

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Podiplomski program Gradbeništvo
Hidrotehnična smer

Kandidat:

Sašo Šantl

Makrokalibracija pri hidravličnem modeliranju vodooskrbnih sistemov

Magistrska naloga št. 196

Mentor:
prof. dr. Franc Steinman

Somentor:
doc. dr. Primož Banovec

Ljubljana, 14. 12. 2007

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Podiplomski program Gradbeništvo
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Jure Klopčič

Analiza in napoved pomikov za predore, grajene v permo-karbonskih skrilavcih

Doktorska disertacija št. 196

Mentor:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič

Ljubljana, 15. 9. 2009

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

PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA

MAGISTRSKI ŠTUDIJ
HIDROTEHNIČNA SMER

Kandidat:

SAŠO ŠANTL, univ.dipl.inž.grad.

**MAKROKALIBRACIJA PRI HIDRAVLIČNEM
MODELIRANJU VODOOSKRBNIH SISTEMOV**

Magistrsko delo štev.: 196

**MACROCALIBRATION IN THE PROCESS OF
HYDRAULIC MODELLING OF WATER SUPPLY
SYSTEMS**

Master of Science Thesis No.: 196

Mentor:

prof. dr. Franci Steinman

Predsednik komisije:

izr. prof. dr. Matjaž Četina

Somentor:

doc. dr. Primož Banovec

Člana:

izr. prof. dr. Boris Kompare

prof. dr. Brane Širok

Ljubljana, 14.12.2007

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani SAŠO ŠANTL izjavljam, da sem avtor magistrskega dela z naslovom:

**»MAKROKALIBRACIJA PRI HIDRAVLIČNEM MODELIRANJU
VODOOSKRBNIH SISTEMOV«**

Ljubljana, 4. 12. 2007

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	532.5 (043.3)
Avtor:	Sašo Šantl
Mentor:	prof. dr. Franci Steinman
Somentor:	doc. dr. Primož Banovec
Naslov:	Makrokalibracija pri hidravličnem modeliranju vodooskrbnih sistemov
Obseg in oprema:	110 str., 11 pregl., 71 sl.
Ključne besede:	vodooskrbni sistem, hidravlično modeliranje, makrokalibracija, mikrokalibracija

IZVLEČEK**Makrokalibracija pri hidravličnem modeliranju vodooskrbnih sistemov**

V magistrski nalogi je predstavljen celovit pristop k hidravličnem modeliranju vodooskrbnih sistemov, ki večinoma temelji na lastnih raziskavah. Izhodiščna faza hidravličnega modeliranja zahteva ustrezno vzpostavitev geografskega informacijskega sistema in pripravo podatkovnih baz vseh entitet, kar je danes bistvenega pomena za učinkovito upravljanje z vodooskrbnimi sistemi s tehničnih kakor tudi ekonomskih in pravnih vidikov. Ustrezno vodenje podatkov o vodooskrbnem sistemu je tudi pogoj za hidravlično modeliranje. Samo hidravlično modeliranje je sestavljeno iz več faz, ki se praviloma začnejo z vzpostavitvijo vozlišč, oceno hidravličnih parametrov ter glede na namen uporabe modela tudi s skeletizacijo hidravličnega modela. Na podlagi takega neumerjenega hidravličnega modela se v nadaljevanju izvede postopek umerjanja, s čimer se, skupaj z izvedbo verifikacije in validacije, vzpostavi umerjen hidravlični model, ki verodostojno predstavlja stvaren vodooskrbni sistem in je kot tak primeren, da se na njem izvajajo razne analize stanj, s katerimi se upravljalcu nudi učinkovito orodje pri odločanju prihodnjih načrtovanj in izboljšanju delovanja sistema. Samo umerjanje hidravličnih modelov se lahko deli v dve fazi. Prva faza je postopek makrokalibracije, to je odprava predvsem geometrijskih in topoloških napak, druga faza, postopek mikrokalibracije, pa je faza umerjanja predvsem hidravličnih parametrov, kot so koeficienti hrapavosti cevi in porazdelitev porabe po sistemu. Na podlagi posameznih ugotovitev v fazah umerjanja je pomembno, da se podatkovne baze v informacijskem sistemu tudi ustrezno posodablajo, s čimer se sam postopek izdelave hidravličnega modela lahko zelo avtomatizira. Poudarek naloge je predvsem na področju makrokalibracije, saj se ugotavlja, da je to faza, ki je bila v postopku hidravličnega modeliranja premalo dorečena.

