

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:

Ražman, S., 2016. Umerjanje hidravličnega modela in ocena vodnih izgub v cevovodnih omrežjih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Steinman, F.): 99 str.

Datum arhiviranja: 20-09-2016

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:

Ražman, S., 2016. Umerjanje hidravličnega modela in ocena vodnih izgub v cevovodnih omrežjih. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Steinman, F.): 99 pp.

Archiving Date: 20-09-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

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



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
KOMUNALNA SMER

Kandidat:

SANDI RAŽMAN

**UMERJANJE HIDRAVLICNEGA MODELA IN OCENA
VODNIH IZGUB V CEVOVODNIH OMREŽJIH**

Diplomska naloga št.: 3500/KMS

**CALIBRATION OF HYDRAULIC MODELS AND
ESTIMATION OF WATER LOSSES IN PIPE
NETWORKS**

Graduation thesis No.: 3500/KMS

Mentor:

prof. dr. Franc Steinman

Somentor:

asist. dr. Daniel Kozelj

Ljubljana, 15. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

Ta stran je namenoma prazna

Spodaj podpisani/-a študent/-ka _____,
vpisna številka _____, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom:

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 po Repozitoriju UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta/-ke:

Ta stran je namenoma prazna

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	004.414.23:532.5(043.2)
Avtor:	Sandi Ražman
Mentor:	prof. dr. Franc Steinman
Somentor:	asist. dr. Daniel Kozelj
Naslov:	Umerjanje hidravličnega modela in ocena vodnih izgub v cevovodnih omrežjih
Tip dokumenta:	Dipl. nal. - UNI
Obseg in oprema:	99 str., 10 pregl., 25 graf., 92 sl., 53 en., 1 pril.
Ključne besede:	cevovodno omrežje, hidravlično modeliranje, makrokalibracija, vodne izgube, Epanet, minimalni nočni pretok

Izvleček

Hidravlični model je pomembno orodje, s pomočjo katerega simuliramo obnašanje dejanskega vodovodnega sistema. Pričujoča diplomska naloga opisuje postopek grobega umerjanja oziroma makrokalibracije na praktičnem primeru. S sprotnim analiziranjem simulacij modela, odpravljanjem napak in spreminjanjem neznanih parametrov skušamo pridobiti takšen nabor podatkov, na podlagi katerih rezultati hidravličnih izračunov postopno konvergirajo k merjenim vrednostim stvarnega vodovodnega sistema. Po končanem postopku makrokalibracije opravimo na izboljšanem hidravličnem modelu še oceno vodnih izgub na podlagi izračuna minimalnega nočnega pretoka.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 004.414.23:532.5(043.2)

Author: Sandi Ražman

Supervisor: prof. Franc Steinman, Ph.D.

Cosupervisor: Assist. Daniel Kozelj, Ph. D.

Title: Calibration of hydraulic models and estimation of water losses in pipe networks

Document type: Graduation Thesis – University studies

Notes: 99 p., 10 tab., 25 graph., 92 fig., 53 eq., 1 ann.

Key words: water distribution networks, hydraulic modelling, macrocalibration, water losses, Epanet, minimum night flow

Abstract

The hydraulic model of a real water distribution system is a powerful tool which helps us understand, simulate and predict unknown parameters based on actual conditions. In the thesis, we presented a practical example of macro calibration procedure, which consists of analysing model calculations, finding errors and adjusting unknown parameters, with the aim of achieving a match between measured and computed hydraulic parameters. After achieving an improved hydraulic model, we also performed estimation of water losses based on minimum night flow calculations.

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil prof. dr. Francu Steinmanu in asist. dr. Danielu Kozelju za vso pomoč in koristne napotke, s katerimi sta me usmerjala pri izdelavi pričujoče diplomske naloge.

Neizmerna hvaležnost gresta mami in bratu, saj sta mi vsa ta leta stala ob strani in verjela vame.

Navsezadnje gredo zahvale tudi Matjažu, Maji, Maticu, Jaku in Veri za potrpežljivost, moralno podporo in kopico dobrih nasvetov.

Ta stran je namenoma prazna

KAZALO

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	V
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VI
ZAHVALA	VII
KAZALO PREGLEDNIC	XI
KAZALO GRAFIKONOV	XII
KAZALO SLIK.....	XIII
KAZALO PRILOG	XVI
SLOVAR SLOVENSКИH PREVODOV TUJIH IZRAZOV	XVII
1 UVOD	1
1.1 Cilji diplomske naloge.....	1
1.2 Opis problema in vhodni podatki	1
2 PREGLED HIDRAVLIČNIH ZAKONITOSTI	4
2.1 Zakon o ohranitvi mase – kontinuitetna enačba.....	4
2.2 Zakon o ohranitvi energije	5
2.3 Energijske izgube	7
3 UMERJANJE VODOVODNEGA SISTEMA.....	13
3.1 Osnove.....	13
4 MAKROKALIBRACIJA HIDRAVLIČNEGA MODELA MESTA D.....	15
4.1 Obdelava in ovrednotenje vhodnih podatkov	15
4.2 Predviden potek nihanja gladin vode v vodohranih.....	18
4.3 Masna bilanca vodovodnega sistema.....	20
4.4 Koeficient urne porabe	30
4.5 Vozlišča in poraba	32
4.6 Test hidravličnih izgub in izračun koeficienta hrapavosti vodovodnih cevi.....	33
4.6.1 Teoretična izhodišča	33
4.6.2 Določitev C-koeficientov vodovodnih cevi	36
4.7 Črpališča in črpalke	39
4.7.1 Osnove	39
4.7.2 Zaporedna in vzporedna vezava črpalke.....	40
4.8 Krivulja sistema in točka obratovanja črpalke	41
4.8.1 Določanje krivulje sistema.....	42
4.8.2 Določanje točke obratovanja in posodobitev črpalne krivulje črpalke	43
4.9 Umerjanje tlačnih con	45
4.9.1 Tlačna cona DMA5	45
4.9.2 Tlačna cona DMA4	49
4.9.3 Tlačna cona DMA3	52

4.9.4 Tlačna cona DMA2	54
4.9.5 Tlačna cona DMA1	60
4.10 Končni popravki – izboljššan hidravlični model	70
4.10.1 Izračun napak in statističnih podatkov	75
5 IZRAČUN VODNIH IZGUB	80
5.1 Vodna bilanca vodovodnega sistema	80
5.2 Opis vodnih izgub	81
5.3 Minimalni nočni pretok	82
5.4 Modeliranje vodnih izgub v programu Epanet	84
5.4.1 Hidravlične osnove vodnih izgub	84
5.4.2 Določanje koeficienta vodnih izgub	86
5.4.3 Rezultati modeliranja vodnih izgub	88
6 ZAKLJUČEK	94
7 VIRI	96
8 PRILOGE	99

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Primerjava med ocenjeno mesečno porabo in porabo na osnovi masne bilance tlačnih con	32
Preglednica 2: Podatki meritev na hidrantih po posameznih tlačnih conah	37
Preglednica 3: Statistični podatki izboljšanega hidravličnega modela za primer nihanja gladin vodohranov	78
Preglednica 4: Statistični podatki izboljšanega hidravličnega modela za primer pretokov črpališč	78
Preglednica 5: Standardizirana terminologija za izdelavo vodne bilance vodovodnega sistema po IWA.....	80
Preglednica 6: Količina dejanskih izgub glede na lokacijo in tip puščanja za dobro vzdrževan vodovodni sistem	82
Preglednica 7: Dejanske izgube posamezne tlačne cone	84
Preglednica 8: Eksponent vodnih izgub glede na material in tip poškodbe.....	86
Preglednica 9: Izračun koeficienta vodnih izgub C	87
Preglednica 10: Statistični podatki za primer tlakov v reprezentativnih vozliščih	92

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Nihanje vodne gladine, črpanje in prikaz vklopa/izklopa črpalk v tlačni coni DMA1	16
Grafikon 2: Nihanje vodne gladine, črpanje in prikaz vklopa/izklopa črpalk v tlačni coni DMA2	16
Grafikon 3: Nihanje vodne gladine, črpanje in prikaz vklopa/izklopa črpalk v tlačni coni DMA3	17
Grafikon 4: Nihanje vodne gladine, črpanje in prikaz vklopa/izklopa črpalk v tlačni coni DMA4	17
Grafikon 5: Nihanje vodne gladine, črpanje in prikaz vklopa/izklopa črpalk v tlačni coni DMA5	18
Grafikon 6: Prikaz lokalnih ekstremov nihanja vodne gladine, ki nastopijo znotraj časovnega intervala	20
Grafikon 7: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA5 (brez upoštevanja časa vklopa črpališča t_v)	23
Grafikon 8: Pretok črpališča z različnimi časi vklopa znotraj časovnega intervala ene ure ...	24
Grafikon 9: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA5 (z upoštevanjem časa vklopa črpališča t_v)	25
Grafikon 10: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA4 (z upoštevanjem časa vklopa črpališča t_v)	26
Grafikon 11: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA3 (z upoštevanjem časa vklopa črpališča t_v)	26
Grafikon 12: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA2 (z upoštevanja časa vklopa črpališča t_v)	27
Grafikon 13: Količina vode, ki izstopi iz tlačne cone DMA1; prikaz delovanja ventila V2 in črpališča S1	28
Grafikon 14: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA1 (z upoštevanjem časa vklopa t_v)	28
Grafikon 15: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA1 (z upoštevanjem časa vklopa t_v in časa ekstrema t_E)	30
Grafikon 16: Začetni koeficient urne porabe po posamezni tlačni coni	31
Grafikon 17: Krivulje sistema, črpalna krivulja nove in rabljene črpalke tlačne cone DMA5 ..	44
Grafikon 18: Določanje črpalne krivulje vzporedno vezane rabljene črpalke s pomočjo meritev na hidrantih	62
Grafikon 19: Popravljeni koeficienti urne porabe po posamezni tlačni coni	70
Grafikon 20: Urna poraba posamezne tlačne cone	83
Grafikon 21: Nihanje tlakov v reprezentativnem vozlišču tlačne cone DMA1	88
Grafikon 22: Nihanje tlakov v reprezentativnem vozlišču tlačne cone DMA2	89
Grafikon 23: Nihanje tlakov v reprezentativnem vozlišču tlačne cone DMA3	89
Grafikon 24: Nihanje tlakov v reprezentativnem vozlišču tlačne cone DMA4	90
Grafikon 25: Nihanje tlakov v reprezentativnem vozlišču tlačne cone DMA5	90

KAZALO SLIK

Slika 1: Model vodovodnega omrežja mesta D s prikazom tlačnih con in geodetskih višin vozlišč.....	1
Slika 2: Shematski prikaz vodovodnega omrežja mesta D	2
Slika 3: Obratovalna pravila: krmilni program črpalk in ventilov	3
Slika 4: Shematski prikaz uporabe zakona o ohranitvi mase za poljubno vozlišče	5
Slika 5: Grafični prikaz zakona o ohranitvi energije na odseku cevi.....	6
Slika 6: Grafični prikaz energijske in tlačne črte	7
Slika 7: Praktičen primer izrisa energijske in tlačne črte	7
Slika 8: Nastanek vrtinčenja toka in lokalnih izgub za primer zaporne armature in fazonskega kosa.....	8
Slika 9: Moodyjev diagram za določitev Darcy-Weissbachovega koeficienta trenja	11
Slika 10: Proces staranja vodovodnih cevi – nalaganje usedlin rje in sedimentov	12
Slika 11: Shematski prikaz umerjanja hidravličnega modela vodovodnega omrežja	13
Slika 12: Dvostopenjski proces umerjanja.....	14
Slika 13: Grafični prikaz iteracijskega pristopa poskus – napaka v postopku makrokalibracije	15
Slika 14: Vzorci dnevne porabe vode glede na vrsto porabnika	21
Slika 15: Lokalni ekstremi nihanja vodne gladine vodohrana T2	29
Slika 16: Vmesnik za vnos koeficienta urne porabe $k_{por,t}$ v programu Epanet	31
Slika 17: Določevanje velikosti in lokacije vozliščne porabe	32
Slika 18: Dnevno nihanje vodnih izgub	33
Slika 19: Test hidravličnih izgub z dvema merilnikoma tlaka	34
Slika 20: Prostorski prikaz razporeditve hidrantov, na katerih so bile izvedene meritve.....	37
Slika 21: Shematski prikaz energijske črte sistema s črpalko.....	39
Slika 22: Shematski prikaz (White, 2003: str 714) in prerez centrifugalne črpalke (Grundfos, 2004)	39
Slika 23: Zaporedna in vzporedna vezava črpalk	41
Slika 24: Črpalna krivulja, krivulja sistema in točka obratovanja	42
Slika 25: Shematski prikaz profila sistema – pridobivanje krivulje sistema v različnih obtežnih primerih.....	43
Slika 26: Prelivanje vodohrana T5.....	46
Slika 27: Gladina vode v vodohranu T5; popravljen začetni status črpalk	46
Slika 28: Gladina vode v vodohranu T5; popravljen nivo vklopa črpalke PU8	47
Slika 29: Gladina vode v vodohranu T5; popravljen črpalna krivulja.....	47
Slika 30: Pretoki črpališča S4.....	48
Slika 31: Gladina vode v vodohranu T5; popravljeni koeficienti urne porabe (potek nihanja vodne gladine)	48
Slika 32: Gladina vode v vodohranu T7: C-koeficienti (meritve na hidrantih).....	49
Slika 33: Gladina vode v vodohranu T7: C-koeficienti (meritve na hidrantih) in popravljen črpalna krivulja.....	50
Slika 34: Gladina vode v vodohranu T7; C-koeficienti (meritve na hidrantih), popravljen črpalna krivulja in koeficienti urne porabe (nihanje vodne gladine).....	50

Slika 35: Gladina vode v vodohranu T6; C-koeficienti (meritve na hidrantih)	50
Slika 36: Gladina vode v vodohranu T6; C-koeficienti (meritve na hidrantih) in popravljena črpalna krivulja	51
Slika 37: Gladina vode v vodohranu T6; C-koeficienti (meritve na hidrantih), popravljena črpalna krivulja in koeficienti urne porabe (nihanje vodne gladine)	51
Slika 38: Pretoki črpališča S5	51
Slika 39: Gladina vode v vodohranu T3; C-koeficienti (meritve na hidrantih)	52
Slika 40: Gladina vode v vodohranu T3; C-koeficienti (meritve na hidrantih) in popravljena črpalna krivulja	52
Slika 41: Gladina vode v vodohranu T3; C-koeficienti (meritve na hidrantih) in popravljena črpalna krivulja (DMA5)	53
Slika 42: Pretoki črpališča S2	53
Slika 43: Gladina vode v vodohranu T3; C-koeficienti (meritve na hidrantih), popravljena črpalna krivulja (DMA5) in koeficienti urne porabe (nihanje vodne gladine)	54
Slika 44: Gladina vode v vodohranu T4; začetni C-koeficienti in črpalna krivulja nove črpalke	54
Slika 45: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=22$ in črpalna krivulja nove črpalke	55
Slika 46: Vzдолžni profil terena med vodohranom T4 in črpališčem S3	56
Slika 47: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=100$, $C_{lok}=10$ in posodobljena črpalna krivulja_1	57
Slika 48: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=90$, $C_{lok}=8$ in posodobljena črpalna krivulja_2	57
Slika 49: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=90$, $C_{lok}=7$, delno odprt ventil v P337 in posodobljena črpalna krivulja_3	58
Slika 50: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=76$, $C_{P337}=6$, $C_{P237}=3$ in posodobljena črpalna krivulja_6	58
Slika 51: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=93$, $C_{P337}=6$, $C_{P237}=5$ in posodobljena črpalna krivulja_6	59
Slika 52: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=93$, $C_{P337}=6$, $C_{P237}=5$, posodobljena črpalna krivulja in koeficienti urne porabe (nihanje vodne gladine)	59
Slika 53: Gladina vode v vodohranu T1; začetni C-koeficienti in črpalna krivulja nove črpalke	60
Slika 54: Gladina vode v vodohranu T1; začetni C-koeficienti, črpalna krivulja nove črpalke in popravljen nivo vklopa črpalke PU2	61
Slika 55: Gladina vode v vodohranu T1; začetni C-koeficienti, črpalna krivulja nove črpalke, popravljen nivo vklopa in začetni status črpalke PU2	61
Slika 56: Gladina vode v vodohranu T1; C-koeficienti (meritve na hidrantih) in popravljena črpalna krivulja	63
Slika 57: Gladina vode v vodohranu T2	63
Slika 58: Pretoki črpališča S1	63
Slika 59: Pretok črpal PU1 in PU2 ter skupni pretok črpališča S1	64
Slika 60: Gladina vode v vodohranu T1; zmanjšana osnovna poraba vozlišč	65
Slika 61: Gladina vode v vodohranu T2; zmanjšana osnovna poraba vozlišč	65
Slika 62: Pretoki črpališča S1; zmanjšana osnovna poraba vozlišč	65
Slika 63: Izvoz parametrov hidravličnega scenarija	66
Slika 64: Gladina vode v vodohranu T2; posodobljena črpalna krivulja in popravljeni C-koeficienti cevi	67

Slika 65: Gladina vode v vodohranu T4; posodobljena črpalna krivulja in popravljeni C-koeficienti cevi	67
Slika 66: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 24 do 48 ur	68
Slika 67: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 48 do 72 ur	68
Slika 68: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 72 do 96 ur	68
Slika 69: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 24 do 48 ur; popravljeni koeficienti ure porabe	69
Slika 70: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 48 do 72 ur; popravljeni koeficienti ure porabe	69
Slika 71: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 72 do 96 ur; popravljeni koeficienti ure porabe	69
Slika 72: Nihanje vodne gladine vodohrana T1 po končani makrokalibraciji	71
Slika 73: Nihanje vodne gladine vodohrana T2 po končani makrokalibraciji	71
Slika 74: Pretoki črpališča S1 po končani makrokalibraciji	72
Slika 75: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 po končani makrokalibraciji	72
Slika 76: Pretoki črpališča S3 po končani makrokalibraciji	72
Slika 77: Nihanje vodne gladine vodohrana T3 po končani makrokalibraciji	73
Slika 78: Pretoki črpališča S2 po končani makrokalibraciji	73
Slika 79: Nihanje vodne gladine vodohrana T7 po končani makrokalibraciji	74
Slika 80: Nihanje vodne gladine vodohrana T6 po končani makrokalibraciji	74
Slika 81: Pretoki črpališča S5 po končani makrokalibraciji	74
Slika 82: Nihanje vodne gladine vodohrana T5 po končani makrokalibraciji	75
Slika 83: Pretoki črpališča S5 po končani makrokalibraciji	75
Slika 84: Razsevni grafikon in korelacija vodnih gladin vodohranov	79
Slika 85: Razsevni grafikon in korelacija pretokov črpališč	79
Slika 86: Razmerje med velikostjo in časom trajanja izgub	81
Slika 87: Tipičen potek porabe znotraj tlačne cone v obdobju 24 ur	83
Slika 88: Reprezentativna vozlišča posameznih tlačnih con	87
Slika 89: Vodna bilanca sistema izboljšanega hidravličnega modela po končani makrokalibraciji	91
Slika 90: Vodna bilanca sistema izboljšanega hidravličnega modela; vpliv vodnih izgub	91
Slika 91: Vodna bilanca sistema izboljšanega hidravličnega modela; vpliv izgub in odstranjeni koeficienti izgub	92
Slika 92: Razsevni grafikon in korelacija tlakov v reprezentativnih (AZP) vozliščih z upoštevanjem izgub	93

KAZALO PRILOG

PRILOGA 1: Izračun masne bilance in koeficientov urne porabe sistema.....	A1
---	----

SLOVAR SLOVENSКИH PREVODOV TUJIH IZRAZOV

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).....Centralni nadzorni sistem (CNS)

DMA (District Meter Area).....Tlačna cona omrežja

WAGL (Weighted Average Ground Level).....Povprečna geodetska višina z utežjo

AZP (Average Zone Point).....Reprezentativno vozlišče tlačne cone

EC (Emitter Coefficient).....Koefficient vodnih izgub

RMSE (Root Mean Square Error).....Celotna napaka

MAE (Mean Absolute Error).....Srednja absolutna napaka

1 UVOD

1.1 Cilji diplomske naloge

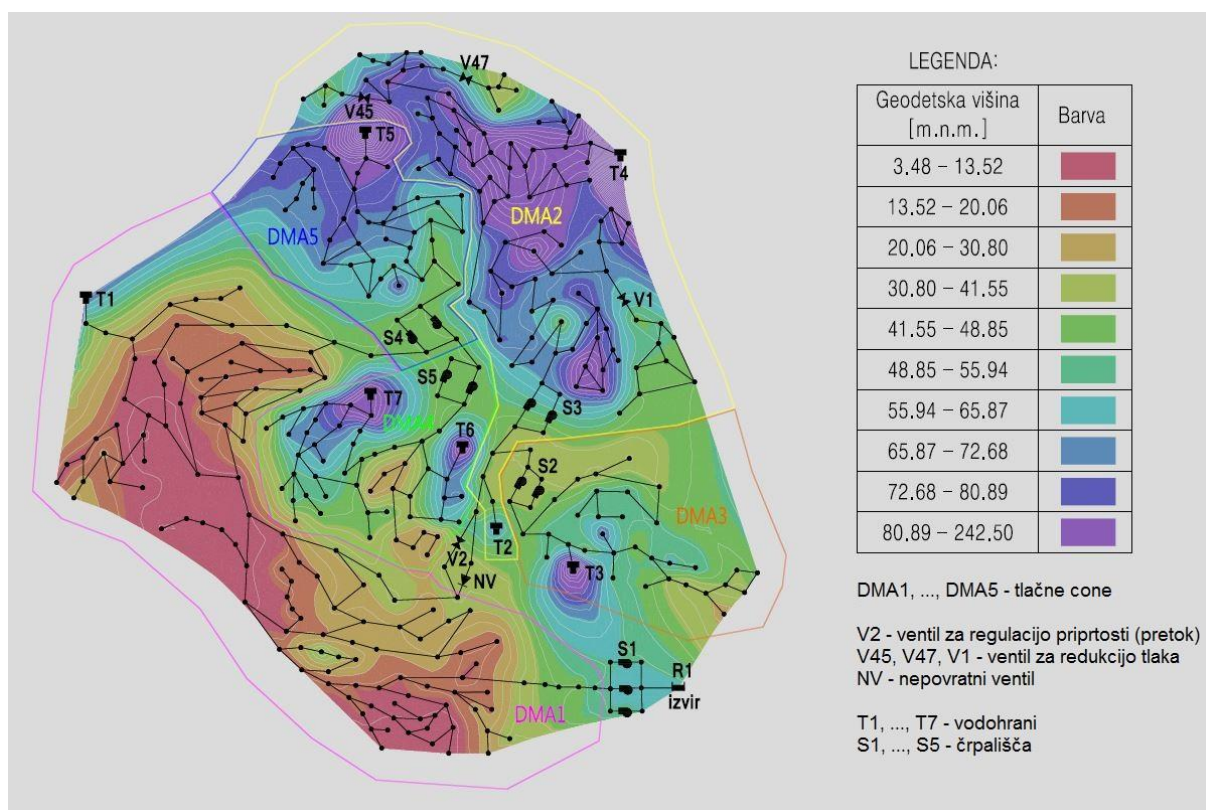
Za hidravlični model vodovodnega omrežja mesta D, skladno z (Ostfeld et al., 2012), je potrebno izvesti postopek makrokalibracije. Na podlagi izračuna masne bilance vodovodnega sistema in opravljenih meritev požarnih pretokov se vse neznane hidravlične parametre umeri tako, da se odstopanja med vrednostmi izračunov in meritev gibajo znotraj meje 30 odstotkov. Po uspešno opravljeni fazi grobega umerjanja je potrebno nato opredeliti in izračunati še vodne izgube sistema po metodi določitve minimalnega nočnega pretoka. Vpliv vodnih izgub nato hidravlično modeliramo kot tlačno odvisen iztok iz sistema s pomočjo koeficientov vodnih izgub. Vsi hidravlični izračuni se izvajajo s programom Epanet.

1.2 Opis problema in vhodni podatki

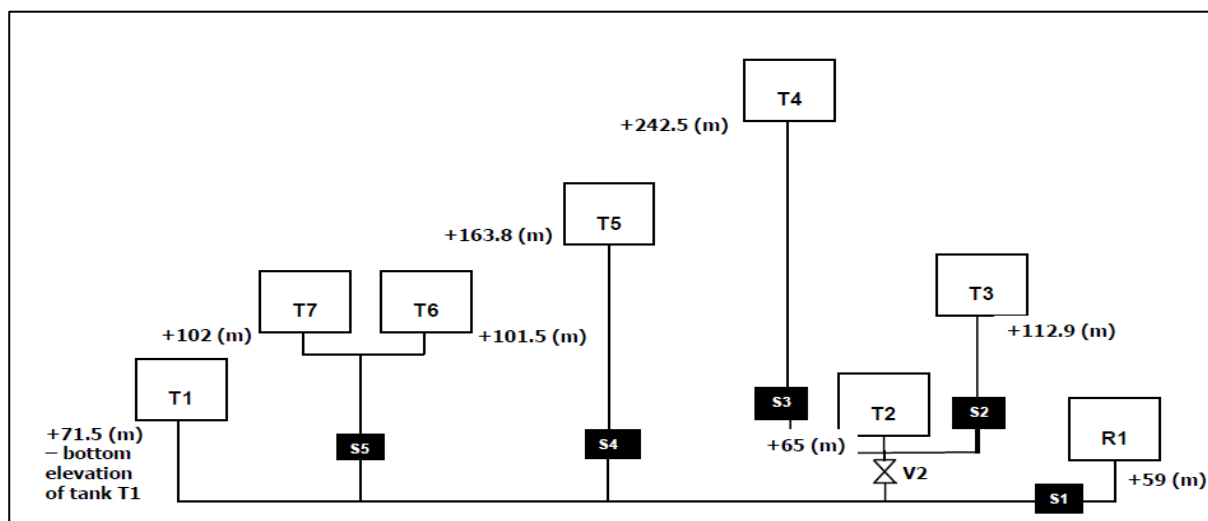
Poleg izvedenih meritev na hidrantnem omrežju so za izvedbo naloge umerjanja bili posredovani še sledeči (kar se da točni) podatki:

Topologija omrežja:

Na osnovi sistema GIS so bili pridobljeni prostorski podatki vodovodnega omrežja (potek cevi, lokacije črpališč in vodohranov, ipd.), ki so zajeti v datoteki EPANET ("D-city.inp"). Opis in ponazoritev tlačnih con ter način obratovanja vodovodnega omrežja so zajeti v posredovanih datotekah "D-city_DMA.pdf" in "D-city_S.pdf" (Ostfeld et al., 2012) in so prikazani na spodnjih slikah.



Slika 1: Model vodovodnega omrežja mesta D s prikazom tlačnih con in geodetskih višin vozlišč (Ostfeld et al., 2012)



Slika 2: Shematski prikaz vodovodnega omrežja mesta D (Ostfeld et al., 2012)

Vodovodno omrežje se napaja iz vodnega vira R1 s konstantno višino vodne gladine. S pomočjo črpalnice S1 se voda črpa v protiležna vodohrana T1 in T2. Dotok v vodohran T2 se uravnava z ventilom V2, ki je krmiljen na osnovi višine vodne gladine v vodohranu T2. Črpalnici S2 in S3 črpata vodo iz vodohrana T2 v višje ležeča vodohrana T3 ter T4. Podobno se iz vodohrana T1 po črpalnicah S4 in S5 z vodo napajajo vodohrani T5, T6 in T7.

Višine vozlišč:

Višine vozlišč so bile določene na podlagi terenskih meritev. Natančnost meritev se giblje v intervalu ± 1 meter. Za lažjo prostorsko predstavbo sem izdelal še digitalni model reliefa (DMR), ki je v obliki plastnic in barvne lestvice ponazorjen na sliki 1.

Cevi sistema:

Podani so premeri, dolžine, starost in tip cevi. Opomniti velja, da so dolžine posameznih cevi lahko večje od evklidske razdalje vozlišč, saj lomne točke cevi (med podanimi vozlišči) niso bile zajete v sistemu GIS.

Karakteristike črpalk:

Posredovane so proizvajalčeve originalne Q-h karakteristike črpalk.

Zaporni ventili:

Kot privzeto lastnost omenimo, da ima vsaka cev v vodovodnem omrežju svoj zaporni ventil. Poleg tega se privzame, razen če ni eksplicitno določeno, da so vsi zaporni ventili popolnoma odprti. Na območju tlačne cone z oznako DMA2 so potekala vzdrževalna dela, ki so botrovala osamitvi določenega dela cevi iz vodovodnega omrežja. Obstaja verjetnost, da se po opravljenih popravilih na območju vzdrževanja en ali več ventilov niso do konca odprli. Meritve na hidrantih so bile izvedene po opravljenih popravilih.

Regulacijski ventili in reduktorji tlaka:

Ventil za regulacijo priprtosti V2 je krmiljen na osnovi višine vode v vodohranu T2. Na območju se nahajajo še trije redukcijski ventili tlaka, katerih nastavitve se letno pregledujejo.

Vodohrani:

Vsi vodohrani v sistemu so cilindrične izvedbe in imajo podane minimalne, maksimalne ter začetne višine vodne gladine, kakor tudi nadmorske višine dna vodohrana.

Vodni viri:

Vodovodno omrežje se napaja iz vodnega vira R1 s konstantno višino vodne gladine.

Poraba:

Podana je ocenjena mesečna poraba za vsako vozlišče vodovodnega sistema.

Podatki centralnega nadzornega sistema (SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition):

Centralni nadzorni sistem za daljinsko vodenje in nadzor objektov (CNS) ima za obdobje enega tedna (168 ur) zbrane in zajete podatke višin vodne gladine v posameznih vodohranih ter urne podatke pretokov posameznih črpališč.

Krmilni program črpalk in ventilov:

Podan je krmilni program črpališč, s katerim se na osnovi višine vodne gladine v posameznih vodohranih krmilijo posamezne črpalke v vodovodnem sistemu.

```
[CONTROLS]
LINK PU1 1.0000 IF NODE T1 BELOW 4.0000
LINK PU1 0.0000 IF NODE T1 ABOVE 6.3000
LINK PU2 1.0000 IF NODE T1 BELOW 2.5000
LINK PU2 0.0000 IF NODE T1 ABOVE 4.5000
LINK V2 open IF NODE T2 BELOW 0.5000
LINK V2 closed IF NODE T2 ABOVE 5.5000
LINK PU4 1.0000 IF NODE T3 BELOW 3.0000
LINK PU4 0.0000 IF NODE T3 ABOVE 5.3000
LINK PU5 1.0000 IF NODE T3 BELOW 1.0000
LINK PU5 0.0000 IF NODE T3 ABOVE 3.5000
LINK PU6 1.0000 IF NODE T4 BELOW 2.0000
LINK PU6 0.0000 IF NODE T4 ABOVE 3.5000
LINK PU7 1.0000 IF NODE T4 BELOW 3.0000
LINK PU7 0.0000 IF NODE T4 ABOVE 4.5000
LINK PU8 1.0000 IF NODE T5 BELOW 2.5000
LINK PU8 0.0000 IF NODE T5 ABOVE 4.5000
LINK PU10 1.0000 IF NODE T7 BELOW 2.5000
LINK PU10 0.0000 IF NODE T7 ABOVE 4.8000
LINK PU11 1.0000 IF NODE T7 BELOW 1.0000
LINK PU11 0.0000 IF NODE T7 ABOVE 3.0000
```

Slika 3: Obratovalna pravila: krmilni program črpalk in ventilov
(Ostfeld et al., 2012)

Meritve na hidrantih:

Meritve so se izvajale v večernih urah in ločeno za posamezno tlačno cono. Osnovna vozliščna poraba (ne upošteva se pretoka požarne obremenitve) v času izvajanja meritev se le v grobem ujema z osnovno porabo po vozliščih v času trajanja 1. ure posredovane serije podatkov SCADA.

2 PREGLED HIDRAVLIČNIH ZAKONITOSTI

Zaradi kompleksnosti matematičnega opisa dinamike toka realne tekočine se za primer hidravlike vodovodov vpeljejo določene poenostavitve:

- voda je nestisljiva tekočina,
- tok je stacionaren, kar pomeni, da se v vsaki točki poljubnega prečnega prereza tako tlak kakor hitrost tekočine s časom ne spreminjata; spreminjata se le po prostoru (Steinman, 1999),
- tok v cevi je pod tlakom, zato voda zapolnjuje celotno površino prečnega prereza cevi.

Vpliv posameznega elementa vodovodnega sistema na vse sosednje elemente, s katerimi je le-ta povezan, lahko povežemo s kontinuitetno in energijsko enačbo ter robnimi pogoji, s pomočjo katerih kvantificiramo vrednosti tlakov in pretokov sistema.

2.1 Zakon o ohranitvi mase – kontinuitetna enačba

Zakon o ohranitvi mase izhaja iz pogoja, da je sprememba mase tekočine v nekem volumnu enaka razliki dotoka in iztoka na površini volumna. Za enodimenzijski tok (na primer tok v cevi), kjer prevladuje le ena komponenta hitrosti (vzdolž smeri osi cevovoda), lahko kontinuitetno enačbo zapišemo tako, da izberemo smer koordinatnega sistema kolinearno s smerjo toka. Kontrolni volumen je tako del elementarne tokovne cevi, zato ni pretoka skozi ostenje. Osnovna enačba se tako glasi (Steinman, 1999):

$$\frac{\partial(v_s \cdot S)}{\partial s} = 0, \quad (1)$$

kjer je s "s" označena smer naravne koordinate (smer tokovnice), površina tokovne cevi pa s "S". Z integriranjem enačbe (1) in ob predvidevanju, da se gostota tekočine lahko spreminja $\rho = \rho(s, t)$, dobimo splošno kontinuitetno enačbo po (Steinman, 1999):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho}{v} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) = 0. \quad (2)$$

Za stacionarni tok $\partial Q / \partial s = 0$ in nestisljivo tekočino $\rho = const.$ se izraz iz zgornje enačbe poenostavi v (Steinman, 1999):

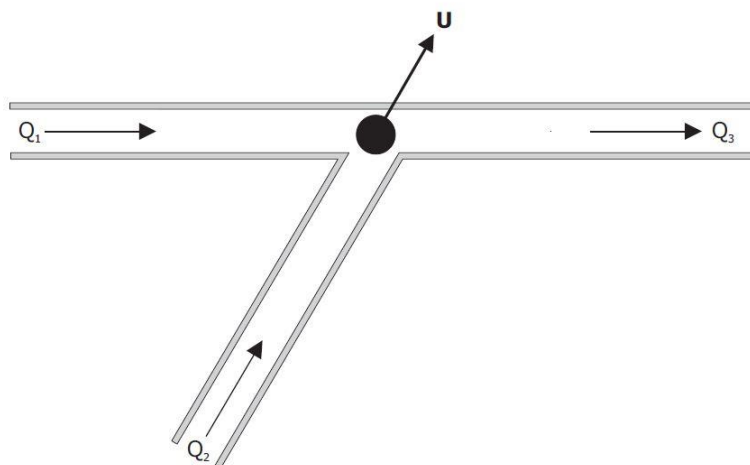
$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = v_i \cdot S_i \quad (3)$$

Zakon o ohranitvi mase lahko s pridom uporabimo pri izračunu masne bilance vodovodnega sistema. Količina vode, ki vstopi v cev, mora tudi iz nje izteči, zato lahko za poljubno vozlišče, v katerem se stika n št. cevi, zapišemo enačbo bilance po (Walski et al., 2003) kot:

$$\sum_{i=1}^n Q_i - U = 0, \quad (4)$$

kjer je Q_i = dotok i-te cevi v vozlišče [l/s] in

U = iztok iz vozlišča v obliki porabe oziroma vodnih izgub [l/s].



Slika 4: Shematski prikaz uporabe zakona o ohranitvi mase za poljubno vozlišče
(Walski et al., 2003: poglavje 2, str. 50)

2.2 Zakon o ohranitvi energije

Zakon o ohranitvi energije pove, da na spremembo celotne energije v sistemu vplivata dovedena oziroma odvedena toplota in sistemu odvzeta oziroma dodana energija zaradi dela, ki ga sistem opravi na okolico (Steinman, 1999):

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial A_p}{\partial t} - \frac{\partial A_{tr}}{\partial t} - \frac{\partial A_m}{\partial t}. \quad (5)$$

Delo A lahko razdelimo na delo normalnih tlakov A_p , delo strižnih sil A_{tr} in mehansko delo A_m . Za enodimenzijski tok lahko privzamemo, da so parametri dovolj enakomerno razporejeni po prerezu in da zato lahko računamo s povprečnimi količinami po prerezu (na primer po prerezu cevi krožnega preseka). Za poljubno izbrani kontrolni volumen tako dobimo (Steinman, 1999):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{\partial A_m}{\partial t} = \rho \cdot Q \cdot \left(e_i + \frac{p}{\rho} + g \cdot z + \frac{v^2}{2} \right)_{izstop} - \rho \cdot Q \cdot \left(e_i + \frac{p}{\rho} + g \cdot z + \frac{v^2}{2} \right)_{vstop}. \quad (6)$$

V večini praktičnih primerov v hidrotehniko velja, da sta obe količini na levi enaki nič. Upoštevamo, da je notranja energija na enoto mase e_i (povezana je z lokalno temperaturo) tudi oblika nepovračljive energije. Iz takih predvidevanj dobimo znano energijsko enačbo, ki

jo lahko za primer stalnega toka tekočine v cevi za odsek med dvema točkama zapišemo kot:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \sum \text{nepovračljive energije} , \quad (7)$$

kjer je p = tlak [N/m²],

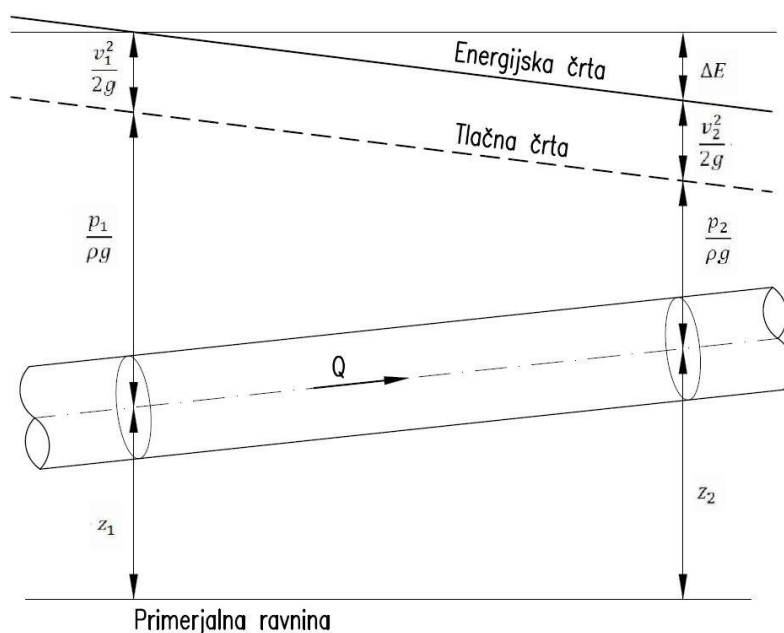
ρ = gostota tekočine [kg/m³],

v = hitrost toka [m/s],

z = višina težišča prereza glede na primerjalno višino [m] in

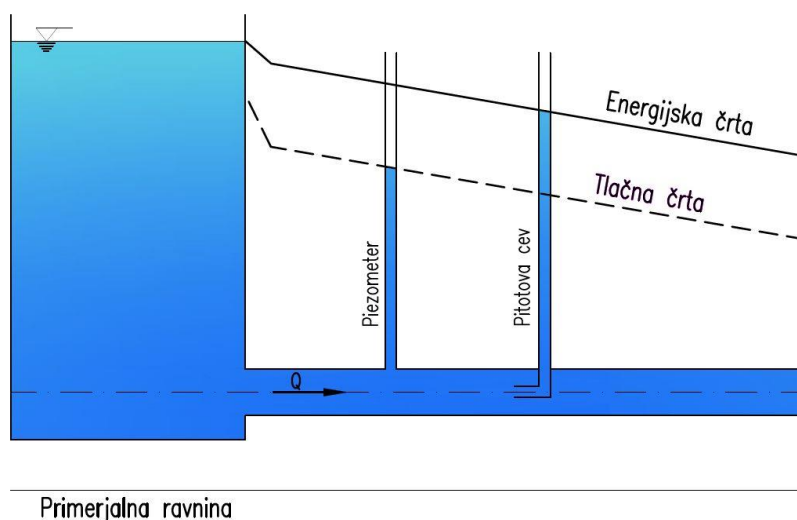
g = gravitacijski pospek [9,81 m/s²].

Skupna energija v danem prerezu je sestavljena iz tlačnega ($p/(\rho \cdot g)$), kinetičnega ($v^2/(2 \cdot g)$) in potencialnega dela (z). Energijska enačba nam pove, da se pri toku realne tekočine sestava celotne energije spreminja, zato se vzdolž toka vedno večji del celotne energije spreminja v nepovračljivo obliko energije (npr. toplotno energijo tekočine) (Steinman, 1999).



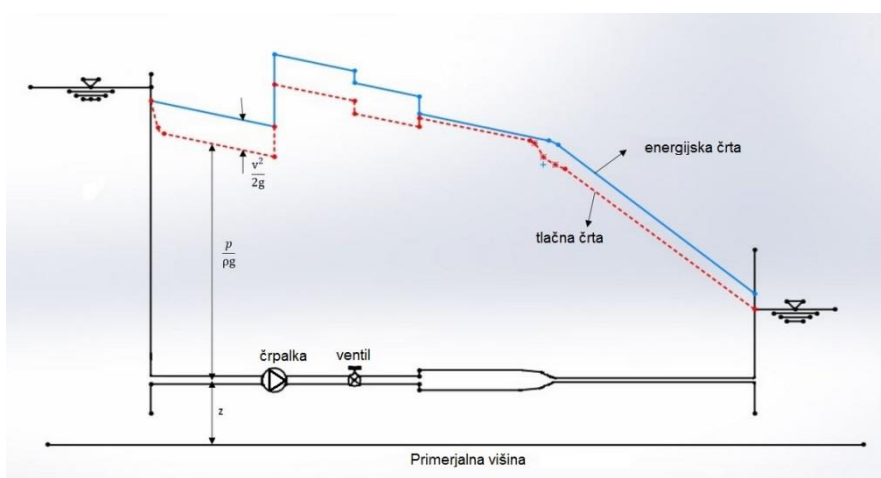
Slika 5: Grafični prikaz zakona o ohranitvi energije na odseku cevi
Povzeto po (PipeFlow, 2016a)

Razmere v sistemu lahko po (Jecl, 2014) grafično ponazorimo z uvedbo pojma energijske in tlačne črte. Na sliki 6 je energijska črta predstavljena kot vsota tlačne, kinetične in potencialne energije v danem prerezu cevi. V naravi je prikazana z višino gladine vodnega stolpca pri merjenju s Pitotovo cevjo. Tlačna črta pa predstavlja seštevek tlačnega in potencialnega dela energije in ponazarja velikost tlaka v danem prerezu cevi oziroma višino proste gladine vode v piezometrični cevi pri stiku z atmosferskim tlakom. Tlačno črto imenujemo tudi piezometrična višina.



Slika 6: Grafični prikaz energijske in tlačne črte
Povzeto po (Jecl, 2014)

Energjska in tlačna črta v vodohranu sovpadata, saj zaradi mirujoče proste gladine vode ($v = 0$) odpade kinetični del energije. Na sliki 7 lahko opazimo, da je v ceveh z manjšim premerom kinetični del energije večji. Po kontinuitetni enačbi (3) namreč manjši premer cevi prisili pretok v večje hitrosti (Ghimire, 2008).



Slika 7: Praktičen primer izrisa energijske in tlačne črte
(Wikimedia Commons, 2016)

2.3 Energjske izgube

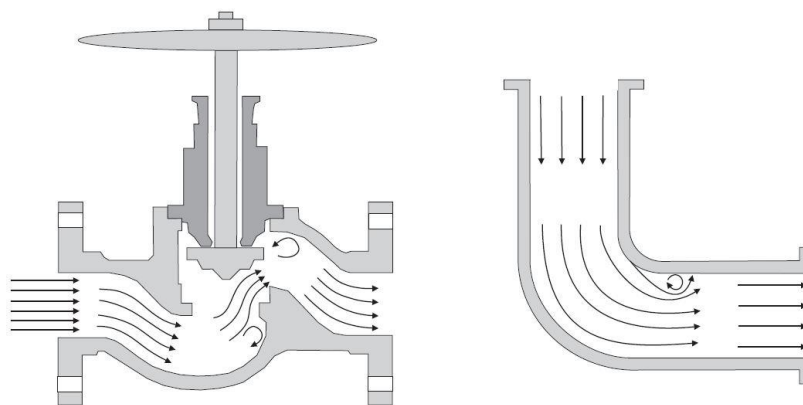
Optimalno delovanje sistemov in racionalizacija stroškov (npr. porabljene električne energije) je prednostna naloga vsakega inženirja. Pri hidravličnih izračunih praktičnih primerov je zato zelo pomembno upoštevati in seveda določiti tisti del energije, ki se pri trenju toka vode po ceveh pretvori v nepovračljivo obliko oziroma v energjske izgube. Po (Steinman, 1999) je energija seveda neuničljiva in se ne izgublja, pretvori se le v obliko, ki je za hidrotehnično izrabo neizkoriščena oziroma izgubljena.

Izgube energije zaradi premagovanja trenja vzdolž toka imenujemo trenjske ali linijske izgube in naraščajo proporcionalno z dolžino toka. V ceveh krožnega preseka se linijske izgube najpogosteje določajo skladno s (Steinman, 1999), z znano Darcy-Weisbachovo enačbo:

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

kjer je ΔE_{tr} = linijske izgube zaradi trenja [m],
 λ = koeficient trenja (po Darcy-Weisbachu) [/],
 L = dolžina vodovodne cevi [m],
 d = premer vodovodne cevi [m],
 v = hitrost vode v cevi [m/s] in
 g = gravitacijski pospešek [9,81 m/s²].

Zožitve oziroma razširitve in vse spremembe smeri tokovnic, ki nastanejo zaradi posledic lokalnih motenj v toku (npr. tok skozi zaporne armature in fazonske kose, iztok iz cevi v vodohran, ipd.), so vzrok nastanka dodatnih izgub.



Slika 8: Nastanek vrtničenja toka in lokalnih izgub za primer zaporne armature in fazonskega kosa (Walski et al., 2003: poglavje 2, str. 40)

Vrtničenja v toku, kot so ponazorjena na sliki 8, pripomorejo k zmanjševanju energije osnovnega toka. Imenujemo jih lokalne izgube ΔE_{lok} in jih izračunamo s pomočjo spodnje enačbe po (Steinman, 1999):

$$\Delta E_{lok} = \xi_{lok} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}, \quad (9)$$

kjer je ΔE_{lok} = lokalne izgube [m],
 ξ_{lok} = koeficient lokalne izgube [/],
 v = hitrost vode v cevi [m/s] in
 g = gravitacijski pospešek [m/s²].

Z uporabo superpozicije lahko celotno izgubo energije ΔE_{tot} izračunamo kot vsoto linijskih in lokalnih izgub vzdolž opazovanega odseka toka po izrazu:

$$\Delta E_{tot} = \sum_{i=1}^n \Delta E_{tr,i} + \sum_{j=1}^m \Delta E_{lok,j} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \frac{L_i}{d_i} \cdot \frac{v_i^2}{2 \cdot g} + \sum_{j=1}^m \xi_{lok,j} \cdot \frac{v_j^2}{2 \cdot g} . \quad (10)$$

Zgornja enačba, kot jo navaja (Steinman, 1999), velja le, če se lokalne motnje med seboj ne prepletajo in so izvori motenj na zadostni medsebojni razdalji.

Koeficient lokalne izgube ξ_{lok} je odvisen od geometrijske karakteristike lokalne motnje tokovnic in se ga praviloma določa na eksperimentalen način.

Koeficient trenja λ je odvisen od režima toka, Reynoldsovega števila in relativne hrapavosti ostenja cevi ε/d in se izvednoti z znano Colebrook-White enačbo:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \cdot \left[\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{d} \cdot \frac{1}{3,71} \right] , \quad (11)$$

kjer je Re = Reynoldsovo število [/],

ε = višina hrap ostenja vodovodne cevi [mm] in

d = premer vodovodne cevi [mm].

Reynoldsovo število, s katerim ugotavljamo režim toka, izračunamo po izrazu:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} , \quad (12)$$

kjer je v = hitrost vode v cevi [m/s],

d = premer vodovodne cevi [m] in

ν = kinematična viskoznost vode [$1,14 \cdot 10^{-6}$ m²/s (pri 15°C)].

Če je $Re < Re_{krit} \approx 2300$, imamo opravka z laminarnim tokom v cevi.

Če je $Re > Re_{krit} \approx 2300$, imamo opravka s turbulentnim tokom v cevi.

Ker iz enačbe (11) ne moremo direktno izračunati koeficienta trenja λ , saj le-ta nastopi na obeh straneh enačbe (rešujemo iterativno oz. z uporabo matematičnih programov), se v praksi uporablja Moodyjev diagram (glej sliko 9), s katerim zajamemo celoten spekter dogajanja v cevovodih. Po (Steinman, 1999) ločimo štiri režime oziroma območja:

- območje laminarnega režima toka ($Re < 2000$):

Koeficient trenja je neodvisen od višine hrap in se linearno spreminja po enačbi, ki jo dobimo, če enačimo Darcy-Weissbachovo enačbo z enačbo Hagen-Poiseuille za laminarni tok:

$$\Delta E_{tr} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{32 \cdot \nu \cdot L \cdot v}{g \cdot d^2} \Rightarrow \lambda = \frac{64}{Re} ,$$

- območje izrazite turbulence – turbulentno hrapav režim toka ($Re > 4000$):

Tudi pri pogojih turbulentnega režima toka se ob ostenju cevi ohranja tanek laminarni mejni sloj. Če je višina hrap večja od debeline mejnega laminarnega sloja, potem se vrtinčenja odtrgajo od nepravilnosti ostenja (hrap) in povzročijo nastanek izrazite turbulence. Velikosti hrap ε so neodvisne od premera cevi, zato bo cev z manjšim notranjim premerom izkazala večjo relativno hrapavost in posledično tudi večji koeficient trenja λ od cevi enakih materialnih lastnosti in večjega premera. Koeficient trenja je v tem režimu odvisen izključno od relativne hrapavosti:

$$\lambda = \lambda\left(\frac{\varepsilon}{d}\right),$$

- območje med laminarnim in turbulentno hrapavim režimom toka ($2000 < Re < 4000$):

V prehodnem (tranzicijskem) območju se laminarni in turbulentni režim naključno izmenjujeta (polno razvit ni ne laminarni kot tudi ne turbulentni režim toka). Z večanjem Reynoldsovega števila se debelina mejnega laminarnega sloja zmanjšuje, tj. vedno več hrap štrli nad mejnim laminarnim slojem, vse dokler Reynoldsovo število ne doseže določene vrednosti, pri kateri je za posamezno razmerje ε/d vpliv viskoznega trenja zanemarljivo majhen v primerjavi z vztrajnostnimi silami vrtinčenja, oziroma preidemo iz tranzicijskega v območje izrazite turbulence. Koeficient trenja je v prehodnem območju odvisen tako od Reynoldsovega števila kot od relativne hrapavosti:

$$\lambda = \lambda\left(Re, \frac{\varepsilon}{d}\right),$$

- krivulja hidravlično gladkih cevi:

O hidravlično gladkih ceveh govorimo takrat, ko je višina hrap manjša od debeline mejnega laminarnega sloja, ki se zadržuje ob ostenju cevi, zato na razvoj turbulenc ne vplivajo. Pri hidravlično gladkih ceveh je koeficient trenja odvisen le od viskoznih sil in ga lahko izračunamo s pomočjo Blasiusove enačbe (Kiijärvi, 2011):

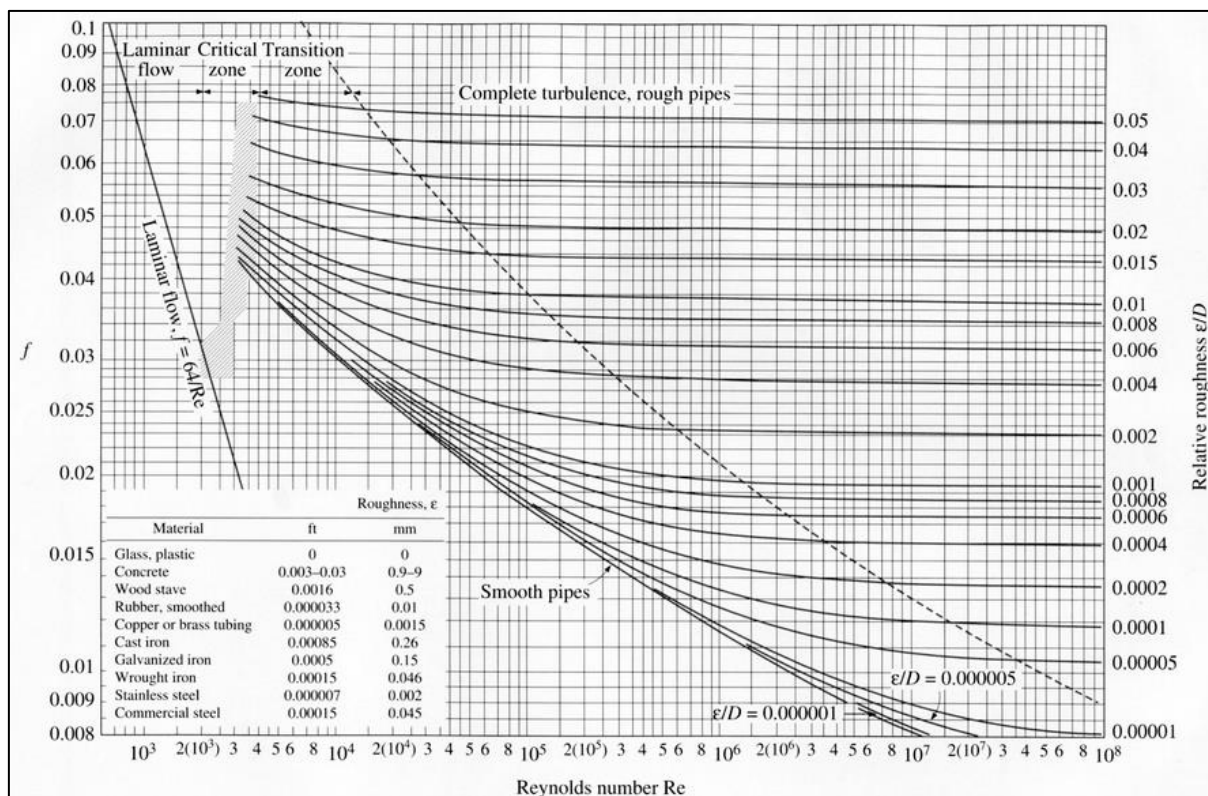
$$\lambda = \lambda(Re), \quad \lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}.$$

Veliko avtorjev je izvedlo aproksimacijo Colebrook-Whiteove enačbe za turbulentni režim toka (Genić et al., 2011), vendar sta se zaradi enostavnosti pri ročnem izračunu in sorazmerno dobrih statističnih parametrov v praksi najboljše prijeli Swamee-Jainova enačba v eksplicitni obliki:

$$\lambda = 0,25 \cdot \left[\log \left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2}, \quad (13)$$

in še posebej Haalandova enačba:

$$\lambda = \left(-1,8 \cdot \log \left[\left(\frac{\varepsilon/d}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \right)^{-2}. \quad (14)$$



Slika 9: Moodyjev diagram za določitev Darcy-Weissbachovega koeficienta trenja (Mecanica de Fluidos, 2016)

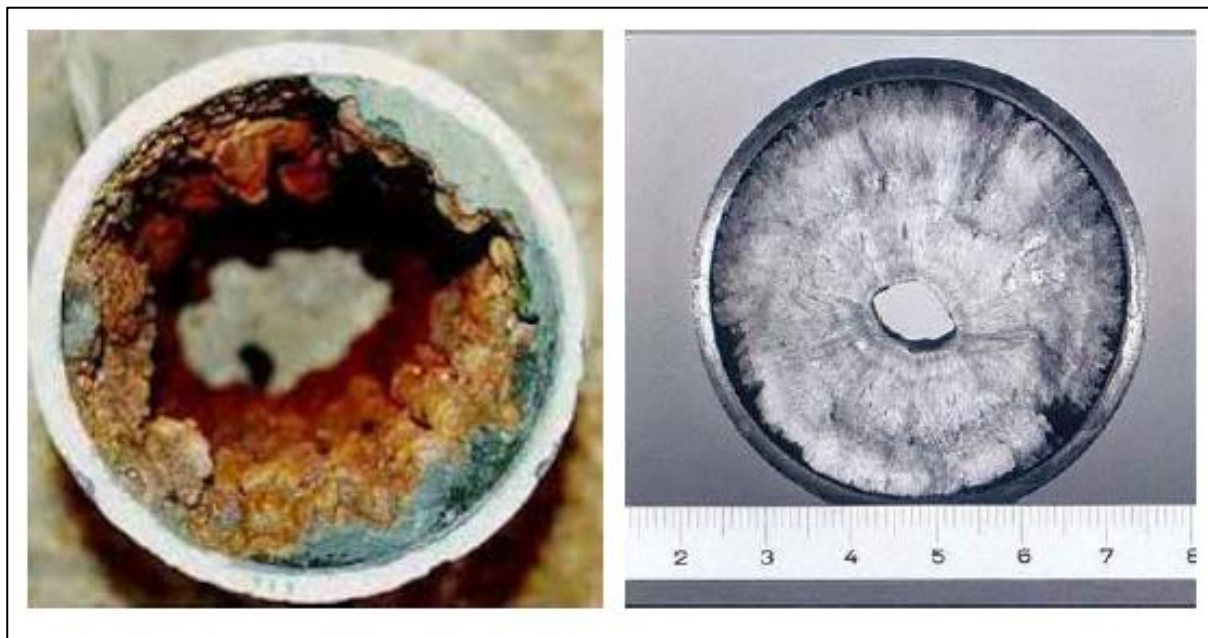
Poleg Darcy-Weissbachove enačbe za izračun linijskih izgub poznamo še empirično določen Hazen-Williamsov izraz, ki ga določimo z izrazom po (Walski et al., 2003):

$$h_l = C_f \cdot \frac{Q^{1,852} \cdot L}{C^{1,852} \cdot d^{4,87}} \quad (15)$$

- kjer je h_l = linijske izgube zaradi trenja [m],
 C_f = faktor pretvorbe enot; za SI enote = 10,67 [/],
 Q = pretok [m^3/s],
 L = dolžina vodovodne cevi [m],
 C = Hazen-Williamsov C-koeficient [/] in
 d = premer vodovodne cevi [m].

S Hazen-Williamsovo enačbo na enostavnejši način izračunamo hidravlične izgube, saj C-koeficient ni odvisen od Reynoldsovega števila (posledično tudi ne od hitrosti, kinematične viskoznosti in temperature vode), ki sicer znatno vpliva na stopnjo turbulence v cevi. Zaradi svoje empirične narave ima zato Hazen-Williamsova enačba, kot navaja (PipeFlow, 2016b), določeno območje veljavnosti. Velja za turbulenten režim toka in v primeru, če se po ceveh s premerom večjih od 50 mm pretaka voda s temperaturo okrog 15°C (oziroma tekočina s kinematično viskoznostjo $1,14 \cdot 10^{-6} m^2/s$) ter hitrosti v ceveh ne presegajo vrednosti 3 m/s. Za natančnejši izračun hidravličnih izgub, oziroma ko se nahajamo zunaj območja veljavnosti, je primernejša Darcy-Weissbachova enačba.

V procesu staranja zaradi galvanskih in kemičnih reakcij (proces tuberkulacije), ki imajo za posledico rjavenje cevi in nalaganje usedlin rje in vodnih sedimentov (glej sliko 10), se hidravlične razmere v cevi lahko bistveno poslabšajo. Zmanjšan efektivni prerez in povečana hrapavost ostenja tako pripomoreta k slabši prevodni sposobnosti in večjim linijskim izgubam v starih in dotrajanih vodovodnih ceveh.



Slika 10: Proces staranja vodovodnih cevi – nalaganje usedlin rje in sedimentov
(Townley Brothers, 2016)

3 UMERJANJE VODOVODNEGA SISTEMA

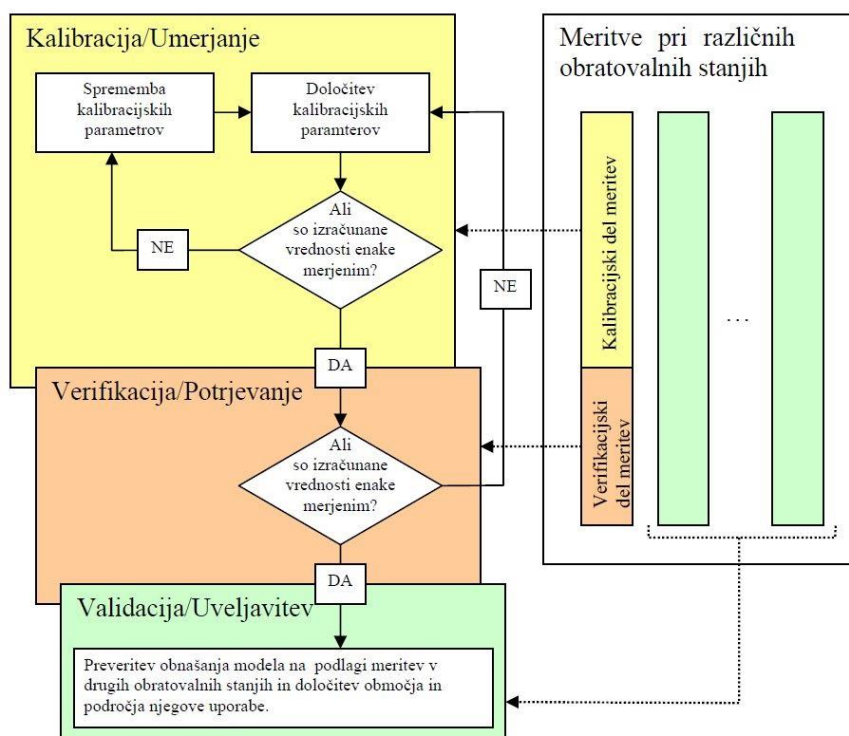
3.1 Osnove

Pri reprezentaciji oziroma opisovanju stvarnih karakteristik vodovodnega omrežja, kjer se s hidravličnimi izračuni skušamo približati dejanskim razmeram v sistemu, lahko zaradi različnih razlogov pride do odstopanj. Šantl (2007) navaja sledeče možne vzroke napak:

- napačni vhodni podatki (netočne meritve),
- neznana porazdelitev (alokacija) porabe vodovodnega sistema,
- neznane vrednosti koeficientov hrapavosti cevi,
- človeška zmotljivost,
- napačni podatki obratovanja vodovodnih elementov (stare črpalke, ipd.),
- topografske nedoslednosti (višinske kote vodohranov, premeri in dolžine cevi, ipd.)
- pomanjkljivi podatki iz uradnih evidenc komunalne infrastrukture,
- neustrezno poenostavljanje hidravličnega modela v postopku skeletizacije.

