskih izgub se lahko izrazi z naslednjo enačbo, ki velja le pod zgoraj navedenim pogojem:

$$\sum \Delta E = \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{L_i v_i^2}{d_i 2g} + \sum_{i=1}^m \xi_i \frac{v_i^2}{2g},$$

kjer je:

$\sum \Delta E$ ...vsota energijskih izgub [meter vodnega stolpca]

$\lambda_i$ ...Darcy-Weissbachov koeficient trenja na obravnavanem odseku [-]

$L_i$ ...dolžina obravnavanega odseka [m]

$D$ ...premer cevi [m]

$v_i$ ...hitrost toka v cevi na obravnavanem odseku [m/s]

$\xi$ ...koeficient lokalnih izgub [-]

$g$ ...gravitacijski pospešek [m/s<sup>2</sup>]

$m$ ...število elementov na odseku z lokalnimi izgubami energije

$n$ ...število elementov na odseku z linijskimi izgubami energije

Običajno se dve ali več motenj toka prekriva. Takrat je potrebno le-te obravnavati kot celoto in oceniti, ali je potrebno določiti koeficient vseh izgub eksperimentalno ali pa to za določen (manj zahteven) hidravlični račun nima bistvenega pomena in je nastala netočnost s principom superpozicije sprejemljiva.

- **Hidravlično dolgi cevovodi**

Hidravlično dolgi cevovodi so cevovodi relativno velikih dolžin, kjer velja razmerje  $L/D \geq 500$ . V tem primeru vsota linijskih izgub bistveno presega vsoto vseh lokalnih izgub. Ker vemo, da so hidravlični računi izvedeni z določeno natančnostjo (3 – 5%), se lahko prispevek lokalnih izgub zanemari, ne da bi se s tem bistveno poslabšala natančnost izračuna. [7]

Tako se lahko izgube za hidravlično dolgi cevovod računa po naslednji enačbi:

$$\sum \Delta E = Q^2 \sum_i \frac{L_i}{K_i^2}, \quad (14)$$

kjer je:

$Q$ ...pretok v cevi [m<sup>3</sup>/s]

$K$ ...pretočni modul

Pretočni modul se lahko izrazi na naslednji način: [7]

$$K = S \frac{1}{n_G} R^{\frac{2}{3}}, \quad (15)$$

kjer je:

$S$ ...prerez cevi [m<sup>2</sup>]

$n_G$ ...Manningov koeficient [-]

$R$ ...hidravlični radij [m]

- **Nadomestna dolžina cevovoda**

Kadar se na nekem odseku pojavi skupina motenj, ki vplivajo druga na drugo, je račun celotnih izgub zelo otežen. Zato se obravnava cevovod kot celoto in se skupne hidravlične izgube izrednotijo s pomočjo nadomestne dolžine cevovoda. [7]

V primeru, da je premer cevi na nekem odseku konstanten, velja naslednji izraz: [7]

$$\sum \Delta E = \left( \lambda \frac{L}{D} + \sum \xi_{lok} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

Drugi člen v vsoti spremenimo v izraz za fiktivno (nadomestno) dolžino cevovoda, ki se glasi:

$$\sum \xi_{lok} = \lambda \frac{L_e}{D}, \quad (17)$$

kjer je  $L_e$  ekvivalentna oziroma nadomestna dolžina cevovoda, s pomočjo katere lahko celotne izgube računamo le kot linijsko izgubo in sicer po naslednji enačbi: [7]

$$\sum \Delta E = \lambda \frac{\sum(L + L_e)}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (18)$$

## 2.5 Karakteristika cevovoda

Na opazovanem odseku cevi, se vplivi linijskih in lokalnih izgub seštejejo. Ti vplivi se z večanjem pretoka skozi cevovod povečujejo. Geodetska višina predstavlja razliko v višini na vtoku in iztoku cevi. Eksponent  $n$  (enačba št.19) je, tako kot koeficient linijskega upora in koeficient lokalnih izgub, odvisen od uporabljene enačbe za izračun linijskih izgub. Če je uporabljena Darcy-Weissbachova enačba, je eksponent enak 2, za Hazen-Williamsovo enačbo je ta koeficient enak 1,875. [7]

Karakteristiko cevovoda oz. krivuljo sistema predstavlja krivulja, ki pove, kako se v posamezni cevi sistema spreminjajo tlačne izgube v odvisnosti od pretoka v cevi. Krivulja pove, koliko energije je potrebno za pretok določene količine vode po izbrani cevi. Za izbrani odsek cevi se krivulja sistema zapiše z enačbo: [2]

$$H = h_{geod} + \sum rQ^n + \sum mQ^2, \quad (19)$$

kjer je:

$H$ ...tlak [m]

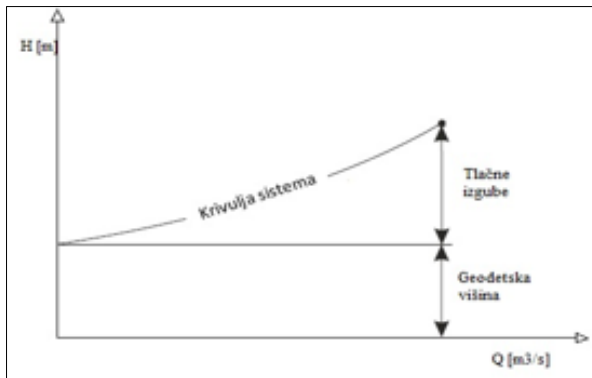
$h_{geod}$ ...geodetska višina [m]

$r$ ...koeficient linijskega upora [-]

$n$ ...eksponent [-]

$m$ ...koeficient lokalnih izgub [-]

$Q$ ...pretok v cevi [m<sup>3</sup>/s]



Slika 9: Krivulja karakteristike cevovoda [2, str. 48]

Krivulja sistema se spreminja, saj se gladina vode in poraba v sistemu s časom nenehno spreminja. [2] S spreminjanjem gladine vode se spreminja tudi statična višina, s spreminjanjem porabe se spreminjajo tlaki v sistemu, kar posledično vpliva na obliko in spremembo krivulje sistema.

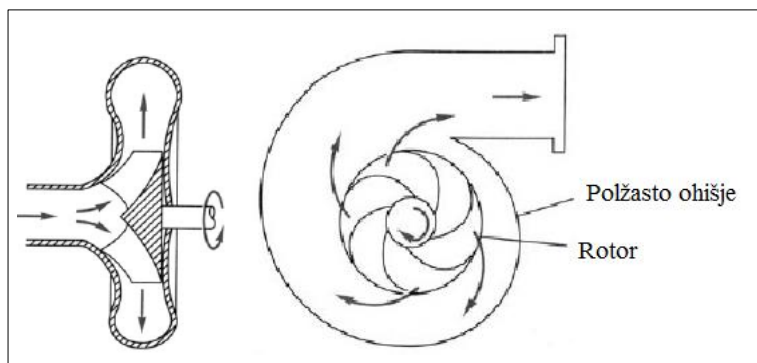
## 2.6 Črpalna kot dodaten izvir energije v sistemu

Tok vode v tlačnem cevovodu ima potencialno, tlačno in kinetično energijo, na drugi strani pa se pri toku vode po cevovodu pojavljajo energijske izgube. Seštevek vseh energij in nastalih izgub se ponazori s pomočjo energijske črte. Tok tekočine po ceveh je običajno posledica razlike potencialne energije, lahko pa se pretok doseže tudi s pomočjo dodane energije črpalke. V zelo dolgih cevovodih, v katerih teče relativno velika masa, se največkrat ne doseže željenega pretoka samo s črpalno, zato je potrebna uporaba več črpalk. Te so razporejene tako, da na njihove črpalne krivulje premagajo zahtevano črpalno višino in dosežajo željene pretoke in željeno porazdelitev tlakov v sistemu. [7]

Črpalke so sestavni del večine tlačnih omrežij in bistveno vplivajo na izračun energijskih višin v cevnom omrežju. Kadar gre za prevelike energijske izgube in energijske razlike v samem sistemu, se s pomočjo črpalk poveča energija, pretok ali tlak oziroma zmanjšamo razlike med tlaki, saj le-te dodajajo energijo v sistem. To lahko privede do primera, ko je v neki točki na cevovodu na razpolago premalo energije. Pomeni, da energijska črta ne doseže zelene točke v cevovodu in zato ni zagotovljen potreben pretok v cevi. Zato je potrebno energijo v cevovodu dovesti in s tem dvigniti energijsko črto v sistemu s pomočjo črpalk. Dodana energija se imenuje črpalna višina. Energija, ki jo v hidravlični sistem dodaja črpalna, mora zagotoviti premagovanje višinskih razlik v vodovodnem omrežju in biti večja od vsote energijskih izgub na opazovanem odseku, saj se lahko le s tem zagotovi ustrezen pretok in energijo v vodovodnem omrežju.

S črpalno se vodo sesa in/ali potiska z nižje na višjo lego. Za črpanje pitne vode se lahko izbira med različnimi vrstami in tipi črpalk, saj se le te ločijo: [3]

- Po načinu delovanja na centrifugalne in batne (batne se redkeje uporabljajo)
- Glede na postavitev na horizontalne in vertikalne
- Glede na lego motorja na suhe in potopne
- Glede na število stopenj



Slika 10: Centrifugalna črpalka [2, str. 95]

### 2.6.1 Črpalna krivulja in točka obratovanja črpalke

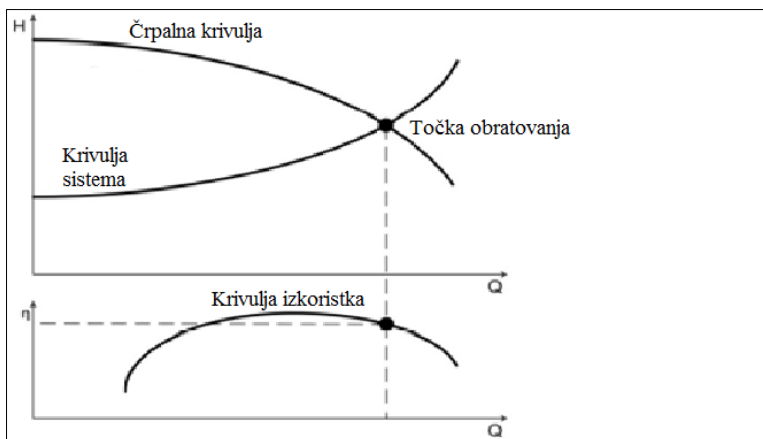
Lastnosti črpalke so podane s karakteristično krivuljo  $Q-H$ , ki prikazuje odvisnost med tlačno višino  $H$  ter pretokom vode v cevi  $Q$ . Krivulja prikazuje sposobnost črpalke za dodajanje energijske višine pri določenem pretoku. Pri izračunu sistema s črpalke so potrebni še dodatni podatki, ki določijo dejansko obratovalno točko črpalke. Ta točka sovпада s točko, ki je na zgornjem grafu prikazana kot sečišče krivulje  $Q-H$  ter krivulje karakteristik cevododa, in hkrati predstavlja geodetsko spremembo višine ter linijske in lokalne izgube. S seštevkom tako linijskih kot lokalnih izgub se enostavno določi tudi točko optimalnega obratovanja črpalke.

Točka obratovanja črpalke je točka, v kateri se sekata karakteristika cevododa in karakteristika črpalke. V isti koordinatni sistem se lahko zriše krivuljo, ki ponazarja izkoristek črpalke v odvisnosti od pretoka ter tako preveri izkoristek delovanja črpalke v točki obratovanja.



Slika 11: Črpalna krivulja [2, str.35]





Slika 10: Točka obratovanja in izkoristka črpalke [2, str.48]

Krivulja sistema se spreminja v odvisnosti od porabe in količine vode v vodohranu, črpalna krivulja črpalke pa ostane pri določeni hitrosti nespremenjena. V primeru, da se voda črpa neposredno v cevovod, je potrebno zagotoviti nadzor nad tlaki v omrežju, da ti ne presežejo ali padejo pod dovoljene vrednosti. Te za vodovodne sisteme znašajo med 2 in 6 bara. [12] Takšna oblika obratovanja vodovodnega ni priporočena, saj lahko vodohran s svojim volumnom dosti lažje uravnava nihanja porabe in vzdržuje konstantnejše tlake v vodovodnem sistemu.

S presekom krivulje sistema in črpalne krivulje se dobi točka obratovanja. Ta predstavlja višino, do katere mora črpalna s svojo črpalno krivuljo dvigati vodo. Ob izpolnitvi tega pogoja, so tudi tlaki in hitrosti v vodovodnem omrežju ustrezni. Če bi v sistemu prišlo do sprememb, na primer menjave črpalke, je potrebno ponovno preveriti njeno ustreznost in zadostiti prej naštetim kriterijem.

Črpalna višina ( $H_c$ ) je sestavljena iz geodetske višine ( $H_{geod}$ ) in energijske razlike, potrebne za želeni pretok ( $\Delta E$ ). Črpalna mora premagovati najprej obstoječo energijsko razliko in nato dodati še ustrezno energijsko razliko, ki je potrebna za želeni pretok, saj le-ta brez črpalke v tem primeru ne bi bil možen. To opiše spodnja enačba:

$$H_c = H_{geod} + \Delta E = H_{geod} + \left( \frac{v_l^2}{2g} \sum (\xi_{lin} + \xi_{lok}) \right) \quad (20)$$

V hidravlični model se vnese črpalno krivuljo s pomočjo matematične funkcije. Nekateri modeli prilagodijo polinomsko krivuljo k izbranim podatkovnim točkam, drugi pa krivuljo črpalke opišejo z naslednjo enačbo: [2]

$$h_p = h_0 - cQ_p^m \text{ ..enačba črpalne krivulje} \quad (21)$$

kjer je:

$h_p$ ...črpalna višina [m]

$h_0$ ...črpalna višina pri ničelnem pretoku [m]

$Q_p$ ...pretok skozi črpalno [m<sup>3</sup>/s]

$c, m$ ...koeficienta ki opišeta obliko črpalne krivulje, kjer  $m$  predstavlja eksponent

Pri črpalkah z nespremenljivo hitrostjo vrtenja rotorja obstaja le ena črpalna krivulja, pri črpalkah s spremenljivo hitrostjo (frekvenčne črpalke) pa je lahko več različnih črpalnih krivulj. Če s  $Q_1$  in  $Q_2$  označimo pretoka črpalke pri dveh različnih hitrostih, z  $v_1$  in  $v_2$  različni hitrosti in s  $h_1$  in  $h_2$  črpalni višini pri dveh različnih hitrostih, lahko zapišemo razmerji [3]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (22)$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2 \quad (23)$$

Če poznamo črpalno krivuljo pri neki hitrosti, lahko s temi razmerji in z enačbo črpalne krivulje določimo črpalno krivuljo pri poljubni drugi hitrosti.

### 2.6.2 Moč črpalke

Potrebno energijo za delovanje vodovodnega sistema se odvzame iz električnega omrežja, porabo pa narekuje moč črpalke. [2] Kadar je med kontrolnima prevezoma nameščena črpalna, se mora v posplošeni energijski enačbi upoštevati tudi njeno dovedeno delo  $N_{\check{c}}$  oziroma dovedeno energijo. Navadno se upošteva v obliki dodane črpalne višine  $H_{\check{c}}$ . Pri tem nam gravitacijska sila pomaga ( $z_1 - z_2 > 0$ ) ali pa nasprotuje pretakanju snovi po cevi ( $z_1 - z_2 < 0$ ), kar je razvidno tudi iz energijske enačbe (enačba št.20).

Če želimo določiti delo črpalke  $N_{\check{c}}$ , pretok  $Q$  ali premer cevi  $D$ , se potrebno napisati enačbo za preseke cevi, kjer so razmere poznane. Če pa želimo preveriti velikost tlakov v določenem preseku cevi zaradi možnega pojava kavitacije, se napiše primerjalna enačba za kritični prerez in prerez, v katerem so tlaki in ostale količine v cevovodu znane. [2]

Za doseg željenega dela je potrebno izbrati ustrezno moč črpalke, ki se običajno poda z naslednjo enačbo: [2]

$$N_{\check{c}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\check{c}} \cdot Q}{\eta_{\check{c}}}, \quad (24)$$

kjer je:

$N_{\check{c}}$ ...moč črpalke [W]

$Q$ ...pretok tekočine [ $m^3/s$ ]

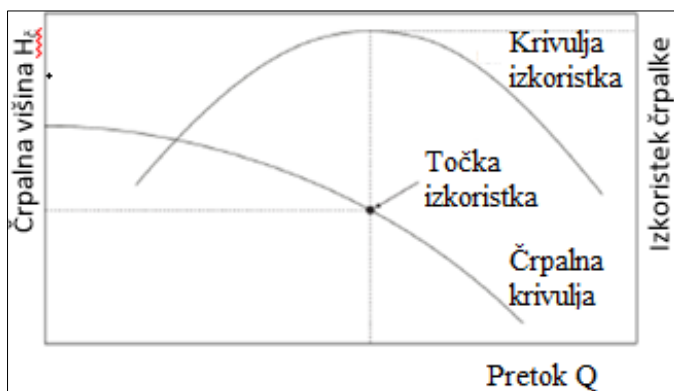
$H_{\check{c}}$ ...višina črpanja [m]

$\eta_{\check{c}}$ ...izkoristek črpalke [-]

### 2.6.3 Izkoristek črpalke

Kot je bilo poudarjeno že prej, se gladina vode v sistemu nenehno spreminja. S tem se spreminjajo tudi vrednosti različnih parametrov (geodetska oz. statična višina, tlačne izgube). Iz tega sledi, da se hidravlične karakteristike cevovoda (t.j. tiste, ki so npr. odvisne od hitrosti toka) s časom spreminjajo, medtem ko karakteristike črpalke ostajajo enake. Zaradi časovnega spreminjanja karakteristik cevovoda se posledično po času spreminja tudi točka obratovanja sistema, ki je določena v presečišču obeh krivulj. Če se želi dokazati

ekonomičnost delovanja črpalke, ki se jo izbere za nek vodovodni sistem, je potrebno na točki obratovanja preveriti, kolikšen je izkoristek delovanja črpalke.



Slika 12: Izkoristek črpalke [2, str.49]

Motor črpalke električno energijo pretvori v mehansko delo. Ta se preko rotorja prenaša na vodo. Pri vsakem prenosu se del energije pretvori v nepovratno obliko, zato izkoristek ni popoln. Izkoristek črpalke je razmerje med močjo črpalke (prenos energije prek lopatic na vodo) in močjo motorja, ki poganja črpalke. [2]

$$\eta = \frac{P}{P_m}, \quad (25)$$

kjer je:

P...moč črpalke [W]

P<sub>m</sub>...moč motorja [W]

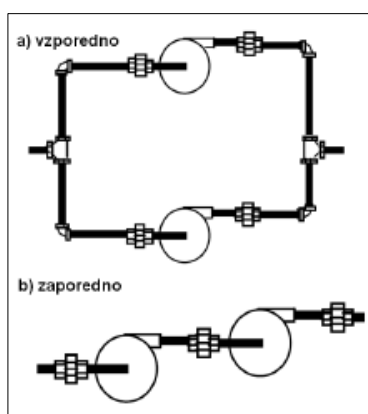
Izkoristek črpalke je odvisen od vrste in velikosti črpalke, velikosti in oblikovanosti lopatic, oblikovanosti notranjega dela ohišja in odtočnega ustja črpalke, hitrosti delovanja črpalke, nepravilnosti in zamikov, ki povzročajo dodatno trenje in od mnogih drugih dejavnikov. Izkoristki večjih centrifugalnih črpalk se gibljejo med 75% in 90%, manjših pa med 50% in 70%. [2]

#### 2.6.4 Sistem več črpalk

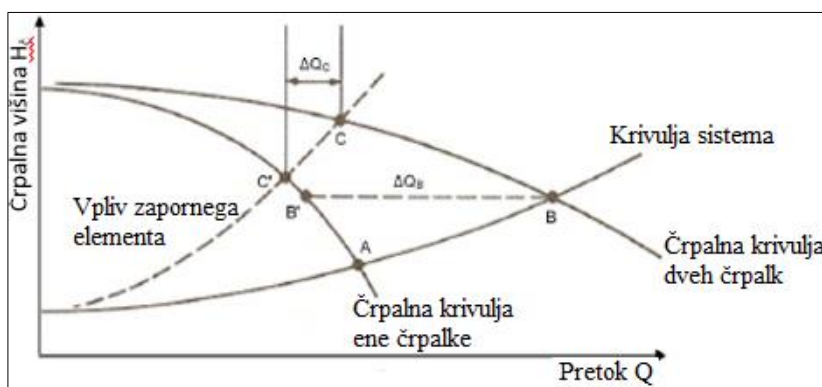
Za zagotavljanje ustreznega pretoka in tlaka v vodovodnem omrežju navadno le ena sama črpalke ne zadostuje, zato je potrebno uporabiti več črpalk hkrati. Eden izmed razlogov za vzpostavitev sistema je lahko potreba po premagovanju velikih razlik med posameznimi vodohrani in vzdrževanje ustreznega tlaka in pretoka v ceveh. Navadno pa imajo vsa večja črpališča tudi vgrajene rezervne črpalke, predvsem na pomembnejših črpališčih, zaradi možnost izpada črpalke v obratovanju ali sanacijskih del na črpalke. Povečanje pretoka se doseže z vzporedno vgradnjo črpalk, povečanje črpalne višine pa z zaporedno vgradnjo črpalk. Pri slednji pretok omejuje maksimalni pretok, ki ga dopušča vsaka od črpalk (predpostavi se, da sta črpalke enaki), črpalna višina pri tem pretoku pa je enaka 0. Maksimalna črpalna višina sistema obeh črpalk je pri pretoku 0 enaka dvakratniku črpalne višine ene črpalke. Sistem dveh zaporedno vezanih črpalk v primerjavi z eno samo črpalke obratuje pri nekoliko večjem pretoku in pri nekoliko večji črpalni višini. Ta pa je manjša od dvakratnika črpalne višine ene črpalke. [2]

Cilj pri vzporedni vgradnji črpalk je povečanje pretoka, kar pa ima za posledico povečanje energijskih izgub. Ker so energijske izgube sistema zaradi povečane hitrosti večje, morajo črpalke dovesti več energije, zato je potrebna črpalna višina višja. Dve enaki vzporedno vgrajeni črpalke ne zagotavljata dvakrat večjega pretoka kot ena črpalka, temveč je njun skupen pretok nekoliko manjši.

Problematika vzporedne vgradnje črpalk je prikazana na spodnji sliki. Točka A predstavlja točko obratovanja ene črpalke, točka B pa točko obratovanja sistema dveh vzporedno vgrajenih črpalk. Točka B' je hipotetična in služi le za lažjo predstavo manjšega pretoka posamezne črpalke v sistemu dveh črpalk. Povečanje pretoka  $\Delta Q_B$  zaradi uporabe dodatne črpalke je manjše od dvakratnika pretoka v točki A. Točki C' in C sta točki obratovanja ene črpalke in sistema dveh črpalk v kažeta vpliv vgradnje zapornih elementov na pretok. Prirastek pretoka  $Q_C$  je v tem primeru bistveno manjši od prirastka pretoka  $\Delta Q_B$  v primeru, če se neuporabi zapornih elementov.



Slika 13: Zaporedni in vzporedni način vgradnje črpalke [13]

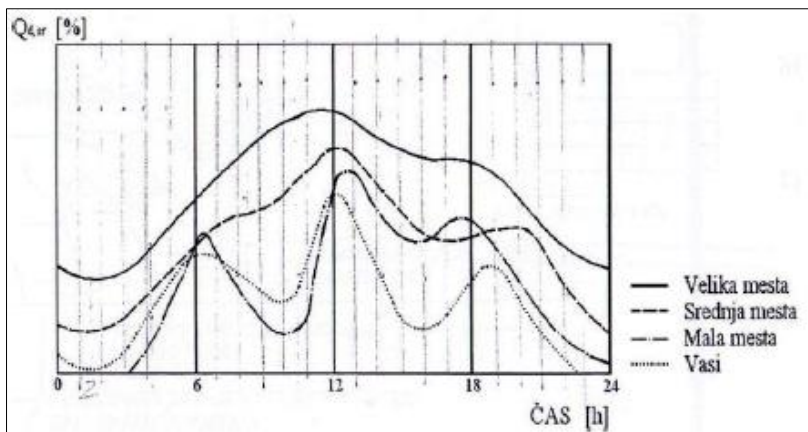


Slika 14: Vzoredna vgradnja črpalk [14]

## 2.7 Nihanje porabe vode

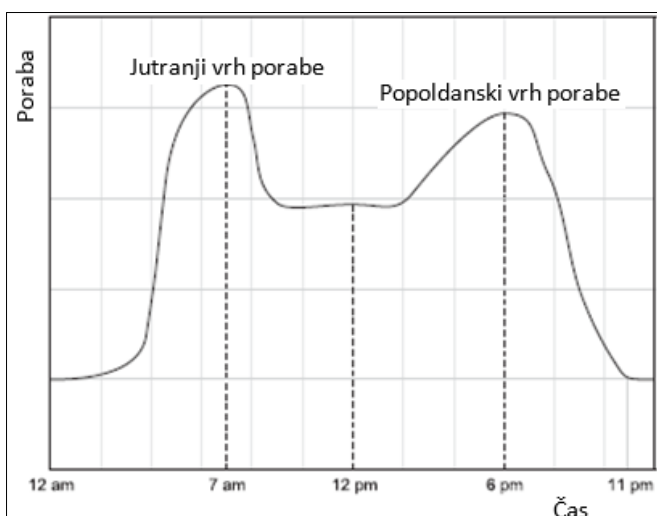
Poraba vode v območju vodovodnega omrežja niha po določenih vzorcih v odvisnosti od časovnega obdobja. Za dimenzioniranje vodovodnih omrežij sta pomembna podatka o maksimalni dnevni in o urni neenakomernosti porabe vode. Dnevno nihanje porabe vode je odvisno od velikosti in tipa naselja ali obravnavanega območja in posnema njegove lastnosti. Tako je očitna razlika v nihanju porabe vode v poslovnem območju ali v spalnem naselju. To

ni mišljeno v smislu količine porabljene vode, vendar v časovnem faktorju odjema, ki je v poslovnem območju večji v času delovnih ur. Medtem je spalno naselje aktivno v porabi z vodo predvsem v jutranjih urah in po opravljenem delavniku.



Slika 15: Vpliv velikosti naselja na dnevno nihanje porabe vode [15, str.28]

Tipičen vzorčni primer dnevne porabe za naselje ima dva viška v porabi (zjutraj in popoldan) ter minimum ponoči. Ker meritve nihanja porabe niso vedno na voljo, se lahko uporabi računski pristop. Določimo jo tako, da s koeficienti neenakomernosti množimo srednjo dnevno porabo, ki je konstantna skozi celoten dan.



Slika 16: Nihanje porabe skozi dan [2, str.156]

Vzorec porabe se lahko natančno določi z meritvami na cevi vodovodnega sistema. Za oblikovanje natančnega grafa nihanja porabe skozi dan, bi bilo potrebno meritve pretokov izvajati na več točkah vodovodnega sistema in izmerjene rezultate primerjati med sabo in oblikovati značilno krivuljo porabe opazovanega območja. Če ta možnost ni izvedljiva, je možno oceniti krivuljo izrisati tudi s pomočjo nihanja vode v vodohranu. Za ustrezno oblikovanje krivulje, je potrebno poznati natančna nihanja gladine vode v vodohranu, pretoke na vtočnem in iztočnem delu vodohrana. Če se voda v vodohran črpa, je potrebno poznati tudi kriterije ki povedo, kdaj se črpalka izklopi oziroma vklopi.

Poleg ciljnih porabnikov je potrebno za dimenzioniranje omrežja upoštevati tudi izgube vode na omrežju (puščanja v omrežju, nepopisana poraba ali napake na merilnih porabe, itd.) ter izpolniti zahtevo po zahtevanem minimalnem pretoku v primeru požara.

## 2.8 Uporabljena programska oprema za izdelavo hidravličnega modela

Za izdelavo hidravličnega modela je bilo potrebno najprej spoznati določene teoretične osnove, ki so mi zagotovile poznavanje delovanja in pravilno uporabo zahtevanih programskih orodij.

### 2.8.1 GIS okolje

Geografski informacijski sistem (GIS) je pogosto uporabljena programska oprema za zbiranje, shranjevanje, upravljanje, manipulacijo, analizo in kartiranje (prikazovanje) prostorskih informacij. Vključuje dejavnosti baze podatkov, kot so shranjevanje podatkov, poizvedbo, statistične analize in omogoča analize z vizualizacijo in ostalimi geografskimi funkcijami. GIS lahko služi tudi kot sestavni del projekta, ki zahteva upravljanje večjih količin digitalnih podatkov in uporabo posebnih analitičnih orodij. Postaja tudi vse bolj pomembno orodje pri modeliranju hidravličnih modelov, saj služi kot baza geografskim podatkov. Integracija z modelom in GIS okoljem poteka v treh oblikah: [2]

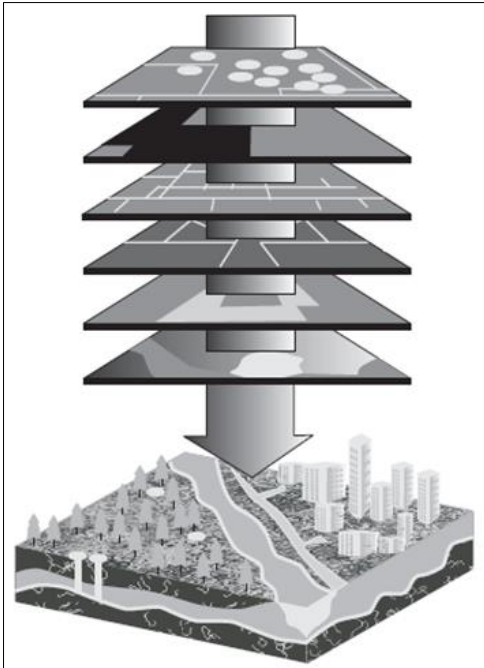
1. Podatki se izmenjujejo preko datoteke, ki je lahko ASCII tabela ali preglednica. Zapisani so v obliki, da so lahko berljivi. Hidravlični model in GIS program tako tečeta neodvisno.
2. Vzpostavi se povezava med modelom in GIS okoljem. Te povezave se uporabijo za sinhronizacijo podatkov. Skupna točka obeh je t.i. »shape« datoteka, ki povezuje podatke modela in gis programa.
3. Uporabi se lahko zgolj eno »skladišče« za zahtevane podatke, iz katerega črpata oba in sta tako med sabo odvisna in povezana.

Integracija GIS okolja in hidravličnega modela vodi do ugodnosti: [2]

- Časovni prihranek pri gradnji modelov
- Sposobnost vključevanja raznolike rabe zemljišč, demografskih in ostalih podatkov
- Vizualizacija podatkov, predstavljena v obliki karte. Kakovost karte je odvisna od kvalitete vhodnih podatkov.
- Možnost kombinacije različnih slojev (ang. Layers)

Najboljša značilnost GIS orodij z vidika načrtovalca je gotovo sposobnost integracije GIS, preko različnih prostorskih razmerij in baz podatkov, ki bi jih težje povezali med sabo izven GIS okolja.

GIS okolje v osnovi sestavlja več različnih slojev (slika 17), ki so na tak ali drugačen način povezani v določenih točkah in jih je zato moč združiti in prikazati na skupni karti. To omogoča uporabniški vmesnik (GUI), uporabnik GIS orodja pa lahko sam določi v kakem zaporedju se plasti pojavljajo in izbira katere želi prikazati na zaslonu. Predmeti oziroma točke na karti v GIS okolju niso zgolj točke ali linije, vendar jih v ozadju dopolnjuje tudi tabela atributov. Tako lahko poleg lokacije elementa na vodovodnem sistemu, poizvemo tudi o njegovih lastnostih, višinski legi, premeru cevi ali katerem drugem podatku.



Slika 17: Kombinacija različnih grafičnih slojev [2, str.529]

Vsako vrsta sistema oziroma baza podatkov se lahko poveže z grafičnim slojem pod pogojem, da sta v njih zapisani dosledni in kakovostni podatki. Na karto se lahko izpišejo tudi določene atributne vrednosti iz tabele, katero vsebuje določen grafični sloj. Na spodnji sliki so prikazani atributni podatki o ceveh vodovodnega sistema, katerega je uporabnik postavil nad sloje obrisa objektov, obrisa parcel in vrisane ceste. Prikazana je potek cevovoda po terenu, stikanja in posamezna vozlišča na ceveh.



Slika 18: GIS karta [2, str.530]

Za obravnavo geografskih podatkov so se razvile tri oblike: [2]

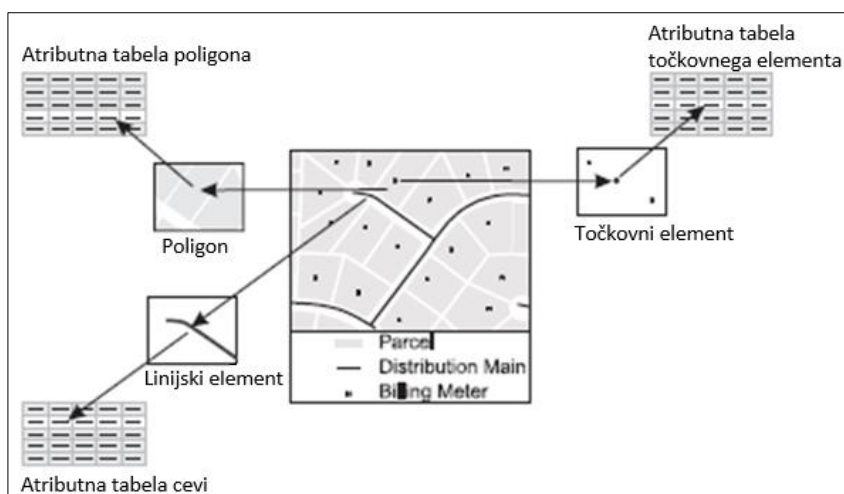
- Raster  
Vsaka celica mreže ima svoj atribut in povezavo tega s posamezno celico mreže (koordinato). Podatki so shranjeni v obliki matrike. Koordinate se določijo sproti, saj je poznana velikost celice, rotacija in osnovni rastrski model.

- Vektor

Predstavljen je lahko kot točka, črta ali poligon. Vsak izmed elementov ima določeno atributno vrednost, ki je povezana s koordinatami v sistemu. Razlika v primerjavi z rastrskimi podatki je ravno v neločljivi povezavi atributov s koordinatami.

- Trikotna nepravilna mreža (TIN)

Trikotna mreža izhaja iz nepravilno razporejenih vzorčnih točk, ločnih linij in poligonov. Vsaka vzorčna točka ima koordinato in atribut (npr. »z«-koordinata). Preostale točke, med dvema vzorčnima ki tvorita začetek in konec linije, se pridobijo z interpolacijo v okviru TIN. TIN je ponekod predstavljen kot posebna oblika vektorskega modela, nekateri pa ga dojemajo tudi kot samostojen podatkovni model.



Slika 19: Organizacija delovanja GIS okolja [2, str. 531]

Pri hidravličnem modeliranju so v uporabi predvsem vektorski podatki. Vozlišča so točkovni elementi, cevi so linije in omrežje porabe predstavlja poligon ali točkovni element (vodomer). Čeprav je večina podatkovnih modelov sestavljena iz vektorskih funkcij, uporablja tudi TIN podatke za primere, kjer se izdeluje digitalni model višin (DMV) območja ali če se uporabi ortofoto posnetek za grafično podlago modelu.

Pomemben korak v procesu oblikovanja baze podatkov je zbiranje informacij o naboru podatkov, ki jih imenujemo metapodatki. Ti omogočajo poznavanje vira in nastanka podatkov, poznavajo metodo, s katero so bili podatki obdelani in s tem se tudi poveča zaupanje v verodostojnost pridobljenih podatkov.

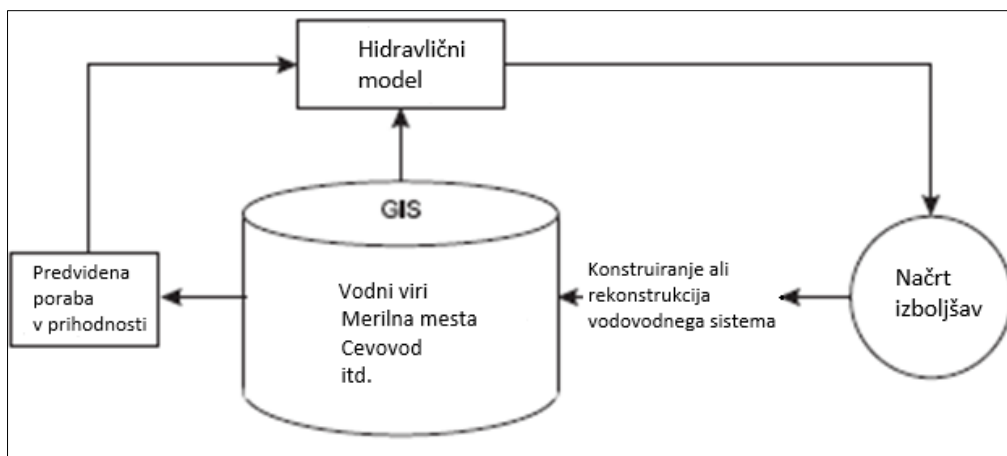
Upravljalci vodovodnih sistemov bi se morali na področju GIS okolja prizadevati za tri temeljne cilje. Le tako lahko GIS postane strateška dobrina za organizacijo. Te so naslednje: [2]

- Kartografska predstava razprostrtosti cevovodnega sistema in razporeditev objektov na sistemu
- Popis omrežja in njegovih lastnosti, karakteristik in spremljanje stanja in obratovalnih značilnosti
- Hidravlični model vodovodnega sistema



Vzpostavitev hidravličnega modela in njegovo posodabljanje (vzdrževanje) je eden časovno bolj potratnih del. V pomoč so lahko uporabljeni GIS programi, s pomočjo katerih se: [2]

- Proces deloma avtomatizira
- Poveča zmožnost obdelave večje količine podatkov, zato lahko ti vsebujejo tudi detajle
- Možnost uporabe naprednih orodij za obdelavo podatkov
- Zbrani GIS podatki se lahko prenesejo tudi v druge modele
- Možnost interpolacije z-koordinate, ki prinaša samodejno določitev višine vozlišča
- Orodja za urejanje



Slika 20: Vzpostavitev hidravličnega modela [2, str. 544]

Program Quantum GIS (krajše QGIS), deluje od leta 2002. Gre za odprtokodni program, kar pomeni, da lahko vsaj večš uporabnik spreminja njegovo kodo za svoje lastne potrebe. Omogoča izdelavo lastnih funkcij in vtičnikov, ki jih lahko potem vsak doda v knjižnico, kjer je nabor delujočih vtičnikov in ostalih pripomočkov za obdelavo podatkov. Program podpira rastrske in vektorske podatkovne oblike, ki se vstavijo preko gumba za vnos podatkov različnih oblik in kasneje prikažejo na uporabniškem vmesniku. Uvoženi sloji so lahko predstavljeni v različnih projekcijah, pomembno pa je, da imamo vse poenotene, saj jih lahko le tako prekrivamo in združujemo med seboj. QGIS omogoča:

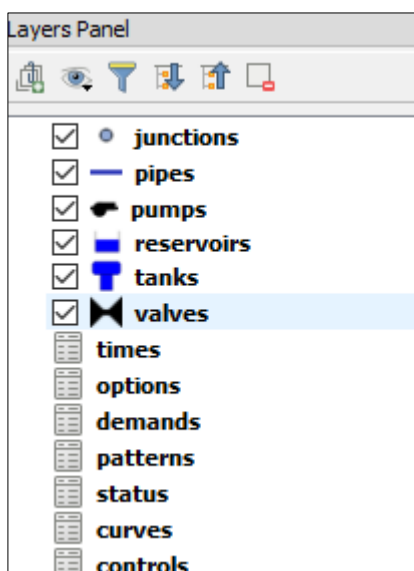
- Med sloji se lahko ustvarijo različne povezave preko atributnih tabel
- Nudi možnost ustvarjanja novih grafičnih slojev (točkovni, linijski ali poligoni)
- Urejanje uvoženih grafičnih slojev
- Izvoz željenih podatkov v različnih oblikah
- Analizo in obdelavo uvoženih grafičnih slojev
- Povezavo z zunanji programi (npr. google maps)
- Možnost uporabe se razširi z možnostjo uporabe številnih funkcij in vtičnikov, ki ponujajo dodatne možnosti obdelave, urejanja, dodajanja novih elementov in tudi povezavo z drugimi programi (npr. EPANET - om)
- Za večše uporabnike ima vgrajeno tudi Python vtičnik, preko katerega se lahko z znanjem programiranja ustvari nove ukaze ali napišejo nove funkcije, ki se jih uporabi za specifične primere obdelave podatkov

## 2.8.2 Vmesnik qgis epanet

Vmesnik povezuje GIS okolje s programom za simulacijo hidravličnega modela EPANET. Simulacija se izvaja preko GIS vmesnika in je lahko v pomoč pri postavljanju temeljev za upravljanje vodovodnih sistemov. Deluje na osnovi QGIS baze podatkov in tabel, s katerimi se definira vodovodni sistem in nastane po logiki vozliščne topologije, ki ima štiri osnovna pravila: [17]

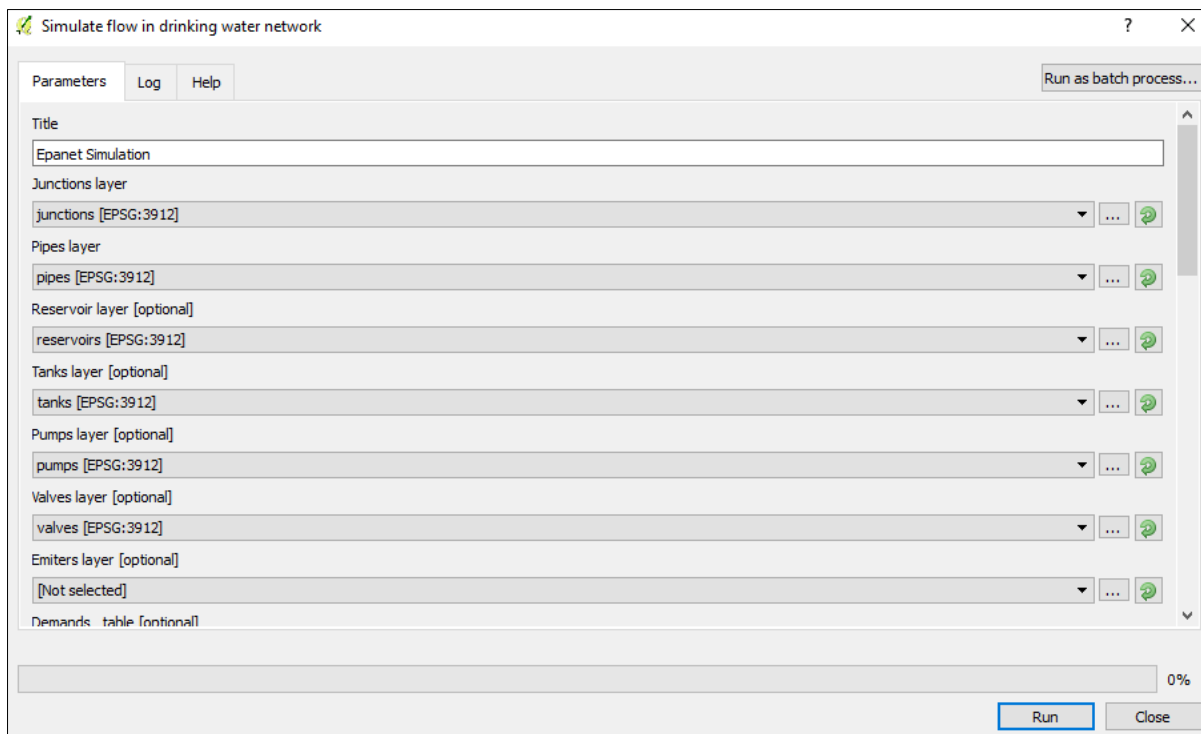
- Vozlišča so osnovni elementi sistema in predstavljajo točkovni geometrijski element
- Linijski element povezuje dve točki oziroma dve vozlišči
- Linijski elementi so usmerjeni
- Točke ob linijskem elementu, ki definirajo njegovo obliko so verteksi in predstavljajo točkovni element.