UDC: 532.5 (043.3)
Author: Sašo Šantl
Advisor: prof. dr. Franci Steinman
Co-advisor: doc. dr. Primož Banovec
Title: **Macrocalibration in the process of hydraulic modelling of water supply systems**

Notes: 110 p., 11 tab., 71 fig.
Key words: water supply systems, hydraulic modelling, macrocalibration, microcalibration

ABSTRACT

Macrocalibration in the process of hydraulic modelling of water supply systems

The thesis presents an integrated approach to hydraulic modelling of water supply systems, which is mostly based on our own research. The starting phase of hydraulic modelling requires appropriate setting up of a geographic information system and preparation of databases of all entities. This is today crucial for efficient management of water supply systems as far as technical as well as economic and legal aspects are concerned. Appropriate management of data on a water supply system is also a condition for hydraulic modelling. Hydraulic modelling itself consists of several phases which normally begin with the setting up of nodes, the assessment of hydraulic parameters and, considering the purpose of the model use, also with the skeletonization of a hydraulic model. On the basis of such an uncalibrated hydraulic model a calibration procedure is further on performed which, together with verification and validation, leads to a calibrated hydraulic model credibly representing a real water supply system. Such a model is suitable for various analyses of situations to be performed on it and provides a manager with an efficient tool for future planning and improvement of system operation. The calibration of hydraulic models itself can be divided into two phases. The first phase is a procedure of macrocalibration, i.e. elimination of mainly geometric and topological errors, while the second one, i.e. microcalibration, comprises calibration of mainly hydraulic parameters, such as pipe roughness coefficients and distribution of consumption across the system. Considering individual findings in the calibration phases it is important that databases in the information system are suitably updated which can very much automate the procedure of hydraulic model design. The thesis focuses especially on the macrocalibration area since it has been established that this is a phase which has not been elaborated enough in the hydraulic modelling procedure.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	UPRAVLJANJE Z VODOOSKRBNIMI SISTEMI.....	5
2.1	Udeleženci	5
2.2	Pogoji in cilji delovanja oskrbnih con	8
2.3	Zasnova in informacijska podpora upravljanju	9
3	HIDRAVLIČNO MODELIRANJE.....	14
3.1	Teoretična izhodišča.....	16
3.2	Elementi hidravličnega modela.....	21
3.2.1	Cevi	22
3.2.2	Zajetja (zbiralniki).....	23
3.2.3	Vodohrani.....	24
3.2.4	Črpalke	25
3.2.5	Ventili.....	26
3.2.6	Virtualne linije.....	27
3.2.7	Vozlišča in poraba.....	28
3.2.8	Sestavljeni objekti	32
3.3	Tehnični vidiki obratovanja in upravljanja.....	34
3.4	Skeletizacija ali poenostavitev sistema	36
3.4.1	Rezanje vej cevovoda.....	38
3.4.2	Združevanje cevi enakih hidravličnih karakteristik	38
3.4.3	Združevanje cevi različnih hidravličnih karakteristik	39
3.4.4	Združevanje vzporednih cevi	39
3.4.5	Avtomatizacija skeletizacije.....	40
3.5	Umerjanje	42
3.5.1	Makrokalibracija	47
3.5.2	Mikrokalibracija	49
3.6	Analiza in načrtovanje	52
4	MAKROKALIBRACIJA HIDRAVLIČNEGA MODELA	57
4.1	Strokovni pristop.....	57
4.1.1	Povezanost omrežja.....	59
4.1.2	Dobava in poraba vode na nivoju celotnega VS	61
4.1.3	Vodni viri	63

4.1.4	Vodohrani	64
4.1.5	Črpališča	65
4.1.6	Cevovod.....	66
4.1.7	Reducirni ventili	67
4.1.8	Tlaki v vozliščih	68
4.1.9	Obratovanje in upravljanje	70
4.2	Klasifikacijski algoritmi.....	70
5	PRIMER MAKROKALIBRACIJE	73
5.1	Povezanost omrežja	74
5.2	Dobava in poraba vode	75
5.3	Vodni viri in vodohrani.....	79
5.4	Črpališča.....	83
5.5	Tlaki v sistemu	87
5.6	Povzetek ugotovitev	90
5.7	Sinteza pregleda stanja in opravljenih raziskav	91
6	ZAKLJUČEK	94
7	POVZETEK.....	97
8	SUMMARY	100
VIRI	103
PRILOGA	108

KAZALO SLIK

Slika 1	Pravno sistemska ureditev infrastrukture in objektov s področja rabe vode in urejanja voda (Steinman et al., 2006).....	5
Slika 2	Kategorije potreb po vodi (Steinman et al., 2006).....	6
Slika 3	Eden od primerov razmejitve pristojnosti in obveznosti med državo in lokalno skupnostjo.....	7
Slika 4	Prikaz robnih pogojev »T-P-E pristopa«.....	8
Slika 5	Petstebni model za primerjavo, kako učinkovita je dejavnost oskrbe z vodo (WD, 2005).....	9
Slika 6	Primer uporabe informacijskega sistema upravljalca za potrebe hidravličnega modeliranja.....	10
Slika 7	Prikaz vpliva spremembe koeficienta hrapavosti na tlak v ceveh z različnim premerom.....	16
Slika 8	Prikaz načina stikanja posameznih cevi vodooskrbnega sistema – vsak stik zahteva ločene entitete za vse stične elemente.....	22
Slika 9	Primer večanja koeficienta hrapavosti glede na staranje cevi (jeklene in litoželezne cevi), saj se lahko pojavijo obloge ali razjede na ostenju – Priceov diagram.....	23
Slika 10	Primer določitve črpalne krivulje z eno točko (levo) ali tremi točkami (desno) (Rossman, 2000).....	25
Slika 11	Spreminjanje črpalnih krivulj glede na različno nastavljeno hitrost.....	26
Slika 12	Pravilno orientiranje cevi v črpalki.....	27
Slika 13	Pravilno stikanje več cevi v bližini črpalke ali ventila.....	27
Slika 14	Primer porazdelitve porabe različnega tipa po vozliščih.....	29
Slika 15	Neposredno upoštevanje (vezava) porabe objekta prek hišnih priključkov v primeru popolnega informacijskega sistema.....	29
Slika 16	Pripis porabe posameznega objekta na podlagi prekritosti z vozliščnimi Thiessenovimi poligoni.....	30
Slika 17	Pripis porabe najbližjih cevi in delitev na pripadajoči vozlišči obratno sorazmerno glede na oddaljenost od točke pravokotne projekcije porabe na cev.....	30
Slika 18	Delež izgube vode glede na celotno porabo vode preko dnevnega nihanja.....	32