Na podlagi odzivnosti modela, kjer s sprotnim analiziranjem in odpravljanjem možnih virov napak lahko skladno s (Šantl, 2007) kalibracijo opišemo kot postopek pridobivanja najboljšega izbora podatkov, s pomočjo katerih se hidravlični izračuni postopno približujejo vrednostim meritev.

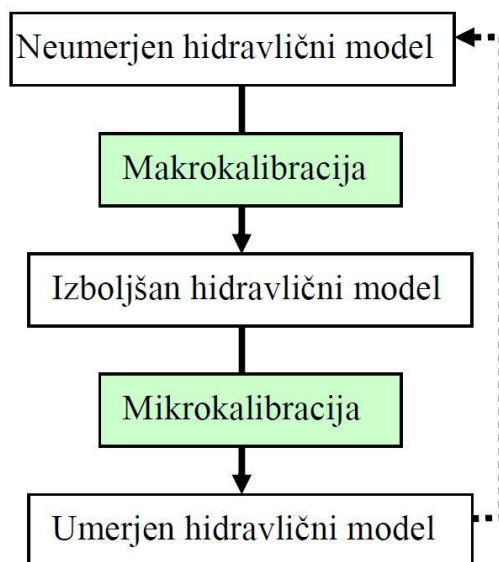
Postopek kalibracije je sestavljen iz treh faz, prikazanih na spodnji sliki, in je v nadaljevanju povzet po (Šantl, 2007):



Slika 11: Shematski prikaz umerjanja hidravličnega modela vodovodnega omrežja (Šantl, 2007: str. 45)

Kalibracija se izvede na podlagi ustreznih meritev, s pomočjo katerih prilagajamo parametre računskega modela, s čimer želimo izboljšati ujemanje med izračunanimi in merjenimi vrednostmi. S pomočjo neodvisnega, v procesu kalibracije neuporabljenega niza meritev iz enakega obratovalnega stanja, se v fazi verifikacije nato preveri in potrdi stopnjo ujemanja s stvarnim sistemom. Umerjanje se zaključi s postopkom validacije, ki določi in potrdi področje, v katerem model z želeno natančnostjo izkazuje stvarni sistem (Šantl, 2007).

Postopek umerjanja hidravličnih modelov se lahko označi kot dvostopenjski proces (Šantl, 2007). Začetni neumerjeni hidravlični sistem preide s pomočjo makrokalibracije v izboljšan hidravlični model. Proces skuša odpravljati pogoste grobe napake v delovanju in (ne)povezanosti hidravličnega modela. Pod slednje prištevamo napačne nastavitve atributov hidravličnih elementov (krivulje črpanja, premeri cevi, nastavitve obratovalnih pravil črpalk in ventilov, ipd.), napačno topologijo sistema (kote vozlišč, povezanost sistema, orientacija ventilov in črpalk, ipd.) in napačne robne pogoje (premer/polmer, začetna, minimalna in maksimalna višina vodohranov, kote zajetij, ipd.).

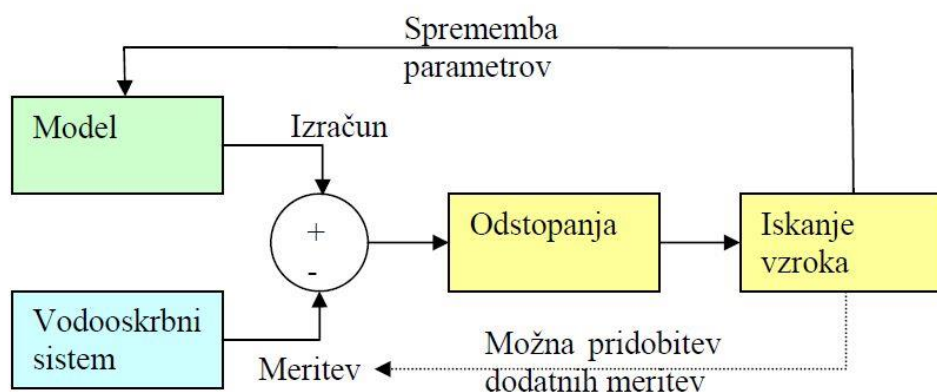


Slika 12: Dvostopenjski proces umerjanja
(Šantl, 2007: str. 46)

Šele po uspešno opravljeni prvi fazi lahko na podlagi izboljšanega hidravličnega modela preidemo v fazo mikrokalibracije, kjer se z naprednimi orodji (genski algoritmi, ipd.) umerijo hidravlične veličine, za katere ni na voljo zadostnega števila meritev (koeficienti hrapavosti – veliko število cevi, osnovna poraba vozlišč).

4 MAKROKALIBRACIJA HIDRAVLIČNEGA MODELA MESTA D

Obnavljanje in prepoznavanje večjih razhajanj med hidravličnimi izračuni in podatki, pridobljenimi s pomočjo meritev na dejanskem vodovodnem sistemu, je ključna naloga postopka grobega umerjanja oziroma makrokalibracije.



Slika 13: Grafični prikaz iteracijskega pristopa poskus – napaka v postopku makrokalibracije (Šantl, 2007: str.57)

Makrokalibracija je postopek, v katerem se iterativno primerja rezultate hidravličnih izračunov modela vodooskrbnega sistema z dejanskimi meritvami, pri tem se sproti ugotavlja izvor odstopanj ali napake, izvede posodobitev parametrov in ponovno primerja rezultate izračunov z meritvami. Ocenjuje se, da se morajo izračuni izboljššanega hidravličnega modela ujemati z meritvami stvarnega sistema znotraj meja 30 odstotkov (Šantl, 2007). Postopek pridobivanja izboljššanega modela je popisan v pričujočem poglavju.

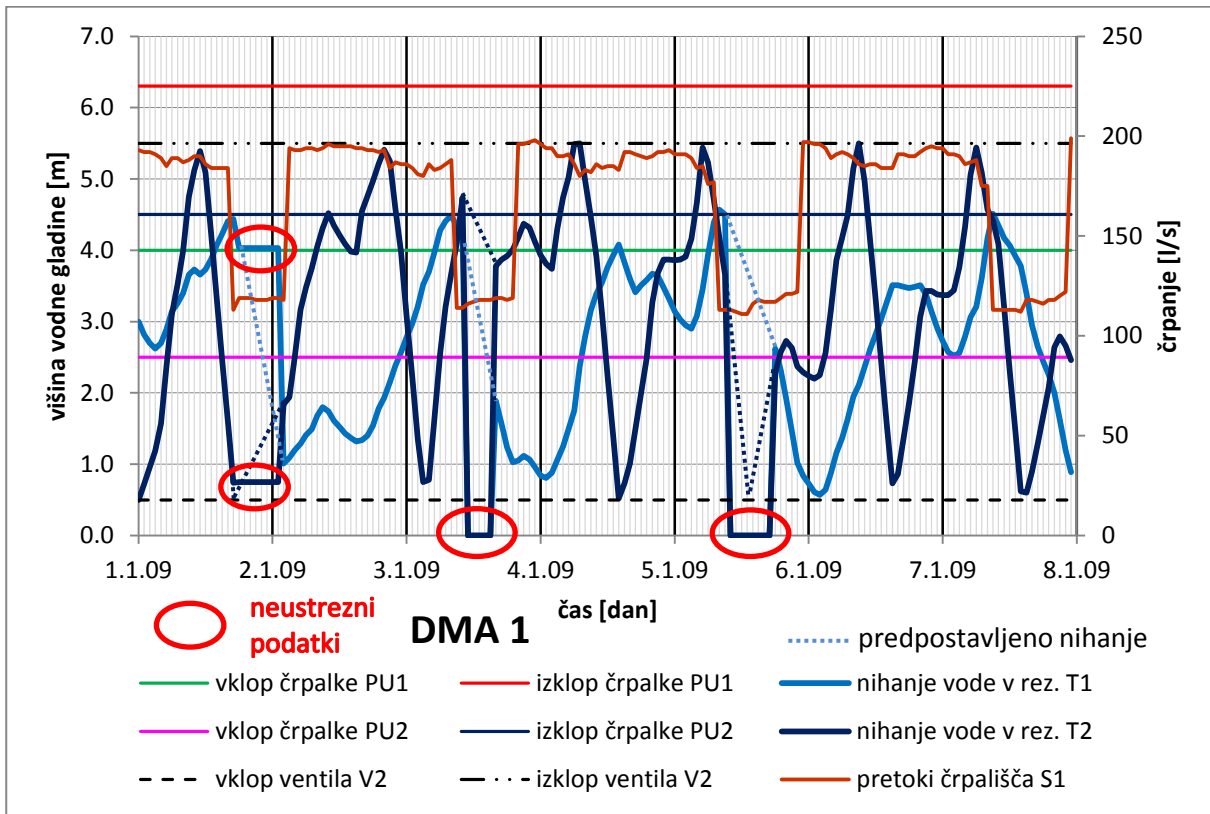
4.1 Obdelava in ovrednotenje vhodnih podatkov

Podatke centralnega nadzornega sistema (CNS) moramo skrbno preučiti in izločiti morebitne nepravilnosti, ki se lahko pojavijo zaradi odpovedi računalniškega sistema, izpada elektrike, napak pri prenosu podatkov, napak merilnih inštrumentov, ipd.

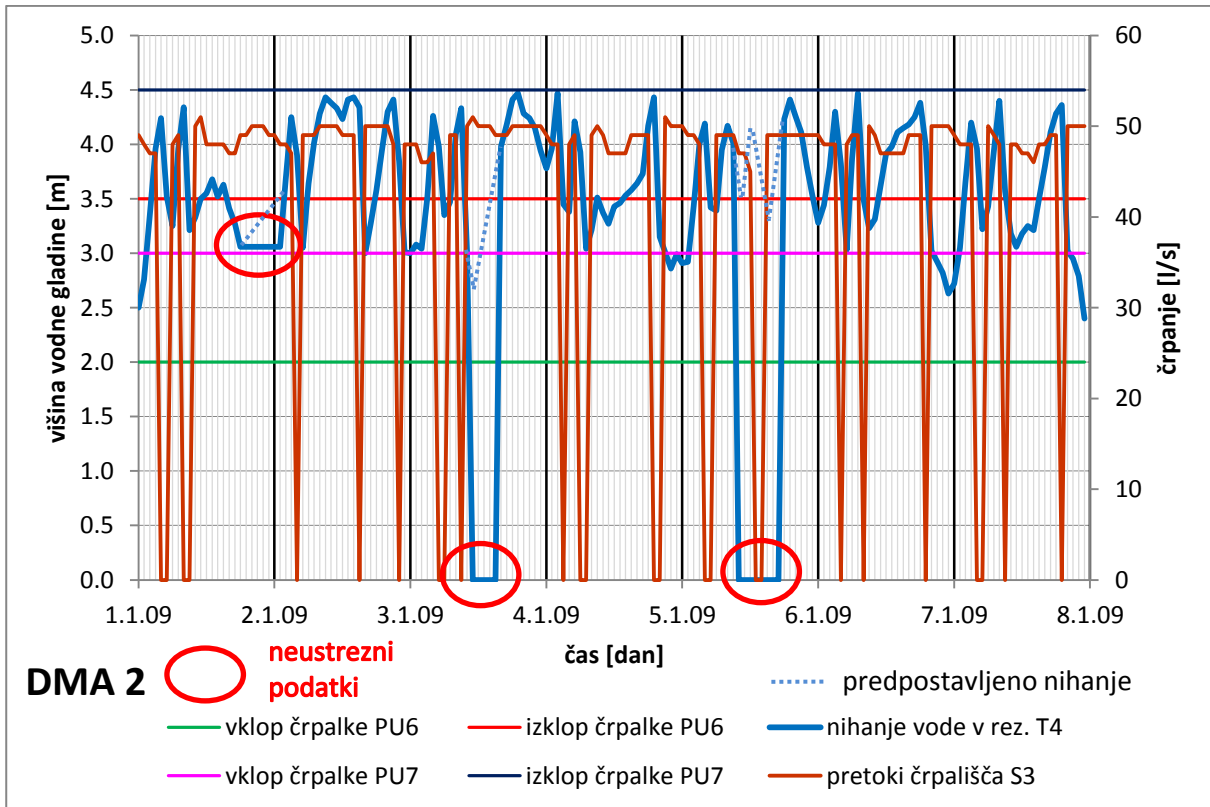
Zaradi lažjega pregleda in ovrednotenja podatkov, ki jih imamo na voljo in s katerimi nameravamo izvesti kalibracijo vodovodnega sistema, je ugodnejše, če podatke prikažemo v časovno odvisnem diagramu. Na tak način se ognemo nepreglednim tabelam, obenem lahko dokaj enostavno odkrijemo podatkovne nepravilnosti, dnevne časovne vzorce praznjenja in polnjenja vodo hranov ter njihovo časovno ujemanje z obratovanjem posameznega črpališča.

Neustrezni oz. manjkajoči podatki opazovanega parametra se na grafu odražajo kot hipen upad vrednosti na ničelno vrednost (izpad sistema) ali kot ravna črta s fiksno neničelno vrednostjo v določenem časovnem obdobju. V slednjem primeru ob pojavitvi napake si CNS zapomni zadnjo vrednost merjene količine in jo drži v spominu ves čas trajanja napake, vse dokler se podatkovna baza ne osveži z novo vrednostjo.

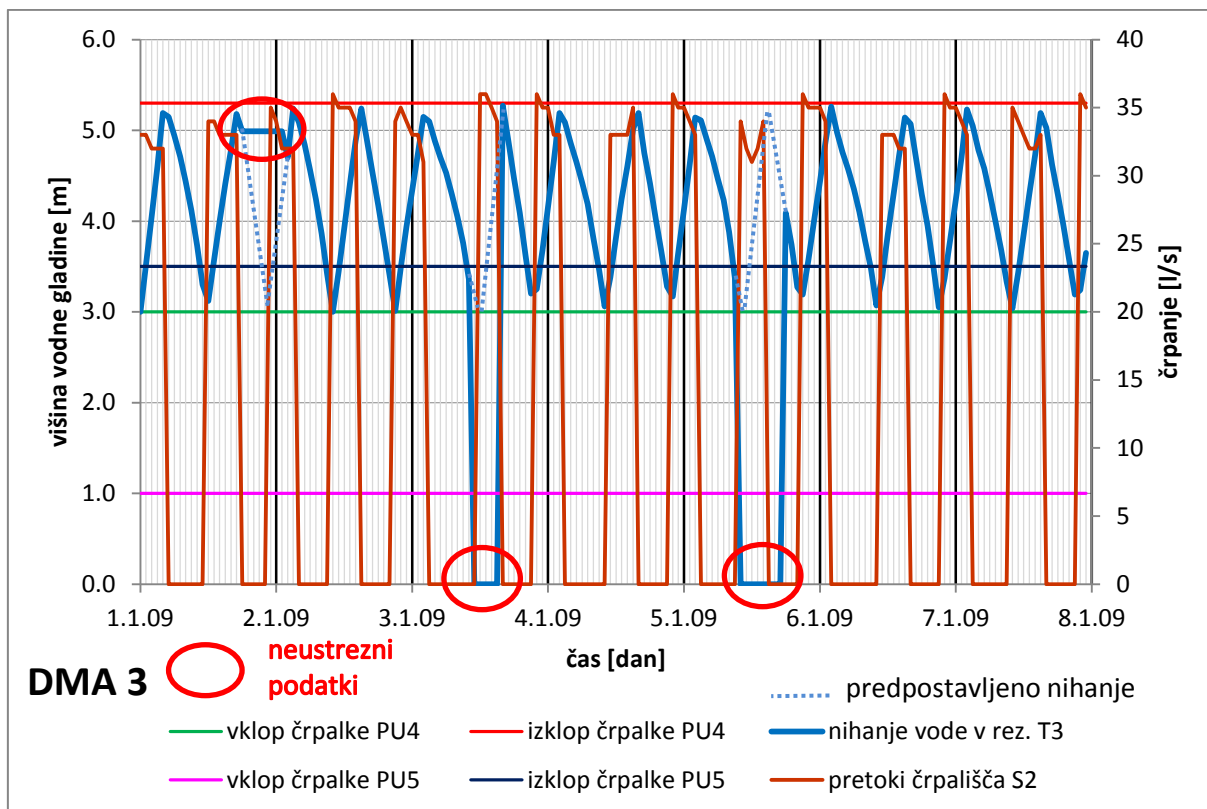
V spodnjih diagramih je za celotno vodovodno območje mesta D grafično prikazano sedemdnevno (168-urno) nihanje vodne gladine v vodo hranah, črpalne sposobnosti črpališč in nivoje vklopa/izklopa črpalk za posamezno tlačno cono (DMA1-DMA5).



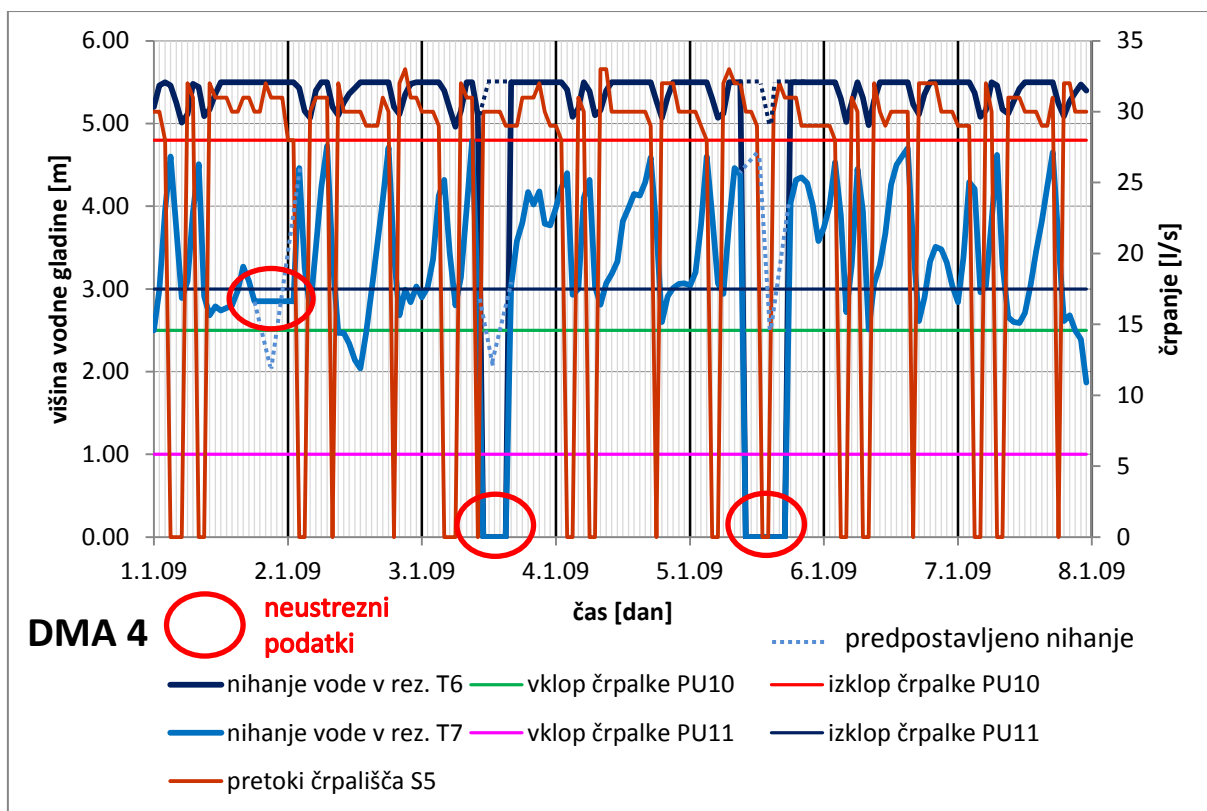
Grafikon 1: Nihanje vodne gladine, črpanje in prikaz vklopa/izklopa črpalk v tlačni coni DMA1



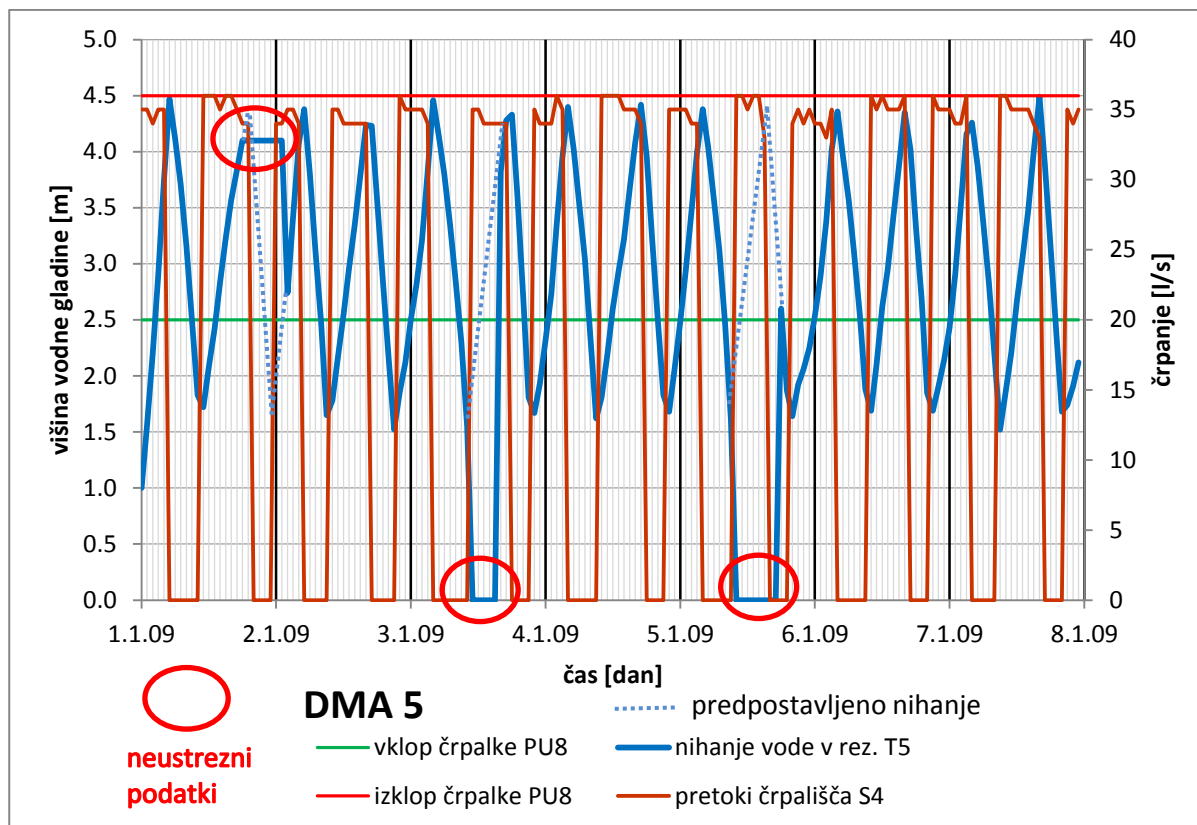
Grafikon 2: Nihanje vodne gladine, črpanje in prikaz vklopa/izklopa črpalk v tlačni coni DMA2



Grafikon 3: Nihanje vodne gladine, črpanje in prikaz vklopa/izklopa črpalke v tlačni coni DMA3



Grafikon 4: Nihanje vodne gladine, črpanje in prikaz vklopa/izklopa črpalke v tlačni coni DMA4



Grafikon 5: Nihanje vodne gladine, črpanje in prikaz vklopa/izklopa črpalke v tlačni coni DMA5

V bazi podatkov vodnih gladin lahko pri vseh vodohranih opazimo neustreznost podatkov v treh časovnih obdobjih, in sicer:

- v času od 1. 1. 2009 od 19. ure do 2. 1. 2009 do 1. ure so 7-urni podatki ponazorjeni z neničelno konstantno vrednostjo (vodoravna črta v daljšem časovnem obdobju),
- v času od 3. 1. 2009 od 11. ure do 4. 1. 2009 do 1. ure so 5-urni podatki ponazorjeni z nično vrednostjo (hipen upad vodne gladine v vodohranu) in
- v času od 5. 1. 2009 od 10. ure do 6. 1. 2009 do 17. ure so 8-urni podatki ponazorjeni z nično vrednostjo (hipen upad vodne gladine v vodohranu).

4.2 Predviden potek nihanja gladin vode v vodohranih

Neustrezne podatke ne moremo vključiti v naše izračune, zato jih poskušamo nadomestiti s podatki, pridobljenimi z linearno interpolacijo med vrednostjo pred nastopom napake in vrednostjo po odpravljenju le-te, oziroma poskusimo predvideti časovni potek vrednosti s pomočjo opazovanja parametra v časovnem obdobju, kjer se napaka ni pojavila in jo na osnovi srednje vrednosti znanih veličin in robnih pogojev (vklop/izklop črpalke) tudi kvantificirati. Pomagamo si lahko tudi s časovnim potekom črpanja in s predvidevanjem, da se v normalnih obratovalnih pogojih brez izjemnih dogodkov (npr. požar, lom vodovodne cevi, ...) pri obratovanju črpališča vodohran polni. V zgornjih grafih je s črtkano črto prikazano predvideno nihanje gladine vode vodohranov v časovnem obdobju, kjer nastopijo neustrezni oziroma manjkajoči podatki.

Ob podrobnem pregledu grafikona 1 do grafikona 5 lahko opazimo, da vodna gladina ponekod ne doseže mejnega nivoja, pri katerem se posamezna črpalka izklopi/vklopi, a kljub temu v naslednjem časovnem intervalu Δt voda v vodohranu upada/narašča. Ker imamo na

voljo podatke meritev ob vsaki polni uri, se nam zaradi prevelikega časovnega intervala Δt med posameznimi meritvami lahko pripeti, da spregledamo dejanski lokalni (urni) minimum ali maksimum, oziroma kot je razvidno iz grafikona 6, le-ti nastopijo znotraj obravnavanega časovnega intervala Δt (kar se odraža kot stopničasto porezan graf). Z manjšanjem časovnega intervala Δt med posameznimi meritvami se bi vrednosti lokalnih ekstremov večale (maksimumi) oziroma manjšale (minimumi) in približevale k dejanskim vrednostim.

Pri hidravličnih izračunih in računalniških simulacijah je v primerih hitrega spreminjanja višine vodne gladine torej smotrno izbrati manjši hidravlični časovni korak, kot je čas, ki preteče med posameznimi meritvami (Bentley System Inc., 2004). V našem primeru je $\Delta t = 60$ minut, zato v nastavitvah programskega orodja Epanet za vrednost hidravličnega časovnega koraka izberemo vrednost 15 min.

Ker znotraj intervala, v katerem naj bi nastopil lokalni ekstrem, ne poznamo točnega trenutka, ko se zamenjata polnjenje in praznjenje vodohrana, si pomagamo z začetno poenostavitvijo ter časovno nihanje vodne gladine opišemo z ravno črto. Daljici, ki povezujeja točki (t_1, y_1) in (t_2, y_2) ter (t_3, y_3) in (t_4, y_4) , z enakim naklonom podaljšamo še v srednji časovni interval, to je med točkama (t_2, y_2) in (t_3, y_3) – glej grafikon 6. Navidezno presečišče predstavlja točko lokalnega ekstrema, kjer z uporabo enačb presečišča premic izračunamo njegovi koordinati:

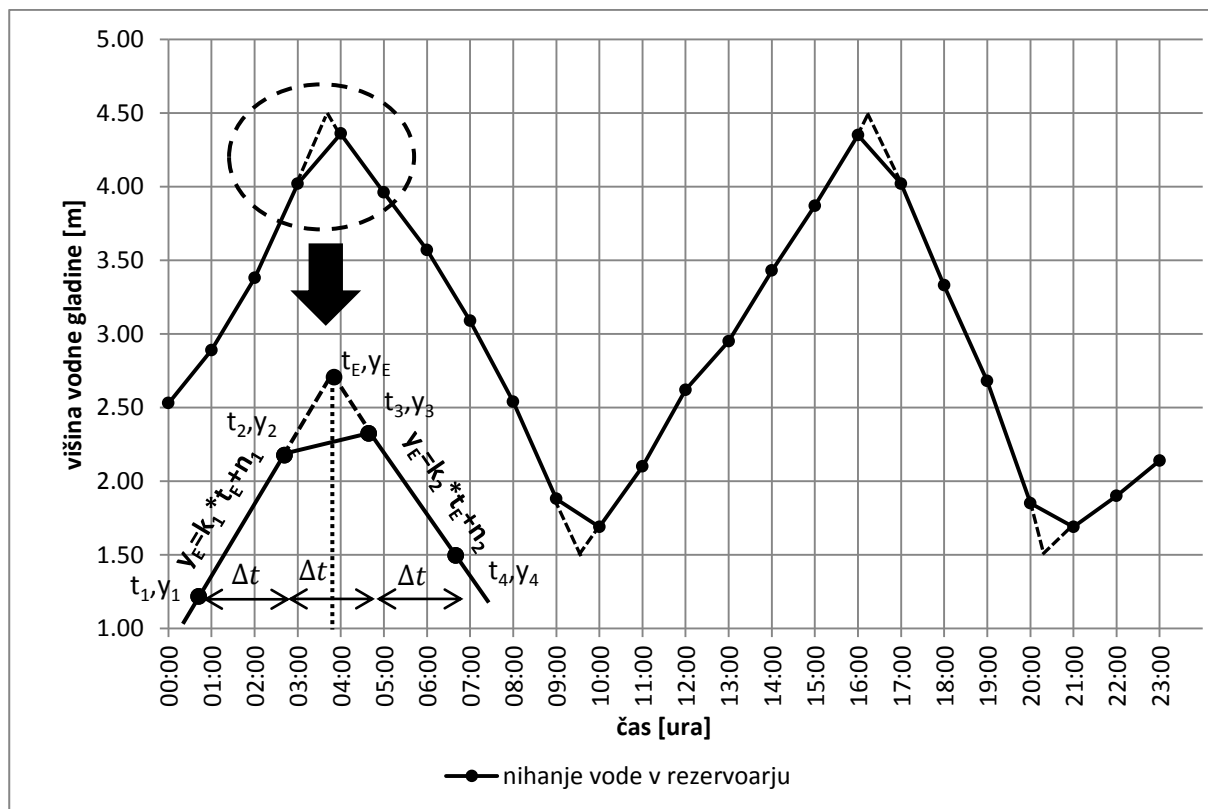
$$y_E = k_1 \cdot t_E + n_1 = k_2 \cdot t_E + n_2; \quad t_E = \frac{n_2 - n_1}{k_1 - k_2}, \quad (16)$$

kjer je t_E = čas znotraj intervala Δt (60 min.), pri katerem nastopi lokalni ekstrem [min.],
 y_E = vrednost lokalnega ekstrema (višina vodne gladine) [m],
 n_1, n_2 = vrednost, pri kateri navidezna premica seka ordinatno os in
 k_1, k_2 = smerni koeficient navidezne premice.

Če postavimo izhodišče navideznega koordinatnega sistema v točko (t_1, y_1) in upoštevamo vrednosti časov $t_1 = 0, t_2 = 60, t_3 = 120, t_4 = 180$ minut, lahko izrazimo:

$$k_1 = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}; \quad k_2 = \frac{y_4 - y_3}{t_4 - t_3}; \quad n_1 = y_1; \quad n_2 = 3 \cdot y_3 - 2 \cdot y_4, \quad (17)$$

kjer so y_1, y_2, y_3, y_4 = merjene vrednosti višine vodne gladine v vodohranu [m] ter
 t_1, t_2, t_3, t_4 = časovni intervali posameznih meritev.



Grafikon 6: Prikaz lokalnih ekstremov nihanja vodne gladine, ki nastopijo znotraj časovnega intervala

V primerih, v katerih z *enačbo* (16) dobimo prevelika odstopanja med izračunanimi vrednostmi lokalnih ekstremov y_E in nivoji, pri katerih se posamezne črpalke vklopijo/izklopijo, lahko s pomočjo navideznih premic določimo čas nastopa ekstrema t_E , tako da preverimo, kdaj dosežemo vklopno/izklopno vrednost ekstrema y_E z leve in kdaj z desne strani:

$$t_{Ei} = \frac{y_E - n_i}{k_i}; \quad i = 1, 2.$$

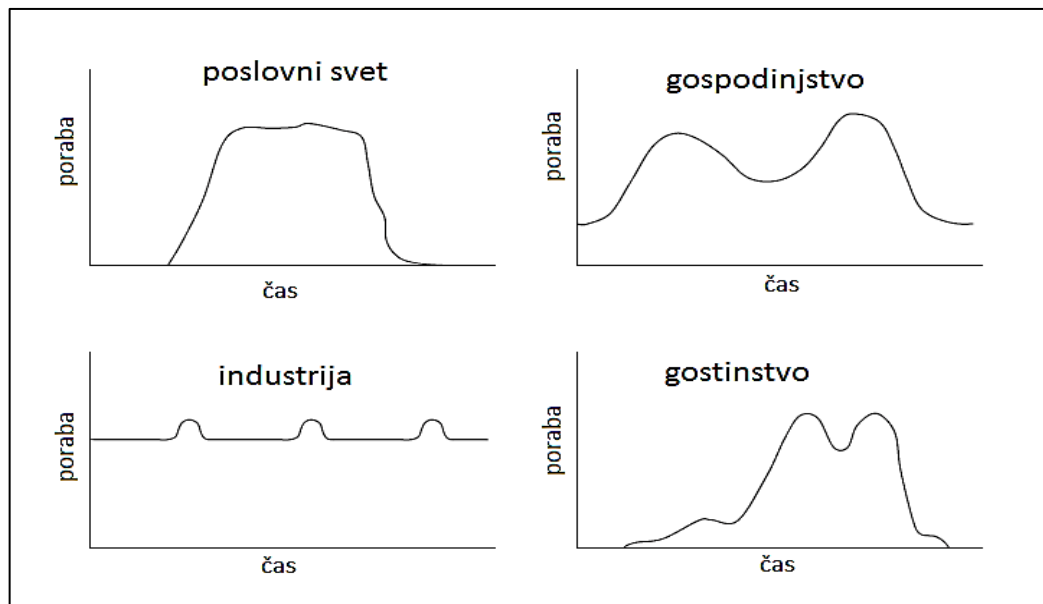
Dobljeni vrednosti (t_{E1}, t_{E2}) tvorita podinterval, ki znotraj intervala Δt zmanjša nabor možnih časov nastopa lokalnega ekstrema t_E .

Zavedati se moramo, da predvideni podatki nihanja gladin vode vodohranov in izračunani časi lokalnih ekstremov niso točni, so le začetni približki, s katerimi se lotimo obravnave masne bilance vodovoda, na osnovi katere želimo določiti začetni časovno odvisen vzorec porabe vode v posamezni tlačni coni sistema.

4.3 Masna bilanca vodovodnega sistema

Poraba vode čez dan ni konstantna in v pretežni meri niha glede na vrsto odjemalca ter čas odvzema. Seveda poznamo tudi mesečna in sezonska nihanja porabe, ki so posledica različnih dejavnikov, kot na primer letni časi, temperature, spremembe navad odjemalcev vode, hidrološke razmere vodnih virov, ipd., vendar jih v okviru diplomske naloge ne bomo obravnavali.

Vsak vodovodni sistem ima unikaten vzorec porabe, vendar pri obravnavanju tako celote, kakor tudi posamezne tlačne cone znotraj vodovodnega sistema, lahko potegnemo določene vzporednice. Spodnja slika prikazuje nekaj tipičnih vzorcev dnevne porabe glede na vrsto odjemalca, ki se lahko oskrbuje z vodo v posameznem vozlišču.



Slika 14: Vzorci dnevne porabe vode glede na vrsto porabnika
(Walski et al., 2003: poglavje 4, str. 160)

Za pisarne, vrtce, šole, obrtnike, ipd. je poraba največja ravno v času trajanja delovnika, kar je v nasprotju z gospodinjstvi, kjer je možno zaznati povečano porabo v jutranjih urah, ko se ljudje pripravljajo na delovni dan, in v popoldanskih in večernih urah, ko se vračajo nazaj domov. V industrijah, kjer je delovni proces neprekinjen, je vzorec porabe čez dan konstanten z rahlimi odstopanji v času menjave delovnih izmen. V gostinstvu je možno zaznati povečano porabo vode v času priprave in serviranja obrokov.

V primeru mesta D ne poznamo sestave različnih vrst odjemalcev, ki so lahko vezani na posamezno vozlišče, kakor tudi ne njihove prostorske porazdelitve, zato bomo lahko na osnovi izdelanega vzorca porabe sklepali, katera vrsta odjemalca prevladuje po posamezni tlačni coni.

Podano ocenjeno mesečno porabo posameznega vozlišča lahko pretvorimo v enoto osnovne porabe, izraženo v [l/s], vendar podatek zadostuje le za statično simulacijo stalnega toka vodovodnega sistema (tj. vrednosti hidravličnih parametrov se s časom ne spreminjajo). Za dinamični primer razširjene časovne simulacije stalnega toka, ko simuliramo obnašanje vodovodnega sistema v daljšem časovnem obdobju, kjer se parametri s časom spreminjajo¹, moramo poleg osnovne porabe vozlišč vedeti še, kako se s časom spreminja vzorec porabe po posamezni tlačni coni. Pomagamo si z enačbo masne bilance (Walski et al., 2003), ki v

¹ Razširjena časovna simulacija je sestavljena iz več statičnih simulacij, ki si sledijo z danim časovnim korakom, pri tem se pa med zaporednimi izračuni sproti posodablja vse spremembe robnih pogojev sistema.

poenostavljeni obliki pove, da je vsota vtokov in iztokov v vodovodni sistem v dani časovni enoti enaka in se jo zapiše kot:

$$Q_{por,t} = Q_{\check{c}rp,t} - Q_{izs,t} + \frac{\Delta V_{rez}}{\Delta t}, \quad (18)$$

kjer je $Q_{por,t}$ = povprečna poraba v časovni enoti [m^3/h],

$Q_{\check{c}rp,t}$ = povprečna načrpana količina v časovni enoti [m^3/h],

$Q_{izs,t}$ = povprečna količina, ki zapusti sistem (npr. oskrba drugih tlačnih con) [m^3/h],

ΔV_{rez} = sprememba volumna vode v vodohranu [m^3] in

Δt = trajanje časovnega intervala med posameznimi meritvami [h].

Ker tlačna cona DMA1 oskrbuje ostale cone (DMA2–DMA5), velja le zanjo, da je člen $Q_{izs,t}$ različen od nič.

Na podlagi znanih višin vodne gladine in geometrije vodohranov lahko spremembo volumna v časovnem intervalu izračunamo kot:

$$\Delta V_{rez} = \sum_i A_i \cdot (h_{i,t} - h_{i,t+\Delta t}), \quad (19)$$

kjer je A_i = ploščina prereza i -tega vodohrana, ki v posamezni tlačni coni sodeluje [m^2],

$h_{i,t}$ = višina vode v i -tem vodohranu v času t (začetek intervala) [m],

$h_{i,t+\Delta t}$ = višina vode v i -tem vodohranu v času $t + \Delta t$ (konec intervala) [m].

Ker imamo opravka s cilindrično obliko vodohranov, lahko enačbo (19) zapišemo kot:

$$\Delta V_{rez} = \sum_i \frac{\pi d_i^2}{4} \cdot (h_{i,t} - h_{i,t+\Delta t}), \quad (20)$$

kjer je d_i = premer i -tega vodohrana [m].

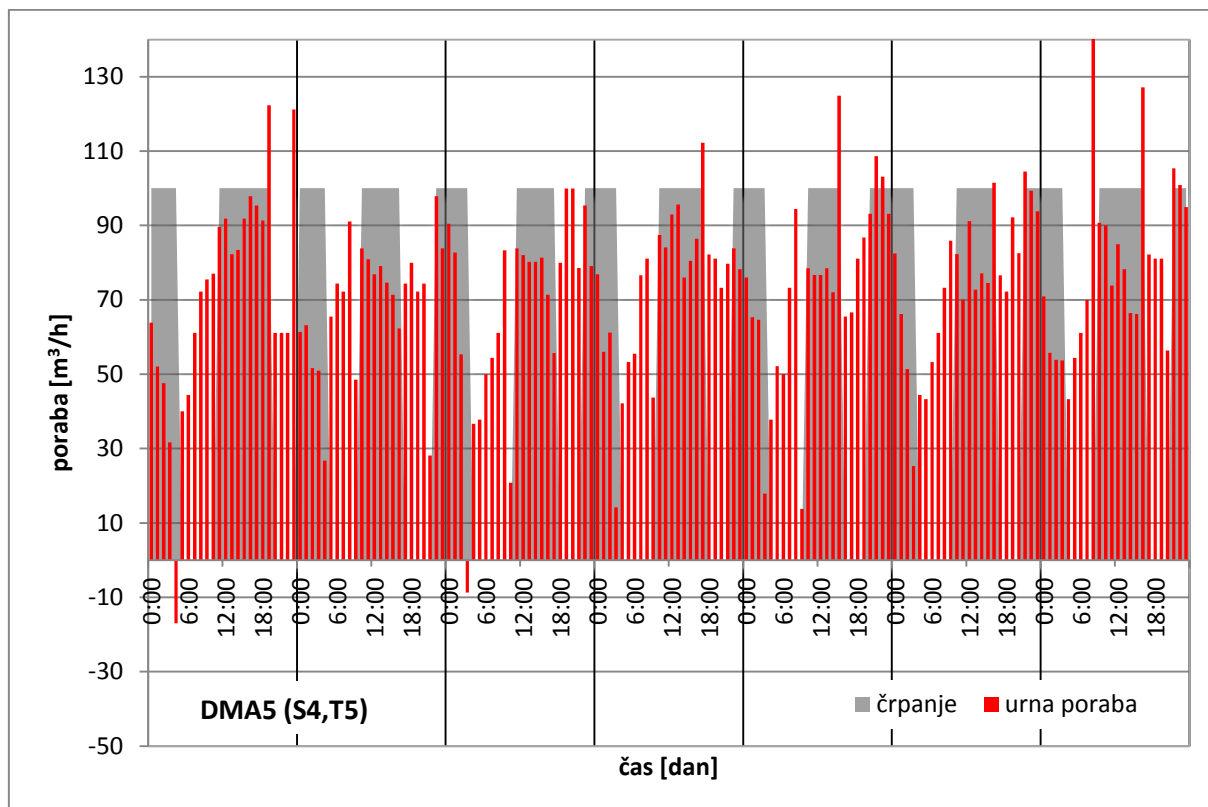
Kadar črpališče obratuje in je poraba znotraj posamezne tlačne cone manjša od črpanja ($Q_{por,t} < Q_{\check{c}rp,t}$), na primer v nočnih urah, se višek načrpane vode shrani v vodohranu (vodohran se polni). V tem primeru imata enačbi (19) in (20) negativen predznak, zato se poraba po enačbi (18) odraža kot razlika med načrpano in shranjeno količino vode v časovnem intervalu Δt (ob predvidevanju, da ni drugih iztokov, $Q_{izs,t} = 0$).

Kadar črpališče obratuje in je poraba znotraj posamezne tlačne cone večja od črpanja ($Q_{por,t} > Q_{\check{c}rp,t}$), na primer v konici dnevne urne porabe, se manjkajoča količina vode nadomesti s praznjenjem vodohrana. V tem primeru imata enačbi (19) in (20) pozitiven predznak, zato se poraba po enačbi (18) odraža kot vsota med načrpano in shranjeno količino vode v časovnem intervalu Δt (ob predvidevanju, da ni drugih iztokov, $Q_{izs,t} = 0$).

Kadar črpališče ne obratuje ($Q_{\check{c}rp,t} = 0$), se celotna potreba po vodi znotraj posamezne tlačne cone zagotovi iz zaloge v vodohranih. V tem primeru imata enačbi (19) in (20)

pozitiven predznak in je poraba po enačbi (18) enaka spremembi volumna vodohranov v časovnem intervalu Δt (ob predvidevanju, da ni drugih iztokov, $Q_{izs,t} = 0$).

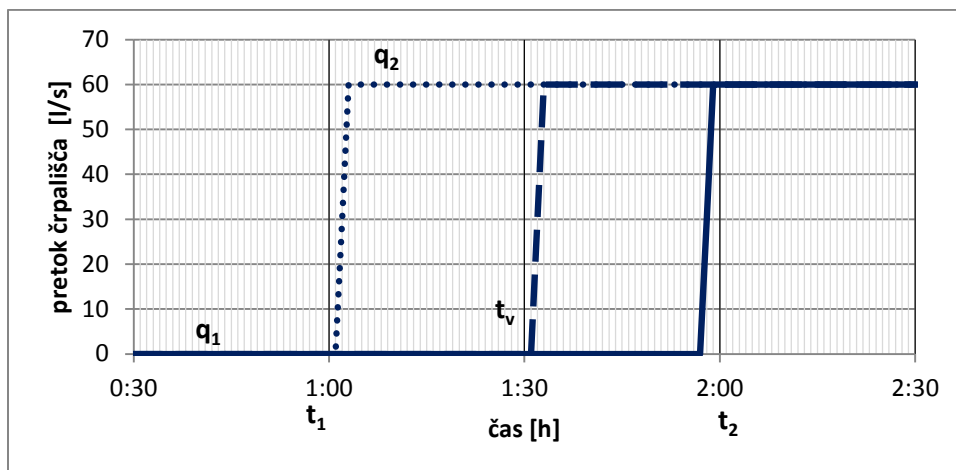
Spodnji grafikon ponazarja potek nihanja povprečne urne porabe znotraj tlačne cone DMA5, skozi celotno opazovano obdobje 168 ur, ki smo jo izračunali s pomočjo enačbe (18).



Grafikon 7: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA5 (brez upoštevanja časa vklopa črpalnice t_v)

Poleg značilnega nihanja porabe so iz grafikona razvidne še nesorazmerno visoke urne konice in celo negativna poraba. Opazimo tudi, da se največja odstopanja pojavljajo ravno v časovnih intervalih, v katerih prihaja do vklopa/izklopa črpalk v črpalnišču, oziroma do večjih sprememb v količini črpanja. Znani so nam podatki o pretokih skozi črpalnišče le ob vsaki polni uri, ne vemo pa, kaj se s črpalniščem dogaja znotraj enournega intervala. Podatek ni zanemarljiv, saj ni vseeno, ali se črpalka vklopi prvo minuto po polni uri ali na primer po preteku 58. minute. Če bi posplošili in bi za pretok črpalnišča skozi celoten urni interval upoštevali povprečje znanih pretokov na začetku in koncu intervala, bi dobili napačno količino, ki bi se upoštevala pri izračunu masne bilance.

Za lažje razumevanje navedimo računski primer. Znani so nam pretoki skozi črpalnišče v času t_1 ($q_1 = 0 \text{ l/s}$) in t_2 ($q_2 = 60 \text{ l/s}$), ne vemo pa, kdaj znotraj časovnega intervala $\Delta t = t_2 - t_1$ pride do spremembe pretoka iz $q_1 \rightarrow q_2$. V grafikonu 8 je prikazanih nekaj možnih časov vklopa črpalnišča t_v .



Grafikon 8: Pretok črpališča z različnimi časi vklopa znotraj časovnega intervala ene ure

Če upoštevamo povprečje pretokov q_1 in q_2 , bi povprečna načrpana količina v časovnem intervalu Δt znašala:

$$Q_{\text{črp},t} = \frac{q_1 + q_2}{2} \cdot \Delta t = \frac{0 + 60}{2} \left[\frac{l}{s} \right] \cdot \frac{60 \cdot 60 [s]}{1000} = 108,00 [m^3/h] .$$

Če za vklop upoštevamo uro 1.01 ($t_v = 1 \text{ min}$), bi povprečna načrpana količina v časovnem intervalu Δt znašala:

$$Q_{\text{črp},t} = q_2 \cdot (t_2 - t_v) = 60 \left[\frac{l}{s} \right] \cdot \frac{59 \cdot 60 [s]}{1000} = 212,40 [m^3/h] .$$

Če za vklop upoštevamo uro 1.31 ($t_v = 31 \text{ min}$), bi povprečna načrpana količina v časovnem intervalu Δt znašala:

$$Q_{\text{črp},t} = q_2 \cdot (t_2 - t_v) = 60 \left[\frac{l}{s} \right] \cdot \frac{29 \cdot 60 [s]}{1000} = 104,40 [m^3/h] .$$

Če za vklop upoštevamo uro 1.59 ($t_v = 59 \text{ min}$), bi povprečna načrpana količina v časovnem intervalu Δt znašala:

$$Q_{\text{črp},t} = q_2 \cdot (t_2 - t_v) = 60 \left[\frac{l}{s} \right] \cdot \frac{1 \cdot 60 [s]}{1000} = 3,60 [m^3/h] .$$

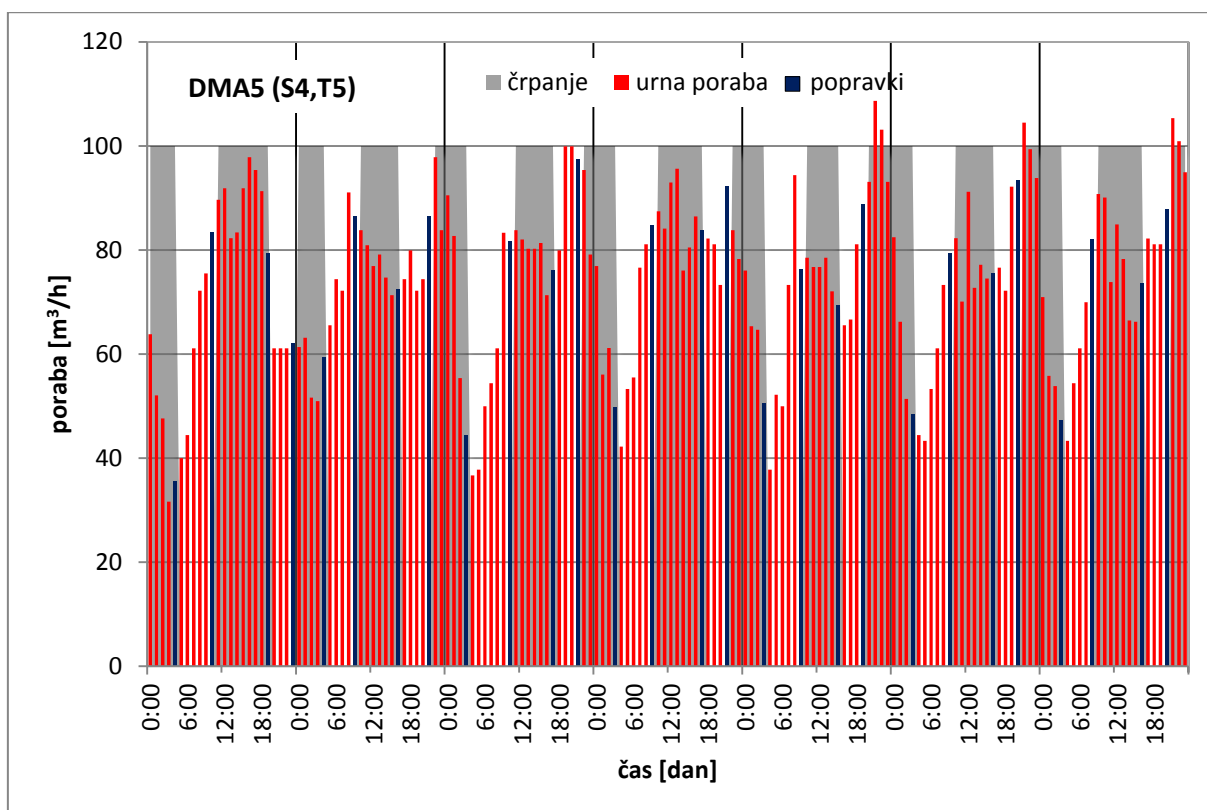
Če poznamo čas vklopa črpališča t_v , lahko povprečno načrpano količino v poljubnem časovnem intervalu $\Delta t = t_2 - t_1$ in pri poljubnih pretokih q_1 in q_2 , v splošnem po (Walski et al., 2003) zapišemo kot:

$$Q_{\text{črp},t} = \frac{(t_v - t_1) \cdot q_1 + (t_2 - t_v) \cdot q_2}{t_2 - t_1} . \quad (21)$$

Za posamezni časovni interval Δt , kjer se vrednosti pretokov q_1 in q_2 med seboj bistveno ne razlikujeta ($|q_1 - q_2| \leq 3 \text{ l/s}$), na primer pri nihanju črpanja, lahko pri izračunu masne bilance v fazi makrokalibracije uporabimo kar srednjo vrednost q_1 in q_2 za pretok skozi celoten časovni interval in pri tem ne bomo naredili prevelike napake.

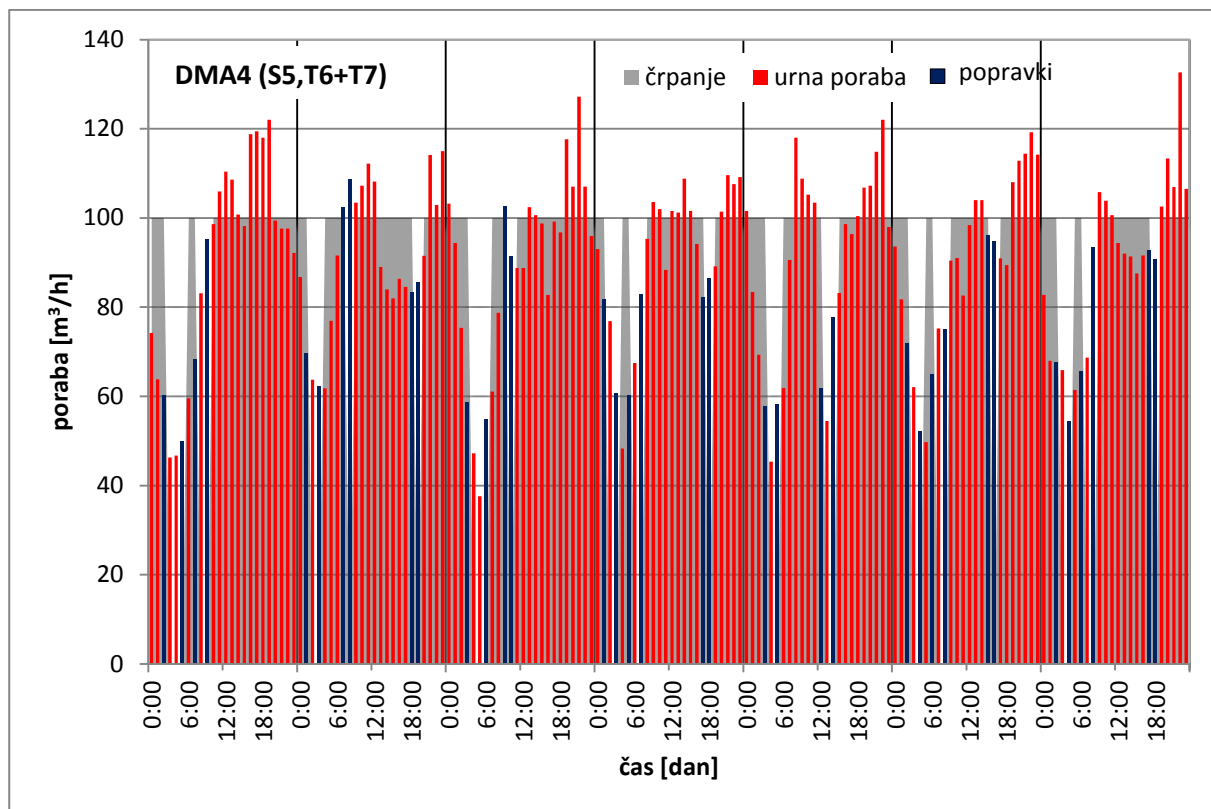
Za časovni interval Δt , kjer so razlike pretokov q_1 in q_2 očitne ($|q_1 - q_2| > 3 \text{ l/s}$), na primer pri vklopu oziroma izklopu ene ali več črpalk, je ugodneje, če čas vklopa t_v določimo tako, da z uporabo linearne interpolacije med sosednjimi vrednostmi povprečnih urnih porab zgladimo izstopajoče vrednosti.

V spodnjem grafikonu je prikazano nihanje povprečne urne porabe znotraj tlačne cone DMA5, kjer so z modro bravo označeni časovni intervali Δt , v katerih je čas vklopa t_v ročno nastavljen.

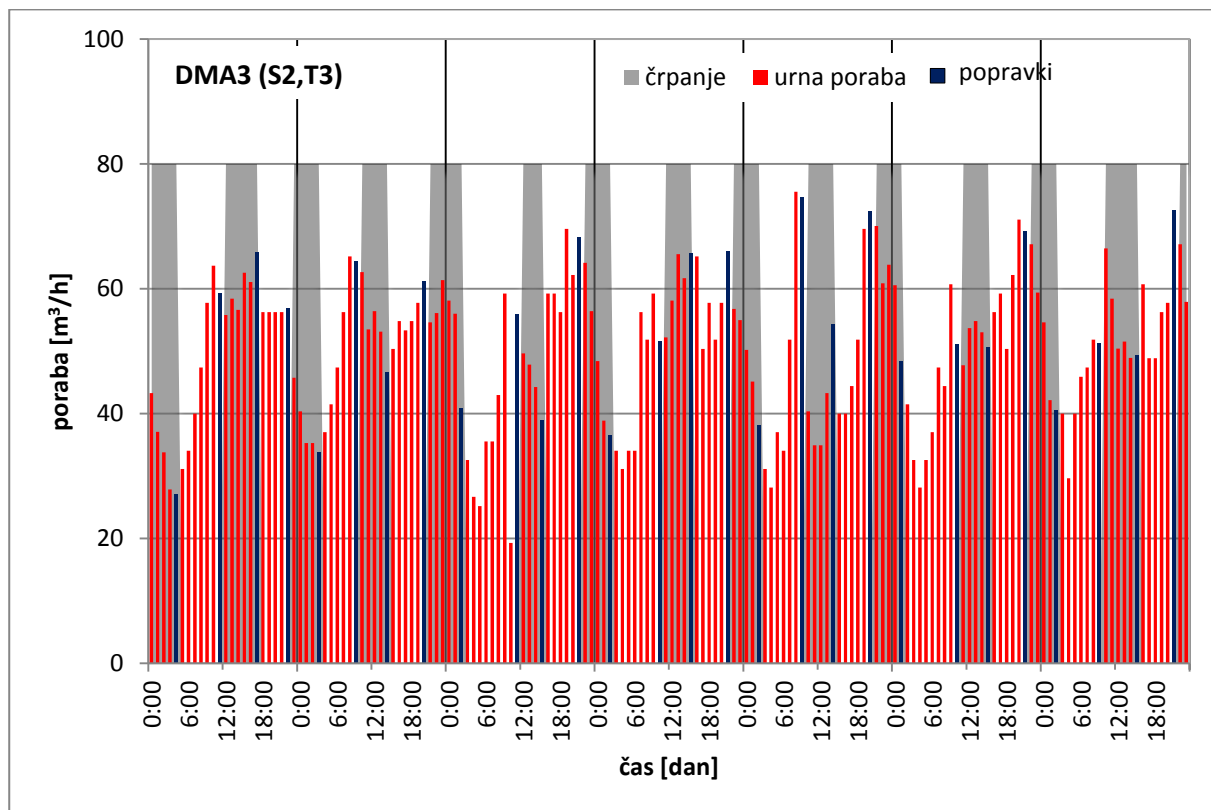


Grafikon 9: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA5 (z upoštevanjem časa vklopa črpališča t_v)

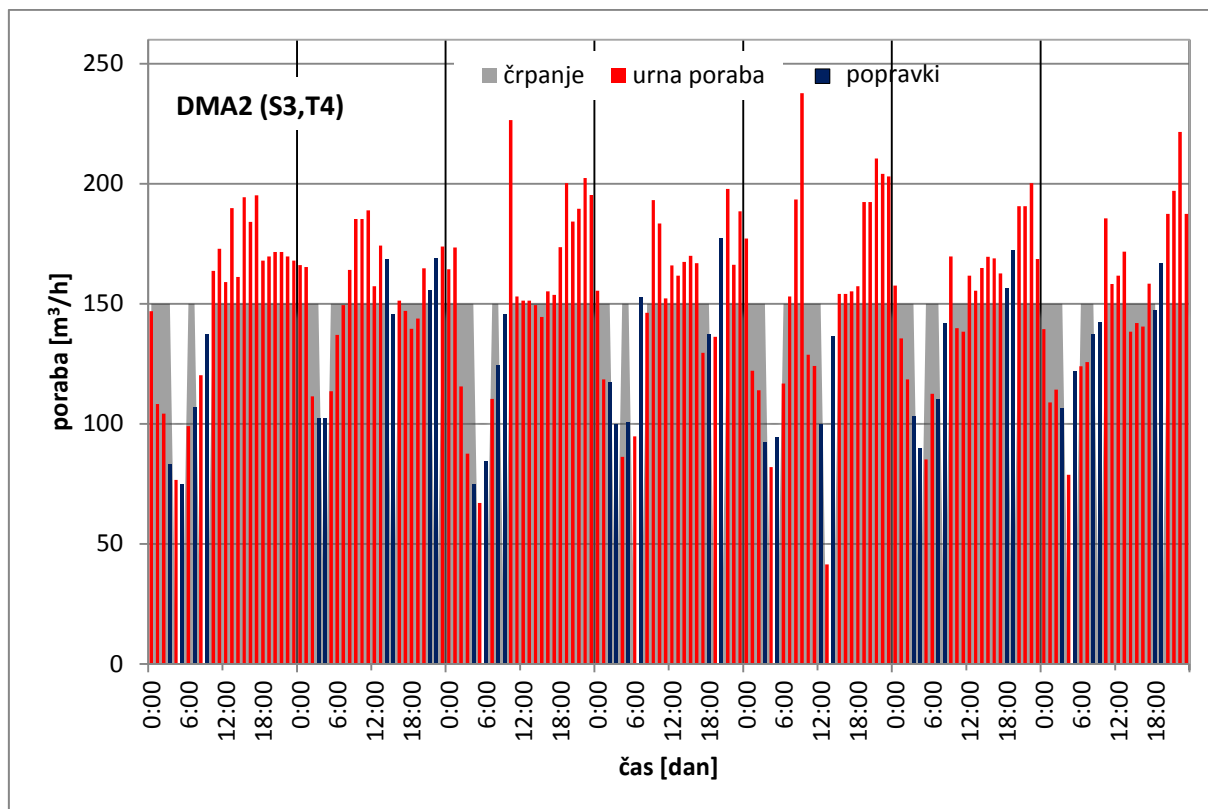
Postopek ponovimo še za preostale tlačne cone vodovodnega sistema.