Vsi točkovni in linijski elementi s pripadajočimi atributnimi tabelami in dodatnimi (.csv) datotekami, se zberejo in ustrezno formirajo v obliko, ki jo lahko vtičnik prepozna. Zahtevana oblika podatkov je prikazana na spodnji sliki, v kateri je jasno videna zahtevana struktura podatkov, na podlagi katerih se izvede hidravlični račun.



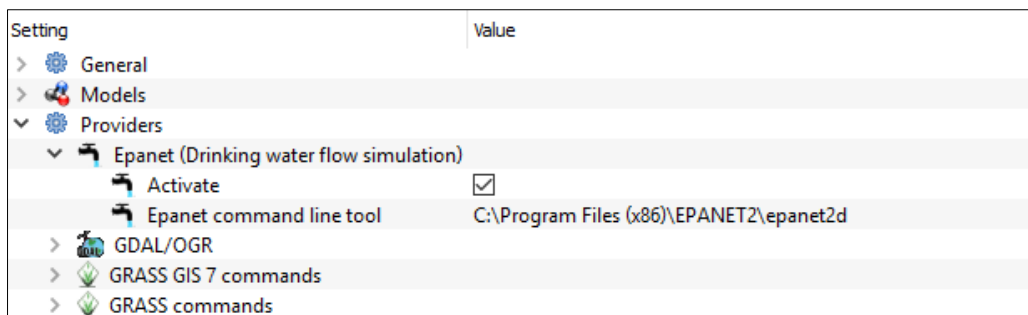
Slika 21: Zahtevani podatkovni in grafični sloji za hidravlični model

Vnos podatkov poteka preko okna vmesnika, ki je vidno na sliki 22. Tu se podatki ustrezno strukturirajo in razvrstijo v ustrezna, v že naprej pripravljena polja. Ta zahtevajo podatke o vseh točkovnih in linijskih slojih, s pripadajočimi atributnimi tabelami. Nekatere lastnosti, kot na primer črpalna krivulja, so definirane v posebni podatkovni tabeli, katera se preko ustreznega poimenovanja atributa poveže z atributno tabelo. Paziti je potrebno, da se sloji ustrezno razporedijo, saj v nasprotnem primeru vmesnik ne izvede računa, oziroma je ta napačen.



Slika 22: Okno vmesnika qgis epanet

Vmesniku je potrebno določiti natančno pot, kje se nahaja EPANET. Ta se vnese preko spodaj prikazane povezave, ki jo najdemo pod zavihkom »Processing options«.



Slika 23: Nastavitev direktorija programa za hidravlični račun v nastavitvah vtičnika

Rezultati simulacije se vrnejo v QGIS v obliki štirih tabel. Dve sta vezani na dogajanje v točkovnih in drugi dve na dogajanje v linijskih elementih. QGIS omogoča tudi vizualizacijo rezultatov na topološki karti omrežja, kjer se lahko na primer prikažejo vrednosti minimalnih in maksimalnih pretokov na posameznih ceveh. Atributni rezultati se obarvajo glede na vrednost in predpostavljene meje v legendi v več barv, katere ponazarjajo dogajanje na vodovodnem sistemu. Omogoča tudi možnost časovne simulacije za vsa vozlišča, preko kateri se lahko spremljajo pretoki in kako ti nihajo skozi časovno obdobje simulacije. Izbere se lahko poljubno vozlišče in opazuje za poljuben časovni okvir.

### 2.8.3 EPANET 2.0

EPANET 2.0 je razvit s strani ameriške agencije za varstvo okolja (U.S. Environmental Protection Agency). Gre za brezplačno dostopen program, do katerega se lahko dostopa preko

njihove spletne strani. EPANET je bil razvit za modeliranje vodovodnih omrežij z namenom, da omogoči izboljšanje kakovost vode, ki se dovaja potrošnikom preko vodovodnega sistema, predvsem pa za planiranje in izboljšanje sistemskih hidravličnih razmer. Program omogoča tako statične kot tudi razširjene časovne simulacije. Primeren je za uporabo: [17]

1. analizo vodovodnega sistema poljubne velikosti
2. račun linijskih izgub tlaka z uporabo različnih enačb (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ali Chezy-Manning)
3. račun lokalnih izgub zaradi lokov, zožitev, ipd.
4. modeliranje različnih črpalk (krivulja  $H(Q)$ , konstantna ali spremenljiva hitrost črpalk)
5. modeliranje različnih tipov ventilov (zaporni ventil, kontrolni ventil, regulator tlaka, ventil za kontrolo pretoka)
6. simulacijo vodohranov poljubne velikosti in oblike (npr. premer se lahko spreminja z višino).

EPANET je programiran do te mere, da omogoča simulacije hidravličnega dogajanja v sistemu in kakovostne parametre vode v vodovodnem omrežju, skozi daljše časovno obdobje. Vodovodno omrežje, ki je sestavljeno iz cevi, vozlišč, črpalk, ventilov, vodohranov in vira se prenese v računalniško okolje programa s pomočjo ustreznih simbolov in parametrov, ki določajo posamezen element. Račun s programom EPANET omogoča: [17]

- račun pretoka vode v ceveh in vpogled na tlačne razmere v vozliščih v obravnavanem sistemu
- vpogled v višino vode v rezervoarjih ter opazovanje nihanja koncentracije določenih snovi v vodovodnem omrežju skozi simulirano obdobje
- omogoča urejanje vhodnih podatkov,
- zagon hidravličnih in kvalitativnih simulacij
- pregled rezultatov v različnih formatih.

Uporabniku je preko grafičnega vmesnika tudi omočen vpogled v kodirano barvno karto omrežja, ogled podatkovne preglednice za vsak element sistema, časovni grafi ter dvo ali tridimenzionalni ploskovni prikaz tlakov. V EPANET-u lahko upoštevamo tudi različne kategorije porabe vode v omrežju (šole, bolnišnice, industrija) na konkretnem vozlišču s specifičnim vzorcem potrošnje, omogoča tudi modeliranje iztoka oz. izgube v odvisnosti od tlaka v sistemu in omogoča zasnovo tudi bolj kompleksnih scenarijev kontrole v vodovodnem omrežju (npr. nivo gladine vode v vodohranu, časovna kontrola,...). Poleg zgoraj naštetih, ponuja programsko orodje še mnoge druge možnosti in je namenjen tako manj kot tudi bolj zahtevnim uporabnikom.

Za izboljšanje tlačnih in pretočnih razmer v vodovodnem sistemu, se lahko s pomočjo programa preoblikuje model. Tako se lahko na črpališču poda črpalke z drugačnimi karakteristikami ali novim vzorcem (krivuljo) delovanja, vplivamo na delovanje vodohrana, vključi v model dodatne ventile, itd. Pri ponovni vzpostavitvi hidravličnega modela se preveri nove tlačne in pretočne razmere in se jih primerja s prejšnjimi. S pomočjo takih sprememb v modelu omrežju se lahko prihrani veliko časa, energije in tudi finančnih sredstev za delo na terenu. Zato se vsak vodovodni sistem vedno predhodno obdela s pomočjo hidravličnega modela v enem izmed računalniških programov, pa naj si bo to za namen novogradnje ali za rekonstrukcijo že obstoječega stanja.

Za določitev linijskih izgub je najnatančnejša uporaba enačbe Darcy-Weisbach (D-W). Program poleg te ponuja tudi enačbi Chezy-Manning (C-M) in Hazen-Williams (H-W). H-W se v program vnašata v brezdimenzijski obliki. V enačbi D-W nastopa absolutna višina hrap ( $\epsilon$ ) v cevi, enota pa je v programu odvisna od izbranega merskega sistema enot (mm ali mft).

V EPANET 2.0 je laminarni režim toka definiran za območje  $Re < 2000$ , kritični režim za  $2000 < Re < 4000$  in prehodni režim za  $Re > 4000$ . Račun energijskih izgub s pomočjo Darcy-Weisbachove enačbe. [17]

Podatke o lastnostih vodovodnega omrežja se lahko vnaša za vsak element posebej ali s pomočjo tabel. Pri vnosu podatkov se je potrebno zavedati, da so nekateri podatki nujni, drugi pa kot pomoč boljšemu določevanju nekaterih elementov. Kateri podatki pa so nujno potrebni za natančno določitev elementa nam prikazuje spodnja preglednica.

**Tabela 1: Vhodni podatki elementov hidravličnega modela**

<b>Element vodovodnega sistema</b>	<b>Potrebni podatki za hidravlični model</b>
Vir/zajetje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ustrezna oznaka</li> <li>• višina gladine (nadmorska višina + tlak)</li> </ul>
Vozlišče	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ustrezna oznaka</li> <li>• višina vozlišča (z-koordinata)</li> <li>• poraba v vozlišču</li> </ul>
Ventil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PRV (razbremenilnik tlaka)</li> <li>• FCV (vzdrževanje pretoka)</li> <li>• PSV (vzdrževanje tlaka)</li> <li>• FBV (reduciranje tlaka)</li> <li>• TCV (za simulacije delno odprtega ventila)</li> <li>• GPV (za modeliranje specialnih elementov sistema)</li> </ul>
Cev	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ustrezna oznaka posamezne cevi</li> <li>• absolutna hrapavost</li> <li>• premer in dolžina cevi</li> <li>• začetno in končno vozlišče</li> </ul>
Vodohran	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ustrezna oznaka vodohrana</li> <li>• višinska kota rezervoarja (z-koordinata)</li> <li>• začetna višina vode</li> <li>• minimalna in maksimalna gladina vode</li> <li>• premer oziroma geometrija vodne celice</li> </ul>
Črpalka	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ustrezna oznaka črpalke</li> <li>• ustrezna črpalna krivulja</li> </ul>

EPANET mogoča prikaz rezultatov na več različnih načinov. Izbira načina prikaza je odvisna predvsem od vrste rezultata in na kak način ga želimo predstaviti. Prikaz je možen s pomočjo grafikonov, preglednic ali v situaciji vodovodnega omrežja (barvna shema).

Grafikovi predstavljajo dober način prikaza rezultatov analiz (npr. tlaki v cevovodu). Predstavitev rezultatov analiz in vnešenih parametrov je lahko tudi v obliki preglednic, saj so v njej zbrani vsi podatki in tako mogoče v ustrežnejši obliki za nadaljnjo obdelavo. Prikaz rezultatov je možen tudi na situaciji, kjer se pomočjo kodirane barve sheme oplemeniti izgled hidravličnega modela, vse prikazane barve so zbrane v tabeli in predstavljajo določeno vrednost. V situaciji se lahko izpiše vrednost izbranih faktorjev ob posameznem elementu, vendar si lahko z uporabo te funkcije zmanjša preglednost modela. Obstaja tudi možnost animacije, kar pomeni da si lahko ogledamo spreminjanja podatkov skozi določeno časovno obdobje.

EPANET je v osnovi namenjen modeliranju vodovodnih omrežij in modeliranju kvalitete vode. S prilagoditvijo lastnosti »emitter«, ki je predvidena za modeliranje hidrantov ali sprinkler omrežij, je način računa primeren tudi za modeliranje mest puščanj na ceveh vodovodnega sistema.

Definicija je osnovana na Torcellijevi enačbi pretoka skozi odprtino. EPANET v svojem računu uporablja poenostavljeno obliko enačbe, ki je oblike:

$$EC = \frac{Q}{P^{P_{exp}}} \quad (26)$$

kjer je:

EC...emitter koeficient [l/s]

C...pretok

P...tlak v cevi [Pa]

Pexp...tlačni eksponent [-]

Emitter koeficient EC je lahko definiran za vsako mesto okvare na cevi posebej, medtem ko je je tlačni eksponent Pexp enak za celotno obravnavano vodovodno omrežje. Pexp je odvisen od oblike odprtine oziroma tipa okvare na cevi. V enačbi se lahko upošteva tudi zmanjšanje tlaka na mestu okvare za upor zemljine, vendar le za manjše tlake, ki ne erodirajo prehitro zemljine okoli cevi. Za vodovodne sisteme se predpostavi začetna vrednost Pexp = 0,5 in se preveri obnašanje in kako natančne rezultate se pridobi s to oceno. Uporabnost te metode v praksi je odvisna predvsem od natančnosti senzorjev tlaka in njihove zmožnosti zaznave manjših sprememb tlaka v cevi ter natančnosti EPANET modela. Metoda je bila preizkušena na več vodovodnih sistemih in je podala relativno zadovoljive rezultate določevanja mest vodnih izgub na ceveh, ki so odvisni od zgoraj naštetih pogojev. Metoda je uporabna predvsem za upravljavce vodovodnih sistemov, saj lahko z njo predhodno določijo mesta vodnih izgub. [18]

## 2.9 Vodne izgube

Nadzor nad vodnimi izgubami je povezan z distribucijo vode odkar so bili zgrajeni prvi vodovodni sistemi. Znanje in začetki prvih poznavanj in zavedanja vodnih izgub segajo 2000

let nazaj, za čas Rimskega imperija. Leta 57 je bil takrat rimski konzul in inženir Julius Frontinus, določen kot glavni upravljalec rimskega vodovodnega sistema. Celo življenje je posvetil delu na vodovodnih sistemih, beležil opažanja, iskal rešitve, največji izziv mu je predstavljalo iskanje ravnovesja med dotokom količin vode v mesto preko akvaduktov z uravnavanjem količin načrpane vode na vodnih virih v okolici. Ob tem se je zavedal tudi obstoja vodnih izgub na sistemu, predvsem tistih v podzemnih rovih. [19]

Danes, 2000 let pozneje, je narejen velik napredek v poznavanju razlogov, načinov odkrivanja in napredku v razvoju sistemov, s katerimi lahko upravljalec reši težavo prevelik vodnih izgub na vodovodnih sistemih. [19] Poznanih je več primerov vodovodnih sistemov, ki delujejo na meji zmogljivosti, predvsem zaradi omejenih vodnih virov ali pa je prirast števila odjemalcev (pre)hiter. Do napredka in razvoja na področju vodnih izgub je prišlo tudi zaradi klimatskih sprememb, kjer vse daljša sušna obdobja brez padavin povzročijo primanjkljaje zalog pitne vode, katere so nekatere države pripeljale na rob pomanjkanja zalog pitne vode (npr. nekatere zvezne države v ZDA). [19]

V Sloveniji se s to težavo ukvarja tudi Primorska oziroma Rižanski vodovod, ki v poletnem času, v vrhuncu turistične sezone ob obali, beleži težavo z zahtevanimi količinami pitne vode. Težavo rešujejo z odkupom pitne vode predvsem s Hrvaške strani, dolgoročna želja pa je vsekakor povezava z dodatnimi viri pitne vode. Druga skrajnost pa je lahko, da je kljub zadostni izdatnosti vodnega vira oskrba pogojena z zmogljivostjo sistema oskrbe ali z zmogljivostjo obdelave surove vode. Ena izmed rešitev za te primere se lahko identificira tudi v zmanjšanju vodnih izgub na vodovodnem sistemu. Gre za začasno rešitev, ki ne more nadomestiti ukrepa povečanja zmogljivostnih kapacitet ali priključitve novega vira pitne vode na vodovodni sistem. Ob vsem tem velja poudariti, da so vodne izgube v vodovodnih sistemih vedno prisotne, pa četudi predstavljajo le majhen del količine načrpane vode. [21]

Cresson je leta 1999, kot član Evropske komisije za razvoj, formuliral štiri pomembne smernice EU za pitno vodo. [22] Te vključujejo tudi preprečevanje in odkrivanje okvar na sistemih s pitno vodo, predstavil oziroma povzel pa je do sedaj poznane pristope za izboljšanje delovanja sistemov in pristope za zmanjšanje izgub. Leta 2003, je Nemčija izdala lastno smernico DVGWW392 (German Association of the Gas and Water Sector), ki opisuje že prej omenjene rešitve in metode za določevanje in zmanjšanje vodnih izgub. Leta 2009, se tej skupni pridruži še Avstrija s prenovljeno direktivo OVGWW63 (Austrian Association of Gas and Water). Vsebuje priporočila za račun vodne bilance sistema, povzete iz priporočil IWA (ang. International water association), in napotke za monitoring izgub. [22] Ta se od IWA priporočil razlikuje na področju izvajanja meritev oziroma določitvi DMA (ang. District meter area) območja. Druga razlika med obema smernicama je v dejstvu, da IWA predpostavlja, da lahko uravnavanje tlaka v sistemu bistveno pripomore k zmanjšanju števila okvar in količini izgub. Tu se naša soseda drži svojih pravil in smernic, kjer piše, da uravnavanje tlaka v sistemu ni nadomestilo za potrebne ukrepe, ki jih je potrebno izvesti za izboljšanje delovanja vodovodnega sistema. Priznavajo pa dejstvo, da lahko znižanje tlaka v cevovodu vodi k zmanjšanju vodnih izgub v času od poznavanja okvare in vse do njene sanacije. [22]

Vodovodne sisteme sestavlja večje število odjemnih mest, cevi različnih premerov, ventilov, črpalk in objektov, povezanih v skupen sistem. Zaradi omenjene kompleksnosti je njihova analiza zahtevna, določanje lokacij, predvsem velikosti vodnih izgub pa še vedno ena izmed zahtevnejših del in vedno odprta tema za nove diskusije in predlog novih raziskav. [23]

### 2.9.1 Vodna bilanca

Kot prvi korak vsake analize vodnih izgub je vzpostavitev vodne bilance obravnavanega vodovodnega sistema. Vodna bilanca predstavlja revizijo vseh dotokov in iztokov v obravnavanem sistemu in predstavlja vpogled v dogajanje obravnavanega sistema. Beleži porabo, količino izgub, ipd. in je prvi pokazatelj obsega vodnih izgub na sistemu. V vodni bilanci je predstavljen tudi delež prodane vode, napram dobavljenim (načrpanim) količinam vode. Obravnava se območje vodovodnega sistema od zajema oziroma vtoka pitne vode v cevovod, pa tja do odjema vode s strani različnih porabnikov (vodomera). Določene količine dovedene vode v omrežje se ovrednoti kot izgubljene, saj zaradi različnih razlogov niso bile dovedene od mesta odjema do končne točke odjema na sistemu, oziroma do merjenega mesta odjema.

IWA je vzpostavila model za oblikovanje vodne bilance sistema. [22] Ena izmed težjih del v pripravi analize je določitev neizmerjenih vrednosti količin izgubljene vode oziroma njihova kasnejša kategorizacija. Določene kategorije so lahko zgolj ocenjene, težka se definira časovni obseg, v katerem so se zbirali potrebni podatki. Določeni so zbrani na letni, drugi pa na krajši ali daljši časovni osnovi. Velja priporočilo, da se vse pridobljene podatke preoblikuje na časovno enoto enega leta in saj se s tem poenostavi nadaljnje delo. [22]

Vodna bilanca vodovodnega sistema predstavlja količino načrpane vode oziroma količino vode na vtoku v vodovodni sistem. Del teh količin vode se proda in se definira kot ugotovljena (merjeno) poraba, preostala razlika pa izpade v vodne izgube. Ugotovljena poraba se razdeli dalje v obračunano in neobračunano porabo. Tiste količine, za katere se lahko zagotovi, da predstavljajo del obračunane porabe, jih lahko označimo kot prodane količine vode uporabnikom in se jim jih tudi obračuna, glede na porabljeno letno količino. Preostali del se opredeli kot neprodana količina vode. V neprodane količine vode spadajo tudi vodne izgube na vodovodnem sistemu. Te se delijo na dejanske in navidezne. Pod slednje se uvršča neugotovljena poraba na vodovodnem sistemu in napaka, ki je možna pri meritvah pretokov oziroma na mestih odjema. Dejanske vodne izgube sestavljajo izgube vode na sistemih za obdelavo načrpanih količin vode, puščanja na transportnih ceveh ter puščanja na objektih vodovodnega sistema. Vse te količine se uvrščajo v skupino neprodanih količin vode.

V razred neobračunanih količin vode se uvršča tudi neobračunana avtorizirana poraba. V ta delež izgub se uvrščajo izgube količin vode, ki so bile uporabljene za namen gašenje požarov ali za potrebe rednega ali izrednega pranja vodohranov. Za pranje objektov na sistemu se upravljalec odloči po obdobju daljših ali aktivnejših padavin, ko je načrpana voda kalna zaradi različnih primesi in drobcov mivke. S tem se zagotavlja ustrezno kakovost pitne vode v sistemu in prepreči prekomerno kloriranje načrpane vode. Posebna kategorija, ki v teh shemah ni uvrščena, a je vsaj na našem območju prisotna, so neplačani računi oziroma odpis dolga. Ta se izvede za družine ali posameznike, ki preživljajo težjo socialno ali ekonomsko krizo in v tistem trenutku niso zmožni plačevati obračunanih količin porabljene vode. Tako se določena podjetja odločijo za odpis dolga, odpisane količine vode, navadno manjšega obsega, bi lahko uvrstili v zgornji shemi pripisali neobračunanemu razredov vodnih izgub.

Cena m<sup>3</sup> prodanih in neprodanih količin vode se obračuna z enakimi stroški črpanja, vendar od neprodanih količin upravljalec nima nobenih koristi. Zato jih poskuša zmanjšati na minimalne vrednosti in s tem povečati količino prodane vode. Ob tem se zmanjša tudi potrebna količina načrpanih količin, ki jih je potrebno dovajati v sistem.



Glede na rezultate vodne bilance, se tudi oblikujejo ustrezni ukrepi izboljšav vodovodnega sistema. Vodna bilanca predstavlja zelo malo podatkov o bodoči razporeditvi vodnih izgub, njihovi velikosti in ali se bo dinamika izgub povečala ali zmanjšala. [22]

Sklopi vodne bilance za vodovode				
Vtok v vodovodni sistem [m <sup>3</sup> /leto]	Ugotovljena poraba [m <sup>3</sup> /leto]	Obračunana poraba [m <sup>3</sup> /leto]	Obračunana merjena poraba (vključujoč izvoz vode) [m <sup>3</sup> /leto]	Prodane količine vode [m <sup>3</sup> /leto]
			Obračunana nemerjena poraba [m <sup>3</sup> /leto]	
		Neobračunana poraba [m <sup>3</sup> /leto]	Neobračunana merjena poraba (vključujoč izvoz vode) [m <sup>3</sup> /leto]	Neprodane količine vode [m <sup>3</sup> /leto]
			Neobračunana nemerjena poraba [m <sup>3</sup> /leto]	
	Vodne izgube [m <sup>3</sup> /leto]	Navidezne izgube [m <sup>3</sup> /leto]	Neugotovljena poraba [m <sup>3</sup> /leto]	Neprodane količine vode [m <sup>3</sup> /leto]
			Nenatančnost meritev [m <sup>3</sup> /leto]	
		Dejanske izgube [m <sup>3</sup> /leto]	Dejanske izgube na vodih surove vode in na sistemih za obdelavo vode (če obstajajo) [m <sup>3</sup> /leto]	
			Puščanje na transportnih in razdelilnih vodih [m <sup>3</sup> /leto]	
Puščanje in prelitvi na transportnih in/ali razdelilnih vodovodnih [m <sup>3</sup> /leto]				
Puščanje na priključkih do merilnega mesta [m <sup>3</sup> /leto]				

Slika 24: Vodna bilanca [1]

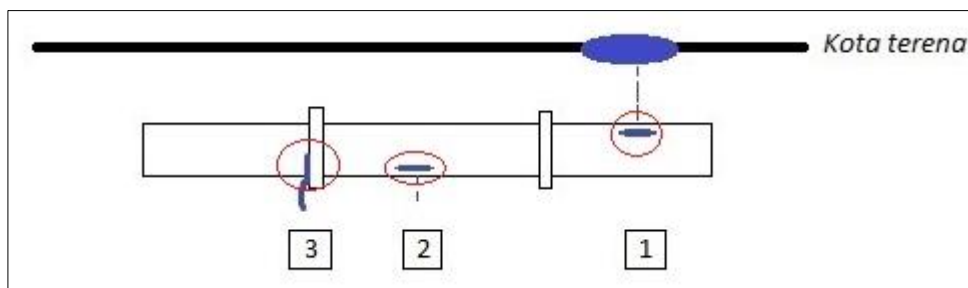
## 2.9.2 Nastanek vodnih izgub

Vodne izgube nastanejo zaradi različnih razlogov in dejavnikov, ki se pojavijo kot posledica delovanja vodovodnega sistema ali pa imajo povsem drug izvor iz okolice. Prisotne so v vseh vodooskrbnih sistemih, tudi novejših. Obseg in število izgub na vodovodnem sistemu je moč ovrednotiti, tako s količinsko kot tudi ekonomsko vrednostjo. [24] Na njihov nastanek in obseg vplivajo:

- korozivni vplivi okolja na materiale elementov sistema (cevi, objekte, črpalke,..)
- zemeljski premiki (npr. plazovi)
- neustrezna konstrukcijska zasnova (oblika omrežja, neustrezno lociranje objektov, nepravilen hidravlični račun,...)
- (prevelika) fluktuacija tlaka v vodovodnem sistemu
- vibracije

Izgube se lahko pojavijo na mestih po celotni mreži vodovodnega sistema. Območje obravnave in odkrivanje vodnih izgub pomeni delo in izvajanje z njimi povezanih ukrepov na celotnem vodovodnem sistemu. Območje dela za upravljalca pomeni skrb za celotno cevovodno mrežo in objekte na sistemu, od točke vtoka vode v sistem in vse do točke odjema oziroma mesta vodomera.

Ob vsem tem se je potrebno zavedati, da voda na mestu puščanja na cevi izteka v zemljino. Če je okvara na cevi manjša ali so tlaki v cevi manjši, lahko iztekajoča voda zaradi zemljinske poroznosti izteka med zrnca zemljine dalj v globino. Zato posledice poškodb cevi niso nujne vidne na terenu. Predvsem to velja za primere, ko je okvara manjših razsežnosti in jo je težko zaznati tudi z rednim monitoringom omrežja.



Slika 25: Oblike puščanj na ceveh [25]

Obseg puščanja je odvisen od primera do primera, v grobem pa jih lahko razdelimo na: [25]

- Vidno puščanje (primer 1): javljanje vidnih mest okvar s strani uporabnikov vodovodnega sistema: navadno so taka mesta vidna pri visokih pretokih v omrežju in je obvestilo o pojavu okvare prejeto kmalu po nastanku okvare na cevi.
- Skrito puščanje (primer 2): ostane nevidno očem, vse dokler se obseg puščanja ne poveča ali se ne odkrije z uporabo naprav za odkrivanje vodnih izgub na ceveh. Obseg izgubljene vode skozi mesto okvare odvisen od tlaka v cevi. Okvaro je moč zaznati s pomočjo monitoringa sistema, mesto okvare pa locirati z akustičnimi napravami. Navadno se ta tip okvare pojavi na distribucijskem omrežju in hišnih priključkih.
- Manjša puščanja (primer 3): zaradi majhnega obsega puščanja ostanejo skrita tudi akustičnim merilnim instrumentom in je njihov obseg deloma možno oceniti zgolj z stalnim monitoringom. Take oblike puščanj uvrščamo pod tisti odstotek izgub, ki ji ni moč odpraviti oziroma njihovo iskanje pomeni precejšnje povečanje stroškov za upravljalca. To obliko puščanja se navadno pojavi na stikovanju dveh cevi (slabo tesnilo), fazonskih kosih, itd. S pomočjo različnih raziskav so bile podane vrednosti obsega teh puščanj. Določena je zgornja vrednost, do katere lahko tip puščanja uvrstimo ta razred. Mejna vrednost je cca. 0,0694 l/s oziroma vrednost, ki je manjša od 250 l/dan. [25]

Posledice vodnih izgub na sistemu se lahko merijo v:

- izgubi dragocenih količin pitne vode ustrezne kakovosti,
- poškodbah cevovodnega sistema ali cestnih teles v okolici ali
- z prodajno ceno m<sup>3</sup> pitne vode.

Vedno pa velja zavedanje, da lahko okvara na cevi ob zmanjšanem tlaku v omrežju pomeni nevarnost okužbe pitne vode s tujki. [25]

### 2.9.3 Identifikacija vodnih izgub

Vodne izgube se v vodovodnih sistemih (po definiciji IWA) delijo v dva večja razreda, vsak s svojimi karakteristikami in različnim deležem v celotnem obsegu vodnih izgub na vodovodnem omrežju.

### **Dejanske (realne) izgube (ang. Real losses)**

V ta razred vodnih izgub se zvrsti tisti delež izgub vode, ki nastanejo zaradi poškodb na vodovodnem sistemu. Lokacije poškodb so lahko na transportnih ali distribucijskih vodih, stikovanju cevi, z leti pa se poveča tudi možnost poškodb na objektih (vodohrani, rezervoarji) ali pa se puščanje pojavi na mestu odvzema (vodomeru).

Vzroki, za nastanek dejanskih izgub: [21]

- Material, stanje in starost cevovodnega sistema
- Puščanja na dotrajanih ali nepravilno tesnjenih ventilih ali hidrantih
- Dimenzioniranje
- Kakovost gradnje, montaže
- Vzdrževanje vodovodnega omrežja
- Tlak v omrežju
- Zemeljski premiki ali neustrezno izvedeno tesnjenja objekta
- Prometna obtežba

Določevanje dejanskih izgub lahko poteka s pomočjo volumetrične metode za izgube v vodohranih in drugih rezervoarjih, z meritvijo pretokov za oceno izgub na transportnem omrežju ali s pomočjo analize minimalnih nočnih pretokov za oceno izgub v distribucijskem omrežju.

Ocenjena vrednost dejanskih izgub je enaka: [26]

**Dejanske izgube = NRM – UAC – navidezne izgube**

kjer je:

NRW...neprodane količine vode (ang. Non revenue water)

UAC...neobračunana poraba (npr. raba s strani upravljalca)

### **Navidezne izgube (ang. Apparent losses)**

Razlog za pojav navideznih izgub ni v puščanju infrastrukture, ampak se razlogi za njihov nastanek iščejo v naslednjih dejavnikih: [25]

- Nenatančnost meritev: okvare, pomanjkljivo vzdrževanje, neumerjen instrument, napačno izbrana velikost števca pri merjenju odjema.
- Kapljično iztekanje: lahko iz domače pipe ali pri vodomeru. S kontinuiranim kapljanjem lahko kaj hitro dosežemo velikost vodnih izgub do nekaj 10 l/dan. (DVGW smernica)
- Nenatančnost obdelave podatkov: napake pri odčitavanju vodomero, napake pri obdelavi meritev in obračunu, podcenjevanju količin nemerjene porabe vode v omrežju, pavšalno obračunavanje (vodi k večji porabi vode kot je običajno predvideno).
- neregistrirana poraba oziroma kraja vode iz sistema: t.i. »črni« priključki, kjer gre za nepooblaščen odzem vode (preko hidranta). Druga oblika je manipulacija vodnih števcov (ureditev »by-pass« sistema) ali osebja.

Pri določevanju obsega navideznih izgub se lahko uporabi naključno vzorčenje vodomeroev za določitev natančnosti merjenja, uporabi različno programsko opremo za oceno nenatančnosti pri obdelavi podatkov ali z naključnim vzorčenjem ugotavlja obseg nepooblaščenih porab načrpane vode.

#### 2.9.4 Izvajanje monitoringa

Monitoring se na vodovodnih sistemih izvaja z namenom spremljanja stanja in zaznave sprememb na vodovodnem omrežju. Spremljanje stanja vodnih izgub je osnovna naloga vsakega izvajalca javne službe, saj lahko neobvladljive vodne izgube pripeljejo obratovanje vodovodnega sistema relativno hitro na rob zanesljivosti. To poskuša uravnavati s povečanjem vtočnih količin vode v vodovodni sistem, tako da je zagotovljena nemotena oskrba s pitno vodo in da ohranja tlake v vodovodnem sistemu v okviru zahtevanih meja.

Izvajanje ustreznih in pravočasnih ukrepov na področju zmanjševanja vodnih izgub, lahko prinese upravljalcu vodovodnega omrežja določene prednosti: [21]

- povečan zdravstveno-higienski standard oskrbe pitne vode oziroma zmanjšanje možnosti okužbe pitne vode skozi mesto defekta. Zato je pomembno v sistemu ohraniti določen tlak, ki preprečuje vdore zunanjih organizmov v vodovodno cev. Na viru, se lahko ob krajši in slabši kvaliteti surove vode uporabi klorirno postajo. Če gre za konstantno črpanje manj kakovostne surove vode, se zato zgradi ustrezen objekt in uvede postopke za obdelavo načrpane vode (peščeni ali membranski filtri, sedimentacija, dezinfekcija, itd.)
- zmanjšanje stroška porabe električne energije za črpanje in obdelavo surove vode. Strošek električne energije predstavlja drugi največji strošek, večji je le strošek fizičnega dela na omrežju. Ocenjeno je, da lahko v razvitih državah s tem prihraniš do 50% do sedaj porabljenih financ.
- zmanjšanje tekočih stroškov obratovanja vodovodnega sistema
- optimizacija proizvodnje – ugodnejše razmerje med količino načrpane vode in dobavljene (prodane) vode
- zmanjša se potreba po iskanju novih vodnih virov
- manjšanje potreba po rekonstrukciji vodovodnega sistema in s tem podaljševanje življenjske dobe vodovodnih sistemov
- zanesljivejše obratovanje vodooskrbnega sistema z manj intervencijami in manj prekinitvami v dobavi vode, zaradi stabilnejšega delovanja sistema
- manjši vplivi na okolje
- manjši davek vodnega povračila oziroma manjše okoljske dajatve

Monitoring je lahko statične ali dinamične oblike. Pri statičnem gre za stalno spremljanje hidravličnih parametrov na merilnih točkah v sistemu. Spremlja se iztok in vtok vode v vodohran, pretoke skozi črpalke in količino načrpane vode na vodnem viru. Dinamično spremljanje je lahko dnevno spremljanje stanja določenega dela omrežja, kjer se sproti posodablja in izbira oprema, s katero se pridobi potrebne rezultate meritev in se prilagaja razmeram v omrežju. Ustrezen odziv na dogajanje, lahko pozitivno vpliva na hidravlično stanje omrežja, kvalitetno in konstantno oskrbo odjemnih mest, s sprotim vzdrževanjem pa tudi na finančni prihranek. [22]

Za uspešen monitoring je potrebno izpolnjevati naslednje kriterije: [22]

- zaznati spremembe v pretoku, smeri toka v cevi in nihanju tlaka, ki so jasni pokazatelji pojava izgub na sistemu. Tu se pomaga z merilnimi napravami, ki so postavljena na ključna vozlišča sistema.
- razdelitev vodovodnega sistema na DMA območja, s katerim se lahko hitreje locira območje in določi mesto izgub in v katerih se meri zgoraj navedene parametre. S kontinuiranimi meritvami se lahko identificira mesto okvare na cevi z manjšanjem DMA območja, do same cevi natančno.
- z monitoringom dosežemo vpogled v sistem in rezultate, ki se jih doseže z opravljenimi sanacijami v DMA območju
- ekonomska upravičenost sanacij → omejitev na velikost defektov, ki jih je še smiselno sanirati
- cilj monitoringa vodovodnega sistema je zmanjšanje obsega izgub v sistemu, zato je pravi pristop k izvajanju meritev ključnega pomena

Na vodovodnih sistemih, kjer ni vzpostavljenega monitoringa skozi daljše časovno periodo, se mesta okvar na cevi locirajo z: [25]

I. naključnim iskanjem

II. zapiranjem ventilov v DMA območju (t.i. »step testing«)

Za krajši čas se ustvari območje (ang. Leakage control zone (LCZ)) in opravlja meritve v času minimalnega nočnega pretoka (MNF), med 2 in 4 uro zjutraj. Meritve zajamejo tako vsoto nočnega pretoka in tudi količino vodnih izgub. Če je izmerjena vrednost večja od določene vrednosti s strani upravjalca, ki bi moral poznati stanje vodovodnega sistema in pretoke v nočnem času, razlika v vrednostih pomeni velikost izgub vode na tem območju. Z meritvami v času nočnih pretokov se lažje določi velikost in lokacija porabljene vode (majhna glede na dnevno) in ob tem se tudi ogne prekinitvi oskrbe z vodo.