Slika 19	Določitev prostorninske krivulje akumulacijskega jezera za uporabo nadomestnega elementa - vodohrana.....	33
Slika 20	Primer redukcije tlaka v eno smer z obvodno enosmerno cevjo za tok vode v višjo tlačno cono v izjemnih dogodkih.....	33
Slika 21	Primer skeletizacije hidravličnega modela (debelejše črte označujejo cevi z večjim premerom).....	37
Slika 22	Primer odstranjevanja nevplivnih vej cevovoda z dodajanjem porabe na vezno vozlišče.....	38
Slika 23	Združevanje cevi z dodajanjem porabe odstranjenega vozlišča preostalima sosednjima vozliščema	38
Slika 24	Združevanje cevi z dodajanjem porabe odstranjenega vozlišča preostalima sosednjima vozliščema in določitvijo nadomestnih ekvivalentnih hidravličnih karakteristik preostali cevi.....	39
Slika 25	Združevanje vzporednih cevi – primer določitve ekvivalentnega koeficienta hrapavosti.....	40
Slika 26	Različne stopnje izvedene skeletizacije – do enega vozlišča s pripisano celotno porabo območja izhodiščne situacije	41
Slika 27	Shematiziran odsek cevovoda z oznakami in atributi cevi in vozlišč	42
Slika 28	Primer postopka umerjanja hidravličnega modela VS	45
Slika 29	Proces dvostopenjskega umerjanja.....	46
Slika 30	Primer procesa izvajanja postopka makrokalibracije	48
Slika 31	Primer procesa izvajanja postopka mikrokalibracije.....	49
Slika 32	Kvantitativna ocena sprejemljivosti odstopanja od optimalnih vrednosti na področju iskanja optimalne rešitve pri analizi vodooskrbnega sistema (Steinman et al. 2001).....	53
Slika 33	Ilustrativni prikaz optimizacijskega procesa z uporabo genetskih algoritmov.....	55
Slika 34	Primer optimizacije z uporabo genetskih algoritmov.....	56
Slika 35	Pristop k procesu iskanja napak pri hidravličnem modeliranju (Perez, 2003).....	57
Slika 36	Strokovni pristop k makrokalibraciji (Kompore, 2007)	58
Slika 37	Možne variante poteka križanja cevi.....	59

Slika 38	Možne napake, do katerih lahko pride pri avtomatiziranem vnosu oz. prenosu podatkovnih slojev v hidravlični model, ki so vidne pri podrobnejšem pregledu sistema	59
Slika 39	Hidravlični model enostavnega vodooskrbnega sistema z napako pri povezovanju cevovoda	60
Slika 40	Nihanje gladine vode v vodohranih – vodooskrbni sistem je povezan	60
Slika 41	Nihanje gladine vode v vodohranih – vodooskrbni sistem ni povezan.....	61
Slika 42	Alokacija porabe vode s kontrolo, izvedeno na podlagi upoštevanja celotne porabe vode v vodooskrbnem sistemu (Kozelj, 2004)	62
Slika 43	Pretoki in smeri vode v cevovodu – izrez iz opravljenih analiz (EPANET2).....	63
Slika 44	Razlika v načrpani količini vode v sprejemnem rezervoarju črpalnišča s konstantno in spremenljivo gladino vode.....	64
Slika 45	Napačno podane dimenzije vodohrana ter posledično prehitro nihanje gladine vode v vodohranu	65
Slika 46	Sprememba črpalne krivulje zaradi staranja	66
Slika 47	Sprememba pretoka zaradi staranja (izrabljenosti) črpalke	66
Slika 48	Večanje koeficienta hrapavosti glede na staranje cevi (jeklene in litoželezne cevi).....	67
Slika 49	Prikaz izračunanega pretoka vode skozi reducirni ventil brez napake.....	68
Slika 50	Testni primer omrežja z oštevilčenjem vozlišč	69
Slika 51	Izračunani tlaki pri različnih nastavitvah redukcije tlaka v ventilu in spremembi kote točke 6.....	69
Slika 52	Shematski prikaz procesa klasifikacije (Perez, 2003).....	72
Slika 53	Poenostavljen vodooskrbni sistem s prikazom bistvenih objektov in različnih tlačnih con (rdeče – visoka tlačna cona, modro – nizka tlačna cona, zeleno – dve manjši ločeni tlačni coni).....	74
Slika 54	Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2	75
Slika 55	Razporeditev ocenjenih izgub po vozliščih na transportnih vodih po VS (rdeče točke).....	76
Slika 56	Dotok vode iz vodnega vira Z4 v vodohran T1	80
Slika 57	Dotok vode iz vodnega vira Z4 v vodohran T1 v primeru povečanja koeficienta hrapavosti na $n_G = 0,020$	80