Grafikon 10: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA4 (z upoštevanjem časa vklopa črpalnišča t_v)



Grafikon 11: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA3 (z upoštevanjem časa vklopa črpalnišča t_v)



Grafikon 12: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA2 (z upoštevanja časa vklopa črpališča t_v)

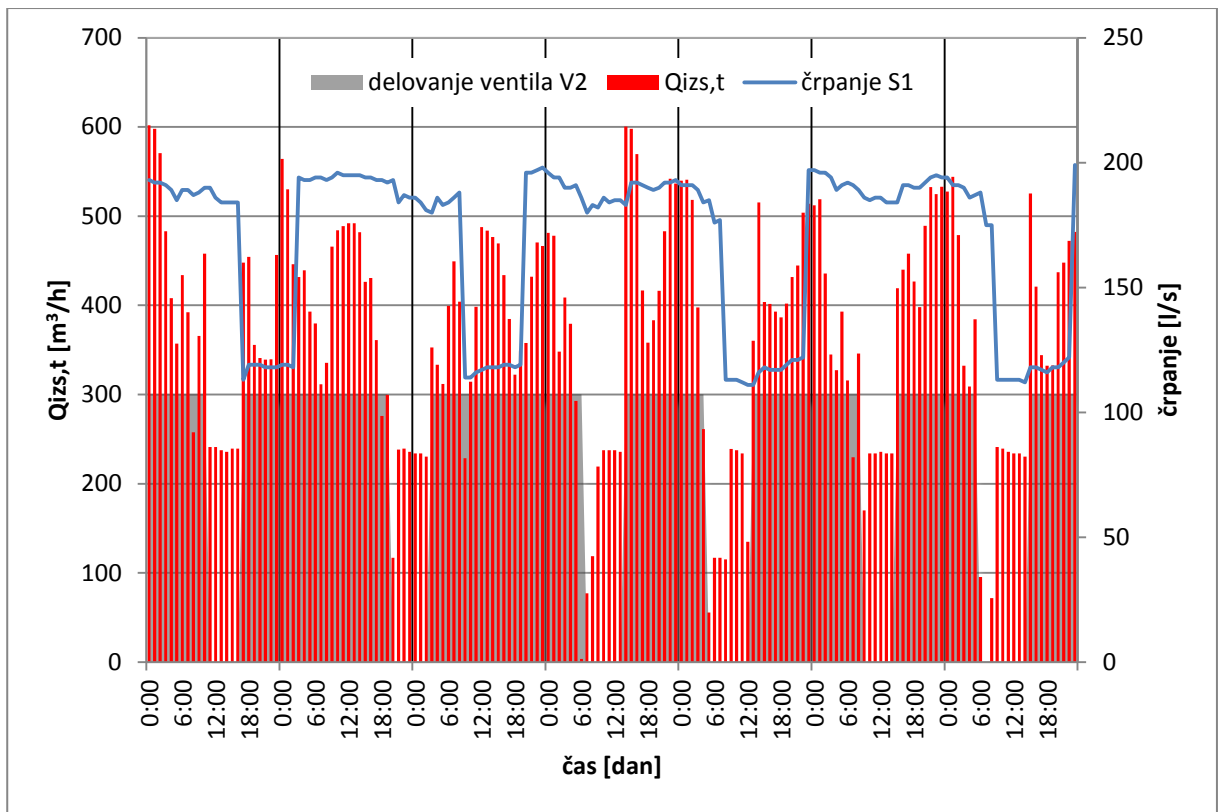
Pri izračunu masne bilance za tlačno cono DMA1 je potrebno malo več pozornosti, saj moramo upoštevati še povprečno količino vode, ki v časovnem intervalu Δt izstopi iz tlačne cone DMA1. Na podlagi slike 2 se člen $Q_{izs,t}$ v enačbi (18) izrazi kot:

$$Q_{izs,t} = Q_{\check{c}rp,t}^{S5} + Q_{\check{c}rp,t}^{S4} + (Q_{\check{c}rp,t}^{S3} + Q_{\check{c}rp,t}^{S2} + \Delta V_{rez}^{T2}) \quad (22)$$

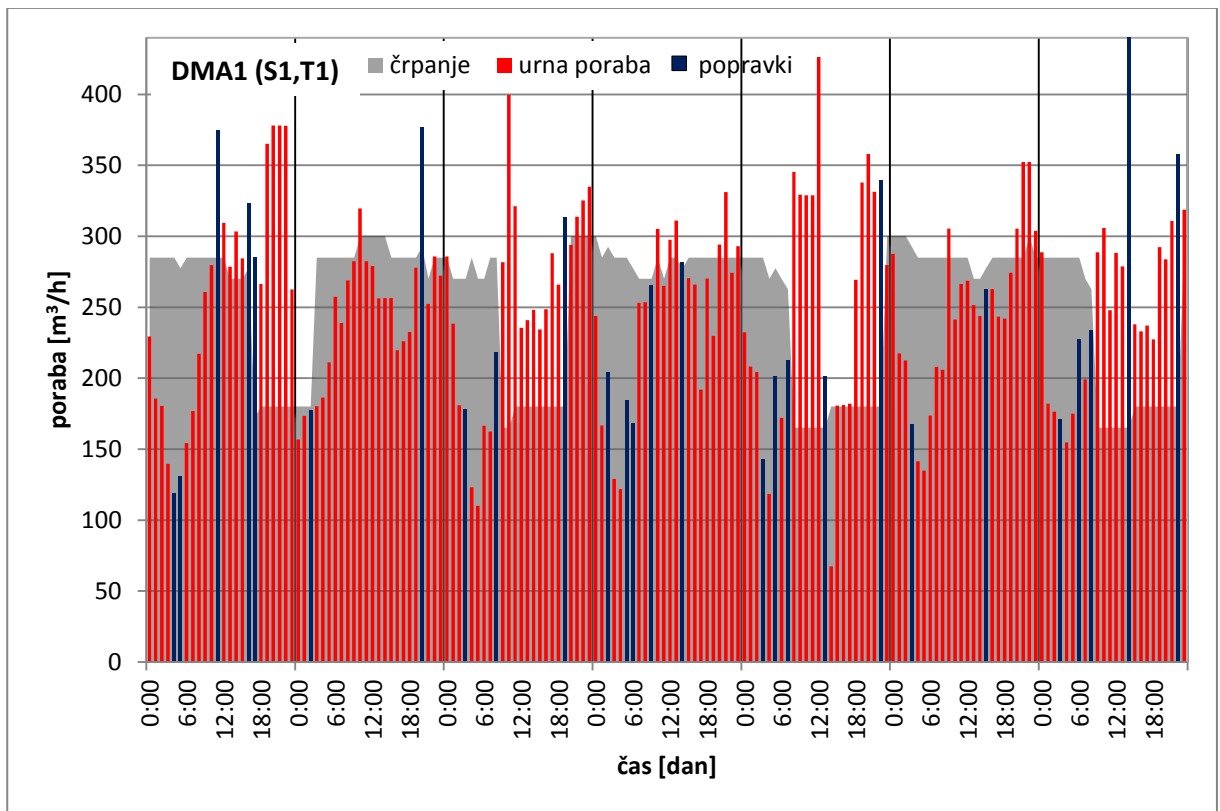
in predstavlja vsoto načrpane količine vode črpališč S5 in S4 ter količine vode, ki gre skozi ventil V2. Če se v časovnem intervalu Δt vodohran T2 polni (potrebe črpališč S2 in S3 so manjše od količine, ki gre skozi ventil V2 – višek vode se tako shrani v vodohranu), ima člen ΔV_{rez}^{T2} pozitiven predznak in negativen, če se le-ta prazni. Potrebe črpališč S2 in S3 se v tem primeru razdelijo na del vode, ki gre skozi ventil V2, in na del, ki se zagotovi s praznjenjem zalog vodohrana T2. Ker je ventil V2 krmiljen glede na višino vodne gladine v vodohranu T2, moramo točno vedeti, kdaj je ventil V2 odprt, saj je to pomemben podatek, od katerega je odvisna skupna količina vode, ki izstopi iz tlačne cone DMA1. Če je ventil V2 zaprt, je izraz v oklepaju v enačbi (22) enak nič.

Iz grafikona 1 lahko razberemo vzorec polnjenja in praznjenja vodohrana T2 in s pomočjo nivojev v krmilnem programu določimo časovne intervale Δt , v katerih pride do vklopa/izklopa ventila V2. Ugotovimo lahko, da po vsakem ciklusu polnjenja, oziroma ko gladina vode v vodohranu doseže nivo $h_{V2}^{OFF} = 5,5 \text{ m}$, nastopi v povprečju 7-urno obdobje, v katerem je ventil V2 zaprt. V tem času zaradi delovanja črpališč S2 in S3 zaloge vode v vodohranu kopnijo, vse dokler gladina vodohrana T2 ne pade do nivoja $h_{V2}^{ON} = 0,5 \text{ m}$, kar ima za posledico ponovno odprtje ventila V2.

V grafikonu 13 je prikazano delovanje ventila V2, črpališča S1 in količina vode, ki v časovnem intervalu Δt izstopi iz tlačne cone DMA1, izračunana po enačbi (22).

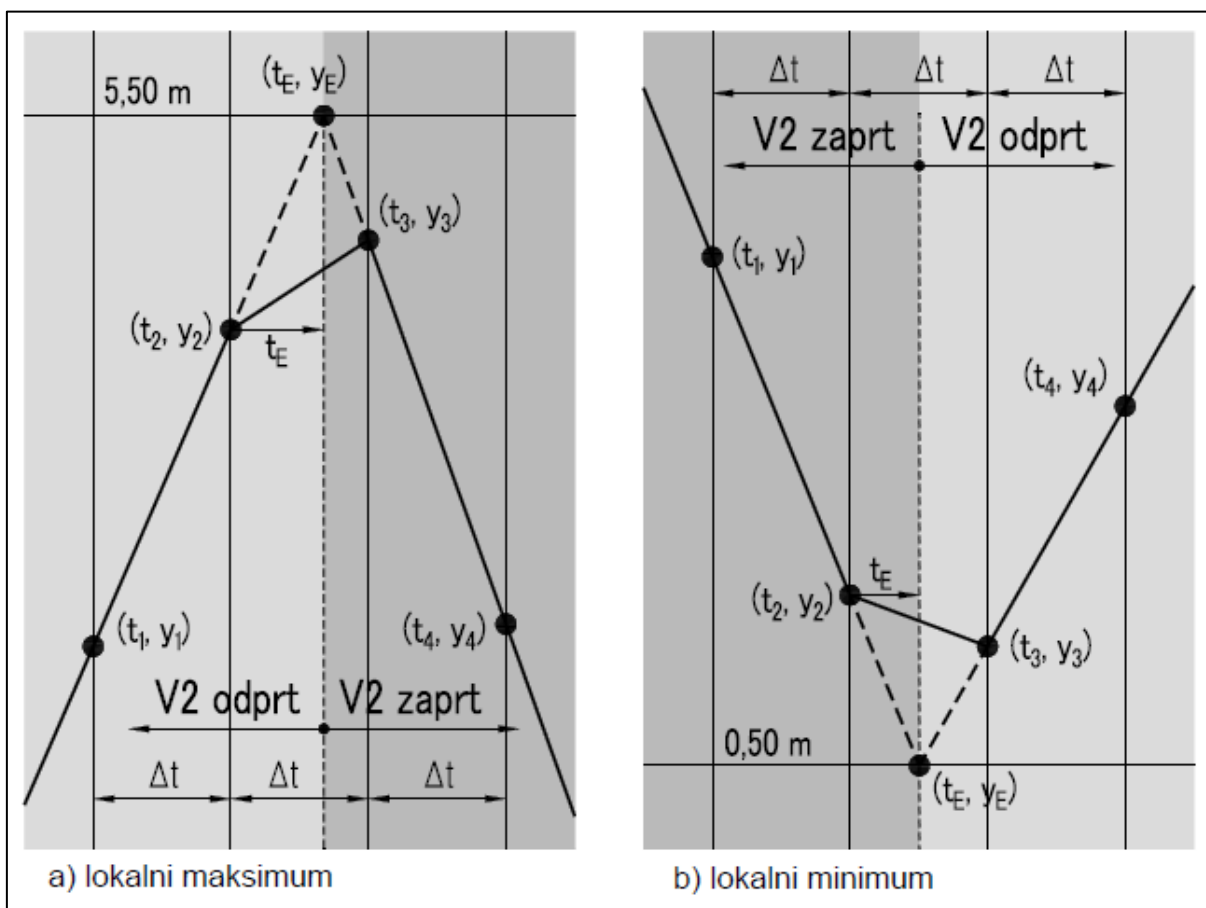


Grafikon 13: Količina vode, ki izstopi iz tlačne cone DMA1; prikaz delovanja ventila V2 in črpališča S1



Grafikon 14: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA1 (z upoštevanjem časa vklopa t_v)

Na grafikonu 14 je prikazana povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA1, izračunana s pomočjo enačbe (18) in (22). Opazimo lahko, da kljub ročno nastavljenim časom vklopa t_v črpalnišča S1 se nismo mogli znebiti nesorazmerno visokih konic urne porabe. Največja odstopanja se pojavljajo v časovnih obdobjih, ko nastopijo neustrezni oziroma manjkajoči vhodni podatki in v intervalih Δt , v katerih prihaja do vklopa/izklopa ventila V2. V slednjem primeru si pomagamo s sliko 15 in enačbo (16), s katero izračunamo čas znotraj intervala, pri katerem nastopi lokalni ekstrem (parameter t_E).



Slika 15: Lokalni ekstremi nihanja vodne gladine vodohrana T2

Če imamo znotraj intervala Δt opravka z lokalnim maksimumom, se vodohran T2 polni, vse dokler je ventil V2 odprt, oziroma dokler gladina vode v vodohranu ne doseže višine 5,50 metra pri času t_E . Količino izraženo v $[m^3/h]$, ki v časovnem intervalu Δt gre skozi ventil V2 izračunamo kot:

$$Q_{izs,t}^{V2} = (q_{S2} + q_{S3}) \cdot t_E + (h_{V2}^{OFF} - y_2) \cdot A_{T2} . \quad (23)$$

V primeru lokalnega minimuma se enačba glasi:

$$Q_{izs,t}^{V2} = (q_{S2} + q_{S3}) \cdot (\Delta t - t_E) + (y_3 - h_{V2}^{ON}) \cdot A_{T2} , \quad (24)$$

kjer je q_{S2}, q_{S3} = pretok črpalnišč S2 in S3,

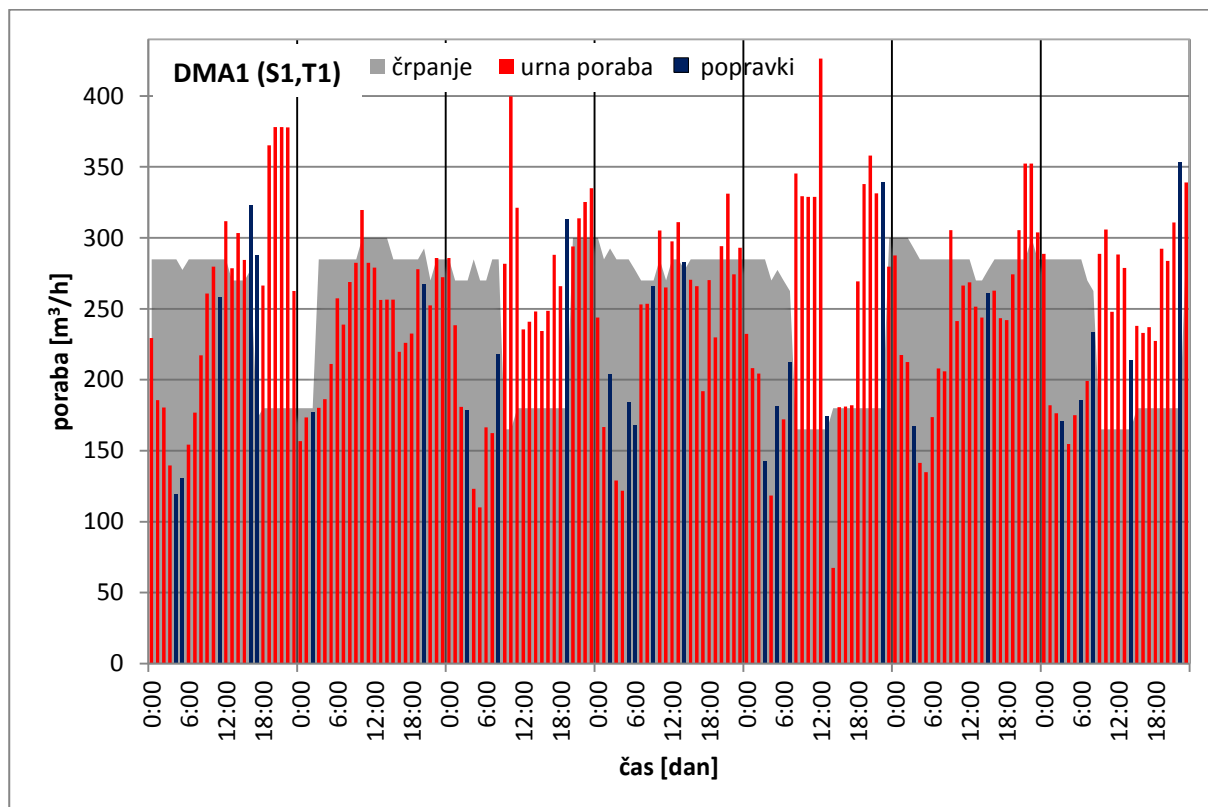
h_{V2}^{OFF} = nivo vode v vodohranu T2, pri katerem se ventil V2 zapre [5,5 m],

h_{V2}^{ON} = nivo vode v vodohranu T2, pri katerem se ventil V2 odpre [0,5 m],

A_{T2} = ploščina prereza vodohrana T2 [m²] in

Δt = trajanje časovnega intervala [60 min.].

Prvi del enačb (23) in (24) predstavlja načrpano količino črpališč S2 in S3, drugi pa količino vode, ki se shrani v vodohranu T2.



Grafikon 15: Povprečna urna poraba znotraj tlačne cone DMA1 (z upoštevanjem časa vklopa t_v in časa ekstrema t_E)

Količina vode, ki po ventilu V2 izstopi iz tlačne cone DMA1, ni odvisna zgolj od enega neznanega parametra, saj ne vemo z gotovostjo, kdaj sovpadajo časi, ko je ventil V2 odprt (nastop lokalnega ekstrema t_E), in časi, ko posamezna črpališča obratujejo (čas vklopa t_v).

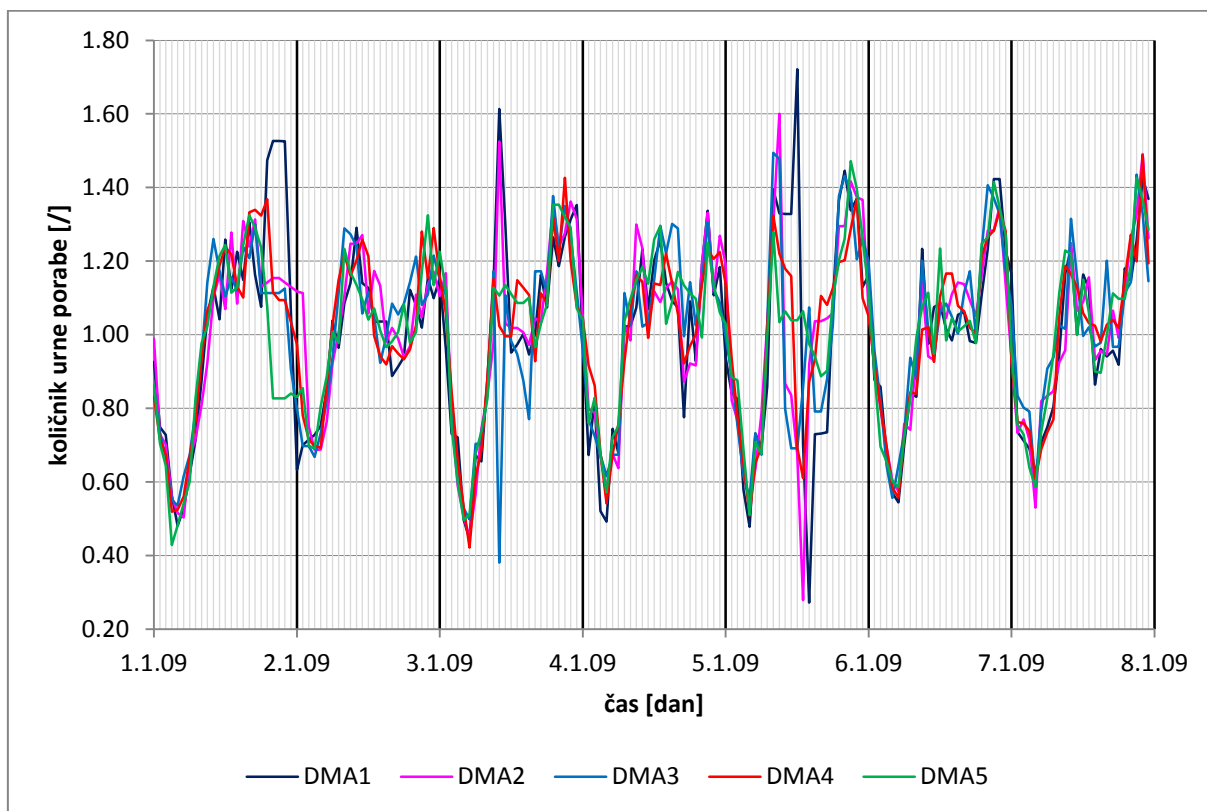
4.4 Koeficient urne porabe

Na osnovi izračunov masne bilance in urne porabe znotraj posamezne tlačne cone lahko naposled podamo koeficient urne porabe $k_{por,t}$, ki ponazarja časovno spreminjanje porabe vozlišč po posamezni tlačni coni in ga izračunamo kot:

$$k_{por,t} = \frac{Q_{por,t}}{\overline{Q}_{por}}, \quad (25)$$

kjer je $Q_{por,t}$ = povprečna urna poraba znotraj posamezne tlačne cone v intervalu Δt [m³/h],
 \overline{Q}_{por} = povprečna poraba znotraj posamezne tlačne cone v obdobju 168 ur [m³/h].

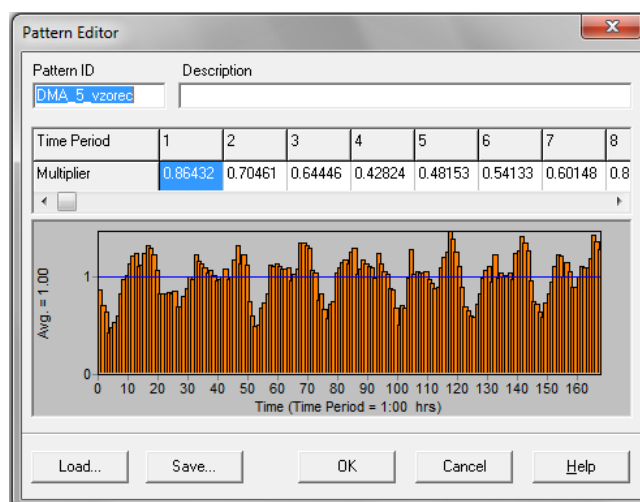
Koeficienti urne porabe po posamezni tlačni coni so ponazorjeni v grafikonu 16. Ponovno lahko opazimo izrazita konična odstopanja nihanja urne porabe ravno v časovnih obdobjih, kjer nastopijo neustrezni oziroma manjkajoči vhodni podatki, kar nas privede do zaključka, da je predvideno nihanje vodne gladine posameznih vodohranov vprašljive natančnosti. Še zlasti to velja za tlačne cone DMA1, DMA2 in DMA3.



Grafikon 16: Začetni koeficient urne porabe po posamezni tlačni coni

Programu Epanet lahko količnik urne porabe (vzorec nihanja urne porabe) podamo na dva načina:

- ročno po vmesniku "Pattern Editor" oziroma
- ustvarimo in uvozimo tekstovno datoteko s končnico ".pat".

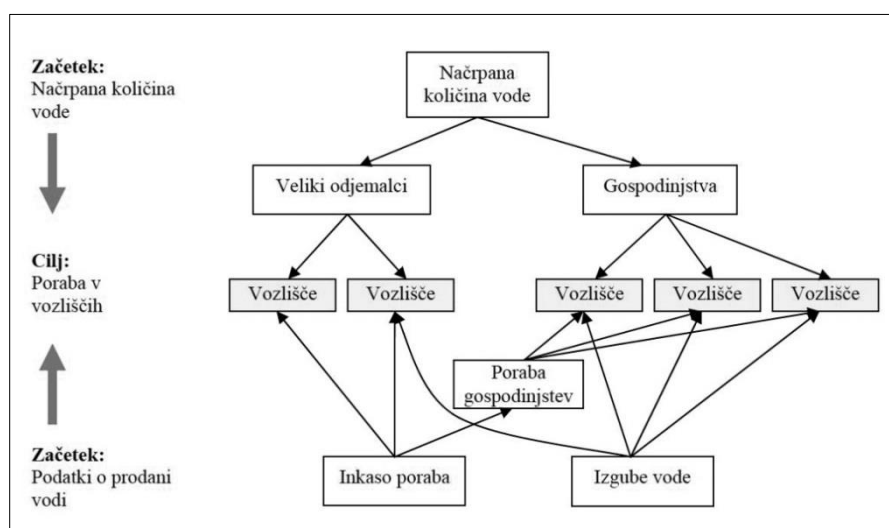


Slika 16: Vmesnik za vnos koeficienta urne porabe $k_{por,t}$ v programu Epanet

4.5 Vozlišča in poraba

Vozlišča so točkovni elementi hidravličnega modela, kjer se stikajo cevi in kjer voda vstopa in izstopa iz omrežja. Poleg prostorskih koordinat moramo vsakemu vozlišču znotraj posamezne tlačne cone dodeliti še porabo vode in pripadajoči vzorec nihanja porabe vode.

Ker imamo na voljo podatke o alokaciji porabe, lahko osnovno porabo posameznega vozlišča vodovodnega sistema (izraženo v l/s) določimo iz njegove ocenjene mesečne porabe (izraženo v m³/mesec). Osnovno porabo tako obravnavamo kot obračunano oziroma izmerjeno ("inkaso") porabo vode.



Slika 17. Določevanje velikosti in lokacije vozliščne porabe (Kozelj, 2014)

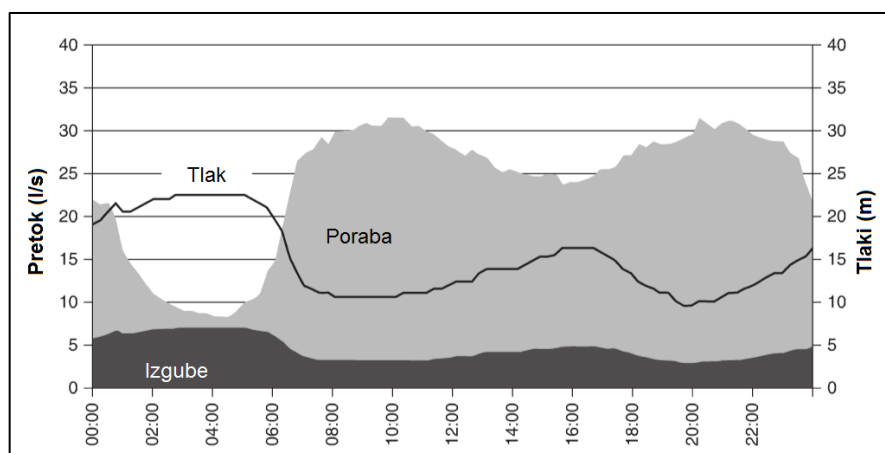
Pri porazdelitvi porabe po vozliščih moramo še preveriti, ali je vsota celotne porazdeljene porabe po vozliščih usklajena z evidenco celotne porabe v posameznih tlačnih conah in vodooskrbnem sistemu kot celoti.

Preglednica 1: Primerjava med ocenjeno mesečno porabo in porabo na osnovi masne bilance tlačnih con

Tlačna cona	Povprečna poraba na osnovi ocenjene mesečne porabe (l/s)	Povprečna poraba na osnovi masne bilance sistema (l/s)	Črpališče	Povprečna načrpana količina (l/s)
DMA1	69,59	68,82	S1	168,37
DMA2	43,21	41,27	S3	41,24
DMA3	15,17	14,04	S2	14,31
DMA4	26,00	24,77	S5	24,74
DMA5	21,80	20,51	S4	20,76
Skupaj	175,76	169,41		

Pri določevanju porabe po vozliščih moramo poleg obračunane porabe upoštevati še neobračunano vodo, kamor v večji meri spadajo izgube vode. Količino le-teh določimo iz razlike med načrpano in obračunano vodo. Iz slike 18 je razvidno, da so vodne izgube

odvisne od višine tlakov in nihajo čez dan. V nočnem času, ko je poraba najnižja, so tlaki v omrežju višji in s tem posledično tudi izgube vode.



Slika 18: Dnevno nihanje vodnih izgub (Yi Wu et al., 2011: str. 23)

Kriteriji, kako razporediti izgube v vodovodnem sistemu, se določijo na osnovi podatkov o starosti cevi, podatkov o okvarah cevi vodooskrbnega sistema oziroma iz izkušenj upravljavca komunalne infrastrukture (Kozelj, 2014).

V fazi makrokalibracije se težko določi porazdelitev vodnih izgub po sistemu, še zlasti njihovo časovno nihanje, zato je običajno najenostavnejše, če se izgube vežejo na vozlišča na podlagi ustreznih strokovnih ocen, pri čemer se za časovno nihanje izgub uporabijo že obstoječi ali prirejeni koeficienti urne porabe vode (Šantl, 2007).

Ker ne poznamo vseh parametrov za točen izračun masne bilance (masna bilanca sistema je vprašljive natančnosti), bomo vodne izgube vozliščem pripisali po uspešni izvedbi postopka makrokalibracije in pridobitvi izboljššanega hidravličnega modela.

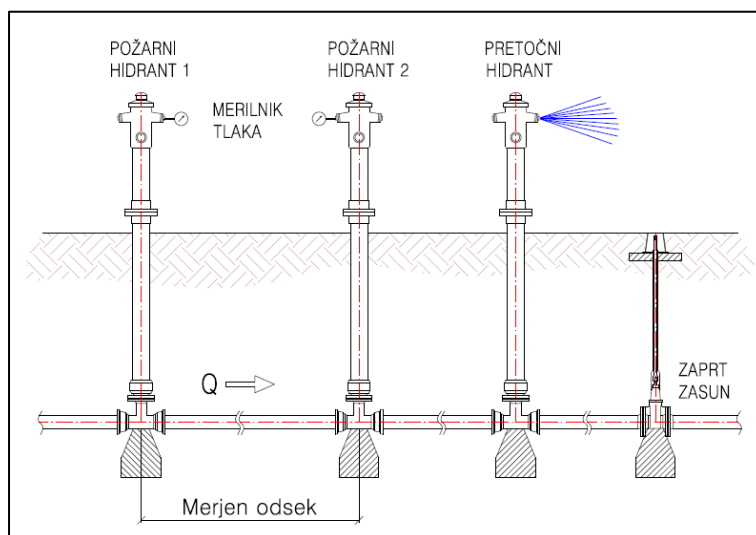
Vozliščna poraba je v danem časovnem obdobju Δt zmnožek koeficienta urne porabe $k_{por,t}$ in osnovne (dejanske) porabe vozlišča. Iz slike 16 je razvidno, da je povprečna vrednost koeficientov urne porabe enaka ena, saj smo privzeli, da v fazi makrokalibracije vpliv vodnih izgub kompenziramo z višjim koeficientom urne porabe. Če bi želeli vozliščem poleg osnovne porabe pripisati še izgube (vozliščna poraba se bi povečala), bi morali koeficient urne porabe proporcionalno zmanjšati. Določitev vodnih izgub obravnavamo v poglavju 5.

4.6 Test hidravličnih izgub in izračun koeficienta hrapavosti vodovodnih cevi

4.6.1 Teoretična izhodišča

Če se pri hidravličnih izračunih in umerjanju matematičnih modelov vodovodnih sistemov uporabljajo nazivni premeri cevi, je nujno potrebno opraviti test hidravličnih izgub in meritve pretoka, s katerimi naknadno določimo hrapavost vodovodnih cevi oziroma vrednosti koeficienta λ (Darcy-Weisbach) ali C-koeficienta (Hazen-Williams). V nadaljevanju je podan opis postopka določevanja koeficientov po (Walski et al., 2003).

V praksi se zelo uporablja test hidravličnih izgub z dvema merilnikoma (angl. Two – Gage Test), kjer se merjeni odsek po navadi nahaja med dvema hidrantoma, na katere predhodno namestimo merilnike tlaka. Merjeni odsek izoliramo tako, da dolvodno od njega zapremo zasun, obenem celoten pretok skozi obravnavani odsek preusmerimo na dolvodni hidrant (zapremo tudi vse morebitne stranske odcepe vodovoda), kjer na iztoku tudi merimo pretok.



Slika 19: Test hidravličnih izgub z dvema merilnikoma tlaka
(Walski et al., 2003: poglavje 5, str. 193)

Hidravlično izgubo na obravnavanem odseku lahko izrazimo s pomočjo razlike hidravličnih gradientov oziroma razlike izmerjenih tlakov in razlike geodetskih višin med gorvodnim ter dolvodnim hidrantom (Walski et al., 2003):

$$h_l = HGL_g - HGL_d = C_f \cdot (P_g - P_d) + (Z_g - Z_d) , \quad (26)$$

kjer je h_l = linijska izguba vzdolž merjenega odseka [m],
 HGL_g = višina tlačne črte na gorvodnem hidrantu [m],
 HGL_d = višina tlačne črte na dolvodnem hidrantu [m].
 C_f = faktor pretvorbe enot; za SI enote = 0,102 [/],
 P_g = tlak, merjen na gorvodnem hidrantu [kPa],
 P_d = tlak, merjen na dolvodnem hidrantu [kPa],
 Z_g = geodetska višina gorvodnega hidranta [m] in
 Z_d = geodetska višina dolvodnega hidranta [m].

V primeru statičnih pogojev, tj. v normalnih obratovalnih pogojih, ko ni pretoka skozi obravnavani odsek (poraba odjemalcev, ki so priključeni na obravnavani odsek, je zanemarljiva proti količini vode, ki se bo pretakala med samim izvajanjem testa), lahko privzamemo nično vrednost linijskih izgub in iz enačbe (26) lahko razliko geodetskih višin izrazimo kot:

$$Z_g - Z_d = -C_f \cdot (P_{gs} - P_{ds}) , \quad (27)$$

kjer je C_f = faktor pretvorbe enot; za SI enote = 0,102 [/],
 P_{gs} = tlak, merjen na gorvodnem hidrantu, statični pogoji [kPa] in
 P_{ds} = tlak, merjen na dolvodnem hidrantu, statični pogoji [kPa].

Če enačbo (27) vstavimo v enačbo (26), dobimo nov izraz, s katerim lahko izračunamo linijsko izgubo odseka:

$$h_l = C_f \cdot [(P_{gd} - P_{dd}) - (P_{gs} - P_{ds})] , \quad (28)$$

kjer je C_f = faktor pretvorbe enot; za SI enote = 0,102 [/],
 P_{gd} = tlak, merjen na gorvodnem hidrantu, dinamični pogoji [kPa] in
 P_{dd} = tlak, merjen na dolvodnem hidrantu, dinamični pogoji [kPa].

Na osnovi podatkov, ki jih pridobimo s pomočjo meritev tlakov tako v statičnih (v normalnih obratovalnih pogojih) kot dinamičnih pogojih (odpremo hidrante in znatno povečamo pretok, kar privede do velikega padca tlaka), lahko z enačbo (28) linijske izgube izračunamo tudi, če ne poznamo geodetskih višin hidrantov. Linijske izgube so odvisne le od stvarnih karakteristik in starosti cevi ter režima toka (laminarni, turbulentni), zato geodetska višina na velikost linijskih izgub nima vpliva.

Pri znanem nazivnem premeru in dolžini vodovodne cevi ter izmerjenemu pretoku in izračunani linijski izgubi vzdolž obravnavanega odseka lahko naposled izračunamo Hazen-Williamsov C-koeficient:

$$C = \left(\frac{C_f \cdot L \cdot Q^{1,852}}{h_l \cdot d^{4,87}} \right)^{1/1,852} , \quad (29)$$

kjer je C = Hazen-Williamsov C-koeficient [/],
 C_f = faktor pretvorbe enot; za SI enote = 10,7 [/],
 L = dolžina vodovodne cevi [m],
 Q = pretok [m³/s],
 h_l = linijske izgube zaradi trenja [m] in
 d = premer vodovodne cevi [m].

Hazen-Williamsov C-koeficient si lahko predstavljamo kot koeficient, ki ponazarja pretočno sposobnost cevi. Višji kot je C-koeficient, večja je pretočna sposobnost in obratno, za cevi z nižjim C-koeficientom, ki so domena hrapavih cevi, lahko predvidimo turbulentno hrapav režim toka in posledično večje linijske izgube. Z leti v uporabi se C-koeficient cevi znižuje pretežno v odvisnosti od stopnje agresivnosti (koroziivnosti) vode.

Poleg C-koeficienta lahko izračunamo tudi Darcy-Weisbachov koeficient λ z enačbo:

$$\lambda = h_l \cdot \frac{d \cdot 2g}{L \cdot v^2} , \quad (30)$$

kjer je λ = koeficient trenja (po Darcy-Weisbachu) [/],
 L = dolžina vodovodne cevi [m],
 d = premer vodovodne cevi [m],
 v = hitrost vode v cevi [m/s] in
 g = gravitacijski pospešek [9,81 m/s²].

Hitrost v cevi določimo s pomočjo znanega pretoka in premera cevi po izrazu:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi d^2} . \quad (31)$$

Če želimo koeficient trenja dodeliti še ostalim cevem, je potrebno Darcy-Weisbachov koeficient λ pretvoriti v absolutno hrapavost ε . Iz Colebrook-White enačbe (enačba (11)) se izpelje izraz:

$$\frac{\varepsilon}{d} = 3,7 \cdot \left[\exp \left(\frac{1}{-0,86 \cdot \sqrt{\lambda}} \right) - \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right] , \quad (32)$$

kjer je Re = Reynoldsovo število [/],
 ε = višina hrap ostenja vodovodne cevi [mm] in
 d = premer vodovodne cevi [mm].

Pri gladkih ceveh nam lahko zgornja enačba poda tudi negativne vrednosti, kar privzamemo kot nično trenje (opravka imamo s hidravlično gladkimi cevmi).

4.6.2 Določitev C-koeficientov vodovodnih cevi

Meritve so se izvajale v večernih urah in ločeno za posamezno tlačno cono. Osnovna vozliščna poraba (ne upošteva se pretok požarne obremenitve) v času izvajanja meritev se le v grobem ujema z osnovno porabo po vozliščih v času trajanja 1. ure posredovane serije podatkov SCADA. Osnovna poraba vozlišč (pridobljena na osnovi ocenjene mesečne porabe) se zato množi s pripadajočim koeficientom urne porabe za posamezno tlačno cono, ki ustreza času 1. ure posredovanih podatkov. Delež vodnih izgub, ki se vežejo na osnovno porabo vozlišč pri simulaciji požarnih testov, ne upoštevamo.

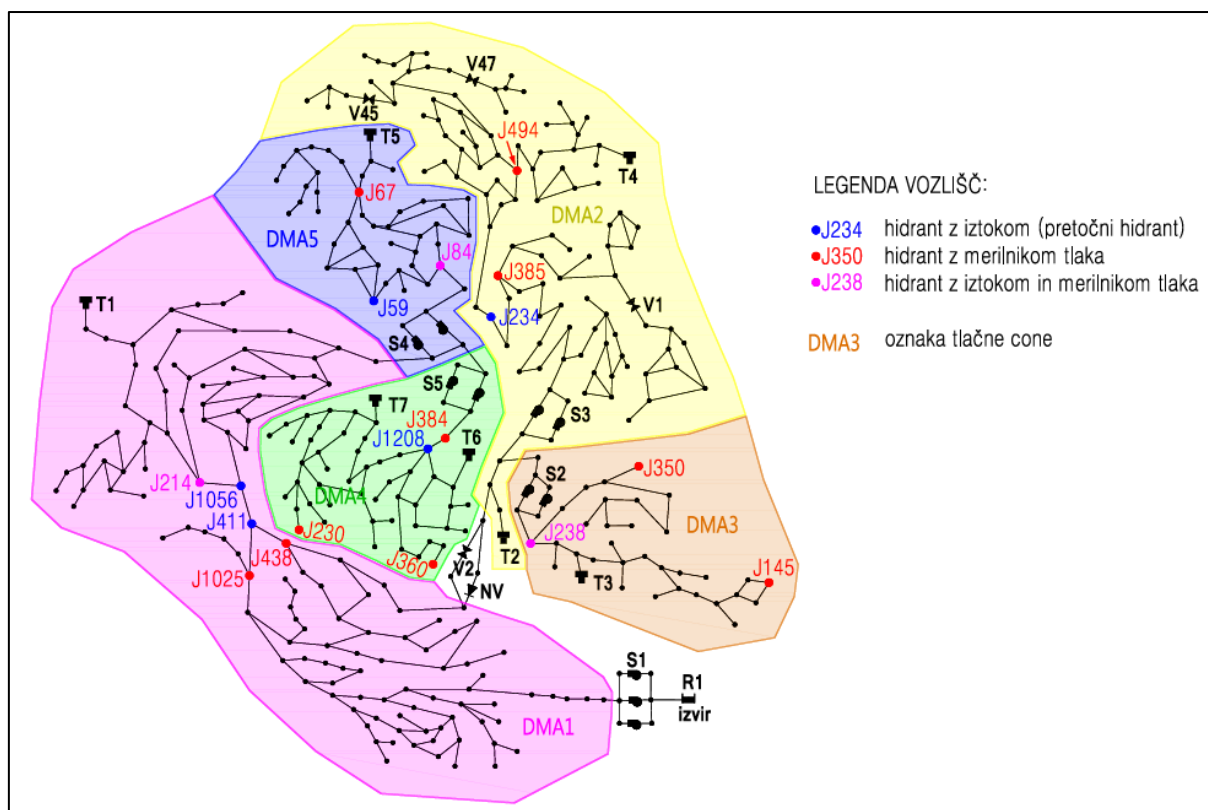
V vodovodnem omrežju poskušamo s pomočjo programa Epanet ustvariti dinamične pogoje obratovanja (požarna obremenitev na hidrantih), saj statična obremenitev v normalnih obratovalnih pogojih ne daje pogojev (majhna poraba → majhni pretoki → majhne hitrosti → majhne hidravlične izgube), da bi lahko verodostojno ocenili C-koeficiente cevi. Drugače povedano, ko so hitrosti v ceveh majhne, je možno, da se model obnaša kot umerjen, navkljub velikemu odstopanju med predvidenimi in dejanskimi vrednostmi C-koeficientov. Vozliščem, ki odgovarjajo hidrantom, na katerih so se izvajale meritve, dodelimo osnovno porabo v višini iztoka iz hidranta. Tlake v vozliščih, dobljenih s hidravličnim izračunom, nato primerjamo s tlaki meritev (glej preglednico 2).

C-koeficient lahko grupiramo, če imajo cevovodi sprejemljivo enake karakteristike (starost in material cevi, premer cevi in relativno lokacijo).

V prvem koraku cevem po posameznih tlačnih conah dodelimo začetno vrednost C-koeficienta, katere vrednost se giblje med 80 in 140, na podlagi tabele starosti cevi v uporabi in materiala cevi po (Ductile Iron Pipe Research Association, 2016). Ko zaženemo statično simulacijo stalnega toka z dinamično obtežbo (požarna obremenitev), opazimo, da izračunani tlaki v vozliščih, kjer so se izvajale meritve na hidrantih (slika 20), znatno odstopajo od izmerjenih tlakov.

Preglednica 2: Podatki meritev na hidrantih po posameznih tlačnih conah

DMA	Poraba		Tlaki			Višina vode		Iztok iz rezervoarja		Pretok črpališča	
	Vozlišče	[l/s]	Vozlišče	[m]	Statični [m]	Rezervoar	[m]	Rezervoar	[l/s]	Črpališče	[l/s]
1	J214	126	J214	50	65	T1	3	T1	247	S1	228
	J1056	126	J1025	51	66					S4+S5	58
	J411	126	J438	48	64						
2	J234	63	J385	49	62	T4	2,5	T4	50	S3	54
			J494	12	24						
3	J238	63	J145	53	77	T3	3	T3	28	S2	48
			J350	65	95						
			J238	55	85						
4	J1208	63	J384	39	70	T6	5	T6	12	S5	38
			J230	63	75	T7	2,5	T7	34		
			J360	58	87						
5	J59	32	J84	58	80	T5	1	T5	37	S4	45
	J84	32	J67	22	27						



Slika 20: Prostorski prikaz razporeditve hidrantov, na katerih so bile izvedene meritve

Manjši premer cevi in višje ocenjeni koeficient hrapavosti oz. nižje ocenjeni C-koeficient vplivata na povišanje hidravličnih izgub, kar v primeru transporta vode pomeni manjši pretok in nižje oskrbovalne tlake (Šantl, 2007).

Zato smo v naslednjem koraku bolj konservativni in predvidene začetne vrednosti C-koeficienta zmanjšamo za 15 odstotkov, vendar nam tudi ta ukrep ne prinese zadovoljivih rezultatov, saj so izračunani tlaki v merjenih vozliščih še zmeraj previsoki. Nadaljujemo z ročnim nastavljanjem vrednosti C-koeficienta (grupiramo glede na premer cevi), ki se na primer za tlačno cono DMA3 giblje med 100 in 120. Izračun nam pokaže, da so tlaki tudi v tem primeru previsoki (tlačna cona DMA3), in to v povprečju za 10 metrov vodnega stolpca (1 bar).

Zaradi soodvisnosti osnovne porabe in tlakov v vozliščih, si lahko pomagamo s sledečim pristopom (Walski et al., 2003):

$$A = \frac{F}{\left(\frac{b}{a}\right) \cdot (Q_e + F) - Q_e} \quad (33)$$

$$B = \frac{F}{b \cdot (Q_e + F) - a \cdot Q_e}, \quad (34)$$

kjer je A = korekcijski faktor,
 B = korekcijski faktor,
 F = iztok iz hidrantov [m^3/s],

$$b = \left(\frac{h_2}{h_4}\right)^{0,54},$$

$$a = \left(\frac{h_1}{h_3}\right)^{0,54},$$

Q_e = predvidena poraba na območju, kjer so se izvajale meritve na hidrantih [m^3/s],

h_1 = razlika izmerjenih piezometričnih višin na odseku, statični pogoji [m],

h_2 = razlika izmerjenih piezometričnih višin na odseku, dinamični pogoji [m],

h_3 = razlika izračunanih piezometričnih višin na odseku, statični pogoji [m] in

h_4 = razlika izračunanih piezometričnih višin na odseku, dinamični pogoji [m].

S pomočjo korekcijskih faktorjev A in B lahko izračunamo boljše približke Hazen-Williams C-faktorjev in/ali osnovne porabe vozlišč:

$$Q_c = A \cdot Q_e \quad (35)$$

$$C_c = B \cdot C_e, \quad (36)$$

kjer je Q_c = popravljena vrednost porabe na območju meritev [m^3/s],

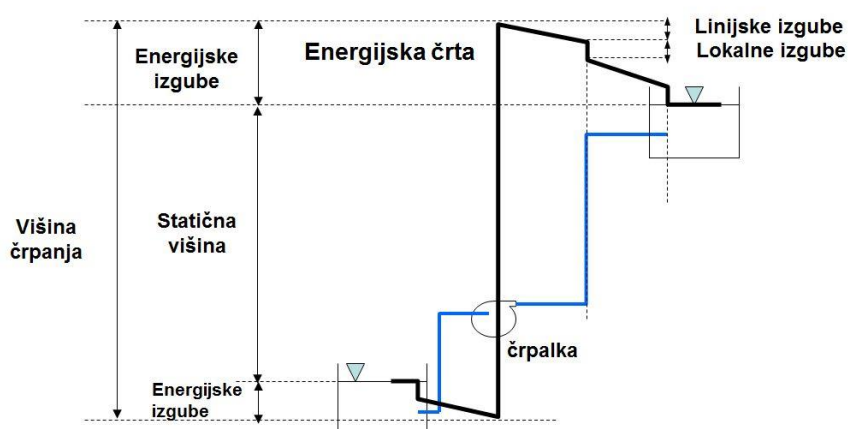
C_c = popravljena vrednost C-faktorjev in

C_e = začetna predvidena vrednost C-faktorjev.

4.7 Črpališča in črpalke

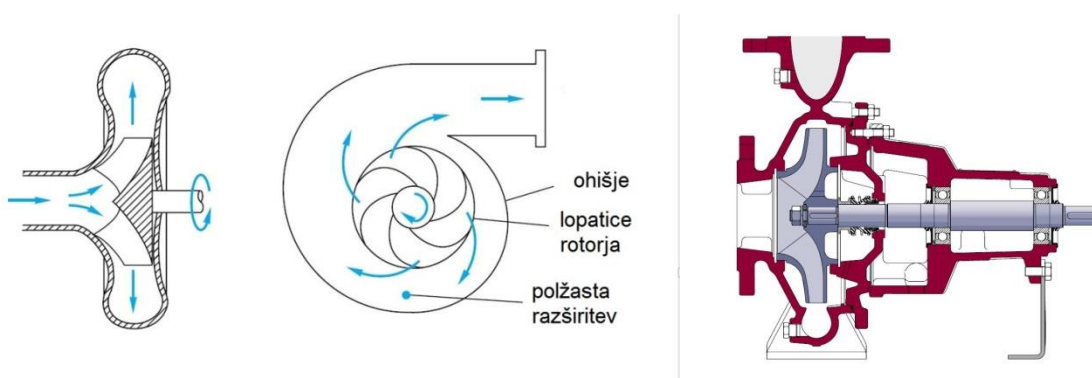
4.7.1 Osnove

Črpalke so elementi vodovodnega sistema, s pomočjo katerih dovajamo energijo tekočini, tako da je le-ta sposobna premagovati višinske razlike in vsoto vseh energijskih izgub (linijske in lokalne izgube) od prereza A do prereza B, ki se v danih pogojih pojavljajo v sistemu (slika 21), obenem mora zagotavljati ustrezne tlake in pretoke v oskrbovanem vodovodnem omrežju. To energijo, ki jo ponazorimo kot višino črpanja in jo izražamo v metrih vodnega stolpca, črpalka zagotovi s pretvorbo električne energije v mehansko.



Slika 21: Shematski prikaz energijske črte sistema s črpalko (Benjamin, 2015)

V sistemih za oskrbo vode so najpogosteje uporabljene centrifugalne črpalke. Vodo, ki priteče skozi odprtino v središče centrifugalne črpalke, prestrežejo lopatice rotorja in jo tangencialno in radialno (vrtinčasto) pospešujejo, vse dokler ne zapusti oboda lopatic. Voda ob prehodu skozi lopatice rotorja pridobi tako hitrost kot pritisk, nato se v polžasti razširitvi pretok zmanjša, kar ima za posledico še dodatno povečanje pritiska (White, 2003).



Slika 22: Shematski prikaz (White, 2003: str 714) in prezek centrifugalne črpalke (Grundfos, 2004)

Nelinearno zvezo med višino črpanja in pretokom skozi črpalko se podaja s Q/h karakteristiko, ki jo po (Walski et al., 2003) matematično zapišemo v obliki polinoma :

$$h = h_0 - c \cdot Q^m, \quad (37)$$

kjer je h = višina črpanja [m],

h_0 = maksimalna višina črpanja pri pretoku $Q = 0$ [m],

Q = pretok črpalke [l/s] in

c, m = koeficienta za opis oblike črpalne krivulje.

Iz enačbe (37) opazimo, da večji kot je pretok skozi črpalno, manjša je višina črpanja črpalke.

Če poznamo in vnesemo karakteristične točke črpalke (maksimalna višina črpanja pri pretoku nič, točka obratovanj črpalke in maksimalni pretok pri minimalni črpalni višini) nam program Epanet sam aproksimira enačbo črpalne karakteristike.

Za dan tip vgrajenega rotorja (lopatic) in dano hitrostjo, s katero elektromotor poganja rotor, je Q/h karakteristika črpalke fiksna. Za črpalke z nastavljivo hitrostjo lahko na podlagi zakona afinite (sorodnosti) podamo naslednje zveze (Rossman, 2000):

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (38)$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \quad (39)$$

kjer je Q_1 = pretok pri hitrosti n_1 ,

Q_2 = pretok pri hitrosti n_2 ,

h_1 = višina črpanja pri hitrosti n_1 ,

h_2 = višina črpanja pri hitrosti n_2 in

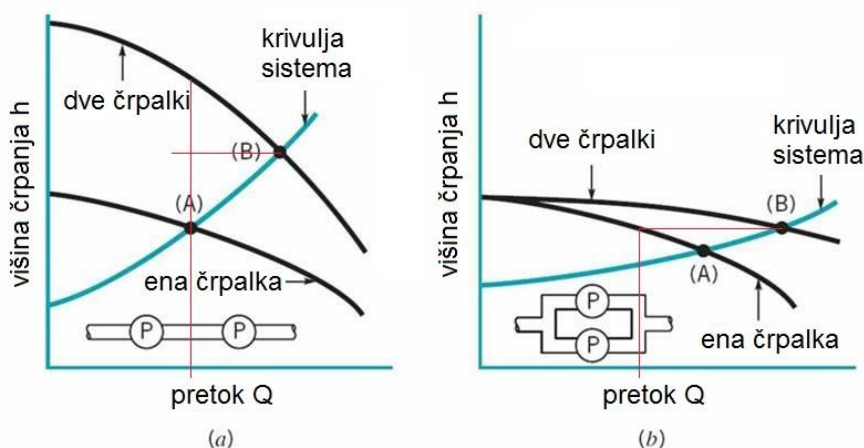
n_1, n_2 = različni hitrosti.

Če poznamo Q/h karakteristiko črpalke pri določeni hitrosti, lahko z enačbami (38), (39) in (37) določimo črpalno krivuljo pri poljubni hitrosti.

4.7.2 Zaporedna in vzporedna vezava črpalk

Če želimo pokriti časovno spreminjanje dneve porabe in obenem zagotoviti zadovoljive pretoke in tlake v sistemu, se zgodi, da včasih samo ena črpalna ni kos nalogi. Črpalnišča se zato opremijo s kombinacijo črpalk, ki jih lahko vežemo vzporedno ali zaporedno.

Pri zaporedni vezavi dveh enakih črpalk se nam pri enakem pretoku poveča višina črpanja. Največji pretok vezave je tako pogojen z največjim dopustnim pretokom vsake izmed sodelujočih črpalk. Skupna višina črpanja je pri pretoku nič enaka dvakratniku višine črpanja ene črpalke. Slednje pa ne velja za obratovalne pretoke, saj je višina črpanja v tem primeru odvisna od točke obratovanja črpalk oziroma od naklona krivulje sistema v danem obtežnem primeru (točka B – slika 23 a).



Slika 23: Zaporedna in vzporedna vezava črpalk (Benjamin, 2015)

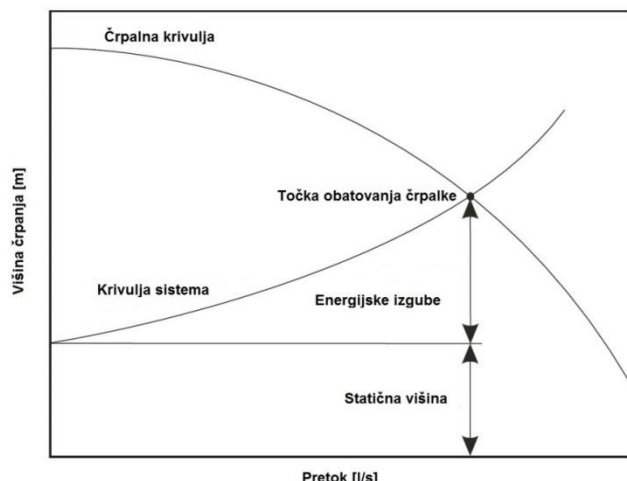
Z vzporedno vezavo črpalk dosežemo povečanje pretokov (pri enaki zahtevani višini črpanja). Z večanjem pretokov se zaradi vpliva kinetičnega dela energije večajo tudi energijske izgube v sistemu, zato morajo črpalke zagotavljati nekoliko višjo višino črpanja za premagovanje le-teh. Višja višina črpanja pa povzroči, da posamezna črpalka vzporedne vezave zdrsne po krivulji črpanja v območje nižjih pretokov. Točka A na sliki 23 b predstavlja točko obratovanja ene črpalke, točka B pa točko obratovanja dveh vzporedno vezanih črpalk glede na krivuljo sistema. Če od točke B potegnemo vodoravno črto, dobimo točko na črpalni krivulji ene črpalke, s pomočjo katere lahko odčitamo, kakšen pretok doprinese posamezna črpalka pri vzporedni vezavi dveh enakih črpalk.

4.8 Krivulja sistema in točka obratovanja črpalke

Krivuljo sistema najlažje opišemo kot razmerje med višino črpanja in pretokom, in pove, kolikšno višino črpanja mora premagovati črpalka, da bi lahko sistemu uspešno zagotavljala odgovarjajoči pretok glede na zahtevano porabo vozlišč. Krivulja sistema je odvisna od karakteristik vodovodnega omrežja, in sicer: od višine vodne gladine v vodohranu, delovanja črpalk, fizičnih karakteristik cevi (C-faktorji) in porabe sistema. Za razliko od črpalne krivulje, ki je fiksna za dano karakteristiko črpalke (vrsta lopatic rotorja, hitrost črpalke), imamo pri krivulji sistema raje opravka z družino krivulj, saj se razmere v sistemu neprestano spreminjajo glede na nihanje porabe vozlišč in višino vode v vodohranu. Torej posamična krivulja izmed družine krivulj sistema enoznačno odraža pogoje vodovodnega sistema v danem času oziroma v točno določenem obtežnem primeru izvajanja hidravličnega izračuna.

Presečišče črpalne krivulje in krivulje sistema imenujemo točka obratovanja črpalke in pove, kolikšen pretok bo šel skozi črpalke in koliko bo znašala višina črpanja, ki jo bo črpalke dodala vodi, da le-ta premaga statično višino in vsoto energijskih izgub v sistemu.

Na sliki 24 je prikazan primer črpalne krivulje, krivulje sistema in točke obratovanja.



Slika 24: Črpalna krivulja, krivulja sistema in točka obratovanja
(Walski et al., 2003: poglavje 2, str.48)

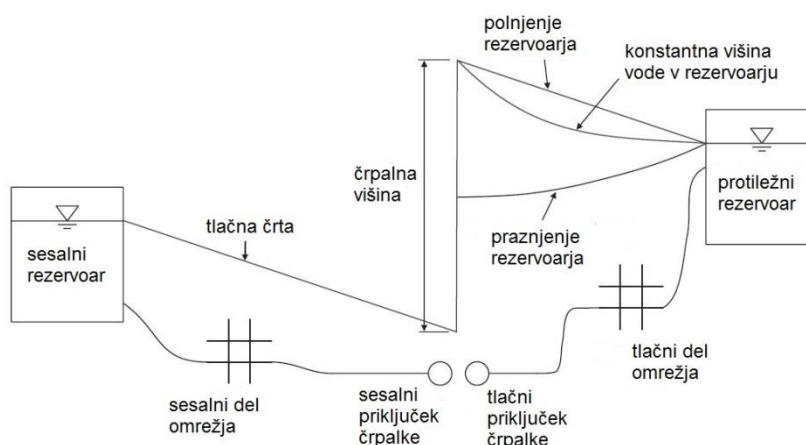
Energija, ki je potrebna za premagovanje višinskih razlik, je konstantna in se ne spreminja v odvisnosti od pretoka skozi črpalko. Kar pa ne velja za energijske izgube, ki proporcionalno naraščajo z naraščanjem pretoka. Kumulativna energija, ki jo mora zagotavljati črpalka v danih obratovalnih pogojih, je tako sestavljena iz statične višine in vsote vseh energijskih izgub.

4.8.1 Določanje krivulje sistema

Realni vodovodni sistemi so skupek velikega števila cevi in vozlišč, ki tvorijo kompleksen sistem vej in zaprtih zank, zato je smiselno, da za enostavnejši, predvsem pa natančnejši izračun tlakov uporabimo hidravlični model. Da bi lahko pridobili krivulje sistema, ki ustrezajo posameznemu obtežnemu primeru, moramo hidravlični model posamezne tlačne cone razdeliti na dva dela; to je na del, ki leži na sesalni strani črpalke, in del, ki leži na tlačni strani črpalke (slika 25). Posamezni del obravnavamo ločeno, pri tem si pomagamo s postopkom, ki ga opisuje (Walski et al., 2003).

Črpalko odstranimo iz hidravličnega modela, tako da pustimo prosta vozlišča, kjer je bila črpalka priključena. Količino vode, ki zapusti sesalni del omrežja, modeliramo kot porabo vozlišča in jo pripišemo sesalnemu priključku črpalke. Analogno, vozlišču, ki odgovarja tlačnemu priključku črpalke, dodelimo negativno porabo (dotok vode v vozlišče) enake velikosti, kot je poraba na sesalnem priključku črpalke. Zaženemo statično simulacijo stalnega toka in odčitamo vrednosti tlačne črte na priključkih manjkajoče črpalke. Vrednost tlaka na sesalnem priključku črpalke odštejemo od vrednosti tlaka na tlačnem priključku črpalke. Razlika nam pove, kakšno višino črpanja mora črpalka zagotavljati, da premakne omenjeno količino vode med dvema tlačnima conama oziroma pretok skozi črpalko.

Vsakič, ko v danem obtežnem primeru zaženemo statično simulacijo, dobimo za rezultat točko na krivulji sistema. S spreminjanjem pretoka na obeh priključkih črpalke in ponovnim zagonom statične simulacije dobimo dodatne točke, s pomočjo katerih lahko izrišemo krivuljo sistema za dan obtežni primer.