Uporaba tega načina iskanja izgub je priporočljiva za iskanje vodnih izgub v primeru manjših okvar na ceveh ali za odkrivanje mest neznane porabe. Metoda mora biti skrbno načrtovana, saj mora biti izvedena v zelo kratkem času (2 ur) in se lahko izvede v dveh tipičnih korakih:

1) Izolacijska metoda [25]

Postopek dela sledi prvemu koraku, kjer z zaprtjem najbolj oddaljenega ventila od mesta meritve začnemo proces določitve mesta okvare. Na tem mestu je (mora biti) pretok  $Q = 0$ . Tako sledi zapiranje naslednjih ventilov, enega za drugim, vse dokler se ne identificira potencialnih območja puščanja vode. Postopek ima tudi večjo negativno lastnost, saj ob zapiranju ventilov in ob obstoju okvare na cevi, tlak v tem območju pada in je manjši od tlaka v sistemu. S tem obstaja možnost, da pride skozi mesto okvare na cevi do vdora podtalnice ali drugih tujkov v cev in se s tem ogrozi neoporečnost cevovoda.

2) Metoda »odpri – zapri« [25]

Del vodovodnega sistema se določi kot DMA območje in se zapre. Tu se opravi meritve potrebnih hidravličnih parametrov in za tem odpre. Prednost tega načina meritev je v tem, da so uporabniki v coni merjenja krajši čas brez vode. Ima pa tudi slabost, ki se lahko odraža v naslednji coni meritev, saj ima lahko prejšnja cona vpliv na naslednjo. Ob zaprtju prejšnje, se tlak in pretok v tej

povečata in lahko traja nekaj časa, da se ponovno do vzpostavi ravnovesno stanja sistema. Zato se za ta primer težje zagotovi optimalnost meritev in verodostojnost rezultatov.

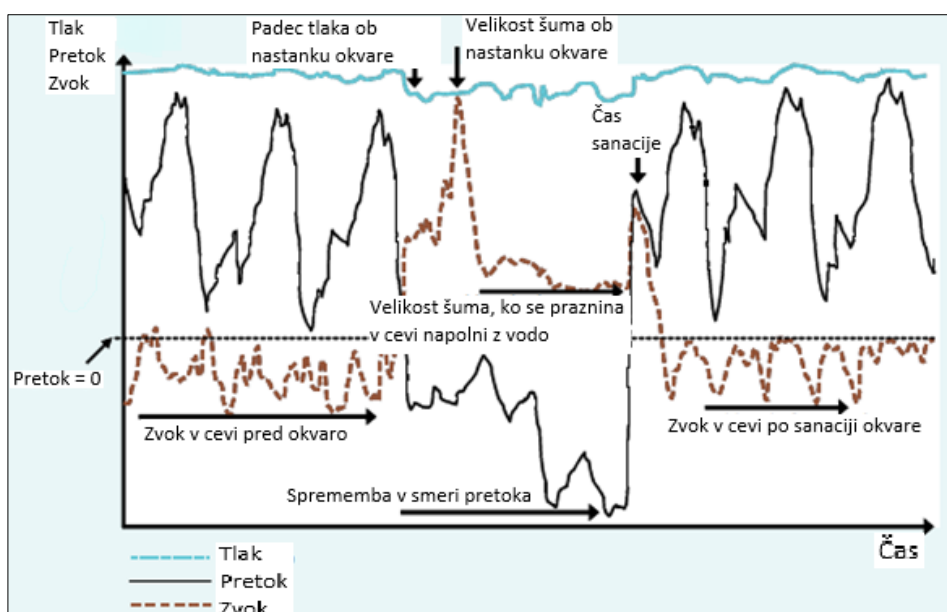
III. karakteristiko šuma vode na mestu okvare [25]

Vsak defekt na cevi ali okvara na sistemu ustvarja svoj značilen šum, s specifično frekvenco zvoka. Ta je odvisna od velikosti okvare, materiala cevi, tlaka v cevi, lastnosti okolišnje zemljine in višine podtalnice. Hitrost potovanja šuma je odvisna od lastnosti materiala cevi in vode. Pri potovanju šuma skozi okolišnjo zemljino se lahko spremeni frekvenca šuma ali pa se zaradi lastnosti zemljine in višine podtalnice le-ta deloma zaduši. Poudariti je potrebno, da vse nastale okvare na sistemu ustvarjajo specifične šume, ki jih je moč zaznati, uporabiti je potrebno le ustrezen pristop, metodo in merilno napravo.

IV. uporabo akustičnih naprav (logerjev) [25]

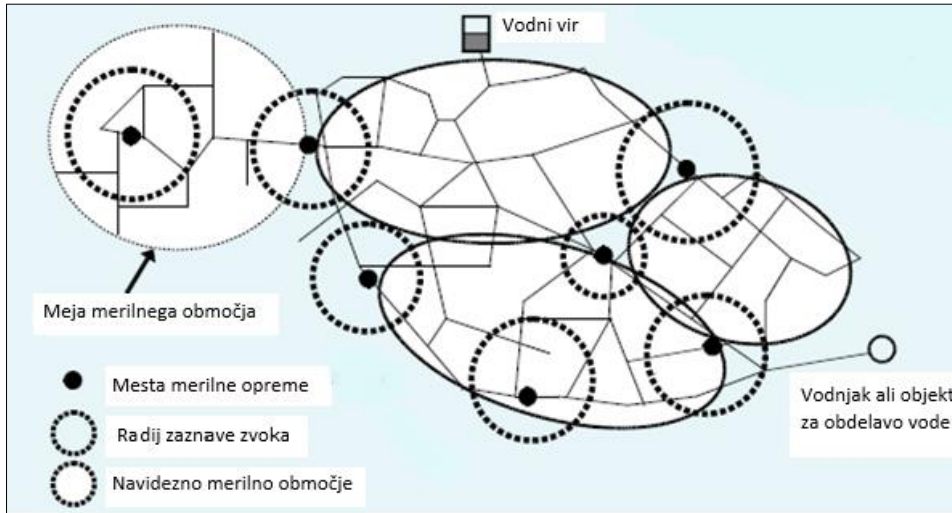
Okoli leta 1990 je ta metoda nadomestilo prejšnje (npr. »step by step«) oblike metod, saj je njeno izvajanje možno v kateremkoli delu dneva, ni potrebe po dodatnem zapiranju ventilov, itd. Priporočljiva je predvsem na območjih z razgibano obliko terena, kjer bi lahko nočno delo pomenilo dodatno nevarnost za delavce na terenu. Uporablja se kot dodatna možnost meritev v DMA območjih, torej kot del monitoringa sistema ali pa se namesti na sistem zgolj za krajše obdobje (npr. 2 noči). Gre za natančno metodo, ki je uporabna na vseh tipih in materialih vodovodnih sistemov. Namestitev naprave je možna na ventil ali hidrant, s pomočjo močnega magneta. Meritve se opravljajo intervalno, v času nočnih pretokov, ko ni veliko ostalih motečih šumov iz okolice. Vsak odčitek naprave sledi na 1 sekundo in v okviru časovne periode 2 ur.

V okviru monitoringa se navadno opravlja meritve pretoka, tlaka in šuma. To so najpomembnejši parametri za določevanje izgub. Sočasno z meritvami, se lahko opravi tudi meritve dodatnih parametrov, kot je na primer temperatura vode v sistemu. [22]



Slika 26: Meritve tlaka, pretoka in zvoka na odseku cevi [22, str. 3]

Ob izvajanju meritev in uporabi merilne opreme se je potrebno zavedati zmožnosti in omejitev merilnih naprav, njihove natančnosti in pravilne uporabe. Vsak instrument ima svoje značilno merilno območje delovanja. Tako so meritve pretoka in tlaka omejene na točkovno mesto na sistemu. Medtem ko lahko meritve zvoka zajamejo določen radij okoli točke namestitve merilnega inštrumenta. S tem zajamejo različne tipe šumov, ki nastajajo na cevi in v okolici, ki se jih uspešno loči z ustreznimi filtri zvoka. [22]



Slika 27: DMA območja in radij instrumenta za zaznavo zvoka [22, str. 6]

## 2.10 Metode odkrivanja okvar na sistemu

Iskanje mesta okvare poteka v obliki štirih korakov: [25]

1. Ugotavljanje pojava in obsega vodnih izgub na vodovodnem omrežju s pomočjo računa vodne bilance
2. Določitev DMA območja, na katerem se z monitoringom oceni obseg vodnih izgub
3. Določitev mesta okvare na cevi, znotraj DMA območja, s terensko ekipo in ustrežno opremo za odkrivanje mesta okvare na cevi
4. Ustrezen pristop in izvedbo sanacije mesta okvare na cevi

K odkrivanju lokacij okvar na vodovodnem sistemu se lahko pristopi na več načinov. Najstarejši pristop je terensko iskanje, pri katerem se z uporabo različnih instrumentov išče mesta defektov na vodovodnem sistemu.



Slika 28: Časovni razvoj opreme in metod za detekcijo okvar [25, str.20]

Skozi čas in razvojem znanj na področju odkrivanja vodnih izgub in razvojem računalniške opreme, so prihajale nove in bolj natančne metode za iskanje mest okvar na ceveh. Tako poznamo danes veliko različne opreme, metod in pristopov. Ti so vedno znova posodabljeni in delujejo na osnovi različnih matematičnih metod, analiz hidravličnega stanja vodovodnega sistema in s povezavo različnih metod v zaključeno in uspešno celoto.

### 2.10.1 Akustične metode

V tem sklopu se najde vsa najpogosteje uporabljena terenska oprema za lociranje mesta okvare na cevi. Akustična naprava zaznava šume, ki jih ustvarja vode, ki pod tlakom izteka iz mesta okvare. [21]

Posebej je potrebno opozoriti, da akustične metode (zaenkrat) ne zaznajo vseh izgub. S tem so povezane minimalne oziroma izgube majhnega velikostnega razreda. Njihov obseg puščanja je tako majhen oziroma počasen, da jih akustična naprava ne zazna. To vrsto izgub smo pri razdelitvi izgub omenili v razredu neobračunane nemerjene porabe.

Poznamo več različnih merilnih instrumentov in pristopov, opisani so zgolj najpogosteje uporabljeni.

- **Stetoskop** oz. »slušna palica« [25]  
Ena izmed najstarejših in preprostejših metod je uporaba votle palice, ki deluje na principu stetoskopa in je lahko iz različnih kovin ali lesa. En del palice se namesti na cev (ventil, hidrant,...), drugi pa prisloni k ušesu. Iskanje poteka naključno in je zato lahko časovno potratno delo. Uspešnost identifikacije in lociranja mesta okvare na cevi je omejeno, pri čemer so pogosto potrebna obsežna izkopavanja, za dejansko lociranje loma.
- **Elektronski stetoskop** [25]  
Gre za naprednejšo verzijo opremo prejšnje točke. Celotno opremo sestavljajo mikrofoni, ojačevalci in filter za ločevanje šumov. Ponekod se še danes uporablja kot del rednih pregledov vodovodnih sistemov. Uporabi se lahko kot ena izmed metod v odkrivanju mest izgub znotraj DMA območja. Namesti se na ventil in hidrant in lahko služi kot potrditev ugotovitev drugih oblik metod. Prikaz rezultatov je lahko tudi v grafični obliki na zaslonu ali sprotno spremljanje šumov s pomočjo slušalk.



Danes se uporablja sodobnejše oblike metod za odkrivanja mest okvar na sistemu. Metode se vedno znova razvijajo in pridobivajo na natančnosti. Iskanje izgub poteka v dveh osnovnih korakih, identifikaciji območja in identifikaciji lokacije loma cevi. Identifikacija območja je aktivnost, ki identificira območja in opredeljuje prioritete glede območij izgub, da je kasnejše lociranje mesta okvare lažje in hitrejše. Izvaja se z vzpostavitvijo začasnega manjšega merilnega območja, kjer se izvaja meritve pretokov in tlakov. Ta območja so v sedanji literaturi označena kot DMA območja (ang. District metered area) in predstavljajo del celotnega vodovodnega sistema, ki se oskrbuje preko ene same cevi. Območje se fizično vzpostavi z zapiranjem določenih ventilov in zasunov. [2]

Velikost območja se lahko izbere s pomočjo naravne oblikovanosti terena ali s pomočjo priporočil UKWIR (United Kingdom Water industry research) iz leta 1999, ki so bila izdelana za vzdrževanje, nadzor in kontrolo obsega puščanj na vodovodnih sistemih. Načeloma naj bi DMA območje obsegalo od 500 do 3000 odjemnih mest. Z ustrezno določenim DMA območjem, se hitro in učinkovito locira območje cevovoda, kjer prihaja do večjega obsega vodnih izgub. [21] Na tem območju se meri pretok in tlak na več točkah, ob pogoju poznanih količin dotekajoče vode v DMA območje. S pomočjo tega koraka se predvidi netipične porabe vode, ki so lahko vezane na odjemalce ali okvaro na cevovodnem sistemu DMA območja. Za katerega izmed njiju gre, nam lahko povedo meritve v času minimalnih nočnih pretokov. V času minimalnih pretokov so tlaki v vodovodnem omrežju največji, zato je tudi efekt puščanja najlažje prepoznati in locirati. [21] Več kot je merilnih naprav tlaka na sistemu, hitreje se lahko zazna pojav izgub vode oziroma pojav okvare na sistemu, saj okvara povzroči nihanje tlaka v omrežju. Zaželeni so merilci z visoko natančnostjo, ki zaznajo že manjša odstopanja od običajnih razmer. Merilce se namesti na tista mesta, kjer je predvidena večja verjetnost pojava okvare. [28] Povežejo se lahko v skupno bazo, kjer se shranjuje SCADA podatke, ki so vedno na voljo za spremljanje dogajanja in obdelavo. [21]

Za sum puščanja na sistemu so lahko kot prvi opozorilni znak povečani nočni pretoki. To se obravnava v primeru, če je nočna poraba večja od tiste v času s strani odjemalcev (pozno zvečer) ali pa če nočni pretok preseže določeno vrednost dovoljenega nočnega pretoka. Ta vrednost je določena kot vsota pretokov nočne porabe odjemalcev (hišni priključki), porabe industrijskih in trgovinskih kompleksov ter določene (neizogibne) stopnje vodnih izgub iz sistema. [21]

Po vzpostavitvi DMA območja in določitvi območja puščanja na cev natančno, se mesto loma na cevi določi z uporabo akustičnim merilnih naprav (ang. Accoustic logging). V uporabi je več različnih naprav, vedno znova pa stroka s tega področja raziskuje in išče nove metode ali naprave, s katerimi poskuša še natančneje locirati in določiti obseg izgub na vodovodnih sistemih. Spodaj so predstavljene najpogosteje uporabljene akustične metode in njihova uporaba.

- **Talni mikrofoni** (ang. Listening devices)

Oprema je sestavljena iz palice in (talnega) mikrofona. Poznamo elektronske in mehanske oblike naprav. Delujejo s pomočjo občutljivih mehanizmov, ki zaznajo šum ali vibracijo v tleh, ki jo povzročata defekt na cevi. Upravljalca z inštrumentom potuje po terenu, nad osjo cevi. Mehanske merilce lahko motijo šumi okolice, zato niso uporabljeni v okolici večjih urbanih središč, prometnic ali drugih možnih virov šumov. Danes elektronske naprave vsebujejo filtre šumov, ki ločijo šum defekta od ostalih šumov okolice. [21] Lahko se jih namesti neposredno na stik (ventil) ali na površino

terena, neposredno nad osjo cevi. Pri prvem je statično nameščen, pri drugem pa se napravo pomika nad osjo cevi in spremlja jakost šuma. Modernejše oblike te naprave lahko sestavlja tudi do 16 senzorjev. [25]



Slika 29: Iskanje mesta okvare nad osjo cevi, z uporabo metode s talnim mikrofonom [25, str.21]

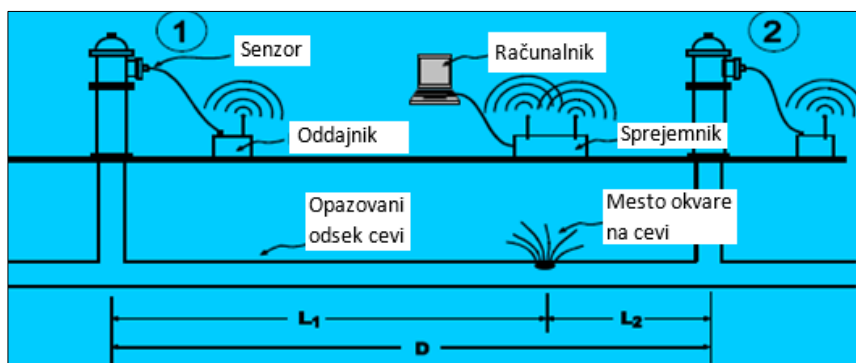
Primerni so za uporabo na območjih, kjer je sestava tal enovita in se šum širi enakomerno v vse smeri. Uspešnost meritev je odvisna od usposobljenosti in izkušenj upravljalca z merilnim instrumentom. Gre za časovno potraten način iskanja mesta okvare, saj gre v celoti za terensko delo.

- **Digitalni logerji** (ang. Digital noise loggers)

Predstavlja kombinacijo akustičnega logerja in korelatorja in s tem povečanje učinkovitosti delovanja naprave, ki pomenijo manj operativnih stroškov za delo na terenu. S hitrejšim identificiranjem mesta okvare, ki se odraža tudi v hitrejši odpravi težave, se zmanjša obseg izgub in njihov vpliv na ekonomski račun.

Namesti se jih v obliko mreže, po 6 ali več v bližino stikovanja dveh cevi, hidrantov ali ventilov, na medsebojni razdalji 200 do 500 m, in tam pusti skozi noč. [21] Obstaja tudi varianta, da se akustične logerje namesti neposredno na cev, ventil ali hidrant. [27]

Merjeni podatki na sistemu se zapisujejo na napravo ali pa sproti prenašajo v oddaljeno skupno bazo podatkov. Možno je naprave programirati za zbiranje podatkov v le določenem časovnem oknu, npr. v času minimalnega nočnega pretoka (2 – 4 ure zjutraj). Izračunano mesto okvare, na podlagi merjenih podatkov, se lahko potrdi tudi z uporabo dodatne akustične metode, ki potrdi ali še natančneje določi mesto okvare na cevi.



Slika 30: Priključitev logerjev na hidrant, preko posebnega vmesnika [21, str. 7]

**Prednosti: [25]**

- uporaba logerja je v prednosti pred mikrofonom za primer, da gre za iskanje defekta na območju z več hrupa (mesta, bližina prometnic, itd.). Ti lahko motijo mikrofona, na loger pa nimajo vpliva.
- učinkoviti pri meritvah šibkejših šumov (manjših okvar) in tudi nižjih frekvenc šuma (PVC cev odda šum z nižjo in šibkejšo frekvenco od litoželezne cevi)

**Slabosti: [21]**

- Van der Kleij in Stephenson (2002) sta ugotovila, da uporaba logerja ni kos izkušenemu operaterju z mikrofonom. To velja za primer, če se logerje premika iz enega mesta meritev na drugo in ne morejo opraviti kontinuiranih (več dnevnih) meritev na istem mestu. V tem primeru so lahko tudi do 3x manj natančni. S primeri iz prakse sta ugotovila tudi do 40% manj odkritih defektov, v primerjavi z metodo s talnim mikrofonom.
- niso (najbolj) primerni za določevanje točkovnega mesta defekta
- ob redkejši rabi je lahko vprašljiva ekonomska upravičenost nakupa
- dosti težje določiti mesto okvare na ne-kovinskih ceveh, saj se šum na teh materialih hitro zaduši

- **Korelatorji** (ang. Leak noise correlators)

Metoda korelacije je ena izmed naprednejših metod odkrivanja izgub. Gre za prenosne naprave, ki se lahko uporabijo za nadzor puščanj ali za določitev mesta okvare na terenu. Meritev se istočasno opravlja na dveh mestih na cevi, kamor se postavi senzorje, opcija je tudi namestitve na ventile. Nastali šum in vibracije okvare se širita po cevi v obe smeri s konstantno in poznano hitrostjo, ki je odvisna od premera in materiala cevi. Meri se čas, ko prispe šum do vsakega izmed senzorjev, kjer se beležijo časovni odčitki. Po opravljenih meritvah, korelator s pomočjo podatkov o razliki v času zaznave šuma, premeru in materialu cevi in podatka o razdalji med senzorjema izračuna mesto okvare na cevi na nekaj centimetrov natančno. Večina korelatorjev že pozna podatke o različni materialih in presekih cevi, zato je račun hitrejši. [20] Določitev oddaljenosti mesta okvare od mesta senzorja je odvisna od programske opreme, navadno uporabljajo Fourierovo transformacijo. Možen je tudi grafičen izris na zaslonu računalnika ali tablice. [27]

**Prednosti: [25]**

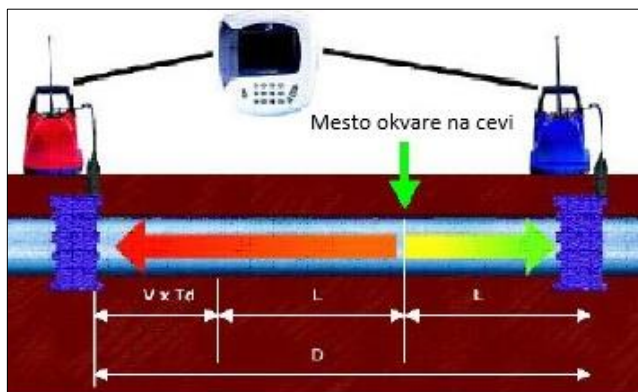
- učinkovita metoda, poda natančne rezultate
- ne zahteva izkušenega operaterja opreme, zgolj ustrezno usposobljenega
- primerna za uporabo za vse tipe okvar in v različnih materialih cevi. Za posebne primere, pa so razvili še dodatne metode, ki so prilagojene vsakemu izmed primeru posebej.
- cena nakupa take opreme je danes nižja kot v preteklosti. Oprema sestoji le iz strojnega dela, za spremljanje poteka meritev in prikaz rezultatov je moč uporabiti PC z ustrezno programsko opremo.

**Slabosti:**

- v začetku je bila metoda nezanesljiva pri iskanju mest manjših okvar v litoželeznih ceveh in večino PVC ceveh ali ceveh večjih premerov. Danes

narejenih že dosti izboljšav na sami tehnični izvedbi opremi, zato je primerna za vse materiale cevi.

Račun korelacije se lahko izvede tudi na podlagi širjenja šuma skozi vodo v cevi. Hitrosti v cevi se meri s hidrofonom, ki je priključen na hidrant. Zvok v vodi se prenaša kot tlačni val in ta lahko pripelje do natančnejših rezultatov. [25]



Slika 31: Princip delovanja korelatorja za zaznavo šuma [25, str.22]

Račun mesta okvare po postopku korelacije: [25]

$$\tau_{max} = \frac{L_2 - L_1}{c} \quad (27)$$

V zgornji enačbi zamenjamo:  $L_2 = D - L_1$

Dobimo enačbo za določitev mesta okvare na cevi (oddaljene od 1. merilnega mesta):

$$L_1 = \frac{D - c * \tau_{max}}{2} \quad (28)$$

kjer je:

$\tau_{max}$ ...časovna zakasnitev

$L_1, L_2$ ...razdalja mesta okvare, oddaljena od vsakega senzorja

D...razdalja med obema senzorjema

c...hitrost potovanja šuma po cevi (poznana vrednost za vsak material cevi)

Digitalno obliko korelatorja so razvili l. 1990 in je primeren za uporabo na vseh vrstah materialov cevi. Gre za enostavno in hitro metodo, ki je primerna tudi za manj izkušene operativne delavce. Naprava lahko vsebuje tudi GPS (ang. Global positioning system) ali uporabo GIS podatkov. Prvi omogočajo avtomatski preračun razdalje med obema senzorjema, drugi pa lahko vsebuje shemo omrežja, poznane premere cevi in ostale lastnosti obravnavanega vodovodnega omrežja.

## FAKTORJI, KI VPLIVAJO NA AKUSTIČNO MERILNO OPREMO

Vsaka izmed zgoraj naštetih metod in opreme zahteva določena znanja o pravilni uporabi merilnega inštrumenta in nekateri za svoj račun tudi dodatne podatke o obravnavanem sistemu oziroma cevi. Pomemben faktor tu sta presek in material cevi, ki vplivata na moč šuma ob

pojavo defekta na cevi. PVC cevi šum hitro zadušijo, medtem ko šum potuje hitreje in je tudi močnejši v litoželeznih in železnih ceveh. Večji premer in manj tog material cevi pomeni manjšo frekvenco šuma, ta efekt loči šume v cevi od ostalih vibracij (črpalke, prometnic,..). Večji premer cevi omogoča večje tlake v sistemu, ki posledično pomenijo glasnejši šum. Tip zemljine in gladina podtalnice prav tako vplivata na dušenje šuma, saj se šum bolje prenaša na prodnatih, kot glinenih tleh. Če je cev pod gladino podtalnice, je šum defekta pridušen in težje zaznaven. Akustična karakteristika šuma je odvisna od velikosti defekta. Reže ali korozijske razpoke poškodovane cevi lahko povzročijo večji (močnejši) šum kot pa nastane pri puščanju na stiku dveh cevi ali puščanju na ventilu. [25]

### 2.10.2 Neakustične metode

- **Sledilci plinov** (ang. Gas tracer technique)

Za odkrivanje mest okvar na cevi so bili pogosteje uporabljeni pred 20 leti kot pa danes, saj je danes na voljo dosti več ostalih učinkovitih akustičnih metod. Uporabijo se nestrupeni, nevodotopni plini, ki so lažji od zraka, kot npr. vodik ali helij. Inovativna metoda s helijem je bila razvita v Evropi, danes pa se uporablja širom sveta, za vse oblike tlačnih cevi in je certificirana z NSF standardom 60. Preferira se za uporabo v ceveh večjih premerov in je primerna predvsem v nizko tlačnih cevovodih, nekovinskih ceveh in ceveh manjših premerov. [25]

Postopek iskanja defekta na cevi poteka tako, da se plin vtisne v cev preko posebej za to narejenega priključka na cevi. Tlak in tok v cevi potiska plin skozi cev in voda na mestu defekta, potisne plin iz cevi. Ta potuje proti površju, kjer se z ustrezno opremo išče mesto pojava plina na površju in posledično določi mesto okvare na cevi pod površjem.

Prednosti: [25]

- uporaba plina v cevi je neodvisna od materiala cevi
- zazna tudi manjša mesta okvar (občutljivost na najmanjše anomalije v cevi)
- metoda se lahko izvede neodvisno od rednega obratovalnega režima
- uporaba metode ni omejena s premerom, dolžino cevi ali obliko sistema cevovoda
- hitra metoda, saj je hitrost potovanja plina po cevi sorazmerno hitra, prav tako njegov pojav na površju. Do manjšega časovnega zamika pride le v primeru, če so tla nad cevjo betonska ali asfaltirana.

Slabost metode je potreba po zagotavljanju plinski jeklenk in njunem transportu po terenu na mesta vtiskanja v cev. Potrebna so tudi posebni priključki, preko katerih se plin vtisne v cev.

- **Termografija**

Voda na mestu defekta izteka v zemljino in ob tem se spremeni termično ravnovesje okolice. To spremembo v tleh zazna infrardeča kamera na površju, ki beleži in išče razlike v temperaturi v tleh. Za primere uporabe na vodovodnem sistemu, meritve termografije potekajo v okolici cevi. [25]

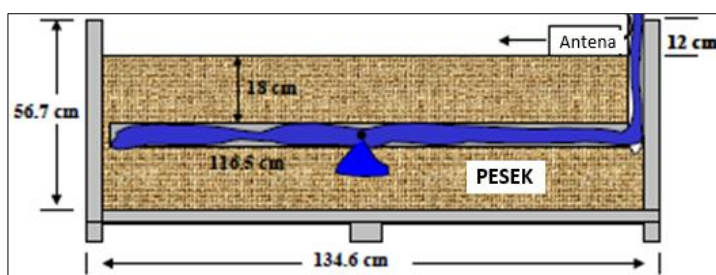
- **GPR** (ang. Ground penetrating radar)

Celotna naprava je nameščena na voziček, ki se potiska po površju, nad osjo cevovoda. [21] Radar z oddajanjem propagirajočih EM valov v tla zazna mesto puščanja na cevi z detekcijo povečane saturacije zemljine v okolici defekta, ki nastane kot posledica spremembe naboja oziroma dielektričnih lastnosti zemljine.[2] Naprava odda radarsko valovanje, ki se odbijejo od anomalije v tleh (povečane saturacije v zemljini) in nazaj v sprejemnik oddanega valovanja. Čas med oddanim in sprejetim radarskim valovanjem določi globino mesta defekta. [21] Radar zazna mesto okvare na osnovi Dopplerjevega efekta. [23] Meritev omogoča spremljanje poteka meritev »v živo« in ob podatkih meritev GPR-ja, dodatnih sondah in ob znanem poteku cevi tudi možnost izdelave karte rezultatov. [28]



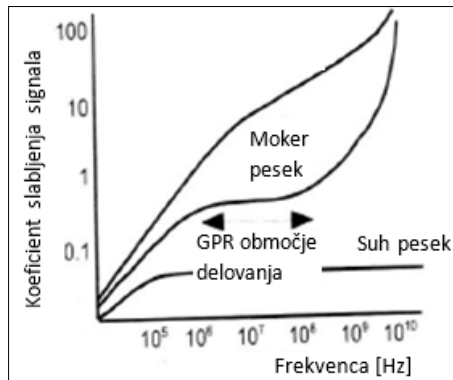
Slika 32: Rezultati uporabe GPR metode [25, str.26]

Metoda je primerna za uporabo v urbanem okolju in varuje geološko, okoljsko in arheološko celovitost območja. Uporablja se tudi za detekcijo tistih okvar, ki oddajo majhen ali skoraj ničeln šum. S tem se lahko odkrije tudi manjše okvare na sistemu, vendar je uporaba metode stroškovno visoka in si jo večina upravljavcev vodovodnih sistemov težje privoščijo.



Slika 33: Laboratorijski model [29, str. 8]

V primeru pojava podtalnice, plasti zemljine z večjo vsebnostjo vode ali stikovanja različnih plasti zemljin, je potrebno uporabiti različno močne frekvence oddanega valovanja, saj se lahko le na ta način z gotovostjo potrdi mesto in globina okvare na cevi. V primeru pojava takih plasti, lahko radar pokaže tudi rezultate, ki kažejo da cev leži globlje kot je dejansko vkopana. [30]



Slika 34: Slabljenje oddanega valovanja v različnih zemljinah [30, str.2]

Tabela 2: Hitrost potovanja EM valovanja skozi različne plasti [30, str.3]

Medij	Hitrost [m/s]
Zrak	300
Distilirana voda	33
Voda	33
Suhi pesek	150
Saturirani pesek	60
Apnenec	120
Glina	60
Kamen	160

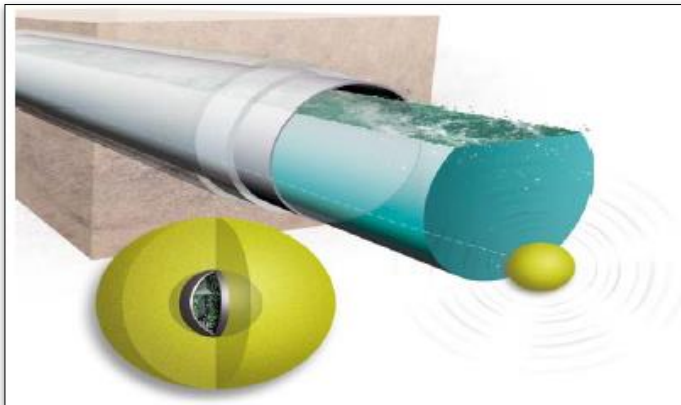
Prednosti:

- Material cevi nima vpliva na njegovo območje delovanja
- Primeren za uporabo v večjih urbanih središčih, visoko obremenjenih cestah, itd.
- Možnost oddajanja valovanja na različnih frekvencah

Slabost metode je v neprimernosti za uporabo na razgibanem terenu, kjer ni urejenih dostopnih poti.

### 2.10.3 »IN-PIPE« akustična tehnologija

- »Pametna kroglja«



Slika 35: Uporaba metode v cevi [25, str. 32]

Krogle, različnih velikosti in materialov se vstavijo v cev na posebej pripravljenih mestih na cevi, po cevi potujejo s tokom vode in lahko določijo mesto okvare na meter natančno. Te krogle lahko prenesejo različne tlake v cevovodu, zato so primerne za uporabo v različnih tipov cevovodov. Pri izbiri ustrezne velikosti krogle je treba upoštevati tudi vsa zožanja v sistemu (mesta ventilov, itd.), kjer bi lahko krogla zastala. Vgrajeni senzorji in merilci omogočajo tudi izris temperaturnih in tlačnih profilov, vzdolž cevi.



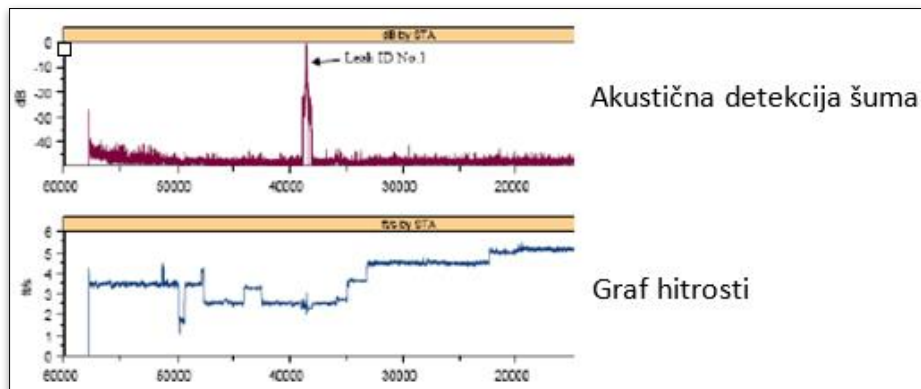
Slika 36: »Pametna krogla« [31, str.8]



Elektromagnetični  
sledilec

Slika 37: Notranjost krogle [31, str. 12]





Slika 38: Graf rezultatov opravljenih meritev s kroglo [31, str. 13]

Prednosti:

- Občutljiva na vsako najmanjšo spremembo v cevi
- Enostavna uporaba
- Cenovno sprejemljiva
- Rezultati na voljo v roku nekaj ur

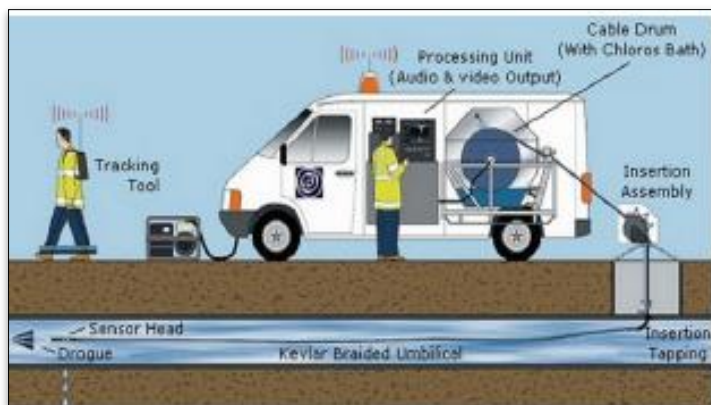
Slabosti:

- Nevarnost, da obtiči na mestu zožanja

#### 2.11.4 Ostale tehnologije

- **Video kamera** (ang. Video inspection)

Kamero, velikosti nekaj milimetrov se vstavi v cev. Nameščena je na koncu cevi (kabela) z notranjim jedrom iz steklenih vlaken za večjo potisno moč. Kamera lahko vsebuje tudi LED-diode za debelim plastičnim oknom, kar omogoča jasno sliko sten v cevi. Leče kamere so iz safirnega kristala in so skoraj popolnoma odporne na praske. Pri vstavljanju kamere je potrebno paziti, da ne pride do vnosa smeti ali tujkov s sistem. Ob potovanju kamere po cevi hkratio spremljanje stanja sten cevi na zaslonu, kamor je priključen kabel kamere. Ena večjih omejitev te metode je v tem, da je potrebno pred intervencijo s kamero preveriti zmožnost potovanja kamere skozi kolena, ki so prisotna v sistemu.



Slika 39: Primer uporabe "in-pipe" metode [25, str.28]

#### 2.10.4 Matematične metode (analize)

Terenski pristop k iskanju izgub je ekonomsko gledano strošek in tudi časovno trajajoč proces. Zato se uporabljajo zmogljivejši računalniki in programska oprema, s katerimi se ustvari posnetek dejanskega stanja vodovodnega omrežja oziroma t.i. hidravlični model. Ta temelji na računskem modelu hidravličnega omrežja, opravljenih meritvah na omrežju in poznanih podatkih o ceveh, objektih, črpalkah in ostalih elementih, ki sestavljajo vodovodno omrežje. S primerjavo opravljenih meritev tlakov in pretokov, se lahko z računskim modelom omrežja oceni velikost vodnih izgub na sistemu.

Zanesljivost hidravličnega modela je tesno povezana s kvaliteto uporabljenih podatkov in kasnejšega umerjanja modela, da se doseže stanje, ki je čim bolj podobno realnemu. Po končanem postopku umerjanja, se lahko rezultate simulacij obdela in ovrednoti njihovo verodostojnost. [31]

Uporabljena programska oprema je lahko različnih cenovnih razredov, nekateri programi so prosto dostopni na spletu, vendar vseeno učinkoviti za uporabo v različnih oblikah analiza. Metode, na podlagi katerih delujejo, so povezane s spremembo tlaka oziroma pretoka v omrežju, masno bilanco sistema, dinamičnim modelom in z meritvijo tlaka na posameznih vozliščih. [29] Za simulacijo efekta puščanja vode na omrežju, ki temelji na porabi vode, je potrebno zbrati podatke o skupni energiji, masni bilanci in minimalnemu tlaku v omrežju. Po kalibraciji modela se uporabi optimizacijski algoritem, katerega cilj je zmanjšati razliko med opravljenimi meritvami na terenu in računsko simulacijo. [31] Spodaj so zbrane le nekatere metode, saj se moramo zavedati, da lahko vedno znova najdemo neke nove načine in ideje o določanju izgub s pomočjo današnjega razvoja programske tehnike.

- **Metoda prehodne ocene** (ang. Transient based technique) [19]

Metoda je bila sprva testirana za območja, z znanimi količinami in lokacijami vodnih izgub. Odvisna je od poznavanja velikosti puščanja in okvare, režima toka in poznavanja samega vodovodnega sistema. Primerna za določitev območij na sistemu, kjer prihaja do izgub in s kombinacijo terenskim metod, ki določijo natančno lokacijo mesta okvare. Metoda je pomembna za diagnosticiranje, monitoring in nadzor vodovodnega sistema. Tu ne gre samo za iskanje območij izgub na sistemu, vendar tudi za boljše razumevanje razlogov za okvare na sistemu, sploh če je lahko razlog za to tudi naravni pojav (npr. plaz).

Ob nastanku nenadnega in hipnega povečanja tlaka v cevi, ta diskontinuiteta potuje po cevi. Na najšibkejšem delu cevi lahko nastala sila uniči steno cevi in nastane okvara na cevi, znana kot defekt. Ta predstavlja spremembo hidravličnega stanja v sistemu, saj razpoka niža tlak v cevi. Z detekcijo teh pojavov, lahko določimo tip pojava in lokacijo. [19] V tlačni cevi s stalnim pretokom, trenutna sprememba pretočnih razmer  $\Delta Q$  povzroči variacijo tlaka  $\Delta H$ . Razdalja od vira nastanka te anomalije v pretoku do mesta okvare na cevi je označena z  $x_d$ . Oceni se na podlagi potovalnega časa anomalije od mesta nastanka, do mesta okvare in nazaj:

$$x_d = \frac{a t}{2} \quad (29)$$

Enačba za oceno velikosti defekta: [19]

$$q = \frac{Q_{L0}}{Q_0} = \frac{\Delta H_d}{\Delta H} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{\Delta H + (\Delta H_d/2)}{H_0 - H_{L_{OUT}}}} \right)^{-1} \quad (30)$$

kjer je:

$H_0$ ... tlačna višina na mestu defekta [m vodnega stolpca]

$H_{L_{OUT}}$ ... tlačna višina izven mesta defekta [m vodnega stolpca]

$\Delta H$ ... velikost nihanja tlaka na odseku, kjer je ta anomalija propagirala [m vodnega stolpca]

$\Delta H_d$ ... trenutna sprememba tlaka, ko ob nastanku defekta nastane povratni udar tlaka [m vodnega stolpca]

Uporaba te enačbe velja zgolj kot ocena vodnih izgub na mestu defekta, saj sama enačba ne upošteva trenja v cevi in viskoznosti materiala cevi.