Slika 58	Nihanje gladine vode v vodohranu T5	81
Slika 59	Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2.....	81
Slika 60	Dotok vode iz zajetja Z2.....	82
Slika 61	Dotok vode iz zajetja Z1.....	82
Slika 62	Črpališče Č1 z navezo na transportni cevovod.....	83
Slika 63	Dotok vode iz črpališča Č1.....	83
Slika 64	Črpalna višina v črpališču Č1.....	84
Slika 65	Dotok vode iz črpališča Č1 po povečanju premera cevi na 150 mm	84
Slika 66	Črpalna višina v črpališču Č1 po povečanju premera cevi na 150 mm.....	85
Slika 67	Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2.....	85
Slika 68	Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2 pri upoštevanju gornjega scenarija.....	86
Slika 69	Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2 pri odstranitvi ventila za uravnavanje pretoka	87
Slika 70	Tlaki in pretoki v vodooskrbnem sistemu	88
Slika 71	Primerjava izračunanih tlakov z merjenimi v vozlišču na cevovodu iz smeri zajetja Z2 pred združitvijo s cevovodom iz smeri Z1.....	89

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Razpoložljiva programska oprema za hidravlično modeliranje in modeliranja kakovosti vode v vodooskrbnih sistemih na angleškem govornem območju (EPA, 2005)	18
Preglednica 2:	Primer določitve spreminjanja prostornine vodohrana glede na globino vode v vodohranu.....	24
Preglednica 3:	Primer določitve črpalne krivulje.....	25
Preglednica 4:	Določitev količnika porabe vode v vozlišču	28
Preglednica 5:	Strukturiranje enostavnih nadzornih pravil (Rossman, 2000).....	34
Preglednica 6:	Strukturiranje na nadzoru temeljčih pravil (Rossman, 2000).....	35
Preglednica 7:	Prikaz obratovalnih pogojev črpalk v odvisnosti od električne tarife in nivoja gladine vode v vodohranih	35
Preglednica 8:	Primeri napak pri različnih elementih hidravličnega modela VS	58
Preglednica 9:	Alokacija vode glede na tip porabe	76
Preglednica 10:	Določitev urnih koeficientov porabe za visoko cono prek izenačitve z bilanco vtoka in iztoka v visoko cono	77
Preglednica 11:	Določitev urnih koeficientov porabe za nizko cono prek izenačitve z bilanco vtoka in iztoka v nizki coni.....	78

1 UVOD

Upravljanje vodooskrbnih sistemov (VS) zahteva usklajevanje različnih zahtev in pričakovanj, ki jih izražajo različni subjekti, posredno in neposredno povezani s področjem oskrbe s pitno vodo. Ob temeljnih pravicah do oskrbe z vodo mora upravljalec poleg tehničnih predpisov pri načrtovanju upoštevati še ekonomiko in zlasti ostale vidike drugih resorjev, ki se lahko kot celota predstavijo kot pravni vidiki.

Poudariti je treba, da je namen te naloge predvsem obdelava sistemov oskrbe z vodo, s katerimi se zagotavlja oskrba s pitno vodo, to je obdelava vodooskrbnih sistemov. Poleg te oskrbe z vodo namreč obstajajo tudi druge oskrbe z vodo, na primer oskrba s tehnološko vodo z odprtimi ali zaprtimi sistemi, oskrba z vodo za namakanje in oskrba s požarno vodo z ločenim sistemom. Razlike nastopajo predvsem na področju zagotavljanja kakovosti vode, pri čemer so kriteriji za oskrbo s pitno vodo seveda najstrožji. S samega hidravličnega vidika pa so to vsi sistemi, kjer veljajo tlačne hidravlične razmere z enim medijem, to je vodo.

Upravljalec se za zagotovitev vidikov iz prvega odstavka zaveda potreb po vzpostavitvi pregledne evidence in ustrezne strokovne podpore, ki bi mu nudila predvsem hitro in zanesljivo podporo odločanju pri načrtovanju in vzpostavitvi obratovanja vodooskrbnega sistema. To podporo mu v obdobju današnje računalniške tehnologije lahko najbolje ponudi ustrezna vzpostavitev geografskega informacijskega sistema, ki združuje različne vidike upravljanja, in vzpostavitev hidravličnega modela kot neposrednega orodja, ki verodostojno predstavlja dejansko stanje na vodooskrbnem sistemu in omogoča ustrezno simulacijo različnih obratovalnih stanj ob spreminjanju parametrov hidravličnih entitet.