Slika 25: Shematski prikaz profila sistema – pridobivanje krivulje sistema v različnih obtežnih primerih (Walski et al., 2003: poglavje 8, str. 343)

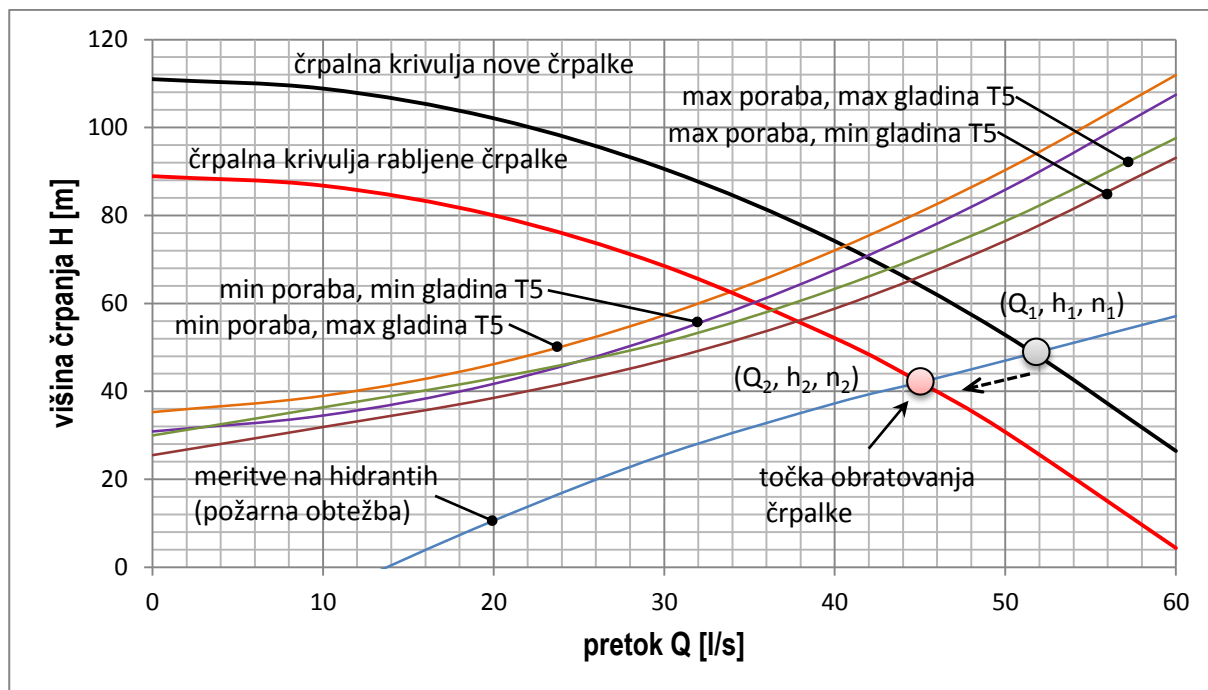
Krivulje sistema morajo pokrivati vse možne obtežne scenarije, ki jih črpalka v sistemu lahko v obratovalnih pogojih pričakuje. Višje krivulje izmed družine krivulj sistema pripadajo obtežnemu primeru, kjer imamo nizko gladino vodohrana na sesalni strani črpalke, visoko gladino protiležnega vodohrana na tlačni strani črpalke in minimalno porabo. Nižje krivulje sistema nasprotno pripadajo obtežnemu primeru, kjer imamo visoko gladino vodohrana na sesalni strani črpalke, nizko gladino protiležnega vodohrana in visoko porabo vozlišč.

Primer družine krivulj sistema je prikazan na grafikonu 17, konkretnije gre za krivulje sistema tlačne cone DMA5.

4.8.2 Določanje točke obratovanja in posodobitev črpalne krivulje črpalke

V fazi umerjanja C-koeficientov po posamezni tlačni coni so se v merjenih vozliščih pojavljale višje računске vrednosti tlakov glede na izmerjene vrednosti na hidrantih. Nižje vrednosti izračunanih tlakov lahko dosežemo z zvišanjem vozliščne porabe oziroma tako, da črpalka dovede manj energije v sistem. Ker je začetna simulacija bila izvedena s črpalno krivuljo nove tovarniške črpalke, lahko sklepamo, da smo v času simulacije imeli na voljo več pretoka in rahlo višjo višino črpanja (torej več energije v sistemu), kot je dejansko bilo na voljo s staro črpaljo.

Z leti obratovanja se zaradi različnih razlogov (obraba lopatic rotorja, nevdzdrževanje črpal, mehanske poškodbe, ipd.) lahko črpalne sposobnosti črpal bistveno poslabšajo, zato moramo za uspešno umerjanje hidravličnega modela prilagoditi črpalne krivulje.



Grafikon 17: Krivulje sistema, črpalna krivulja nove in rabljene črpalke tlačne cone DMA5

Če želimo pridobiti črpalno krivuljo rabljene črpalke, si ponovno pomagamo s podatki meritev na hidrantih in s preglednico 2. Kot primer navedimo tlačno cono DMA5. Preden zaženemo statično simulacijo stalnega toka, moramo nastaviti vse parametre modela, da bodo le-ti odražali stanje, ko so se izvajale meritve na hidrantih – sistemu dodelimo obtežni primer. Vozliščem tlačne cone dodelimo porabo v času izvajanja meritev, to je v času trajanja 1. ure podatkov SCADA, vozliščem J59 in J84 dodelimo požarno obremenitev ter nastavimo višino vode v vodohranu T5. Razvidno je, da je pretok črpališča S4 v času odprtih hidrantov znašal 45 l/s. Na podlagi obratovalnih pravil črpalk vemo, da je v času meritev bila v pogonu le črpalka PU8. Če hidravličnemu modelu odstranimo črpalko in na vozlišči, na katerih je bila leta priključena, dodelimo porabo 45 l/s ter -45 l/s (negativna poraba na tlačnem priključku črpalke) in zaženemo simulacijo, dobimo (iz razlike tlačne črte na priključkih črpalke) vrednost višine črpanja 42,05 metra. S koordinato pretoka tako tvori točko obratovanja črpalke pri požarni obremenitvi modela (glej grafikon 17 – rdeča točka). Če na priključni vozlišči dodelimo serijo pretokov in ponovimo opisani postopek, dobimo krivuljo sistema pri požarni obtežbi. Ker vemo, da mora posodobljena črpalna krivulja potekati skozi točko obratovanja, lahko s pomočjo zakona afinite – enačbi (38) in (39) ter enačbe (37) izračunamo in izrišemo posodobljeno krivuljo črpalke PU8.

Zakon afinite je izpeljan na predvidevanju, da imata dve različni točki obratovanja, ki jih med seboj primerjamo, enak izkoristek, zato so relacije med njima odvisne od oblike (naklona) krivulje sistema, na kateri le-ti ležita (Fluide Design, 2016). Za pravilen izračun se zato nujno moramo premakniti po krivulji sistema (od sive do rdeče točke obratovanja na grafikonu 17). Enačbo posodobljene črpalne krivulje dobimo tako, da črpalno krivuljo nove tovarniške črpalke potegnemo skozi pridobljeno točko obratovanja za obtežni primer požara (rdeča točka) oziroma v enačbo črpalne krivulje nove črpalke vnesemo koordinati točke obratovanja ($Q=45$ l/s in $h=42,05$ m) in izrazimo novo vrednost h_0 (maksimalna višina črpanja pri pretoku $Q = 0$). Koeficienta za opis oblike črpalne krivulje (c , m) sta v obeh primerih enaka.

Zavedati se moramo, da so parametri modela, ki so bili uporabljeni pri izdelavi obtežnega primera, vprašljive natančnosti, saj ne poznamo dejanskih vrednosti C-koeficientov in vozliščne porabe tlačne cone, zato je tudi posodobljena krivulja črpanja podvržena določeni stopnji napake.

Iz grafikona 17 lahko opazimo še, da se krivulja sistema za obtežni primer požara razlikuje od ostalih v družini krivulj sistema za normalne obratovalne pogoje in je bolj podobna krivulji sistema s tlačno odvisnimi porabniki po (Walski et al., 2010). Hidravlični izračun stalnega toka s programom Epanet temelji na kriteriju zagotavljanja porabe, zato se v primeru izjemnih dogodkov (požarni odvzem vode na hidrantih, lom cevi) lahko zgodi, da pri simulaciji nižjih pretokov črpalke, nam izračun v določenih vozliščih sistema pokaže nizke, celo negativne tlake (podtlake). Požarna obremenitev je tlačno odvisna poraba, zato se v hipotetičnem primeru uporabe manj zmogljive črpalke (točka obratovanja bi tako po krivulji sistema zdrsnila proti nižjim vrednostim višine črpanja) lahko pripeti, da bi bila oskrba z vodo določenih vozlišč ali delov sistema motena.

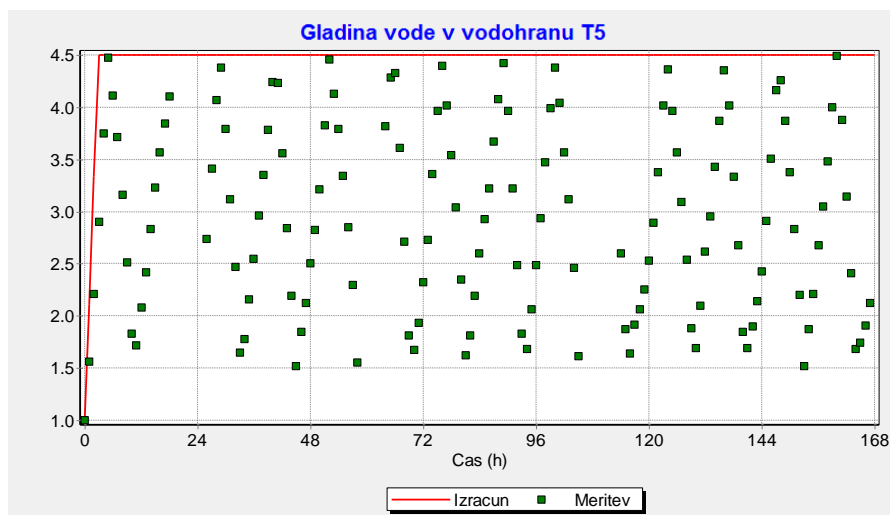
Pri izbiri in modeliranju črpalk moramo biti pozorni, da obratovalne lastnosti (Q/h karakteristika) črpalke zadostijo celotnemu spektru obtežnih primerov, ki jih lahko pričakujemo v sistemu, obenem moramo paziti, da se projektirana točka obratovanja nahaja v območju največjega izkoristka črpalke.

4.9 Umerjanje tlačnih con

Vsako tlačno cono smo obravnavali individualno, to pomeni, da smo po principu "poskus – napaka" iterativno poskušali nastaviti parametre modela tlačne cone, tako da so se izračunane hidravlične veličine, kar se da najbolje ujemale z rezultati meritev. Pri tem smo morali upoštevati tudi možnost kompenzacije napak. S spreminjanjem neznanih veličin lahko sicer odpravimo določeno nedoslednost, obenem lahko s tem v hidravlični model vnesemo dodatna odstopanja. V fazi umerjanja modela moramo zato določiti neznane veličine tako, da bodo ustrezale širšemu območju obratovanja sistema in ne samo dotičnemu obtežnemu primeru. Proces je lahko dolgotrajen in ima pridih detektivskega dela (Walski, 1990).

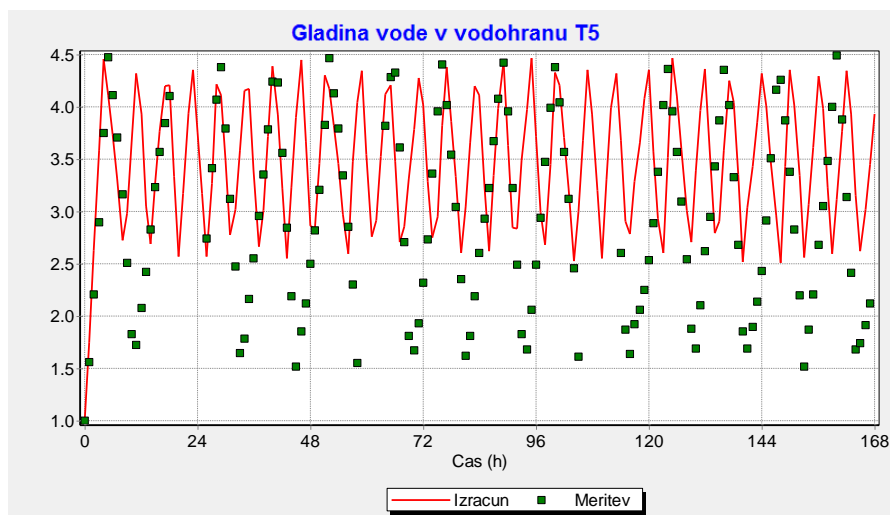
4.9.1 Tlačna cona DMA5

Po vnosu C-koeficientov, pridobljenih s pomočjo testov na hidrantih in zagonu izračunov, lahko iz slike 26 opazimo, da je vodohran T5 ves čas poln oziroma prihaja do prelivanja vodne gladine na višini 4,5 metra, kar nam da slutiti, da je znotraj tlačne cone porazdeljena premajhna poraba po vozliščih. Kljub povečanju porabe za faktor 1,5 je v vodohranu T5 še vedno prihajalo do prelivanja vode, zato smo iskali vzrok napake drugje. Glede na to, da je višek vode v tlačni coni lahko le posledica premajhne porabe vozlišč oziroma prevelikega dotoka v tlačno cono, smo se usmerili v podroben pregled črpalk.



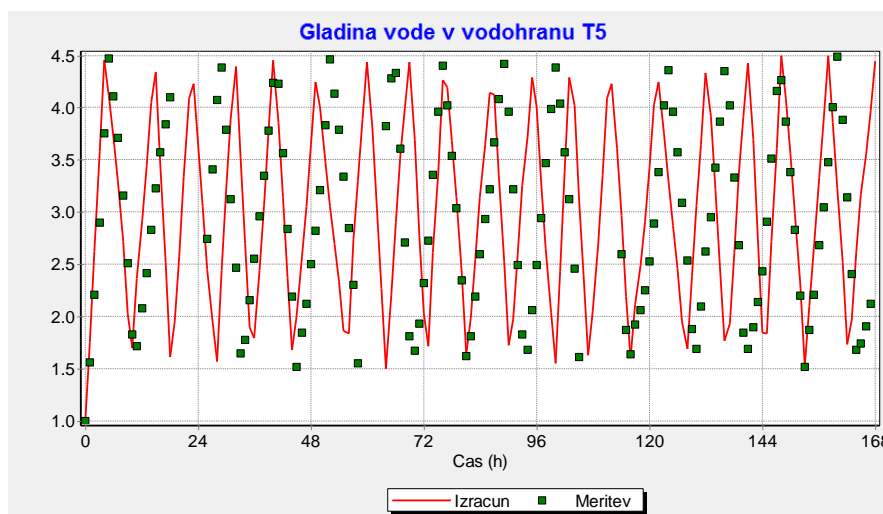
Slika 26: Prelivanje vodohrana T5

Ob zagonu hidravličnega računa je bil začetni status črpalk črpališča S4 nastavljen na odrtu, zato sta obe črpalki (PU8 in PU9) v času simulacije hkrati dovajali vodo v tlačno cono (podvojeni pretoki), saj iz krmilnega programa črpalk in ventilov (slika 3) ni razvidno, pri katerih robnih pogojih naj bi prišlo do vklopa/izklopa črpalke PU9, kar je privedlo do prelivanja vodohrana T5. Pred zagonom izračuna je zato vsem črpalkam sistema potrebno nastaviti začetni status na zaprto, potem ob izvajanju simulacije nadzor nad delovanjem posameznega elementa (vklop/izklop) prevzame krmilni program črpalk in ventilov. Ob spremenjenem začetnem statusu črpalk lahko opazimo, da v času simulacije črpalka PU9 ne obratuje, tako da je celotna količina vode, ki vstopi v tlačno cono DMA5, prečrpana le s strani črpalke PU8.



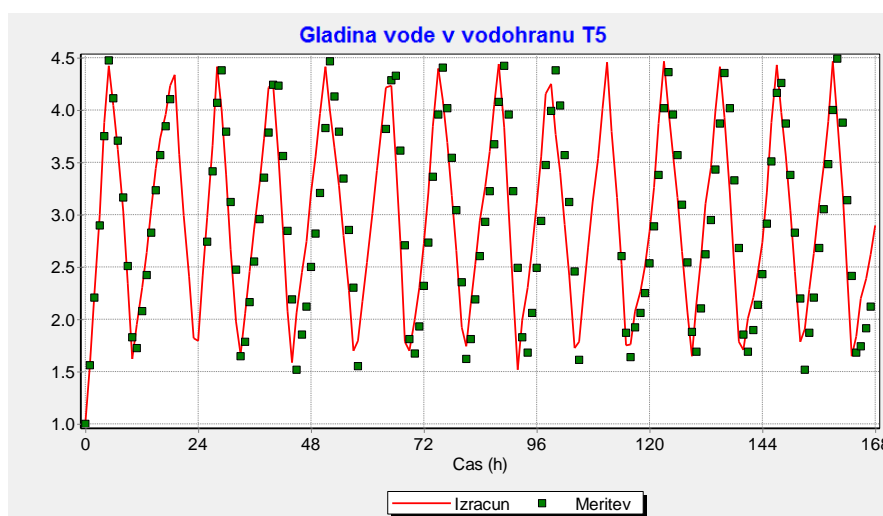
Slika 27: Gladina vode v vodohranu T5; popravljen začetni status črpalk

Iz slike 27 opazimo še, da je nivo vode, pri katerem pride do vklopa črpalke PU8 zastavljen previsoko (2,5 metra) glede na potek cikla praznjenja in polnjenja vodohrana T5 (glej grafikon 5). Ker se vodohran začne polniti takoj, ko se vklopi črpališče S4 in ker lokalni minimum vodne gladine sovпада s časom vklopa črpališča, bomo za nov nivo, pri katerem pride do vklopa črpalke PU8, nastavili na vrednost 1,5 metra (slika 28).



Slika 28: Gladina vode v vodohranu T5; popravljen nivo vklopa črpalke PU8

Če posodobimo črpalno krivuljo nove črpalke in ponovno zaženemo razširjeno časovno simulacijo stalnega toka, konvergiramo k boljšemu ujemanju izračunanih vrednosti v primerjavi z meritvami (slika 29).

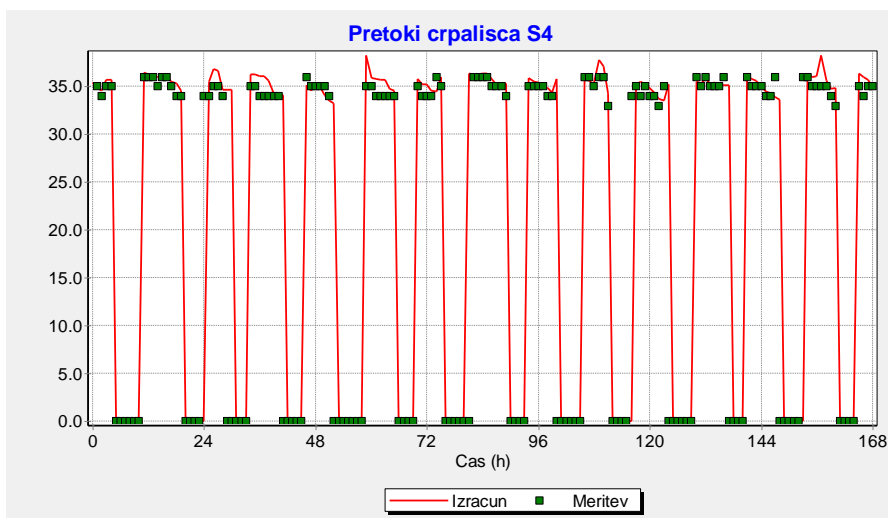


Slika 29: Gladina vode v vodohranu T5; popravljena črpalna krivulja

Zaradi enakomernega in enostavnega vzorca polnjenja in praznjenja vodohrana T5 lahko predvidimo, da smo okvirno uganili potek nihanja vodne gladine v času manjkajočih podatkov, zato je izstopajoča konica (stopnica) koeficienta urne porabe v večernih urah na dan 1. 1. 09 (glej grafikon 16) lahko posledica napačne ocene količine črpanja črpališča S4 (čas vklopa črpalke t_v). Z nastavitvijo časov vklopa črpalke se tudi nismo mogli znebiti konice, zato nam ni preostalo drugega, kot da smo ponovno preučili neustrezne (manjkajoče) vhodne podatke.

Skozi celotno opazovano obdobje 168 ur imamo na voljo podatke pretokov črpališč, zato lahko na podlagi pretokov črpališča S4 in obratovalnih pravil črpalk in ventilov določimo, v katerem časovnem obdobju vodna gladina vodohrana T5 doseže svoj lokalni minimum ali maksimum. Ker se črpalka PU8 vklaplja in izklaplja na podlagi višine vode v vodohranu T5,

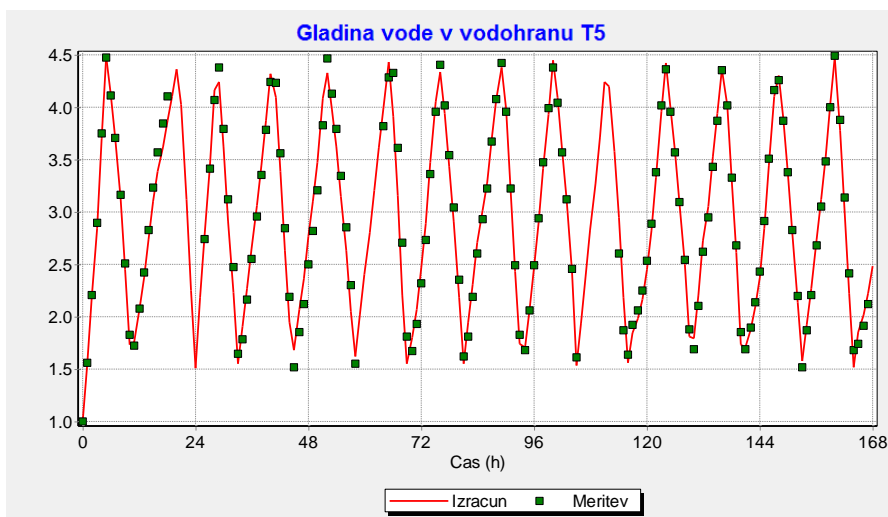
lahko opazimo (slika 30), da smo v nekaterih časovnih obdobjih “zgrešili” oziroma zamaknili čas vklopa in izklopa črpalke PU8.



Slika 30: Pretoki črpalnice S4

Če se je nesoglasje zgodilo v obdobju, ko imamo na voljo podatke o višinah vodne gladine vodohrana, potem skušamo napako odpraviti s spreminjanjem časov vklopa črpalke t_v . Če se je napaka pripetila v obdobju z neuporabnimi podatki poteka vodne gladine, potem napako skušamo odpraviti tako, da ponovno predvidimo potek nihanja vodne gladine, saj vemo, kdaj doseže lokalno ekstremno vrednost glede na čas vklopa/izklopa črpalnice. Morebitno odstopanje kompenziramo še s spreminjanjem časov vklopa črpalke t_v .

Po ponovnem vnosu popravljenih koeficientov urne porabe dobimo zadovoljujoče ujemanje izračunanih in merjenih podatkov (glej sliko 31).

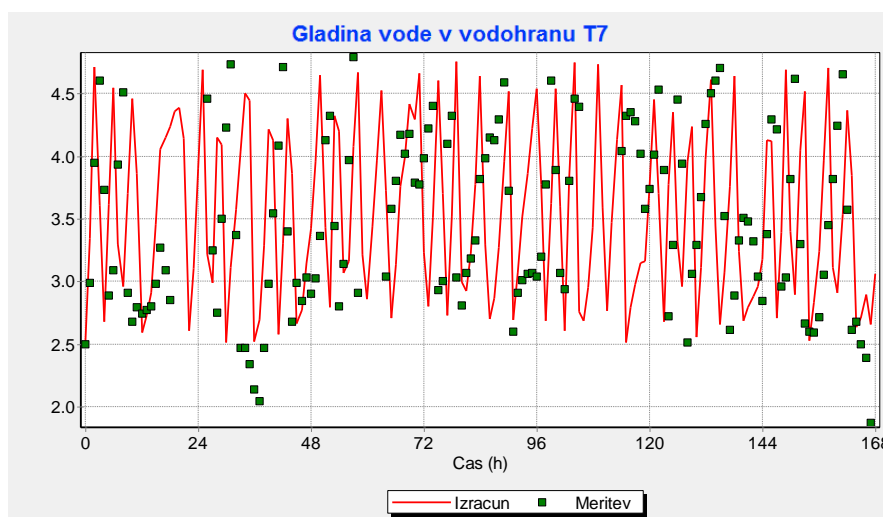


Slika 31: Gladina vode v vodohranu T5; popravljeni koeficienti urne porabe (potek nihanja vodne gladine)

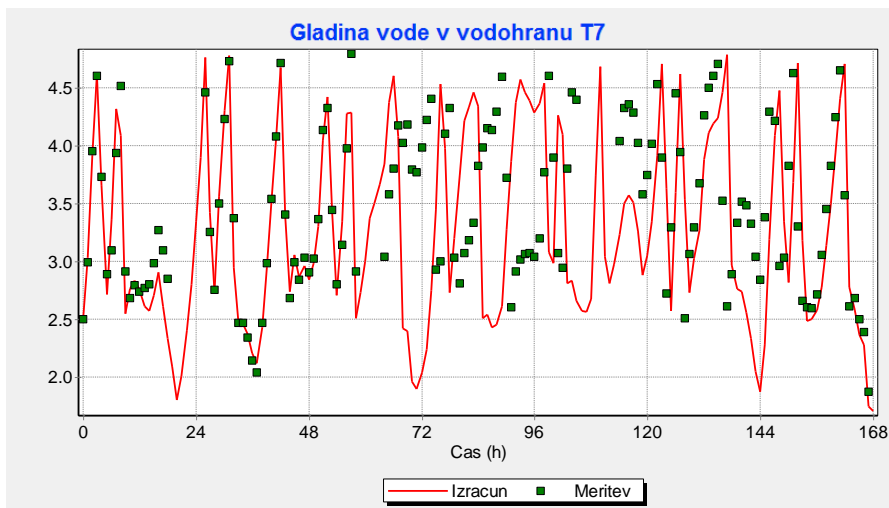
4.9.2 Tlačna cona DMA4

Po vnosu C-koeficientov, pridobljenih na podlagi meritev na hidrantih, lahko opazimo, da nihanje vodne gladine vodohrana T7 drastično odstopa (slika 32). Po popravku črpalne krivulje, se rezultati vidno izboljšajo (slika 33). Opazimo, da za določena časovna obdobja koeficienti urne porabe, s katerimi se množi osnovna poraba vozlišč, niso ustrezni, saj se izračunane vrednosti nihanja vodne gladine v vodohranu T7 le v grobem ujema s podatki meritev navkljub posodobljeni črpalni krivulji. Ker v tlačni coni sodelujeta dva vodohrana, moramo pri izračunu masne bilance tlačne cone oziroma koeficienta urne porabe upoštevati oba.

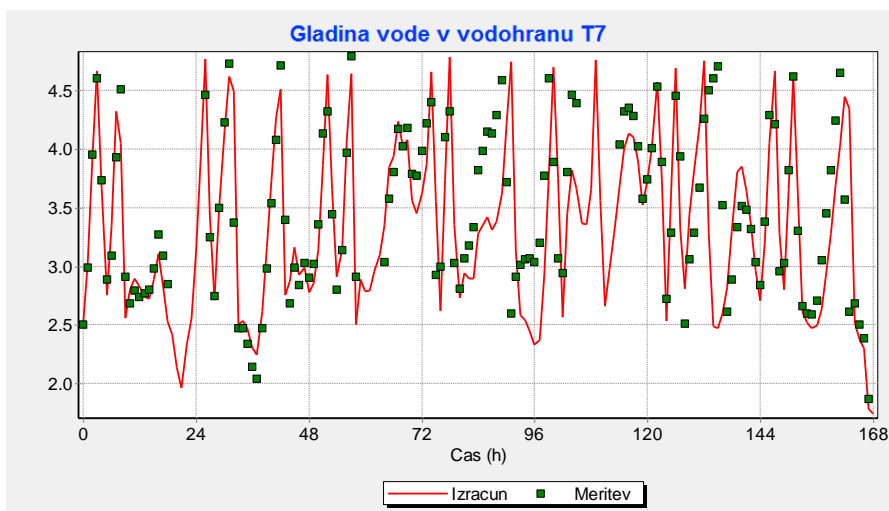
Če podrobno pogledamo grafikon 4, lahko opazimo, da obstaja povezava med pretokom črpališča in nihanjem vodne gladine vodohrana. Če se pretok črpališča v izbranem časovnem obdobju spremeni, se mora spremeniti tudi naklon praznjenja/polnjenja vodohrana, zato moramo za obdobje slabih podatkov ponovno preučiti predvidene začetne višine vodnih gladin, dobljene na osnovi linearne interpolacije med točkama, kjer se napaka na sistemu SCADA ni pojavila. Podobno kot pri tlačni coni DMA5 si pomagamo z grafom pretoka in s časi vklopa/izklopa črpališča S5. S popravkom predvidenih višin vodnih gladin in s spreminjanjem časa vklopa črpalke t_v , dosežemo, da se za celotno opazovano obdobje 168 ur koeficienti urne porabe, ki so bili pridobljeni na osnovi masne bilance tlačne cone, spremenijo, saj mora biti njihovo povprečje enako ena. Kljub boljšemu ujemanju z meritvami (slika 34) lahko še vedno opazimo večja odstopanja.



Slika 32: Gladina vode v vodohranu T7: C-koeficienti (meritve na hidrantih)

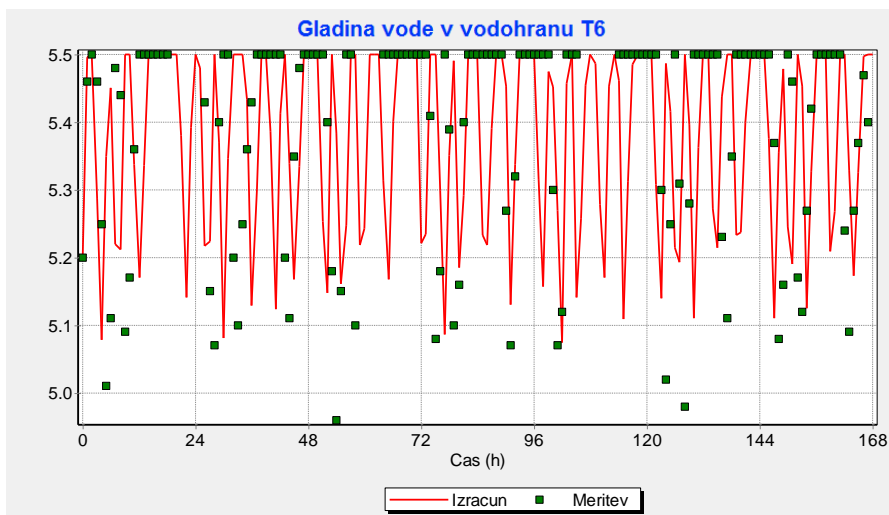


Slika 33: Gladina vode v vodohranu T7: C-koeficienti (meritve na hidrantih) in popravljena črpalna krivulja

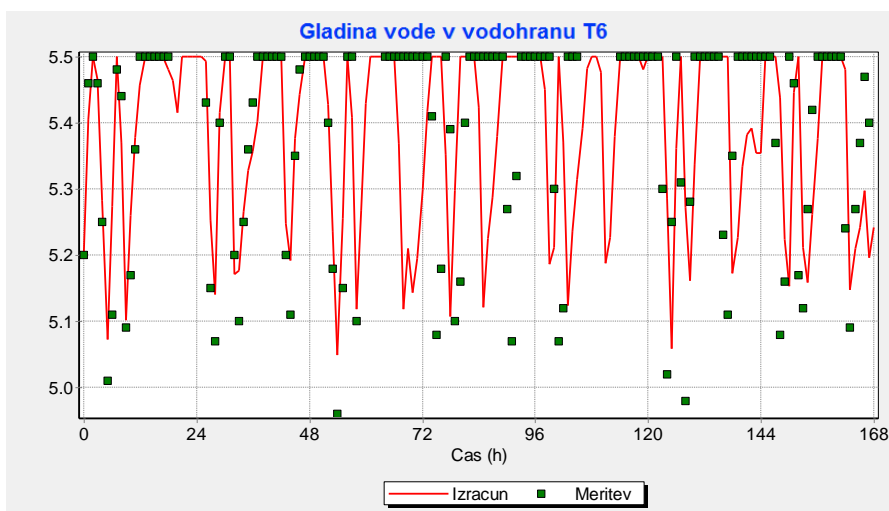


Slika 34: Gladina vode v vodohranu T7; C-koeficienti (meritve na hidrantih), popravljena črpalna krivulja in koeficienti urne porabe (nihanje vodne gladine)

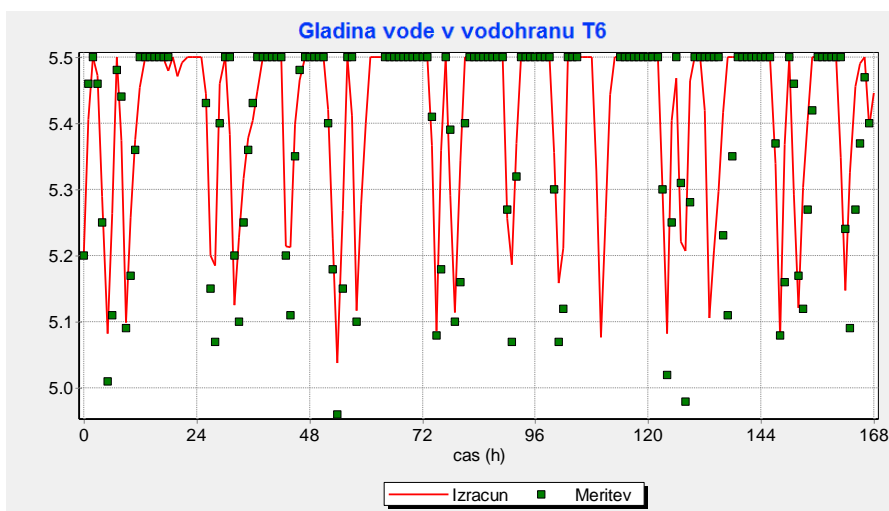
V spodnjih slikah lahko podobne ugotovitve opazimo tudi za vodohran T6.



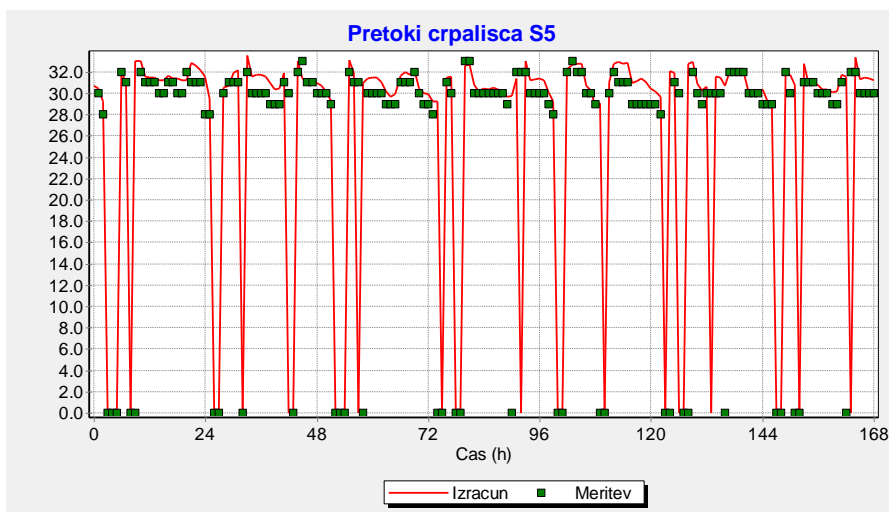
Slika 35: Gladina vode v vodohranu T6: C-koeficienti (meritve na hidrantih)



Slika 36: Gladina vode v vodohranu T6: C-koeficienti (meritve na hidrantih) in popravljena črpalna krivulja



Slika 37: Gladina vode v vodohranu T6; C-koeficienti (meritve na hidrantih), popravljena črpalna krivulja in koeficienti urne porabe (nihanje vodne gladine)

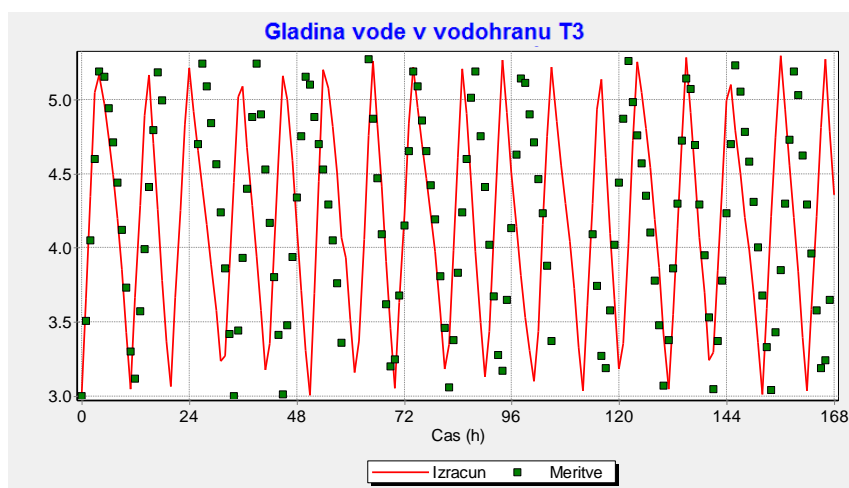


Slika 38: Pretoki črpalisca S5

4.9.3 Tlačna cona DMA3

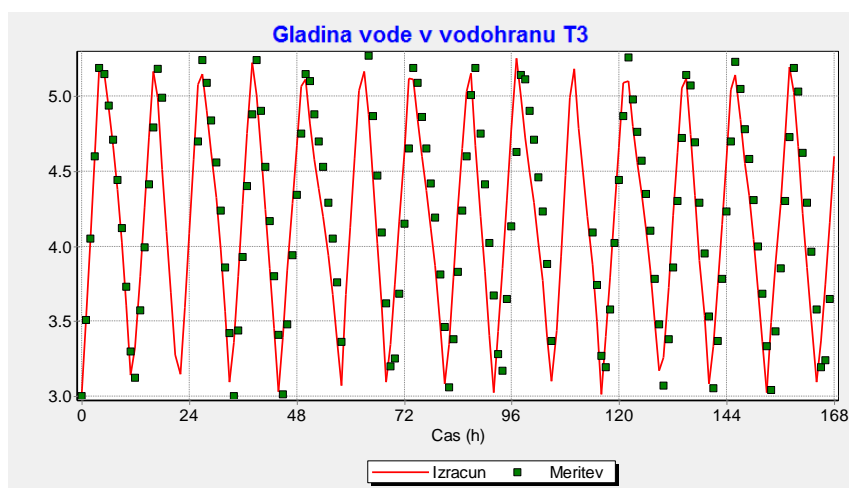
Iz obratovalnih pravil črpalk in ventilov ter grafikona 3 lahko opazimo, da nihanje vodne gladine v vodohranu T3 v opazovanem obdobju ne doseže nivoja 1,0 metra, pri katerem naj bi prišlo do vklopa črpalke PU5, zato sklepamo, da slednja ne sodeluje pri obratovanju črpališča S2. Če pred zagonom hidravličnega izračuna obema črpalkama dodelimo začetni status zaprto, lahko ugotovimo, da se tlačna cona oskrbuje le s črpalko PU4.

Podobno kot za prejšnje tlačne cone tudi tukaj najprej vnesemo popravljene C-koeficiente, pridobljene s pomočjo meritev na hidrantih. Zaradi enostavnega in enakomernega nihanja polnjenja in praznjenja vodohrana T3 lahko predvidimo, da smo okvirno uganili potek vodne gladine v času manjkajočih podatkov, saj smo že s samo spremembo C-koeficientov dobili dokaj dobro ujemanje izračunanih in merjenih vrednosti vodne gladine v vodohranu T3 (glej sliko 39).



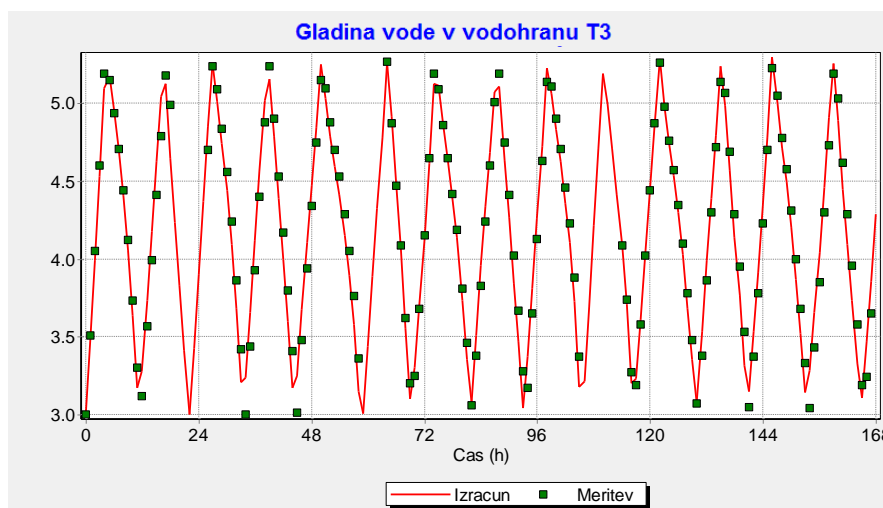
Slika 39: Gladina vode v vodohranu T3; C-koeficienti (meritve na hidrantih)

Po izračunu točke obratovanja črpalke za primer požarne obremenitve in izvedenemu popravku črpalne krivulje opazimo, da se frekvenca polnjenja in praznjenja vodohrana bolje prilega merjenim vrednostim (slika 40).



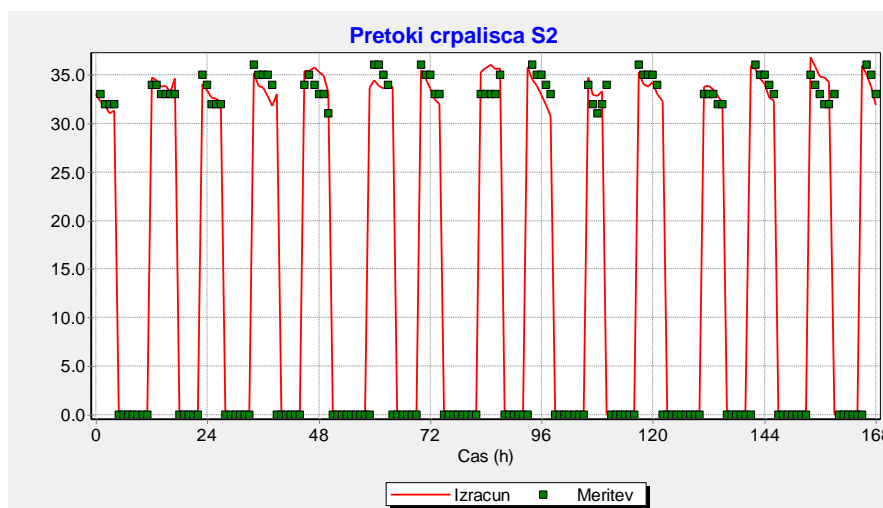
Slika 40: Gladina vode v vodohranu T3; C-koeficienti (meritve na hidrantih) in popravljena črpalna krivulja

Črpališča tlačnih con DMA5 in DMA3 uporabljajo črpalke enakih karakteristik (črpalna krivulja 9), zato poskusimo zagnati hidravlični izračun tlačne cone DMA3 s popravljeno črpalno krivuljo, pridobljeno s podatki požarnih meritev tlačne cone DMA5. Opazimo, da se rezultati še nekoliko bolj približajo merjenim vrednostim (slika 41), kar nas privede do zaključka, da je hidravlični upor, ki ga daje omrežje tlačne cone DMA3, dejansko manjši od izračunanega. Če želimo skozi črpalko spraviti 48 l/s pretoka, mora tako črpalka vodi dodajati manj energije v obliki višine črpanja (35,4 m namesto 37,8 m).



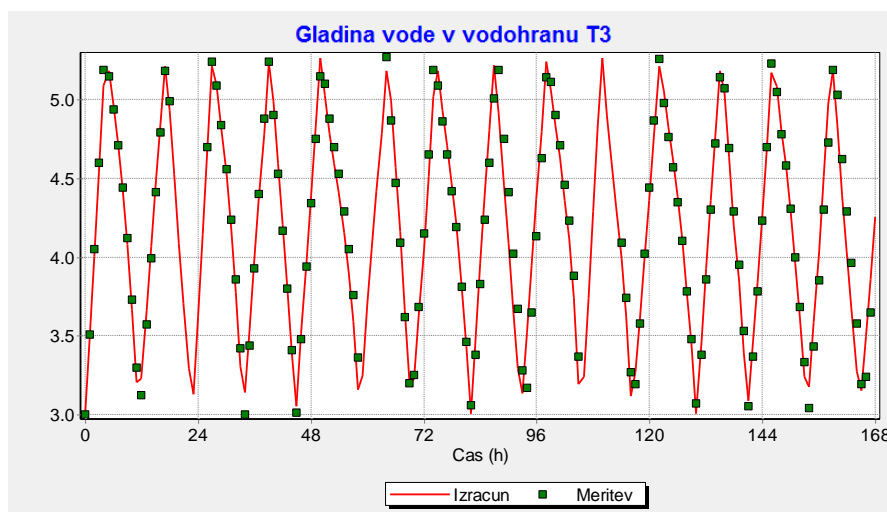
Slika 41: Gladina vode v vodohranu T3; C-koeficienti (meritve na hidrantih) in popravljena črpalna krivulja (DMA5)

Izstopajoči konici koeficienta urne porabe za dan 3. 1. 09 (glej grafikon 16) sta lahko posledica napačne ocene količine črpanja črpališča S2. Z nastavljanjem časov vklopa črpalke t_v se nismo mogli znebiti konic, saj je v tem primeru delež masne bilance vode, ki ga doprinese različen čas vklopa črpalke znotraj intervala ($t_v \in [0,59]$ min) in pretok skozi črpalko, mnogo manjši od deleža, ki je posledica napačno predvidene začetne višine vodne gladine vodohrana v obdobju neustreznih podatkov. Preostalo nam ni drugega, kot da smo ponovno preučili neustrezne vhodne podatke in lokalne ekstreme, kot tudi nihanje vodne gladine uskladili z grafom pretoka in s časi vklopa/izklopa črpališča S2 (slika 42).



Slika 42: Pretoki črpališča S2

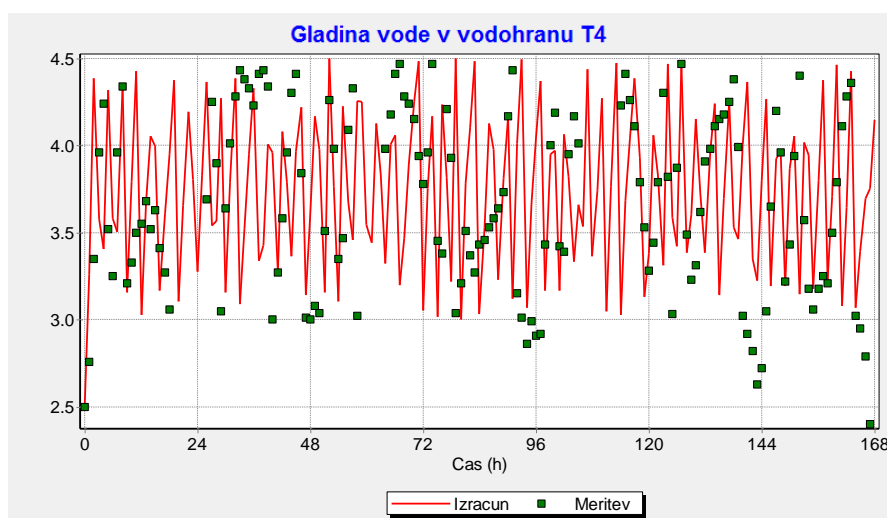
Po vnosu popravljenih vrednosti koeficientov urne porabe smo dobili več kot zadovoljujoče ujemanje izračunanih in izmerjenih vrednosti nihanja vode v vodohranu T3 (slika 43).



Slika 43: Gladina vode v vodohranu T3; C-koeficienti (meritve na hidrantih), popravljena črpalna krivulja (DMA5) in koeficienti urne porabe (nihanje vodne gladine)

4.9.4 Tlačna cona DMA2

Za obtežni primer požara vnesemo v model začetne vrednosti C-koeficientov cevi in zaženeemo hidravlični izračun s črpalno krivuljo nove tovarniške črpalke (poraba po vozliščih ustreza porabi v času trajanja 1. ure posredovane serije podatkov SCADA). Opazimo, da so izračunani tlaki v vozliščih J385 in J494 veliko večji od izmerjenih (v povprečju odstopajo za cca. 10 m vodnega stolpca, oziroma 1 bar). Opazovana vozlišča – hidranti ležijo na glavnem vodu premera $d=305,00$ mm, ki povezuje črpalnišče S3 in vodohran T4. Če želimo umeriti tlake v opazovanih vozliščih, moramo vrednosti C-koeficientov za cevi premera $d=305,00$ mm spustiti do nerealno nizkih vrednosti.

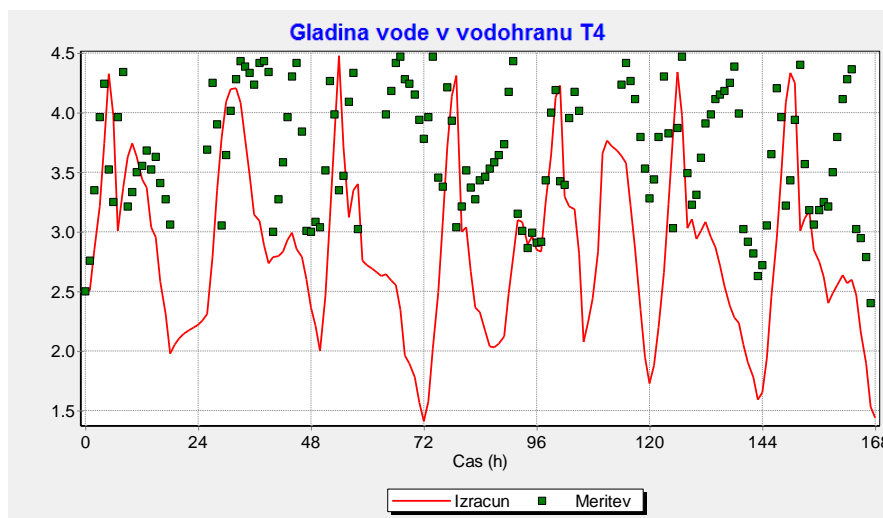


Slika 44: Gladina vode v vodohranu T4; začetni C-koeficienti in črpalna krivulja nove črpalke

Če med merjenimi vrednostmi in izračunanimi vrednostmi prihaja do velikega odstopanja tlakov in pretokov, tako da za umerjanje modela moramo uporabiti nerealne vrednosti C-

koeficientov ($40 < C < 150$), oziroma moramo izvesti velike popravke porabe vozlišč, potem obstaja velika verjetnost, da je nesoglasje posledica zaprtih oziroma delno zaprtih ventilov (Walski et al., 2003). Tezo še dodatno potrди zaznamek v opisu naloge, ki pravi, da so na območju tlačne cone DMA2 potekala vzdrževalna dela, ki so botrovala osamitvi določenega dela cevi iz vodovodnega omrežja, zato obstaja možnost, da po opravljenih popravilih na območju vzdrževanja enega ali več ventilov niso do konca odpri. Meritve na hidrantih so bile izvedene po opravljenih popravilih.

Na odseku od vodohrana T4 do črpališča S3 se z nižanjem vrednosti C-koeficienta cevem s premerom $d=305$ mm poskušamo približati izmerjenim vrednostim tlakov. Če cevem s premerom $d=305$ dodelimo vrednost $C_{d=305}=22$ (slika 45), nam izračuni pokažejo sledeče vrednosti tlakov v vozliščih: $p_{J385}=52,47$ m ter $p_{J494}=-4,20$ m (podtlaki – zaradi večje porabe vozlišč na tem delu cevovoda). Ker gre za del cevovoda z enakimi karakteristikami cevi (premer, predvidena enaka vrednost C-koeficienta), so celotne linijske izgube na obravnavanem odseku cevi proporcionalne z dolžino cevovoda (in pretokom skozi posamezno cev), zato bi se morali izračunani tlaki vsaj v grobem ujemati z meritvami v vozliščih ($p_{J385}=49,00$ m in $p_{J494}=12,0$ m) – preglednica 2. Rezultati odstopajo pri enem vozlišču v plus, pri drugem vozlišču pa v minus, zato nas napeljujejo k predvidevanju, da je na odseku omenjenega cevovoda med vodohranom T4 in vozliščem J494, kakor tudi med črpališčem S3 in vozliščem J385, (vsaj) ena obstrukcija, ki je povod za izmerjene nizke tlake v vozliščih J385 in J494.



Slika 45: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=22$ in črpalna krivulja nove črpalke

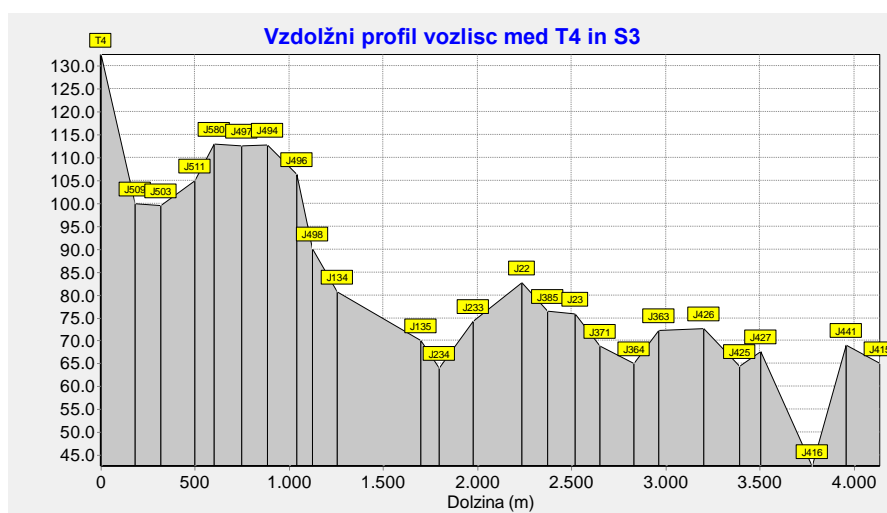
Zaradi delno priprtega ventila se v sistemu pojavijo velike hidravlične izgube. V programu Epanet lahko vpliv lokalnih izgub pripišemo cevem s pomočjo K-koeficienta oziroma koeficienta lokalnih izgub ξ_{lok} (ang. Loss Coefficient). Slednji vključuje vpliv lokalnih izgub, ki se na ceveh pojavijo zaradi zožitev tokovnic (tok skozi zaporne armature, fazonske kose, ipd.). Specifične lokalne izgube se po navadi upoštevajo v postrojenjih črpališč in ostalih inštalacijah, kjer se pojavi veliko različnih lokalnih izgub na kratkih odsekih cevi.

Ostale lokalne izgube je možno modelirati tudi tako, da celotne hidravlične izgube, ki se pojavijo na odseku cevi (vpliv lokalnih izgub je vključen), pripišemo cevem v obliki proporcionalno nižjega C-koeficienta. Lokalne izgube, ki so posledica delno priprtega ventila,

je možno na terenu odpraviti (enkrat, ko se ga locira, ga je možno odpreti do konca) – vpliv ni trajen, zato je smiselno, da vpliv lokalnih izgub kompenziramo s C-koeficientom.

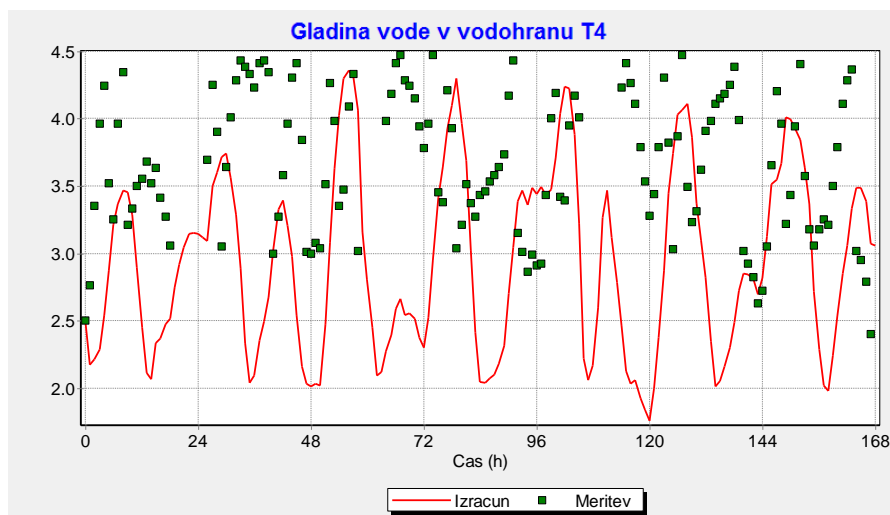
Kako določiti lokacijo zaprtega ventila in kakšna je C-vrednost cevi z delno zaprtim ventilom? Odločimo se, da za začetno vrednost C-koeficienta cevi z delno zaprtim ventilom privzamemo vrednost $C_{lok}=10$. Posamični cevi določimo vrednost C-koeficienta za cev z delno zaprtim ventilom, ostalim na odseku pa dodelimo običajne vrednosti (na primer $C=100$). Skozi iteracije opazujemo, kaj se z merjenimi vozlišči dogaja in katera cev z dodeljenimi lokalnimi izgubami doprinese najmanjše odstopanje med izračunanimi ter merjenimi vrednostmi opazovanih vozlišč.

Vozlišče J416 se nahaja na odseku med črpališčem S3 in vozliščem J385 (slika 46) ter leži na najnižji nadmorski višini odseka, zato lahko v tem vozlišču pričakujemo najvišje tlake, ki so v povprečju višji za 2,5 bara glede na ostali del odseka. Če gledamo od črpališča S3 proti vozlišču J416, je smiselno, da se delno odprt ventil nahaja pred vozliščem J416, v nasprotnem primeru bi tlaki v vozlišču J416 presegali mejo normalnih obratovalnih tlakov. V primeru požarne obremenitve, vrednosti $C_{d=305}=100$ in modeliranja s črpalno krivuljo nove tovarniške črpalke znaša tako tlak v vozlišču $p_{J416}=98,03$ m.



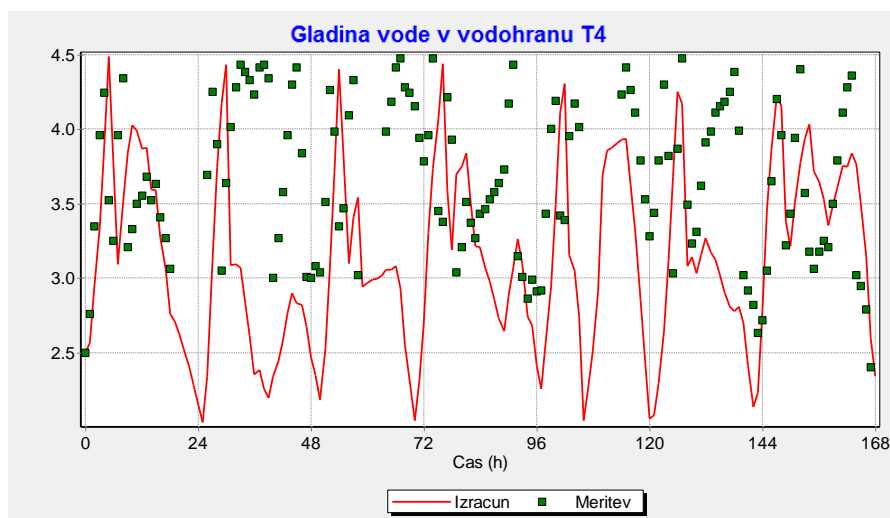
Slika 46: Vzdolžni profil terena med vodohranom T4 in črpališčem S3

Iteracije so pokazale, da se za kandidata cevi z delno odprtim ventilom najbolj izkažeta cevi P524 in P237. Ko smo s spreminjanjem C-koeficientov za silo umerili vrednosti tlakov v vozliščih J494 in J385, odčitamo vrednost tlakov na sesalnem ter tlačnem delu črpalke (odstranimo črpalke) pri pretoku požarne obremenitve $Q=54$ l/s. Z dobljeno točko obratovanja posodobimo črpalno krivuljo. Opazimo, da je pri popravku črpalna krivulja zastavljena prenizko, saj pri pretokih $Q=70$ l/s višina črpanja zavzame negativno vrednost. Če zaženemo razširjeno časovno simulacijo, lahko opazimo (slika 47), da je gladina vode v vodohranu T4 nižja v primerjavi z meritvami.



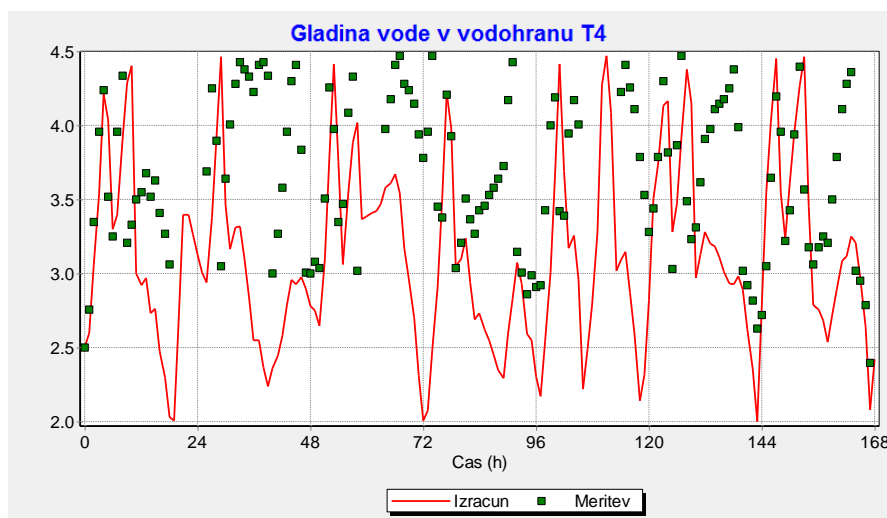
Slika 47: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=100$, $C_{lok}=10$ in posodobljena črpalna krivulja_1

Hidravlični upor sistema bo zato potrebno povečati, tako da znižamo predvidene C-koeficiente za cevi s premerom $d=305$ mm na vrednost $C=90$, obenem znižamo vrednost C-koeficienta cevi z delno zaprtim ventilom na $C_{lok}=8$. Dobimo točko obratovanja s koordinatama $Q=54$ in $h=61$ m. Če zaženemo simulacijo, dobimo za odtenek boljše ujemanje rezultatov z meritvami (slika 48), kar nam nakazuje, da smo na pravi poti.