- **Inverzna prehodna ocena** (ang. Inverse transient analysis) (ITA) [19]  
Uporablja se za identifikacijo neznanih parametrov, kot npr. puščanj, z uporabo podatkov o »prehodnem tlaku (ang. Transient pressure data). Poznamo 2 obliki te oblike tlaka in sicer: [19]
  - Linearno elastično: ni tako natančna pri določevanju mesta defekta
  - Linearno viskoelastično: boljše opiše ta tip tlaka v PVC ceveh in je natančnejša pri določevanju mesta defekta

Gre za optimizacijski algoritem, kjer obnašanje sistema simulira HTS (ang. Hydraulic transient solver). Razlika med merjeno in izračunano vrednostjo spremenljivke je prilagojena z ITA (ang. Inverse transient analysis). Optimizacija poteka z iskanjem najboljše rešitve z zmanjšanjem napake kvadrata med merjenimi podatki in izračunano spremenljivko.

V laboratoriju in pri matematični izračunih se je izkazala sicer kot natančna metoda. Negotovost mesta defekta je odvisna od velikosti defekta, pretočnega režima in lokacije nastanka anomalije, ki propagira po cevi. Metoda do sedaj še ni bila preverjena na realnem primeru omrežja v naravi, zato s težavo ocenimo uspešnost in dovezetnost metode za vse spremembe, ki se lahko zgodijo v realnem primeru.

- **HDSM** (ang. Head driven simulation method) [24]  
Velikost izgub v vozlišču je povezana z velikostjo tlaka. Metoda pri računu oziroma simulaciji stanja v vodovodnem omrežju upošteva tlačne odvisnosti od porabe v vozlišču. Primerna za uporabo s obratovalnih pogojih, ob realnem tlaku v omrežju, saj je le v teh pogojih primerna za uporabo in nudi zadovoljive rezultate. Program EPANET za ta opis uporablja funkcijo »emitter« v vsakem vozlišču, kjer je pretok funkcija tlaka.

$$Q_K = c_K P_K^{n_K} \quad (31)$$

(32)

$$c_K = c \sum_{j=1}^m \frac{L_{Kj}}{2}$$

$$C = \frac{Leak}{\sum_{k=1}^{nn} \left( \sum_{j=1}^m \frac{L_{Kj}}{2} P_K^{n_K} \right)} \quad (33)$$

kjer je:

$Q_K$ ...pretok v vozlišču K [ $m^3$ ]

$c_K$ ...intenzivnost toka v vozlišču K

$P_K$ ...tlak v vozlišču K [m vodnega stolpca]

$n_K$ ...koeficient

$L_{Kj}$ ...cev v vozlišču K

$c$ ...koeficient, enak za celotno območje

$Leak$ ...količina izgub ob minimalnem nočnem pretoku

Metoda dopušča kontinuirane izgube v vozliščih. Te ni potrebno določevati po vsaki iteraciji ampak se to izvede s pomočjo tlačno odvisnega iztoka iz odprtine (okvare na cevi). Preizkušena je bila na hidravličnih modelih in realnih primerih vodovodnih omrežij. Simulira lahko tudi ekstremne dogodke na vodovodnem sistemu (npr. crkne črplaka) in je sposobna oceniti pretoke v cevi ob teh spremenjenih pogojih. Opravljene meritve in testi so nudili hidravlično zadovoljive in realne rezultate. [32]

- **VDM** (ang. Virtual distortion method) [33]

Poljski strokovnjaki so oblikovali metodo, ki je primerna za odkrivanje vodnih izgub na vodovodnih sistemih. Potegnili so vzporednice s Crossovo metodo konstrukcijske zasnove paličja i potegnili določene vzporednice za vodovodni sistem, ki je prav tako razvejan. Sistem je lahko matematično modeliran v obliki grafa oz »usmerjenega grafa«, ki kaže smer toka vode v cevi.

V prvem koraku se oblikuje incidenčna matrika, ki definira smer toka vode v cevi. Predstavlja število dogodkov in njihovo pojavnost v določenem časovnem intervalu. Za oblikovanje matrike je potrebno poznavanje količin porabljene energije in definiranje odvisnosti tlaka in pretoka v omrežju s pomočjo Hazen-Williams-ovega konstitutivnega zakona (ang. Hazen-Williams constitutive law). Rezultati, ki predstavljajo vsebino informacij o globalnem odzivu vodovodnega sistema na lokalne motnje tlaka, ki jih avtorji imenujejo »virtualna izkrivljenja« (ang. Virtual distortion). Ta se uporabijo za modeliranje izgub na vodovodnem sistemu in je predstavljena z dvema vektorjema, ki kažeta v nasprotno smer. Detekcija izgub v sistemu je definirana kot optimizacijski problem oz. vrednost minimalne funkcije, ki predstavlja razliko med podatki meritev tlaka in rezultati hidravličnega modela. [33]

Cilj metode je ustvariti avtomatiziran sistem, kjer kontinuirane meritve na sistemu uravnavajo delovanje sistema in obratovalne pogoje. Zato je potrebno oblikovati ustrezen numerični model omrežja, ki je umerjen z meritvami na sistemu. Zagotovljeno mora biti optimalno delovanje ventilov in ostale opreme, predvsem pa vzpostavljen

brežžični prenos podatkov z mesta meritev v umerjen model omrežja. Mesta puščanj na sistemu se določi s pomočjo VDM metode.

Metoda je bila do sedaj zgolj teoretično preizkušena in še ni bila izvedena na realnem primeru. Vendar avtorji zagotavljajo, da omogoča detekcijo puščanj s pomočjo prilagojene VDM metode v »steady state« analizi vodovodnega omrežja. Za to je potrebno oblikovati ustrezen algoritem, ki išče mesta okvare vzdolž cevi in vzpostaviti mrežo merilnih postaj za meritve tlaka. Ta je lahko iz praktičnih razlogov nameščena tudi na mestu hidrantnih priključkov.

## 2.11 Upravljanje z vodnimi izgubami

Vodne izgube na vodovodnem sistemu se lahko zmanjša z implementacijo različnih ukrepov in metod, katerih skupen cilj je upravljanje z vodnimi izgubami oziroma njihovim zmanjšanjem. Finančni vložki v proces so različni, odvisni od finančnih zmožnosti upravljalca omrežja in obsega ekonomsko sprejemljivih stroškov, do katerih je še vredno izvajati ukrepe zmanjšanja izgub. [25]

Ob zaznavi pojava vodnih izgub na sistemu je potrebno oblikovati ustrezne ukrepe, s katerimi se zmanjša obseg in količina vodnih izgub v vodovodnem omrežju. [34]

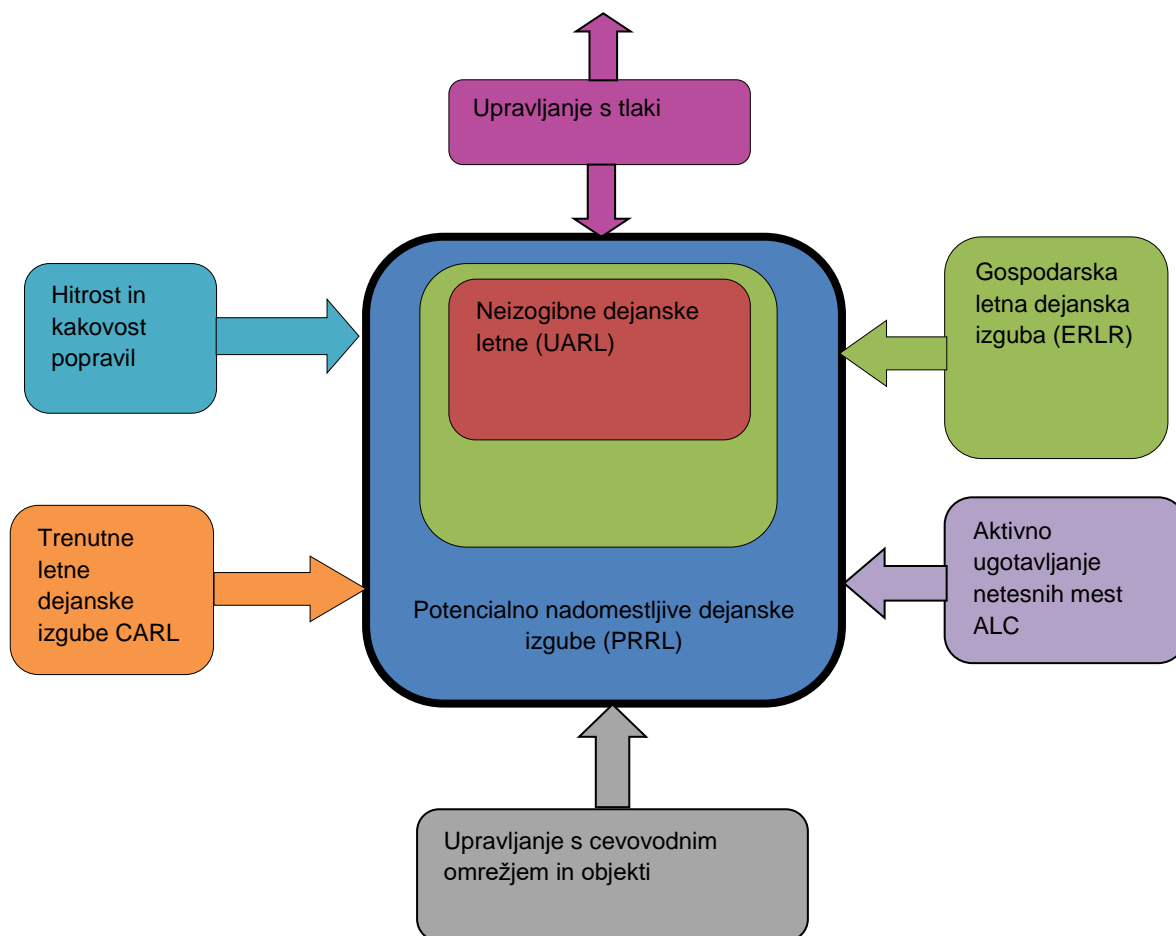
- hitri odziv na pojav okvare na sistemu s sanacijami
- zamenjava odsekov cevovodnega omrežja ali ostale opreme
- znižanje tlaka v sistemu, predvsem v času minimalne (nočne) porabe
- odkriti in popraviti »skrita« mesta okvar. To so tista mesta na sistemu, katerih posledice niso vidne na površini terena.

Ti ukrepi so najprej povezani predvsem z aktivnimi ukrepi in nadzorom nad vodnimi izgubami, ki so povezani s hitrostjo in kvaliteto sanacije nastale okvare. Vodovodni sistem ima v odvisnosti od različnih faktorjev, določen delež lomov in izgub, ki jih ni mogoče zaznati na površini (t.i. nevidne izgube). To obliko izgub je potrebno zaznati in odpraviti z uporabo aktivnega iskanja izgub (ang. Active leakage control (ACL)). Gre za proaktivno strategijo za zmanjšanje vodnih izgub z detekcijo nevidnih okvar na ceveh, katere locirajo kvalificirani uporabniki z uporabo specializirane opreme. Določitvi mesta okvare na cevi sledi še hitra in kvalitetna sanacija defektnega mesta. Celoten sklop aktivnih ukrepov sestavljajo: [25]

- nadzor nad tlakom v omrežju
- aktivni nadzor nad vodnimi izgubami
- material cevi in vzdrževanje cevovoda
- hitrost in kakovost sanacije defekta

Najpogostejši ukrepi obvladovanja vodnih izgub v projektih upravljalcev vodovodnih sistemov na področju zmanjševanja vodnih izgub so lahko predstavljeni v obliki strukturnih rešitev. Ti zajemajo uporabo dodatnih ventilov za redukcijo tlaka, pozicioniranje črpalk na ustrezna mesta, prilagoditev zgradbe omrežja ali pa spremembo obratovalnih pogojev. [27]

Zmanjševanje vodnih izgub in njihovo spremljanje je stalen izziv, vendar imajo danes inženirji na voljo cel niz opreme, ki jim omogoča naslavljanje vodnih izgub na štirih osnovnih nivojih:



Slika 40: Štirje stebri upravljanja (managementa) z vodnimi izgubami [26]

Osrednji del v zgornji shemi predstavljata dve obliki vodnih izgub. Večji del predstavlja obseg vodnih izgub, ki se jih lahko z ustreznimi metodami in zadostnimi finančnimi zmožnostmi reducira in s tem izboljša delovanje vodovodnega sistema. Drugi del pa predstavlja vsoto letnih vodnih izgub na sistemu, katerim se ni moč izogniti (ang. Unavoidable annual real loss (UARL)). [25]

Ukrepi zmanjševanja vodnih izgub na sistemu zajemajo različne pristope in tehnike, ki so odvisne od odločitev upravljalca, lastnosti obravnavanega samega vodovodnega sistema in poznanih (merjenih) količin.

### 2.11.1 Upravljanje s tlaki

V praksi je ena izmed prvih uporabljenih ukrepov, s katerim se poskuša doseči zmanjšanje obsega puščanj in nadzor nad količino izgub na vodovodnem sistemu. Optimizacija tlačnih vrednosti v vodovodnem sistemu se izvaja do te mere, da se še vedno zagotovi odjemalcu ustrezen oskrbovani tlak. Uporaba metode na sistemu manjša presežne tlake in odpravlja neustrezno upravljanje gladine v vodohranu. [30] Obstaja tesna povezava med tlakom in vodnimi izgubami v pretoku in med tlakom in odjemalci na vodovodnem omrežju. [25]

V vodovodnih sistemov obstajajo dnevna nihanja v porabi, v nekaterih tudi nočna, za katere je značilna maksimalna poraba določena v različnem delu dneva. Nekatero sisteme zaznamuje

tudi sezonska oblika nihanja, ki imajo svoje značilne krivulje porabe. Zaradi vseh teh sprememb in težje določanja maksimalne porabe, je v vodovodnih sistemih vedno določen odstotek presežkov tlaka, ki lahko pokrijejo hipno potrebo v povečanju porabe. Če lahko zmanjšamo presežke tlaka v sistemu, lahko tudi s tem povezane izgube.

Na podlagi tega ukrepa, so bila izvedena številna testiranja na modelih in realnih vodovodnih sistemih. Rezultati metode upravljanja s tlaki v omrežju so pokazali, da se je znižalo število lomov cevi na vodovodnem omrežju, zmanjša se tudi odstotek vodnih izgub. Pri tem se oblikuje tlačno odvisna poraba v sistemu. Izgube na mestih netesnih delov cevovoda, kot tudi skupne vodne izgube sistema, se znatno zmanjšajo. S tem se zmanjša tudi strošek popravil okvar in podaljša življenjska doba vodovodnega sistema. [25]

Pozitivni vpliv tega ukrepa se odraža v zmanjšanju količin izgubljene vode, zmanjšanju frekvence pojava novih okvar na sistemu in zmanjšanju njihovega obsega. V več državah so temu ukrepu pripisali številne pozitivne učinke v procesu zmanjševanja vodnih izgub: [35]

- Podaljšanje življenjske dobe vodovodnega sistema
- Zmanjšanje pretoka in volumna iz obstoječih mest okvar
- Učinkovitejša distribucija vode (odseki manjkrat zaprti zaradi sanacij)
- Ohranjanje vodnih zalog oziroma zmanjšanje količin načrpane vode
- Manj stroškov: na račun sanacij, odkrivanja okvar in stroškov črpanja
- Odlog stroškov, za iskanje novih virov
- Manj pritožb s strani uporabnikov

Slabost zmanjšanja tlaka v vodovodnem sistemu se odraža predvsem v težjem odkrivanju mest vodnih izgub na ceveh. Posledično je zaradi zmanjšane tlaka v ceveh tudi šum na mestu okvare manjši in težje prepoznaven za različne akustične tehnike.

Kljub vseh naštetim prednostim ukrepa, je ob izvajanju vseeno potrebno paziti na: [35]

- Zagotavljanje ustreznega pretoka vode za potrebe požara in sisteme za avtomatsko gašenje požarov
- Izgube na hidravlični kapaciteti in kvaliteti vode
- Potencialne spremembe pri porabi in prihodku upravljalca
- Delovanje namakalnih sistemov
- Stanje in vpliv na kakovost vode v slabše pretočnih delih vodovodnega sistema
- Hidravlične karakteristike sistema: distribucija dela, kakor tudi vodohranov za shranjevanje vode (cikli polnjenja in praznjenja)

Pred samo izvedbo ukrepa je potrebno preveriti željene implementirane posege in s tem preveriti njihov obseg in uporabnost: [35]

1. Identifikacija območij z večjim številom okvar in razlogi za nastanek
2. Analiza porabe za identifikacijo značilnosti v porabi, omejitev in obsega direktne in posredne porabe
3. Začetna stroškovna analiza: pokaže, če obstaja potencial, za reševanje težav
4. Meritve na sistemu: pretoka, tlaka in porabe
5. Modeliranje modela z uporabo izboljšav za redukcijo tlaka in izgub
6. Identifikacija ustreznih ventilov in izbira lokacije namestitve v sistem
7. Modeliranje obratovalnega režima

## 8. Stroškovna analiza: tehtanje stroška izvedbe s potencialnim doprinosom izvedenih ukrepov

Upravljanje tlaka na sistemu se v praksi izvaja z ventili za redukcijo tlaka ali s črpalko. Če s samo hidravliko ni moč doseči željenega učinka, se uporabi ventil za redukcijo tlaka na točno določenem mestu v sistemu. Ventil mora biti ustrezne velikosti oziroma mora dopuščati sprejemljivi delež celotnega pretoka v cevi, saj ni smiselno, da bi z  $\frac{3}{4}$  priprtih ventilom regulirali pretok. Zato imajo določeni tudi vgrajene obtočne (ang. Bypass) odseke, ki zadostijo potrebam v času minimalnega pretoka v cevi, regulacijski ventil pa je v tem času zaprt. Ventil poleg tega vsebuje še zračni ventil, za primer izolacije ali potreba vzdrževanja, in merilca tlaka pred in za ventilom, ki spremljata status nameščenega ventila. [35]



Slika 41: Avtomatski ventil za redukcijo tlaka [36]

V primeru požara, lahko avtomatski PRV ventil sam uravnava tlak v omrežju in hkrati zagotavlja ustrezen pretok vode, za potrebe gašenja. Tlak v sistemu se lahko uravnava tudi v avtomatizirani povezavi z zahtevano porabo vode. Izjemoma, obstaja tudi možnost, da je hidrantsno omrežje za potrebe gašenja požara speljano po vzporednih ceveh. To je prava redkost, saj se tak način izvede le za primer, da je v bližini kak drugi vir z zadostnimi količinami vode za potrebe požarnega pretoka. [35]

V preteklem obdobju se je razvilo več različnih pristopov k vpeljavi in izvajanju tega ukrepa, spodaj sta naštetata zgolj dva uporabnejša: [35]

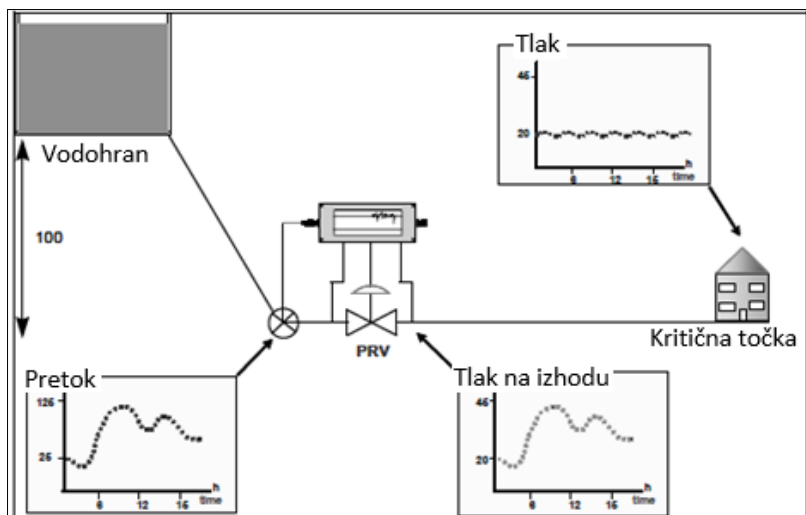
- **»Time based« model**

Oblikovanje modela je odvisno od poznavanja porabe. V pomoč za zbiranje teh podatkov se lahko uporabi logerje ali podobne kontrolne naprave. Z uporabo teh podatkov, se oblikuje model, kjer je posamezen ventil v sistemu vezan na čas, ki mu pove, kolikšen naj bo pretok v cevi v danem trenutku. Tako lahko z nekaj ventilov na posameznih odsekih sistema nadzoruje pretok in uravnava tlak v celotnem vodovodnem sistemu.

- **»Flow based« model**

Primeren za območja s spremenljivimi razmerami v porabi, pretoku, požarnih zahtevah, itd. Kontrola tlaka se vrši na iztoku iz območja, odvisna pa je od pretoka. Izvede se s pomočjo naprave, ki spremlja iztočne vrednosti. Uravnava jo lahko loger, ki spremlja merjene količine ali pa je dostop zagotovljen preko oddaljenega načina dostopa.





Slika 42: Uravnavanje pretoka na koncu območju s katero se zmanjša tlake na kritičnih točkah območja [35]

Upravljanje s tlaki v sistemu je eden osnovnejših ukrepov za zmanjševanje izgub. Pri tem si lahko dodatno pomagamo še z: [35]

- Spremembo tlačnih con in vzpostavitev novih tlačnih con
- Nadzor nad črpalkami
- Vgradnja novih zasunov: ti so lahko časovno, tlačno ali pretočno nastavljivi
- Daljinskim krmiljenjem zasunov

Glede na podane informacije o tej metodi lahko rečem, da lahko metoda doseže še večji potencial, če se uporabi pravočasno, še preden pride do povečanega obsega pojava izgub. To bi lahko dosegli že v fazi projektiranja in testnega obratovanja vodovodnega sistema. Preko modelnih izračunov in realnih meritev bi se preverile tlačne razmere v vodovodnem sistemu in tako bi lahko že v začetku obratovanja vzpostavili prilagojen obratovalni režim, kateri bi izpolnjeval zahtevane tlake v omrežju, hkrati pa tudi preprečil pojav visok tlakov v ceveh in s tem posledično zmanjšal možnost pojava okvar na ceveh vodovodnega sistema.

Cevovodno omrežje predstavlja največji delež celotne infrastrukture v vodovodnem omrežju. Zato je na teh mestih posledično najdenih tudi največ vodnih izgub. Z načrtnim vzdrževanjem in stalnim monitoringom se lahko stanje sistema izboljša in s tem se mu poveča tudi življenjska doba. Kljub temu se je potrebno zavedati življenjske dobe vgrajenih materialov, ki pod vplivom korozije, staranja ali vplivom stalne prometne obtežbe izgubljajo na kvaliteti lastnosti materiala. Cilji ukrepa težijo k stalnemu spremljanju stanja sistema in k njegovemu vzdrževanju. To ima lahko na sistem zelo pozitivne vplive, ki se lahko kažejo v hitrejšem odkrivanju okvar, manjšim številom okvar in zmanjšanju vodnih izgub.

Pomembnejši izmed ukrepov zmanjševanja vodnih izgub na vodovodni sistemih je tudi hitrost odziva na zaznavo pojava okvare na cevi in njeno sanacijo. To lahko dosežemo s kontinuiranim monitoringom DMA območij in zadostnim številom merilnih instrumentov, ki so nameščeni znotraj teh območij. Seveda to ni pogojeno zgolj s številom, vendar tudi z ustreznim delovanjem merilne naprave. Natančnejše mesta okvar na cevi se iščejo z prej omenjenimi tehnikami. Velik pomen na lociranje mesta okvare je hiter odziv terenske ekipe, ki mora biti ustrezno usposobljena in opremljena. Z rednimi pregledi in kakovostnimi sanacijskimi deli na

cevovodu se zmanjša število okvar na sistemu, kar posledično pomeni tudi zmanjšanje pogostosti pojava okvar na cevovodu.

## 2.12 Sanacija okvar

Hitra odprava identificiranih mest vodnih izgub na vodovodnih sistemih je ključnega pomena za učinkovito obvladovanje volumna vodnih izgub. V ta namen upravljalec sistema pripravi ustrezni logistični sistem, uporabi znanja in postopke, ki omogočajo hitro in kvalitetno izvedbo intervencij. Pogosto se ti ukrepi izvajajo pod izredno težkimi in celo nevarnimi delovnimi pogoji in vedno z izrednim časovnim pritiskom. Vsako obliko okvare na sistemu spremlja tudi ustrezni sistem ukrepov. Bistvena komponenta pri sanaciji, ki vpliva tudi na stroškovni del, je čas zaznave okvare na cevi in hitrost odziva odprave okvare.

Načinov za sanacijo nastalega defekta na cevi je lahko več in je odvisen je od primera do primera. Eden izmed mogoče dražjih, a vseeno boljših rešitev je zamenjava celotne cevi ali odseka, ki pomeni tudi trajnejšo rešitev in preprečitev ponovnega pojava okvare na tem odseku cevi. Ta se izvede v primeru, da je cev starejša ali da se okvare na tem odseku večkrat ponovijo. Vsi ukrepi so nekako v lasti ekonomske presoje in presoje ekipe na terenu, ki lahko oceni obseg in validira okvaro šele po tem, ko opravi odkop na mestu okvare.

Možnost pojava puščanja na stiku je možno rešiti z zmanjšanjem števila stikov med cevmi, ki pa so na drugi strani seveda omejene z določeno (prefabricirano) dolžino. Vsem tem, bi lahko še dodali ukrep zamenjave celotne cevi ali zamenjavo materiala na stiku. [20]



Slika 43: Reparturna objemka za sanacijo mesta okvare na cevi [36]

Ekonomski strošek sanacije obsega strošek količine izgubljene vode, prevoz opreme za izkop, prekinjeno dobavo vode, povečane stroške črpanja za vzdrževanje ustreznega tlaka v sistemu, stroški vzdrževanja kakovosti ustrezne kvalitete in stroške popravila ali nadomestitve cevi. Lahko se tudi dogodi, da se na isti cevi znova pojavi težava z okvaro in je treba ustrezno presoditi, kateri ukrep je ekonomsko upravičen in s katerim ukrepom bi bilo trajneje zagotovljena nemotena oskrba, ki je za vsakega upravljalca vedno na prvem mestu.

Katalog možnih ukrepov za sanacijo okvar iz zmanjšanje vodnih izgub: [2]

- Izboljšanje tehnik menjave cevi
- Povečanje odstotka delujočih merilnih naprav na sistemu
- Menjava števecov na odjemnih mestih
- Menjava cevi
- Izobraževanje zaposlenih
- Uvajanje novih postopkov in standardov

- Uporaba nove programske opreme
- Uveljavljanje strožje zakonodaje
- Kontrola in popravilo spojev
- Čiščenje ulic a alternativnim virov vode (bazen, reke,...)
- Prilagoditev trajanja izpiranja in začetek čiščenja vodohrana, ko je nivo vode nizek
- Odčitavanje števecov s pomočjo prenosnih digitalnih naprav (vezan na bazo podatkov)
- Kontrola izmerjenih volumnov s sekundarnim testnim merjenjem
- Monitoring kvalitete vode, ki lahko vpliva tudi na natančnost števca
- Preverba porabe vode v sistemu
- Oblikovati račun vodne bilance
- Pregled ventilov, namestitvev dodatnih ventilov in menjava obratovalnih nastavitev na ventilu
- Uvedba programa za sistematično odkrivanje puščanj in sledenje kraji vode
- Nadzor hidrantov zaradi nedovoljenega odjema
- Nočno testiranje – korak za korakom (obravnavna DMA območij)
- Menjava cevi s cevmi iz nerjavečega materiala
- Oblikovanje ekipe za aktivno iskanje vodnih izgub
- Uvedba novih skupin pri ceni vode ali oblikovanje cene, ki zajema vse stroške in s tem povezane z učinkovito dobavo vode. Možna tudi uporaba različnih tarif, za različne uporabnike.
- Vzpostavitev monitoringa v vodohranih z beleženjem podatkov (SCADA)
- Hidravlično modeliranje vodovodnega omrežja
- Mehki zagon črpalk in mehko zapiranje ventilov
- Uporaba GIS orodij: informacije o sistemu
- Formacija merilnih in tlačnih con
- Kampanje za ozaveščanje javnosti
- Določiti izgube na hišnih priključkih (menjava hišnih priključkov)
- Napredno hidravlično modeliranje, konstantna uporaba hidravličnega modela , modeliranje hidravličnih razmer v sistemu, itd.

### 2.13 Kazalci na vodovodnih sistemih

S primerjavo vodnih izgub, ki so določena s pomočjo vodne bilance, ne moremo primerjati posameznih vodovodnih sistemov med seboj, saj ima vsak svoje specifične karakteristike. Zato se je oblikovalo več oblik indikatorjem oziroma kazalcev, kateri omogočajo primerjavo različnih vodovodnih sistemov med sabo in služijo kot podpora upravljalcu pri odločanju izvajanja ukrepov. Indikatorji povežejo vodne izgube na sistemu z karakteristikami omrežja in tako so različni vodovodni sistemi primerljivi med seboj. Spodaj so naštetni eni izmed najpogostejših kazalcev, ki se uporabljajo za primerjavo vodovodnih sistemov.

#### 1. Faktor stanja vodovodnega sistema [35]

Faktor ICF (ang. Infrastructure condition factor) opisuje stanje omrežja, saj ta bistveno vpliva na obseg pojava okvar na sistemu. Izboljša se lahko zgolj z investicijami v obnovo infrastrukture omrežja. Predstavlja razmerje med dejanskimi in neizogibnimi (unavoidable) izgubami. Lahko pa pomeni tudi razmerje med obstoječim stanjem in najboljšim možnim stanjem vodovodnega omrežja.

$$ICF = \frac{\textit{najmanjša dosežena vrednost vodnih izgubv merilnega območja}}{\textit{neizogibne izgube v merilnem območju}}$$

Kazalnik ICF se lahko oceni s pomočjo več pristopov: [35]

- a) Za hitro oceno se lahko vzame vrednost enako kazalniku ILI.
- b) ICF oceni s pomočjo analize občutljivosti: analiza povpreči dve ekstremne vrednosti kazalnika ICF. Minimalna vrednost bi na primer bila  $ICF = 1$  in maksimalna  $ICF = 6$ . Pri prvem so izgube na vodovodnem sistemu sestavljene in neizogibnih (izgube, ki jih akustične tehnike ne zaznajo) izgub in izgub vode, preden so bila mesta okvar sanirana. Drugi predpostavi, da so vse izgube povezane z neizogibnimi izgubami. Srednja vrednost bi predstavljala  $ICF = 3$ .
- c) Kazalnik ICF oceni glede na primerljivo merilno območje: primerljivo merilno območje mora biti enake starosti, zgrajeno iz enakim materialov in s podobnimi tlaki v ceveh.
- d) Kazalnik ICF se oceni po sanacijah vseh okvar na ceveh. V naslednjem koraku se oceni/izmeri obseg neizogibnih izgub in oceni kazalnik UARL in tudi identificira kazalnik ICF bodoče porabe.

Zadnja točka predstavlja daleč najbolj natančno določitev kazalnika ICF izmed vseh zgoraj naštetih.

## 2. Faktor »dan-noč« [35]

Faktor NDF (ang. Night – day factor) je pomemben parameter v povezavi obsega nočnih in dnevnih izgub. Razlikuje se od dneva do dneva, nanj vplivajo tudi sezonski vplivi. Analiza izgub se opravi po meritvah (minimalnega) nočnega pretoka (MNF). Iz tega se realni obseg izgub prilagodi na povprečno porabo skozi dan. Ta lahko služi kot primerjalna vrednost oziroma kot vrednost za račun letne bilance vodnih izgub [Farley in Trow, 2003]. Tlak v omrežju niha skozi celoten dan, v odvisnosti od porabe. Za gravitacijsko oblikovane cevovode je tlak v omrežju višji v nočnem času, ko je poraba minimalna. Za tak primer tudi velja, da se dnevne izgube izračuna s faktorjem NDF oz. faktorjem  $< 1$ . Tlak je tu minimalen, ko je poraba maksimalna.

Obseg izgub skozi dan varira v odvisnosti od variacije tlaka v omrežju. Zato bi bilo napačno predvidevati, da so izgube v nočnem obdobju enake dnevnim. Minimalni nočni pretok je uporabljen za oceno začetnih izgub v sistemu.

Da se lahko NDF faktor uporabi za račun letnih izgub v gravitacijskih vodovodnih sistemih, je potrebno izmeriti 24 urni profil povprečnega tlaka (AZP..average zone pressure) za obdobje enega tedna ali še boljše, opraviti meritve v različnih obdobjih leta. Faktor NDF se lahko izračuna iz 24 urnega profila tlakov, brez poznavanja količin vtoka vode v sistem. Če pa se voda v sistem črpa, je potrebno poznati več kot 24 urne profile povprečnega tlaka v omrežju.

## 3. Ekonomski kazalci uspešnosti

Tekom razvoja razvoja metod za odkrivanje izgub, se je oblikovala tudi ekonomska presoja za presojo upravičenosti sanacije ali katerega izmed ostalih ukrepov na sistemu. Da lahko vodovodne sisteme primerjamo med seboj, se je oblikovala splošna formula, ki temelji na letnih osnovi: [35]

$$L_A = (Q_{AN} + Q_{VS}) * C_{SP} + Q_{VR} * C_P \quad (34)$$

kjer je:

$L_A$ ... izguba (finančna) [eur]

$Q_{AN}$ ... neobračunana pooblaščen poraba [ $m^3$ /leto]

$Q_{VS}$ ...navidezne izgube [ $m^3$ /leto]

$Q_{VR}$ ...dejanske izgube [ $m^3$ /leto]

$C_{SP}$ ...cena vode [eur/ $m^3$ ]

$C_P$ ...proizvodna cena [eur]

Za izbiro najprimernejše metode za zmanjšanje izgub je potrebno oceniti poslovno upravičen faktor ELL (Economic level of leakage). Upravljalcu sistema pomaga razumeti, če bodo vložena sredstva prinesla željene rezultate in do katere še ekonomsko sprejemljive meje je vredno iti z izvajanjem ukrepov za zmanjševanje izgub. S pomočjo »cost-benefit« analize se oceni, katera metoda bi bila primerna za implementacijo in uporabo v realnem sistemu. Vedno išče optimalne rešitve, kjer cena prihranjenih količin vode ni manjša od vloženi sredstev. V ceno vode se uvršča različne produkcijske stroške (črpanje, elektrika, kloriranje), distributivne stroške (stroški prečrpavanja), plačilo letne okoljske dajatve (vodno dovoljenje) in odstotek za vlaganje v iskanje novih virov vode ali izgradnjo objektov za obdelavo vode. Če so vodni viri na območju omejeni, mora biti cena vode v ELL analizi ovrednotena kot višja vrednost ali enaka vrednosti maloprodajne cene  $m^3$  pitne vode. Ta vrednost zato, ker bi prihranjeno vodo, sicer uporabnikom obračunali po obstoječi maloprodajni ceni. [35]

Če vodovodni sistem nima težav z zagotavljanjem potrebnih količin vode je lahko ELL analiza tudi končni odločilni element. Če načrpane količine vode niso zadostne ob določenem odstotku izgub, se mora upravljalec odločiti ali bo ubral pot zmanjševanja izgub ali poiskal kak drug ustrezen ukrep (npr. ohranjanje ali iskanje novih vodnih virov). [35]

#### 4. Tehnični kazalec uspešnosti (trenutne realne letne izgube CARL)

S pomočjo tehničnih kazalnikov je mogoče določiti odvisnosti dejanskih vodnih izgub. [35]

$$CARL = \frac{Q_{VR} * 10}{N_{dwsp}} \quad (35)$$

kjer je:

$CARL$ ...trenutne realne letne izgube [l/HP/dan] (ang. Current annual real loss)

$Q_{VR}$ ...dejanske izgube (letne) [ $m^3$ /leto]

$N_{dwsp}$ ...število dni, ko je omrežje pod tlakom [-]

#### 5. Tehnični kazalec uspešnosti (neizogibne letne izgube UARL)

Kazalnik UARL (ang. Unavoidable annual real loss) predstavlja neizogibne letne izgube na sistemu. Te okvare so navadno manjšega obsega, tako da jih ni moč zaznati z akustičnimi ali drugimi tehnikami. Predstavljajo zgolj orientacijsko vrednost, ki lahko prinese zmanjšanje vodnih izgub. [35]

$$UARL = (18 * L_N + 0,8 * N_C + 25 * L_P) * P_A \quad (36)$$

kjer je:

UARL...dnevne neizogibne letne izgube oskrbovanega priključka [l/HP/dan]

L<sub>M</sub>...celotna dolžina vodovodnega omrežja [km]

N<sub>C</sub>...število hišnih priključkov [-]

L<sub>P</sub>...skupna dolžina hišnih priključkov [km]

P<sub>A</sub>...povprečni oskrbovalni tlak [m]

Infrastructure Component	Background Leakage	Reported Leaks and Breaks	Unreported Leaks and Breaks	UARL total	Units
Mains	9.6	5.8	2.6	18	liters/km of mains/day/meter of pressure
Service connections main to curb stop	0.6	0.04	0.016	0.80	liters/service connection/day/meter of pressure
Service connections curb stop to meter	16	1.9	7.1	25	liters/km of service connection/day/meter of pressure

Slika 44: Standardne vrednosti za račun faktorja UARL [35, str.51]

## 6. Tehnični kazalec uspešnosti (ILI)

Predstavlja razmerje med obema prejšnjima tehničnima faktorjema in pomeni razmerje zmanjšanja dejanskih vodnih izgub na vodovodnem sistemu. [25] Kazalnik tudi pove, kako uspešno se upravlja, nadzoruje, izboljšuje, vrši kontrola in uporablja metode za nadzor dejanskih izgub na sistemu.

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \quad (37)$$

kjer je:

ILI...potencialno zmanjšanje dejanskih vodnih izgub na vodovodnem sistemu (ang. Infrastructure leakage index)

Velja za vodovodne sisteme z:

- N<sub>C</sub> > 3.000 [HP]
- P<sub>A</sub> > 25 m
- Gostota HP > 20 HP/km

Dobro voden in vzdrževan vodovodni sistem bi dosegal faktor ILI = 2 - 4, vendar je to dosegljivo zgolj na račun velikih finančnih vložkov, katere večina upravljalcev

vodovodnih sistemov težko zagotovi. Večje finančne investicije se lahko upravičijo z razlogom omejenih količin vodnih virov ali potrebo po dodatni obdelavi pitne vode.