V izhodiščni fazi hidravličnega modeliranja je treba najprej pravilno vzpostaviti in voditi evidenco entitet v geografskem informacijskem sistemu (GIS), ki so podlaga za izdelavo hidravličnega modela. Na podlagi ustreznega vodenega GIS se lahko ustrezno vzpostavi hidravlični model, ki pa je v začetni fazi še neumerjen. To pomeni, da pri izvajanju simulacij že podaja rezultate, katerih istovetnost s stvarnimi hidravličnimi razmerami v samem vodooskrbnem sistemu pa je treba še potrditi. V samem postopku hidravličnega modeliranja je tako treba izvesti ustrezne postopke, ki postopoma vodijo do točke, ko se lahko po izvedenem

postopku kalibracije z verifikacijo in validacijo ugotovi, da hidravlični model tudi dejansko predstavlja razmere v stvarnem vodooskrbnem sistemu.

Na področju raziskav pri vzpostavitvi hidravličnega modela in iskanju optimalne variante pri načrtovanju in obratovanju so se že pred časom uveljavili sodobni pristopi, ki vključujejo tudi aplikacije umetne inteligence, od genetskih algoritmov, nevronske mreže do različnih hibridnih metod, uporabe mehkih pogojev in klasifikacijskih algoritmov. Vendar se v praksi ugotavlja, da je vmesni člen med ustrezno podatkovno bazo in končnim hidravličnim modelom ostal nekako zapostavljen. Ta razkorak občutijo predvsem upravljalci, ki s področjem aplikativnih raziskav niso dobro seznanjeni in jim manjka osnovna navezava ter obrazložitev postopka od informacijskega sistema do izdelave surovega hidravličnega modela in do izboljšane hidravličnega modela, ki pa že nudi določen pogled v soodvisnost dogajanja v dejanskem vodooskrbnem sistemu.

Zato se je pojavila potreba, da se z raziskavami sistematično predstavi tudi ta faza, to je faza makrokalibracije, katere pot je treba tudi ustrezno dokumentirati in prikazati na dejanskem primeru. Omenjeno je tudi naslovna tema te magistrske naloge. Na ta način se bo ponudil ustrezen strokoven vpogled v zadevne postopke hidravličnega modeliranja, ki jih bo lahko z veliko manjšo podporo lažje opravil tudi sam upravljalac, saj sam postopek ponuja tudi nov vpogled v vodooskrbni sistem in njegovo soodvisno obnašanje predvsem s hidravličnega vidika.

Hidravlični modeli so običajno inženirsko orodje, ki jih uporabljajo raziskovalci, projektanti in tudi upravljalci VS. Področje hidravličnega modeliranja VS je verjetno eno najbolj dinamičnih znanstveno-raziskovalnih področij infrastrukturnih sistemov. Po eni strani zaradi pomena, ki ga ima infrastruktura za oskrbo z vodo, po drugi strani zaradi obsežnega podjetniškega zaledja vpletenih (proizvodnja opreme oz. elementov, gradnja in vzdrževanje idr.). Z delovanjem vodooskrbnih sistemov je povezanih več procesov spremljanja njihovega delovanja (tehnični, obračunski itd.), ki imajo lahko različno informacijsko podporo. S hidravličnimi modeli vodooskrbnih sistemov, ki so navezani na standardizirano in vzdrževano podatkovno okolje o vseh elementih vodooskrbnih sistemov in režimih njihovega obratovanja, je možno doseči bistven napredek na področju vzpostavitve modelov in njihove uporabe v operativnem, načrtovalnem in razvojnem delu. Cilj raziskovalnega dela je, da se s predlagano

metodologijo zainteresiranim subjektom pripravijo učinkovita orodja podpore pri odločanju za upravljanje vodooskrbnih sistemov. Rezultati raziskovalnega dela bodo tudi neposredno testirani na stvarnih vodooskrbnih sistemih različnih velikosti.

Čeprav je zagotavljanje ustrezne kakovosti vode eden od pomembnih dejavnikov pri načrtovanju celotne oskrbe z vodo, zlasti s pitno vodo, to področje v tej nalogi ne bo obdelano. Naloga se prvenstveno osredotoča na področje hidravlike, same kakovosti vode pa se dotakne le posredno, ko se v fazi analiz in načrtovanja skupaj z drugimi cilji zagotavljajo tudi ustrezne hitrosti vode, s katerimi se preprečuje predolgo zadrževanje vode v ceveh, kar neposredno povzroča neželjeno tveganje za poslabšanje kakovosti vode.

V nalogi, ki temelji na lastnih raziskavah ter povzemanju strokovne literature oziroma znanstvenega tiska, so predstavljene oziroma uporabljene različne raziskovalne metode, predvsem aplikativne, med katerimi je vzpostavitev ustreznega geografskega informacijskega sistema temeljna podlaga ostalemu delu. Vzpostavitev učinkovitega osnovnega koncepta informacijske podpore upravljanju z VS je namreč ključna za nadaljnjo nadgradnjo posameznih sklopov ali modulov sistema tako z vidika spremembe povezanosti kakor tudi z vidika izboljšave in optimizacije posameznega postopka.

Kot osnova s področja teorije hidravličnega modeliranja je predstavljena gradientna metoda in druge sorodne metode različnih pristopov k hidravlični analizi tlačnih sistemov. V nadaljevanju pa so med drugim podane:

- klasifikacijska metoda za opredelitev in vzpostavitev baze parametrov posameznih atributov hidravličnega modela,
- metode porazdelitve porabe vode,
- metoda poenostavitve hidravličnega modela s prikazom primera algoritma za avtomatizacijo,
- metoda dvostopenjskega umerjanja,
- iteracijska metoda pri makro in mikrokalibraciji in
- optimizacijska metoda z uporabo genetskih algoritmov.