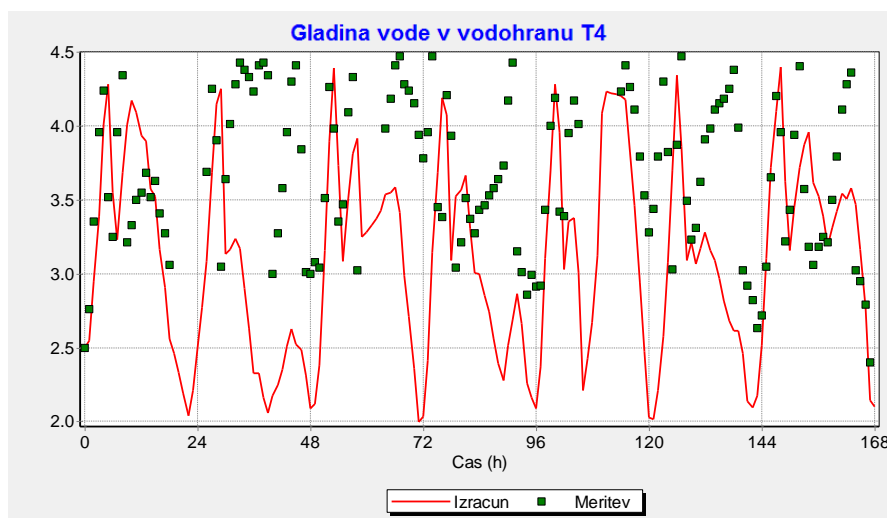
Slika 48: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=90$, $C_{lok}=8$ in posodobljena črpalna krivulja_2

Ponovimo posodobitev črpalne krivulje in poskušamo ponovno umeriti vozlišči J494 in J358, obenem spremljamo, kakšni so pretoki črpalnišča S3 ter iztok iz vodohrana T4. Opazimo, da prihaja do negativnih tlakov v vozlišču J494, zato cev P524 ne more biti več kandidat cevi z delno odprtim ventilom. Če cevi P348 dodelimo $C=8$, opazimo, da sicer umerimo tlake v vozlišču J494, vendar je v tem primeru iztok iz vodohrana T4 prenizek (le 46 l/s). V primeru cevi P527 in P349 dobimo nizke tlake v vozlišču J494 ter prenizek iztok iz vodohrana. Če cevi P337, ki se nahaja pred vozliščem J494, dodelimo $C=8$ in zaženemo simulacijo, opazimo, da se iztok iz vodohrana zelo približa izmerjeni vrednosti ($Q=50,39$ l/s), če cevi dodelimo $C=7$, dobimo iztok iz vodohrana v vrednosti 49,87 l/s. Nova točka obratovanja ima koordinati $Q=54$ l/s, $h=62,54$ m. Simulacija nam pokaže spodnje rezultate nihanja vodne gladine v vodohranu T4 (slika 49).



Slika 49. Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=90$, $C_{lok}=7$, delno odprt ventil v P337 in posodobljena črpalna krivulja_3

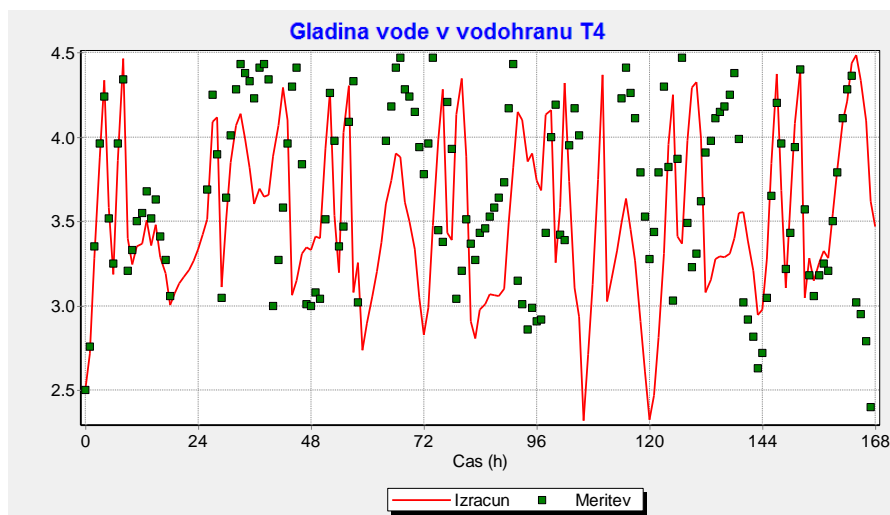
Iterativno ponavljamo postopek umerjanja tlakov v vozliščih, posodabljammo črpalno krivuljo in primerjamo rezultate simulacij z meritvami. Za primer $C_{P337}=6$, $C_{P237}=3$ in $C_{d=305}=76$ dobimo točko obratovanja s koordinatama $Q=54$ l/s in $h=75,17$ m. Rezultati hidravličnega izračuna za vodohran T4 so vidni spodaj (slika 50).



Slika 50: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=76$, $C_{P337}=6$, $C_{P237}=3$ in posodobljena črpalna krivulja_6

Opazimo, da se z večanjem hidravličnega upora sistema (višja višina črpanja črpalke), ne moremo znebiti drastičnih upadov gladine vodohrana T4. Nesoglasja ne moremo odpraviti niti z velikimi popravki porabe po vozliščih.

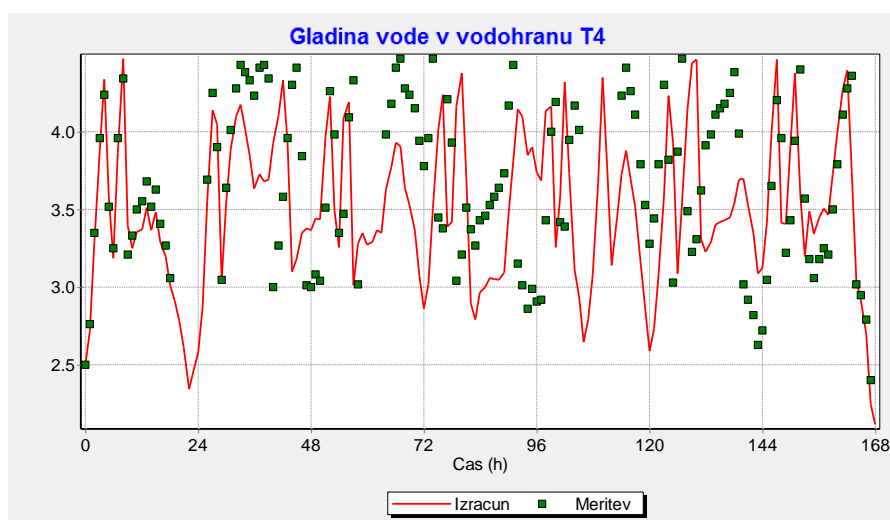
Spreminjanje C-koeficientov ima večji vpliv na tlake pri ceveh manjših premerov kakor pri ceveh z večjim premerom, zato so bila večja odstopanja posledica prenizkega C-faktorja cevi P237 (delno zaprt ventil smo v modelu bolj zaprli, kot je dejansko bil). V naslednji iteraciji zato zvišamo C-koeficiente na sledeče vrednosti: $C_{P337}=6$, $C_{P237}=5$ ter $C_{d=305}=93$ in dobimo boljše ujemanje z rezultati (slika 51).



Slika 51: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=93$, $C_{P337}=6$, $C_{P237}=5$ in posodobljena črpalna krivulja_6

Izstopajoče konice (stopnice) vrednosti koeficientov urne porabe poskusimo popraviti z nastavljanjem vrednosti višine vodne gladine v času manjkajočih podatkov in časov vklopa črpalke t_v tako, da zgladimo potek grafa skozi časovno obdobje. Kot doslej si pomagamo s podatki vklopa/izklopa posamezne črpalke in grafom pretoka, s katerim lahko določimo, kdaj naj bi nihanje vodne gladine doseglo lokalni ekstrem.

Ponoven in podroben pogled predvidenega nihanja vodne gladine v večernih urah dne 1. 1. 09 nam da slutiti, da smo lokalni minimum zastavili previsoko glede na obratovanje črpalnišča in nihanje vode v vodohranu skozi opazovano obdobje, zato ga poskusimo spustiti na vrednost okrog 2,6 metra, tako da se potek nihanja gladine bolj mehko naveže na potek nihanja v času znanih podatkov. Ko se ob določeni uri pojavi ekstremna konica koeficienta urne porabe (grafikon 16), lahko sklepamo, da smo namesto polnjenja vodohrana privzeli praznjenje in obratno, namesto praznjenja vodohrana smo prevzeli polnjenje. Analogno velja za črpalnišča: če hočemo koeficient urne porabe zmanjševati, moramo čas vklopa črpalke t_v nastaviti tako, da bo načrpana količina vode v časovnem intervalu Δt manjša.

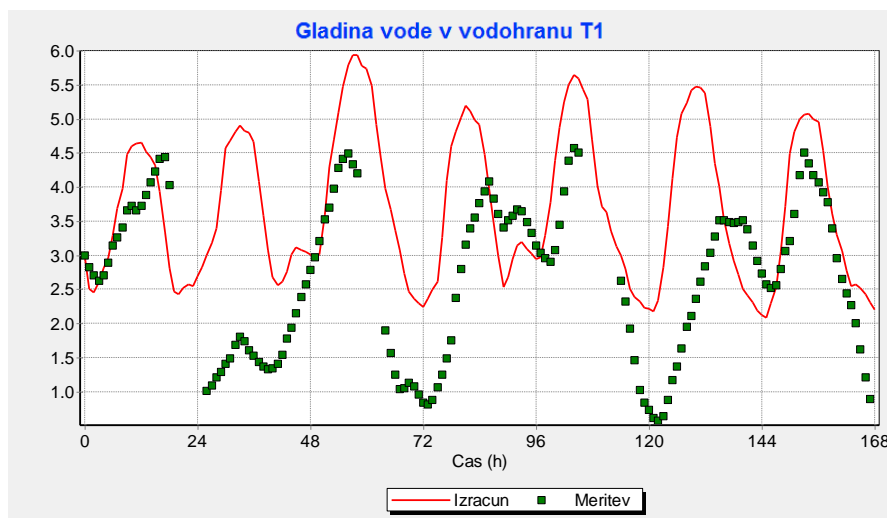


Slika 52: Gladina vode v vodohranu T4; $C_{d=305}=93$, $C_{P337}=6$, $C_{P237}=5$, posodobljena črpalna krivulja in koeficienti urne porabe (nihanje vodne gladine)

Po vnosu popravljenih vrednosti koeficientov urne porabe smo dobili mnogo boljše ujemanje izračunanih in izmerjenih vrednosti nihanja vode v vodohranu T4 (slika 52).

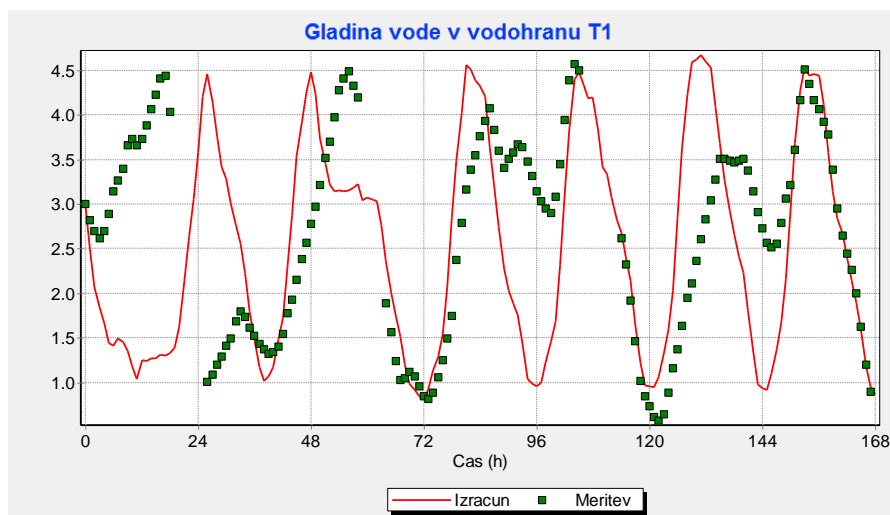
4.9.5 Tlačna cona DMA1

Cevi v tlačni coni DMA1 so od vseh cevi v sistemu največ časa v uporabi, zato lahko zaradi procesov tuberkulacije že v osnovi pričakujemo nižje vrednosti C-koeficientov. Če cevem dodelimo začetne vrednosti C-koeficientov in zaženemo simulacijo, lahko opazimo, da se lokalni minimumi nihanja vodne gladine vrtijo okrog vrednosti 2,5 metra (slika 53).



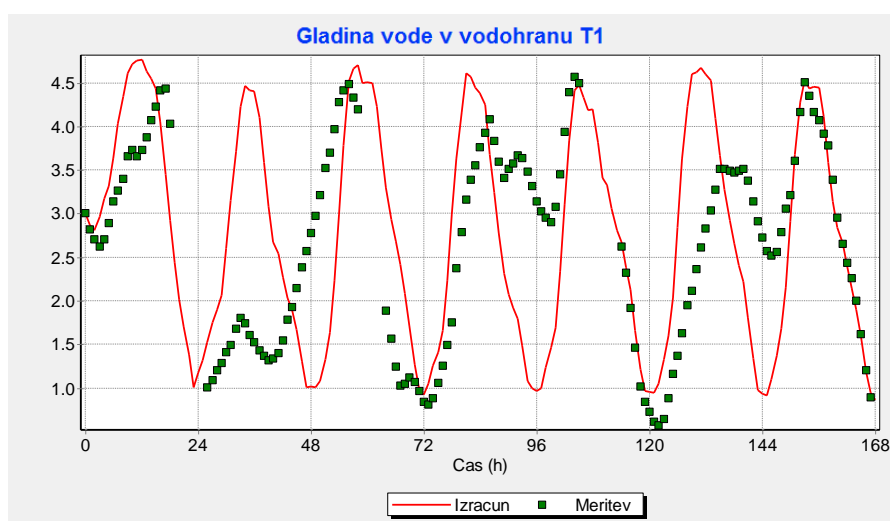
Slika 53: Gladina vode v vodohranu T1; začetni C-koeficienti in črpalna krivulja nove črpalke

Črpalnišče S1 je sestavljeno iz treh vzporedno vezanih črpalk z enakimi karakteristikami (črpalnimi krivuljami), od katerih črpalka PU3 ne sodeluje, saj iz krmilnega programa črpalk in ventilov (slika 3) ni razvidno, pri katerih robnih pogojih naj bi prišlo do vklopa/izklopa le-te, zato jo lahko obravnavamo kot rezervno črpalko črpalnišča. Če podrobno pogledamo grafikon 1, lahko opazimo, da skupni pretoki črpalnišča S1 nihajo okrog dveh vrednosti (195 l/s in 115 l/s). Dokler gladina vode v vodohranu T1 ne doseže višine 4,5 metra, sta obe črpalki v pogonu (PU1 in PU2) in pretok skozi črpalnišče S1 znaša 195 l/s, saj v primeru vzporedne vezave dveh črpalk se pri enaki višini črpanja pretok podvoji. Ko gladina vode doseže višino 4,5 metra, se črpalka PU2 izključi, tako da pretok skozi črpalnišče S1 pade na vrednost 115 l/s (deluje samo črpalka PU1). Črpalnišče vzdržuje pretok na tej vrednosti, vse dokler gladina vode ne pade do višine 1,0 metra. Takrat namreč pretok skozi črpalnišče ponovno naraste na vrednost 195 l/s in vodohran se prične polniti. Iz slednjega lahko zaključimo, da je podana višina, pri kateri se vključi črpalka PU2, napačna (2,5 metra). Krmilni program vklopa črpalke popravimo na novo vrednost, in sicer na 1,0 metra ter ponovno zaženemo simulacijo. Opazimo, da se gladina vodohrana T1 obnaša daleč od pričakovanj. Ker smo na podlagi ugotovitev iz tlačne cone DMA5 vsem črpalkam v sistemu dodelili začetni status zaprto, se je vodohran T1 zaradi porabe vozlišč v tlačni coni že v začetku začel prazniti vse do nivoja 1,0 metra, ko se vklopi črpalka PU2 (slika 54).



Slika 54. Gladina vode v vodohranu T1; začetni C-koeficienti, črpalna krivulja nove črpalke in popravljen nivo vklopa črpalke PU2

Če popravimo začetni status črpalke PU2 na odprto, lahko opazimo, da črpališče S1 zagotavlja zadosten pretok glede na porabo, in da se izračunane višine vodne gladine vodohrana T1 v grobem ujemajo z meritvami (slika 55).

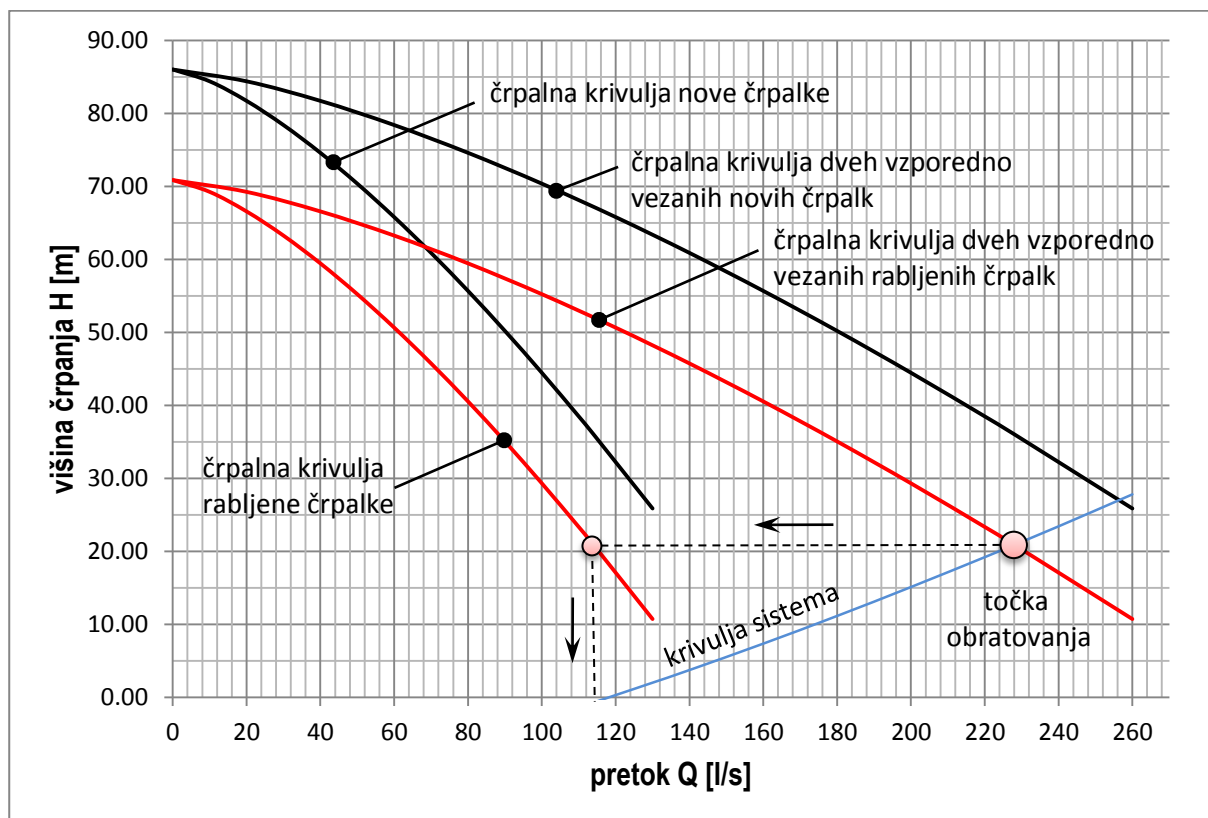


Slika 55: Gladina vode v vodohranu T1; začetni C-koeficienti, črpalna krivulja nove črpalke, popravljen nivo vklopa in začetni status črpalke PU2

Razlike v časovnih obdobjih, ko gladina v večji meri odstopa od meritev, so posledica neuskrajene masne bilance. Količina vode, ki izstopi iz tlačne cone DMA1, je odvisna od statusa ventila V2 (odprt/zaprto). Slednji je krmiljen glede na višino vodne gladine v vodohranu T2, dotok v vodohran T2 je pa odvisen od pretoka črpališča S1. Preden se lotimo vzporednega umerjanja vodohranov T1 in T2, je zato smiselno, da najprej uskladimo model tlačne cone DMA1 z meritvami na hidrantih in posodobimo krivuljo črpanja.

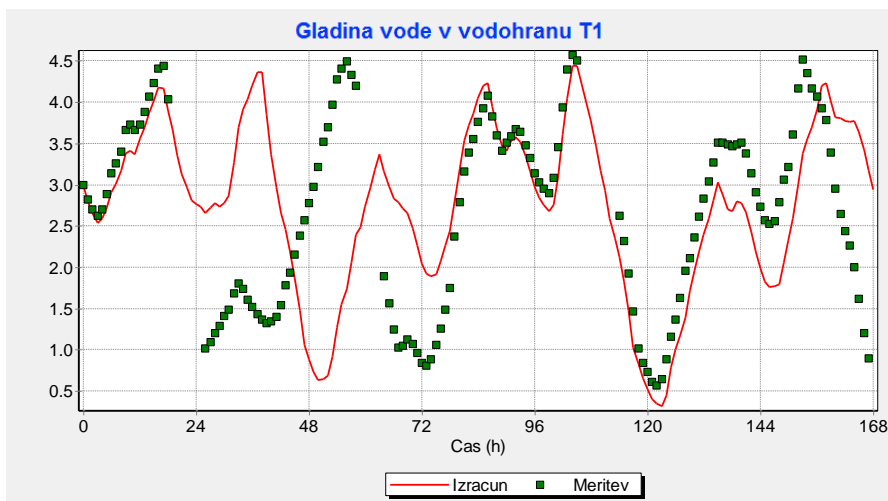
Po znanem postopku dodelimo porabo po vozliščih v času 1. ure opazovane serije podatkov in vozliščem s hidranti dodelimo porabo skladno s preglednico 2. Preverimo še višino vodne gladine v vodohranu T1, ventil V2 odpremo ter skupno porabo črpališč S4 in S5 modeliramo tako, da vozlišču J301 dodelimo porabo v višini 58 l/s, obenem črpalke omenjenih črpališč odstranimo iz modela. S spreminjanjem C-koeficientov cevi umerimo tlake v opazovanih

vozljičih in dobimo višino črpanja dveh vzporedno vezanih enakih črpalk pri požarnem pretoku 228 l/s in znaša 20,90 metra. Če želimo določiti posodobljeno krivuljo črpanja posamezne črpalke, moramo pri enaki višini črpanja pretok požarne obremenitve razpoloviti. Dobimo točko, skozi katero na znan način potegnemo enačbo črpalne krivulje nove črpalke (glej grafikon 18).

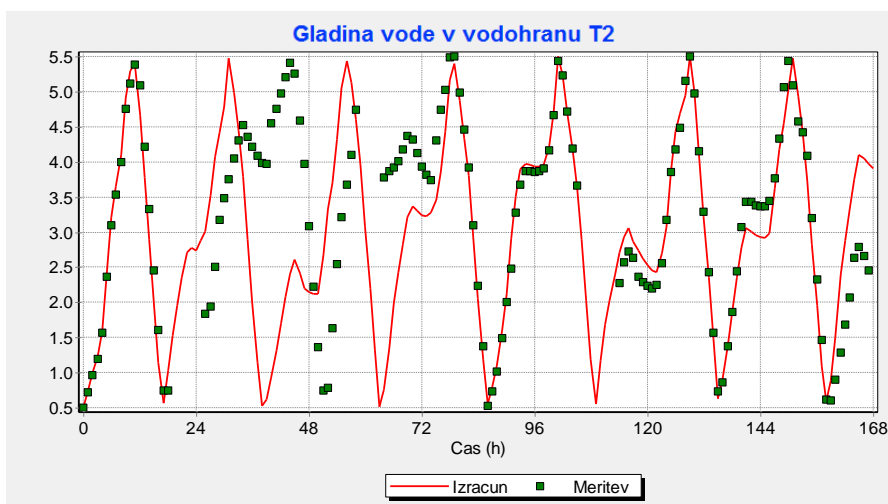


Grafikon 18: Določanje črpalne krivulje vzporedno vezane rabljene črpalke s pomočjo meritev na hidrantih

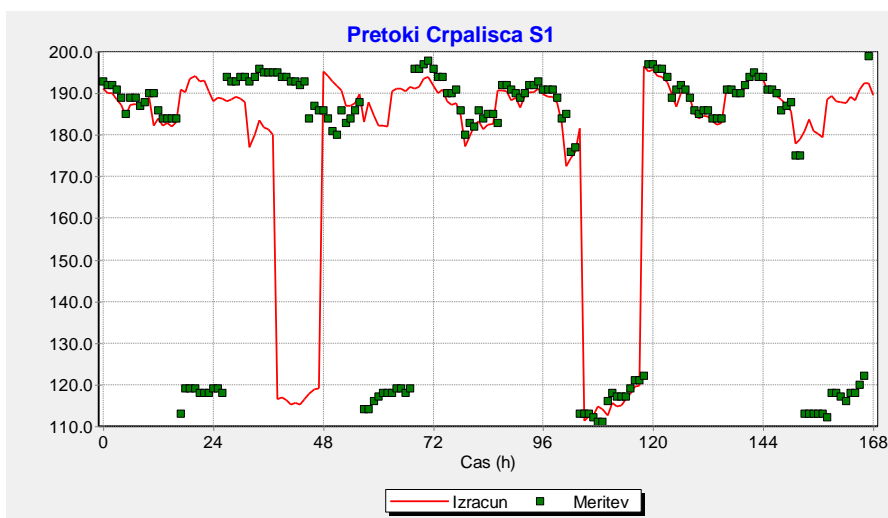
Po vnosu popravljene krivulje črpanja in popravkov C-koeficientov cevi ter izvedenem hidravličnem izračunu lahko opazimo, da se v določenih obdobjih gladina vode vodohrana T1 dobro prilega meritvam, v določenih pa drastično odstopa (slika 56). Pri vodohranu T2 lahko opazimo, da do večjih odstopanj prihaja v enakih časovnih obdobjih (slika 57) kot pri vodohranu T1 in sovpadajo ravno s časovnimi obdobji, ko se tudi pretoki črpalnišča S1 ne ujemajo z meritvami (slika 58).



Slika 56: Gladina vode v vodohranu T1; C-koefficienti (meritve na hidrantih) in popravljena črpalna krivulja



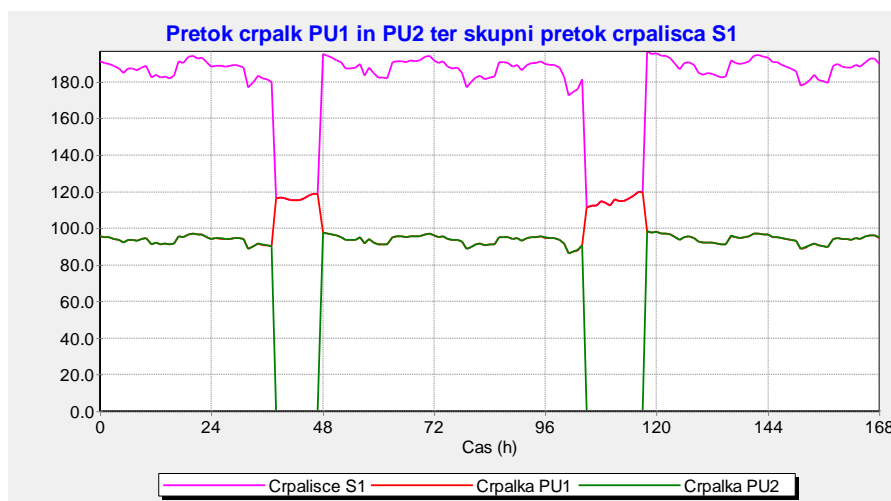
Slika 57: Gladina vode v vodohranu T2



Slika 58: Pretoki črpalisca S1

Če podrobno pogledamo, kaj se dogaja znotraj črpalisca S1 (slika 59), opazimo, da se v času obratovanja obeh črpalk pretok posamezne črpalke seštevava. Zaradi spreminjanja

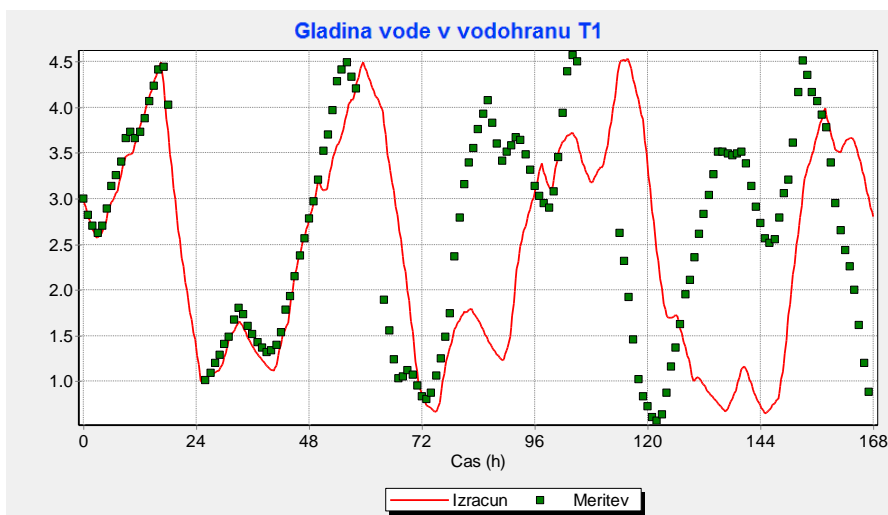
porabe skozi časovna obdobja, oziroma ko gladina vode v vodohranu T1 doseže nivo 4,5 metra, se črpalka PU2 izključi in takrat obratuje samo črpalka PU1. Zaradi potreb sistema je črpalka PU1 primorana zagotavljati nekoliko višji pretok, kot če bi delovala v paru, zato točka obratovanja črpalke PU1 zdrsne po črpalni krivulji v območje višjih pretokov in nižje višine črpanja in deluje z manjšim (slabšim) izkoristkom.



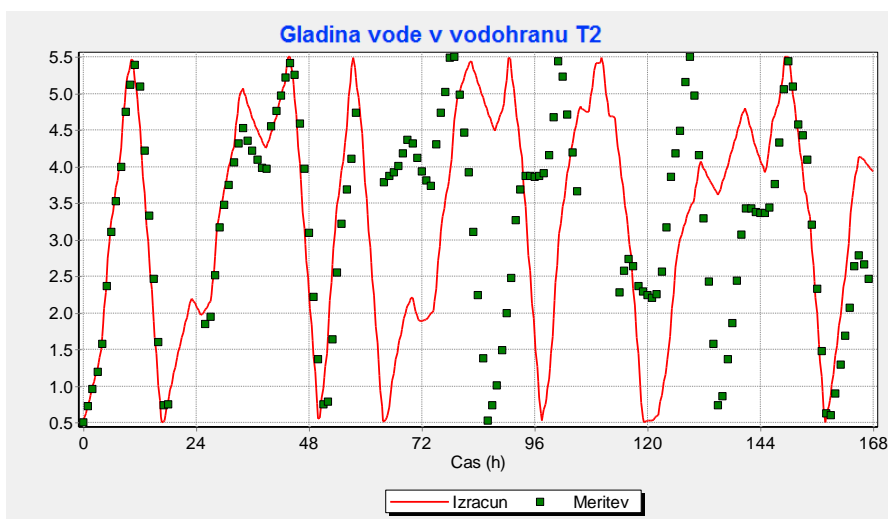
Slika 59. Pretok črpal PU1 in PU2 ter skupni pretok črpalnice S1

Iz grafa pretokov črpalnice S1 lahko razberemo, da naj bi voda v vodohranu T1 prvič dosegla lokalni maksimum oziroma 4,5 metra višine v času poteka 18. ure posredovanih podatkov in takrat naj bi prišlo do izklopa črpalke PU2 (slika 56). Opazimo pa, da takrat gladina te višine ne zavzame, zato sta obe črpalki črpalnice S1 še dalje v pogonu. Nesoglasja poskušamo odpraviti tako, da si pomagamo s podatki pretokov črpalnice in z višinami vodnih gladin, pri katerih se vklopijo črpalke in ventili ter skušamo ponovno predvideti boljši potek nihanja vodne gladine v času manjkajočih podatkov. Z nastavljanjem višine vodne gladine in časov vklopa črpalke smo se sicer znebili konic urne porabe, vendar še zmeraj ne dosežemo izklopa črpalke PU2.

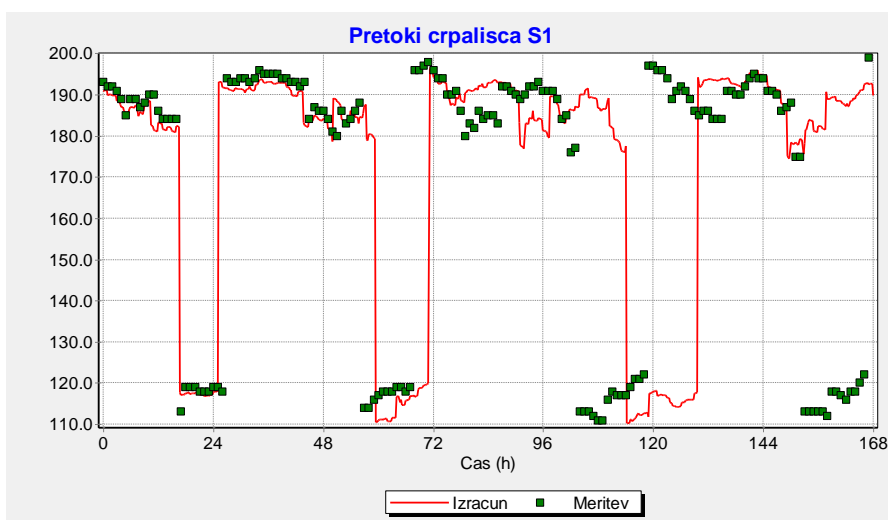
Višji nivo energije v vodohranu T1 in s tem izklop črpalke PU2 lahko dosežemo tako, da zmanjšamo osnovno porabo vozlišč in/ali povečamo pretočne lastnosti cevi, tako da zvišamo vrednosti C-koeficientov. Iz preglednice 1 opazimo, da skupna poraba vozlišč posamezne tlačne cone, ki smo jo pridobili na podlagi mesečne ocene porabe, presega skupno porabo vozlišč, pridobljene na osnovi masne bilance vodovodnega sistema. S postopnim zmanjševanjem osnovne porabe vozlišč v vseh tlačnih conah se višina shranjene vode v vodohranu T1 povečuje vse do meje, ko dosežemo izklop črpalke PU2. Ukrep se izkaže za pravilen, saj se nihanje vodne gladine vodohranov T1 in T2 ter pretoki črpalnice S1 v prvih treh dneh posredovane serije podatkov bistveno izboljša glede na predhodno stanje.



Slika 60: Gladina vode v vodohranu T1; zmanjšana osnovna poraba vozlišč



Slika 61: Gladina vode v vodohranu T2; zmanjšana osnovna poraba vozlišč

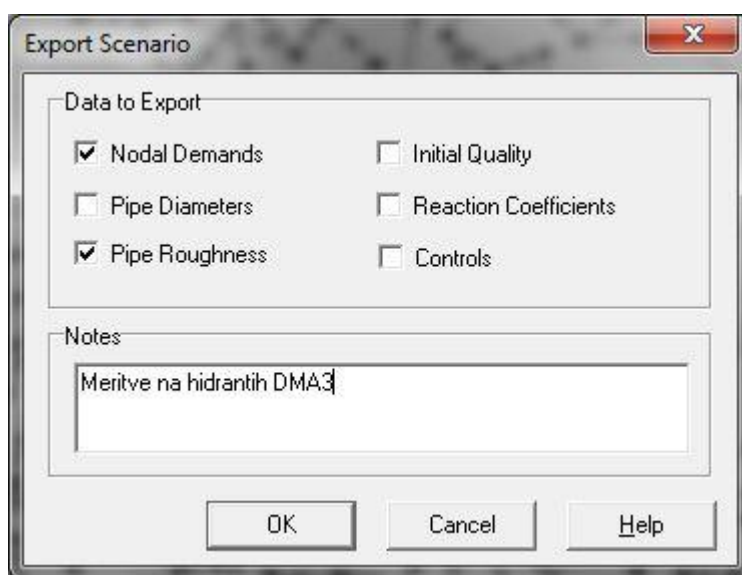


Slika 62: Pretoki črpalnice S1; zmanjšana osnovna poraba vozlišč

Glavno črpališče se po navadi nahaja v neposredni bližini vodnega izvira oziroma obrata za pripravo pitne vode (vodarna) in zagotavlja vodo celotnemu vodovodnemu sistemu. Prečrpališča (booster črpalke) se lahko nahajajo kjerkoli v vodovodnem sistemu in njihova glavna naloga je zagotavljanje pretokov in tlakov visoko ležečim predelom vodovodnega sistema oziroma tlačnih con (slika 1). Prečrpališča se po navadi izvedejo z direktno vezavo na napajalni cevovod, ki ga oskrbuje glavno črpališče.

S posodobitvijo črpalne krivulje črpalke glavnega črpališča S1 smo spremenili tlačne pogoje, ki so prvotno vladali na sesalni strani ostalih prečrpališč (S2-S5), kar je imelo za posledico slabše ujemanje merjenih in izračunanih vrednosti nihanja vodnih gladin vodohranov v ostalih tlačnih conah, saj so bile krivulje črpanja posameznih črpališč posodobljene glede na predhodne razmere. Glede na to, da smo zmanjšali še osnovno porabo vsem vozliščem v vodovodnem sistemu, je nujno, da ponovimo postopek posodobitve krivulj črpanja in določanja C-koeficientov cevi (meritve na hidrantih), saj so v posamezni tlačni coni po novem prisotne drugačne hidravlične zahteve, ki jih morajo posamezne črpalke zagotoviti.

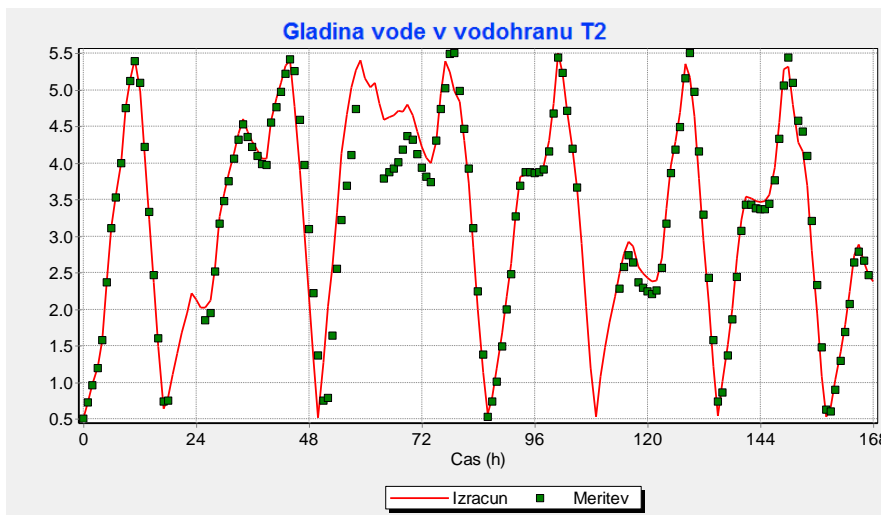
S programom Epanet lahko izvozimo hidravlične parametre različnih obtežnih scenarijev, ki jim podvržemo hidravlični model vodovodnega sistema (slika 63). Ugodneje je, če posodabljanje črpalnih krivulj črpalke in določanje C-vrednosti cevi s pomočjo meritev na hidrantih modeliramo ob pomoči posebnih datotek, saj nam tako ni potrebno neprestano spreminjati med parametri za dinamični primer razširjene časovne simulacije stalnega toka in parametri za statično simulacijo stalnega toka (vzorec porabe, trajanje časovne simulacije, ipd.). Uvoz scenarija iz datoteke statične simulacije stalnega toka v delovno datoteko za razširjeno časovno simulacijo se izvede s pomočjo ".scn" tekstovne datoteke. Slednja nam olajša mukotržno ročno vnašanje posameznih parametrov vozlišč (osnovna poraba) in cevi (hrapavost – C-koeficienti) in nam prihrani čas, obenem nam prihrani tudi morebitne napake, ki bi lahko nastale zaradi človeške zmotljivosti.



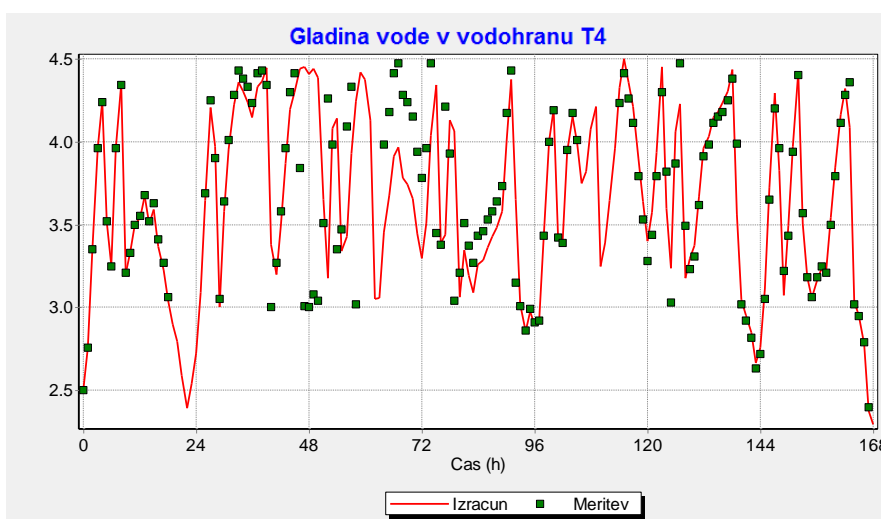
Slika 63: Izvoz parametrov hidravličnega scenarija

Po vnosu posodobljenih črpalnih krivulj in uvozu C-koeficientov cevi nam model izkazuje občutno boljše ujemanje izračunov z meritvami. Pri vodohranu T2 opazimo večje odstopanje znotraj tretjega dne opazovanih podatkov (slika 64). V času, ko je ventil V2 zaprt, se tlačni

coni DMA2 in DMA3 čez črpališči S3 in S2 napajata neposredno iz vodohrana T2. Potek nihanja vodohrana T3 tlačne cone DMA3 izkazuje dobro ujemanje z meritvami, zato lahko sklepamo, da se napaka vodohrana T2 prenaša z napako, ki je prisotna v poteku nihanja vodne gladine vodohrana T4 (slika 65).

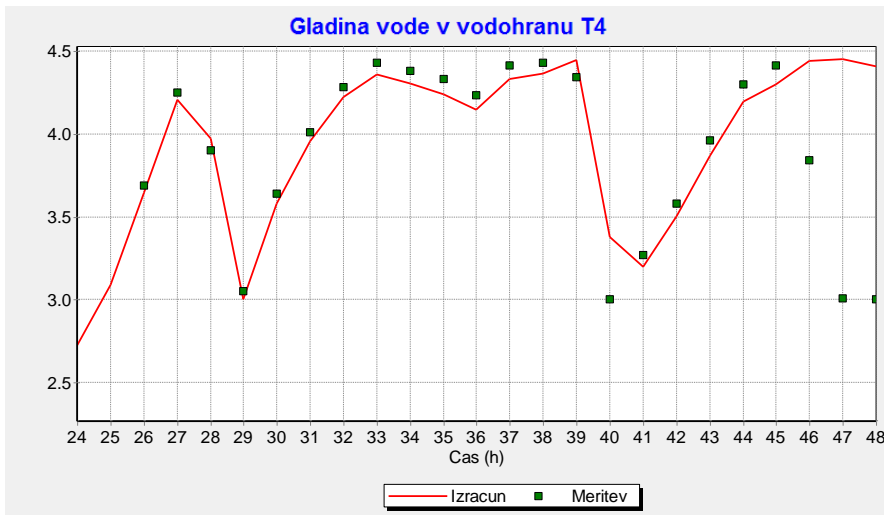


Slika 64: Gladina vode v vodohranu T2; posodobljena črpalna krivulja in popravljeni C-koeficienti cevi

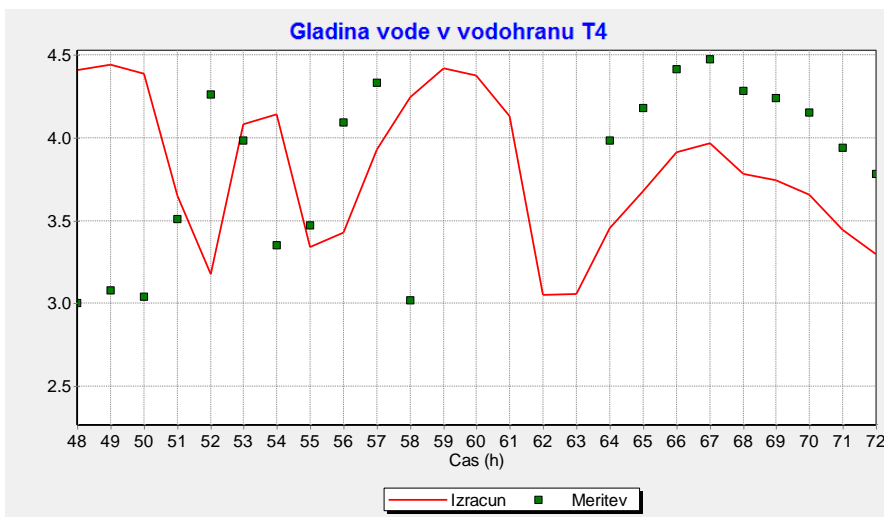


Slika 65: Gladina vode v vodohranu T4; posodobljena črpalna krivulja in popravljeni C-koeficienti cevi

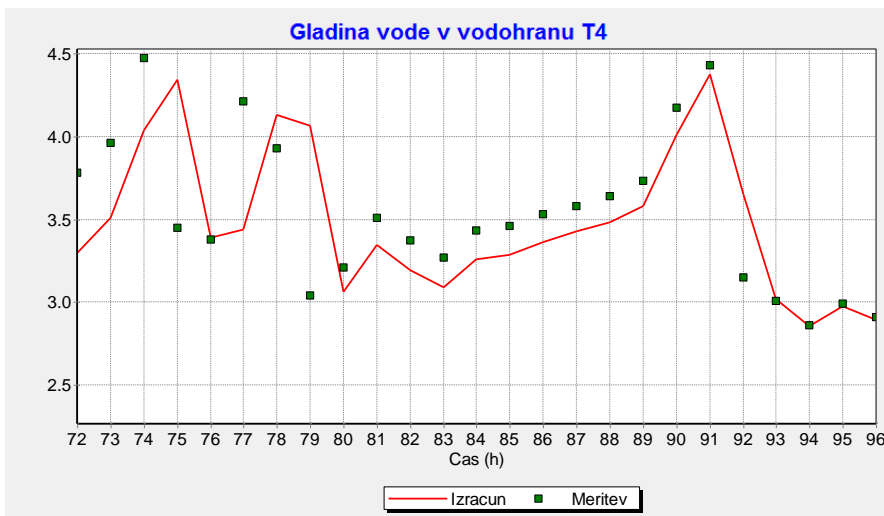
Podroben pogled nihanja vodne gladine vodohrana T4 znotraj drugega (slika 66), tretjega (slika 67) in četrtega (slika 68) dneva opazovanega obdobja razkriva precejšnje odstopanje izračunanih vrednosti glede na meritve.



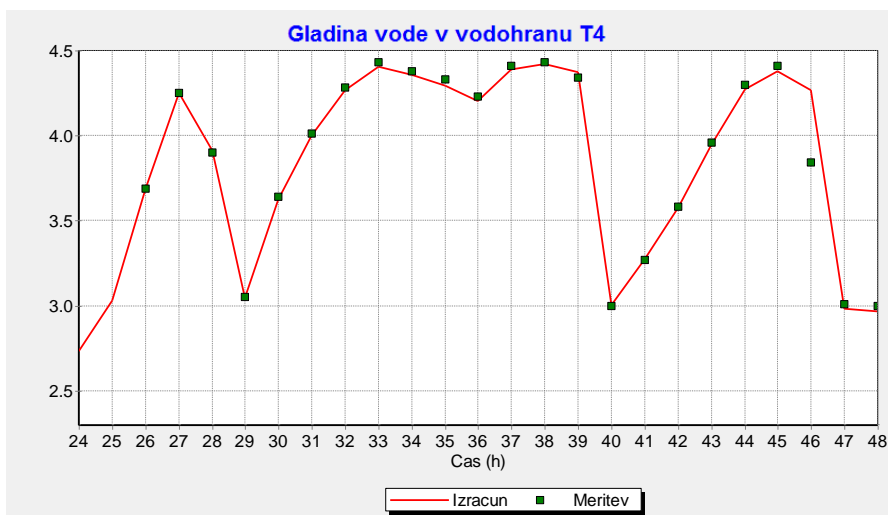
Slika 66: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 24 do 48 ur



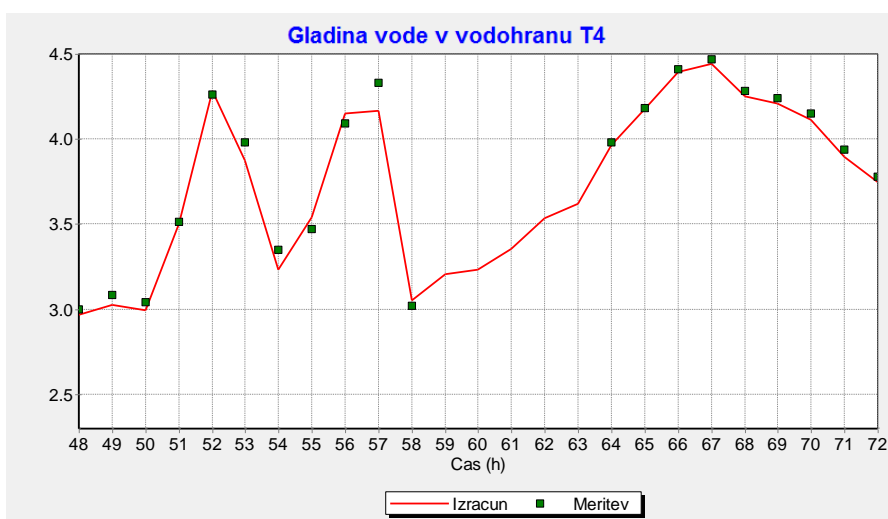
Slika 67: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 48 do 72 ur



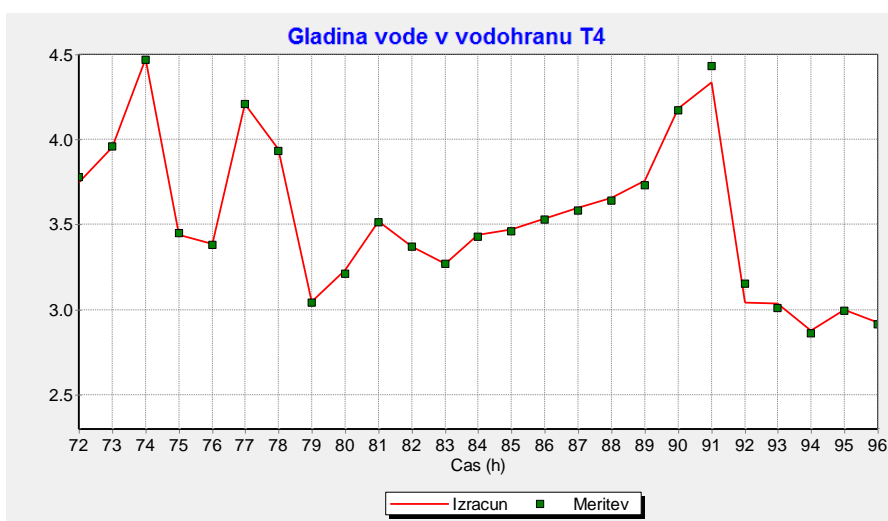
Slika 68: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 72 do 96 ur



Slika 69: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 24 do 48 ur; popravljivi koeficienti ure porabe



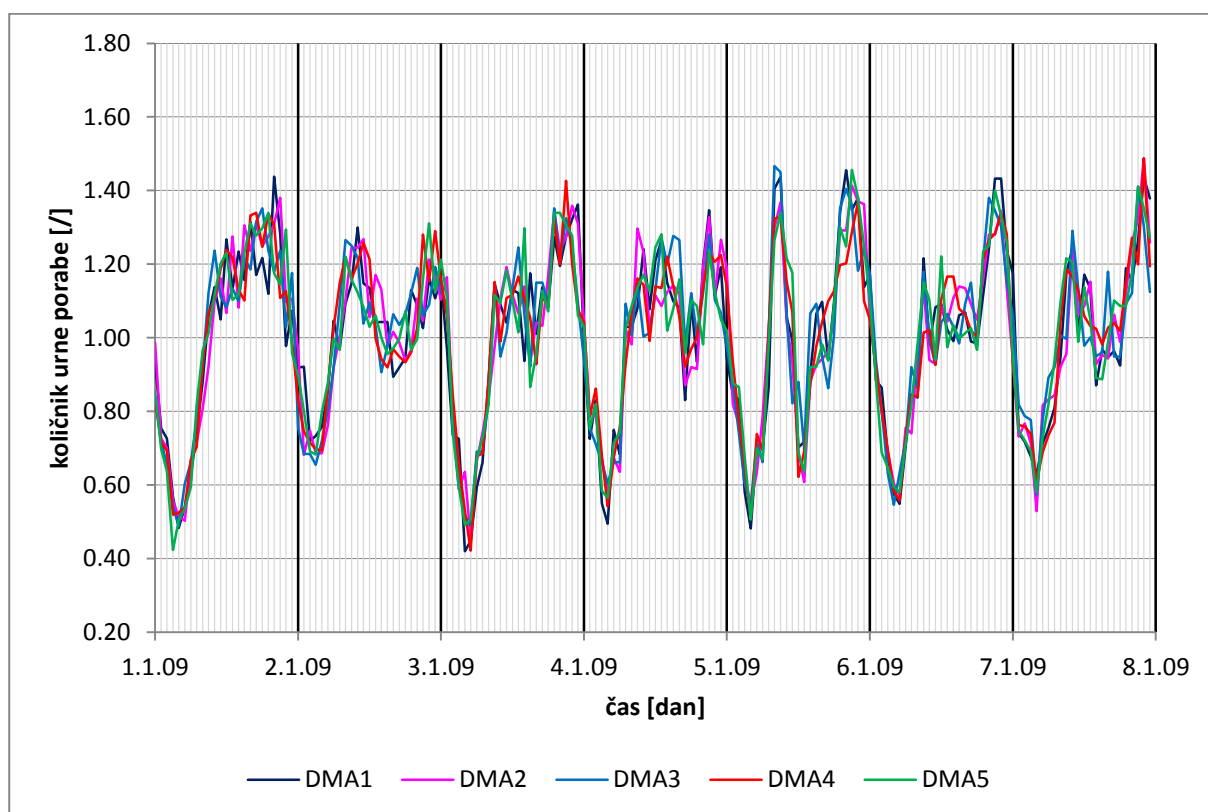
Slika 70: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 48 do 72 ur; popravljivi koeficienti ure porabe



Slika 71: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 v času od 72 do 96 ur; popravljivi koeficienti ure porabe

S spreminjanjem predvidenega poteka nihanja vodne gladine vodohrana T4 v času manjkajočih podatkov in spreminjanjem časov vklopa črpališča t_v , spremenimo vrednosti koeficientov urne porabe $k_{por,t}$, s katerim množimo osnovno porabo vozlišč v danem časovnem obdobju Δt . Da bi preverili ustreznost posamezne spremembe, moramo vsakič popraviti “.pat” tekstovno datoteko vzorca urne porabe, jo uvoziti po vmesniku (slika 16) in zagnati hidravlično simulacijo modela. S pristopom “poskus – napaka” iterativno ponavljamo dolgotrajen postopek, vse dokler ne dobimo nabora podatkov, s katerim se hidravlični izračuni kar se da najbolje ujemajo z rezultati meritev (slika 69, slika 70 in slika 71). S tem, ko smo popravili nihanje vodne gladine v vodohranu T4, opazimo, da se je popravilo tudi nihanje vodne gladine v vodohranu T2.

Če primerjamo spodnji grafikon z grafikonom 16, opazimo, da je časovni potek koeficientov urne porabe posamezne tlačne cone zdaj bolj zglajen, saj smo se znebili vseh največjih izstopajočih konic.



Grafikon 19: Popravljeni koeficienti urne porabe po posamezni tlačni coni

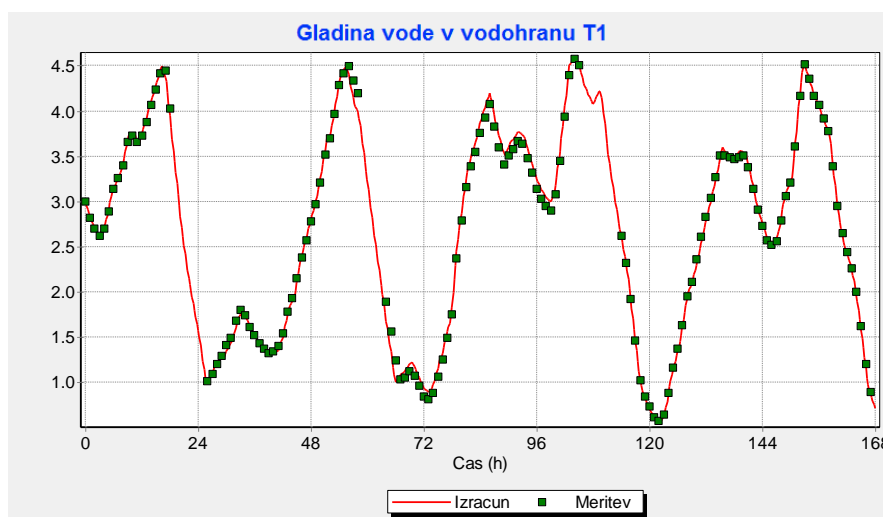
4.10 Končni popravki – izboljššan hidravlični model

Za zaključno fazo umerjanja v postopku makrokalibracije hidravličnega modela izvedemo še zadnje manjše popravke. Vrednosti osnovne porabe vozlišč, krivulj črpanja črpalk in koeficientov urne porabe posamezne tlačne cone fiksiramo, vrednosti C-koeficientov cevi po posamezni tlačni coni pa glede na premer cevi postopoma spreminjamo in opazujemo, kaj se z rezultati hidravličnih izračunov dogaja. Vrednost C-koeficienta posamezne skupine cevi enakega premera, ki v danih razmerah izkazuje najboljše ujemanje celotnega modela z meritvami, obdržimo. Postopek ponovimo za vse premere cevi in za vse tlačne cone.

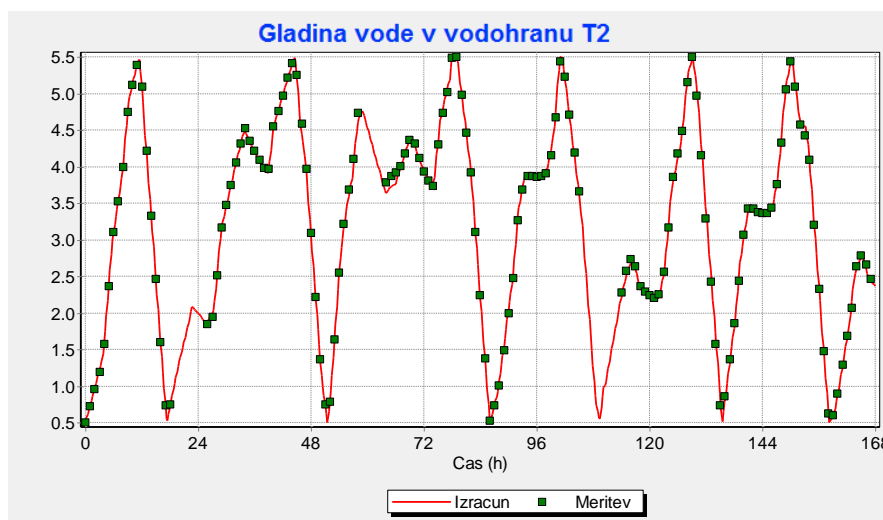
Glede na to, da se po tlačni coni DMA1 oskrbujejo ostale tlačne cone in je zaradi tega najboljčutljivejša za vsakršno spremembo znotraj sistema, začnemo s postopkom pri slednji. Odločimo se, da se meje intervala, znotraj katerega izbiramo vrednosti C-koeficientov, gibljejo v razmiku $\pm 10\%$ glede na začetno vrednost C-koeficienta pred pričetkom postopka.