**Tabela 3: Mejne vrednosti koeficienta ILI [24]**

Kazalnik ILI	Stanje	Opis
1 - 2	ODLIČNO	Za dodatno zmanjšanje izgub je potrebno narediti stroškovno analizo ukrepa
2 - 4	ZADOVOLJI VO	Obstajam možnost dodatnih izboljšav na vodovodnem sistemu
4 - 8	SLABO	Slab nadzor nad vodnimi izgubami
> 8	ZELO SLABO	Oblikovanje programa nadzora nad vodnimi izgubami je prioriteta

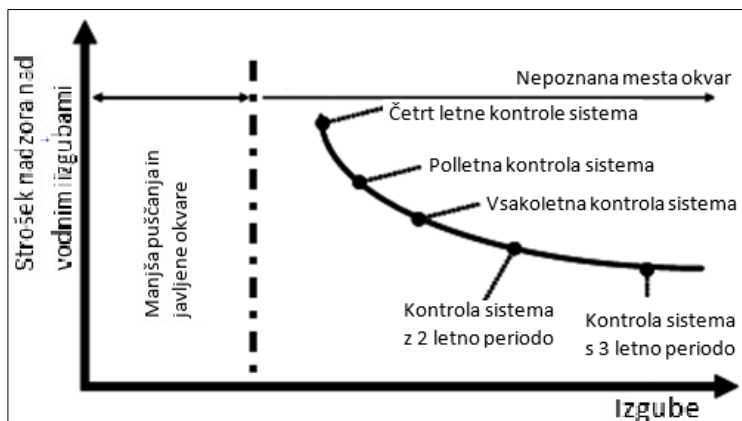
## 2.14 Poslovno upravičena analiza vodnih izgub

Uspešnost odprave vodnih izgube je povezana z izbiro pristopa k delu, inovativnosti in uporabljene metode za sanacijo okvare. V ozadju vedno teče in se premlava poslovno upravičenost, ki (ne)upraviči obseg željenih izboljšav in odločitev na vodovodnem sistemu. Z ekonomsko optimizacijo se določi obseg izvedenih del in zavedno dopusti določen odstotek vodnih izgub v sistemu (UARL). [22]

Nekaj desetletij nazaj je veljalo, da se sproži postopek iskanja okvare na sistemu le za primer, da je bilo očitno vidno, da voda na sistemu nekje uhaja. Drugi pogoj je bil seveda, da je imel upravljalec vodovodnega omrežja zadostne finančne zmožnosti, da je lahko financiral tak projekt. Danes je odkrivanje okvar predvideno v letnih proračunih, saj evropske zahteve in zakoni stremijo k temu, da je dobava vode uporabniku nemotena in da je dobavljena voda tudi ustrezne kvalitete. [27] Sanacija defektnih mest predstavlja ekonomsko najbolj upravičen način zmanjševanja vodnih izgub in zviševanja kvalitete vodooskrbe. Temelji na predhodni analizi tehničnih in izvedbenih parametrov vodovodnega sistema, iskanju defektov na cevovodih in sanaciji teh defektov. Izkušnje kažejo, da so investicije v aktivno iskanje in zmanjševanje vodnih izgub nujno potrebne ter predvsem stroškovno upravičene. V večini primerov, kjer vodne izgube presegajo 30 % načrpane vode, se namreč na račun manjših obratovalnih stroškov investicija povrne prej kot v enem letu, vodooskrbni sistem pa deluje z bistveno povečano zanesljivostjo in povišano kvaliteto dobavljene vode. [21]

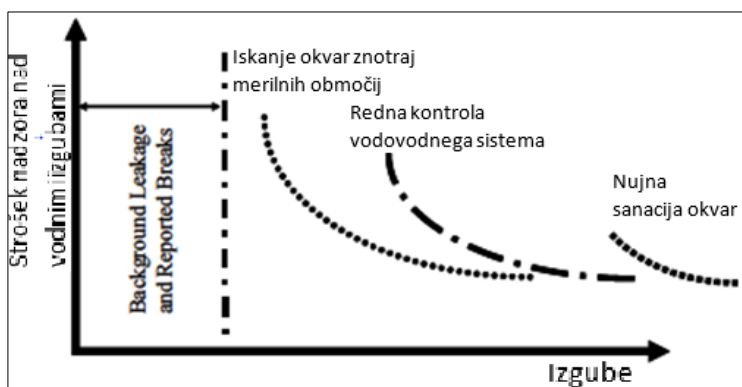
Stroškovna analiza obsega zavedanje naslednjih dejavnikov:

1. Vrednost izgube je enaka vsoti vrednosti surove vode, stroškom obdelave surove vode do ustrezne kakovosti in transporta po cevovodu. [29]
2. Vseh okvar na omrežju ni moč odpraviti. Dodaten razlog za sprejetje določene stopnje vodnih izgub bi bila tudi »cost-benefit« analiza, ki pove do katere stopnje je še smiselno iskati in sanirati nastale okvare. [24]
3. Zmanjšanje vodnih izgub na vodovodnem sistemu pomeni za upravljalca omrežja tudi prihranek. Tega lahko preusmeri v druge veje svojega dela, kot so na primer zagotavljanje ustrezne kakovosti vode, iskanje novih virov pitne vode ali investicije v infrastrukturo. [27]



Slika 45: Krivulja stroškov zmanjšanja izgub z uporabo akustičnih tehnik [35, str .151]

Zgornji graf predstavlja tipično zmanjšanje vodnih izgub v odvisnosti ob nastalih stroških za različne tipe okvar, odkrite s pomočjo akustičnih tehnik. Krivulja prikazuje letne stroške uporabe akustičnih metod, z različno frekvenco delovanja. Kot stroški so tu opredeljeni stroški dela na terenu in ne vključujejo sanacije odprave okvare. Iskanje mest okvar je potekalo z različno pogostostjo, ob tem pa se lahko pričakuje najmanjši obseg izgub na pogostejše pregledanih vodovodnih sistemih, kar pa pomeni tudi nekoliko višje finančne vložke. [35]

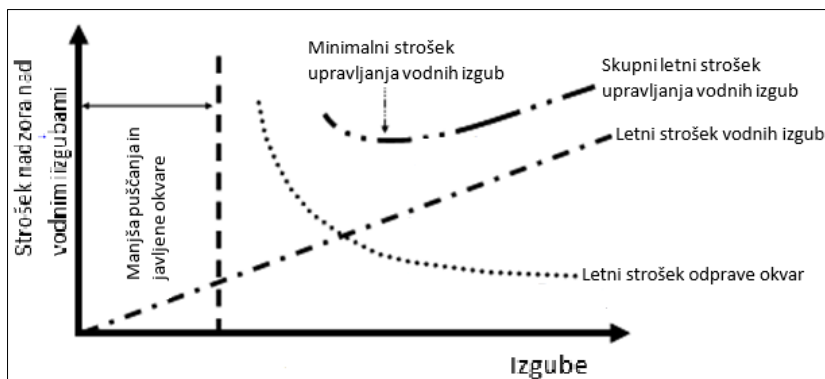


Slika 46: Krivulja stroškov za različne strategije zmanjševanja vodnih izgub [35, str .151]

Vsem krivuljam na zgornjem grafu je skupna hiperbolična oblika, vsaka posamezna pa ima različen učinek in obseg potrebnih stroškov na zmanjšanje vodnih izgub. Tako pri krivulji z največjim obsegom izgub poteka sanacija zgolj najdenih okvar, medtem ko se pri prvi vrši kontrola s kontinuiranim monitoringom in so posledično vsa mesta okvar na sistemu hitreje odkrita in sanirana. [35]

Obseg zmanjšanja izgub je močno povezan tudi s tlakom v sistemu. Večji kot je tlak, večji je obseg izgub in število okvar. Zato na pripravo ELL analize močno vpliva tudi sistemski obratovalni tlak in stanje infrastrukture (cevovoda in objektov). Za pripravo načrtovane strategije zmanjšanja izgub je pomembno tudi poznavanje stanja sistema, predvsem starosti cevovoda. Navadno je s starejšimi in slabše vzdrževanimi posledično težje ali celo nemogoče doseči željeno stopnjo uspeha pri zmanjšanju vodnih izgub.





Slika 47: Ekonomska bilanca zmanjševanja izgub [35, str.153]

Strošek letnih izgubljenih količin vode in strošek letnih vlaganj v izboljšave za zmanjšanje izgub je moč predstaviti na skupnem grafu, kjer se oblikuje skupna krivulja stroškov. Minimum krivulje predstavlja vrednost, ki se uporabi v ELL analizi. Ta točka na krivulji ni nujno tudi optimalno mesto za upravljalca, saj lahko privzame ELL kot optimizacijo zmesi s stroški ukrepov aktivne kontrole, uravnavanjem tlaka, kvaliteto saniranih mest in nadomestitvijo dotrajanih delov cevovoda. Zato prej omenjena ELL analiza ne predstavlja zgolj smiselnega vložka v izbrani sistem zmanjšanja izgub ampak tudi oceni najboljši pristop za izvajanje takega ukrepa.

Kot zaključek je vredno poudariti, da vsa vložena sredstva in aktivnosti na področju detekcije zmanjševanja vodnih izgub, z racionalno in pravilno uporabo, za vodovodni sistem vedno pomenijo določeno stopnjo izboljšave k delovanju sistema in pripomorejo k trajnosti cevovodnega sistema in neprekinjeni dobavi pitne vode odjemalcem. [35]

### 3 OBRAVNAVANO OBMOČJE

#### 3.1 Opis obravnavanega območja

Občina Kostanjevica na Krki je del spodnjeposavske statistične regije. Meri 58 km<sup>2</sup>. Sredi leta 2013 je imela občina približno 2.400 prebivalcev. Danes je to število prebivalcev nekoliko višje, kot je razvidno iz spodnje tabele. [37] Omrežje naselij v Občini Kostanjevica na Krki sestavlja 28 naselij po RPE. Naselja v občini se glede na vlogo in funkcijo delijo na: [38]

- lokalno središče Kostanjevica na Krki,
- naselja: Avguštine, Črešnjevec pri Oštrcu, Črneča vas, Dobe, Dobrava pri Kostanjevici, Dolnja Prekopa, Dolšče, Globočice, Gornja Prekopa, Grič, Ivanjše, Jablance, Karlče, Kočarija, Koprivnik, Male Vodenice, Malence, Orehovec, Oštrc, Podstrm, Ržišče, Sajevce, Slinovce, Velike Vodenice, Vrbje in Vrtača, in Zaboršt.

Tabela 4: Število oskrbovanih prebivalcev

Ime naselja	Število prebivalcev	Število prebivalcev, ki se oskrbujejo s pitno vodo
Avguštine	29	29
Črešnjevec	24	24
Črneča vas	139	139
Dobe	84	84
Dobrava	50	50
Dolnja Prekopa	254	249
Dolšče	93	93
Globočice	105	105
Gornja Prekopa	115	115
Grič	34	34
Ivanjše	14	14
Jablance	51	51
Karlče	10	10
Kočarija	68	68
Koprivnik	13	13
Kostanjevica na Krki	723	713
Male Vodenice	34	34
Malence	65	65
Orehovec	236	234
Oštrc	172	172
Podstrm	16	16
Ržišče	23	23
Sajevce	27	27
Slinovce	44	44
Velike Vodenice	51	51
Vrbje	10	0 ??
Vrtača	7	0 ??
Zaboršt	19	19
<b>SKUPAJ:</b>	<b>2510</b>	<b>2476</b>

### 3.2 Prostorski razvoj in smernice občine Kostanjevica na Krki na podlagi OPN-ja

Občina na osnovi sprejetih načrtov določa pogoje za vsak poseg v prostor, zato so vsebine teh načrtov zelo pomembne. Iz Zakona o prostorskem načrtovanju izhajajo naslednje pristojnosti občin na področju prostorskega načrtovanja: [38]

1. določanje ciljev in izhodišč prostorskega razvoja občine
2. določanje rabe prostora in pogojev za umeščanje posegov v prostor in
3. načrtovanje prostorskih ureditev lokalnega pomena.

Te pristojnosti občine definirajo z Občinskim prostorskim načrtom (OPN) ter za posamezna območja bolj natančnim Občinskim podrobnim prostorskim načrtom (OPPN). Občinski prostorski načrt občine Kostanjevica na Krki vsebuje tudi člene, ki se navezujejo na področje vodooskrbe. Strateški del OPN določa izhodišča in cilje ter zasnovo prostorskega razvoja občine. Na področju urejanje infrastrukture daje prednost ureditvam na področju obnove cest ter dogranje kanalizacijskega in vodovodnega omrežja. Postopek urejanja s komunalno infrastrukturo je pomemben predvsem s področja varstva okolja in vidika ohranjanja vodnih virov na tem območju. Iz obstoječega vodovodnega sistema se zagotavlja oskrba s pitno vodo, za razširitve pa je potrebno zagotoviti dodatne vire pitne vode in ob tem ustrezno rekonstruirati sistem. Težijo k racionalnejšemu, učinkovitejšemu in bolj nadzorovanemu vodovodnemu sistemu ter hkrati vzpostavlja poveza z vodovodnimi sistemi sosednjih občin. S tem hkrati povezuje tudi vodne vire, preko katerih se lahko nadomesti pomanjkanje pitne vode v sosednji občini oziroma vodovodnem sistemu. Tu je potrebno posebno pozornost nameniti tudi zaščiti vodnih virov. [38]

Priključevanje novih porabnikov na vodovodni sistem poteka v okviru s predpisi in potrebno dokumentacijo. Priključitev je mogoča s soglasjem upravljalca in če tlačne razmere na odseku omogočajo priključitev novih porabnikov. V nasprotnem primeru je potrebno izvesti sanacijo vodovodnega sistema in zagotoviti priključitev preko vodomernega jaška. V nasprotnem primeru izda dovoljenje za začasno uporabo lastnega vira pitne vode (lastno zajetje, cisterna). [38]

### 3.3 Upravljalac omrežja

Upravljalac vodovodnega omrežja na območju vodovodnega sistema Kostanjevica je družba Kostak izvaja dejavnosti gospodarskih javnih služb za območje občine Krško in Kostanjevica na Krki na osnovi sklenjenih koncesijskih pogodb, in sicer:

- dejavnosti individualne rabe: oskrba s pitno vodo, odvajanje in čiščenje odpadnih in padavinskih voda, zbiranje in prevoz komunalnih odpadkov, urejanje in vzdrževanje pokopališč ter pogrebnih storitev in urejanje ter vzdrževanje javnih tržnic (samo v občini Krško);
- dejavnosti kolektivne rabe: vzdrževanje občinskih javnih cest, urejanje in čiščenje javnih površin, javna razsvetljava, izobešanje zastav in okraševanje v naseljih.

V družbi Kostak, d. d., so v letu 2014 izpeljali dve reorganizaciji, katerih cilj je zlasti povečanje organizacijske učinkovitosti pri izvajanju delovnih procesov v posameznih organizacijskih enotah.



**Slika 48: Shema organiziranosti skupine Kostak [40, str.14]**

Osnovna naloga podjetja Kostak d.d na področju vodooskrbe je oskrba uporabnikov v občinah Krško in Kostanjevica na Krki s kakovostno (zdravstveno ustrežno) pitno vodo v zadostnih količinah. Družba Kostak upravlja z 8 vodovodnimi sistemi ter vzdržuje več kot 730 km vodovodnega omrežja in okoli 120 različnih objektov, kot so zajetja, črpališča, prečrpališča in vodohrani.

### 3.4 Obravnavani vodovodni podsystem

Predmet obravnave je del vodovodnega sistema v občini Kostanjevica na Krki. To je sestavljeno iz dveh omrežij, ki sta ločeni in se napajata iz različnih vodnih virov. Manjše, podsystem Javorovica, ki obsega vasi Grič, Ivanjše, Kočarija, Male in Velike Vodenice, Podstrm, Ržišče, ima vodni vir na vrhu hriba Javorovica. Geografsko je ta vodni vir uvrščen v okvir komunale Novo mesto, ki je upravljalec vodovodnega sistema v sosednji občini. Vodovodni sistem je zasnovan tako, da leži vodni vir na najvišji točki sistema in voda teče po sistemu gravitacijsko.

Vsi ti objekti so umeščeni v prostor in sistem z nalogo, da zagotavljajo zadostne količine pitne vode porabnikom na omenjenem območju. Zagotavljati morajo tudi ustrezen tlak v omrežju, saj so višinske razlike med objekti in s tem povezani prirastki tlakov neenakomerni, saj sledijo padnici terena.

Za vir podatkov v magistrski nalogi sem izbral večji del sistema, podsystem Kostanjevica, kateri oskrbuje preostalih 21 naselij v občini. Obravnavano območje predstavlja v spodnjem delu precej raven teren, del Krško-brežiškega polja. Mesto Kostanjevica na Krki leži na samem robu polja, ki se začne vzpenjati po pobočju Gorjancev, vse do meje s Hrvaško, kjer doseže svojo najvišjo točko. Najnižji objekt na obravnavanem sistemu je vodno zajetje Jama in poleg nje ležeče prečrpališče Jama. Od tu vodi tlačni cevovod do višje ležečih objektov in naselij, saj je večina objektov za vodooskrbo na vodovodnem sistemu postavljena na že vzpenjajoči relief. Najvišja točka omenjenega sistema, kjer je postavljen vodohran v Črneči vasi, leži na cca 420 m.n.v..

Situacija vodovodnega sistema je bila izdelana s pomočjo geodetskih kart območja ter podatkov katastra komunalnih objektov in naprav. Situacija prikazuje potek vodovoda po območju vodovodnega oskrbovanja in razvejanost cevi različnih premerov. Ker je situacija obravnavanega vodovoda v katastru komunalnih objektov in naprav izdelana pomanjkljivo, je

bila v postopku izdelave hidravličnega modela dopolnjena z lastnimi terenskimi ogledi, meritvami in pridobljenimi podatki s strani upravljalca vodovodnega sistema.

### 3.4.1 Objekti na obravnavanem vodovodnem sistemu

Vsak izmed objektov na obravnavanem vodovodnem sistemu je opisan v nadaljevanju. Za boljšo informiranost o velikosti in delovanju obravnavanega vodooskrbnega sistema, sem v povezavi z upravljalcem omrežja, podjetjem Kostak d.d., izvedel terenski ogled in popis objektov na sistemu. Poleg popisa posameznih elementov, skic in meritev, sem s terenskim ogledom pridobil tudi prostorsko predstavo in občutek razprostrtosti vodooskrbnega sistema. Obravnavani sistem sestavljata dva podsistema, Kostanjevica in Orehovec, ki sta s to delitvijo poenostavila predstavo o sistemu in tudi samo razdelitev objektov. Vsak ima zagotovljen lasten vir pitne vode, iz katerih se potem napaja celoten, skupno povezan, vodovodni sistem.

**Tabela 5: Pregled vodovodnega omrežja [40]**

<b>Javni vodovod Kostanjevica na Krki</b>	<b>Število</b>	<b>Komentar</b>
Vodohran	5	Nekateri objekti imajo dvojno funkcijo - tako vodohrana kot prečrpavališča
Črpališče	2	Vrtina Orehovec, vrtina Travnik
Prečrpališče	3	V večini primeru vodohran in prečrpavališče "ločuje" kontrolni števec
Naprave za obdelavo pitne vode	2	Zajetje Jama, Vrtini Travnik in Orehovec - plinski klorinator
Količina vode, ki jo zagotavlja [m <sup>3</sup> ]	260915	Dovoljena črana količina [m <sup>3</sup> /leto] navedena v vodnem dovoljenju
Število evidentiranih hidrantov na omrežju	73	

**Tabela 6: Izdatnost vodnih virov [40]**

<b>Vir pitne vode</b>	<b>ID vodnega vira</b>	<b>ID vodovodnega sistema</b>	<b>Dovoljena količina odvzete vode [l/s]</b>	<b>Številka odločbe o vodni pravici</b>
Vrtina Kamnolom	5049	1212	122723	vodno dovoljenje šifra 35527-11/2004
Vrtina Travnik	5048			vodno dovoljenje šifra 35527-44/2004
Zajetje Jama	6		86856	vodno dovoljenje šifra 35527-196/2004

### 3.4.1.1 Vodni viri

Na obravnavanem vodovodnem sistemu so zagotovljeni trije viri pitne vode, iz katerih se napaja celoten vodooskrbni sistem. Vodni viri imajo različno izdatnost, skupaj pa uspejo zagotoviti zadostno količino vode za potrebe oskrbovanega območja. Za vsakega posebej, je bilo v skladu z zakonom pridobljeno vodno dovoljenje.

- **Zajetje Jama**

Zajetje Jama je eden izmed izdatnejših vodnih virov na obravnavanem sistemu. Zajetje je urejeno tako, da izvir Jama, na vrhu obdaja AB pokrov z varovanimi kovinskimi vratci. Voda se črpa s pomočjo črpalke bližje ležečega prečrpališča Jama, dalje v vodohran na Bajinem vrhu. Kovinska vratca so tudi eden izmed zasilnih prelivov za primer viškov vode v zajetju. Ob večjih nalivih lahko voda, ki se steka s prispevnega območja, povzroči tudi razlitje na travniku pod izvirom. Velikost prispevne površine za omenjeno zajetje je težko definirati, saj ga večinoma sestavlja kraški svet, ki pa je lahko precej nepredvidljiv in lahko s svojo sestavo, razpakanostjo in poroznostjo vodi vodo v različne smeri.



Slika 49: Zajetje Jama

Zaradi neobstoječe dokumentacije je težko definirati natančno obliko in globino zajetja. Vsi podatki, so bili pridobljeni s pomočjo lastnih raziskav na terenu. Iz vodnega vira Jama se črpa od 2.3 – 3.2 l/s.

- **Vrtina Orehovec - kamnolom**

Izvir je kraškega tipa, z majhno izdatnostjo. Izdatnost vodnega vira je po besedah upravljalca v območju 2– 2.6 l/s. V okolici so bile izvedene dodatne kontrolne vrtine, katere so pokazale večje količine vode, kot jo je moč načrpati iz vrtine. Ena od možnih razlag je pojav depresijskega lijaka, na območju katerega se piezometrična gladina podzemne vode zniža zaradi črpanja. Druga možnost je zaprojevanje vrtine oziroma nabiranje drobnejših frakcij peska okoli koša za črpanje, ki zmanjšajo dotok vode v koš iz katerega se črpa voda.



Slika 50: Cev iz vrtine z merilcem pretoka

Črpalka je potopljena v cca 176 m globoko črpalno vrtino. Nad vrtino je postavljen objekt, v katerem je shranjena vsa potrebna oprema in dodaten prostor za vzdrževanje. Sem poleg ventilov, cevi, in črpalke, sodi še merilnik pretoka. Nameščen je na cevi, ki pride iz vrtine in meri tako skupno načrpano vodo v  $m^3$ , kot tudi trenutno črpano vodo v l/s.



Slika 52: Merilnik pretoka - skupni pretok iz vrtine

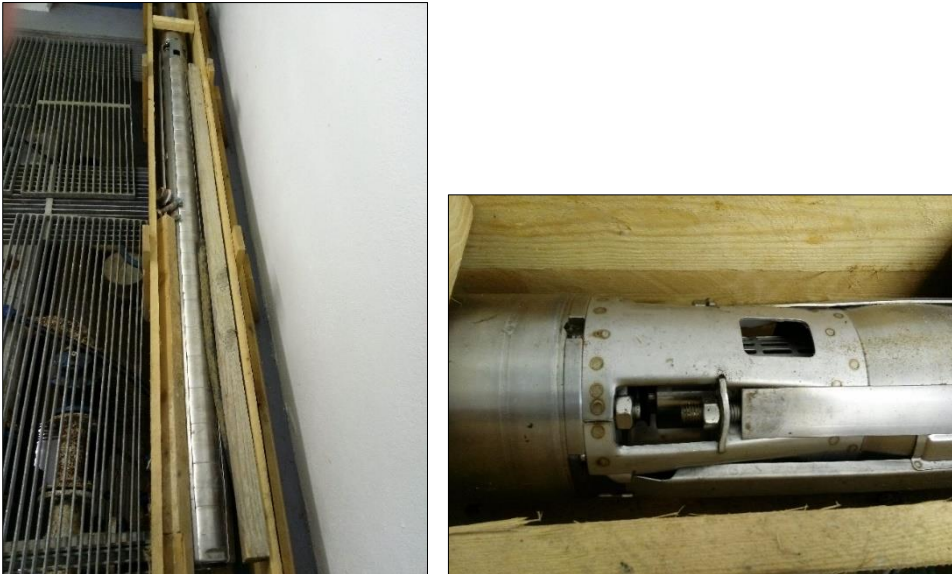


Slika 51: Merilnik pretoka - trenutni pretok (l/s)

Upravljalec vodovodnega sistema je k elektro opremi dodal še frekvenčni regulator. Ta skrbi za enakomerno črpanje in posledično tudi za to, da črpalka ne črpa večjih količin vode in tako ohranja stalen dotok in hkrati vzdržuje gladino vode v vrtini. V nasprotnem primeru bi lahko črpalka sesala zrak, kar ni dobro za črpalko, kot tudi ne za vodovodni sistem.

- **Vrtina Orehovec - travnik**

Druga vrtina v Orehovcu se nahaja nekje 400 m stran od prve. Izdatnost vira je cca 1 l/s. Vsa oprema je nameščena v in pod objektom, ki je tudi ustrezno zavarovan. Celotna črpalna garnitura je sestavljena iz večjega števila kosov cevi, na spodnji sliki je viden zadnji del, ki leži najgloblje v vrtini.



**Slika 53: Del črpalne cevi iz vrtine (levo) in sesalni del (desno)**

V primeru, da se vodohran Orehovec-kamolom napolni, se črpalna v vrtini Travnik ugasne. Posledica tega je, da v času mirovanja črpalke, v vrtino potisne drobne frakcije peska. Tako je ob ponovni vključitvi črpalke Travnik najprej potrebno izprazniti pesek iz vrtine, ki se mešanici z vodo izlijejo v bližnji potok.



**Slika 54: Vrtina s črpalno**

Motnost načrpane vode je posledica večje količine padavin na prispevno območje vira. Zato ima objekt poleg vrtine tudi ločeno sobo s klorno postajo. Dodajanje klora poteka na isti način kot pri črpalnišči Jama. Potrebne količine klora se vbrizgajo direktno v cev, ki povezuje vodohran Orehovec in Bajin vrh. Količina dodanega klora je odvisna od trenutnega stanja kvalitete vode in kalnosti načrpane vode.





Slika 55: Klorna postaja

Na spodnji sliki sta prikazana dva različna načina dodajanja klora. Pred leti je postopek potekal s pomočjo merilne cevke in kroglice, ki je bila pokazatelj o količini dodanega klora v cev. Danes regulacijo klora uravnavajo s pomočjo elektronske naprave. Ta način je preprost in bolj natančen.



Slika 56: Kloriranje na "stari" način - z merilno cevko in kroglico



Slika 57: Digitalni način dodajanja klora

Na obeh črpališčih v Orehovcu se je od prevzema novega upravljalca vodovodnega omrežja, količina načrpane vode zmanjšala. Razlika gre predvsem na račun odpravljanja okvar na ceveh vodovodnega sistema. Določene izboljšave pa so dosegli tudi z zamenjavo dotrajanih cevi, menjavo ventilov in merilne opreme. Vsa načrpana voda iz obeh vrtin v Orehovcu gre v vodohran, ki je lociran poleg vrtine Orehovec – kamnolom.

### 3.4.1.2 Prečrpališča

- **Prečrpališče (PČR) Jama**

Objekt je lociran poleg naravne znamenitosti, Kostanjeviške jame, katere vhod leži nekaj 10 metrov nad objektov. V neposredni bližini objekta, le nekaj 10 m stran, leži tudi zajetje pitne vode Jama.



Slika 58: PČR Jama

Prečrpališče sestavljata 2 črpalke. Prva črpa vodo iz zajetja Jama, druga pa prečrpava vodo v vodohran Avguštine. Pred časom sta črpanje vode iz zajetja Jama na Bajin vrh opravljali 2 črpalke, ki pa nista zadostovali potrebam. Ti črpalke sta danes v mirovanju in služita le kot rezerva in za primer začasne rešitve v primeru okvare glavne črpalke. Črpalke sta tipa Lowara, vsaka z 4 kW moči. Zato so ju nadomestili z ustrežnejšo črpalko proizvajalca Lowara, z 11 kW moči.



Slika 59: Črpalke v prečrpališču Jama



Slika 60: Merilnik pretoka na iztočni cevi črpalke prečrpališča Jama

Na iztočni cevi iz PČR Jama v smeri vodohrana Bajin vrh je nameščen tudi merilnik pretoka. Vsi podobni merilci se v okviru rednega tedensko spremljanja stanja na sistemu popišejo po celotnem sistemu. V primeru okvare količina prečrpane vode v nekem obdobju naraste. Popis pretokov lahko služi kot prvi indikator za pojav okvare na delu sistema.

Eden izmed elementov prečrpališča je tudi klorna postaja. Prostor, v katerem je nameščena jeklenka s klorom in potrebna elektronska oprema, je posebej urejen, ustrezno varovan in prezračevan. S plinskim klorinatorjem se dodaja ustrezna količina klora direktno v cev. Količine klora so predpisane in se uravnavajo glede na kvaliteto načrpane vode.



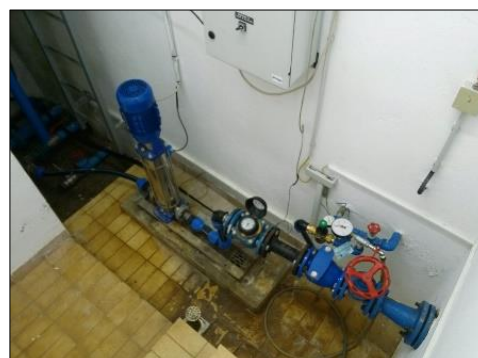
Slika 61: Elektronska oprema za dodajanje klora v cevi z vodo

- **Vodohran (VH) in prečrpališče (PČR) Avguštine**

Vodohran Avguštine leži v območju istoimenskega naselja. Vodohran leži na nadmorski višini cca 335 m. Vsi podatki o geometriji objekta so bili pridobljeni na podlagi lastnih raziskav in meritev na terenu. Vodohran je z zadnje in zgornje strani vkopan v hribino, ki je poraščena s travno rušo.



Slika 62: VH+PČR Avguštine



Slika 63: Prečrpališče Avguštine

Objekt je AB izvedbe, ustrezno označen in urejen. Sestavljen je iz vodne in armaturne celice. Vhod je varovan s kovinskimi vrati, skozi katere se vstopi v armaturno celico. Dno armaturne celice je za višino štirih stopnic spuščeno pod koto terena na vhodni strani. Objekt se preko zračnika na strehi tudi stalno zrači in tako zmanjša možnost pojava kondenza v armaturni celici. Od desni strani, takoj za vhodom, je postavljeno tudi prečrpališče z vso pripadajočo opremo. Črpalka je narejena na Poljskem, s strani proizvajalca Lowara, nazivne moči 2,2 kW. Črpalka črpa vodo dalje v vodohrana Jablance in Črnečo vas. Na cevi iz vodohrana sta nameščena še dva merilca. Prvi je merilnik pretoka, drugi pa merilnik tlaka. Oba sta prikazana na spodnjih slikah in sta del rednega tedenskega popisa spremljanja sistema.



Slika 64: Merilnik tlaka v prečrpališču Avguštine



Slika 65: Merilnik pretoka

Na steno armaturne celice je pritrjena lestev, po kateri se je moč povzpeti na vrh vodne celice. Služi za lažje spremljanja stanja v vodni celici, opazovanje nihanja gladine in kot dostopna točka za primer vzdrževalnih del v vodni celici. Pod njo leži dovodna cev, ki pride iz smeri prečrpališča Jama. Ta se tu preko kolena dvigne in se na koti 2,30 m nad tlemi prebije preko stene v vodno celico. Voda iz cevi se s prostim iztokom izliva v volumen vodne celice. V primeru, da bi prišlo do nevarnosti prelitja višine vodne celice in poplavljanja armaturne celice z elektro opremo, je na višini 1,8 m od dna vodne celice speljana prelivna cev. Ta je v spodnjem delu stikovana s cevjo, ki leži le nekaj centimetrom nad tlemi in služi za praznjenje vodne celice. Vsako posebej je moč zapreti z ventilom.



Slika 66: Dotočna in iztočna cev iz vodne celice

Vodna celica je velikosti 60 m<sup>3</sup>. Višina vode niha, omejena pa je v višino prej omenjene prelivne cevi, ki določa maksimalno višino vode v vodni celici. Višino vode v vodni celici se vzdržuje s pomočjo plovca, ki izklopi ali vklopi črpalko v črpališču Jama. Količine vode zadošča potrebam odjemalcev na območju vasi Dolšč, Oštrca in Avguštin.

- **Prečrpališče (PČR) Orehovec**

Prečrpališče Orehovec je lociramo cca 60 m nižje ob cesti od vrtine Orehovec – travnik. Objekt ima enoten prostor, ki je varovan s kovinskimi vrati. Okolica AB objekta je zasipana z zemljinjo in poraščena s travno rušo z vseh strani, razen vhodne. Črpalka je delo proizvajalca Lowara, z močjo 1,5 kW in zmožnostjo premagovati od 44 do 112 m črpalne višine. Naloga črpalke v sistemu je, da prečrpa vodo iz vodohrana Orehovec – kamnolom do vodohrana Orehovec

(stari), ki leži nad vasjo Orehovec. Pri tem opravi delo za potrebno premostitev 87 m razlike nadmorske višine med objektoma. Na cevi je nameščen tudi merilnik tlaka in pretoka in predstavljata del rednega tedenskega kontrolnega popisa na vodovodnem sistemu.



Slika 67: Prostor s črpalko, merilcem tlaka in merilcem pretoka



Slika 68: Merilnik pretoka

### 3.4.1.3 Vodohrani

Ker se celotno vodovodno omrežje Kostanjevice na Krki razprostira tudi po okoliškem hribovju, temelji ves sistem na večkratnem prečrpavanju vode iz zajetij, ki ležijo v nižjih območjih doline, do višje ležečih vasi in zaselkov. V hidravličnem modelu so uporabljeni naslednji vodohrani vodovodnega omrežja:

- Bajin vrh
- Črneča vas
- Črešnjevce
- Jablance
- Orehovec – stari
- Orehovec – kamnolom

- **Vodohran (VH) Bajin vrh**

Vodohran na Bajinem vrhu leži na cca 206m nadmorske višine. Po principu gravitacijske oskrbe zadovoljuje potrebe odjemalcev na območju Kostanjevice na Krki in vasi Dobrave, Dobe, Malence, Gornje in Dolnje Prekope. Zasipan je z zemljino in poraščen s travno rušo z treh strani, le z vzhodne je moč vstopiti v objekt. Na strehi AB objekta je urejeno prezračevanje. Vhod je varovan s kovinskimi vrati, skozi katere vstopimo v prostor pred vodnima celicama. Tu je vidna vsa strojna in elektro oprema, ki je potrebna za nemoteno obratovanje vodohrana. Pod vstopnim podestom so vidni vsi ventili, zasuni, dovodne in odvodne cevi ter zasilni izpust.

V vodohranu sta dve vodni celici krožne oblike. Vsako deli na sredini zid, debeline 0,80 m, katerega namen je umirjanje in kontrola hitrosti dotekajoče vode v objekt. V VH Bajin vrh črpa voda iz VH Orehovec - kamnolom doteka gravitacijsko, del pa se je črpa iz vira Jama preko PČR Jama. Gladino vode v vodni celici se vzdržuje s plovcem, ki plava na gladini vode vodohrana in niha med 2 – 2,30 m. Ko se gladina vode ob večji porabi zniža, plovec zaniha v zraku in vklopi črpalko v PČR Jama, ki začne dovajati sveže količine vode. Maksimalna gladina vode v vodohranu je omejena s prelivom oziroma cevjo večjega premera, z vtočnim profilom na koti dovoljene maksimalne gladine vode v vodohranu. Ta služi za primer, da bi na plovcu prišlo do okvare in bi viški vode tako odtekali skozi to cev. V spodnjem delu, kolenu cevi, je

priključena tudi cev za praznjenje vodne celice, ki služi za primer vzdrževalni del ali za primer pranja vodne celice po večjem deževju.



Slika 69: VH Bajin vrh



Slika 70: Vpogled v vodno celico

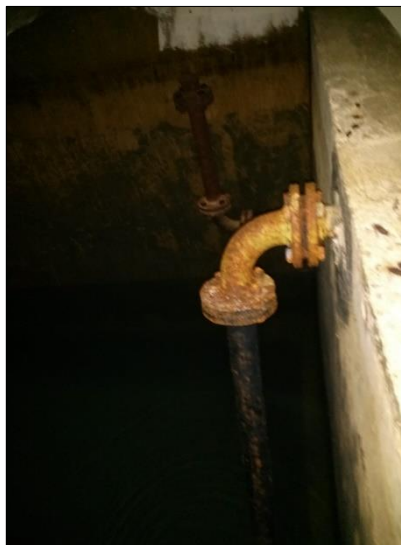
VH Bajin vrh je opremljen z elektronsko opremo, ki omogoča oddaljeni dostop in beleži nihanje vode v vodohranu. S tem je možen stalni nadzor in beleženje podatkov v nekaj minutnih intervalih, katere lahko uporabimo tudi za kasnejše analize in kontrole. Podatkov o dimenzijah objekta ni bilo na voljo, potrebne meritve sem opravil sem.

- **VH Črneča vas**

Vodohran v Črneči vasi leži na 420 m nadmorske višine. Sam objekt je lociran nad istoimenskim naseljem in oskrbuje spodaj ležeča naselja, po principu gravitacijskega toka. Oprema je enaka ostalim opisanim vodohranom in je namenjena temu, da omogoča nemoteno delovanje objekta in vodovodnega sistema. Na AB objektu je urejeno zračenje preko vgrajenega zračnika na kovinskih vratih, preko katerih vstopimo v objekt. V armaturni celici, ki je relativno ozka, so vidne dovodna cev, ki polni vodohran in odvodna cev, ki je priključena na vodovodno omrežje. Urejen je tudi izpust v primeru praznjenja in preliv z cevjo, ki preprečuje prelivanje stene vodne celice.



Slika 71: VH Črneča vas



Slika 72: Dovodna cev (levo) in iztočna (desno) pred vodno celico

- **VH Črešnjevec**

Ta vodohran ne služi več svojemu prvotnemu namenu. Po zadnjih vzdrževalnih delih na sistemu so ugotovili, da nima bistvenega vpliva na hidravlično stanje sistema. Zato je vodna celica tega AB objekta že dalj časa prazna, uporabniki pa so bili prevezani na sistem, ki se oskrbuje iz vodohrana Črneča vas.

- **Vodohran (VH) Jablance**

Vodohran Jablance oskrbuje vmesna naselja med vodohranom Bajin vrh in naseljem Črneča vas. Leži na nadmorski višini cca 314 m in se nahaja sredi območja, kjer je večje število vikendov in zidanic z vinogradi. Večji del AB objekta je vkopan v hrib. V predprostoru so vidne dovodna cev, ki polni vodohran in odvodna, ki je priključena na vodovodni sistem za oskrbo odjemalcev. Odvodna cev je opremljena z merilcem pretoka. Tudi ta vodna celica je opremljena s prelivom v obliki cevi, na višini 1,45 m od tal armaturne celice. Pri tleh, je v kolenu vezana na cev za zasilni izpust oziroma za praznjenje vodne celice. Gladina vode v vodohranu le rahlo niha. Za zagotavljanje teh pogojev skrbi prečrpališče Avguštine, ki se vklopi ob zniževanju gladine vode v vodohranu.



Slika 73: VH Jablance



Slika 74: Vtočna in iztočna cev s talnim izpustom

- **Vodohran (VH) Orehovec - stari**

Vodohran Orehovec (stari) leži na 287 m nadmorske višine. AB objekt je postavljen nad isto imenskim naseljem. Njegov volumen pokriva porabo spodaj ležečih vasi, Orehovec in Grič, cevovod pa je dalje povezan na vodooskrbno cev na Grajski cesti. Oskrba poteka po principu gravitacijske oskrbe. Glede na sam volumen vodne celice in velikost objekta je eden manjših na obravnavanem omrežju. Objekt je z zgornje strani zasipan z zemljino in poraščen s travno rušo. Zračenje objekta je urejeno s stranskimi zračniki, ki so vgrajeni v steno objekta. Manjši predprostor s podestom, vodi do stene vodne celice. Pod vhodnim podestom je vidna dovodna cev, preko katere se polni vodohran, s pomočjo PČR Orehovec. Cev se priključi v vodno celico na višini 2,35 m. Gladina vode se regulira s plovcem, ki ob minimalni določeni gladini vključi PČR Orehovec, ob maksimalni predpostavljene koti vode v vodni celici pa jo izključi. S tem je zagotovljena stalna in zadostna količina vode za potrebe odjemalcev.