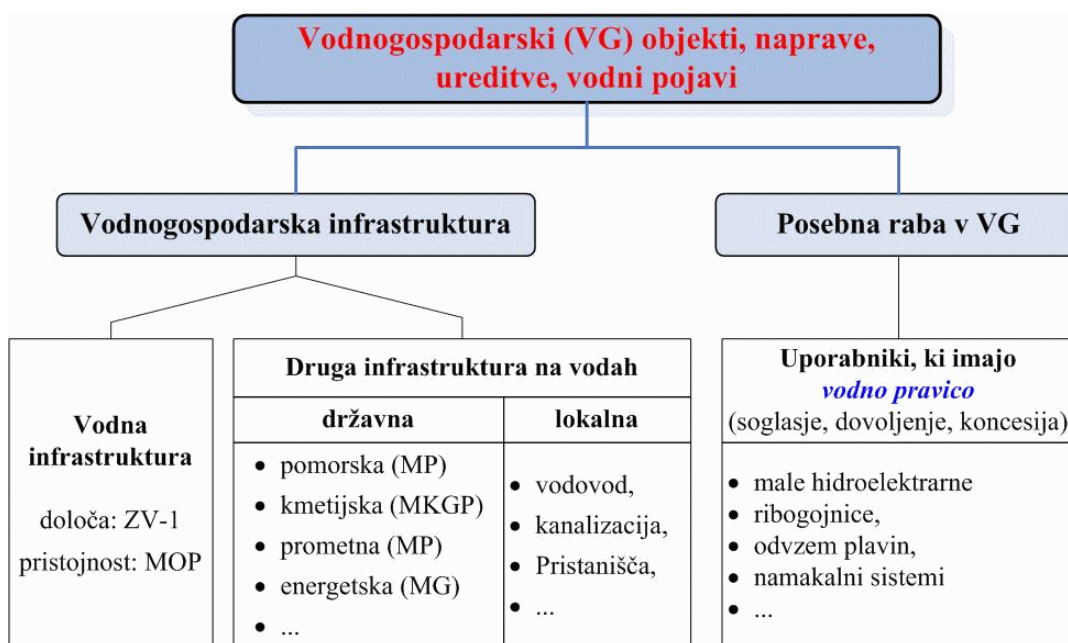
V nadaljevanju pa sta pri analizi in predstavitvi postopka makrokalibracije podani iteracijska metoda strokovnega pristopa in klasifikacijska metoda.

Na začetku tega poglavja je bilo že povedano, da je celotno področje raziskav na področju hidravličnega modeliranja prvenstveno namenjeno upravljalcem. Zato bo v nadaljevanju naloge najprej ustrezno predstavljen vidik upravljanja z vodooskrbnimi sistemi, zlasti na področju pristojnosti in organizacije izvajanja vodooskrbe.

2 UPRAVLJANJE Z VODOOSKRBNIMI SISTEMI

2.1 Udeleženci

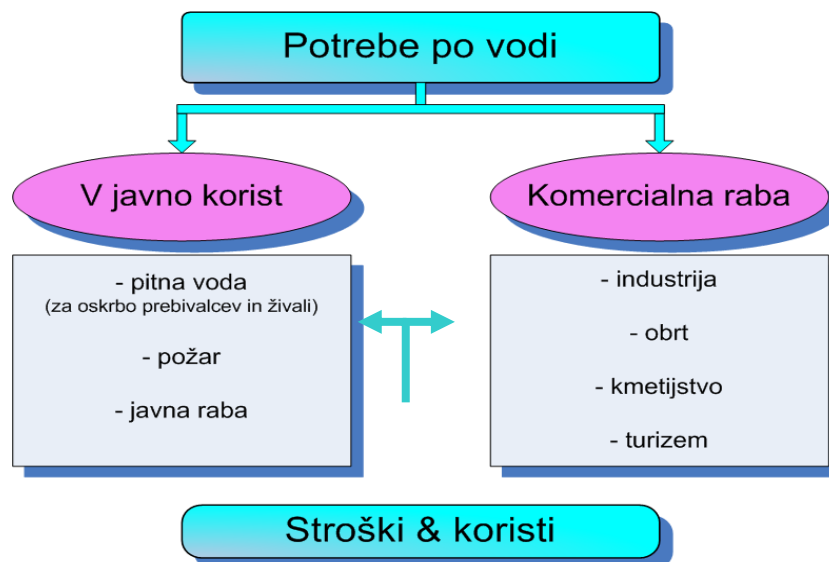
Vodooskrbni sistemi za zagotavljanje pitne vode v javno korist, za gašenje požarov in drugo uporabo vode za javno rabo (čiščenje javnih površin, zalivanje javnih parkovnih površin ipd.) se z vidika pravne systemske ureditve področja rabe vode in urejanja voda oziroma celovitega upravljanja z vodami uvrščajo v vodnogospodarsko infrastrukturo, katere upravljanje je v pristojnosti lokalnih skupnosti.