Po opravljenem postopku dobimo sledeče ujemanje nihanja vodne gladine posameznih vodohranov in pretokov črpališč:

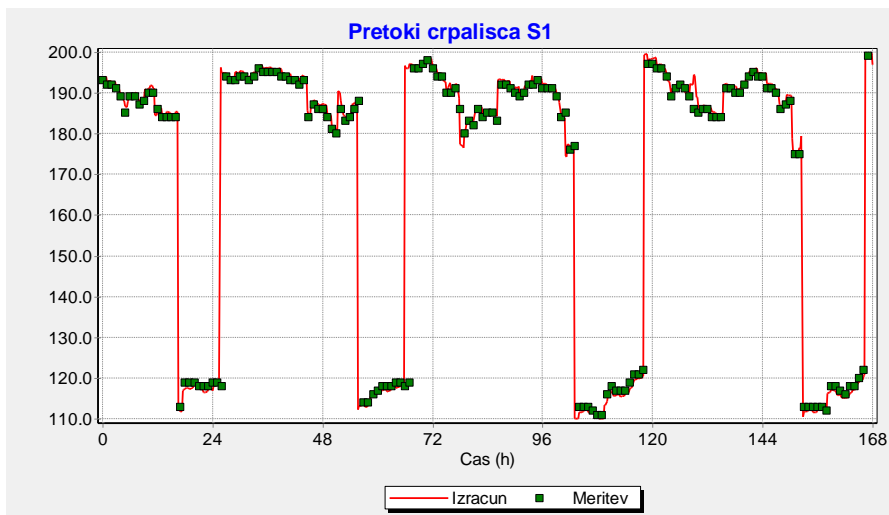
- tlačna cona DMA1



Slika 72: Nihanje vodne gladine vodohrana T1 po končani makrokalibraciji

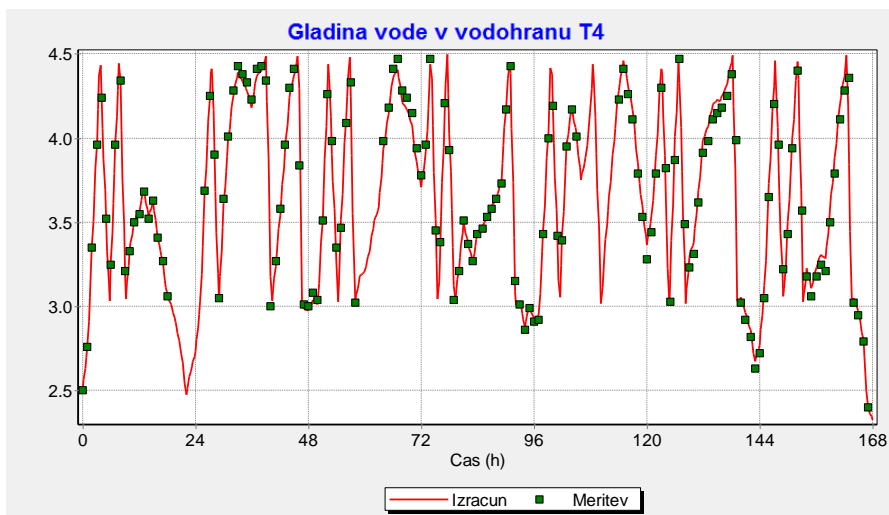


Slika 73: Nihanje vodne gladine vodohrana T2 po končani makrokalibraciji

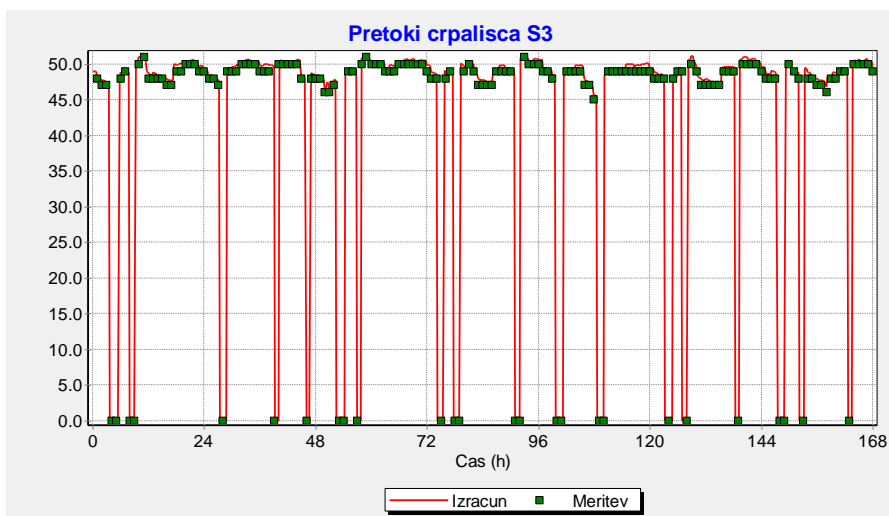


Slika 74: Pretoki črpalnice S1 po končani makrokalibraciji

- tlačna cona DMA2

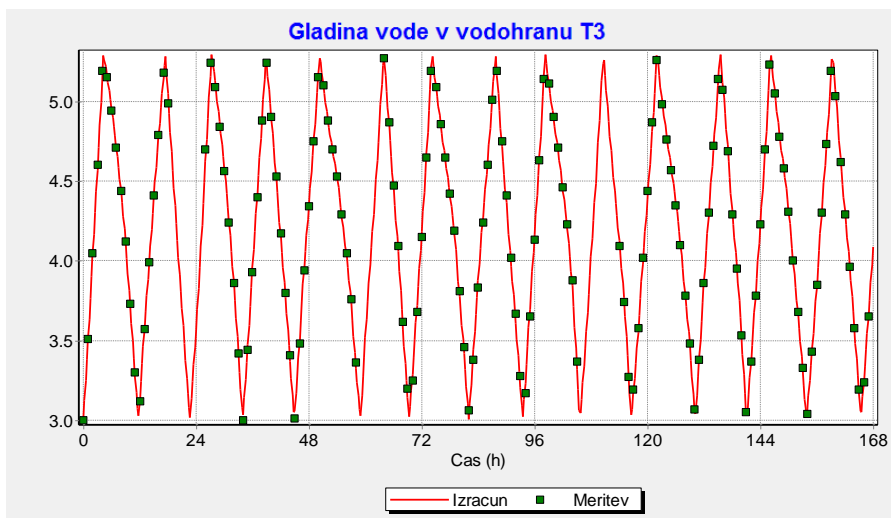


Slika 75: Nihanje vodne gladine vodohrana T4 po končani makrokalibraciji

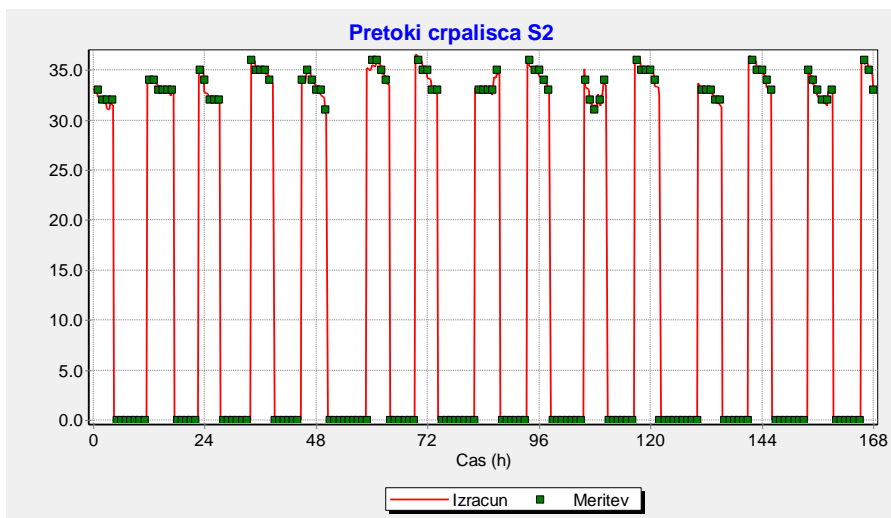


Slika 76: Pretoki črpalnice S3 po končani makrokalibraciji

- tlačna cona DMA3

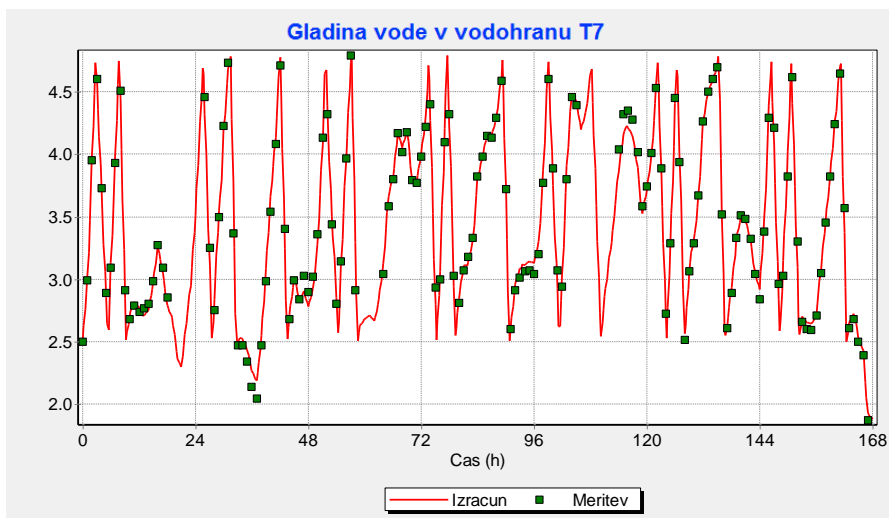


Slika 77: Nihanje vodne gladine vodohranu T3 po končani makrokalibraciji

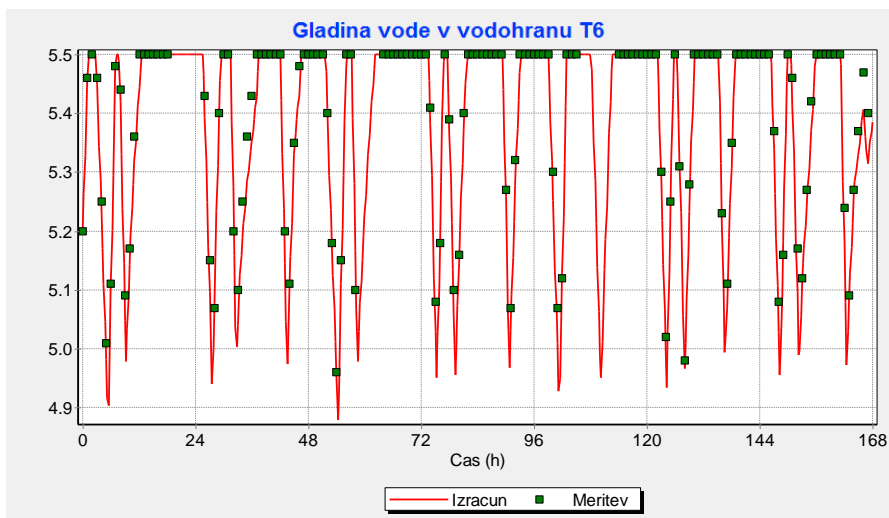


Slika 78: Pretoki črpališča S2 po končani makrokalibraciji

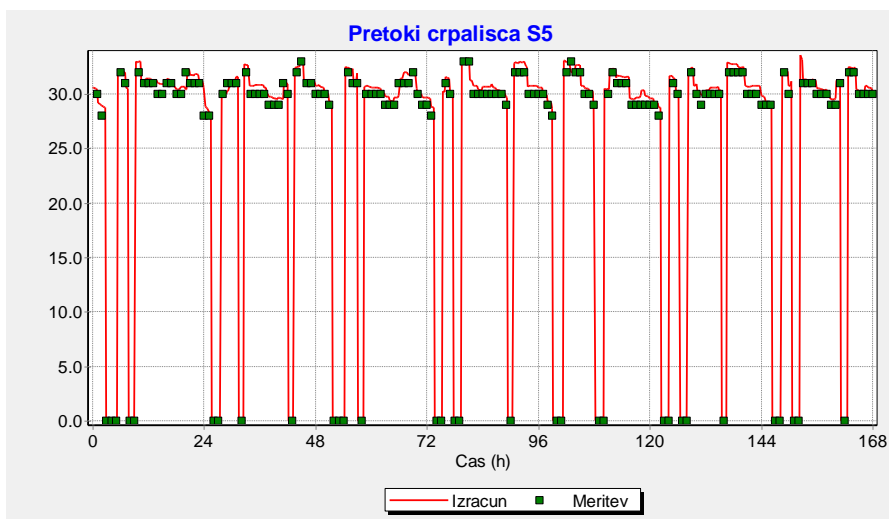
- tlačna cona DMA4



Slika 79: Nihanje vodne gladine vodohrana T7 po končani makrokalibraciji

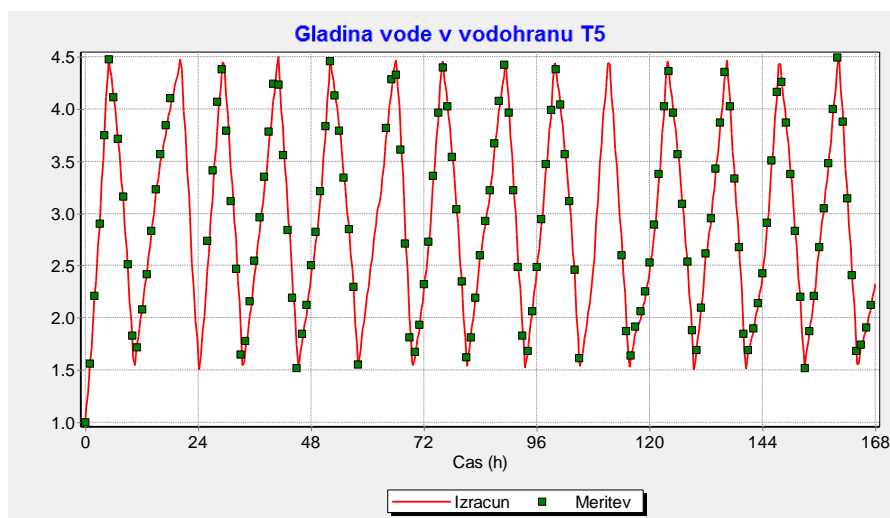


Slika 80: Nihanje vodne gladine vodohrana T6 po končani makrokalibraciji

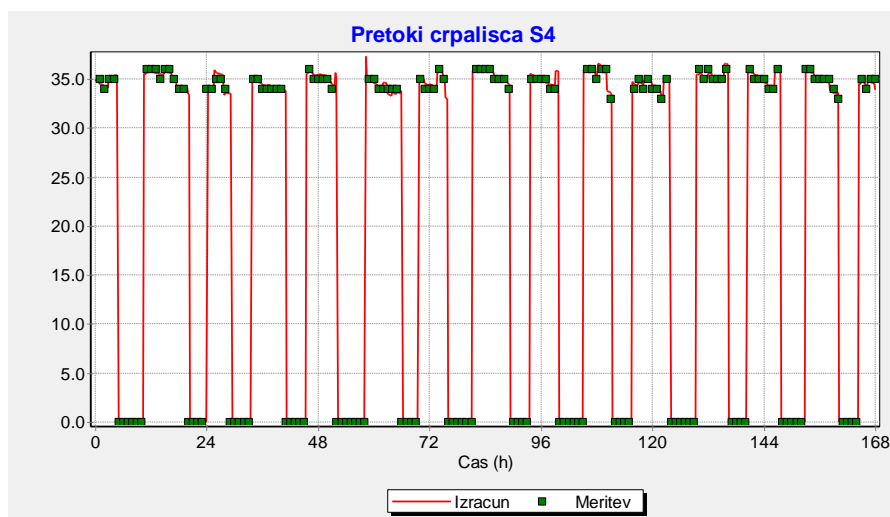


Slika 81: Pretoki črpalisca S5 po končani makrokalibraciji

- tlačna cona DMA5



Slika 82: Nihanje vodne gladine vodohrana T5 po končani makrokalibraciji



Slika 83: Pretoki črpališča S5 po končani makrokalibraciji

4.10.1 Izračun napak in statističnih podatkov

Programsko orodje Epanet nam poleg izračuna hidravličnih veličin modela vodovodnega sistema ponudi še samodejen izračun statističnih veličin oziroma statistične pokazatelje, ki nakazujejo stopnjo odstopanja (velikost napake) med izračunanimi vrednostmi in vrednostmi, ki smo jih pridobili na osnovi meritev (podatki SCADA) ter korelacijo med njimi.

Program Epanet nam skladno z (Rossman, 2000) za vsako merilno mesto samodejno izračuna sledeče veličine:

- srednja vrednost merjenih podatkov:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \quad , \quad (40)$$

kjer je \bar{y} = srednja vrednost merjenih podatkov posameznega merilnega mesta,
 y_i = merjena vrednost v danem časovnem obdobju,
 n = število vseh meritev,

- srednja vrednost izračunanih podatkov:

$$\bar{f} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n f_i, \quad (41)$$

kjer je \bar{f} = srednja vrednost izračunanih podatkov posameznega merilnega mesta,
 f_i = izračunana vrednost v danem časovnem obdobju,
 n = število vseh meritev,

- srednja absolutna napaka (angl. Mean Absolute Error – MAE) meri povprečno absolutno razliko vrednosti med izračunanimi in merjenimi podatki in je skladno s (Stanski et al., 1989) ponazorjena z enačbo:

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |f_i - y_i|, \quad (42)$$

- celotna napaka (angl. Root Mean Square Error – RMSE) je definirana kot koren povprečja kvadratov razlik vrednosti med izračunanimi in merjenimi podatki in je skladno s (Stanski et al., 1989) ponazorjena z enačbo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2}. \quad (43)$$

Tako MAE kot RMSE izračunata povprečno velikost napake s to razliko, da MAE podaja linearno oceno velikosti napake. To pomeni, da vsaka izmed razlik med merjeno in izračunano vrednostjo prispeva enako težo k povprečni velikosti napake. Nasprotno pa je zaradi kvadriranja pred izračunom povprečne vrednosti RMSE dosti občutljivejši na velika odstopanja med podatki meritev in izračunov. Večja odstopanja imajo tako večjo težo pri izračunu povprečne velikosti napake, zato je RMSE uporabna tam, kjer so velika odstopanja nezaželena (Stanski et al., 1989).

S pomočjo MAE in RMSE lahko ocenimo spreminjanje (variacijo) napak med merjenimi in izračunanimi vrednostmi. RMSE bo vedno večja oziroma kvečjemu enaka MAE, zato večja kot je njuna razlika, večja bo varianca² (razpršenost) posamezne napake glede na srednjo vrednost napake. Če sta RMSE in MAE enaka, potem imajo vsa odstopanja med

² Kvadratni koren variance imenujemo standardni odklon, s katerim določamo razpršenost enot v populaciji. Majhen standardni odklon predstavlja veliko koncentracijo statističnih enot okoli aritmetične sredine.

posameznimi izračunanimi in merjenimi vrednosti enako težo. Manjše kot so vrednosti RMSE in MAE, večjo natančnost izkazuje hidravlični model.

V nadaljevanju je podan postopek izračuna korelacijskega koeficienta povzetega po (Kovačič, 2014).

Povezanost dveh številskih nizov (merjene in izračunane vrednosti) ponazorimo s Pearsonovim koeficientom korelacije po enačbi:

$$r_{yf} = \frac{C_{yf}}{\sigma_y \cdot \sigma_f} , \quad (44)$$

kjer je C_{yf} = kovarianca,

σ_y = standardni odklon merjenih podatkov in

σ_f = standardni odklon izračunanih podatkov.

Kovarianca C_{yf} je enaka povprečnemu produktu odklonov od povprečja in jo zapišemo kot

$$C_{yf} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (f_i - \bar{f}) . \quad (45)$$

Standardni odklon posameznega niza podatkov dobimo iz enačb variance

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (46)$$

ter

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2 , \quad (47)$$

kjer je \bar{y} = srednja vrednost merjenih podatkov posameznega merilnega mesta,

y_i = merjena vrednost v danem časovnem obdobju,

\bar{f} = srednja vrednost izračunanih podatkov posameznega merilnega mesta,

f_i = izračunana vrednost v danem časovnem obdobju in

n = število vseh meritev.

Če enačbe (45), (46) in (47) vstavimo v enačbo (44), dobimo končno obliko enačbe za izračun korelacijskega koeficienta

$$r_{yf} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) \cdot (f_i - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}} . \quad (48)$$

Vrednost korelacijskega koeficienta leži na območju od -1 do 1. Vrednost okoli ničle pomeni, da številka niza nista povezana, nasprotno pa vrednosti okoli 1 nakazujejo močno linearno pozitivno povezanost.

Epanet nam izračuna korelacijski koeficient med srednjo vrednostjo merjenih podatkov in srednjo vrednostjo izračunanih podatkov na vsakem merilnem mestu, kakor tudi za sistem kot celoto.

Statistični podatki izboljšane hidravličnega modela za primer nihanja vodnih gladin vodohranov in primer pretokov črpališč so prikazani v spodnjih preglednicah.

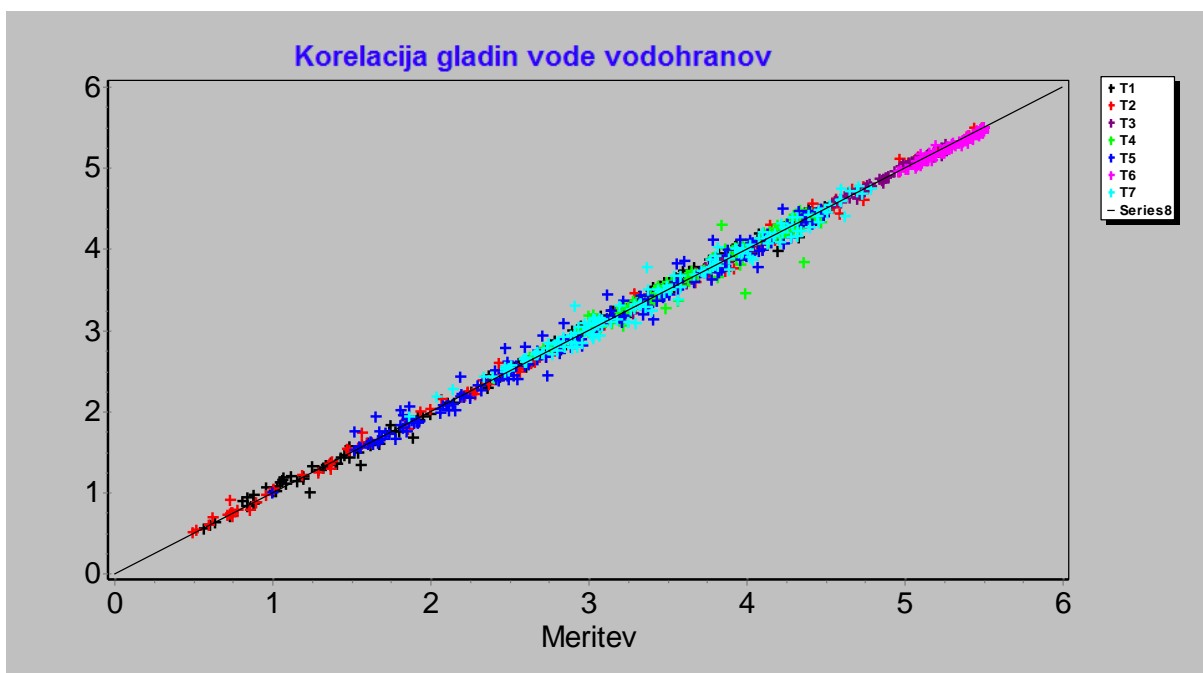
Preglednica 3: Statistični podatki izboljšane hidravličnega modela za primer nihanja gladin vodohranov

Merilno mesto	Število meritev	Srednja vrednost merjenih podatkov \bar{y} [m]	Srednja vrednost izračunanih podatkov \bar{f} [m]	Srednja absolutna napaka MAE [m]	Celotna napaka RMSE [m]
T1	148	2,66	2,68	0,049	0,068
T2	148	3,27	3,26	0,039	0,056
T3	148	4,20	4,20	0,024	0,030
T4	148	3,67	3,67	0,059	0,097
T5	148	2,94	2,94	0,085	0,113
T6	148	5,39	5,37	0,016	0,028
T7	148	3,47	3,47	0,064	0,090
Omrežje	1036	3,66	3,66	0,048	0,075
Korelacijski koeficient r					
			1,000		

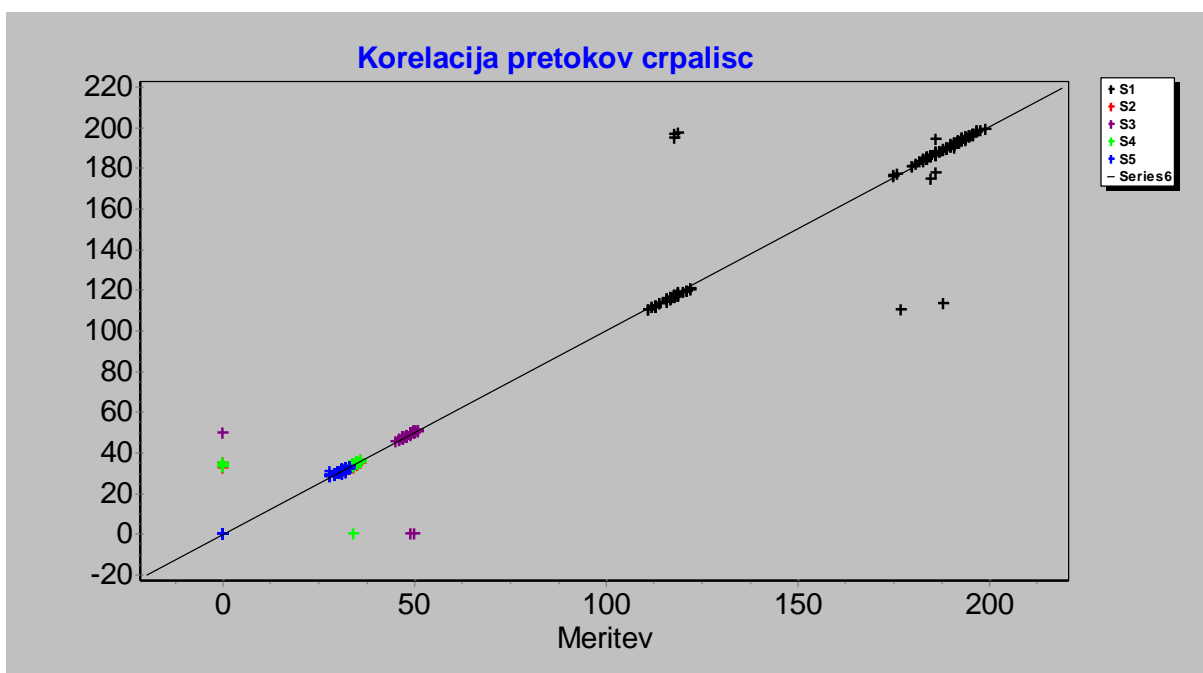
Preglednica 4: Statistični podatki izboljšane hidravličnega modela za primer pretokov črpališč

Merilno mesto	Število meritev	Srednja vrednost merjenih podatkov \bar{y} [l/s]	Srednja vrednost izračunanih podatkov \bar{f} [l/s]	Srednja absolutna napaka MAE [l/s]	Celotna napaka RMSE [l/s]
S1	168	167,73	168,48	3,248	13,051
S2	168	14,88	15,19	0,536	3,702
S3	168	41,20	41,31	1,298	6,642
S4	168	20,33	21,17	1,385	6,437
S5	168	24,58	24,97	0,466	0,603
Omrežje	840	53,74	54,22	1,387	7,348
Korelacijski koeficient r					
			1,000		

Z razsevnim grafikonom prikažemo točkovni raztros merjene in izračunane vrednosti za vsako meritev na posamezni lokaciji merjenja (vodohrani T1–T7 in črpališča S1–S5). Vsaka lokacija merjenja je na grafikonu ponazorjena s svojo barvo. Bližje kot se točke nahajajo 45° premici, manjše je odstopanje med izračunanimi in merjenimi vrednostmi (Rossman, 2000).



Slika 84: Razsevni grafikon in korelacija vodnih gladin vodohranov



Slika 85: Razsevni grafikon in korelacija pretokov črpališč

Po pričakovanju lahko opazimo, da se v primeru pretokov črpališč pojavljajo večja odstopanja, saj je hidravlični sistem modeliran z velikim številom parametrov, katerim ne poznamo točne vrednosti in vplivajo na potek delovanja črpalk. Osamelci na razsevni grafikonu (slika 85) predstavljajo posamezen časovni zamik vklopa/izklopa črpališča oziroma večje spremembe v pretoku glede na podatke meritev in so vzrok veliki napaki MAE ter RMSE.

5 IZRAČUN VODNIH IZGUB

5.1 Vodna bilanca vodovodnega sistema

Vodne izgube so prepoznavne kot pereča problematika upravljanja vodovodnih sistemov. Da bi lahko opredelili in kvantificirali vodne izgube, se moramo najprej seznaniti s pojmi, ki vplivajo na sestavo vodne bilance vodovodnega sistema. Vodna bilanca vodovodnih sistemov je standardizirani pojem, pri čemer se za njegovo standardizacijo najširše uveljavlja metodologija po International Water Association (IWA). V spodnji preglednici je po (Lambert & Hirner, 2000) podan seznam sestavnih delov vodne bilance sistema povzetih po IWA.

Preglednica 5: Standardizirana terminologija za izdelavo vodne bilance vodovodnega sistema po IWA

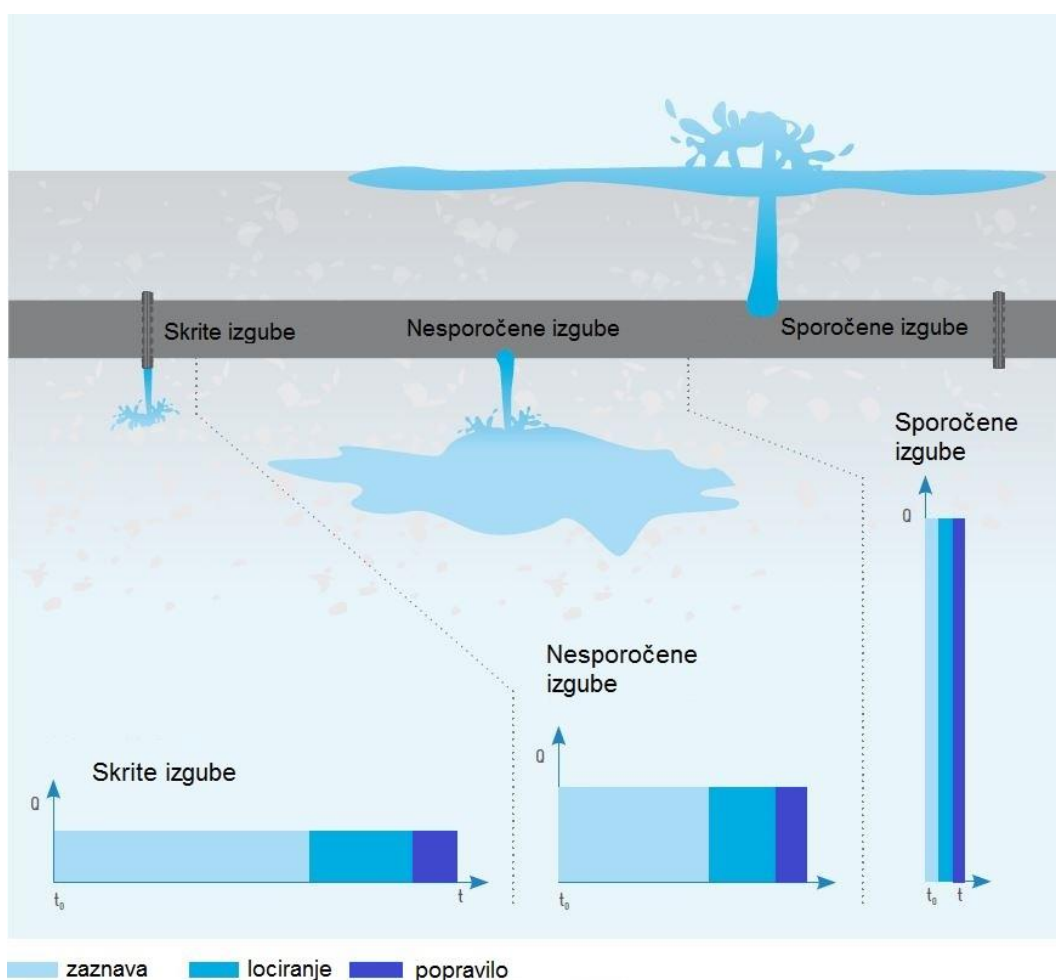
Vtok v vodovodni sistem (System Input Volume)	Dovoljena poraba (Authorised Consumption)	Dovoljena obračunana poraba (Billed Authorised Consumption)	Obračunana merjena poraba (Billed Metered Consumption)	Prodana količina vode (Revenue Water)	
		Dovoljena neobračunana poraba (Unbilled Authorised Consumption)	Obračunana nemerjena poraba (Billed Unmetered Consumption)		
		Vodne izgube (Water Losses)	Navidezne izgube (Apparent Losses)	Nedovoljena poraba (Unauthorised Consumption)	Neprodana količina vode (Non-Revenue Water)
			Dejanske izgube (Real Losses)	Neobračunana merjena poraba (Unbilled Metered Consumption)	
	Nenatančnost meritev (Customer Metering Inaccuracies)				
	Izgube na transportnih in razdelilnih vodih (Leakage on Distribution Mains)				
	Puščanje in prelivanje vodohranov (Leakage and Overflows at Storage Tanks)				
	Puščanje na priključkih do merilnega mesta (Leakage on Service Connections up to point of Customer metering)				

Količino vode, ki vstopi v vodovodni sistem, lahko v grobem razdelimo v dve skupini, in sicer dovoljena poraba ter vodne izgube sistema. Dovoljena poraba vključuje merjeno in nemerjeno količino vode, ki jo lahko odvzamejo uporabniki javne službe ter vsi ostali pooblaščen uporabniki. Sem lahko prištevamo lastno porabo, redno in izredno pranje vodohranov (za zagotavljanje ustreznosti pitne vode), gašenje požarov, izpiranje kanalizacijskih cevi, pranje ali namakanje javnih površin, ipd. Slednji odvzemi so lahko obračunani ali neobračunani, merjeni ali nemerjeni, odvisno od nacionalne zakonodaje na območju in se izvajajo v skladu s predpisom občine, ki ureja javno službo (Uredba o oskrbi s pitno vodo, Uradni list RS št. 88-3498/2012: 9038).

5.2 Opis vodnih izgub

Vodne izgube lahko opredelimo kot količino vode, ki se zaradi različnih razlogov izgubi na poti med točko oskrbovanja vodovodnega sistema in merilnega mesta strank. Izrazimo jih lahko kot razliko med količino vode, ki vstopi v sistem, in dovoljeno porabo vode in so sestavljene iz navideznih ter dejanskih izgub. K navideznim izgubam prištevamo nedovoljeno porabo (ilegalni odvzem vode na hidrantih, ilegalni priključki in predelani oziroma izvedeni obvodi merilnikov), nenatančnost meritev (neumerjenost merilnikov, vgradnja napačnih merilnikov in slaba izvedba vgradnje merilnikov) ter navsezadnje tudi napako, ki se pojavi pri ravnanju s podatki (slabi odčitki, prenos podatkov, ipd.).

Dejanske izgube sestavljajo izgube na transportnih in razdelilnih vodih, puščanje in prelivanje vodohranov ter puščanje na priključkih do merilnih mest uporabnikov. Glede na velikost in čas trajanja jih delimo v tri skupine, ponazorjene na spodnji sliki (Fallis et al., 2011).



Slika 86: Razmerje med velikostjo in časom trajanja izgub (Fallis et al., 2011, str: 51)

Sporočene oziroma vidne izgube so posledica nenadnega loma cevi ali spoja cevi. Voda se glede na velikost tlaka (in loma) hitro in vidno pojavi na površju, zato je čas zaznave, lociranja in popravila okvare kratek. Količinsko gledano predstavljajo sporočene izgube v povprečju 45 odstotkov vseh dejanskih izgub in 10 odstotkov vseh puščanj ter uhajanj.

Nesporočene izgube zaradi loma cevi se zaradi spleta neugodnih razmer običajno ne pojavijo na površju, tako da ostanejo očem skrite. Imajo daljši čas zaznavanja, saj se jih namensko odkriva z uporabo različnih akustičnih (geofoni in data loggerji šumov) in neakustičnih metod (Andoljšek, 2012). Količinsko gledano predstavljajo nesporočene izgube v povprečju 30 odstotkov vseh dejanskih izgub.

Skrite izgube oziroma manjša puščanja na spojih in uhajanja zaradi razpokanosti cevi so konstantno prisotne, saj jih z uporabo akustičnih metod ni možno locirati. Odpravijo se v okviru rednih investicijskih in vzdrževalnih del, kjer se sprotno zamenjujejo dotrajani odseki vodovoda. Zaradi velikega števila in dolgega časa trajanja prispeva kumulativa vseh relativno majhnih puščanj in uhajanj na dolgi rok v povprečju 25 odstotkov vseh dejanskih izgub. Skupaj z nesporočenimi izgubami predstavljajo preostalih 90 odstotkov vseh puščanj in uhajanj.

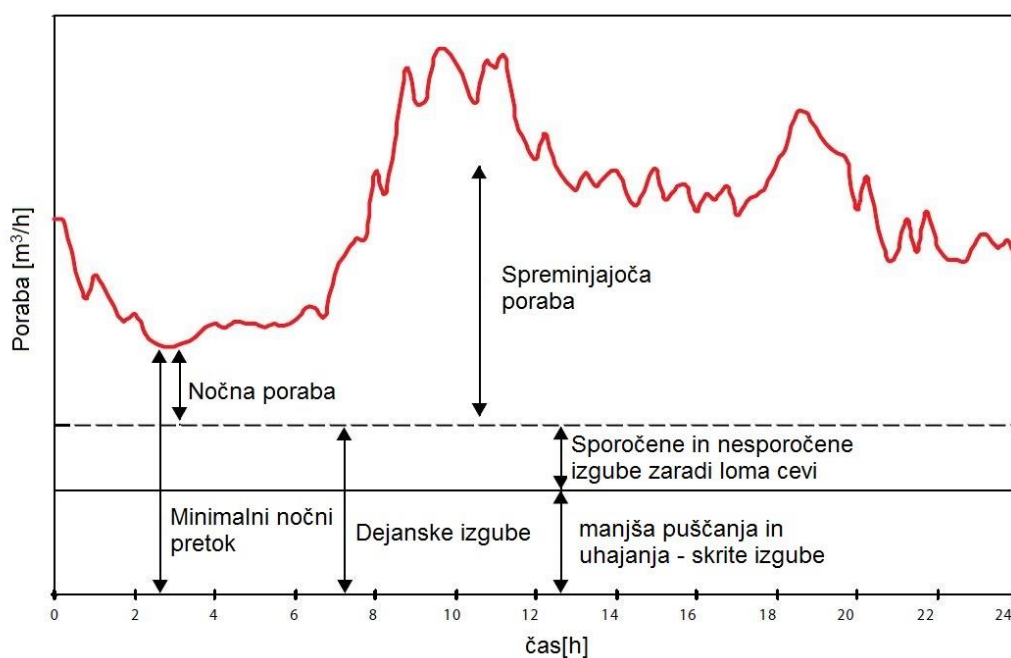
V spodnji preglednici so prikazane okvirne vrednosti količine dejanskih izgub glede na lokacijo in tip puščanja za dobro vzdrževan vodovodni sistem, ki jih (Yi Wu et al., 2011) povzemajo po IWA Water Loss Task Force.

Preglednica 6: Količina dejanskih izgub glede na lokacijo in tip puščanja za dobro vzdrževan vodovodni sistem

Lokacija / tip	Vrednost	Enota
Transportni vod – sporočene izgube	240	[liter/ura/m tlaka]
Transportni vod – nesporočene izgube	120	[liter/ura/m tlaka]
Razdelilni vod – sporočene izgube	32	[liter/ura/m tlaka]
Razdelilni vod – nesporočene izgube	32	[liter/ura/m tlaka]
Skrite izgube		
Transportni vod	9,6	[liter/km cevi/dan/m tlaka]
Razdelilni vod – priključki uporabnikov	0,6	[liter/število priključkov/dan/m tlaka]
Cevi hišnih priključkov do vodomera	16	[liter/km cevi priključka/dan/m tlaka]

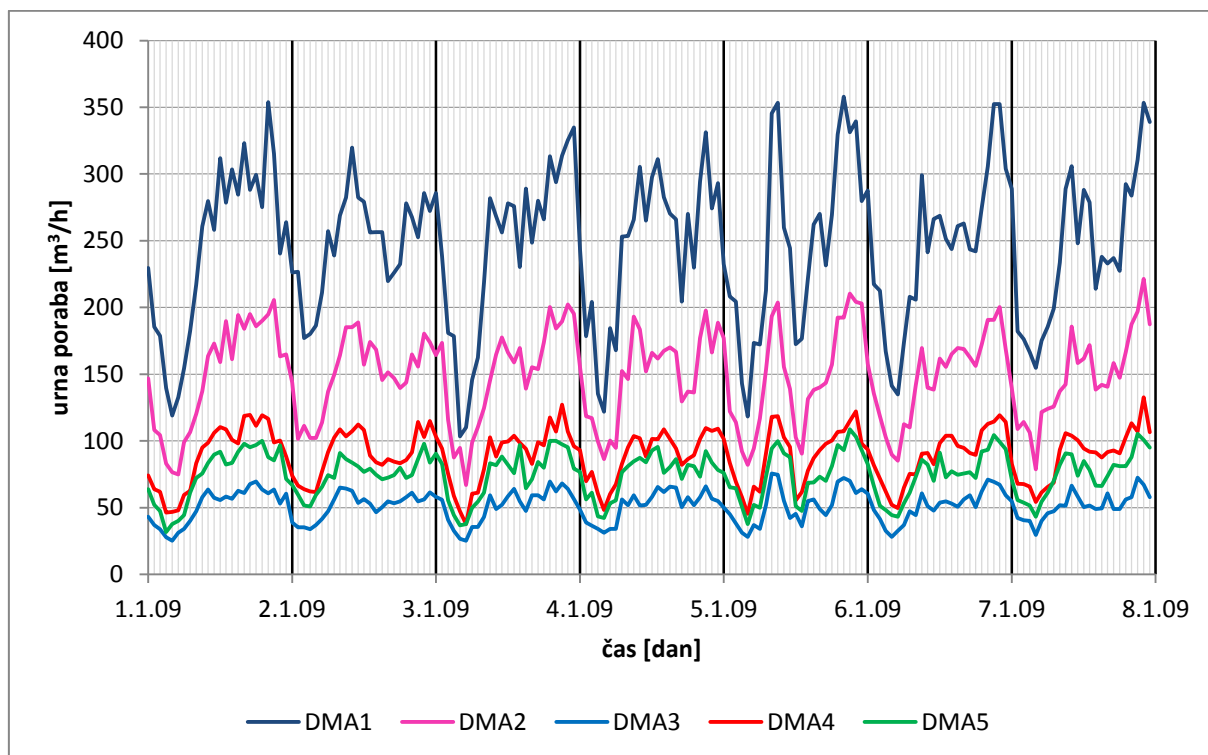
5.3 Minimalni nočni pretok

Za določitev vodnih izgub je zelo uporabna metoda minimalnega nočnega pretoka, kjer merimo porabo v posamezni tlačni coni v času, ko je dovoljena poraba vode s strani uporabnikov najmanjša. To se zgodi v nočnih urah, po navadi med 2. in 4. uro zjutraj, ko večina prebivalcev spi, zato privzamemo, da so zaradi višjih tlakov v omrežju takrat izgube največje. Spodnja slika prikazuje tipičen potek porabe znotraj tlačne cone v obdobju 24 ur.



Slika 87: Tipičen potek porabe znotraj tlačne cone v obdobju 24 ur (Farley et al, 2008, str: 56)

Minimalni nočni pretok je sestavljen iz dela dejanskih izgub in dela nočne porabe, to je dovoljena poraba s strani uporabnikov v nočnem času. Dejanske vodne izgube dobimo, če od minimalnega nočnega pretoka odštejemo nočno porabo (Farley et al., 2008). Spodnji grafikon prikazuje porabo po posamezni tlačni coni vodovodnega omrežja. Opazimo lahko, da za vse tlačne cone dnevni minimalni nočni pretok nastopi približno ob enakem času.



Grafikon 20: Urna poraba posamezne tlačne cone

Oceno minimalnega nočnega pretoka posamezne tlačne cone dobimo tako, da za obdobje 7 dni izračunamo povprečje minimalnih nočnih pretokov, ki nastopijo v posameznem dnevu.

Izkušnje na raznih koncih sveta so pokazale, da je v času trajanja minimalnega nočnega pretoka aktivnih v povprečju 6 odstotkov populacije in znaša poraba približno 10 litrov/oseba/ura (Mckenzie, 1999). Ker ne poznamo gostote prebivalstva, ki se veže na posamezno vozlišče, bomo nočno porabo posamezne tlačne cone ocenili tako, da vsoto obstoječe povprečne osnovne porabe vseh vozlišč v posamezni tlačni coni pomnožimo s faktorjem 0,06 in jo pretvorimo v enoto [m³/h]. V spodnji preglednici lahko opazimo, da nočna poraba znaša približno 11 odstotkov minimalnega nočnega pretoka v posamezni tlačni coni.

Preglednica 7: Dejanske izgube posamezne tlačne cone

Tlačna cona [m ³ /h]	Minimalni nočni pretok [m ³ /h]	Nočna poraba [m ³ /h]	Dejanske izgube [m ³ /h]	Obstoječa povprečna vozliščna poraba [m ³ /h]	Delež izgub [%]
DMA1	132,704	14,558	118,146	242,632	32,75
DMA2	82,218	9,040	73,178	150,674	32,69
DMA3	28,712	3,173	25,539	52,882	32,56
DMA4	49,053	5,439	43,614	90,648	32,48
DMA5	40,819	4,560	36,259	76,006	32,29
Omrežje	333,506	36,770	296,736	612,842	32,62

Glede na približno enak delež vodnih izgub po posamezni tlačni coni bomo osnovno porabo vozlišč celotnega sistema pomnožili s faktorjem

$$k_{poraba\ vozlišč} = \frac{612,842 + 296,736}{612,842} = 1,484 \quad ,$$

ter proporcionalno zmanjšali koeficiente urne porabe posamezne tlačne cone s faktorjem

$$k_{urna\ poraba} = \frac{1}{1,49} = 0,673 \quad .$$

5.4 Modeliranje vodnih izgub v programu Epanet

5.4.1 Hidravlične osnove vodnih izgub

Poleg običajnih hidravličnih izračunov in modeliranja kakovosti vode v vodovodnem sistemu lahko s programom Epanet modeliramo tudi sisteme za namakanje oziroma vsak iztok na prosto skozi šobo (odprtino). Analogno lahko tudi vodne izgube zaradi puščanja ponazorimo kot tlačno odvisen iztok skozi odprtino. Osnova je Torricellijeva enačba iztoka skozi odprtino

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2gh} \quad , \quad (49)$$

kjer je Q = pretok [l/s],

C = koeficient iztoka (odvisen od dotočne hitrosti in kontrakcije curka odprtine) [/],

A = presek odprtine [m²],

h = tlak v težišču odprtine [m] in

g = gravitacijski pospešek [9,81 m/s²].

Za namen modeliranja vodnih izgub lahko enačbo (49) poenostavimo v splošno obliko, ki opisuje zvezo med tlakom in količino vodnih izgub (van Zyl, 2014):

$$Q = C \cdot h^\alpha, \quad (50)$$

kjer je Q = količina vodnih izgub [l/s],

C = koeficient vodnih izgub (angl. Emitter Coefficient) [$l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1/2}$],

h = povprečni tlak v tlačni coni [m],

α = eksponent vodnih izgub [].

Po enačbi (49) bi pričakovali, da bo vrednost eksponenta vodnih izgub znašala 0,5, vendar na podlagi študij različnih avtorjev (van Zyl, 2014), (Franchini & Lanza, 2014) lahko vrednost eksponenta naraste tudi do 2,9. To pomeni, da so vodne izgube še toliko občutljivejše na tlak v cevi, kot se je sprva pričakovalo. Dejavniki, ki pomembno vplivajo na velikost eksponenta vodnih izgub, so:

- geometrija in velikost iztočne odprtine,
- sposobnost širjenja curka skozi odprtino puščanja je pri naraščanju tlaka odvisna od tipa poškodbe in materiala cevi. Vzдолžna razpoka ima z naraščanjem tlaka večjo sposobnost širjenja od okrogle luknje. Pri ceveh iz elastičnih materialov oziroma z nizkim modulom elastičnosti E (PVC, PE) se z večanjem tlaka v cevi presek odprtine puščanja linearno povečuje (Franchini & Lanza, 2014),
- pri vkopanih ceveh bo zemljina ali peščen obsip, s katerim je obdana cev, ponudila hidravlični upor pri iztoku in tako neposredno vplivala na stopnjo uhajanja vode. Višji kot je zemeljski pritisk na cev, manjša bo stopnja puščanja (pomembnost dobre vgradnje – doseganje zbitosti obsipnega materiala do 97 odstotkov trdnosti po standardnem Proktorjevem postopku). Dolgoročno zemljina ne more kljubovati velikim pritiskom vodnega curka, zato je bolj verjetno, da zemljina morda vpliva na velikost koeficienta vodnih izgub in ne na samo velikost eksponenta (Mashford et al., 2009),
- režim toka (turbulentni, laminarni) na iztoku odprtine.

V spodnji preglednici so ponazorjeni eksponenti vodnih izgub glede na material in tip poškodbe vodovodne cevi (Mashford et al., 2009). Vse navedene vrednosti veljajo za turbulentni režim toka v cevi in za iztok na prosto.

Preglednica 8: EkspONENT vodnih izgub glede na material in tip poškodbe

Tip poškodbe	EkspONENT vodnih izgub glede na material cevi		
	PVC	Azbestcement	Železo
Okrogla luknja	0,52	/	0,52
Vzdolžna razpoka	1,38 - 1,85	0,79 - 1,04	/
Prečna razpoka	0,41 - 0,53	/	/
Korozijska kepa	/	/	0,67 - 2,30

Fallis et al. (2011) povzema, da se za cevi z nizkim modulom elastičnosti E (PVC, PE) običajno privzame vrednost eksponenta $\alpha = 1,5$, medtem ko se za bolj toge cevi (železo, nodularna litina) privzame vrednost $\alpha = 0,5$. Program Epanet ima to pomanjkljivost, da lahko vrednost eksponenta podamo le za celotno vodovodno omrežje oziroma model, kar nam lahko dodatno oteži inženirsko oceno v primeru, ko v isti tlačni coni oziroma modelu kot celoti nastopajo cevi iz različnih materialov. Za velika vodovodna omrežja se za začetno oceno lahko privzame linearna povezava med tlakom in količino vodnih izgub ($\alpha = 1$).

5.4.2 Določanje koeficienta vodnih izgub

Vodovodno omrežje je sestavljeno iz litoželeznih cevi, zato lahko iz enačbe (50) izrazimo koeficient vodnih izgub kot:

$$C = \frac{Q}{h^\alpha} = \frac{Q}{\sqrt{h}}, \quad \alpha = 0,5, \quad (51)$$

kjer je Q = količina vodnih izgub [l/s],

C = koeficient vodnih izgub (Emitter Coefficient) [$l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$],

h = povprečni tlak v tlačni coni [m],

α = eksponent vodnih izgub (za litoželezne cevi privzamemo $\alpha = 0,5$) [].

Da bi izračunali povprečni tlak posamezne tlačne cone, moramo najprej določiti reprezentativno (povprečno) vozlišče cone (angl. Average Zone Point – AZP), v katerem bomo merili povprečni tlak (Yi Wu et al., 2011). Postopek pričnemo z izračunom povprečne geodetske višine z utežjo (angl. Weighted Average Ground Level – WAGL) tlačne cone s pomočjo utežne funkcije. Utežno funkcijo uporabimo, kadar hočemo, da bi nekateri elementi imeli več vpliva na končni rezultat, zato za utež privzamemo povprečno dnevno porabo posameznega vozlišča. Povprečno geodetsko višino z utežjo izračunamo po enačbi, ki jo podaja (Renaud et al., 2012):

$$WAGL = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (52)$$

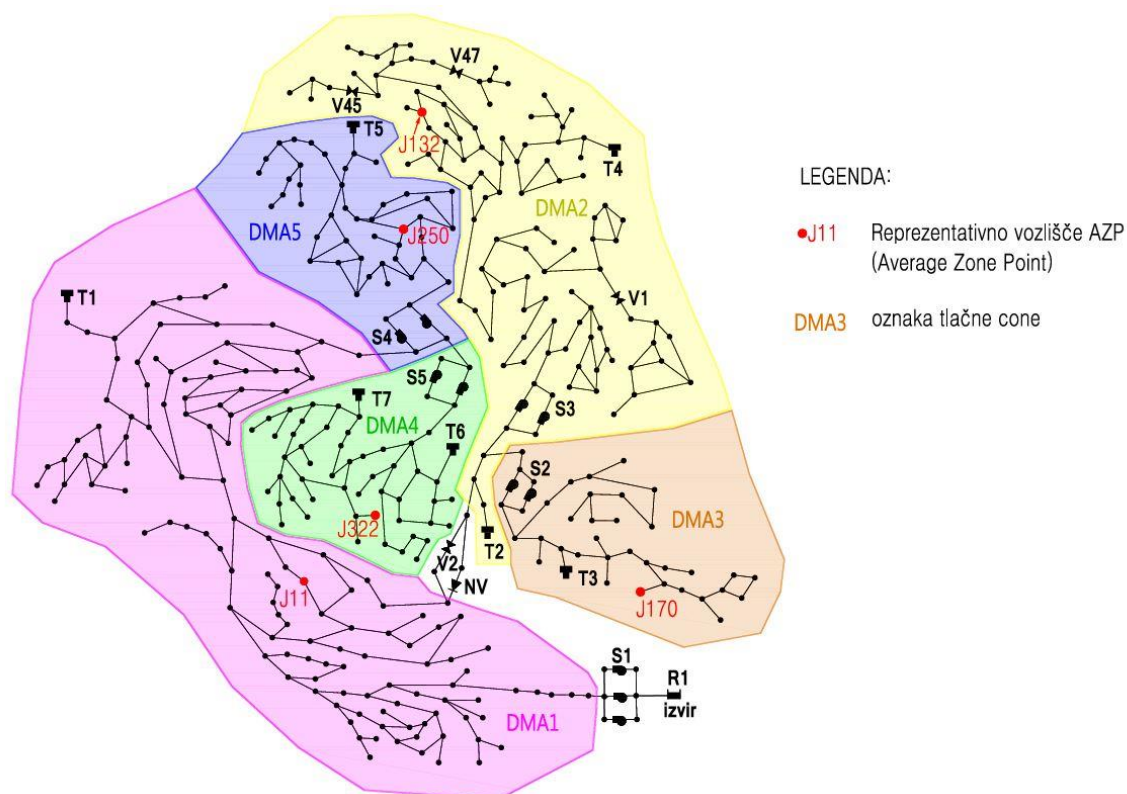
kjer je $WAGL$ = povprečna geodetska višina z utežjo [m],

z_i = geodetska višina posameznega vozlišča tlačne cone [m] in

w_i = utež, povprečna dnevna poraba vozlišča [m^3 /dan].

S pomočjo izračunane povprečne geodetske višine z utežjo nato poiščemo vozlišče (AZP), ki se nahaja približno na sredini posamezne tlačne cone, med vodohranom in črpališčem,

katera geodetska višina se ujema z izračunano povprečno geodetsko višino z utežjo (WAGL). Na spodnji sliki je prikazana lokacija reprezentativnega vozlišča posamezne tlačne cone.



Slika 88: Reprezentativna vozlišča posameznih tlačnih con

Za reprezentativno vozlišče (AZP) nato s pomočjo hidravličnega izračuna določimo povprečno vrednost tlaka za obdobje 168 ur, potem po enačbi (51) izračunamo še koeficient vodnih izgub tlačne cone. Rezultati so prikazani v spodnji preglednici.

Preglednica 9: Izračun koeficienta vodnih izgub C

Tlačna cona	Povprečna geodetska višina z utežjo WAGL [m]	Reprezentativno vozlišče (AZP)	Povprečni tlak AZP vozlišča / tlačne cone [m]	Vodne izgube [l/s]	Skupni koeficient vodnih izgub C [l/s ⁻¹ m ^{-1/2}]	Število vozlišč tlačne cone n	Koeficient vodnih izgub posameznega vozlišča C _n [l/s ⁻¹ m ^{-1/2}]
DMA1	18,63	J11	56,31	33,182	4,42196	144	0,03071
DMA2	74,54	J132	61,25	20,553	2,62624	111	0,02366
DMA3	45,64	J170	70,39	7,174	0,85505	36	0,02375
DMA4	48,46	J322	58,07	12,251	1,60772	52	0,03092
DMA5	66,89	J250	44,08	10,186	1,53409	45	0,03409

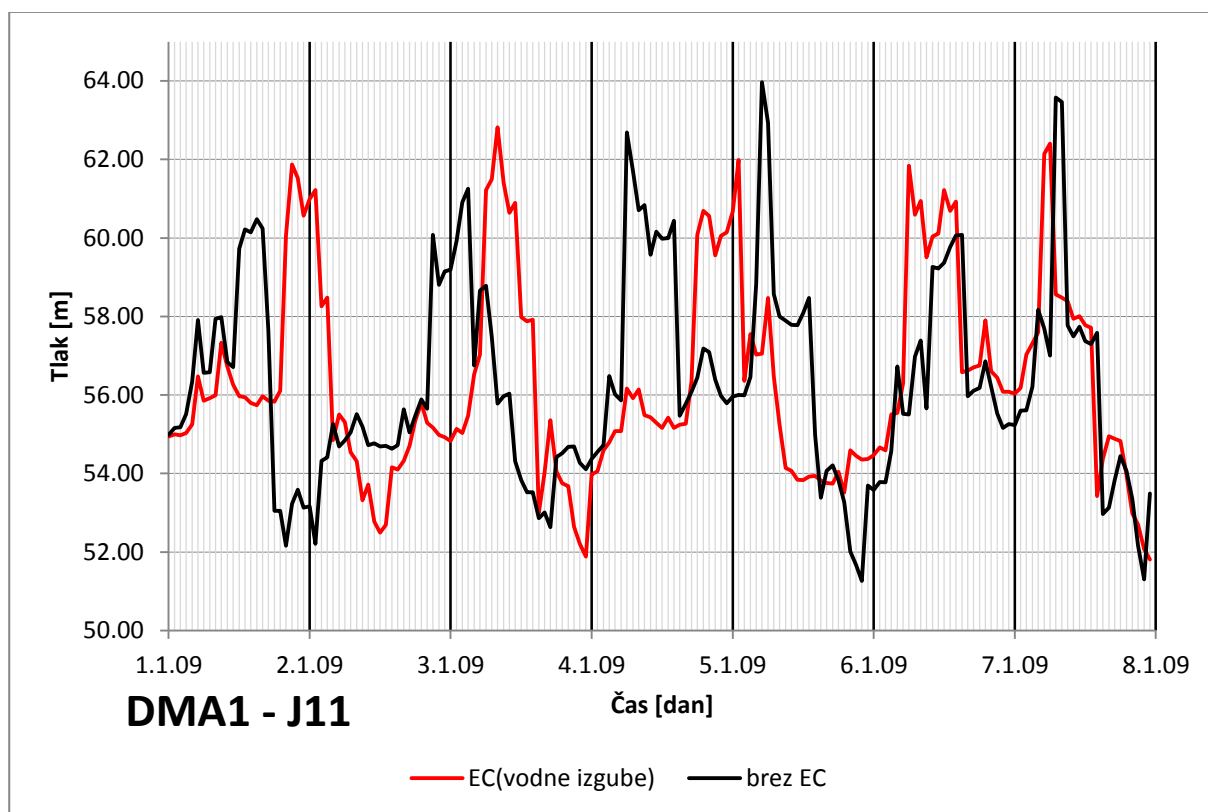
Zaradi lažjega modeliranja lahko skupni koeficient vodnih izgub porazdelimo v vozlišču ali dveh, vendar skladno z (Walski et al., 2003), bi bilo bolj natančno, če proporcionalno manjše vrednosti koeficientov porazdelimo na vsa vozlišča posamezne tlačne cone po enačbi:

$$C_n = \frac{C}{n}, \quad (53)$$

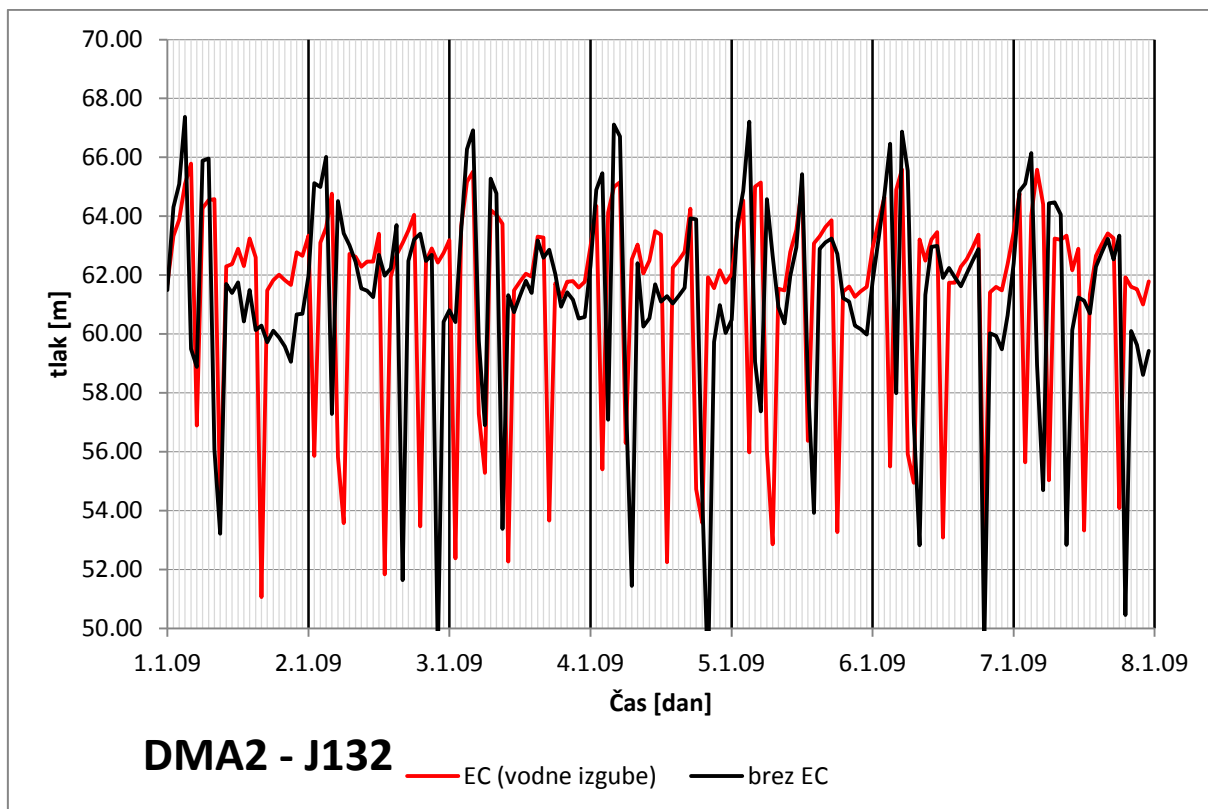
kjer je C_n = koeficient vodnih izgub v n-tem vozlišču tlačne cone [$l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1/2}$],
 C = skupni koeficient vodnih izgub posamezne tlačne cone [$l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1/2}$] in
 n = število vozlišč v posamezni tlačni coni.