Slika 75: VH Orehovec – stari



Slika 76: Vodna celica

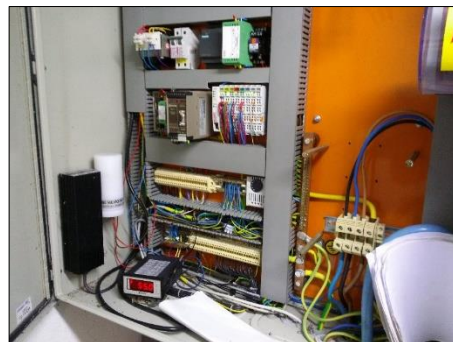
- **VH Orehovec - kamnolom**

Drugi vodohran v Orehovcu je poleg vrtine - kamnolom, saj sta ograjena z isto mrežno ogrado, ki preprečuje nezaželen vstop. Objekt je AB izvedbe in stoji na cca 230 m nadmorske višine. Vodna celica je razdeljena v dva dela, z 20 cm AB pregradnim zidom. V vsak prekat je speljana načrpana voda iz obeh vrtin v Orehovcu, Kamnolom in Travniki. Vodohran je varovan tudi s prelivno cevjo večjega premera, za zagotavljanje primera večjih gladin vode in preprečevanje prelivanja sten vodohrana in poplavljanje elektro opreme. Voda v vodohranu se odjema preko dveh mrežastih košar, ki sta vgrajeni za primer, če črpalka v vrtini poseša vodo pomešano s peskom. Načrpana voda v vodni celici le redko doseže višjo gladino kot 40 cm. Eden izmed razlogov je majhna izdatnost obeh vodnih virov, druga pa precej velik volumen vodnih celic, ki znaša 120 m<sup>3</sup>. Vsa načrpana voda gre dalje proti PČR Jama in dalje na VH Bajin Vrh po principu gravitacijskega toka.





Slika 77: Košara za odvzem vode in prelivni profil cevi



Slika 78: Frekvenčni regulator

Del elektro opreme je tudi omarica s frekvenčnim regulatorjem. Z njim se regulira delovanje črpalke v vrtini in prepreči, da bi črpalka prehitro počrpala vodo iz vrtine. S tem mehanizmom se regulira črpalka glede na izdatnost vodnega vira. Omarica z vso potrebno opremo je prikazana na spodnji sliki.

#### 3.4.1.4 Vodovodne cevi

Podsistem Kostanjevica in Orehovec sestavlja poleg zgoraj naštetih objektov na sistemu še 67 606 m vodovodnih cevi. Ob prevzemu s strani predhodnega upravljalca sistema in do danes, je sedanjí upravljalca družba Kostak d.d., odkrila več različnih materialov cevi, ki so položene na obravnavanem območju. Najde se tudi še nekaj salonitnih cevi, ki pa jih z vsakoletnimi investicijami v infrastrukturo ali rednimi vzdrževalnimi deli zamenjajo s sodobnejšimi, obstojnejšimi in okolju prijaznejšimi materiali. Do razlike v dolžini cevi, podanih zgoraj in v tabeli, gre na račun starosti podatkov in izgradnje nekaj dodatnih kilometrov cevovodov v preteklem obdobju s pomočjo skupnega projekta Hidravlične izboljšave vodovodnega sistema na območju Posavja, v katerega so se povezale tri posavske občine.

Tabela 7: Podatki o dolžinah vodovodnega omrežja in materialu [37]

Javni vodovod		Kostanjevica na Krki
Zap.številk	Material	Dolžina cevovoda [m]
1	JE - jeklo	320
2	LŽ - lito železo	7730
3	NL - nodularna litina	0
4	PE - polietilen	51437
5	S - Salonit	1223
6	TE - tesal	0
7	Ostali materiali	0

#### 3.4.1.5 Armaturni elementi

Poleg zasunov, ki so montirani na objektih v sistemu, številnih jaških z različnimi ventili, ter številnih hišnih priključkih, armaturo sestavlja še 73 hidrantov (nadzemnih in podzemnih). Ker gre za relativno obsežen sistem, sistem vsebuje tudi zračnike in blatnike, ki s svojo funkcijo

omogočajo nemoteno delovanje. Z zračniki se zmanjšuje število okvar na sistemu, saj namestitve teh elementov na določenih točkah v sistemu odpravi pojav zračnih žepkov v cevi, ki nastanejo zaradi različnih podtlakov. Blatniki služijo za primer čiščenja cevovoda in odstranitev nezaželenih delcev iz sistema.

### 3.4.2 Poškodbe cevovoda na obravnavanem vodovodnem sistemu

Zaradi starosti vodovodnega sistema in dotrajanosti cevi so potrebne redne investicije v obnovo dotrajanih elementov in stroški popravila okvar na sistemu krijejo sproti. Zamenjavo črpalk, različnih tipov ventilov ali redna vzdrževalna dela na vodohranih se lahko predvidi in načrtuje kot del investicijskih naložb za prihajajoče leto. Odkrivanje nastalih okvar na cevovodu je potrebno sanirati v najkrajšem možnem času in predstavljajo delež predpostavljenih letnih stroškov, njihov obseg pa je nemogoče napovedati. Preventivni ukrep za zmanjšanje okvar je zamenjava dotrajanih odsekov cevovoda. V spodnji tabeli je prikazano število okvar v preteklih letih, potrebno število delovnih ur za njihovo odpravo, strošek nabave novih materialov, stroški prevoza opreme za izkop in sam izkop jarka.

Tabela 8: Pregled okvar po letih na obravnavanem sistemu [37]

Leto	Število okvar	Število ur	Material [EUR]	Ostali stroški [EUR]
2009	96	580	4779	5866
2010	144	952	5481	10292
2011	140	862	5011	9082
2012	126	662	3527	6381
2013	90	492	3258	5735
2014	84	553	4504	7282

### 3.4.3 Poraba vode na obravnavanem sistemu

Podatke o porabi vode na obravnavanem območju lahko pridobimo na več načinov. Številni pravilniki obravnavajo, kolikšne količine vode se približno porabijo za določeno dejavnost (gospodinjstva, industrija, ipd.) v enem dnevu. V tem poglavju se opiramo konkretno na primer vodovodnega omrežja Kostanjevica na Krki.

Povprečna letna poraba v zadnjih 3 letih je znašala cca 105 000 m<sup>3</sup>/leto. Nihanje porabe vode je odvisno od velikosti in tipa naselja, števila vikendov na območju, obsega industrije in večjih kmetij, ki porabijo večje količine vode. Sistem mora biti zasnovan in zmožen sprotnih prilagajanj spremembam nihanja porabe vode. Povprečna dnevna poraba za obravnavano območje, za dobo zadnjih treh let, znaša 144 l/oseb/dan. Ob preračunu vrednosti letnih količin lahko oblikujemo tudi porabo glede na posamezno odjemno mesto ali kraj natančno. Skupna poraba na vseh odjemnih mestih znaša 3,5 l/s.

Nihanje dnevne porabe je po pričakovanjih različno za različna časovna obdobja v tednu in dnevu. Enako velja za količine porabljene vode, ki se bolj zmerno porabljajo skozi celoten dan, v času prostih dni. Z ustrežno opremo na samem vodohranu se lahko beležijo nihanje gladine

vode v krajšim časovnih intervalih in s tem vrši stalen nadzor nad dogajanjem v sistemu. Obstaja tudi možnost oddaljenega dostopa do teh podatkov. S tem dobimo jasnejši pregled nad samim obratovanjem in tudi vpogled v obnašanje sistema v vsakem časovnem trenutku.

## 4 Obdelava pridobljenih podatkov, vzpostavitev hidravličnega modela in priprava aktivnosti za pridobitev potrebnih podatkov

V tem poglavju so opisani postopki obdelave pridobljenih podatkov za potrebe vzpostavitve hidravličnega modela. Po ustrezni obdelavi, so bili ti s pomočjo različnih programskih orodij zbrani in uporabljeni v hidravličnem modelu. Opis uporabljenih metod in orodij je bil podan v poglavju 2. V zadnjem delu so rezultati hidravličnega modela analizirani in prikazani s pomočjo grafikonov in tabel. Sledi jim še oblikovanje različnih aktivnosti s katerimi bi pridobili ustrezne podatke za oblikovanje natančnejšega hidravličnega modela. Del tega zajema tudi vzpostavitev merilnih območij, ki zajemajo določitev merilnih mest na vodovodnem sistemu in izbiro ustrezne merilne opreme, s pomočjo katerih bi se lažje določila območja večjih vodnih izgub na obravnavanem vodovodnem sistemu.

### 4.1 Obdelava podatkov za potrebe hidravličnega modela

Podatki, prejeti s strani upravljalca vodovodnega sistema in podatki, pridobljeni s pomočjo lastnih meritev, zahtevajo določeno stopnjo obdelave in analiziranja. Preoblikovati jih je potrebno do te mere, da so primerni za uporabo v hidravličnem modelu. Posamezne podatkovne bloke sem razdelal v več odsekih. V spodnjih poglavjih so zajeti načini in opisani pristopi, s katerimi sem obdelal pridobljene podatke v ustrezno obliko in s pomočjo katerih se lahko izdelal hidravlični model.

#### **Porabe vode na obravnavanem vodovodnem sistemu**

Podatke o porabljenih količinah načrpane pitne vode na obravnavanem območju sem pridobil s strani upravljalca vodovodnega sistema. Podani so bili za 3-letno časovno obdobje. Ker so bili podani na letni osnovi, je bilo potrebno te vrednosti pretvoriti v ustrezno enoto, ki za hidravlični model predstavlja vrednosti v l/s. Te vrednosti predstavljajo srednjo dnevno porabo.

Podatki o porabi vode, kot je razvidno iz slike spodaj, so vezani na posamezno hišno številko odjemalca. Posebnost, s katero sem se srečal pri atributih hišnih števil, so manjkajoče oziroma ničelne vrednosti v teh podatkih, ki so predstavljale objekte na tem območju, ki nimajo hišnih števil. Najpogosteje se ti manjkajoči podatki pojavljajo pri objektih kot so zidanice in počitniški objekti. Ti ležijo le na določenih, predvsem vinogradniško in počitniško usmerjenih lokacijah. Porabo teh objektov znotraj posameznega naselja sem seštel in enakomerno porazdelil na poznane porabnike znotraj tega naselja. Porazdeljene vrednosti porabe so bile nizke, zato predpostavljam, da nimajo bistvenega vpliva na kasnejši hidravlični račun.

Tabela 9: Tabela porabe na posameznem odjemnem mestu

NASLOV	HS	HD	PORABA [m <sup>3</sup> /leto]	PORABA [l/S]
--------	----	----	----------------------------------	-----------------

ČREŠNJEVEC PRI OŠTRCU	7		58.7	0.00186
ČREŠNJEVEC PRI OŠTRCU	9		126.0	0.003995
ČREŠNJEVEC PRI OŠTRCU	9	A	92.7	0.002938
ČRNEČA VAS	10		78.1	0.002475
ČRNEČA VAS	11		90.7	0.002877

Tudi za večstanovanjske objekte na obravnavanem območju, ki so združeni pod skupno hišno številko, je bila pripadajoča poraba vode za tak objekt seštet. V atributni tabeli sem s pomočjo ustreznih funkcij ločil ime naselja (ali ulice) in hišno številko, saj sem lahko le tako kasneje povezal tabelo porabe vode posameznega odjemnega mesta s slojem hišnih števil v GIS okolju. Ta povezava se ustvari preko atributov, ki morajo biti v obeh tabelah označeni z istim imenom oziroma identifikatorjem (ID).

### Cevovod

Tabela z različnimi atributnimi podatki o ceveh (.dbf) je bila pridobljena s strani upravljalca vodovodnega sistema, prav tako topologija v obliki grafičnega (.shp) sloja. Vsaka cev v sistemu je enolično označena, v atributnem delu pa definirana z več različnimi podatki. Ti zajemajo poleg oznake cevi, tudi premer in material cevi, hrapavost ostenja ter začetno in končno točko cevi. Dolžina cevi je definirana preko poteka trase cevovoda, ki se nahaja med dvema vozliščema (tj. začetnim in končnim vozliščem tega linijskega elementa). S spodnji tabeli je prikazan del atributov in njihovih vrednosti, za posamezne cevi na območju obravnavanega vodovodnega sistema.

**Tabela 10: Del tabele atributov cevi obravnavanega vodovodnega sistema**

ID	Node1	Node2	Length	Diam	Rough	Mloss	Status
8	284	285	13.77125	25	0.005	1.5	
9	286	287	93.14803	25	0.005	1.5	
10	766	767	2.680357	25	0.005	1.5	
11	771	772	44.58789	25	0.005	1.5	
13	773	775	34.61073	25	0.005	1.5	
14	770	769	6.544916	25	0.005	1.5	
15	739	740	3.502483	25	0.005	1.5	
23	852	853	52.54253	20	0.005	1.5	
24	857	859	9.292577	25	0.005	1.5	
25	856	858	22.04171	25	0.005	1.5	
26	860	957	12.92717	25	0.005	1.5	
27	855	866	79.4968	32	0.005	1.5	

Topologijo vodovodnega sistema je bilo po prvem pregledu potrebno dopolniti. S poznavanjem razmer in ob pomoči upravljalca omrežja sem preveril in ponovno definiriral posamezna nejasna mesta stikanj cevi med seboj ali z ostalimi elementi (tj. objekti in napravami) vodovodnega sistema. V tem koraku sem tudi izvedel spajanje cevi istih premerov, v primeru da na tem stiku ni bilo kakšnega drugega elementa ali vozlišča s tretjo cevjo. Stike sem urejal s pomočjo nabora ukazov, s katerimi se lahko spremenijo, dodajo ali izbrišejo posamezni elementi (ang.

Features) vodovodnega sistema. S pomočjo teh, so bili izvedeni tudi določeni »lomi« cevi. Ti so se izvedli na mestih stikanj dveh cevi različnih premerov, na mestu priključka sekundarne cevi na glavno cev ali ob vstavljanju ostalih elementov vodovodnega sistema na cev. Cevem je bilo potrebno po vseh uvedenih spremembah pripisati ustrezne atributne podatke, saj morajo biti vsi elementi na vodovodnem sistemu enolično označeni. Spremembe zajemajo spremembo poimenovanja in dolžine cevi, ter začetnega in končnega vozlišča. Ustrezen nabor ukazov in orodij nudi možnost, da zgolj s klikom posodobimo celoten stolpec v atributni tabeli, na primer dolžino cevi. To se opravi s pomočjo funkcije »field calculator« in njene operacije »length«, ki ob zagonu posodobi dolžine obstoječih cevi. Z zgoraj omenjenimi posegi v topologijo cevovoda, sem dosegel primerljivost shematične (GIS) zasnove z dejanskim stanjem obravnavanega vodovodnega sistema.

Podatki o topologiji vodovodnega sistema so vsebovali tudi primere napačno spojenih cevi ali pa vrisane cevi niso več v uporabi. Pojavilo se je tudi območje, s precej strnjeno poselitvijo, ki ni bilo pokrito s cevovodom. Tako sem s pomočjo upravljalca, ki najbolje pozna obravnavani vodovodni sistem, vrisal dodatne cevi na Gorjupovi in Hmeljski cesti. Pripisal sem jim tudi ustrezne atributne podatke, ki jih zahteva hidravlični model (oznaka in premer cevi, dolžina, ipd.). Na območju večjega števila zidanic in vikendov, kjer poraba vode ni bila vezana na poznano hišno številko, sem posamezne priključke odjemalcev in cevi manjših premerov ( $\phi_{\text{cev}} < 50 \text{ mm}$ ) odstranil, saj bi voda v teh ceveh zgolj zastajala, z odstranitvijo cevi pa bistveno ne vpliva na sam hidravlični izračun.

Hrapavost cevi, ki je obvezni podatek za hidravlični preračun, je odvisna predvsem od materiala in starosti cevi. Koeficient absolutne hrapavosti je bil uporabljen v povezavi z Darcy-Weissbachovim modelom računa linijskih izgub, s pomočjo katerega se izračuna koeficient trenja in posledično linijske izgube v cevovodu. [7] Vrednosti koeficientov absolutne hrapavosti so bili podani za cevi treh različnih materialov, njihova vrednosti pa so rahlo prilagojene, glede na vrednosti novih cevi iz enakih materialov. Vrednosti posameznih koeficientov so prikazane v spodnji tabeli.

**Tabela 11: Koeficient hrapavosti za različne materiale cevi [42]**

Material	Kratica za material	Absolutna hrapavost
Polietilenska cev	PE	0.005
Duktilno lizoželezna cev	DLTZ	0.2
Azbestno cementna cev	Salonit	0.5

### **Vozlišča**

Vozlišča v hidravličnem modelu predstavljajo točkovne elemente vodovodnega sistema. Vsako vozlišče nosi enolično oznako in je ustvarjeno na stikih dveh cevi različnih premerov ali na stiku več cevi (odseku). Prav tako se uporabijo za definiranje začetne in končne točke vseh linijskih elementov. V spodnji tabeli sta prikazana potrebna atributna podatka, s pomočjo katerih se definira vozlišče v hidravličnem modelu. Prvi stolpec v tabeli predstavlja enolično oznako vozlišča, drugi pa njegovo višinsko koto na terenu.

Tabela 12: Del tabele vozlišč obravnavanega vodovodnega sistema

ID	Elevation
1	151.644
4	151.1
5	151.41
6	151.525
7	151.725
8	151.396
9	150.962
10	151.364
11	151.364

Za oblikovanje hidravličnega modela je bilo potrebno posameznim vozliščem na vodovodnem sistemu pripisati višinsko vrednost terena oziroma na kateri nadmorski višini vozlišče leži. Te sem pridobil s strani Geodetskega uprave Republike Slovenije, v obliki karte DMV 50. Pridobljeni podatki DMV 50 so bili zapisani v tekstovni datoteki (.txt) in so predstavljali mrežo višinskih točk obravnavanega območja. Te so bile po celotnem območju razporejene v rastru 50 x 50 m. Ker vozliščne točke vodovodnega sistema ležijo tudi med temi višinsko poznanimi točkami, je bilo potrebno med temi točkami opraviti postopek interpolacije. S pomočjo tega sem lahko določil višinsko vrednost poljubne točke na tem območju. Orodje »point sampling tool« v programu QGIS omogoča, da sem vozliščnim točkam in ostalim točkovnim elementom vodovodnega sistema, pripisal atribut njihove višinske vrednosti. S poznavanjem te lastnosti posameznega točkovnega elementa, se v hidravličnem modelu lahko preliminarno oceni zahtevana črpalna višina, določa razlike v tlakih med dvema opazovanima točkama in mogoče že predčasno predvidi določen ukrep, za zmanjševanje tlakov na vodovodnem sistemu.

Naslednji atribut, ki se je vezal na vozlišče vodovodnega sistema, je bila poraba vode s strani različnih odjemalcev. Posamezna vrednost porabe vode je bila vezana na posamezno hišno številko. Upravljalca vodovodnega sistema ne hrani v svoji bazi podatkov geodetskega sloja odjemnih mest, zato je bilo potrebno porabnika vezati na vodovodno cev na drugačen način. V začetku so se izrisala vozlišča, na že prej omenjenih točkah, in določila vplivna območja posameznega vozlišča. Ta območja so se določila s pomočjo funkcije Voronoi-jevih diagramov, ki so se izrisali okoli posameznih vozlišč. Ti se izrišejo okoli vsakega vozlišča na sistemu in razdelijo celotno obravnavano območje na številne poligone, ki se med sabo stikajo. Posamezno mesto porabe lahko leži zgolj znotraj enega izmed poligonov. Voronoi-jevi diagrami nam povedo, koliko odjemnih mest leži znotraj vplivnega območja posameznega vozlišča. V postopku oblikovanja Voronoi-jevih diagramov je potrebno posebno pozornost nameniti tudi temu, da posamezno odjemno mesto ne bi bilo priključeno na napačno cev. V nasprotnem primeru, bi lahko primer prevezave večjega porabnika na napačno cev, vplival na rezultate hidravličnega modela.

Za izračun porabe vode v območju posameznega poligona je bilo potrebno vrednosti posameznih porab sešteti. Ta korak je mogoče opraviti s pomočjo funkcije »join attributes by location«, s katero se lahko vrednosti znotraj posameznega Voronoi-jevega diagrama seštejejo, povprečijo ali pa se poišče najmanjša/največja podana vrednost, izmed vrednosti znotraj Voronoi-jevega diagrama. Za moj primer so bile vrednosti seštete in vezane na najbližje

vozlišče na cevi. V hidravličnem modelu je ta povezava narejena med slojem vozlišč in podatkovno datoteko porabe, katerima skupni atribut so enolično označena vozlišča.

## 4.2 Hidravlični model

Hidravlični modeli vodovodnega sistema povzemajo dejansko stanje vodovodnega sistema. Izdela se z namenom analize obstoječega stanja vodovodnega sistema ali preverbe, kako bi novi elementi vodovodnega sistema (npr. vodni vir, cevovodi ali objekti) vplivali na hidravlične razmere na sistemu.

### 4.2.1 Elementi hidravličnega modela

Hidravlični model je tako kot vodovodni sistem, zgrajen iz več posameznih elementov. Ti elementi se v osnovi delijo v dva razreda, to so točkovni in linijski elementi, in so bili predstavljeni v poglavju 2 in bodo v nadaljevanju na kratko povzeti.

#### A. Točkovni elementi

Točkovni elementi v hidravličnem modelu vodovodnega sistema predstavljajo vozlišča, vodohrane in vodne vire. Vsak izmed njih je enolično označen, a za vsakim izmed elementov se skriva povsem različna podatkovna tabela, v kateri so definirani zahtevani atributi.

##### • **Vodni vir**

Vodni vir v hidravličnem modelu predstavlja neomejene količine vode, ki jih lahko ta dovaja v vodovodni sistem. V hidravličnem modelu je predstavljen s točkovnim elementom, z enolično oznako in atributom višine gladine vode. Višina v tem primeru ne predstavlja enakega atributa, kot v primeru vozliščnih točk. V primeru vodnega vira predstavlja zahtevana višina gladino vode v vodnem viru, za katero sem predpostavil, da se bistveno ne spreminja, saj natančnega podatka ni bilo na voljo. Podatki v tabeli 13 so podrobneje opisani v poglavju 3.4.1.1.

Tabela 13: Vodni viri na obravnavanem območju

ID	Head
VirTravnik	65
VirKamnolom	65
VirJama	100

##### • **Vodohran**

Vodohran predstavlja točkovni element hidravličnega modela. Enolično označene elemente sestavlja več različnih atributov, s katerimi se opiše stanje gladine v vodohranu (poglavje 3.4.1.3). Prvi izmed zahtevanih atributov je višinska kota, s katero se označi najnižja točka objekta. Ta lahko predstavlja dno vodne celice oziroma višino iztočne cevi iz vodohrana. Začetna gladina (ang. Initial level) predstavlja višino vode v vodni celici ob zagonu računa. Vrednost te, je nekje med minimalno in maksimalno gladino vode v vodni celici. Za obravnavani primer je bila določena pomočjo poznane višinske kote stropne plošče vodohrana (vrhnja plošča objekta) in s pomočjo lastnih meritev objektov na sistemu. Te sem odštel od podane višinske kote. Minimalna gladina vode predstavlja minimalno dovoljeno višino vode v vodni



celici. Ta se navadno meri na koti iztočnega profila. Njeno nasprotje je dovoljena maksimalna višina, ki je v mojem primeru nekaj centimetrov nižja od varnostnega preliva. Na obravnavanem vodovodnem sistemu so poznana nihanja vodne gladine zgolj za vodohrana Bajin Vrh in Avguštine, katerih podatke se beleži s pomočjo SCADA podatkov. Gladine v vseh preostalih objektih so bile določene zgolj z opazovanjem, lastnimi meritvami in izkustvenimi podatki upravljalca.

Eden izmed zahtevanih atributnih podatkov je tudi premer vodohrana oziroma premer vodne celice. V hidravličnem modelu so predpostavljene vodne celice krožne oblike, zato sem za obravnavani primer pretvoril oglate vodne celice v celice krožnih oblik. Račun premera je bil izveden preko ohranjanja volumna in poznavanja najvišje gladine vode v vodni celici, kar omogoča določitev tlorisnega prečnega prereza vodohrana. V spodnji tabeli so zbrani vsi potrebni atributni podatki vodohranov na obravnavanem območju s pripadajočimi vrednostmi. Te vrednosti so predstavljale del začetnih vhodnih podatkov hidravličnega modela.

**Tabela 14: Atributna tabela vodohranov na obravnavanem območju**

<b>ID</b>	<b>Elevation</b> [m]	<b>IniLevel</b> [m]	<b>MinLevel</b> [m]	<b>MaxLevel</b> [m]	<b>Diameter</b> [m]	<b>MinVol</b>
Kamolom	227.85	0.47	0.4	0.5	8.74	0
Orehovec	283.35	2.25	2.15	2.35	5.7	0
BajinVrh	200.85	2.13	2	2.2	11.3	0
Avgustine	332.85	1.6	1.4	6.7	11.4	0
CrnecaVas	421.05	1.92	1.8	2	4.4	0
Jablance	368.75	3.14	3	3.2	4.8	0

## **B. Linijski elementi vodovodnega sistema**

V hidravličnem modelu se pod linijske elemente uvrščajo cevi, črpalke in ventili. Vsi naštetih elementi so definirani z dvema vozliščema (tj. začetnimi in končnim) in podatkovno tabelo, v kateri so zbrani kompleksnejši atributni podatki.

V podatkovnih tabelah so zbrani:

- podatki o črpalnih krivuljah vseh črpalk v sistemu,
- pravila, ki definirajo vklop/izklop posamezne črpalke na sistemu,
- podatki o statusu posameznih cevi (če je mogoče katera izmed cevi zaprta)

### **• Cevi**

Cevi so v hidravličnem modelu definirane s pomočjo atributnih lastnosti cevi in dveh točk, ki definirata začetno in končno vozlišče cevi (poglavje 4.1). Za obravnavani primer, je bilo na določene cevi potrebno dodati kontrolne protipovratne ventile (ang. Control valve). Ti so bili namenjeni usmeritvi toka v cevi oziroma so nameščeni z namenom, da preprečijo povratni tok v cevi. Te namestimo na cevi v območju vodnih virov, črpalk in določenih mest na sistemu. Za ta mesta smo prepričani, da je na tej cevi tok mogoče zgolj v eni smeri ali pa želimo preprečiti povratne tokove vode v cevi v zgodnejših fazah hidravličnega modeliranja. S tem si lahko kljub pomanjkanju ostalih podatkov, zagotovimo določeno stopnjo gotovosti o smeri toka vode na določenem območju.

## • Črpalka

Na obravnavanem primeru vodovodnega sistema, črpalke (poglavje 2.6) delujejo z namenom premagovanja višinskih razlik od nižje ležečih vodnih virov do vodohranov ali med posameznima vodohranoma. Da se doseže obratovalne razmere na vodovodnem sistemu, je potrebno v vodovodni sistem vgraditi črpalke ustreznih zmogljivosti. Te so v hidravličnem modelu predstavljene s podatkovno tabelo, v kateri je definirana črpalna krivulja. Podani so tudi pogoji, s katerimi se dodatno določi obratovalne pogoje (vklop/izklop) posamezne črpalke. V hidravličnem modelu je črpalna predstavljena z enolično označenim linijskim elementom, ki ga definirata dve vozlišči.

Če je črpalna potopljena v vrtini, od koder se črpa voda za oskrbo, je potrebno pažljivo položiti predvsem na njeno globino. Le redko kateri vodni vir je zadosti izdaten, da lahko vzdržuje konstantno vodno gladino in vodna gladina v njem ne niha. Zato je potrebno potopno črpalno v vrtini namestiti nekaj metrov nižje od vodne gladine v vrtini. Ta razlika je odvisna predvsem od meritev in opazovanj nihanja vodne gladine v vrtini, pred namestitvijo potopne črpalke.

V hidravličnem modelu se potopno črpalno modelira s pomočjo dveh točk, ki sta obe pod gladino vode na vodnem viru. Povezavo z vozliščem na terenu predstavlja vertikalna cev. Črpalna, ki prečrpa vodo iz nižje na višje ležečo točko, je modelirana z dvema točkama, obema na isti terenski koti. Karakteristiko posamezne črpalke predstavlja Q-H krivulja, s katero je določeno območje delovanja črpalke. Podatke o črpalnih krivuljah sem pridobil s strani slovenskih zastopnikov podjetij Lowara in Grundfos. V hidravličnem modelu je črpalna krivulja posamezne črpalke sistema definirana v podatkovni datoteki in je preko ustreznih atributov povezana z ustreznim linijskim elementom. Vsi atributni podatki, s pomočjo katerih se definirajo črpalke v hidravličnem modelu, so v tabeli spodaj. Tu je poleg enoličnih oznak (ID), definiranih obeh vozlišč, podana tudi Q-H krivulja za vsako črpalno posebej. V spodnji tabeli so prikazane enolično označene črpalke obravnavanega vodovodnega sistema. Podana so tudi začetna in končna vozlišča, ki definirata smer črpanja vode. Podano je tudi enolično poimenovanje črpalne krivulje posamezne črpalke, s katero so preko istega atributa povezane s podatkovno tabelo črpalnih krivulj.

Tabela 15: Črpalke na obravnavanem vodovodnem sistemu

ID	Node1	Node2	Value	Notes
PumpKamnolom	143	140	HEAD PumpKamnolom	
PumpJama	166	Jama	HEAD PumpJama	
PumpTravnik	197	213	HEAD PumpTravnik	
PCROrehovec	213	114	HEAD PumpPCROrehovec	
PCRJama	179	196	HEAD PumpPCRJama	
PCRAvgustine	292	291	HEAD PumpPCRAvgustine	

## • Ventili

Za obravnavani primer, so bili v hidravličnem modelu uporabljeni CV (ang. contole valve) tipi ventilov, katere sem namestil na cev, takoj za črpalno. Njihova vgradnja na cev preprečuje povratne tokove skozi črpalno in s tem prepreči poškodbe črpal in zagotavlja, da voda v cevi teče le v predpostavljene smeri. V hidravličnem modelu se definirajo v atributni tabeli

posamezne cevi, kjer nam okence ponudi možnost, da se definira stanje cevi. Lahko je zaprta, odprta ali z ventilom.

#### 4.2.2 Vzpostavitev hidravličnega modela

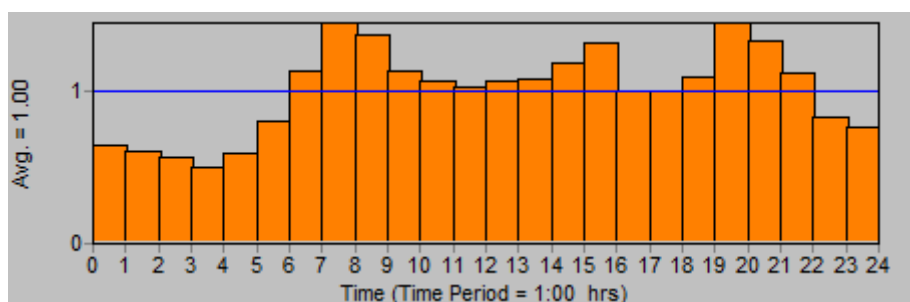
Hidravlična simulacije se izvaja z namenom razumevanja delovanja vodovodnega sistema ali za implementacijo novo dimenzioniranih ali že obstoječih objektov vodovodnega sistema, pri čemer se preverja njihov vpliv na hidravlične razmere v vodovodnem sistemu.

Z simulacijo se lahko hitro preveri kritične situacije ali pojave, ki lahko nastanejo v obdobju obratovanja in se tako že vnaprej predvidi določene ukrepe, da se te situacije v času obratovanja vodovodnega sistema ne pojavijo. QGIS (poglavje 2.8.1) služi kot grafični uporabniški vmesnik, ki se lahko uporablja za uvoz, urejanje ali izvoz podatkov hidravličnih elementov. Po fazi priprave podatkov do oblike, da so le ti primerni za vnos v hidravlični model, je potrebno te podatke ustrezno strukturirati. Zbrani podatki se v osnovi razdelijo v 3 skupine. Prvo sestavljajo vsi točkovni elementi vodovodnega sistema, kamor se uvrščajo vozlišča, vodohrani in vodni viri. Druga skupina sestoji iz linijskih elementov, kot so črpalke in ventili. Zadnjo skupino pa predstavljajo podatkovne tabele, z različnimi krivuljami, porabo na obravnavanem območju, obratovalnimi pogoji, ipd.

Pred zagonom hidravlične simulacije s programom EPANET 2.0, je potrebno med obema programskima okoljema ustvariti ustrezno povezavo, ki bo računskemu programu ustrezno posredovala strukturirane podatke. Vmesnik se imenuje »qgis epanet« (poglavje 2.8.2) in ga lahko najdemo pod naborom številnih vtičnikov programa QGIS. Ta omogoča povezavo do simulacije računa vodovodnih sistemov preko odprtokodne povezave z EPANET okoljem. Vtičnik ob zagonu oblikuje EPANET vhodno datoteko, požene račun v EPANET-u in generira rezultate računa.

#### 4.2.3 Rezultati hidravličnega modela

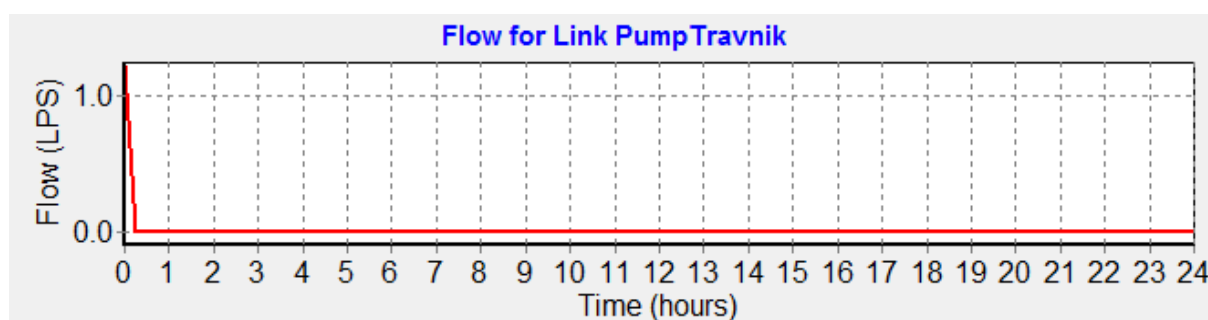
Srednja poraba predstavlja povprečno vrednost nihanja porabe vode skozi dan. Na spodnji sliki, je v obliki grafa, prikazano nihanje porabe vode na obravnavanem območju v časovnem koraku 1 ure. V hidravličnem modelu se spodnji graf izriše s pomočjo tabele, ki se jo vstavi v okence »Vzorca« (ang. Pattern). Posamezna vrednost oziroma velikost stolpca je predstavljena z multiplikatorjem. Ta predstavlja obseg porabe vode v posameznem časovnem koraku in se določeni preko poznavanja dejanske porabe vode skozi dan.



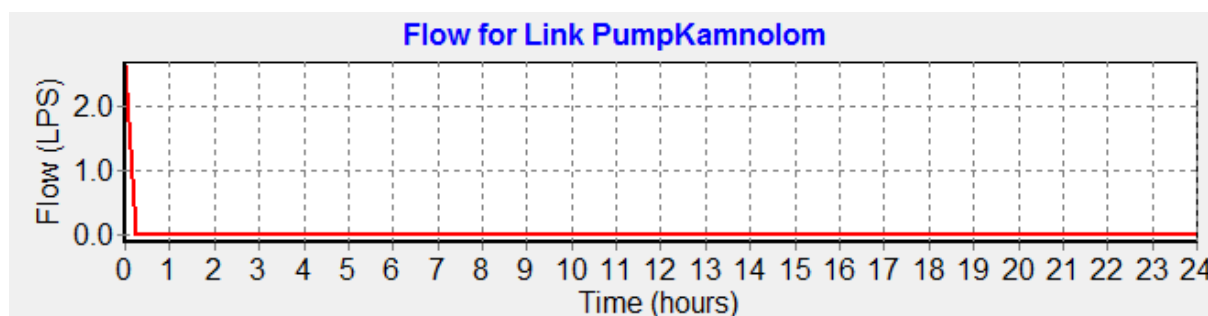
Slika 79: Vzorec porabe na obravnavanem območju

Modra linija na zgornji sliki predstavlja povprečno vrednost multiplikatorjev vseh 24 časovnih korakov in zagotavlja, da so bili posamezni multiplikatorji ustrezno izračunani. V primeru odstopanja od te vrednosti, je potrebno ponovno preveriti vnesene podatke, saj bi lahko drugače že v začetku oblikovanja hidravličnega modela naredili napako, ki vpliva tako na rezultate kot tudi na delovanje hidravličnega modela. Srednja vrednost porabe je za obravnavano območje najatančneje določena od 16 do 18 ure.

Analizo vodovodnega sistema sem pričel na območju vodnih virov v Orehovcu. Tu se nahajata vodna vira Travnik in Kamnolom, katerih izdatnost je 1,23 l/s oziroma 2,66 l/s. Obe vrednosti sta nekoliko višji od izmerjenih podatkov Kostaka, vendar lahko del te razlike pripišemo starosti črpalk in posledično slabši učinkovitosti delovanja. Iz teh dveh vrtin se s pomočjo črpalk vodo črpa v vodohran Kamnolom. Delovanje posamezne črpalke je razvidno iz spodnjih grafov, kjer sta obe črpalke ob začetku hidravlične simulacije vključeni in polnita vodohran Kamnolom. Po določenem času se ti črpalke izklopita in se za čas trajanja časovne simulacije ne vklopita več.

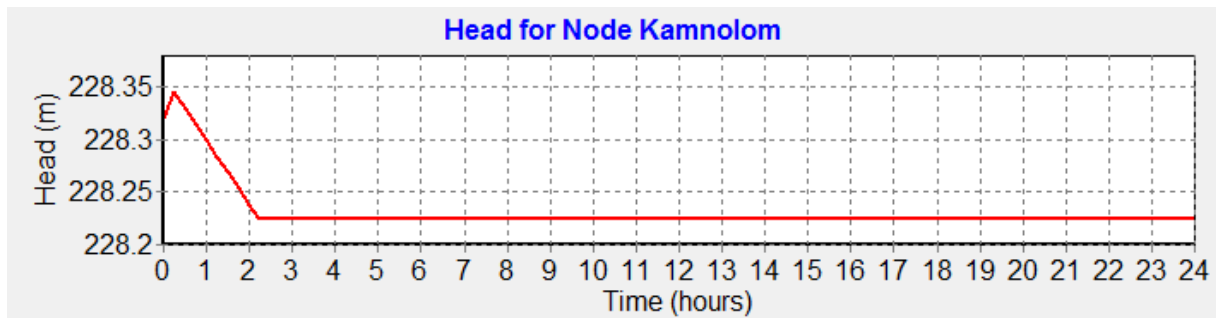


Slika 80: Pretok na črpalci Travnik



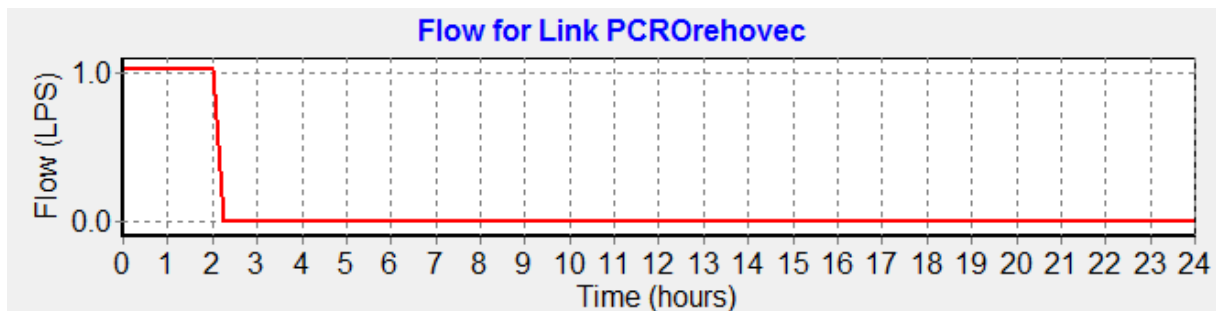
Slika 81: Pretok na črpalci Kamnolom

V vodohranu Kamnolom, ki leži na 227,85 m nadmorske višine se zbira voda iz obeh vodnih virov v Orehovcu. Nihanje gladine je minimalno, zgolj 40 cm. V prve pol ure se vodohran napolni, potem pa glede na porabo počasi prazni do minimalne gladine, s katero je pogojen ponoven vklop črpalke. V določenem časovnem trenutku se vanj steka 2,87 l/s vode. V časovni simulaciji hidravličnega modela je bilo to razvidno že v prvi uri časovnega koraka simulacije, kjer se vidi tudi ujemanje krivulje delovanja črpalk in posledično polnjenje vodohrana. Na spodnji sliki je polnjenje oziroma praznjenje vodne celice vodohrana prikazano v obliki grafa. Rast črte, ki predstavlja gladino vode v vodohranu, pomeni polnjenje vodohrana, njen padec pa praznjenje.