Slika 1 Pravno systemska ureditev infrastrukture in objektov s področja rabe vode in urejanja voda (Steinman et al., 2006)

Druga raba vode za komercialne namene se prav tako zagotavlja z vodooskrbnimi sistemi, ki so lahko popolnoma ločeni z lastnimi podeljenimi pravicami za rabo vode (vodna dovoljenja, koncesije), ali pa se koristijo obstoječi javni vodooskrbni sistemi, kjer se pravica do rabe vode ureja na podlagi obstoječih pravic rabe vode, s katerimi razpolagajo lokalne skupnosti (javne službe) ali drugi lastniki pravic. Zaradi dodatnih večjih količin vode je treba te pravice ponovno pravno pridobiti in urediti. Predvsem na področju mešane rabe vode, to je zagotavljanja vode v javno in zasebno korist z istim vodooskrbnim sistemom, je treba zlasti

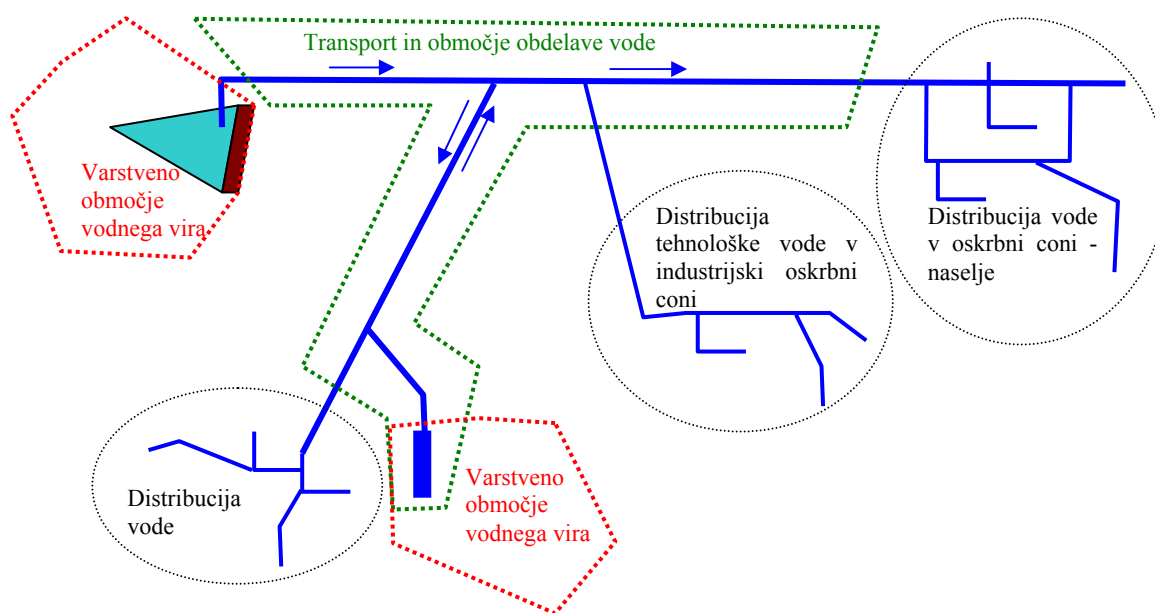
ekonomiko (stroški in koristi; načelo »uporabnik plača«) in prioritete (oskrba s pitno vodo prebivalcev ima prednost) ter pravne relacije in obveznosti ustrezno urediti (Steinman et al., 2006).



Slika 2 Kategorije potreb po vodi (Steinman et al., 2006)

Različne potrebe prebivalstva in gospodarstva po vodi se urejajo s podeljevanjem vodnih pravic. Pri oskrbi prebivalstva s pitno vodo kot neizpodbitno ustavno določeno pravico, ki je v pristojnosti države, je treba s primernim celovitim načrtovanjem poskrbeti, da so rabe vode med seboj usklajene, kar pomeni, da so zagotovljene ustrezne količine vode ustrezne kakovosti za vse podeljene pravice. V primeru zagotavljanja ustreznih količin pitne vode je tako eden od učinkovitih državnih mehanizmov varovanje obstoječih in v prihodnje potrebnih vodnih virov.

Pri zagotavljanju ustrezne vodooskrbe se v neki točki konča pristojnost države in se prične pristojnost lokalne skupnosti. Predvsem v primerih regionalne oskrbe s pitno vodo, ki je značilna za območja vododeficitarnosti, je ta razmejitev lahko nejasna. Zato je treba urediti tudi podlage za upravljanje in razpolaganje oziroma gospodarjenje z vodooskrbnim sistemom, na kar pa močno vpliva izbira sistema organiziranosti. Slika 3 prikazuje enega od primerov oskrbe z vodo, kjer so označena območja zagotavljanja količin vode (izgradnja in vzdrževanje akumulacije) in njihovega varovanja, ki je v pristojnosti države, in območja distribucije vode uporabnikom, ki je v pristojnosti lokalne skupnosti.



Slika 3 Eden od primerov razmejitve pristojnosti in obveznosti med državo in lokalno skupnostjo.