5.4.3 Rezultati modeliranja vodnih izgub

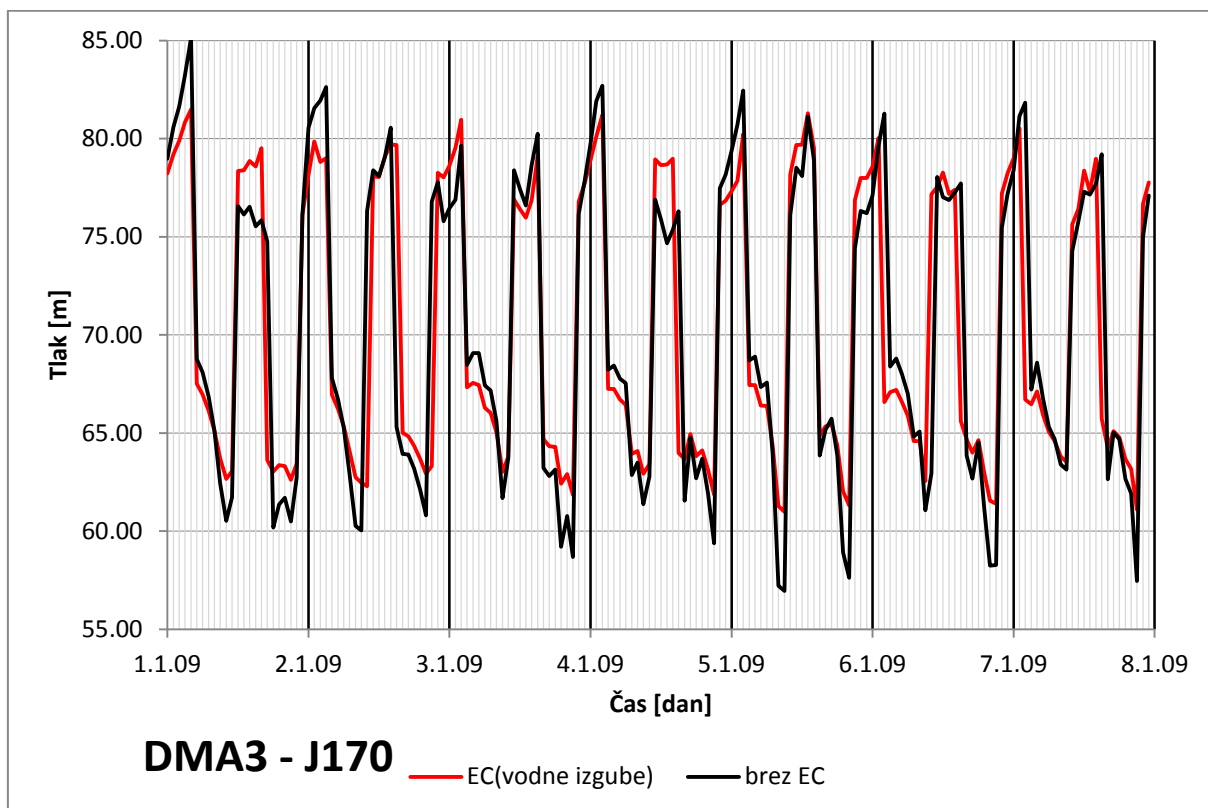
Po posamezni tlačni coni smo osnovno porabo vozlišč proporcionalno zmanjšali za vrednost vodnih izgub, izračunano po preglednici 7. Manjkajoči delež porabe smo nadomestili z uporabo koeficientov vodnih izgub (angl. Emitter Coefficient EC), izračunanih po preglednici 9, in jih dodelili odgovarjajočim vozliščem. Za posamezno tlačno cono smo nato v reprezentativnem vozlišču izmerili tlake za dva obtežna primera, oziroma pred vnosom koeficientov vodnih izgub in po njem. V spodnjih grafikonih so prikazani rezultati hidravličnih simulacij.



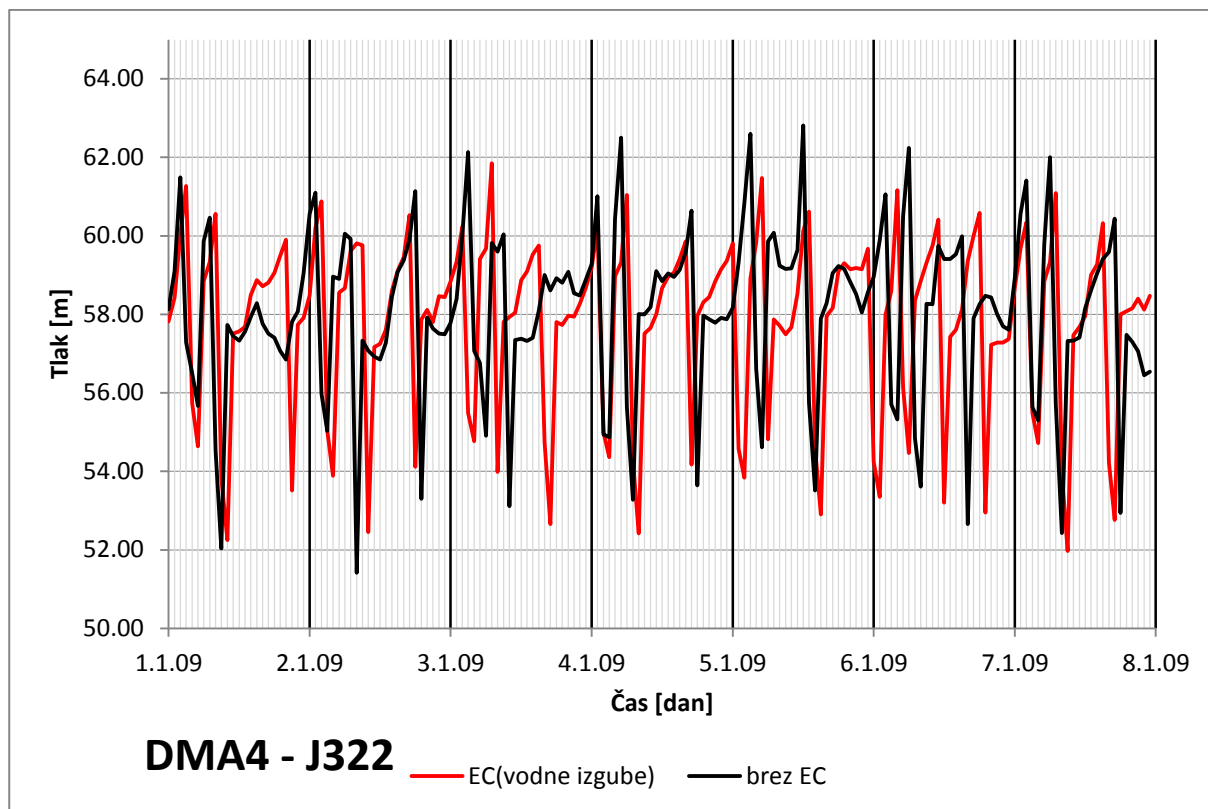
Grafikon 21: Nihanje tlakov v reprezentativnem vozlišču tlačne cone DMA1



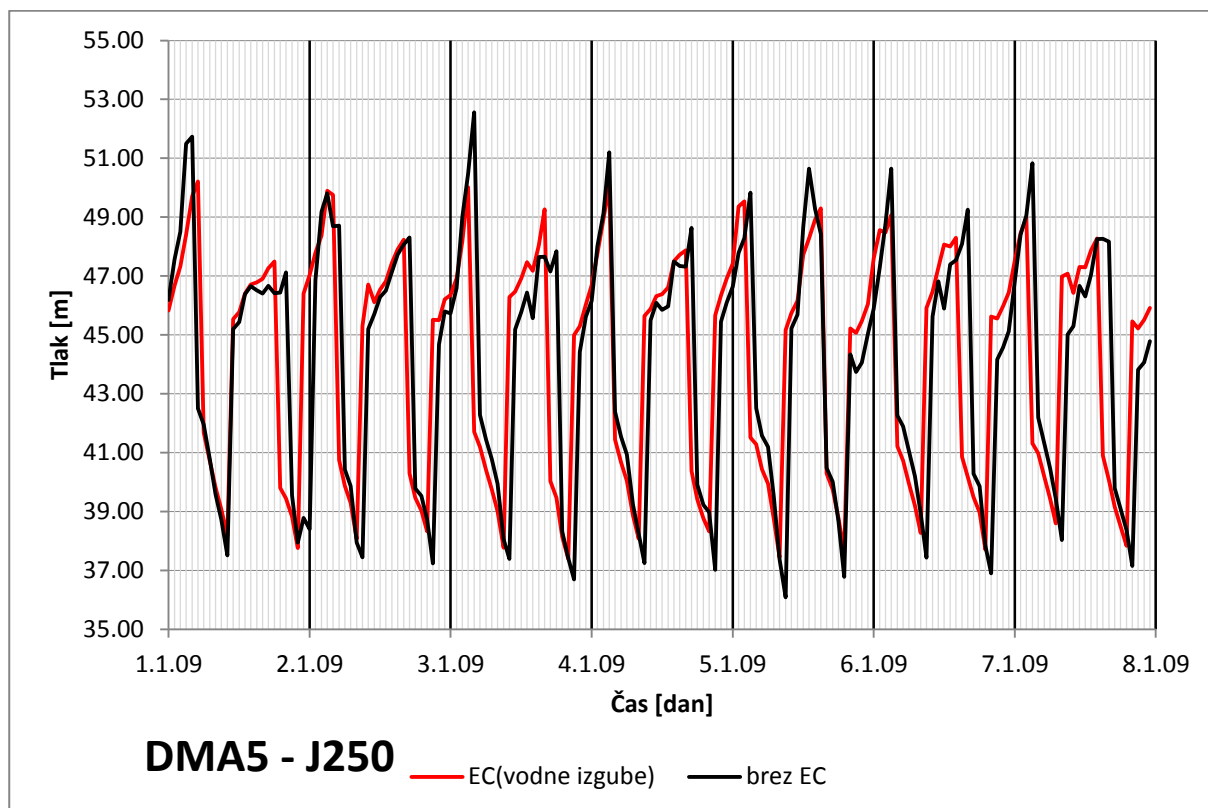
Grafikon 22: Nihanje tlakov v reprezentativnem vozlišču tlačne cone DMA2



Grafikon 23: Nihanje tlakov v reprezentativnem vozlišču tlačne cone DMA3

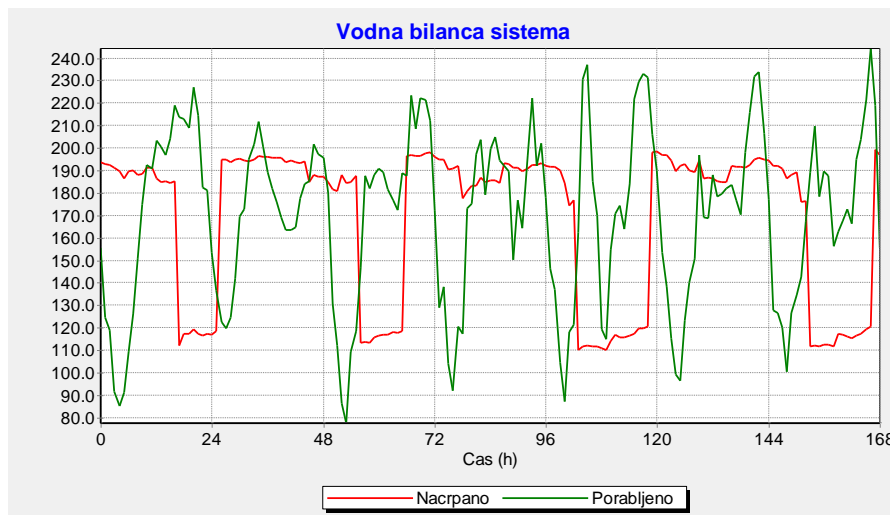


Grafikon 24: Nihanje tlakov v reprezentativnem vozlišču tlačne cone DMA4



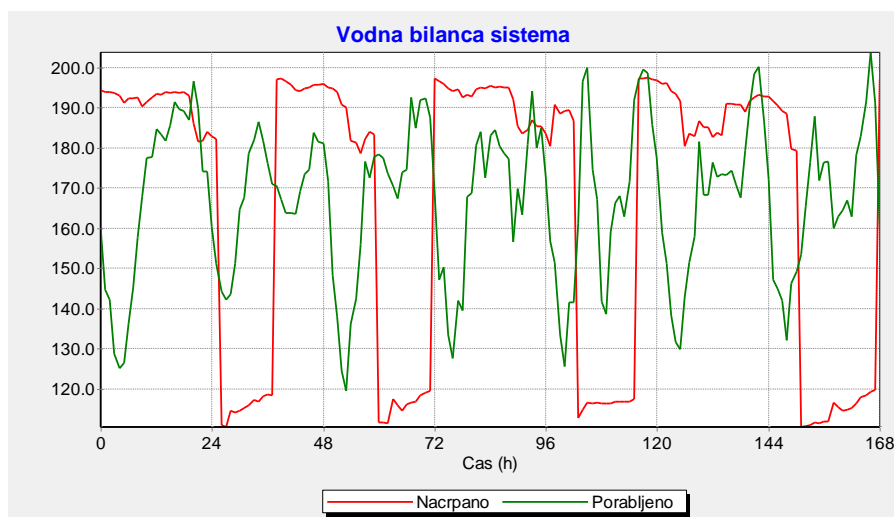
Grafikon 25: Nihanje tlakov v reprezentativnem vozlišču tlačne cone DMA5

Na spodnji sliki je prikazana vodna bilanca izboljšanega hidravličnega modela po končani fazi makrokalibracije (brez upoštevanja vodnih izgub), kjer so se podatki izračunov relativno dobro ujemali s podatki meritev. Načrpana količina vode, ki vstopi v sistem, se ujema z vhodnimi podatki meritev pretokov črpališča S1 – glej sliko 74.



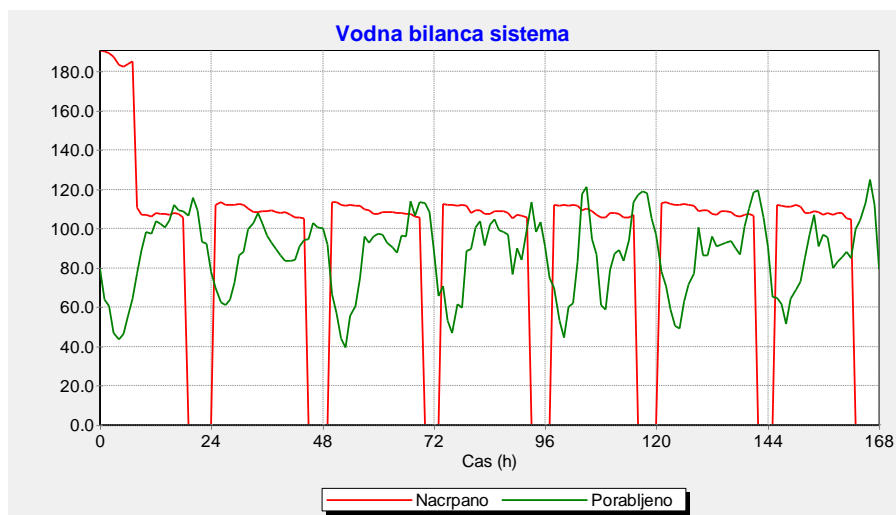
Slika 89: Vodna bilanca sistema izboljšanega hidravličnega modela po končani makrokalibraciji

Pri modeliranju vodnih izgub sistema, pri katerem smo proporcionalno zmanjšali osnovno porabo vozlišč in jo nadomestili s koeficienti vodnih izgub, lahko opazimo, da se delovanje črpališča S1 ni bistveno spremenilo. Velikosti pretokov glede na potrebe sistema ostajajo na ravni 195 in 115 l/s, obenem se časi vklopov/izklopov črpališča niso bistveno spremenili.



Slika 90: Vodna bilanca sistema izboljšanega hidravličnega modela; vpliv vodnih izgub

Če zmanjšani porabi vozlišč zaradi vpliva vodnih izgub iz radovednosti iz modela odstranimo še vpliv koeficientov vodnih izgub (EC), se po pričakovanju vodna bilanca in s tem pretoki črpališča S1 bistveno razlikujejo. Zaradi zmanjšane porabe vozlišč ne pride do vklopa črpalke PU2, saj celotni porabi vodovodnega sistema zadosti le obratovanje črpalke PU1. Iz zgoraj navedenega lahko sklepam, da sem pravilno predvidel, izračunal in apliciral na model vse ključne parametre, s katerimi hidravlično ponazorimo vodne izgube.



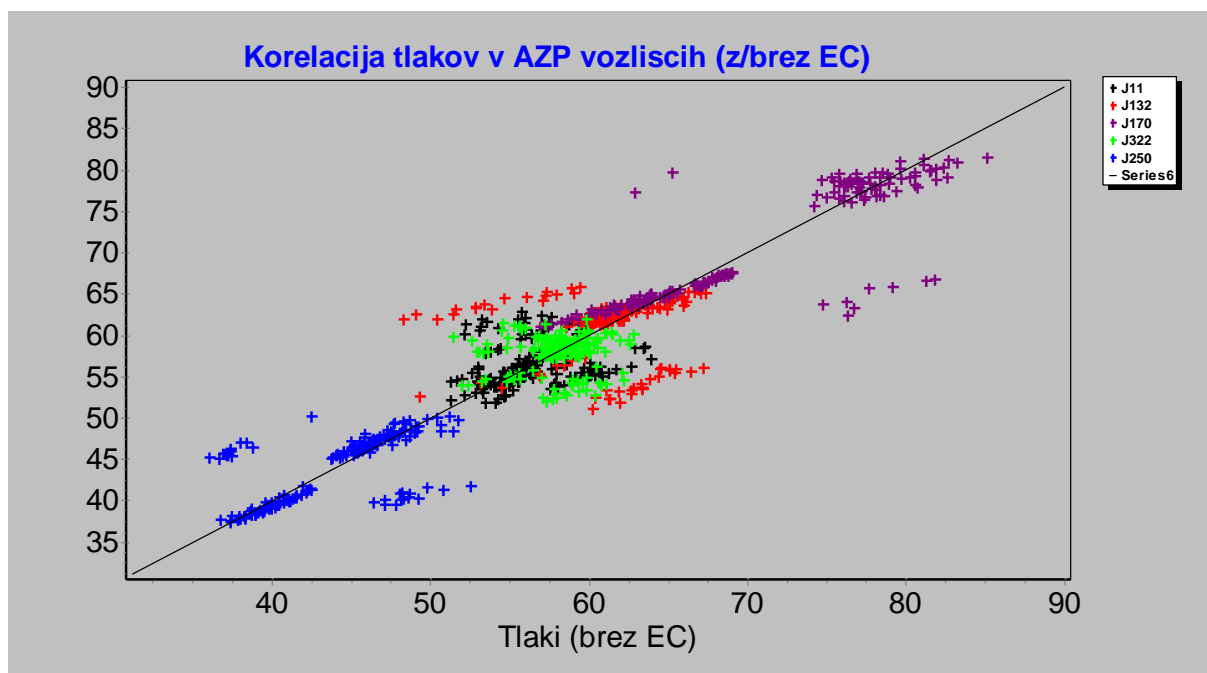
Slika 91: Vodna bilanca sistema izboljšanega hidravličnega modela; vpliv izgub in odstranjeni koeficienti izgub

S pomočjo enačb iz podpoglavja statistike smo izračunali še odstopanja meritev in velikost napake med obema obtežnima primeroma ter izračunali še njuno povezanost (koeficient korelacije). Rezultati so prikazani v spodnji preglednici.

Preglednica 10: Statistični podatki za primer tlakov v reprezentativnih vozliščih

Merilno mesto vozlišče AZP	Koef. korelac. r	Srednja vrednost tlakov AZP-vozlišča brez izgub (brez EC) \bar{y} [m]	Srednja vrednost tlakov AZP-vozlišča z upoštevanjem izgub (EC) \bar{f} [m]	Srednja absolutna napaka MAE [m]	Celotna napaka RMSE [m]
DMA1-J11	0,210	56,32	56,37	2,456	3,279
DMA2-J132	0,684	61,25	61,32	3,145	4,836
DMA3-J170	0,972	70,32	70,32	2,135	3,703
DMA4-J322	0,379	58,07	57,83	2,148	3,022
DMA5-J250	0,963	44,06	44,15	2,014	3,506
Omrežje	1,000	58,01	58,00	2,380	3,723

Izris razsevnega diagrama sem pridobil tako, da sem v model, kjer so bile simulirane vodne izgube, vnesel kalibracijsko datoteko s podatki meritev oziroma simulacij tlakov za obtežni primer, pri katerem se vodne izgube niso upoštevale. Rezultat je podan na spodnji sliki.



Slika 92: Razsevni grafikon in korelacija tlakov v reprezentativnih (AZP) vozliščih z upoštevanjem izgub

Že med samo fazo izvajanja postopka makrokalibracije je hidravlični model izkazoval veliko občutljivost na spremembo tako osnovne porabe vozlišč, kakor tudi C-koeficientov cevi. Najbolj eklatanten primer se je sicer zgodil pri izrednem primeru določevanja C-koeficientov delno priprtih cevi (ventilov) v tlačni coni DMA2, kjer se je že pri rahli spremembi vrednosti C-koeficienta napaka med meritvami in hidravličnimi izračuni skoraj podvojila.

V primeru modeliranja vodnih izgub glede na eksponentno odvisnost med velikostjo tlaka in velikostjo izgub je odstopanje podatkov še toliko bolj razumljivo. Svetli izjemi sta tlačni coni DMA3 in DMA5, kjer se nihanje tlakov presenetljivo dobro ujema. Najslabše jo je po pričakovanju odnesla primarna oziroma oskrbovalna tlačna cona, saj se je vpliv manjših napak, ki imajo izvor v drugih tlačnih conah, izraziteje manifestiral ravno v tlačni coni DMA1. Za obtežni primer modeliranja vpliva vodnih izgub se povprečna velikost napake tlakov, skladno s preglednico 10, za celoten sistem giblje okrog vrednosti 3,7 metra.

6 ZAKLJUČEK

Za posredovani hidravlični model se je izvedel postopek makrokalibracije, s katerim se je pridobil izboljšani hidravlični model. Zaradi velikega števila neznanih vhodnih parametrov je bila naloga kompleksna. Veliko časa in energije je bilo namreč namenjeno dolgotrajnemu postopku "poskus – napaka", kjer se je iterativno in s pomočjo hidravličnih zakonitosti postopno odpravljalo napake v sistemu.

Hidravlični model vodovodnega omrežja je sestavljen iz:

- pet tlačnih con,
- enega vodnega vira,
- sedem vodohranov (od tega se dva nahajata v isti tlačni coni),
- pet črpališč (11 črpalk),
- 429 cevi,
- 388 vozlišč in
- štirih ventilov (trije redukcijski ventili in en ventil za nadzor priprtosti – pretok).

Postopek se je pričel z obdelavo in ovrednotenjem vhodnih podatkov. Za posredovani niz meritev pretokov črpališč in višin vodne gladine posameznih vodohranov za obdobje 168 ur so se zaradi napake in izpada centralnega nadzornega sistema najprej izločili neuporabni podatki. Prav slednji so se kasneje izkazali za pereč problem, saj je izračun masne bilance vodovodnega sistema, s pomočjo katere so se izračunali koeficienti urne porabe, temeljila na predvidenih začetnih vrednosti nihanj gladin vodohranov. Izstopajoče konice koeficientov urne porabe se niso mogle zgladiti z nastavljanjem časov vklopa črpališča, zato se je moralo velikokrat ponastaviti predvidene začetne vrednosti vodnih gladin.

Osnovna poraba vozlišč je bila izračunana s pomočjo podanih vhodnih podatkov predvidene (ne pa tudi točne) mesečne porabe. Pri umerjanju tlačne cone DMA1 oziroma sistema kot celote se je izkazalo, da sem moral nekoliko znižati osnovno porabo vozlišč, saj se skupna poraba, pridobljena na osnovi masne bilance sistema, ni ujemala s porabo, pridobljeno iz vhodnih podatkov predvidene mesečne porabe.

Na podlagi referenčnih vrednosti glede na starost, premer in material sem cevem dodelil začetne vrednosti C-koeficientov po Hazen-Williamsovem modelu izračuna linijskih izgub. Le-te so se med postopkom umerjanja večkrat spreminjale v okviru sprotnega umerjanja sistema s pomočjo meritev na hidrantih in večkratnim posodobljanjem krivulje črpanja posamezne črpalke. Glede na hidravlični upor, ki ga je v danem obtežnem primeru (požarni pretok) dal hidravlični model (osnovna poraba vozlišč v času trajanja meritev na hidrantih, C-koeficienti cevi), se je na podlagi zakona afinitete določila nova točka obratovanja, s pomočjo katere se je posodobila podana in "zastarela" krivulja črpanja nove črpalke. V primeru črpališča S1 smo morali upoštevati še zakonitosti, ki veljajo za primer vzporedne vezave več črpalk.

Vsaka tlačna cona je bila obravnavana posamično. Poleg prilagajanj vrednosti C-koeficientov, osnovne porabe vozlišč in koeficientov urne porabe je bila opažena in odpravljena še vrsta drugih napak. Prelivanje vodohrana T5 je bila posledica nepravilno nastavljenega začetnega statusa črpalk črpališča S4. Zaznana je bila tudi napaka v višini fluktuacije vodohrana. V obratovalnih pravilih je bila namreč nepravilno nastavljena vrednost,

pri kateri pride do vklopa črpalke PU8. V tlačni coni DMA4 so se koeficienti urne porabe določili na podlagi masne bilance dveh vodohranov, zato so neuporabni podatki nihanj vodne gladine za čas trajanja napake še dodatno otežili nalogo. V tlačni coni DMA2 je težavo povzročalo odkrivanje možnih lokacij delno priprtih ventilov, saj je model na podlagi meritev na hidrantih izkazoval "umerjenost" pri sumljivo nizkih vrednosti C-koeficientov cevi. V tlačni coni DMA1 je bila odkrita napačna vrednost v obratovalnih pravilih, pri kateri naj bi prišlo do vklopa črpalke PU2. S spremembo črpalne krivulje črpalke črpališča S1 so se spremenile tlačne razmere na sesalni strani ostalih prečrpališč, zaradi česar je bilo potrebno ponoviti postopek posodabljanja črpalnih krivulj prečrpališč. Navsezadnje je bilo potrebno umeriti sistem kot celoto. Glede na to, da so se ostale tlačne cone oskrbovale iz tlačne cone DMA1, se je napaka, ki je izvirala iz tlačnih con DMA2–DMA5 prenašala v tlačno cono DMA1 v obliki napake nihanja vodohranov T1 oziroma T2. Pri odpravljanju posamične napake sem moral upoštevati tudi možnost kompenzacije napak, to je s spreminjanjem neznanih veličin sem lahko sicer odpravil določeno nedoslednost, obenem sem lahko s tem v hidravlični model vnesel dodatna odstopanja.

V poglavju 5 sem na podlagi postopka, s katerim se opredeli minimalni nočni pretok, to je pretok v nočnem času, ko je poraba s strani porabnikov minimalna, izračunal delež vodnih izgub sistema. Na podlagi določenih predvidevanj le-te predstavljajo približno 33 odstotkov celotne načrpane količine vode, ki vstopi v sistem.

Vodne izgube lahko v programu Epanet ponazorimo kot tlačno odvisen iztok iz sistema. Z večanjem tlaka se količina vodnih izgub povečuje. Izgube so največje ravno v nočnem času, ko je poraba minimalna, saj so zaradi manjših pretokov po ceveh takrat tlaki največji. Pred samim izračunom koeficientov vodnih izgub je bilo potrebno določiti reprezentativno vozlišče po posamezni tlačni coni, v katerem se je za obdobje 168 ur izračunalo vrednost povprečnega tlaka. S pomočjo utežne funkcije sem izračunal vrednost povprečne geodetske višine in nato izbral vozlišče, ki leži približno na sredini tlačne cone, katere geodetska višina se ujema z vrednostjo povprečja geodetske višine z utežjo. Utežno funkcijo se uporabi, kadar hočemo, da bi nekateri elementi imeli več vpliva na končni rezultat, zato sem za utež privzel povprečno dnevno porabo posameznega vozlišča. Na podlagi znanih vrednosti povprečnih tlakov in vrednosti izgub sem ob predvidevanju eksponenta vodnih izgub izračunal koeficient izgub, ki sem ga nato razpršil čez vsa vozlišča tlačne cone.

Glede na stopnjo natančnosti, ki jo je hidravlični model izkazoval pred samim pričetkom simulacije izgub oziroma tlačno odvisnega iztoka iz sistema, lahko potrdimo dobro povezanost tlakov izračunanih z upoštevanjem vodnih izgub in brez njih.

S pričujočo diplomsko nalogo sem dobil širok vpogled v zakonitosti hidravličnih modelov vodovodnih sistemov in spoznal kompleksnost postopka njihovega umerjanja.

7 VIRI

- Andoljšek, A., 2012. *Sodobne tehnologije in metode lociranja okvar na vodovodih*. Ribnica, Andotehna d.o.o.: 9 str.
http://www.ekomunala.si/media/ANDOLJ%C5%A0EK_rec_lek%20final.pdf (Pridobljeno 2. 8. 2016).
- Benjamin, M., 2015. *Pumps and pumping stations - PowerPoint prezentacija*. University of Washington.
<http://faculty.washington.edu/markbenj/CEE481/Pumps.ppt> (pridobljeno 6. 7. 2015).
- Bentley System Inc., 2004. *SCADA / Model Integration: The Rule for Success*.
ftp://ftp2.bentley.com/dist/collateral/whitepaper/integration_whitepaper.pdf (Pridobljeno 12. 12. 2015).
- Ductile Iron Pipe Research Association, 2016. *Cement-Mortar Linings for Ductile Iron Pipe*. Golden Colorado, Ductile Iron Pipe Research Association: 11 str. <http://www.dipra.org/ductile-iron-pipe-resources/technical-publications> (Pridobljeno 21. 5. 2016).
- Fallis, P., Hübschen, K., Oertlé, E., Ziegler, D., 2011. *Guidelines for water loss reduction: A focus on pressure management*. Eschborn, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: 223 str. <https://www.giz.de/fachexpertise/downloads/giz2011-en-guideline-water-loss-reduction.pdf> (Pridobljeno 2. 8. 2016).
- Farley, M. et al., 2008. *The Manager's Non-Revenue Water Handbook*. Ranhill Utilities Berhad: 110 str.
<http://www.allianceforwaterefficiency.org/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=2624> (Pridobljeno 6. 8. 2016).
- Fluide Design, 2016. Affinity Laws.
http://www.pumpfundamentals.com/yahoo/affinity_laws.pdf (Pridobljeno: 12. 6. 2016).
- Franchini, M., Lanza, L., 2014. Use of Torricelli's Equation for Describing Leakages in Pipes of Different Elastic Materials, Diameters and Orifice Shape and Dimensions. *Procedia Engineering* 89, 2014: 290-297.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023054> (Pridobljeno 29. 7. 2016).
- Genić, S., Arandjelović, I., Kolendić, P., et al., 2011. A Review of Explicit Approximations of Colebrook's Equation. *FME Transactions* 39, 2: 67-71.
http://www.mas.bg.ac.rs/_media/istrazivanje/fme/vol39/2/04_mjaric.pdf (Pridobljeno 12. 1. 2016).
- Ghimire, S.R., 2008. *The effect of demand, tank parameters, and pumping stations on energy use in municipal drinking water distribution systems*. Doktorska disertacija. Michigan, Michigan Technological University (Samozaložba S. R. Ghimire): 155 str.
<http://digitalcommons.mtu.edu/etds/732> (Pridobljeno: 4. 5. 2016).
- Grundfos, 2004. *Pump Handbook*. Bjerringbro, Grundfos Management: 160 str.
http://net.grundfos.com/doc/webnet/mining/_downloads/pump-handbook.pdf (Pridobljeno 25. 6. 2016).

Jecl, A., 2014. *Načrtovanje učinkovitega izpiranja vodovodnega sistema*. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Jecl): 85 str.

Kiijärvi, J., 2011. Darcy Friction Factor Formulae in Turbulent Pipe Flow. *Lunowa Fluid Mechanics Paper 110272*: 11 str.

http://www.kolumbus.fi/jukka.kiijarvi/clunowa/fluid_mechanics/pdf_articles/darcy_friction_factor.pdf (Pridobljeno 13. 1. 2016).

Kovačič, G., 2014. *Regresija in korelacija*. Gradivo pri predmetu Kvantitativne metode v geografiji in uvod v GIS. Koper, Univerza na Primorskem, Fakulteta za humanistične študije: 21 str. http://studentski.net/gradivo/upr_fhs_ge1_kmg_sno_regresija_in_korelacija_01?r=1 (Pridobljeno: 21. 7. 2016).

Kozelj, D., 2014. *Večkriterijska optimizacija umerjanja hidravličnih modelov vodooskrbnih sistemov*. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba D. Kozelj): 200 str.

Lambert, A., Hirner, W., 2000. *Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures*. International Water Association: 13 str. <http://www.joat.co.za/IWA%20Blue%20Pages.pdf> (Pridobljeno: 6. 8. 2016).

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*. Highett, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation: 6 str. <http://www.urbanwateralliance.org.au/publications/ieee-leak%20detection-pipe-networks.pdf> (Pridobljeno 26. 7. 2016).

Mckenzie, R., 1999. *Development of a standardised approach to evaluate burst and background losses in water distribution systems in South Africa*. South African Water Research Commission: 63 str. http://www.wrc.org.za/Other%20Documents/Software/sanflow/User%20Guide%20-%20TT109_99.pdf (Pridobljeno 1. 8. 2016).

Mecanica de Fluidos, 2016. <http://mecanicadefluidos.vacau.com/Tema3-1.html> (Pridobljeno: 5. 3. 2016).

Ostfeld, A., Salomons, E., Ormsbee, L., et al., 2012. The Battle of Water Calibration Networks (BWCN). *Journal Of Water Resources Planning and Management* 138, 5: 523-532. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000191.

PipeFlow, 2016a. <http://www.pipeflow.com/pipe-pressure-drop-calculations/pipe-elevation-changes> (Pridobljeno 17. 8. 2016).

PipeFlow, 2016b. *Hazen - Williams Formula*.

http://www.pipeflow.com/public/documents/Hazen_Williams_Formula.pdf (Pridobljeno 18. 8. 2016).

Renaud, E. et al., 2012. *Comparative study of different methods to assess average pressures in water distribution zones*. Waterloss 2012. Manille, Hal Archives Ouvertes: 9 str. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00779645/document> (Pridobljeno 3. 8. 2016).

Rossman, L.A., 2000. *Epanet 2 User Manual*. Cincinnati, U.S. Environmental Protection Agency: 200 str.

Stanski, H.R., Wilson, L.J., Burrows, W.R., 1989. *Survey of Common Verification Methods in Meteorology*. Druga izdaja. Downsview Canada, Atmospheric Environment Service: 81 str. http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/Stanski_et_al/Stanski_et_al.html (Pridobljeno 1. 8. 2016).

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

Šantl, S., 2007. *Makrokalibracija pri hidravličnem modeliranju vodooskrbnih sistemov*. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba S. Šantl): 109 str.

Townley Brothers, 2016. <http://www.townleybrothers.co.uk/default.asp?contentID=628> (Pridobljeno: 8. 5. 2016).

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

van Zyl, J.E., 2014. Theoretical Modeling of Pressure and Leakage in Water Distribution Systems. *Procedia Engineering* 89, 2014: 273-277. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023029> (Pridobljeno 29. 7. 2016).

Walski, T.M., 1990. Sherlock Holmes Meets Hardy-Cross or Model Calibration in Austin, Texas. *American Water Works Association-AWWA Journal* 82, 3: 34-38. <http://www.awwa.org/publications/journal-awwa/table-of-contents/articleid/12399/issueid/33512095.aspx?getfile=\\pers75appocr\personify\serverfiles\dcdfiles\12399\waternet.0026654.pdf> (Pridobljeno 14. 3. 2016).

Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A., et al., 2003. *Advanced Water Distribution Modelling and Management*. Prva izdaja. Waterbury, Haestad Methods: 800 str.

Walski, T., Hartell, W., Wu, Z., 2010. Developing system head curves for closed system. *American Water Works Association-AWWA Journal* 102, 9: 84-89. <http://www.awwa.org/publications/journal-awwa/table-of-contents/articleid/25246/issueid/33569886.aspx?getfile=\\pers75appocr\personify\serverfiles\dcdfiles\25246\waternet.0072575.pdf> (Pridobljeno 13. 2. 2016).

White, F.M., 2003. *Fluid Mechanics*. Četrty ponatis. New York, Mc Graw-Hill inc.: 826 str.

Wikimedia Commons, 2016. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HGL_and_EGL.png (Pridobljeno 29. 7. 2016).

Yi Wu, Z., Farley, M., Turtle, D., et al., 2011. *Water Loss Reduction*. Exton, Bentley Institute Press: 57 str. <http://viewer.zmags.com/publication/d0afcceeb#/d0afcceeb/1> (Pridobljeno: 2. 9. 2015).

8 PRILOGE

PRILOGA 1: IZRAČUN MASNE BILANCE IN KOEFICIENTOV URNE PORABE SISTEMA

Opomba:

- z rdečo barvo so označena časovna obdobja Δt , v katerih je prišlo do napake v centralnem nadzornem sistemu (predvidene vrednosti nihanja vodne gladine vodohrana),
- z modro barvo so označena časovna obdobja Δt , v katerih so se časi vklopa črpalke t_v ročno nastavljali.

Preglednica P.1: Izračun masne bilance in koeficientov urne porabe za tlačno cono DMA5

Dan	Ura	T5 [m]	S4 [l/s]	$Q_{por,t}$ [m ³ /h]	ΔV_{rez} [m ³ /h]	$Q_{erp,t}$ [m ³ /h]	$k_{por,t}$ [l]
1.1.2009	0:00	1,00	35	63,8213	-62,1787	126,00	0,85519
1.1.2009	1:00	1,56	35	52,0283	-72,1717	124,20	0,69717
1.1.2009	2:00	2,21	34	47,5870	-76,6130	124,20	0,63765
1.1.2009	3:00	2,90	35	31,6216	-94,3784	126,00	0,42372
1.1.2009	4:00	3,75	35	37,6560	-79,9440	117,60	0,50458
1.1.2009	5:00	4,47	0	39,9720	39,9720	0,00	0,53561
1.1.2009	6:00	4,11	0	44,4134	44,4134	0,00	0,59513
1.1.2009	7:00	3,71	0	61,0684	61,0684	0,00	0,81830
1.1.2009	8:00	3,16	0	72,1717	72,1717	0,00	0,96708
1.1.2009	9:00	2,51	0	75,5027	75,5027	0,00	1,01172
1.1.2009	10:00	1,83	0	83,4937	12,2137	71,28	1,11879
1.1.2009	11:00	1,72	36	89,6280	-39,9720	129,60	1,20099
1.1.2009	12:00	2,08	36	91,8486	-37,7514	129,60	1,23075
1.1.2009	13:00	2,42	36	82,2763	-45,5237	127,80	1,10248
1.1.2009	14:00	2,83	35	83,3866	-44,4134	127,80	1,11736
1.1.2009	15:00	3,23	36	91,8486	-37,7514	129,60	1,23075
1.1.2009	16:00	3,57	36	97,8210	-29,9790	127,80	1,31078
1.1.2009	17:00	3,84	35	95,3313	-28,8687	124,20	1,27742
1.1.2009	18:00	4,10	34	96,8623	-25,5377	122,40	1,29793
1.1.2009	19:00	4,33	34	99,9863	-12,2137	112,20	1,33979
1.1.2009	20:00	4,44	0	87,7164	87,7164	0,00	1,17538
1.1.2009	21:00	3,65	0	85,4957	85,4957	0,00	1,14562
1.1.2009	22:00	2,88	0	96,5990	96,5990	0,00	1,29440
1.1.2009	23:00	2,01	0	71,5017	38,8617	32,64	0,95810
2.1.2009	0:00	1,66	34	66,8833	-55,5167	122,40	0,89622
2.1.2009	1:00	2,16	34	59,8006	-64,3994	124,20	0,80131
2.1.2009	2:00	2,74	35	51,6076	-74,3924	126,00	0,69153
2.1.2009	3:00	3,41	35	50,9180	-73,2820	124,20	0,68229
2.1.2009	4:00	4,07	34	59,4196	-34,4204	93,84	0,79621
2.1.2009	5:00	4,38	0	65,5097	65,5097	0,00	0,87781
2.1.2009	6:00	3,79	0	74,3924	74,3924	0,00	0,99684
2.1.2009	7:00	3,12	0	72,1717	72,1717	0,00	0,96708
2.1.2009	8:00	2,47	0	91,0474	91,0474	0,00	1,22001
2.1.2009	9:00	1,65	0	86,3657	-14,4343	100,80	1,15728
2.1.2009	10:00	1,78	35	83,8073	-42,1927	126,00	1,12300
2.1.2009	11:00	2,16	35	80,8970	-43,3030	124,20	1,08400
2.1.2009	12:00	2,55	34	76,8763	-45,5237	122,40	1,03012
2.1.2009	13:00	2,96	34	79,0970	-43,3030	122,40	1,05988
2.1.2009	14:00	3,35	34	74,6556	-47,7444	122,40	1,00037

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.1

2.1.2009	15:00	3,78	34	71,3246	-51,0754	122,40	0,95573
2.1.2009	16:00	4,24	34	72,5103	1,1103	71,40	0,97162
2.1.2009	17:00	4,23	0	74,3924	74,3924	0,00	0,99684
2.1.2009	18:00	3,56	0	79,9440	79,9440	0,00	1,07123
2.1.2009	19:00	2,84	0	72,1717	72,1717	0,00	0,96708
2.1.2009	20:00	2,19	0	74,3924	74,3924	0,00	0,99684
2.1.2009	21:00	1,52	0	86,4790	-36,6410	123,12	1,15880
2.1.2009	22:00	1,85	36	97,8210	-29,9790	127,80	1,31078
2.1.2009	23:00	2,12	35	83,8073	-42,1927	126,00	1,12300
3.1.2009	0:00	2,50	35	90,4693	-35,5307	126,00	1,21227
3.1.2009	1:00	2,82	35	82,6970	-43,3030	126,00	1,10812
3.1.2009	2:00	3,21	35	55,3593	-68,8407	124,20	0,74180
3.1.2009	3:00	3,83	34	44,2890	-69,9510	114,24	0,59346
3.1.2009	4:00	4,46	0	36,6410	36,6410	0,00	0,49098
3.1.2009	5:00	4,13	0	37,7514	37,7514	0,00	0,50586
3.1.2009	6:00	3,79	0	49,9650	49,9650	0,00	0,66952
3.1.2009	7:00	3,34	0	54,4064	54,4064	0,00	0,72903
3.1.2009	8:00	2,85	0	61,0684	61,0684	0,00	0,81830
3.1.2009	9:00	2,30	0	83,2750	83,2750	0,00	1,11586
3.1.2009	10:00	1,55	0	81,7073	-42,1927	123,90	1,09486
3.1.2009	11:00	1,93	35	88,2486	-37,7514	126,00	1,18251
3.1.2009	12:00	2,27	35	82,0073	-42,1927	124,20	1,09888
3.1.2009	13:00	2,65	34	75,7660	-46,6340	122,40	1,01524
3.1.2009	14:00	3,07	34	96,8623	-25,5377	122,40	1,29793
3.1.2009	15:00	3,30	34	64,6626	-57,7374	122,40	0,86646
3.1.2009	16:00	3,82	34	71,3246	-51,0754	122,40	0,95573
3.1.2009	17:00	4,28	34	84,2083	-5,5517	89,76	1,12837
3.1.2009	18:00	4,33	0	79,9440	79,9440	0,00	1,07123
3.1.2009	19:00	3,61	0	99,9300	99,9300	0,00	1,33904
3.1.2009	20:00	2,71	0	99,9300	99,9300	0,00	1,33904
3.1.2009	21:00	1,81	0	97,4447	15,5447	81,90	1,30573
3.1.2009	22:00	1,67	35	95,3313	-28,8687	124,20	1,27742
3.1.2009	23:00	1,93	34	79,0970	-43,3030	122,40	1,05988
4.1.2009	0:00	2,32	34	76,8763	-45,5237	122,40	1,03012
4.1.2009	1:00	2,73	34	56,0490	-69,9510	126,00	0,75104
4.1.2009	2:00	3,36	36	61,1800	-66,6200	127,80	0,81980
4.1.2009	3:00	3,96	35	43,5453	-48,8547	92,40	0,58350
4.1.2009	4:00	4,40	0	42,1927	42,1927	0,00	0,56537
4.1.2009	5:00	4,02	0	53,2960	53,2960	0,00	0,71415
4.1.2009	6:00	3,54	0	55,5167	55,5167	0,00	0,74391
4.1.2009	7:00	3,04	0	76,6130	76,6130	0,00	1,02660
4.1.2009	8:00	2,35	0	81,0544	81,0544	0,00	1,08611
4.1.2009	9:00	1,62	0	84,7437	-21,0963	105,84	1,13554
4.1.2009	10:00	1,81	36	87,4073	-42,1927	129,60	1,17124
4.1.2009	11:00	2,19	36	84,0763	-45,5237	129,60	1,12660
4.1.2009	12:00	2,60	36	92,9590	-36,6410	129,60	1,24563

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.1

4.1.2009	13:00	2,93	36	95,6003	-32,1997	127,80	1,28102
4.1.2009	14:00	3,22	35	76,0350	-49,9650	126,00	1,01885
4.1.2009	15:00	3,67	35	80,4763	-45,5237	126,00	1,07836
4.1.2009	16:00	4,08	35	86,4486	-37,7514	124,20	1,15839
4.1.2009	17:00	4,42	34	71,4754	51,0754	20,40	0,95775
4.1.2009	18:00	3,96	0	82,1647	82,1647	0,00	1,10099
4.1.2009	19:00	3,22	0	81,0544	81,0544	0,00	1,08611
4.1.2009	20:00	2,49	0	73,2820	73,2820	0,00	0,98196
4.1.2009	21:00	1,83	0	92,2550	16,6550	75,60	1,23619
4.1.2009	22:00	1,68	35	83,8073	-42,1927	126,00	1,12300
4.1.2009	23:00	2,06	35	78,2556	-47,7444	126,00	1,04861
5.1.2009	0:00	2,49	35	76,0350	-49,9650	126,00	1,01885
5.1.2009	1:00	2,94	35	65,3523	-58,8477	124,20	0,87570
5.1.2009	2:00	3,47	34	64,6626	-57,7374	122,40	0,86646
5.1.2009	3:00	3,99	34	50,5370	-43,3030	93,84	0,67718
5.1.2009	4:00	4,38	0	37,7514	37,7514	0,00	0,50586
5.1.2009	5:00	4,04	0	52,1857	52,1857	0,00	0,69927
5.1.2009	6:00	3,57	0	49,9650	49,9650	0,00	0,66952
5.1.2009	7:00	3,12	0	73,2820	73,2820	0,00	0,98196
5.1.2009	8:00	2,46	0	94,3784	94,3784	0,00	1,26465
5.1.2009	9:00	1,61	0	99,9243	-18,8757	118,80	1,33896
5.1.2009	10:00	1,78	36	90,7383	-38,8617	129,60	1,21587
5.1.2009	11:00	2,13	36	87,8280	-39,9720	127,80	1,17687
5.1.2009	12:00	2,49	35	51,1870	-76,6130	127,80	0,68589
5.1.2009	13:00	3,18	36	47,4353	-82,1647	129,60	0,63562
5.1.2009	14:00	3,92	36	68,6833	-55,5167	124,20	0,92034
5.1.2009	15:00	4,42	33	68,7477	58,8477	9,90	0,92120
5.1.2009	16:00	3,89	0	73,2820	73,2820	0,00	0,98196
5.1.2009	17:00	3,23	0	69,9510	69,9510	0,00	0,93733
5.1.2009	18:00	2,60	0	81,0544	81,0544	0,00	1,08611
5.1.2009	19:00	1,87	0	96,9377	25,5377	71,40	1,29894
5.1.2009	20:00	1,64	34	93,1107	-31,0893	124,20	1,24766
5.1.2009	21:00	1,92	35	108,6553	-15,5447	124,20	1,45595
5.1.2009	22:00	2,06	34	103,1037	-21,0963	124,20	1,38156
5.1.2009	23:00	2,25	35	93,1107	-31,0893	124,20	1,24766
6.1.2009	0:00	2,53	34	82,4280	-39,9720	122,40	1,10451
6.1.2009	1:00	2,89	34	66,1936	-54,4064	120,60	0,88698
6.1.2009	2:00	3,38	33	51,3386	-71,0614	122,40	0,68792
6.1.2009	3:00	4,02	35	48,3486	-37,7514	86,10	0,64786
6.1.2009	4:00	4,36	0	44,4134	44,4134	0,00	0,59513
6.1.2009	5:00	3,96	0	43,3030	43,3030	0,00	0,58025
6.1.2009	6:00	3,57	0	53,2960	53,2960	0,00	0,71415
6.1.2009	7:00	3,09	0	61,0684	61,0684	0,00	0,81830
6.1.2009	8:00	2,54	0	73,2820	73,2820	0,00	0,98196
6.1.2009	9:00	1,88	0	85,8963	21,0963	64,80	1,15099
6.1.2009	10:00	1,69	36	82,2763	-45,5237	127,80	1,10248

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.1

6.1.2009	11:00	2,10	35	70,0626	-57,7374	127,80	0,93882
6.1.2009	12:00	2,62	36	91,1590	-36,6410	127,80	1,22151
6.1.2009	13:00	2,95	35	72,7040	-53,2960	126,00	0,97421
6.1.2009	14:00	3,43	35	77,1453	-48,8547	126,00	1,03373
6.1.2009	15:00	3,87	35	74,5040	-53,2960	127,80	0,99833
6.1.2009	16:00	4,35	36	75,5210	36,6410	38,88	1,01196
6.1.2009	17:00	4,02	0	76,6130	76,6130	0,00	1,02660
6.1.2009	18:00	3,33	0	72,1717	72,1717	0,00	0,96708
6.1.2009	19:00	2,68	0	92,1577	92,1577	0,00	1,23489
6.1.2009	20:00	1,85	0	93,3653	17,7653	75,60	1,25107
6.1.2009	21:00	1,69	36	104,4830	-23,3170	127,80	1,40005
6.1.2009	22:00	1,90	35	99,3520	-26,6480	126,00	1,33129
6.1.2009	23:00	2,14	35	93,8003	-32,1997	126,00	1,25690
7.1.2009	0:00	2,43	35	70,9040	-53,2960	124,20	0,95010
7.1.2009	1:00	2,91	34	55,7800	-66,6200	122,40	0,74744
7.1.2009	2:00	3,51	34	53,8283	-72,1717	126,00	0,72129
7.1.2009	3:00	4,16	36	51,5367	-11,1033	62,64	0,69058
7.1.2009	4:00	4,26	0	43,3030	43,3030	0,00	0,58025
7.1.2009	5:00	3,87	0	54,4064	54,4064	0,00	0,72903
7.1.2009	6:00	3,38	0	61,0684	61,0684	0,00	0,81830
7.1.2009	7:00	2,83	0	69,9510	69,9510	0,00	0,93733
7.1.2009	8:00	2,20	0	81,9827	75,5027	6,48	1,09855
7.1.2009	9:00	1,52	36	90,7383	-38,8617	129,60	1,21587
7.1.2009	10:00	1,87	36	90,0486	-37,7514	127,80	1,20663
7.1.2009	11:00	2,21	35	73,8143	-52,1857	126,00	0,98909
7.1.2009	12:00	2,68	35	84,9176	-41,0824	126,00	1,13787
7.1.2009	13:00	3,05	35	78,2556	-47,7444	126,00	1,04861
7.1.2009	14:00	3,48	35	66,4626	-57,7374	124,20	0,89058
7.1.2009	15:00	4,00	34	66,1936	-54,4064	120,60	0,88698
7.1.2009	16:00	4,49	33	73,6704	67,7304	5,94	0,98716
7.1.2009	17:00	3,88	0	82,1647	82,1647	0,00	1,10099
7.1.2009	18:00	3,14	0	81,0544	81,0544	0,00	1,08611
7.1.2009	19:00	2,41	0	81,0544	81,0544	0,00	1,08611
7.1.2009	20:00	1,68	0	87,8380	-6,6620	94,50	1,17701
7.1.2009	21:00	1,74	35	105,3243	-18,8757	124,20	1,41132
7.1.2009	22:00	1,91	34	100,8830	-23,3170	124,20	1,35181
7.1.2009	23:00	2,12	35	94,9107	-31,0893	126,00	1,27178

Opomba:

- z rdečo barvo so označena časovna obdobja Δt , v katerih je prišlo do napake v centralnem nadzornem sistemu (predvidene vrednosti nihanja vodne gladine vodohrana),
- z modro barvo so označena časovna obdobja Δt , v katerih so se časi vklopa črpalke t_v ročno nastavljali.

Preglednica P.2: Izračun masne bilance in koeficientov urne porabe za tlačno cono DMA4

Dan	Ura	T6 [m]	T7 [m]	S5 [l/s]	$Q_{por,t}$ [m ³ /h]	ΔV_{rez} T6 [m ³ /h]	ΔV_{rez} T7 [m ³ /h]	$Q_{\text{črp},t}$ [m ³ /h]	$k_{por,t}$ [l]
1.1.2009	0:00	5,20	2,50	30	74,2113	-14,1695	-19,6192	108,00	0,83225
1.1.2009	1:00	5,46	2,99	30	63,7824	-2,1799	-38,4377	104,40	0,71530
1.1.2009	2:00	5,50	3,95	28	61,8344	2,1799	-26,0255	85,68	0,69345
1.1.2009	3:00	5,46	4,60	0	46,2787	11,4446	34,8342	0,00	0,51900
1.1.2009	4:00	5,25	3,73	0	46,7125	13,0795	33,6330	0,00	0,52386
1.1.2009	5:00	5,01	2,89	0	47,9824	-5,4498	-8,0079	61,44	0,53811
1.1.2009	6:00	5,11	3,09	32	59,6028	-20,1642	-33,6330	113,40	0,66842
1.1.2009	7:00	5,48	3,93	31	62,6571	2,1799	-23,2228	83,70	0,70268
1.1.2009	8:00	5,44	4,51	0	83,1371	19,0743	64,0629	0,00	0,93235
1.1.2009	9:00	5,09	2,91	0	95,0892	-4,3598	9,2090	90,24	1,06639
1.1.2009	10:00	5,17	2,68	32	98,6411	-10,3546	-4,4043	113,40	1,10622
1.1.2009	11:00	5,36	2,79	31	105,9723	-7,6297	2,0020	111,60	1,18844
1.1.2009	12:00	5,50	2,74	31	110,3988	0,0000	-1,2012	111,60	1,23808
1.1.2009	13:00	5,50	2,77	31	108,5988	0,0000	-1,2012	109,80	1,21790
1.1.2009	14:00	5,50	2,80	30	100,7929	0,0000	-7,2071	108,00	1,13036
1.1.2009	15:00	5,50	2,98	30	98,1886	0,0000	-11,6114	109,80	1,10115
1.1.2009	16:00	5,50	3,27	31	118,8071	0,0000	7,2071	111,60	1,33238
1.1.2009	17:00	5,50	3,09	31	119,4094	0,0000	9,6094	109,80	1,33913
1.1.2009	18:00	5,50	2,85	30	111,2031	0,0000	3,2031	108,00	1,24710
1.1.2009	19:00	5,50	2,77	30	119,2075	0,0000	7,6075	111,60	1,33687
1.1.2009	20:00	5,50	2,58	32	116,6031	0,0000	3,2031	113,40	1,30766
1.1.2009	21:00	5,50	2,50	31	98,7874	0,0000	-12,8126	111,60	1,10787
1.1.2009	22:00	5,50	2,82	31	100,3890	0,0000	-11,2110	111,60	1,12583
1.1.2009	23:00	5,50	3,10	31	88,1823	0,0000	-18,0177	106,20	0,98893
2.1.2009	0:00	5,50	3,55	28	73,9737	0,0000	-26,8263	100,80	0,82959
2.1.2009	1:00	5,50	4,22	28	66,4454	3,8149	-9,6094	72,24	0,74516
2.1.2009	2:00	5,43	4,46	0	63,7069	15,2594	48,4475	0,00	0,71445
2.1.2009	3:00	5,15	3,25	0	62,1795	4,3598	20,0196	37,80	0,69732
2.1.2009	4:00	5,07	2,75	30	61,7862	-17,9843	-30,0295	109,80	0,69291
2.1.2009	5:00	5,40	3,50	31	76,9215	-5,4498	-29,2287	111,60	0,86265
2.1.2009	6:00	5,50	4,23	31	91,5804	0,0000	-20,0196	111,60	1,02704
2.1.2009	7:00	5,50	4,73	31	102,4228	16,3494	54,4534	31,62	1,14864
2.1.2009	8:00	5,20	3,37	0	108,6851	5,4498	36,0354	67,20	1,21887
2.1.2009	9:00	5,10	2,47	32	103,4253	-8,1747	0,0000	111,60	1,15988
2.1.2009	10:00	5,25	2,47	30	107,2103	-5,9948	5,2051	108,00	1,20233
2.1.2009	11:00	5,36	2,34	30	112,1930	-3,8149	8,0079	108,00	1,25820
2.1.2009	12:00	5,43	2,14	30	108,1891	-3,8149	4,0039	108,00	1,21330
2.1.2009	13:00	5,50	2,04	30	88,9831	0,0000	-17,2169	106,20	0,99791
2.1.2009	14:00	5,50	2,47	29	83,9800	0,0000	-20,4200	104,40	0,94181

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.2

2.1.2009	15:00	5,50	2,98	29	81,9780	0,0000	-22,4220	104,40	0,91935
2.1.2009	16:00	5,50	3,54	29	86,3788	0,0000	-21,6212	108,00	0,96871
2.1.2009	17:00	5,50	4,08	31	84,5753	0,0000	-25,2247	109,80	0,94848
2.1.2009	18:00	5,50	4,71	30	83,2008	16,3494	52,4515	14,40	0,93307
2.1.2009	19:00	5,20	3,40	0	85,5731	4,9048	28,8283	51,84	0,95967
2.1.2009	20:00	5,11	2,68	32	91,5083	-13,0795	-12,4122	117,00	1,02623
2.1.2009	21:00	5,35	2,99	33	114,1212	-7,0847	6,0059	115,20	1,27983
2.1.2009	22:00	5,48	2,84	31	102,9026	-1,0900	-7,6075	111,60	1,15402
2.1.2009	23:00	5,50	3,03	31	115,0051	0,0000	5,2051	109,80	1,28974
3.1.2009	0:00	5,50	2,90	30	103,1953	0,0000	-4,8047	108,00	1,15730
3.1.2009	1:00	5,50	3,02	30	94,3866	0,0000	-13,6134	108,00	1,05851
3.1.2009	2:00	5,50	3,36	30	75,3698	0,0000	-30,8302	106,20	0,84524
3.1.2009	3:00	5,50	4,13	29	58,7423	5,4498	-7,6075	60,90	0,65877
3.1.2009	4:00	5,40	4,32	0	47,2241	11,9895	35,2346	0,00	0,52960
3.1.2009	5:00	5,18	3,44	0	37,6147	11,9895	25,6251	0,00	0,42184
3.1.2009	6:00	4,96	2,80	0	60,5120	-10,3546	-13,6134	84,48	0,67862
3.1.2009	7:00	5,15	3,14	32	61,0931	-19,0743	-33,2326	113,40	0,68514
3.1.2009	8:00	5,50	3,97	31	78,7678	0,0000	-32,8322	111,60	0,88335
3.1.2009	9:00	5,50	4,79	31	102,6530	21,7992	75,2739	5,58	1,15122
3.1.2009	10:00	5,10	2,91	0	88,2569	5,4498	7,2071	75,60	0,98977
3.1.2009	11:00	5,00	2,73	30	98,7798	-13,6245	4,4043	108,00	1,10778
3.1.2009	12:00	5,25	2,62	30	99,5806	-13,6245	5,2051	108,00	1,11676
3.1.2009	13:00	5,50	2,49	30	103,9961	0,0000	-4,0039	108,00	1,16628
3.1.2009	14:00	5,50	2,59	30	98,5925	0,0000	-7,6075	106,20	1,10568
3.1.2009	15:00	5,50	2,78	29	93,9898	0,0000	-10,4102	104,40	1,05406
3.1.2009	16:00	5,50	3,04	29	82,7788	0,0000	-21,6212	104,40	0,92833
3.1.2009	17:00	5,50	3,58	29	99,1914	0,0000	-8,8086	108,00	1,11240
3.1.2009	18:00	5,50	3,80	31	96,7855	0,0000	-14,8145	111,60	1,08541
3.1.2009	19:00	5,50	4,17	31	117,6059	0,0000	6,0059	111,60	1,31891
3.1.2009	20:00	5,50	4,02	31	106,9937	0,0000	-6,4063	113,40	1,19990
3.1.2009	21:00	5,50	4,18	32	127,2153	0,0000	15,6153	111,60	1,42667
3.1.2009	22:00	5,50	3,79	30	107,0008	0,0000	0,8008	106,20	1,19998
3.1.2009	23:00	5,50	3,77	29	95,9918	0,0000	-8,4082	104,40	1,07651
4.1.2009	0:00	5,50	3,98	29	92,9906	0,0000	-9,6094	102,60	1,04286
4.1.2009	1:00	5,50	4,22	28	69,9377	4,9048	-7,2071	72,24	0,78433
4.1.2009	2:00	5,41	4,40	0	76,8421	17,9843	58,8577	0,00	0,86176
4.1.2009	3:00	5,08	2,93	0	60,5675	-5,4498	-2,8027	68,82	0,67924
4.1.2009	4:00	5,18	3,00	31	48,3175	-17,4393	-44,0432	109,80	0,54186
4.1.2009	5:00	5,50	4,10	30	60,1861	5,9948	-8,8086	63,00	0,67497
4.1.2009	6:00	5,39	4,32	0	67,4551	15,8044	51,6507	0,00	0,75648
4.1.2009	7:00	5,10	3,03	0	82,7588	-3,2699	8,8086	77,22	0,92811
4.1.2009	8:00	5,16	2,81	33	95,3103	-13,0795	-10,4102	118,80	1,06887
4.1.2009	9:00	5,40	3,07	33	103,5459	-5,4498	-4,4043	113,40	1,16123
4.1.2009	10:00	5,50	3,18	30	101,9941	0,0000	-6,0059	108,00	1,14383
4.1.2009	11:00	5,50	3,33	30	88,3808	0,0000	-19,6192	108,00	0,99116
4.1.2009	12:00	5,50	3,82	30	101,5937	0,0000	-6,4063	108,00	1,13934

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.2

4.1.2009	13:00	5,50	3,98	30	101,1933	0,0000	-6,8067	108,00	1,13485
4.1.2009	14:00	5,50	4,15	30	108,8008	0,0000	0,8008	108,00	1,22016
4.1.2009	15:00	5,50	4,13	30	101,5937	0,0000	-6,4063	108,00	1,13934
4.1.2009	16:00	5,50	4,29	30	94,1882	0,0000	-12,0118	106,20	1,05629
4.1.2009	17:00	5,50	4,59	29	82,1687	12,5345	34,8342	34,80	0,92149
4.1.2009	18:00	5,27	3,72	0	86,4636	10,8996	44,8440	30,72	0,96966
4.1.2009	19:00	5,07	2,60	32	89,1633	-13,6245	-12,4122	115,20	0,99994
4.1.2009	20:00	5,32	2,91	32	101,3864	-9,8096	-4,0039	115,20	1,13701
4.1.2009	21:00	5,50	3,01	32	109,5980	0,0000	-2,0020	111,60	1,22910
4.1.2009	22:00	5,50	3,06	30	107,5996	0,0000	-0,4004	108,00	1,20669
4.1.2009	23:00	5,50	3,07	30	109,2012	0,0000	1,2012	108,00	1,22465
5.1.2009	0:00	5,50	3,04	30	101,5937	0,0000	-6,4063	108,00	1,13934
5.1.2009	1:00	5,50	3,20	30	83,3776	0,0000	-22,8224	106,20	0,93505
5.1.2009	2:00	5,50	3,77	29	69,3674	0,0000	-33,2326	102,60	0,77793
5.1.2009	3:00	5,50	4,60	28	57,8075	10,8996	28,4279	18,48	0,64829
5.1.2009	4:00	5,30	3,89	0	45,3667	12,5345	32,8322	0,00	0,50877
5.1.2009	5:00	5,07	3,07	0	65,8402	-2,7249	5,2051	63,36	0,73837
5.1.2009	6:00	5,12	2,94	32	61,8570	-20,7092	-34,4338	117,00	0,69370
5.1.2009	7:00	5,50	3,80	33	90,5741	0,0000	-26,4259	117,00	1,01576
5.1.2009	8:00	5,50	4,46	32	118,0027	0,0000	2,8027	115,20	1,32336
5.1.2009	9:00	5,50	4,39	32	118,4067	0,0000	6,8067	111,60	1,32789
5.1.2009	10:00	5,50	4,22	30	102,7949	0,0000	-5,2051	108,00	1,15281
5.1.2009	11:00	5,50	4,35	30	95,3894	0,0000	-10,8106	106,20	1,06976
5.1.2009	12:00	5,50	4,62	29	55,4187	13,6245	34,8342	6,96	0,62150
5.1.2009	13:00	5,25	3,75	0	61,6716	13,6245	48,0471	0,00	0,69163
5.1.2009	14:00	5,00	2,55	0	77,7610	-13,6245	-14,8145	106,20	0,87206
5.1.2009	15:00	5,25	2,92	30	87,1649	-13,6245	-10,8106	111,60	0,97752
5.1.2009	16:00	5,50	3,19	32	92,9800	0,0000	-20,4200	113,40	1,04274
5.1.2009	17:00	5,50	3,70	31	97,9866	0,0000	-13,6134	111,60	1,09889
5.1.2009	18:00	5,50	4,04	31	100,3890	0,0000	-11,2110	111,60	1,12583
5.1.2009	19:00	5,50	4,32	31	106,7988	0,0000	-1,2012	108,00	1,19771
5.1.2009	20:00	5,50	4,35	29	107,2027	0,0000	2,8027	104,40	1,20224
5.1.2009	21:00	5,50	4,28	29	114,8102	0,0000	10,4102	104,40	1,28756
5.1.2009	22:00	5,50	4,02	29	122,0173	0,0000	17,6173	104,40	1,36838
5.1.2009	23:00	5,50	3,58	29	97,9937	0,0000	-6,4063	104,40	1,09896
6.1.2009	0:00	5,50	3,74	29	93,5894	0,0000	-10,8106	104,40	1,04957
6.1.2009	1:00	5,50	4,01	29	81,7796	0,0000	-20,8204	102,60	0,91713
6.1.2009	2:00	5,50	4,53	28	71,8047	10,8996	25,6251	35,28	0,80526
6.1.2009	3:00	5,30	3,89	0	62,1054	15,2594	46,8460	0,00	0,69649
6.1.2009	4:00	5,02	2,72	0	52,0631	-12,5345	-22,8224	87,42	0,58387
6.1.2009	5:00	5,25	3,29	31	49,7300	-13,6245	-46,4456	109,80	0,55770
6.1.2009	6:00	5,50	4,45	30	64,9746	10,3546	20,4200	34,20	0,72867
6.1.2009	7:00	5,31	3,94	0	75,2405	17,9843	57,2562	0,00	0,84380
6.1.2009	8:00	4,98	2,51	0	74,9090	-16,3494	-22,0216	113,28	0,84008
6.1.2009	9:00	5,28	3,06	32	90,4014	-11,9895	-9,2090	111,60	1,01382
6.1.2009	10:00	5,50	3,29	30	90,9851	0,0000	-15,2149	106,20	1,02037

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.2

6.1.2009	11:00	5,50	3,67	29	82,5768	0,0000	-23,6232	106,20	0,92607
6.1.2009	12:00	5,50	4,26	30	98,3906	0,0000	-9,6094	108,00	1,10342
6.1.2009	13:00	5,50	4,50	30	103,9961	0,0000	-4,0039	108,00	1,16628
6.1.2009	14:00	5,50	4,60	30	103,9961	0,0000	-4,0039	108,00	1,16628
6.1.2009	15:00	5,50	4,70	30	96,1608	14,7144	47,2464	34,20	1,07841
6.1.2009	16:00	5,23	3,52	0	94,8155	6,5397	36,4357	51,84	1,06332
6.1.2009	17:00	5,11	2,61	32	90,9095	-13,0795	-11,2110	115,20	1,01952
6.1.2009	18:00	5,35	2,89	32	89,4080	-8,1747	-17,6173	115,20	1,00268
6.1.2009	19:00	5,50	3,33	32	107,9929	0,0000	-7,2071	115,20	1,21110
6.1.2009	20:00	5,50	3,51	32	112,8012	0,0000	1,2012	111,60	1,26503
6.1.2009	21:00	5,50	3,48	30	114,4063	0,0000	6,4063	108,00	1,28303
6.1.2009	22:00	5,50	3,32	30	119,2110	0,0000	11,2110	108,00	1,33691
6.1.2009	23:00	5,50	3,04	30	114,2079	0,0000	8,0079	106,20	1,28080
7.1.2009	0:00	5,50	2,84	29	82,7788	0,0000	-21,6212	104,40	0,92833
7.1.2009	1:00	5,50	3,38	29	67,9643	0,0000	-36,4357	104,40	0,76219
7.1.2009	2:00	5,50	4,29	29	67,7079	7,0847	3,2031	57,42	0,75932
7.1.2009	3:00	5,37	4,21	0	65,8535	15,8044	50,0491	0,00	0,73852
7.1.2009	4:00	5,08	2,96	0	54,2774	-4,3598	-2,8027	61,44	0,60870
7.1.2009	5:00	5,16	3,03	32	61,4397	-18,5293	-31,6310	111,60	0,68902
7.1.2009	6:00	5,50	3,82	30	65,5485	2,1799	-32,0314	95,40	0,73510
7.1.2009	7:00	5,46	4,62	0	68,6563	15,8044	52,8519	0,00	0,76996
7.1.2009	8:00	5,17	3,30	0	93,4500	2,7249	25,6251	65,10	1,04801
7.1.2009	9:00	5,12	2,66	31	105,8277	-8,1747	2,4024	111,60	1,18682
7.1.2009	10:00	5,27	2,60	31	103,8257	-8,1747	0,4004	111,60	1,16437
7.1.2009	11:00	5,42	2,59	31	100,6355	-4,3598	-4,8047	109,80	1,12859
7.1.2009	12:00	5,50	2,71	30	94,3866	0,0000	-13,6134	108,00	1,05851
7.1.2009	13:00	5,50	3,05	30	91,9843	0,0000	-16,0157	108,00	1,03157
7.1.2009	14:00	5,50	3,45	30	91,3855	0,0000	-14,8145	106,20	1,02486
7.1.2009	15:00	5,50	3,82	29	87,5835	0,0000	-16,8165	104,40	0,98222
7.1.2009	16:00	5,50	4,24	29	91,5839	0,0000	-16,4161	108,00	1,02708
7.1.2009	17:00	5,50	4,65	31	92,7519	14,1695	43,2424	35,34	1,04018
7.1.2009	18:00	5,24	3,57	0	90,7724	8,1747	38,4377	44,16	1,01798
7.1.2009	19:00	5,09	2,61	32	102,5876	-9,8096	-2,8027	115,20	1,15048
7.1.2009	20:00	5,27	2,68	32	113,3573	-5,4498	7,2071	111,60	1,27126
7.1.2009	21:00	5,37	2,50	30	106,9545	-5,4498	4,4043	108,00	1,19946
7.1.2009	22:00	5,47	2,39	30	132,6353	3,8149	20,8204	108,00	1,48746
7.1.2009	23:00	5,40	1,87	30	106,4874	10,8996	-12,4122	108,00	1,19422

Opomba:

- z rdečo barvo so označena časovna obdobja Δt , v katerih je prišlo do napake v centralnem nadzornem sistemu (predvidene vrednosti nihanja vodne gladine vodohrana),
- z modro barvo so označena časovna obdobja Δt , v katerih so se časi vklopa črpalke t_v ročno nastavljali.