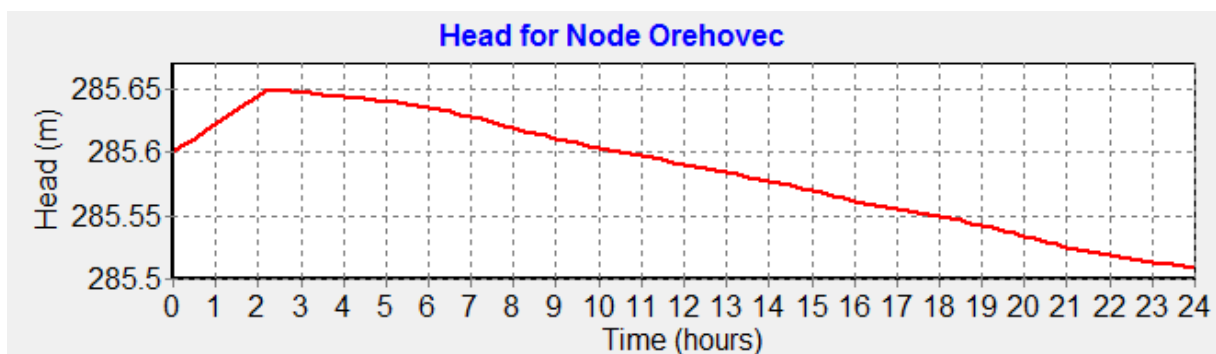
Slika 82: Nihanje gladine vode v vodohranu Kamnolom

Od tu glavni vod vodo gravitacijsko odvaja proti Jami, vendar se na tej razdalji, odcepita dve cevi. Prva pelje vodo v smeri Grajske ceste in zagotavlja sklenjen krog oskrbe in možnost kritja obdobj, ko se poraba na te območju poveča. Vozlišče 139 se preko cevi veže na prečrpališče Orehovec, ki polni vodohran Orehovec, preko katerega se oskrbujejo nižje ležeči prebivalci istoimenskega naselja. Na prečrpališču je v času obratovanja črpalke pretok 1,02 l/s v smeri vodohrana Orehovec. Ta deluje v prvih dveh urah časovne simulacije, ko napolni vodohran do njegove maksimalne kote. Na cev 673, ki leži za črpalko, je nameščen tudi kontrolni ventil, ki preprečuje povratni tok v smeri črpalke. Zagotavlja dodatno varnost pred poškodbami črpalke in poskrbi, da voda iz vodohrana teče po ustrezni cevi do porabnikov.



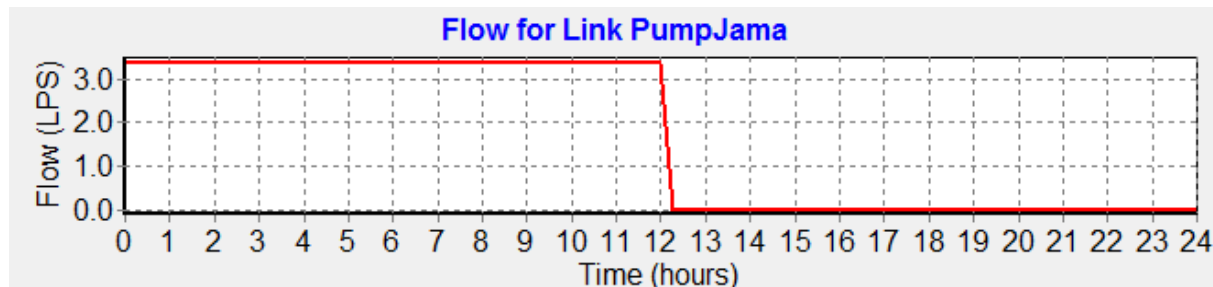
Slika 83: Pretok na prečrpališču Orehovec

Na območju Orehovca je skupna poraba vseh odjemnih mest ocenjena na 0,25 l/s, zato se vodohran polni z razliko v pretoku na črpalki in porabo območja. Vodna gladina v vodohranu raste skladno z delovanjem črpalke, ko ta polni vodohran. V času polnjenja, se porabnike hkrati tudi oskrbuje in zagotavlja ustrezen tlak v ceveh.



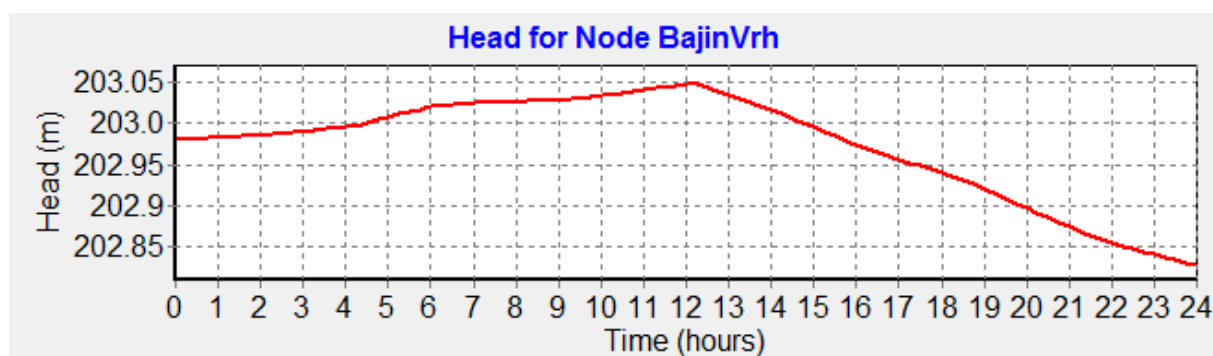
Slika 84: Nihanje gladine vode v vodohranu Orehovec

Cev 790 se iz smeri Orehovca, v vozlišču Jama, priključi na stičišče treh cevi. Ena izmed teh pride iz smeri vodnega vira Jama, ki s svojo izdatnostjo 3,37 l/s in nekaj dodatnimi količinami vode iz Orehovca zagotavlja zadostne količine vode za kritje porabe, ki se oskrbuje iz vodohranov Avguštin in Bajin vrh.



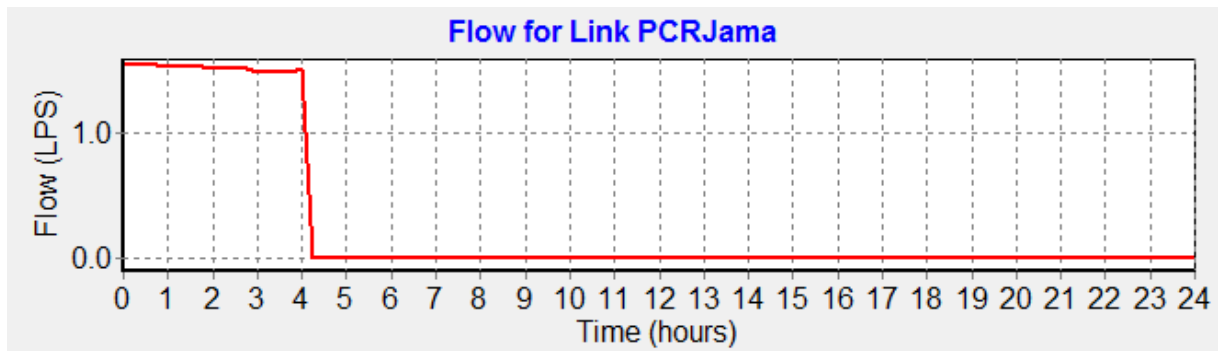
Slika 85: Pretok na črpališču Jama

Cev 790 in cev iz meri vira Jama, se iz vozlišča Jama, združita v enotno cev, ki se po nekaj metrih razcepi. Prva vodi v smeri Bajinega vrha, kjer se s pretokom 1,71 l/s polni vodohran. Vodohran Bajin vrh se lahko polni s pomočjo gravitacijskega toka vode v cevi, saj leži vodohran v Orehovcu 27 m višje od vodohrana na Bajinem vrhu. V primeru izklopa črpalke pri Jami in povečane porabe na Grajski cesti, se aktivira povratni tok po cevi, v smeri Orehovca, kjer je bila že predstavljena krožna zasnova sistema in njen namen in delovanje. Vodohran na Bajinem vrhu se za čas delovanja črpalke polni, kar glede na rezultate simulacije pomeni, da se polni nekje do 12 ure. Od tu dalje služi zgolj kritju porabe na večjem delu obravnavanega območja.



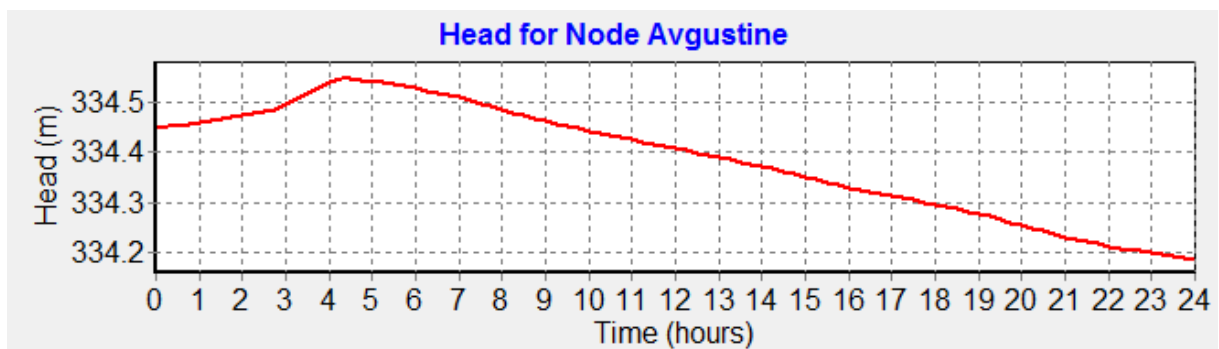
Slika 86: Nihanje gladine vode v vodohranu Bajin vrh

V razcepu cevi pri Jami, se druga odcepi v smeri Avguštin. Tu je tudi nameščena črpalka, s pomočjo katere, se doda potrebno energijo, da se voda prečrpa do vodohrana Avguštin, na 232 m nadmorsko višino 232m. Pretok v cevi za črpalko je v hidravličnem računu bil ocenjen na 1,54 l/s. Na isti cevi je tudi nameščen ventil, ki prepreči povratni tok vode, ko se črpalka v prečrpališču Jama ustavi.



Slika 87: Pretok na prečrpališču Jama

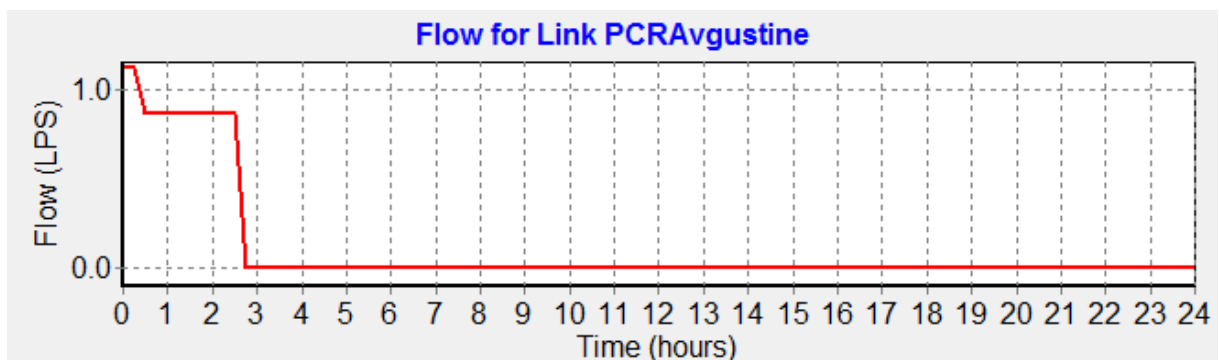
Prečrpališče deluje dobre 4 ure, napolni vodohran Avguštine in medtem še oskrbi odjemna mesta na poti. Tako so odjemna mesta v delu Globočic, Jablanc, Dolšč in Oštrca izpostavljena povečanih tlakom. Ta problem so rešili z namestitvijo reducirnih tlačnih ventilov, ki se jih namesti pred uporabniki ali na začetku odcepa cevi iz glavnega voda.



Slika 88: Nihanje gladine vode v vodohranu Avguštine

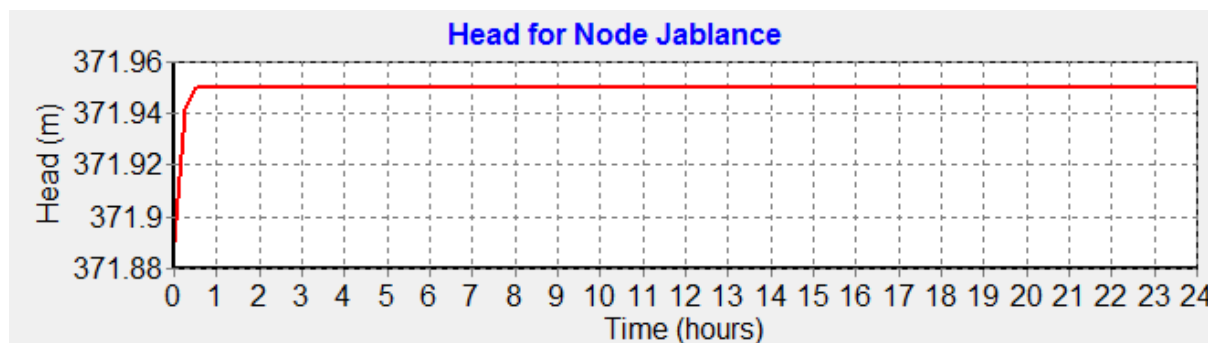
Pretok v cevi tik pred vodohranom znaša 1,23 l/s. Nastala razlika med pretokom za črpalke in pretokom na tem mestu pa predstavlja porabo območja na razdalji od prečrpališča do vodohrana. Na tem vodu obstaja tudi možnost povratnega toka vode, v primeru, ko prečrpališče ne deluje.

Za vodohranov leži prečrpališče Avguštine, ki je priključeno na cev za vodohranom. Na cevi pred prečrpališčem Avguštine znaša 1,12 l/s. Preko prečrpališča Avguštine se voda črpa do vozlišča, kjer se cev razcepi v smeri vodohrana Črneča vas in vodohrana Jablance.



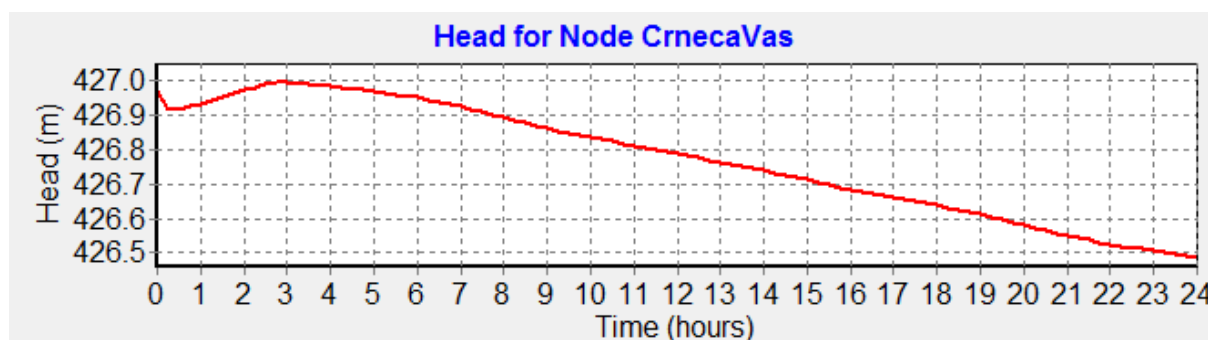
Slika 89: Pretok na prečrpališču Avguštine

Ta v prve pol ure svojega delovanja pokrije potrebe vodohrana Jablance, do 3 ure pa napolni tudi vodohran nad Črnečo vasjo.



Slika 90: Nihanje gladine vode v vodohranu Jablance

Vodohran Jablance gravitacijsko oskrbuje manjše število odjemnih mest, vsa ležijo nižje od samega objekta oziroma od minimalne gladine vode v njem. Ta se polni tudi preko preko vodohrana iz Črneče vasi, ko voda iz tega objekta teče nazaj proti naselju Črneča vas. Zato gladina vode v vodohranu Jablance ohranja svojo maksimalno višino gladine. Medtem se vodohran v Črneči vasi polni do 3 ure zjutraj. Z nadmorsko višino 425 m, je vodohran v Črneči vasi tudi najvišje ležeči objekt na vodovodnem sistemu. Začetna gladina v hidravličnem modelu je na 1,95 m, maksimalna gladina pa je predpostavljena na 2 m.



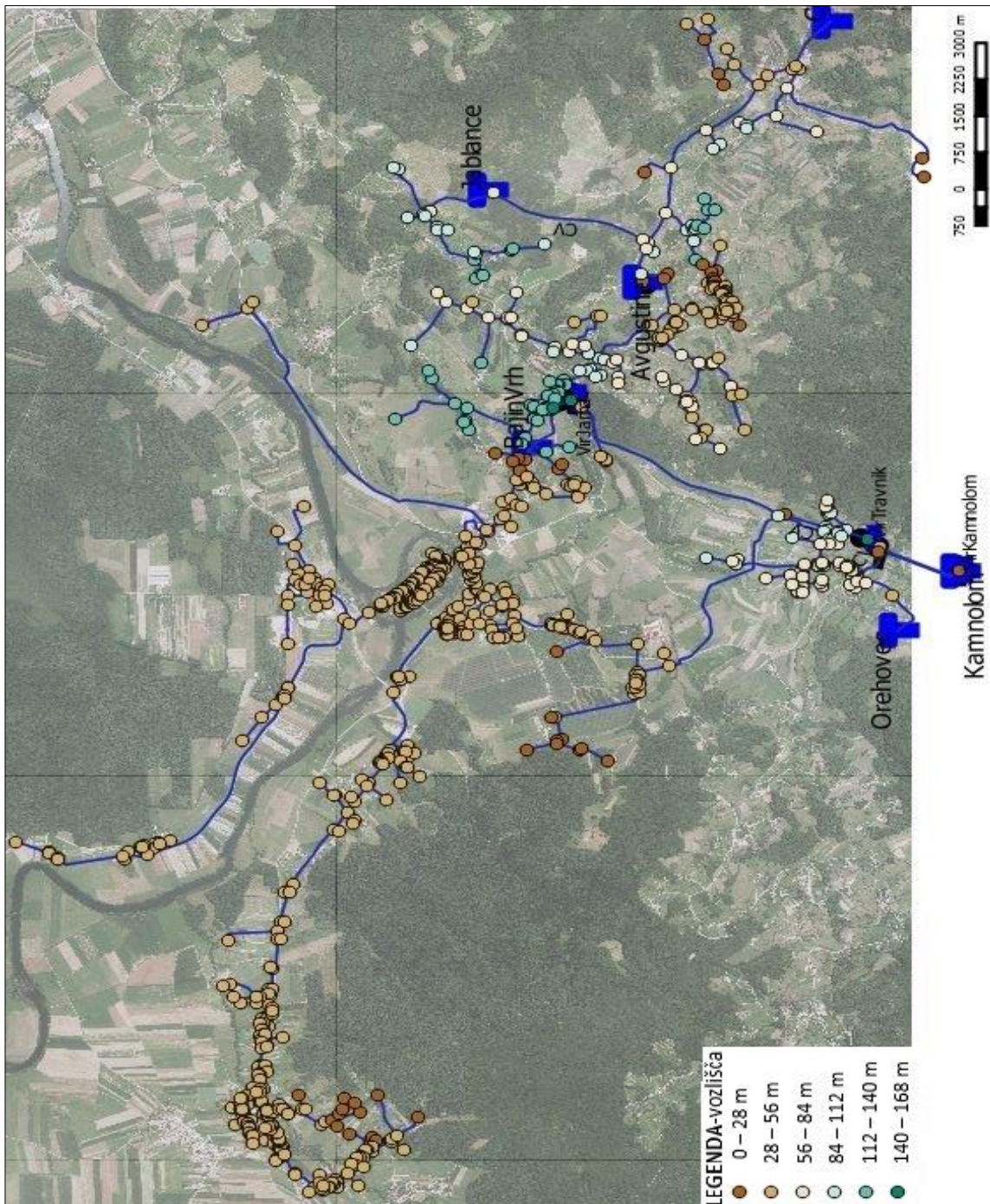
Slika 91: Nihanje gladine vode v vodohranu Črneča vas

QGIS predstavlja odličen grafični vmesnik, za prikaz rezultatov hidravličnega izračuna. Omogoča slikovit prikaz različnih vrednosti tlakov, pretokov v ceveh ali porabe v omrežju s pomočjo barve sheme. Ta se oblikuje na osnovi atributne tabele in se s pomočjo klasifikacije razdeli v poljubno število razredov, ki se potem v grafičnem sloju poljubno obarvajo. Tako lahko z določitvijo mej med posameznimi vrednostmi na karti hitro lociramo območja, v katerih se na primer pojavijo presežki tlakov ali prenizke hitrosti vode v cevi.

Tlaki v posameznem vozlišču vodovodnega sistema so odvisni od hidravličnih razmer v cevi in same lokacije na sistemu. Tako imajo vozlišča, ki se nahajajo za črpalkami višje vrednosti od tistih bolj oddaljenih. Tlačne vrednosti so bile za dani primer izrisane za obdobje srednje vrednosti porabe, ki se za obravnavano območje definira v okolici 17 ure popoldan. Ob tem seveda velja, da se tlačne vrednosti v času hidravlične simulacije spreminjajo, a vedno ostajajo v sprejemljivih mejah.

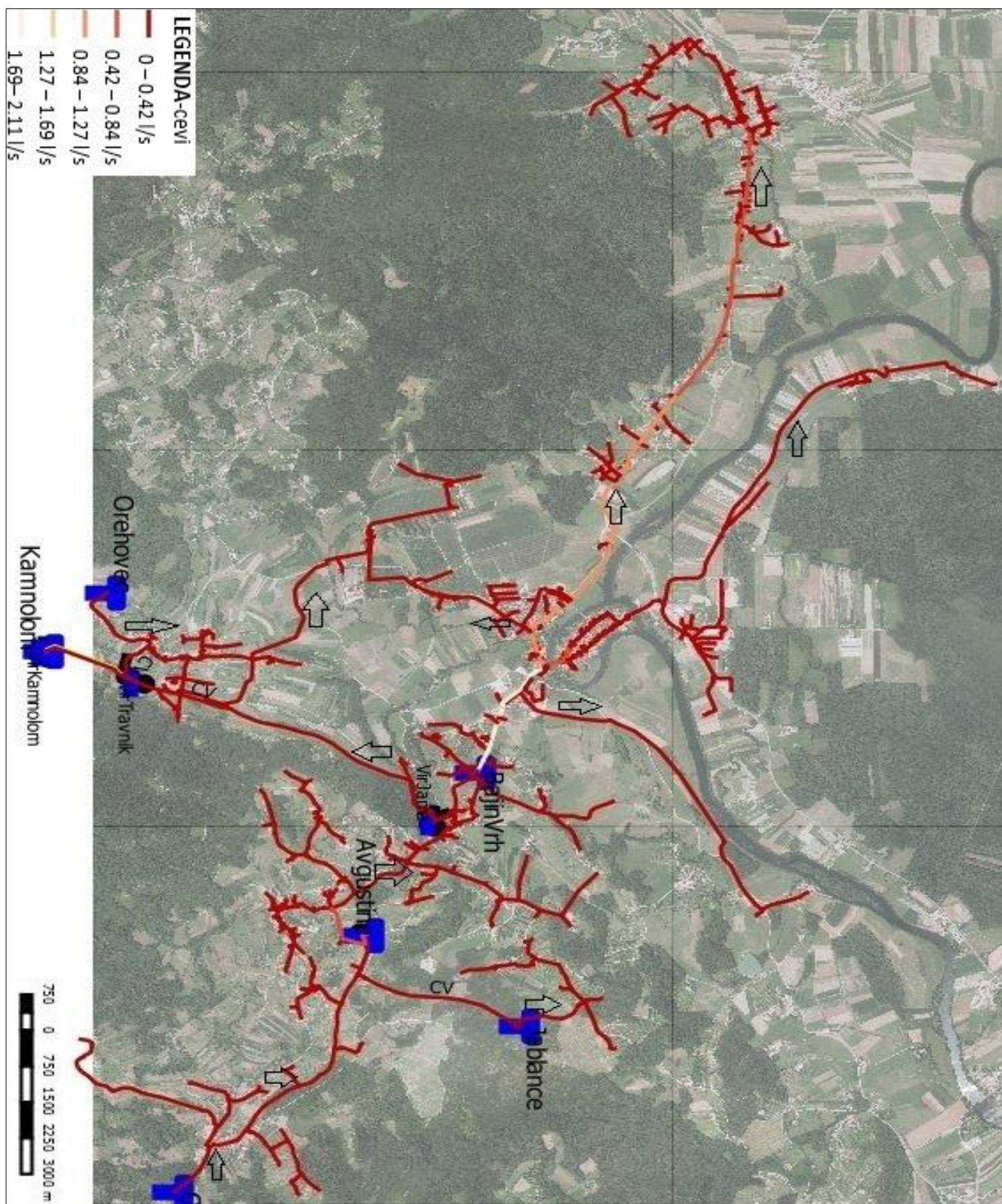


Vozlišča na območju Dolnje in Gornje Prekope, Dob in industrijske cone na Krški cesti so tako v območju sprejemljivih velikosti tlakov, do 5 barov. Vrednosti tlakov v posameznem vozlišču obravnavanega vodovodnega sistema so prikazana na sliki 92. Ta predstavlja situacijo celotnega območja, na katerem so vozlišča vodovodnega sistema obarvana s pomočjo šestih barv. Posamezna barva zajema določeno območje vrednosti tlakov, ki se pojavijo na tem območju. Tako temno rjava predstavlja točke tlakov do 2,8 bara, medtem ko so s tremi odtenki zelene označena vozlišča tlakov, večjih od 8 barov. Porabnikom na tem območju je potrebno kljub stanju na sistemu, zagotoviti ustrezen tlak, ki naj ne bi presegal 6 barov. Zato je potrebno na vse dovodne cevi v ta območja namestiti dodatne reducirne ventile, s katerimi se znižajo tlačne vrednosti na sprejemljivo raven. Območje povišanih tlakov po vozliščih je predvsem na območju od prečrpališča Jama do vodohrana Avguštine, tlak pa je potrebno reducirati tudi pri nižje ležečih odjemnih mestih v Orehovcu in delu Globočic. Najvišje vrednosti tlakov, označene s temno zeleno barvo, so v vozliščih, ki ležijo tik za črpalkami, katere dodajajo v sistem večje količine energije in zato ustvarjajo v teh vozliščih tudi posebno visoke tlačne razmere.



Slika 92: Tlačne vrednosti v posameznem vozišču ob srednji dnevni porabi





### Slika 93: Pretoki po posameznih ceveh ob srednji dnevni porabi

Pretoki v posamezni cevi na obravnavanem vodovodnem sistemu so izpisani za časovno območje srednje vrednosti porabe, ki se nahaja okoli 17 ure popoldan. Pretočne razmere so s pomočjo časovne simulacije poznane za obdobje 24 ur in se v tem času spreminjajo. Tako se lahko v nekem trenutku vodohran po cevi polni, že v drugem pa se ob zaustavitvi črpalke prazni po isti cevi in dovaja vodo do posameznega odjemnega mesta. Na sliki 93 so izrisane vse cevi na obravnavanem vodovodnem sistemu. Pretoki po posameznih ceveh so klasificirani v 5 razredov, s pomočjo katerih sem prikazal posamezne vrednosti pretokov v ceveh. Z rdečo so označena mesta najnižjih pretokov na sistemu. Nekatero izmed njih predstavljajo cevi do manjših porabnikov. Obstaja tudi nekaj primerov, kjer so vrednosti pretokov v posamezni cevi 0. Razlog za to je se lahko išče v priklopih novih odjemnih mest, ali pa so ta odjemna mesta vezana na porabnike na območju, kjer je poraba nepoznana. Tu se obračam predvsem na območje z večjim številom vinogradov in vikendov, za katere še niso jasno določene posamezne vrednosti porabe. Največji pretok pa se doseže v cevi, ki vodi iz vodohrana Bajin vrh. Na sliki 93 so označeni tudi smeti toka vode ob srednji porabi. Posamezna puščica nakazuje, v katero smer teče voda v cevi na izbranem odseku v izbranem časovnem koraku.

Tekom izdelave hidravličnega modela in kasnejše odprave napak pri hidravličnem računu sem se vse bolj zavedal pomena kakovostnih podatkov, na katere bi se lahko zanesel in kateri bi predstavljali zdrave temelje hidravličnega modela. V določenih primerih, kot so pretoki na določenem območju, so bili ti zgolj izkustveno ocenjeni s strani upravljalca. Te podatke bi lahko s sistematičnim pristopom, nekaj finančnih sredstev in z izbiro ustrezne merilne opreme zagotovili na precej natančnejši ravni, na katero se bi lahko v času oblikovanja hidravličnega modela tudi opri. V ta namen, sem v nadaljevanju pripravil oziroma pregledal določene aktivnosti, katere bi lahko bile v pomoč pri izdelavi hidravličnega modela.

## 4.3 Potrebne aktivnosti za podporo hidravličnemu modeliranju

Zaradi maloštevilnih podatkov lastnih posameznih elementov vodovodnega sistema, podatkov o načinu obratovanja in spremljanju vodovodnega sistema preko meritev, s katerimi bi lahko oblikoval ustrezen hidravlični model, sem se v nadaljevanju naloge osredotočil na to, katere podatke bi potreboval za oblikovanje ustreznega hidravličnega modela in na kakšen način bi jih lahko pridobil. V pomoč pri tem, mi je bilo poznavanje stanja vodovodnega sistema in s kakšnimi težavami se upravljalec vodovodnega sistema srečuje. Aktivnosti, s katerimi bi se lahko zmanjšalo število okvar in posledično tudi obseg vodnih izgub na obravnavanem vodovodnem sistemu, sem zbral v prihajajočih poglavjih.

### A. Aktivnosti za izboljšanje podatkovne baze vodovodnega sistema

Bistven pogoj za oblikovanju ustrezne podatkovne baze je dobro poznavanje same topologije vodovodnega sistema, lokacij posameznih elementov na sistemu in natančno poznavanje njihovih karakteristik. Ker sem se sam srečal s pomanjkanjem posameznih podatkov, bi te pomanjkljivosti poskusil odpraviti na naslednji način:

1. Dopolnitev topologije (.shp) cevovoda  
Z natančno definiranimi legami cevi na terenu, njihovimi dolžinami in lokacijami stikanj cevi med sabo, se lahko zagotovi boljša preglednost in tudi vpogled v dejansko stanje

vodovodnega sistema. Za obravnavani primer bi bilo potrebno vrisati manjkajoče cevi, urediti vse potrebne stike med cevmi in objekti na vodovodnem sistemu. Z enolično označenimi elementi bi dosegli željeno stopnjo urejenosti in preglednosti. Oblikovati bi bilo potrebno tudi enotno tabelo, v kateri se posamezni elementi ne bi podvajali (npr. poimenovanje cevi) in bi bili primerni za nadaljnje obdelave zbranih podatkov. Hkrati mora preglednica ustrezati tudi zahtevam Gospodarske javne infrastrukture (krajše GJI), kjer je predpisana zahtevana oblika podatkov.

2. Oblikovanje grafičnega sloja (.shp) odjemnih mest

Za potrebe oblikovanja hidravličnega modela je potrebno poznavanje mest odjema in z njim povezane porabe na posameznem odjemnem mestu. Z grafičnim slojem bi bila odjemna mesta ustrezno razporejena po terenu in označena na ustreznih lokacijah. Z enolično označevanjem bi jih tudi lažje povezali s porabo na posameznem odjemnem mestu. V praksi se izvaja tudi možnost elektronskega popisa odjemnih mest, kjer se odčitki beležijo v bazi podatkov, ob bok ustreznemu odjemnemu mestu. Tako bi tvorili celovito tabelo porabe, vezano glede na lokacijo posameznega merilnega mesta. Ker gre za točkovni element v hidravličnem modelu, bi mu bilo potrebno določiti tudi ustrezno višinsko koto, za potrebe kasnejšega hidravličnega računa.

3. Oblikovanje topologije in določitev natančnih lokacij črpališč

Poznavanje natančne lokacije črpalk na sistemu in njihove vloge v delovanju vodovodnega sistema je ključnega pomena. Črpalke so lahko nameščene v objektih ali potopljene v vrtinah. Za slednje je predvsem pomembno poznavanje globine v vrtini. Poleg same lokacijske informacije je potrebno tudi imeti natančen pregled nad vsemi črpalkami, ki so vgrajene na vodovodnem sistemu. Tu je poleg moči, števila vrtljajev, minimalnega in maksimalnega tlaka in zgradbe črpalke, je za hidravlični model ključnega pomena črpalna poznavanje Q-H krivulje posamezne črpalke. Ta nam pove, v kakem območju deluje črpalka in koliko energije lahko doda v sistem ob določenem pretoku skozi njo. Vse te lastnosti se lahko zberejo v tabeli, ki jo navadno poda tudi proizvajalec ob nakupu njihovega produkta.

4. Določitev gladine vode v vodnem viru

Voda se lahko v tleh zajema na številne načine. Bistveno pri tem je poznavanje tipa vodnega zajetja (vrtina, zajem izvira, odjemni stolpi, itd.) in zajem vodnega vira ter gladine vode. Gladina vode v viru se lahko spreminja glede na letni čas, nanjo vpliva količina padavin, ipd. Poznavanje nihanja gladine v vodnem viru je pomembno predvsem za primer, če je v njem potopljena črpalka. Zagotoviti je potrebno, da je ta na ustrezni globini in da je v vsakem trenutku gladina vode nad črpalko.

Če bi zaradi naraščajočih potreb po pitni vodi iskali nov vodni vir, je eden izmed faktorjev pri izbiri ustreznega dodatnega vira tudi izdatnost. Ta nam pove količino vode, ki jo lahko vir zagotovi ob priključitvi na vodovodni sistem. S pomočjo tega se lahko oceni ali so ponujene količine zadostne in/ali bo potrebno iskati še druge vire. Zato se v primeru, da z več vodovodnimi sistemi upravlja en upravljalec, da se ti povežejo med sabo. S tem se zagotovi pretok vode iz enega v drug vodovodni sistem in omogoči nadomestitev primanjkljaja vode na posameznem območju.

5. Določitev lokacij in lastnosti vodohranov

Vodohran je za oskrbo prebivalcev ključnega pomena, saj zagotavlja stalne tlake v cevi in s svojim volumnom krije dnevna nihanja v porabi. Zato je poleg natančne lokacije vodohrana na vodovodnem sistemu, pomembno tudi poznavanje dimenzij oziroma volumna vodne celice, višine vtočne in iztočne cevi ter nihanje gladine vode v vodni celici. Dimenzije vodohrana se najenostavneje pridobi z hranjenjem izmer iz časa projektiranja. Če te niso na voljo, če se vodovodni sistem prevzame od drugega upravljalca ali je vodovodni sistem starejši, obstaja možnost da ti podatki niso poznani. V tem primeru bi zahtevane dimenzije pridobili in izmerili v času, ko je vodna celica prazna in je moč vstopiti vanjo. Ta se navadno izprazni le za potrebe vzdrževalnih del ali po večjih nalivih, ko se preko načrpane vode slabše kakovosti usedajo tej delci prav v vodohranu, ko se hitrost vode bistveno zmanjša. Višina vtočne cevi v vodohranu je potrebno poznati zaradi samega hidravličnega računa, da se lahko natančno določi količina energije, ki je potrebna, da voda doteka v vodno celico. Iztočna cev je navadno nižje v vodni celici, tako da čim manj vode zastaja v vodohranu. Nižje od nje je le še talni izpust, skozi katerega se vodohran popolnoma izprazni in skozi katerega se sperejo ven usedli delci ob pranju vodne celice. Začetna gladina in nihanje vodne gladine v vodni celici je pomemben podatek, saj ta vpliva tudi na račun in dogajanje v hidravličnem modelu. Nihanje vode se najlažje kontrolira s plovcem ali izmeri preko meritev, ki jih lahko potem upravljalec zbira v enotni bazi podatkov in jih ažurno spremlja. Plovec, ki beleži nihanje gladine vode, je v več primerih tudi povezan z nižje ležečo črpalko in ji signalizira, kdaj se mora črpalka vklopiti in polniti vodohran. Izklopi se, ko plovec doseže njemu predpisano maksimalno gladine vode.

#### 6. Višinska karta obravnavanega območja

Za objekte na vodovodnem sistemu in vsa vozlišča, bi bilo potrebno določiti tudi višinsko lego posameznega elementa. Te se določijo s pomočjo digitalnega modela višin obravnavanega območja ali preko geodetskih meritev na terenu. Ker upravljalec vodovodnega sistema zaposluje lastno geodetsko službo, bi lahko ta sama opravila zahtevane meritve objektov, jaškov in ostalih vozlišč vodovodnega sistema. Definirana mora biti kota na objektu, na kateri se meritev opravlja.

S poznavanjem podatkov s terena, lahko tudi v hidravličnem modelu natančno opredelimo lego in višinsko koto posameznega elementa. Natančnost teh podatkov bistveno vpliva na delovanje hidravličnega modela in tudi samo natančnost rezultatov hidravličnega modela.

Vzdrževanje podatkovnih baz zahteva dobro komunikacijo med posameznimi enotami, s pomočjo katerih se vzdržuje in izboljšuje vodovodne sisteme. Upravljalec vodovodnega obravnavanega vodovodnega omrežja nudi ostale komunalne in gradbene storitve, zato je teh oddelkov, ki skrbijo za posamezno vejo, več. Ključnega pomena je definiranje sheme poročanja in zadolžitev posameznega oddelka ali osebe, da bdi nad opravljanjem določenega dela ali projekta. Ta bi nastale spremembe vpisovala in tako sprotno ažurirala bazo podatkov. Ključnega pomena je tudi sodelovanje s terensko ekipo. Ta bi s poznavanjem dejanskega stanja vodovodnega sistema in lokacijami sanacijskim mest lahko natančno označevala ta mesta na grafični podlogi (karti), preko katere bi lahko hitro zaznali trend pojava večjega števila okvar na določenem odseku, raziskali razloge za nastanek in pripravili sanacijski načrt za tak odsek.

### **B. Namestitev dodatne merilne opreme na objekte vodovodnega sistema**

Na obravnavanem sistemu se beležijo določeni pretoki na objektih, ki se vodijo v obliki popisa tedenskih količin pretokov na posameznem objektu. Vendar zaradi pomanjkanja zadostnega števila podatkov, kateri so potrebni za kvalitetno spremljanje in tudi kasnejše umerjanje hidravličnega modela vodovodnega sistema, sem pregledal obstoječe stanje in oblikoval predloge za namestitev dodatnih merilnikov pretoka.