Preglednica P.3: Izračun masne bilance in koeficientov urne porabe za tlačno cono DMA3

Dan	Ura	T3 [m]	S2 [l/s]	$Q_{por,t}$ [m ³ /h]	ΔV_{rez} [m ³ /h]	$Q_{\text{črp},t}$ [m ³ /h]	$k_{por,t}$ [l]
1.1.2009	0:00	3,00	33	43,2906	-75,5094	118,80	0,84075
1.1.2009	1:00	3,51	33	37,0488	-79,9512	117,00	0,71953
1.1.2009	2:00	4,05	32	33,7683	-81,4317	115,20	0,65582
1.1.2009	3:00	4,60	32	27,8460	-87,3540	115,20	0,54080
1.1.2009	4:00	5,19	32	25,1223	5,9223	19,20	0,48790
1.1.2009	5:00	5,15	0	31,0921	31,0921	0,00	0,60384
1.1.2009	6:00	4,94	0	34,0533	34,0533	0,00	0,66135
1.1.2009	7:00	4,71	0	39,9756	39,9756	0,00	0,77637
1.1.2009	8:00	4,44	0	47,3785	47,3785	0,00	0,92014
1.1.2009	9:00	4,12	0	57,7425	57,7425	0,00	1,12142
1.1.2009	10:00	3,73	0	63,6648	63,6648	0,00	1,23644
1.1.2009	11:00	3,30	0	57,2504	26,6504	30,60	1,11187
1.1.2009	12:00	3,12	34	55,7740	-66,6260	122,40	1,08319
1.1.2009	13:00	3,57	34	58,4158	-62,1842	120,60	1,13450
1.1.2009	14:00	3,99	33	56,6158	-62,1842	118,80	1,09954
1.1.2009	15:00	4,41	33	62,5381	-56,2619	118,80	1,21456
1.1.2009	16:00	4,79	33	61,0575	-57,7425	118,80	1,18581
1.1.2009	17:00	5,18	33	67,7310	28,1310	39,60	1,31541
1.1.2009	18:00	4,99	0	69,5871	69,5871	0,00	1,35146
1.1.2009	19:00	4,52	0	63,6648	63,6648	0,00	1,23644
1.1.2009	20:00	4,09	0	60,7037	60,7037	0,00	1,17893
1.1.2009	21:00	3,68	0	63,6648	63,6648	0,00	1,23644
1.1.2009	22:00	3,25	0	52,9835	8,8835	44,10	1,02900
1.1.2009	23:00	3,19	35	60,5352	-63,6648	124,20	1,17566
2.1.2009	0:00	3,62	34	38,8488	-79,9512	118,80	0,75449
2.1.2009	1:00	4,16	32	35,2488	-79,9512	115,20	0,68457
2.1.2009	2:00	4,70	32	35,2488	-79,9512	115,20	0,68457
2.1.2009	3:00	5,24	32	33,7287	22,2087	11,52	0,65505
2.1.2009	4:00	5,09	0	37,0144	37,0144	0,00	0,71886
2.1.2009	5:00	4,84	0	41,4562	41,4562	0,00	0,80512
2.1.2009	6:00	4,56	0	47,3785	47,3785	0,00	0,92014

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.3

2.1.2009	7:00	4,24	0	56,2619	56,2619	0,00	1,09267
2.1.2009	8:00	3,86	0	65,1454	65,1454	0,00	1,26520
2.1.2009	9:00	3,42	0	64,3442	62,1842	2,16	1,24964
2.1.2009	10:00	3,00	36	62,6546	-65,1454	127,80	1,21682
2.1.2009	11:00	3,44	35	53,4517	-72,5483	126,00	1,03809
2.1.2009	12:00	3,93	35	56,4129	-69,5871	126,00	1,09560
2.1.2009	13:00	4,40	35	53,1323	-71,0677	124,20	1,03189
2.1.2009	14:00	4,88	34	46,6592	-53,3008	99,96	0,90617
2.1.2009	15:00	5,24	0	50,3396	50,3396	0,00	0,97765
2.1.2009	16:00	4,90	0	54,7813	54,7813	0,00	1,06392
2.1.2009	17:00	4,53	0	53,3008	53,3008	0,00	1,03516
2.1.2009	18:00	4,17	0	54,7813	54,7813	0,00	1,06392
2.1.2009	19:00	3,80	0	57,7425	57,7425	0,00	1,12142
2.1.2009	20:00	3,41	0	61,2631	59,2231	2,04	1,18980
2.1.2009	21:00	3,01	34	54,6129	-69,5871	124,20	1,06064
2.1.2009	22:00	3,48	35	56,0935	-68,1065	124,20	1,08940
2.1.2009	23:00	3,94	34	61,3769	-59,2231	120,60	1,19201
3.1.2009	0:00	4,34	33	58,0963	-60,7037	118,80	1,12830
3.1.2009	1:00	4,75	33	55,9769	-59,2231	115,20	1,08713
3.1.2009	2:00	5,15	31	40,8829	7,4029	33,48	0,79399
3.1.2009	3:00	5,10	0	32,5727	32,5727	0,00	0,63260
3.1.2009	4:00	4,88	0	26,6504	26,6504	0,00	0,51758
3.1.2009	5:00	4,70	0	25,1698	25,1698	0,00	0,48883
3.1.2009	6:00	4,53	0	35,5338	35,5338	0,00	0,69011
3.1.2009	7:00	4,29	0	35,5338	35,5338	0,00	0,69011
3.1.2009	8:00	4,05	0	42,9367	42,9367	0,00	0,83388
3.1.2009	9:00	3,76	0	59,2231	59,2231	0,00	1,15018
3.1.2009	10:00	3,36	0	48,8590	48,8590	0,00	0,94890
3.1.2009	11:00	3,03	0	52,1740	-66,6260	118,80	1,01328
3.1.2009	12:00	3,48	36	58,5323	-71,0677	129,60	1,13676
3.1.2009	13:00	3,96	36	64,1352	-63,6648	127,80	1,24558
3.1.2009	14:00	4,39	35	54,6129	-69,5871	124,20	1,06064
3.1.2009	15:00	4,86	34	47,4163	-60,7037	108,12	0,92088
3.1.2009	16:00	5,27	0	59,2231	59,2231	0,00	1,15018
3.1.2009	17:00	4,87	0	59,2231	59,2231	0,00	1,15018
3.1.2009	18:00	4,47	0	56,2619	56,2619	0,00	1,09267
3.1.2009	19:00	4,09	0	69,5871	69,5871	0,00	1,35146
3.1.2009	20:00	3,62	0	62,1842	62,1842	0,00	1,20769
3.1.2009	21:00	3,20	0	68,1971	-7,4029	75,60	1,32446

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.3

3.1.2009	22:00	3,25	36	64,1352	-63,6648	127,80	1,24558
3.1.2009	23:00	3,68	35	56,4129	-69,5871	126,00	1,09560
4.1.2009	0:00	4,15	35	48,3712	-74,0288	122,40	0,93942
4.1.2009	1:00	4,65	33	38,8488	-79,9512	118,80	0,75449
4.1.2009	2:00	5,19	33	36,5858	14,8058	21,78	0,71054
4.1.2009	3:00	5,09	0	34,0533	34,0533	0,00	0,66135
4.1.2009	4:00	4,86	0	31,0921	31,0921	0,00	0,60384
4.1.2009	5:00	4,65	0	34,0533	34,0533	0,00	0,66135
4.1.2009	6:00	4,42	0	34,0533	34,0533	0,00	0,66135
4.1.2009	7:00	4,19	0	56,2619	56,2619	0,00	1,09267
4.1.2009	8:00	3,81	0	51,8202	51,8202	0,00	1,00641
4.1.2009	9:00	3,46	0	59,2231	59,2231	0,00	1,15018
4.1.2009	10:00	3,06	0	51,6215	-47,3785	99,00	1,00255
4.1.2009	11:00	3,38	33	52,1740	-66,6260	118,80	1,01328
4.1.2009	12:00	3,83	33	58,0963	-60,7037	118,80	1,12830
4.1.2009	13:00	4,24	33	65,4992	-53,3008	118,80	1,27207
4.1.2009	14:00	4,60	33	61,6963	-60,7037	122,40	1,19821
4.1.2009	15:00	5,01	35	65,7496	-26,6504	92,40	1,27693
4.1.2009	16:00	5,19	0	65,1454	65,1454	0,00	1,26520
4.1.2009	17:00	4,75	0	50,3396	50,3396	0,00	0,97765
4.1.2009	18:00	4,41	0	57,7425	57,7425	0,00	1,12142
4.1.2009	19:00	4,02	0	51,8202	51,8202	0,00	1,00641
4.1.2009	20:00	3,67	0	57,7425	57,7425	0,00	1,12142
4.1.2009	21:00	3,28	0	65,9663	16,2863	49,68	1,28114
4.1.2009	22:00	3,17	36	56,7323	-71,0677	127,80	1,10181
4.1.2009	23:00	3,65	35	54,9323	-71,0677	126,00	1,06685
5.1.2009	0:00	4,13	35	50,1712	-74,0288	124,20	0,97438
5.1.2009	1:00	4,63	34	45,0906	-75,5094	120,60	0,87571
5.1.2009	2:00	5,14	33	38,1017	4,4417	33,66	0,73998
5.1.2009	3:00	5,11	0	31,0921	31,0921	0,00	0,60384
5.1.2009	4:00	4,90	0	28,1310	28,1310	0,00	0,54633
5.1.2009	5:00	4,71	0	37,0144	37,0144	0,00	0,71886
5.1.2009	6:00	4,46	0	34,0533	34,0533	0,00	0,66135
5.1.2009	7:00	4,23	0	51,8202	51,8202	0,00	1,00641
5.1.2009	8:00	3,88	0	75,5094	75,5094	0,00	1,46648
5.1.2009	9:00	3,37	0	74,6556	39,9756	34,68	1,44989
5.1.2009	10:00	3,10	34	55,1352	-63,6648	118,80	1,07079
5.1.2009	11:00	3,53	32	42,3323	-71,0677	113,40	0,82214
5.1.2009	12:00	4,01	31	45,2935	-68,1065	113,40	0,87965

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.3

5.1.2009	13:00	4,47	32	35,8877	-82,9123	118,80	0,69698
5.1.2009	14:00	5,03	34	54,9160	-10,3640	65,28	1,06653
5.1.2009	15:00	5,10	0	56,2619	56,2619	0,00	1,09267
5.1.2009	16:00	4,72	0	48,8590	48,8590	0,00	0,94890
5.1.2009	17:00	4,39	0	44,4173	44,4173	0,00	0,86263
5.1.2009	18:00	4,09	0	51,8202	51,8202	0,00	1,00641
5.1.2009	19:00	3,74	0	69,5871	69,5871	0,00	1,35146
5.1.2009	20:00	3,27	0	72,3246	11,8446	60,48	1,40463
5.1.2009	21:00	3,19	36	70,0575	-57,7425	127,80	1,36060
5.1.2009	22:00	3,58	35	60,8546	-65,1454	126,00	1,18186
5.1.2009	23:00	4,02	35	63,8158	-62,1842	126,00	1,23937
6.1.2009	0:00	4,44	35	60,5352	-63,6648	124,20	1,17566
6.1.2009	1:00	4,87	34	48,3375	-57,7425	106,08	0,93877
6.1.2009	2:00	5,26	0	41,4562	41,4562	0,00	0,80512
6.1.2009	3:00	4,98	0	32,5727	32,5727	0,00	0,63260
6.1.2009	4:00	4,76	0	28,1310	28,1310	0,00	0,54633
6.1.2009	5:00	4,57	0	32,5727	32,5727	0,00	0,63260
6.1.2009	6:00	4,35	0	37,0144	37,0144	0,00	0,71886
6.1.2009	7:00	4,10	0	47,3785	47,3785	0,00	0,92014
6.1.2009	8:00	3,78	0	44,4173	44,4173	0,00	0,86263
6.1.2009	9:00	3,48	0	60,7037	60,7037	0,00	1,17893
6.1.2009	10:00	3,07	0	51,1221	-45,8979	97,02	0,99285
6.1.2009	11:00	3,38	33	47,7323	-71,0677	118,80	0,92701
6.1.2009	12:00	3,86	33	53,6546	-65,1454	118,80	1,04203
6.1.2009	13:00	4,30	33	54,8158	-62,1842	117,00	1,06458
6.1.2009	14:00	4,72	32	53,0158	-62,1842	115,20	1,02963
6.1.2009	15:00	5,14	32	50,6840	10,3640	40,32	0,98434
6.1.2009	16:00	5,07	0	56,2619	56,2619	0,00	1,09267
6.1.2009	17:00	4,69	0	59,2231	59,2231	0,00	1,15018
6.1.2009	18:00	4,29	0	50,3396	50,3396	0,00	0,97765
6.1.2009	19:00	3,95	0	62,1842	62,1842	0,00	1,20769
6.1.2009	20:00	3,53	0	71,0677	71,0677	0,00	1,38021
6.1.2009	21:00	3,05	0	69,2615	-47,3785	116,64	1,34514
6.1.2009	22:00	3,37	36	67,0963	-60,7037	127,80	1,30309
6.1.2009	23:00	3,78	35	59,3740	-66,6260	126,00	1,15311
7.1.2009	0:00	4,23	35	54,6129	-69,5871	124,20	1,06064
7.1.2009	1:00	4,70	34	42,1294	-78,4706	120,60	0,81820
7.1.2009	2:00	5,23	33	40,5104	26,6504	13,86	0,78676
7.1.2009	3:00	5,05	0	39,9756	39,9756	0,00	0,77637

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.3

7.1.2009	4:00	4,78	0	29,6115	29,6115	0,00	0,57509
7.1.2009	5:00	4,58	0	39,9756	39,9756	0,00	0,77637
7.1.2009	6:00	4,31	0	45,8979	45,8979	0,00	0,89139
7.1.2009	7:00	4,00	0	47,3785	47,3785	0,00	0,92014
7.1.2009	8:00	3,68	0	51,8202	51,8202	0,00	1,00641
7.1.2009	9:00	3,33	0	51,3367	42,9367	8,40	0,99702
7.1.2009	10:00	3,04	35	66,4575	-57,7425	124,20	1,29068
7.1.2009	11:00	3,43	34	58,4158	-62,1842	120,60	1,13450
7.1.2009	12:00	3,85	33	50,3740	-66,6260	117,00	0,97832
7.1.2009	13:00	4,30	32	51,5352	-63,6648	115,20	1,00087
7.1.2009	14:00	4,73	32	48,8935	-68,1065	117,00	0,94957
7.1.2009	15:00	5,19	33	49,4292	23,6892	25,74	0,95997
7.1.2009	16:00	5,03	0	60,7037	60,7037	0,00	1,17893
7.1.2009	17:00	4,62	0	48,8590	48,8590	0,00	0,94890
7.1.2009	18:00	4,29	0	48,8590	48,8590	0,00	0,94890
7.1.2009	19:00	3,96	0	56,2619	56,2619	0,00	1,09267
7.1.2009	20:00	3,58	0	57,7425	57,7425	0,00	1,12142
7.1.2009	21:00	3,19	0	72,5171	-7,4029	79,92	1,40836
7.1.2009	22:00	3,24	36	67,0963	-60,7037	127,80	1,30309
7.1.2009	23:00	3,65	35	57,8935	-68,1065	126,00	1,12436

Opomba:

- z rdečo barvo so označena časovna obdobja Δt , v katerih je prišlo do napake v centralnem nadzornem sistemu (predvidene vrednosti nihanja vodne gladine vodohrana),
- z modro barvo so označena časovna obdobja Δt , v katerih so se časi vklopa črpalke t_v ročno nastavljali.

Preglednica P.4: Izračun masne bilance in koeficientov urne porabe za tlačno cono DMA2

Dan	Ura	T4 [m]	S3 [l/s]	$Q_{pgr,t}$ [m ³ /h]	ΔV_{gez} [m ³ /h]	$Q_{\text{exp},t}$ [m ³ /h]	$k_{por,t}$ [l]
1.1.2009	0:00	2,50	49	146,9325	-27,6675	174,60	0,98668
1.1.2009	1:00	2,76	48	108,2162	-62,7838	171,00	0,72669
1.1.2009	2:00	3,35	47	104,2879	-64,9121	169,20	0,70031
1.1.2009	3:00	3,96	47	83,0043	-29,7957	112,80	0,55739
1.1.2009	4:00	4,24	0	76,6176	76,6176	0,00	0,51450
1.1.2009	5:00	3,52	0	74,8116	28,7316	46,08	0,50237
1.1.2009	6:00	3,25	48	99,0466	-75,5534	174,60	0,66511
1.1.2009	7:00	3,96	49	106,5630	-40,4370	147,00	0,71559
1.1.2009	8:00	4,34	0	120,2470	120,2470	0,00	0,80748
1.1.2009	9:00	3,21	0	137,2304	-12,7696	150,00	0,92153
1.1.2009	10:00	3,33	50	163,7097	-18,0903	181,80	1,09934
1.1.2009	11:00	3,50	51	172,8793	-5,3207	178,20	1,16091
1.1.2009	12:00	3,55	48	158,9663	-13,8337	172,80	1,06749
1.1.2009	13:00	3,68	48	189,8261	17,0261	172,80	1,27471
1.1.2009	14:00	3,52	48	161,0945	-11,7055	172,80	1,08178
1.1.2009	15:00	3,63	48	194,4109	23,4109	171,00	1,30550
1.1.2009	16:00	3,41	47	184,0979	14,8979	169,20	1,23625
1.1.2009	17:00	3,27	47	195,1468	22,3468	172,80	1,31044
1.1.2009	18:00	3,06	49	185,9772	9,5772	176,40	1,24887
1.1.2009	19:00	2,97	49	189,9055	11,7055	178,20	1,27525
1.1.2009	20:00	2,86	50	194,8979	14,8979	180,00	1,30877
1.1.2009	21:00	2,72	50	205,5392	25,5392	180,00	1,38023
1.1.2009	22:00	2,48	50	163,3021	-14,8979	178,20	1,09660
1.1.2009	23:00	2,62	49	164,6945	-11,7055	176,40	1,10595
2.1.2009	0:00	2,73	49	143,7401	-30,8599	174,60	0,96524
2.1.2009	1:00	3,02	48	101,5031	-71,2969	172,80	0,68161
2.1.2009	2:00	3,69	48	111,4086	-59,5914	171,00	0,74813
2.1.2009	3:00	4,25	47	102,1046	37,2446	64,86	0,68565
2.1.2009	4:00	3,90	0	102,2113	90,4513	11,76	0,68637
2.1.2009	5:00	3,05	49	113,6162	-62,7838	176,40	0,76295
2.1.2009	6:00	3,64	49	137,0271	-39,3729	176,40	0,92016
2.1.2009	7:00	4,01	49	149,4684	-28,7316	178,20	1,00371
2.1.2009	8:00	4,28	50	164,0380	-15,9620	180,00	1,10154
2.1.2009	9:00	4,43	50	185,3207	5,3207	180,00	1,24446
2.1.2009	10:00	4,38	50	185,3207	5,3207	180,00	1,24446
2.1.2009	11:00	4,33	50	188,8413	10,6413	178,20	1,26810
2.1.2009	12:00	4,23	49	157,2456	-19,1544	176,40	1,05593
2.1.2009	13:00	4,41	49	174,2717	-2,1283	176,40	1,17026
2.1.2009	14:00	4,43	49	168,3372	9,5772	158,76	1,13041

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.4

2.1.2009	15:00	4,34	0	145,5938	142,5938	3,00	0,97769
2.1.2009	16:00	3,00	50	151,2684	-28,7316	180,00	1,01579
2.1.2009	17:00	3,27	50	147,0119	-32,9881	180,00	0,98721
2.1.2009	18:00	3,58	50	139,5630	-40,4370	180,00	0,93719
2.1.2009	19:00	3,96	50	143,8195	-36,1805	180,00	0,96577
2.1.2009	20:00	4,30	50	164,6945	-11,7055	176,40	1,10595
2.1.2009	21:00	4,41	48	155,6956	60,6556	95,04	1,04552
2.1.2009	22:00	3,84	0	180,4830	88,3230	92,16	1,21197
2.1.2009	23:00	3,01	48	173,8641	1,0641	172,80	1,16753
3.1.2009	0:00	3,00	48	164,2869	-8,5131	172,80	1,10321
3.1.2009	1:00	3,08	48	173,4565	4,2565	169,20	1,16479
3.1.2009	2:00	3,04	46	115,5858	-50,0142	165,60	0,77618
3.1.2009	3:00	3,51	46	87,5900	-79,8100	167,40	0,58818
3.1.2009	4:00	4,26	47	94,6557	29,7957	64,86	0,63563
3.1.2009	5:00	3,98	0	67,0404	67,0404	0,00	0,45019
3.1.2009	6:00	3,35	0	98,9504	-12,7696	111,72	0,66447
3.1.2009	7:00	3,47	49	110,4238	-65,9762	176,40	0,74151
3.1.2009	8:00	4,09	49	124,4008	-25,5392	149,94	0,83537
3.1.2009	9:00	4,33	0	145,4014	139,4014	6,00	0,97639
3.1.2009	10:00	3,02	50	164,7739	-17,0261	181,80	1,10648
3.1.2009	11:00	3,18	51	177,5435	-4,2565	181,80	1,19223
3.1.2009	12:00	3,22	50	166,1663	-13,8337	180,00	1,11583
3.1.2009	13:00	3,35	50	158,7173	-21,2827	180,00	1,06581
3.1.2009	14:00	3,55	50	169,6869	-8,5131	178,20	1,13948
3.1.2009	15:00	3,63	49	139,1554	-37,2446	176,40	0,93445
3.1.2009	16:00	3,98	49	155,1173	-21,2827	176,40	1,04164
3.1.2009	17:00	4,18	49	153,7249	-24,4751	178,20	1,03229
3.1.2009	18:00	4,41	50	173,6152	-6,3848	180,00	1,16586
3.1.2009	19:00	4,47	50	200,2185	20,2185	180,00	1,34450
3.1.2009	20:00	4,28	50	184,2565	4,2565	180,00	1,23731
3.1.2009	21:00	4,24	50	189,5772	9,5772	180,00	1,27304
3.1.2009	22:00	4,15	50	202,3468	22,3468	180,00	1,35879
3.1.2009	23:00	3,94	50	195,2261	17,0261	178,20	1,31098
4.1.2009	0:00	3,78	49	155,4456	-19,1544	174,60	1,04384
4.1.2009	1:00	3,96	48	118,5292	-54,2708	172,80	0,79594
4.1.2009	2:00	4,47	48	117,1815	108,5415	8,64	0,78689
4.1.2009	3:00	3,45	0	99,6089	7,4489	92,16	0,66889
4.1.2009	4:00	3,38	48	86,2770	-88,3230	174,60	0,57936
4.1.2009	5:00	4,21	49	100,3557	29,7957	70,56	0,67391
4.1.2009	6:00	3,93	0	94,7078	94,7078	0,00	0,63598
4.1.2009	7:00	3,04	0	152,4297	-18,0903	170,52	1,02359
4.1.2009	8:00	3,21	49	146,2760	-31,9240	178,20	0,98227
4.1.2009	9:00	3,51	50	193,0979	14,8979	178,20	1,29668
4.1.2009	10:00	3,37	49	183,4413	10,6413	172,80	1,23184
4.1.2009	11:00	3,27	47	152,1739	-17,0261	169,20	1,02187
4.1.2009	12:00	3,43	47	166,0076	-3,1924	169,20	1,11477

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.4

4.1.2009	13:00	3,46	47	161,7511	-7,4489	169,20	1,08619
4.1.2009	14:00	3,53	47	167,4793	-5,3207	172,80	1,12465
4.1.2009	15:00	3,58	49	170,0152	-6,3848	176,40	1,14168
4.1.2009	16:00	3,64	49	166,8228	-9,5772	176,40	1,12024
4.1.2009	17:00	3,73	49	129,5782	-46,8218	176,40	0,87014
4.1.2009	18:00	4,17	49	136,9725	-27,6675	164,64	0,91979
4.1.2009	19:00	4,43	0	136,2090	136,2090	0,00	0,91467
4.1.2009	20:00	3,15	0	177,0779	14,8979	162,18	1,18911
4.1.2009	21:00	3,01	51	197,7620	15,9620	181,80	1,32800
4.1.2009	22:00	2,86	50	166,1663	-13,8337	180,00	1,11583
4.1.2009	23:00	2,99	50	188,5131	8,5131	180,00	1,26590
5.1.2009	0:00	2,91	50	177,1359	-1,0641	178,20	1,18950
5.1.2009	1:00	2,92	49	122,1292	-54,2708	176,40	0,82012
5.1.2009	2:00	3,43	49	113,9444	-60,6556	174,60	0,76516
5.1.2009	3:00	4,00	48	92,1015	-20,2185	112,32	0,61848
5.1.2009	4:00	4,19	0	81,9382	81,9382	0,00	0,55023
5.1.2009	5:00	3,42	0	94,3324	3,1924	91,14	0,63346
5.1.2009	6:00	3,39	49	116,8086	-59,5914	176,40	0,78439
5.1.2009	7:00	3,95	49	152,9891	-23,4109	176,40	1,02735
5.1.2009	8:00	4,17	49	193,4261	17,0261	176,40	1,29889
5.1.2009	9:00	4,01	49	203,6599	30,8599	172,80	1,36761
5.1.2009	10:00	3,72	47	155,3663	-13,8337	169,20	1,04331
5.1.2009	11:00	3,85	47	138,9967	-26,6033	165,60	0,93339
5.1.2009	12:00	4,10	45	102,7587	-10,6413	113,40	0,69004
5.1.2009	13:00	4,20	0	90,4513	90,4513	0,00	0,60740
5.1.2009	14:00	3,35	0	131,4337	13,8337	117,60	0,88260
5.1.2009	15:00	3,22	49	138,0912	-38,3088	176,40	0,92731
5.1.2009	16:00	3,58	49	140,2195	-36,1805	176,40	0,94160
5.1.2009	17:00	3,92	49	143,4119	-32,9881	176,40	0,96303
5.1.2009	18:00	4,23	49	157,2456	-19,1544	176,40	1,05593
5.1.2009	19:00	4,41	49	192,3620	15,9620	176,40	1,29174
5.1.2009	20:00	4,26	49	192,3620	15,9620	176,40	1,29174
5.1.2009	21:00	4,11	49	210,4523	34,0523	176,40	1,41322
5.1.2009	22:00	3,79	49	204,0675	27,6675	176,40	1,37035
5.1.2009	23:00	3,53	49	203,0033	26,6033	176,40	1,36320
6.1.2009	0:00	3,28	49	157,5739	-17,0261	174,60	1,05813
6.1.2009	1:00	3,44	48	135,5554	-37,2446	172,80	0,91028
6.1.2009	2:00	3,79	48	118,5292	-54,2708	172,80	0,79594
6.1.2009	3:00	4,30	48	102,9184	51,0784	51,84	0,69111
6.1.2009	4:00	3,82	0	89,8265	84,0665	5,76	0,60320
6.1.2009	5:00	3,03	48	85,2128	-89,3872	174,60	0,57222
6.1.2009	6:00	3,87	49	112,5520	-63,8480	176,40	0,75581
6.1.2009	7:00	4,47	49	110,1650	104,2850	5,88	0,73978
6.1.2009	8:00	3,49	0	141,6675	27,6675	114,00	0,95132
6.1.2009	9:00	3,23	50	169,6869	-8,5131	178,20	1,13948
6.1.2009	10:00	3,31	49	139,8119	-32,9881	172,80	0,93886

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.4

6.1.2009	11:00	3,62	47	138,3401	-30,8599	169,20	0,92898
6.1.2009	12:00	3,91	47	161,7511	-7,4489	169,20	1,08619
6.1.2009	13:00	3,98	47	155,3663	-13,8337	169,20	1,04331
6.1.2009	14:00	4,11	47	164,9435	-4,2565	169,20	1,10762
6.1.2009	15:00	4,15	47	169,6076	-3,1924	172,80	1,13894
6.1.2009	16:00	4,18	49	168,9511	-7,4489	176,40	1,13453
6.1.2009	17:00	4,25	49	162,5663	-13,8337	176,40	1,09166
6.1.2009	18:00	4,38	49	156,1612	41,5012	114,66	1,04865
6.1.2009	19:00	3,99	0	172,2209	103,2209	69,00	1,15649
6.1.2009	20:00	3,02	50	190,6413	10,6413	180,00	1,28019
6.1.2009	21:00	2,92	50	190,6413	10,6413	180,00	1,28019
6.1.2009	22:00	2,82	50	200,2185	20,2185	180,00	1,34450
6.1.2009	23:00	2,63	50	168,6228	-9,5772	178,20	1,13233
7.1.2009	0:00	2,72	49	139,4836	-35,1164	174,60	0,93666
7.1.2009	1:00	3,05	48	108,9520	-63,8480	172,80	0,73163
7.1.2009	2:00	3,65	48	114,2727	-58,5273	172,80	0,76736
7.1.2009	3:00	4,20	48	106,1792	25,5392	80,64	0,71301
7.1.2009	4:00	3,96	0	78,7458	78,7458	0,00	0,52879
7.1.2009	5:00	3,22	0	121,6532	-22,3468	144,00	0,81692
7.1.2009	6:00	3,43	50	123,9292	-54,2708	178,20	0,83221
7.1.2009	7:00	3,94	49	125,6499	-48,9501	174,60	0,84376
7.1.2009	8:00	4,40	48	137,2830	88,3230	48,96	0,92188
7.1.2009	9:00	3,57	0	142,3012	41,5012	100,80	0,95558
7.1.2009	10:00	3,18	48	185,5696	12,7696	172,80	1,24613
7.1.2009	11:00	3,06	48	158,2304	-12,7696	171,00	1,06254
7.1.2009	12:00	3,18	47	161,7511	-7,4489	169,20	1,08619
7.1.2009	13:00	3,25	47	171,6565	4,2565	167,40	1,15270
7.1.2009	14:00	3,21	46	138,3401	-30,8599	169,20	0,92898
7.1.2009	15:00	3,50	48	141,9401	-30,8599	172,80	0,95315
7.1.2009	16:00	3,79	48	140,5477	-34,0523	174,60	0,94380
7.1.2009	17:00	4,11	49	158,3097	-18,0903	176,40	1,06308
7.1.2009	18:00	4,28	49	147,3069	-8,5131	155,82	0,98919
7.1.2009	19:00	4,36	0	166,5938	142,5938	24,00	1,11871
7.1.2009	20:00	3,02	50	187,4489	7,4489	180,00	1,25875
7.1.2009	21:00	2,95	50	197,0261	17,0261	180,00	1,32306
7.1.2009	22:00	2,79	50	221,5012	41,5012	180,00	1,48742
7.1.2009	23:00	2,40	50	187,4489	7,4489	180,00	1,25875

Opomba:

- z rdečo barvo so označena časovna obdobja Δt , v katerih je prišlo do napake v centralnem nadzornem sistemu (predvidene vrednosti nihanja vodne gladine vodohrana),
- z modro barvo so označena časovna obdobja Δt , v katerih so se časi vklopa črpalke t_v ročno nastavljali.

Preglednica P. 5: Izračun masne bilance in koeficientov urne porabe za tlačno cono DMA1

								I=J+L	J=K-G				
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Dan	Ura	T1 [m]	T2 [m]	S1 [l/s]	$Q_{ppr,t}$ [m ³ /h]	ΔV_{rez}^{T2} [m ³ /h]	ΔV_{rez}^{T1} [m ³ /h]	$Q_{izs,t}^{DMA1}$ [m ³ /h]	$Q_{izs,t}^{V2}$ [m ³ /h]	$Q_{črp,t}^{S2} + Q_{črp,t}^{S3}$ [m ³ /h]	$Q_{črp,t}^{S4} + Q_{črp,t}^{S5}$ [m ³ /h]	$Q_{črp,t}^{S1}$ [m ³ /h]	$k_{por,t}$ [l]
1.1.2009	0:00	3,00	0,50	193	229,49	-74,61	138,50	602,01	368,01	293,40	234,00	693,00	0,93300
	1:00	2,82	0,72	192	185,54	-81,39	92,33	597,99	369,39	288,00	228,60	691,20	0,75432
	2:00	2,70	0,96	192	178,67	-78,00	61,56	572,28	362,40	284,40	209,88	689,40	0,72640
	3:00	2,62	1,19	191	139,57	-128,87	-61,56	482,87	356,87	228,00	126,00	684,00	0,56743
	4:00	2,70	1,57	189	118,89	-271,31	-146,19	408,11	290,51	19,20	117,60	673,20	0,48336
	5:00	2,89	2,37	185	132,71	-247,57	-192,36	355,09	293,65	46,08	61,44	680,16	0,53952
	6:00	3,14	3,10	189	154,24	-145,83	-92,33	433,83	320,43	174,60	113,40	680,40	0,62705
	7:00	3,26	3,53	189	182,37	-156,01	-107,72	386,71	303,01	147,00	83,70	676,80	0,74144
	8:00	3,40	3,99	187	217,20	-257,75	-200,06	257,75	257,75	0,00	0,00	675,00	0,88302
	9:00	3,66	4,75	188	260,82	-125,48	-53,86	365,72	275,48	150,00	90,24	680,40	1,06036
	10:00	3,73	5,12	190	279,81	-91,57	53,86	458,05	273,37	181,80	184,68	684,00	1,13759
	11:00	3,66	5,39	190	258,15	101,74	-53,86	370,31	129,11	208,80	241,20	682,32	1,04953
	12:00	3,73	5,09	186	311,78	298,44	-115,42	241,20	0,00	295,20	241,20	668,40	1,26757
	13:00	3,88	4,21	184	278,61	298,44	-146,19	237,60	0,00	293,40	237,60	662,40	1,13268
	14:00	4,07	3,33	184	303,49	295,05	-123,11	235,80	0,00	291,60	235,80	662,40	1,23385
	15:00	4,23	2,46	184	284,50	291,66	-138,50	239,40	0,00	289,80	239,40	662,40	1,15665
	16:00	4,41	1,60	184	323,24	291,66	-23,08	239,40	0,00	288,00	239,40	585,72	1,31413
	17:00	4,44	0,74	113	287,99	-3,39	315,47	444,01	210,01	212,40	234,00	416,52	1,17083
	18:00	4,03	0,75	119	299,37	-91,57	369,33	498,37	267,97	176,40	230,40	428,40	1,21709
	19:00	3,55	1,02	119	275,21	-105,13	353,95	507,13	283,33	178,20	223,80	428,40	1,11889
	20:00	3,09	1,33	119	353,71	-94,96	315,47	388,36	274,96	180,00	113,40	426,60	1,43804
	21:00	2,68	1,61	118	315,24	-94,96	277,00	386,56	274,96	180,00	111,60	424,80	1,28163
	22:00	2,32	1,89	118	240,34	-81,39	230,83	415,29	303,69	222,30	111,60	424,80	0,97711
23:00	2,02	2,13	118	263,91	30,52	246,22	408,92	270,08	300,60	138,84	426,60	1,07292	
2.1.2009	0:00	1,70	2,04	119	226,11	37,31	277,00	479,29	256,09	293,40	223,20	428,40	0,91925
	1:00	1,34	1,93	119	226,60	30,52	253,92	453,92	257,48	288,00	196,44	426,60	0,92125
	2:00	1,01	1,84	118	177,05	-33,91	-61,56	446,11	320,11	286,20	126,00	684,72	0,71981
	3:00	1,09	1,94	194	180,27	-193,31	-84,64	431,69	269,69	76,38	162,00	696,60	0,73290
	4:00	1,20	2,51	193	186,32	-223,83	-69,25	439,23	235,59	11,76	203,64	694,80	0,75748

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.5

2.1.2009	5:00	1,29	3,17	193	211,13	-105,13	-92,33	393,13	281,53	176,40	111,60	696,60	0,85837
	6:00	1,41	3,48	194	257,28	-91,57	-61,56	379,57	267,97	176,40	111,60	698,40	1,04597
	7:00	1,49	3,75	194	238,84	-101,74	-146,19	311,56	279,94	178,20	31,62	696,60	0,97103
	8:00	1,68	4,05	193	268,89	-88,18	-92,33	335,38	268,18	180,00	67,20	696,60	1,09318
	9:00	1,80	4,31	194	282,39	-71,22	46,17	465,78	253,38	182,16	212,40	702,00	1,14806
	10:00	1,74	4,52	196	319,68	57,65	100,03	484,15	250,15	307,80	234,00	703,80	1,29968
	11:00	1,61	4,35	195	282,33	47,48	69,25	488,92	256,72	304,20	232,20	702,00	1,14783
	12:00	1,52	4,21	195	279,15	40,70	69,25	492,10	261,70	302,40	230,40	702,00	1,13489
	13:00	1,43	4,09	195	256,27	37,31	46,17	491,89	263,29	300,60	228,60	702,00	1,04189
	14:00	1,37	3,98	195	256,54	3,39	38,47	482,13	255,33	258,72	226,80	700,20	1,04299
	15:00	1,32	3,97	194	256,51	-196,70	-15,39	426,50	199,70	3,00	226,80	698,40	1,04285
	16:00	1,34	4,55	194	219,81	-71,22	-46,17	430,62	251,22	180,00	179,40	696,60	0,89366
	17:00	1,40	4,76	193	226,06	-71,22	-107,72	361,02	251,22	180,00	109,80	694,80	0,91905
	18:00	1,54	4,97	193	232,54	-81,39	-184,67	275,79	261,39	180,00	14,40	693,00	0,94540
	19:00	1,78	5,21	192	277,91	-67,83	-115,42	299,67	247,83	180,00	51,84	693,00	1,12988
	20:00	1,93	5,41	193	267,60	54,26	-169,28	252,52	135,52	178,44	117,00	689,40	1,08794
	21:00	2,15	5,25	184	252,51	223,83	-176,97	238,32	0,00	219,24	238,32	667,80	1,02658
	22:00	2,38	4,59	187	285,81	210,27	-146,19	239,40	0,00	216,36	239,40	671,40	1,16195
	23:00	2,57	3,97	186	272,22	298,44	-161,58	235,80	0,00	293,40	235,80	669,60	1,10671
	3.1.2009	0:00	2,78	3,09	186	285,81	295,05	-146,19	234,00	0,00	291,60	234,00	666,00
1:00		2,97	2,22	184	238,33	291,66	-184,67	234,00	0,00	284,40	234,00	657,00	0,96895
2:00		3,21	1,36	181	180,87	206,88	-238,53	230,40	0,00	199,08	230,40	649,80	0,73534
3:00		3,52	0,75	180	178,44	-10,17	-138,50	341,86	166,72	167,40	175,14	658,80	0,72546
4:00		3,70	0,78	186	103,32	-288,27	-207,75	353,13	353,13	64,86	0,00	664,20	0,42005
5:00		3,97	1,63	183	110,06	-312,01	-238,53	312,01	312,01	0,00	0,00	660,60	0,44746
6:00		4,28	2,55	184	145,94	-223,83	-100,03	420,03	335,55	111,72	84,48	666,00	0,59332
7:00		4,41	3,21	186	162,45	-159,40	-61,56	449,20	335,80	176,40	113,40	673,20	0,66044
8:00		4,49	3,68	188	218,33	-142,44	123,11	403,98	292,38	149,94	111,60	499,20	0,88764
9:00		4,33	4,10	114	281,80	-217,05	100,03	228,63	223,05	6,00	5,58	410,40	1,14566
10:00		4,20	4,74	114	268,09	-33,91	269,31	415,21	215,71	181,80	199,50	414,00	1,08994
11:00		3,85	4,84	116	256,10	71,22	300,08	463,38	229,38	300,60	234,00	419,40	1,04120
12:00		3,46	4,63	117	278,07	81,39	315,47	460,41	228,21	309,60	232,20	423,00	1,13050
13:00		3,05	4,39	118	275,77	81,39	307,78	456,81	226,41	307,80	230,40	424,80	1,12117
14:00		2,65	4,15	118	230,28	44,09	292,39	486,91	258,31	302,40	228,60	424,80	0,93621
15:00		2,27	4,02	118	289,06	81,39	292,39	429,93	203,13	284,52	226,80	426,60	1,17520
16:00		1,89	3,78	119	248,59	-30,52	253,92	433,72	206,92	176,40	226,80	428,40	1,01067
17:00		1,56	3,87	119	279,91	-16,96	246,22	392,92	195,16	178,20	197,76	426,60	1,13797
18:00		1,24	3,92	118	266,06	-30,52	161,58	322,12	210,52	180,00	111,60	426,60	1,08168
19:00	1,03	4,01	119	313,24	-57,65	-15,39	349,25	237,65	180,00	111,60	677,88	1,27348	

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.5

3.1.2009	20:00	1,05	4,18	196	293,90	-64,44	-53,86	357,84	244,44	180,00	113,40	705,60	1,19487
	21:00	1,12	4,37	196	313,73	16,96	38,47	432,14	238,64	255,60	193,50	707,40	1,27548
	22:00	1,07	4,32	197	325,27	67,83	84,64	470,37	239,97	307,80	230,40	711,00	1,32239
	23:00	0,96	4,12	198	334,97	64,44	92,33	466,56	239,76	304,20	226,80	709,20	1,36184
4.1.2009	0:00	0,84	3,93	196	243,78	40,70	23,08	481,30	256,30	297,00	225,00	702,00	0,99110
	1:00	0,81	3,81	194	178,44	23,74	-53,86	466,10	267,86	291,60	198,24	698,40	0,72545
	2:00	0,88	3,74	194	204,08	-189,92	-138,50	348,14	220,34	30,42	127,80	690,72	0,82970
	3:00	1,06	4,30	190	135,20	-149,22	-146,19	402,60	241,38	92,16	161,22	684,00	0,54967
	4:00	1,25	4,74	190	121,77	-94,96	-184,67	379,36	269,56	174,60	109,80	685,80	0,49507
	5:00	1,49	5,02	191	184,39	-159,40	-200,06	292,96	229,96	70,56	63,00	677,40	0,74964
	6:00	1,75	5,49	186	167,91	-3,39	-477,06	3,39	3,39	0,00	0,00	648,36	0,68265
	7:00	2,37	5,50	180	253,01	176,35	-323,17	77,22	0,00	170,52	77,22	653,40	1,02863
	8:00	2,79	4,98	183	253,50	176,35	-284,70	118,80	0,00	178,20	118,80	657,00	1,03064
	9:00	3,16	4,46	182	265,71	183,14	-176,97	219,24	0,00	178,20	219,24	661,92	1,08025
	10:00	3,39	3,92	186	305,29	278,10	-123,11	237,60	0,00	271,80	237,60	666,00	1,24116
	11:00	3,55	3,10	184	265,02	291,66	-161,58	237,60	0,00	288,00	237,60	664,20	1,07744
	12:00	3,76	2,24	185	297,59	291,66	-130,81	237,60	0,00	288,00	237,60	666,00	1,20988
	13:00	3,93	1,38	185	311,18	291,66	-115,42	235,80	0,00	288,00	235,80	662,40	1,26513
	14:00	4,08	0,52	183	282,54	-71,22	192,36	587,52	353,52	295,20	234,00	677,70	1,14868
	15:00	3,83	0,73	192	270,41	-94,96	176,97	597,76	363,76	268,80	234,00	691,20	1,09938
	16:00	3,60	1,01	192	266,01	-162,79	146,19	569,59	339,19	176,40	230,40	689,40	1,08146
	17:00	3,41	1,49	191	204,29	-172,96	-76,94	404,56	349,36	176,40	55,20	685,80	0,83056
	18:00	3,51	2,00	190	270,19	-162,79	-53,86	358,15	327,43	164,64	30,72	682,20	1,09847
	19:00	3,58	2,48	189	229,83	-267,92	-69,25	383,12	267,92	0,00	115,20	682,20	0,93438
	20:00	3,67	3,27	190	294,26	-139,05	23,08	416,43	301,23	162,18	115,20	687,60	1,19631
	21:00	3,64	3,68	192	331,19	-64,44	123,11	483,12	295,92	231,48	187,20	691,20	1,34649
	22:00	3,48	3,87	192	274,31	0,00	123,11	541,80	307,80	307,80	234,00	693,00	1,11523
23:00	3,32	3,87	193	293,09	3,39	138,50	536,61	302,61	306,00	234,00	691,20	1,19158	
5.1.2009	0:00	3,14	3,86	191	232,45	-3,39	84,64	539,79	305,79	302,40	234,00	687,60	0,94503
	1:00	3,03	3,87	191	208,19	-13,57	61,56	540,97	310,57	297,00	230,40	687,60	0,84641
	2:00	2,95	3,91	191	204,43	-84,79	38,47	518,05	293,05	208,26	225,00	684,00	0,83111
	3:00	2,90	4,16	189	143,10	-172,96	-138,50	397,60	285,28	112,32	112,32	679,20	0,58177
	4:00	3,08	4,67	184	118,37	-261,14	-284,70	261,14	261,14	0,00	0,00	664,20	0,48122
	5:00	3,45	5,44	185	173,40	71,22	-377,03	83,71	20,35	91,14	63,36	634,14	0,70498
	6:00	3,94	5,23	176	172,15	176,35	-346,25	117,00	0,00	176,40	117,00	635,40	0,69988
	7:00	4,39	4,71	177	212,74	176,35	-138,50	117,00	0,00	176,40	117,00	468,24	0,86490
	8:00	4,57	4,19	113	345,46	179,75	53,86	115,20	0,00	176,40	115,20	406,80	1,40449
	9:00	4,50	3,66	113	353,37	234,01	176,97	230,40	0,00	207,48	230,40	406,80	1,43665
10:00	4,27	2,97	113	259,73	291,66	92,33	237,60	0,00	288,00	237,60	405,00	1,05596	

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.5

5.1.2009	11:00	4,15	2,11	112	244,34	281,49	76,94	234,00	0,00	279,00	234,00	401,40	0,99339
	12:00	4,05	1,28	111	172,51	220,44	-92,33	134,76	0,00	226,80	134,76	399,60	0,70133
	13:00	4,17	0,63	111	176,54	-108,53	153,89	377,25	247,65	118,80	129,60	399,90	0,71771
	14:00	3,97	0,95	116	221,65	-101,74	315,47	515,02	284,62	182,88	230,40	421,20	0,90113
	15:00	3,56	1,25	118	262,14	-132,27	269,31	430,17	308,67	176,40	121,50	423,00	1,06575
	16:00	3,21	1,64	117	270,01	-115,31	253,92	405,11	291,71	176,40	113,40	421,20	1,09774
	17:00	2,88	1,98	117	231,51	-101,74	200,06	389,74	278,14	176,40	111,60	421,20	0,94123
	18:00	2,62	2,28	117	269,28	-98,35	230,83	386,35	274,75	176,40	111,60	424,80	1,09478
	19:00	2,32	2,57	119	329,72	-54,26	307,78	410,06	230,66	176,40	179,40	432,00	1,34048
	20:00	1,92	2,73	121	357,98	33,91	353,95	431,57	202,97	236,88	228,60	435,60	1,45538
	21:00	1,46	2,63	121	331,33	88,18	338,56	444,62	216,02	304,20	228,60	437,40	1,34705
	22:00	1,02	2,37	122	339,33	27,13	138,50	503,87	275,27	302,40	228,60	704,70	1,37957
	23:00	0,84	2,29	197	279,80	16,96	84,64	514,04	285,44	302,40	228,60	709,20	1,13752
6.1.2009	0:00	0,73	2,24	197	287,70	13,57	92,33	512,03	285,23	298,80	226,80	707,40	1,16965
	1:00	0,61	2,20	196	217,34	-16,96	30,78	519,04	295,84	278,88	223,20	705,60	0,88361
	2:00	0,57	2,25	196	212,52	-105,13	-53,86	435,61	277,93	172,80	157,68	702,00	0,86403
	3:00	0,64	2,56	194	167,12	-206,88	-184,67	344,82	258,72	51,84	86,10	696,60	0,67942
	4:00	0,88	3,17	189	141,37	-234,01	-215,45	327,19	239,77	5,76	87,42	684,00	0,57474
	5:00	1,16	3,86	191	134,89	-108,53	-161,58	392,93	283,13	174,60	109,80	689,40	0,54841
	6:00	1,37	4,18	192	173,61	-105,13	-200,06	315,73	281,53	176,40	34,20	689,40	0,70582
	7:00	1,63	4,49	191	208,06	-223,83	-246,22	229,71	229,71	5,88	0,00	684,00	0,84589
	8:00	1,95	5,15	189	205,91	-118,70	-123,11	345,98	232,70	114,00	113,28	675,00	0,83713
	9:00	2,11	5,50	186	299,04	179,75	-192,36	176,40	0,00	178,20	176,40	667,80	1,21575
	10:00	2,36	4,97	185	241,44	278,10	-192,36	234,00	0,00	269,82	234,00	667,80	0,98158
	11:00	2,61	4,15	186	266,32	291,66	-169,28	234,00	0,00	288,00	234,00	669,60	1,08274
	12:00	2,83	3,29	186	268,62	291,66	-161,58	235,80	0,00	288,00	235,80	666,00	1,09207
	13:00	3,04	2,43	184	251,43	291,66	-176,97	234,00	0,00	286,20	234,00	662,40	1,02219
	14:00	3,27	1,57	184	243,73	284,88	-184,67	234,00	0,00	284,40	234,00	662,40	0,99091
	15:00	3,51	0,73	184	261,07	-44,09	0,00	415,61	253,61	213,12	162,00	676,68	1,06139
	16:00	3,51	0,86	191	262,91	-172,96	15,39	440,08	349,36	176,40	90,72	687,60	1,06886
	17:00	3,49	1,37	191	243,41	-166,18	15,39	457,78	342,58	176,40	115,20	685,80	0,98959
	18:00	3,47	1,86	190	242,05	-196,70	-15,39	426,56	311,36	114,66	115,20	684,00	0,98406
	19:00	3,49	2,44	190	274,35	-213,66	-15,39	397,86	282,66	69,00	115,20	687,60	1,11539
	20:00	3,51	3,07	192	305,54	-122,09	100,03	489,29	302,09	180,00	187,20	694,80	1,24218
	21:00	3,38	3,43	194	352,43	0,00	184,67	532,44	296,64	296,64	235,80	700,20	1,43281
	22:00	3,14	3,43	195	352,33	16,96	176,97	524,84	290,84	307,80	234,00	700,20	1,43241
23:00	2,91	3,38	194	303,89	3,39	138,50	533,01	300,81	304,20	232,20	698,40	1,23549	
7.1.	0:00	2,73	3,37	194	288,71	0,00	123,11	527,40	298,80	298,80	228,60	693,00	1,17377
	1:00	2,57	3,37	191	182,13	-23,74	38,47	543,94	317,14	293,40	226,80	687,60	0,74047

se nadaljuje ...

... nadaljevanje Preglednice P.5

7.1.2009	2:00	2,52	3,44	191	176,42	-108,53	-30,78	478,61	295,19	186,66	183,42	685,80	0,71723
	3:00	2,56	3,76	190	166,60	-193,31	-176,97	336,59	273,95	80,64	62,64	680,16	0,67731
	4:00	2,79	4,33	186	154,64	-247,57	-207,75	309,01	247,57	0,00	61,44	671,40	0,62868
	5:00	3,06	5,06	187	175,11	-128,87	-115,42	384,47	272,87	144,00	111,60	675,00	0,71191
	6:00	3,21	5,44	188	185,50	118,70	-307,78	148,42	53,02	178,20	95,40	641,70	0,75417
	7:00	3,61	5,09	175	199,11	176,35	-430,89	0,00	0,00	174,60	0,00	630,00	0,80949
	8:00	4,17	4,57	175	233,57	50,87	-261,61	71,58	0,00	48,96	71,58	566,76	0,94958
	9:00	4,51	4,42	113	288,71	111,92	123,11	241,20	0,00	109,20	241,20	406,80	1,17377
	10:00	4,35	4,09	113	305,90	301,84	138,50	239,40	0,00	297,00	239,40	406,80	1,24365
	11:00	4,17	3,20	113	247,94	295,05	76,94	235,80	0,00	291,60	235,80	406,80	1,00803
	12:00	4,07	2,33	113	288,22	291,66	115,42	234,00	0,00	286,20	234,00	406,80	1,17176
	13:00	3,92	1,47	113	278,72	288,27	107,72	234,00	0,00	282,60	234,00	405,00	1,13316
	14:00	3,78	0,62	112	214,06	6,78	300,08	507,58	277,18	286,20	230,40	421,56	0,87027
	15:00	3,39	0,60	118	238,07	-101,74	338,56	525,28	300,28	198,54	225,00	424,80	0,96790
	16:00	2,95	0,90	118	233,03	-132,27	230,83	420,81	306,87	174,60	113,94	423,00	0,94739
	17:00	2,65	1,29	117	236,98	-132,27	161,58	344,01	308,67	176,40	35,34	419,40	0,96345
	18:00	2,44	1,68	116	227,46	-132,27	138,50	332,25	288,09	155,82	44,16	421,20	0,92473
	19:00	2,26	2,07	118	292,35	-193,31	200,06	332,51	217,31	24,00	115,20	424,80	1,18854
	20:00	2,00	2,64	118	283,82	-50,87	292,39	436,97	230,87	180,00	206,10	428,40	1,15388
	21:00	1,62	2,79	120	310,74	44,09	323,17	448,03	215,83	259,92	232,20	435,60	1,26331
22:00	1,20	2,66	122	353,40	67,83	238,53	472,17	239,97	307,80	232,20	587,04	1,43675	
23:00	0,89	2,46	199	339,04	78,00	84,64	462,00	228,00	306,00	234,00	716,40	1,37839	