Črpalke so na obravnavanem vodovodnem sistemu dobro pokrite z meritvami pretokov. Meritve se popišejo v tedenskem popisu pretokov vseh objektov na terenu. Merilnik pretoka je nameščen na iztočni cevi črpalke in meri količine vode preko posamezne črpalke. S pomočjo teh vrednosti se lahko vrši kontrola pretokov na posameznih elementih vodovodnega sistema. Ob odstopanju srednjih vrednosti pretokov, se začne iskati razloge za povečane pretoke in iskanje potencialnega mesta okvare. Večjo težavo pri meritvah pretokov predstavljajo vodohrani. Le za dva vodohrana na obravnavanem območju upravljalec beleži nihanje gladine vode v vodni celici. Meritve se beležijo v obliki SCADA podatkov, ki se odčitavajo na poljubno določen časovni interval. Nihanje vode v vodohranu se lahko spremlja v poljubnem časovnem trenutku, preko oddaljene baze, ki beleži opravljene meritve. Res je, da sta vodohran Bajin Vrh in Avguštine ena izmed večjih na vodovodnem sistemu, vendar bi za natančen hidravlični model potreboval tudi poznavanje nihanja gladin v ostalih vodohranih. Prav tako, bi bilo potrebno na vtočni in iztočni cevi pred in za posameznim objektom namestiti dodatne merilce pretoka. S pomočjo teh podatkov in ob poznavanju obratovalnih pogojev črpalke, bi lahko natančneje ocenili volumske spremembe vode v vodni celici vodohrana. S pomočjo tega pa bi lahko oblikovali natančen graf nihanja porabe vode v posameznem vodohranu skozi dan.

### **C. Določitev merilnih območij**

Za potrebe iskanja vodnih izgub, je potrebno vodovodni sistem razdeliti na ustrezno velika merilna območja (poglavje 2.10.1). Ta vsebujejo določeno število porabnikov, bistveno pa je dejstvo, da imajo ta območja zgolj en vtočni profil in da so vsi ostali dotoki v to območje zaprti z zapornimi ventili. Ob teh pogojih in pogojih nočnih pretokov, ko je poraba vode minimalna, se lahko opravijo meritve pretoka. Ob pojavu povečanih pretokov vode v to območje od običajnih, se predvideva možnost pojava vodnih izgub znotraj opazovanega merilnega območja vodovodnega sistema.

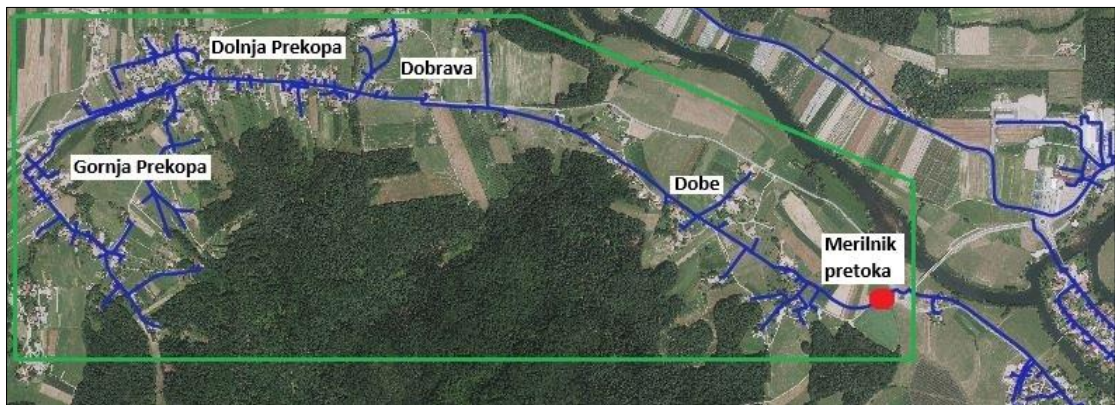
Celotno vodovodno omrežje sem za potrebe magistrske naloge razdelil na več območij, glede na že prej našteje pogoje. Za vsakega izmed njih so zapisane tudi aktivnosti, ki bi jih bilo potrebno izvesti in lokacija namestitve merilnika pretoka. Ob merilnikih pretokov bi bilo priporočljivo dodati tudi merilnike tlaka, ki se lahko namestijo na isto cev ali po možnosti še na dodatne točke na cevi znotraj merilnega območja. Ti bi omogočali še natančnejši vpogled v hidravlično dogajanje znotraj posameznega območja. Ti bi lahko služili tudi kot podatek za potrebe kasnejšega umerjanja hidravličnega modela in omogočali li enostavnejšo kontrolo tlakov znotraj merilnega območja.

Celotno območje obravnavanega vodovodnega sistema sem razdelil na naslednja merilna območja:



## 1. Območje

Obsega naselja Dobe, Dobrava ter Gornja in Dolnja Prekopa. Na tem območju je približno 130 odjemnih mest, s porabo 16 000 m<sup>3</sup>/leto. Med posameznimi vozlišči na območju 1 ni bistvenih višinskih razlik. Merilnik pretoka, ki je označen na sliki 80, bi se namestil na začetku cevi v jašku v bližini krožišča, ki je lociran na cesti s strani Kostanjevice. Merilnik pretoka je pomaknjen nekoliko višje od krožišča, saj se v prihodnje načrtuje priklop novo položene cevi preko mostu, ki bo zagotavljala povezavo med tema dvema vejama in nudila možnost krožne oskrbe v primeru izpada enega izmed odsekov cevi. Drugi vtoki vode v to območje niso možni, edini bi bil možen po cevi iz sosednje občine, ki pa je zaprta s fazonskim X kosom.



Slika 94: Merilno območje 1

## 2. Območje

Območje obsega naselje Malence, ki je redkeje poseljeno, obdano s številnimi obdelovalnimi površinami in ga sestavlja približno 18 odjemnih mest, s porabo 2750 m<sup>3</sup>/leto. Merilnik pretoka bi namestili na cev, ki se odcepi v smeri naselja tik za krožiščem. Vtoki vode po drugih ceveh v to območje niso mogoči.



Slika 95: Merilno območje 2

### 3. Območje

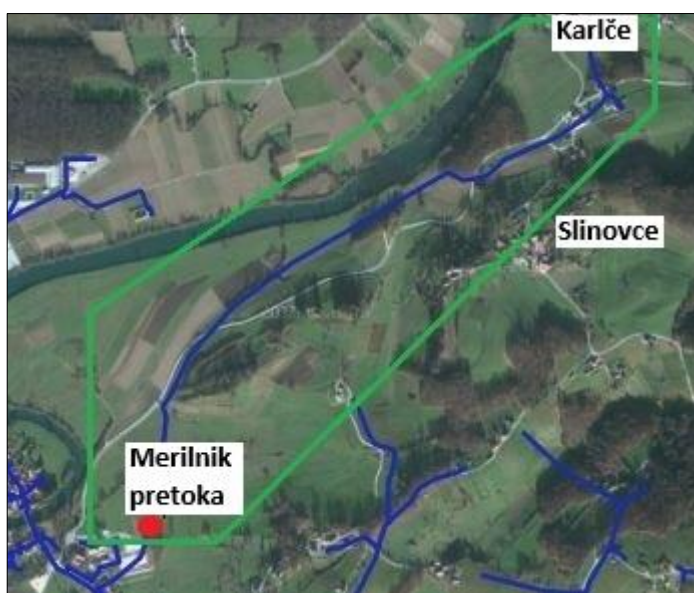
Dovodna cev za to območje se razcepi v istem vozlišču kot se je prejšnja cev v smeri Malenc. Merilnik pretoka bi namestili v jašek, na cevi v smeri industrijske cone oziroma v smeri Krške ceste. Merilno območje (Slika 82) obsega le nekaj manjše porabe hišnih odjemalcev, preostalo sestavlja industrijska cona, v kateri se nahajata dve večji podjetji. Vode iz vodovodnega sistema ne uporabljata neposredno v svojih procesih, vendar zgolj v sanitarne namene in za potrebe čiščenja. Na koncu odseka je vidna tudi čistilna naprava, za katero poraba v pridobljeni evidenci porabe vode na obravnavanem območju ni bila definirana. Letna poraba na tem območju je ocenjena na 5700 m<sup>3</sup>/leto.



Slika 96: Merilno območje 3

### 4. Območje

Območje se prične z odcepom cevi pri osnovni šoli in se nadaljuje proti Podbočju.



Slika 97: Merilno območje 4

Na začetek cevi bi se namestil merilnik pretoka, ki bi pokrival meritve pretoka na 2 km dolgem odseku, z relativno malo porabniki. Porabniki se nahajajo na območju naselij Karlč in Slinovc, s približno 15 odjemnimi mesti in porabo 2300 m<sup>3</sup>/leto. Pred je prišlo do odcepitve občine Kostanjevica od Krškega, se je po tej cevi oskrbovala tudi bližnja ribogojnica, ki je sedaj prevezana na vodovodni sistem sosednje občine, zato se je poraba vode na tem območju

bistveno zmanjšala. Velikost merilnega območja, mesto merilca pretoka in oznake naselij so razvidne iz spodnje slike.

## 5. Območje



Slika 98: Merilno območje 5

Otok sestavljajo Ulica talcev, Oražnova ulica in Kambičev trg z skupno 62 odjemnimi mesti in 13 750 m<sup>3</sup> letne porabe vode. Otok je gosto poseljeno območje, ki ga poleg številnih hiš, sestavljajo tudi večstanovanjske hiše, gostinski lokali in mesnica. Slednja je z 0,138 l/s tudi ena izmed večjih porabnikov na tem območju. Merilnik pretoka bi bil nameščen na cevi pred lesenim mostom, ki povezuje otok s cesto proti osnovni šoli. Oskrba preko te cevi zagotovi pitno vodo za prebivalce

celotnega otoka in tudi za območji 2 in 3. Kot je razvidno iz topologije cevovoda na spodnji sliki, bi bilo v primeru iskanja okvare na tem območju potrebno zapreti cev z zapornim ventilom na drugi strani otoka, kar pa pomeni prekinitev oskrbe najprej ležečih in prej opisanih območij 2 in 3. Tudi zaradi takih razlogov, bi bilo potrebno novo cev pod betonskim mostom priključiti na obstoječi vodovodni sistem in s tem zagotoviti nemoteno oskrbo preko cevi s strani Ljubljanske ceste.

## 6. Območje

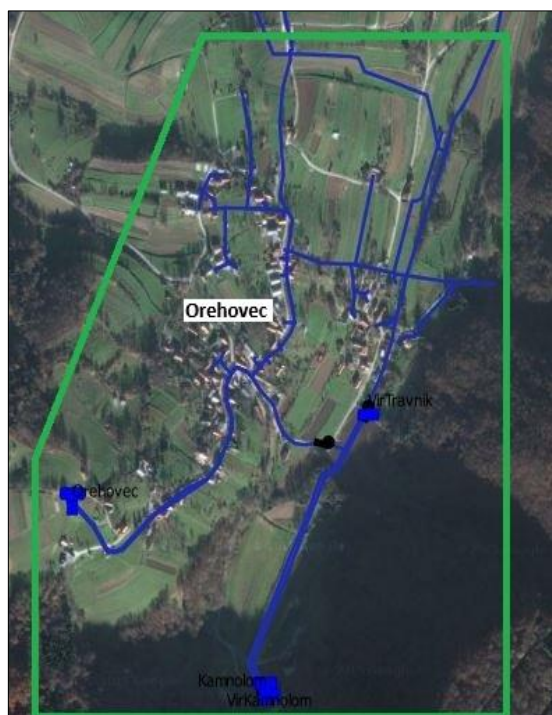
Območje obsega Hmeljsko, Resljevo, Grajsko ter Gorjupovo cesto. Vse ulice so med sabo strjene tesno skupaj in predstavljajo enostavnejšo komunalno ureditev, kot če bi bile raztresene daleč naokoli. Sestavlja jih 81 odjemnih mest s porabo 12 700 m<sup>3</sup>/leto. Merilnik pretoka, ki je označen na sliki 85, bi namestil na cevi takoj za križiščem, na začetku Gorjanske ceste. S tem bi pokrivali celotno ulično porabo in porabo nekaj hiš, ki si sledijo dalje po Grajski cesti do galerije Božidarja Jakca in dalje na Vodeniško cesto. V predstavitvi predloga upravljalcu, so izrazili željo po več merilnih inštrumentih na tem območju, ki bi razdelila posamezne ulice med sabo. S tem bi povečali

natančnost meritev in prihranili na časovnem trajanju terenskega dela, vendar to pomeni dodatne stroške z opremo, ki si jih lastnik vodovodnega sistema ne želi.



Slika 99: Merilno območje 6

## 7. Območje

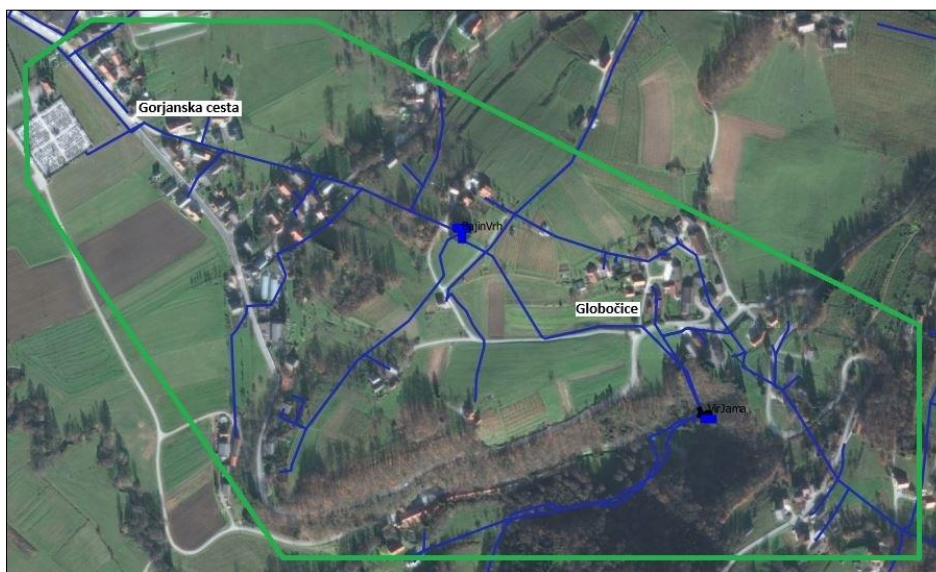


Slika 100: Merilno območje 7

V območju naselja Orehovec se nahajata dva vodna vira in dva vodohrana. Merilno območje na sliki 86, bi lahko delovalo v celoti kot samooskrbno. Ta del vodovodnega sistema ima tudi prečrpališče, ki dvigne vodo iz spodnjega vodohrana na koto 283 m, na kateri leži vodohran Orehovec. Od tu voda gravitacijsko odteka v spodaj ležeče istoimensko naselje. Na tem območju leži 67 registriranih odjemnih mest s porabo približno 8000 m<sup>3</sup>/leto. Na ceveh za obema črpalkama je tudi merilnik pretoka, tako da vtočne količine v vodohran Kamnolom poznane. V višje ležečem vodohranu Orehovec, bi bilo potrebno zagotoviti podatek o gladini vodne gladine in kako ta niha v času porabe.

## 8. Območje

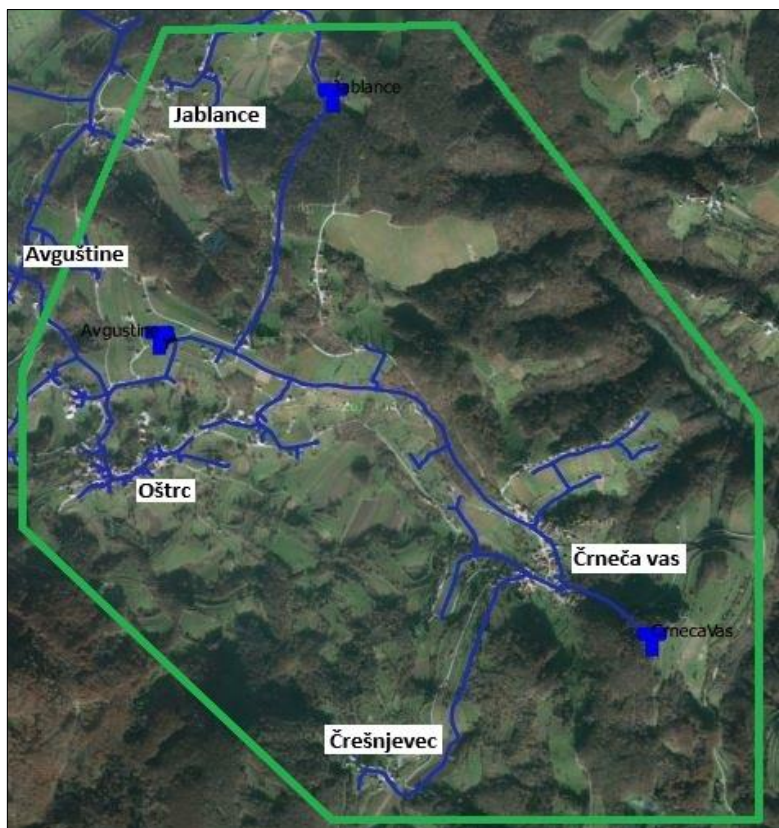
Območje sestavljata Gorjanska cesta in spodnji del vasi Globočice. Merilno območje je pokrito z enim vodnim virom in dvema črpalkama. Prva prečrpava vodo iz vrtine, druga pa dalje proti vodohranu Avguštine in Bajinemu Vrhu. Spodaj prikazano merilno območje 8 sestavlja 64 odjemnih mest z ocenjeno porabo vode 10 100 m<sup>3</sup>/leto. Uvedba dodatnih merilcev pretoka na tem območju ni nujna, saj so ti v veliki večini že nameščeni na ceveh za črpalke in na iztoku iz vodohrana Bajin Vrh. Dodatna namestitvev merilnika pretoka bi bila lahko na ceveh, ki se razcepita nekaj 10 m od združenja cevi iz Jame in iz smeri Orehovca. Meritve na teh ceveh bi služile kot pokazatelj, koliko načrpane vode se prečrpa po vsaki izmed cevi.



Slika 101: Merilno območje 8

## 9. Območje

Območje obsega naselja Jablance, Dolšce, Oštrc, Črnečo vas in Črešnjevce. Na tem območju stoji večje število zidanic in vikendov, ki so raztresene po pobočjih omenjenih vasi. Območje sestavlja približno 240 merilnih mest z ocenjeno porabo 41 100 m<sup>3</sup>/leto. Območje sestavljajo 3 vodohrani in ena črpalka (PČR Avguštine), ki služi kot prečrpališče v višje ležeča vodohrana Črneča vas in Jablance. Na tem območju bi bilo potrebno dodatno pozornost nameniti meritvam gladine v vodohranoma Črneča vas in Jablance, za katera ta podatek ni poznan. Potrebna bi bila tudi namestitvev dodatnih merilnikov pretoka na iztočnih ceveh iz vodohranov. S spodnje slike območja je razvidno, da gre za relativno veliko območje, na katerem bi bilo potrebno identificirati tudi vsa odjemna mesta zidanic in vikendov. Ocenjuje se, da je na tem območju večja možnost pojava t.i. »črnih« priključkov, s tem pa upravljalec vodovodnega sistema izgublja načrpane količine vode. Zato bi bilo potrebno na tem območju natančno opredeliti odjemna mesta in preveriti priključke posameznih počitniških objektov in zidanic na obravnavani vodovodni sistem.



Slika 102: Merilno območje 9

Število merilnih območij na obravnavanem območju bi lahko tudi povečali. Predvsem na območjih z večjim številom porabnikov. Takšen ukrep zahteva tudi nakup dodatnih merilcev pretoka in tudi zapornih ventilov, s katerimi bi določili velikost merilnega območja. Tak ukrep bi bilo potrebno pogledati tudi s finančne plati in preveriti, kakšne so prednosti, če se upravljalca odloči za tako izvedbo. Podrobna analiza v nalogi ni bila narejena. Predlagana območja predstavljajo minimalno število merilnih območij, katera bi bilo potrebno vzpostaviti za lažje določevanje vodnih izgub na terenu. Z izvedbo predloga bi se tudi zmanjšalo število ur terenskega dela, ki ga opravi ekipa, ko mora na terenu, sredi noči, poiskati mesto okvare na cevi s pomočjo različnih akustičnih tehnik.

#### **D. Merilna oprema na cevovodnem sistemu**

Za izvajanje zahtevanih meritev je potrebna tudi ustrezna merilna oprema. Pred izbiro merilne opreme je potrebno dodobra spoznati delovanje vodovodnega sistema. Meritve tlaka so pomembne predvsem zaradi vpogleda v stanje vodovodnega sistema v določenem trenutku. Preko natančnih merilnikov tlaka, se lahko zazna tudi manjša nihanja tlaka v cevi, kjer lahko rahlo povečan tlak pomeni okvaro na cevi znotraj merilnega območja.

Navadno se preverja pretoke v cevi s pomočjo merilnikov pretoka. Ti so različnih tipov in območij delovanja in se zato prodajajo tudi po različnih cenah. V osnovi se delijo na:

- Elektromagnetni merilnik pretoka  
Delujejo na podlagi magnetne induktivnosti. Napetost se inducira preko vode (prevodnika), ko ta teče skozi magnetno polje. Napetost se meri z dvema elektrodama, ki ležita vsaka na svoji strani. Induciran signal napetosti je proporcionalen produktu

gostote magnetnega pretoka, razdalje med obema elektrodama in povprečne hitrosti vode (prevodnika). [43]

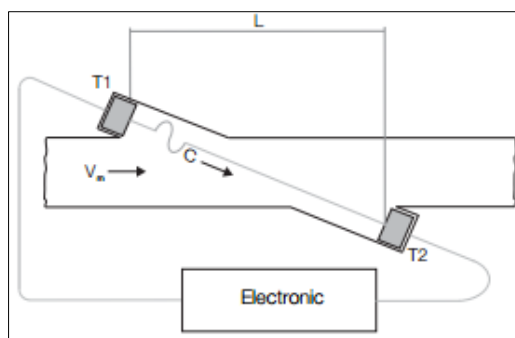
Na cev se namesti preko prirobnice in z uporabo tesnil. Lahko na horizontalni, poševni ali navpični cevi. Za zagotovitev pravilnega delovanja, mora biti skozi njegov prečni prerez vedno polno tekočine. V primeru priključitve na cev večjega premera, se uporabi več reducirnih elementov, s pomočjo katerih se prerez cevi zmanjša na ustrezen profil, ki omogoča namestitev merilca pretoka.

Komunikacija oziroma zapisovanje izmerjenih vrednosti lahko poteka s prenosom na oddaljen računalnik, preko katerega se lahko z merilcem tudi upravlja. Nekatere izvedbe omogočajo tudi namestitev alarma, ko lahko opozarja na minimalne ali maksimalne dovoljene pretoke v cevi ali tudi prazno cev. Meritve lahko opravljajo v obeh smereh toka vode v cevi. [43]

Meritve so zelo natančne in so neodvisne od gostote, temperature in tlaka medija. Priporoča se izbiro merilca glede na pretok in ne glede na velikost cevovoda. Najnatančnejše meritve se doseže pri hitrostih vode 3 m/s in maksimalnem pretoku. Za merilno skalo nad 1 m/s se dopušča merilna napaka 0,4% izmerjene vrednosti in za merilno skalo pod 1 m/s z napako do 0,5% izmerjene vrednosti.

- **Ultrazvočni**

Delujejo na principu hitrosti potovanja oddanega signala skozi medij, v katerem ne smejo biti delci, saj ni zmotijo oddani signal in lahko vplivajo na natančnost meritev. Na cev se vgradi element, v katerem sta 2 senzorja, ki si ležita nasproti. Ob oddajanju ultrazvočnih signalov skozi tekočino, se meri čas potovanja posameznega signala, ki ga beleži mikroprocesor. V primeru, da v cevi ni pretoka, je hitrost potovanja oddanih signalov s strani obeh senzorjev enaka. Zajemajo relativno veliko merilno območje, od 0,05 – 30 l/s, nekateri celo več. Natančnost meritev je cca. 0,7%. [43]



Slika 103: Ultrazvočni merilnik pretoka [42]

Posebna oblika ultrazvočnih merilcev pretoka je prenosna izvedba teh merilcev, ki se jih namesti neposredno na cev. Podatki se zbirajo preko senzorjev, pritrjenih na cevi, in merijo čas potovanja signala skozi presek cevi. Iz tega podatka se izračuna hitrost vode v določenem preseku cevi. [44]



Slika 104: Prenosni ultrazvočni merilnik pretoka [44]

- **Mehanski**  
Veljajo za najbolj robustne in preproste merilce pretokov. So enostavni za uporabo in preprosti za odčitavanje izmerjenih vrednosti. So prvi merilci, s katerimi se je lahko meril pretok in s pomočjo katerih se pretok v cevi meri še danes, če ne drugje, vsaj na vodomerih na mestu odjemalca. Z razvojem merilne opreme, so tudi na mehanske merilce namestili digitalne prikazovalnike. Mehanski merilniki se namestijo neposredno na cev, navadno s prirobnico in tesnilom. Območje delovanja je široko, natančnost pa odvisna od vzdrževanja posameznega merilca (dovoljena vrednost je 1%), saj se jih dostikrat zanemari in pozabi preveriti njihovo natančnost. Poznamo več različnih načinom poteka meritev pretoka. Volumetrični merilci delujejo po principu prenesenega volumna iz ene na drugo stran merilnika. Ta volumen je enak volumnu votline v merilniku, ki je vedno enak. Merilnik sešteje prenesene dele tekočine in na ta način izmeri skupen pretok. Neodvisni so od tipa toka na vstopu (laminaren, turbulenten), zato se jih lahko namesti tudi takoj za kolena ali ventili. So zelo natančni, vendar dragi in veliki. Druga oblika so turbulentni merilniki, ki delujejo na principu merjenja vrtilne frekvence rotorja (vetrnice), ki je vgrajena v merilnik. V nasprotju z volumetričnimi merilniki tu tesnjenje ni bistvenega pomena. Vrtilna frekvenca rotorja je proporcionalna volumskemu pretoku tekočine. [45]

#### Razdelitev merilcev pretoka glede na funkcionalnost:

- Najboljši, najnatančnejši in tudi cenovno najdražji so merilci pretoka, ki nudijo prenos izmerjenih podatkov s pomočjo oddajnika na oddaljeno bazo s sprejemnikom. Na podoben način so urejene meritve nihanja gladine vode v vodohranu, kjer se preko urejene povezave, merjene količine zapisujejo v obliki SCADA podatkovne baze, ki je vedno dostopna za vpogled. Na ta način bi bili tudi pretoki v ceveh natančneje definirani in bi lahko dnevno spremljali dogajanje v posameznem merilnem območju. V trenutno vzpostavljene načinu meritev pretokov na obravnavanem vodovodnem sistemu se povečani pretoki opazijo po opravljenem tedenskem popisu pretokov na mehanskih merilcih pretoka po celotnem vodovodnem sistemu. Z vzpostavitvijo take mreže, pa bi lahko terenska ekipa iskala mesto okvare že v roku enega dneva.
- Druga skupina merilcev pretoka, ki bi bili primerni za uporabo na obravnavanem območju je podobno prvim, le da ti beležijo podatke v izbranem časovnem koraku na spominsko napravo, ki je nameščena na samem merilcu v jašku. Odčitki se odčitajo s same lokacije merilca, s pomočjo digitalnega čitalca ali v fizični obliki. Možna je tudi



namestitvev merilca pretoka direktno na cev, kjerkoli na sistemu. Vendar ta zaradi nedostopnosti, večjega obsega dela, težjega vzdrževanja merilca ni zaželena in predvidena na obravnavanem vodovodnem sistemu.

- Po zasnovi in načinu delovanja so jim podobni povsem klasični, mehanski merilniki pretoka, pri katerih je potrebno odčitke prav tako odčitavati s same lokacije. Ti imajo navadno nameščeno merilno uro, ki šteje pretočene m<sup>3</sup> vode, preko merilnega inštrumenta na cevi. Gre za precej robustno in preverjeno zadevo, ki se na sistemu uporablja že sedaj.

Po diskusiji o predlaganih ukrepih oblikovanja merilnega območja in predlagane merilne opreme z upravljalcem, so potrdili, da si tudi sami želijo določenih izboljšav na področju meritev in povečanja števila merilne opreme na terenu. Zavedajo se tudi stroškov, ki jih prinaša izvedba predlaganih ukrepov. Zato bi se trenutno zadovoljili tudi z namestitvijo mehanskih merilnih inštrumentov. Ti bi predstavljali del rednega tedenskega popisa na obravnavanem območju in bi nudili boljši vpogled v delovanje in nadzor obravnavanega vodovodnega sistema.

## 5 ZAKLJUČEK

Vodovodni sistem Kostanjevica na Krki se uvršča med manjše vodovodne sisteme. Ti so lahko kljub manjšemu številu objektov, dolžini cevi in manjšemu številu odjemalcev prav tako hidravlično zahtevni za obdelavo in za vzdrževanje. Zaradi svoje velikosti so lahko deloma zapostavljeni in tako se s časom, in ob pomanjkanju števila pregledov in vzdrževalnih del, zmanjšuje njihova zanesljivost delovanja. V ta namen, sem v magistrski nalogi pregledal obstoječe vodovodno omrežje, popisal in premeril objekte na območju obravnavanega vodovodnega sistema in jih tudi prikazal v nalogi.

Namen magistrske naloge je bilo pregledati obstoječe stanje sistema in objektov na njem in oceniti obseg vodnih izgub oziroma s pomočjo hidravličnega modela določiti mesto vodnih izgub. Ker je vodovodni sistem relativno star, sedanji upravljalec pa ob prevzemu nalog vzdrževanja obravnavanega vodovodnega sistema ni prejel nobenih podatkov o sistemu, so bili le ti v času zbiranja zahtevanih podatkov relativno okrnjeni ali nepopolni. Prejete podatke s strani upravjalca vodovodnega sistema, sem s pomočjo terenskega dela sam dodatno dopolnil in jih s pomočjo različnih obdelav preoblikoval oziroma pripravil do te mere, da so bili primerni za nadaljnjo uporabo.

Na podlagi zbranih podatkov, sem zbrane podatke ustrezno strukturiral v programu QGIS. Hidravlični izračun je potekal s pomočjo vmesnika »qgis epanet«, ki omogoča povezavo GIS okolja s programom za račun hidravlike vodovodnih sistemov EPANET. Rezultati se lahko deloma prikažejo tudi v programu QGIS, ki omogoča tudi grafični prikaz. Natančnejše in obsežnejše podatke pa lahko pridobimo iz programa EPANET, ki omogoča izpis rezultatov v obliki tabel ali prikaz v obliki grafov. V primeru razširjene časovne simulacije, kjer se izvaja hidravlični račun za določeno časovno obdobje (navadno 24 ur), so lahko določeni rezultati prikazani tudi v obliki simulacije in lahko vidimo, kako tlaki ali pretoki nihajo v določeni točki vodovodnega sistema.

V obdobju zbiranja podatkov in kasnejšim oblikovanjem hidravličnega modela sem se srečal v več primerih s težavami. Zato sem sem v nadaljevanju naloge osredotočil na to, katere podatke bi še potreboval oziroma katere podatkovne baze bi bilo potrebno dopolniti, da bi lahko oblikoval natančnejši hidravlični model. Te aktivnosti deloma sledijo mojemu že opravljenemu delu na pridobljenih podatkih, del njih pa je postavljen povsem na novo, saj zahtevajo tudi določene finančne vložke, s katerimi bi povečali število merilnih mest na vodovodnem sistemu. Oblikovanje merilnih območij je potekalo na podlagi teoretičnih predpostavk o velikosti in ostalih pogojih, ki jih mora izpolnjevati tako območje. Zato sem pod temi pogoji smiselno oblikoval devet merilnih območij. Vsako izmed njih vsebuje na vtočni cevi merilnik pretoka, preko katerega se lahko spremlja vtočne količine v posamezno merilno območje. Ob povečanju teh vrednosti, se lahko upravljalec odloži za ustrezne ukrepe, ki so povezani z odpravo razlogov za povečanje porabe znotraj merilnega območja. Iskanje mesta okvare predstavlja še vedno terensko delo, pri katerem usposobljen delavec z enim izmed akustičnih inštrumentov išče specifično mesto okvare na cevi.

Terensko iskanje mesta okvare se lahko zmanjša tudi z dobro postavljenim hidravličnim modelom vodovodnega sistema. Ta ob zadostnem in kakovostnem številu vhodnih podatkov omogoča, da se lahko z njegovo pomočjo oceni, v katerem merilnem območju oziroma kateri del merilnega območja je izpostavljen povečanim vodnim izgubam. Kot nadaljevanje mojega

dela bi bilo zanimivo videti oziroma primerjati izdelani hidravlični model s tistim, v katerega bi vnesli podatke, ki bi bili pridobljeni ob izvedbi predpostavljenim aktivnosti. Z njim bi bilo mogoče izpolniti tudi zastavljeno nalogo iskanja območij vodnih izgub na vodovodnem sistemu, s pomočjo katerih bi zmanjšali stroške terenskega dela iskanja mesta okvare na cevi. Poleg tega bi se zmanjšal tudi količino izgubljene načrpane vode skozi mesto okvare. Cena 1 m<sup>3</sup> pitne vode danes še ne predstavlja velikega stroška, napram drugim energentom ali prehrabnim izdelkom. Vendar bi se lahko ta ob nadaljevanju prirasti prebivalstva na določenih območjih in ob nepredvidljivih okoljskih spremembah kaj hitro spremenila in narasla. Zato bo tudi v prihodnje poudarek na zmanjševanju vodnih izgub na vodovodnih sistemih v ospredju in bo predstavljal eno izmed glavnih dejavnosti, s katerimi se bodo morali srečati prav upravljalci. Pa naj si bo to zaradi želje po zmanjšanju vodnih izgub na vodovodnem sistemu ali pa zaradi potrebe po izpolnjevanju določenih predpisov s strani države ali Evropske unije.

## 6 VIRI

- [1] Uredba o oskrbi s pitno vodo. Uradni list RS št. 088/2012.
- [2] Walski, T., Chase, D. V., Savić, D. A. et al. 2003. Advanced Water Distribution Modelling And Management. Waterbury, Haestad Methods: 751 str.
- [3] Berdajs, A., et al. 2004. Gradbeniški priročnik. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 476 str.
- [4] Sketelj, J. 1957. Hidravlični preračun vodovodnega omrežja. Ljubljana, Uprava za vodno gospodarstvo LRS: 114 str.
- [5] Pravilnik o tehničnih normativih za hidrantna omrežja in gašenje požarov. Uradni list SFRJ št. 30/91.
- [6] Tehnične smernice o požarni varnosti, TSG-1-001:2010 Požarna varnost v stavbah. 2010. Ministrstvo za okolje in prostor.
- [7] Steinman, F. 2010. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 294 str.
- [8] Petrešin, E. 1980. Vodovodni sistemi. Ljubljana: 888 str.
- [9] Satcitananda. 2016.  
<http://www.satcitananda.si/> (Pridobljeno 20. 9. 2015)
- [10] Uršič, M. 2009. Prispevek k analizi hidravličnih trenjskih izgub za tok pod tlakom v ceveh krožnega prereza. Doktorska dizertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Uršič): 172 str.
- [11] Engineeringtoolbox. 2015.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficients-d\\_798.html](http://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficients-d_798.html) (Pridobljeno 20. 9. 2015)
- [12] Tehnični pravilnik za vodovod. Uradni list RS št. 075/2010.
- [13] Pumping Systems. 2013.  
<http://highereducation.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0072402172/62806/ChX1c.pdf> (Pridobljeno 24. 9. 2015)
- [14] McNally institute. 2015. Črpalne krivulje in zkoristek črpalke.  
<http://www.mcnallyinstitute.com/18-html/18-1.htm> (Pridobljeno 26. 9. 2015)

- [15] Panjan, J. 2002. Osnove zdravstveno hidrotehnične infrastrukture: vodovod in čiščenje pitnih voda, odvodnjavanje in čiščenje onesnaženih voda in komunalni odpadki. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 289 str.
- [16] Giswater. 2016. Računalniški program za izdelavo hidravličnega modela.  
<http://www.giswater.org/> (Pridobljeno 24. 9. 2015)
- [17] Epanet 2.0. 2014. Računalniški program za izdelavo hidravličnega modela.  
<https://www.epa.gov/water-research/epanet> (Pridobljeno 12.10.2015)
- [18] Mashford, J., De Silva, D., Marney, D., Burn, S. 2009. An approach to leak detection in pipe networks using analysis of monitored pressure values by support vector machine. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Avstralija: 6 str.
- [19] Covas, D., Ramos, H., Graham, N., Maksimovic, C. 2004. Application of hydraulic transients for leak detection in water supply systems: 10 str.
- [20] Jernigan, J. 2014. Next Generation Water Loss Tools - AWWA's New & Improving Tools and Publications for Water Loss Control: 10 str.
- [21] Hunaidi, O., Wang, A., Bracken, M., Gambino, T., Fricke, C. 2004. Acoustic methods for locating leaks in municipal water pipe Networks. V: International Water Demand Management Conference. Jordanija, 30 maj do 4 junij 2004: 15 str.
- [22] Koelbl, J., Martinek, P. 2006. Innovative network monitoring technologies to support water loss management: 140 – 145 str.
- [23] Giorgio Borta, C.M., Righettia, M., Bertolaa. P. 2014. Methodology for Leakage Isolation Using Pressure Sensitivity and Correlation Analysis in Water Distribution Systems. V: 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2014: 8 str.
- [24] Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M., Moridi, A. 2009. Pressure Management Model for Urban Water Distribution Networks: 22 str.
- [25] Pilcher, R., Hamilton, S., Chapman, H., Ristovski, B., Stapley, S. 2007. Leak location and repair (Guidance notes), International water association (IWA), Water loss task force: 71 str.
- [26] Water audits and loss control programs, American water works association, 2003
- [27] Titus, R. G., Meston, R., Johnson, J., Meschino, P., Moore, R. 2013. Leak-detection programs identify and control water loss: 5. str.
- [28] GPR. 2016. Akustična metoda za odkrivanje mest vodnih izgub.  
<http://www.undergroundleakdetection.co.za/ground-penetrating-radar> (Pridobljeno 10. 1. 2016)

- [29] Eyuboglu, S., Mahdi, H., Al-Shukri; H. 2006. Detection of water leaks using ground penetrating radar. Department of Applied Science University of Arkansas at Little Rock:
- [30] Hasan;, A. E. 2012. The use of ground penetrating radar with a frequency 1ghz to detect water leaks from pipelines; 16th International Water Technology Conference, Turkey: 6 str.
- [31] San Luis, K., M. 2015. Acoustic leak detection system for petroleum product pipelines.
- [32] Tabesh, M. 2001. Head-driven simulation of water supply networks. Tehran: 12 str.
- [33] Sala, D., Kołakowski, P. 2014. Detection of leaks in a small-scale water distribution network based on pressure data - experimental verification, Poljska: 10 str.
- [34] Hughes. D. M., Oxenford, J., Titus, R. 2014. Pipe Location and Leakage Management for Small Water Systems. The Water Research Foundation, Denver: 59 str.
- [35] Fanner, P. V., Sturm, R., Thornton, J., Liemberger, R. 2007. Leakage management techologies. Awwa reserch foundation: 380 str.
- [36] Zagožen. 2016. Ponudnik številnih vodovodnih elementov.  
<http://www.zagozen.si/si/> (Pridobljeno 24. 1. 2016)
- [37] Statistični podatki prebivalstva. 2015  
<http://www.stat.si/obcine/Vsebina.aspx?leto=2015&id=69> (Pridobljeno 15. 9. 2015)
- [38] Odlok o občinskem prostorskem načrtu. Uradni list RS št. 51/2013.
- [39] Zakon o prostorskem načrtovanju. Uradni list RS št. 33/07.
- [40] Kostak. 2015. Letno poročilo  
<http://www.kostak.si/wp-content/uploads/Letno-porocilo-2014.pdf>
- [41] Katalogi črpalk proizvajalca Lowara in Grundfos
- [42] Engineering toolbox. 2015.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficients-d\\_798.html](http://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficients-d_798.html) (Pridobljeno 3. 3. 2016)
- [43] Aniton. 2016. Prodaja industrijske opreme  
<http://www.aniton.si/text/13446211-1590.html> (Pridobljeno 22. 5. 2016)
- [44] Andotehna. 2016. Prodaja merilne opreme  
<http://www.andotehna.si/merilniki-pretoka> (Pridobljeno 22. 5. 2016)
- [45] Omega. 2016. Merilna oprema  
<http://www.omega.com/literature/transactions/volume4/t9904-08-mech.html> (Pridobljeno 22. 5. 2016)