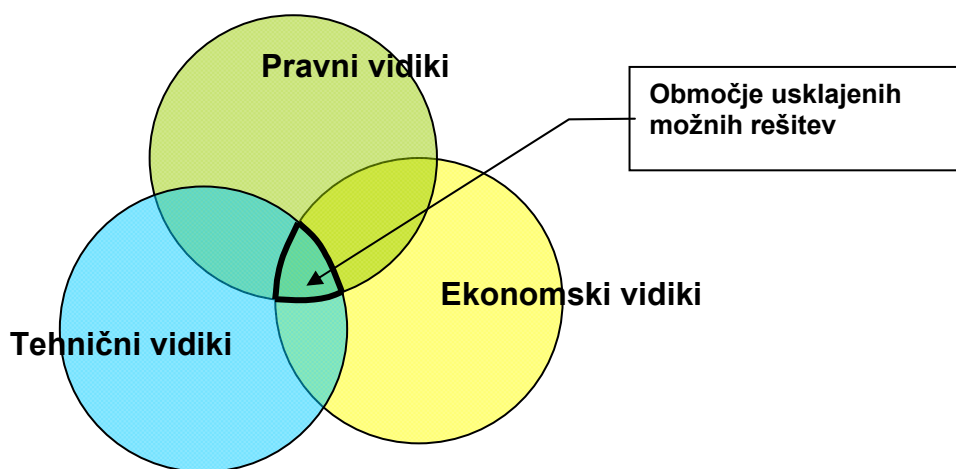
Vmesno območje, kjer se vrši potrebna priprava vode, njeno shranjevanje in transport pa se v skladu s tehničnimi, ekonomskimi in pravnimi vidiki, t.i. »T-P-E« pristopom, ki je podrobneje podan v naslednjem poglavju, ustrezno uredi sistem organiziranosti in pristojnosti, iz katerih seveda predvsem izhajajo tudi finančne obveznosti izgradnje in vzdrževanja ter nadgradnje (HEAWSP, 1999).

Enak »T-P-E« pristop kot na omenjenem nivoju zagotavljanja vodooskrbe velja tudi pri obravnavi in načrtovanju same distribucije vode po oskrbnih conah (upravljanje VS), ki je v pristojnosti lokalne skupnosti oziroma izbranega izvajalca javne službe ali upravljalca VS. Na tem nivoju se s tem pristopom predvsem ureja področje zagotavljanja ustreznega standarda dobave vode (tlaki, količine, kakovost ipd.), ki se zagotovijo z ustreznim načrtovanjem VS .

2.2 Pogoji in cilji delovanja oskrbnih con

Upravljanje VS zahteva obvladovanje različnih zahtev in pričakovanj, ki jih izražajo različni subjekti, povezani s področjem oskrbe s pitno vodo. »T-P-E pristop« (Slika 4) (Steinman et al., 2006) je pristop, ki celovito obravnava tehnično-tehnološke (T), pravne (P) in ekonomske vidike (E) ter eden od možnih načinov celovite obravnave vodooskrbe.

T-P-E pristop obravnava VS kot tehnično samostojno entiteto, ki obratuje v skladu s sprejetimi predpisi oz. tehničnimi smernicami, pri čemer je treba zagotoviti ekonomičnost investicije ter vzdrževanje in obratovanje skozi celotno življenjsko dobo sistema. Pravni vidiki za upravljalca praviloma niso predmet optimizacije delovanja, zato se jih upošteva kot fiksne robne pogoje. Prek pravnih vidikov se zajamejo tudi ekološki vidiki, ki se odražajo v veljavnih okoljskih predpisih. Že tehnično-tehnološki vidiki VS izkazujejo visoko kompleksnost s svojo razvejano infrastrukturo, dinamičnimi obratovalnimi razmerami, pogosto neznanimi fizikalnimi in obratovalnimi karakteristikami elementov in naprav.



Slika 4 Prikaz robnih pogojev »T-P-E pristopa«

Če se pri tem upošteva še ekonomska in stroškovna učinkovitost, predvsem pri določitvi prave cene za različne nivoje storitev oskrbe z vodo ali zagotovitev ustrezne podpore odločanju pri izdelavi učinkovite strategije zamenjave obnove omrežja, ki je na eni strani povezana s finančnimi vložki na drugi strani pa z zmanjšanjem stroškov oskrbe, se kompleksnost toliko bolj poveča (Kleiner et al., 2001).

Učinkovitost vodooskrbe mora izpolnjevati pet bistvenih zahtev (Slika 5). Mednje se šteje varnost oskrbe (zagotavljanje ustreznih količin pitne vode), kakovost (zagotavljanje ustrezne kakovosti pitne vode), nivo storitve strankam (kakovost storitev, ki jih opravlja javna služba oskrbovancem), trajnostni razvoj (zagotavljanje razvoja in nemotenega delovanja javne službe v prihodnosti) in gospodarnost oziroma ekonomičnost opravljanja dejavnosti oskrbe z vodo (povezana z infrastrukturo, organizacijskimi oblikami, idr.).



Slika 5 Petstebni model za primerjavo, kako učinkovita je dejavnost oskrbe z vodo (WD, 2005)

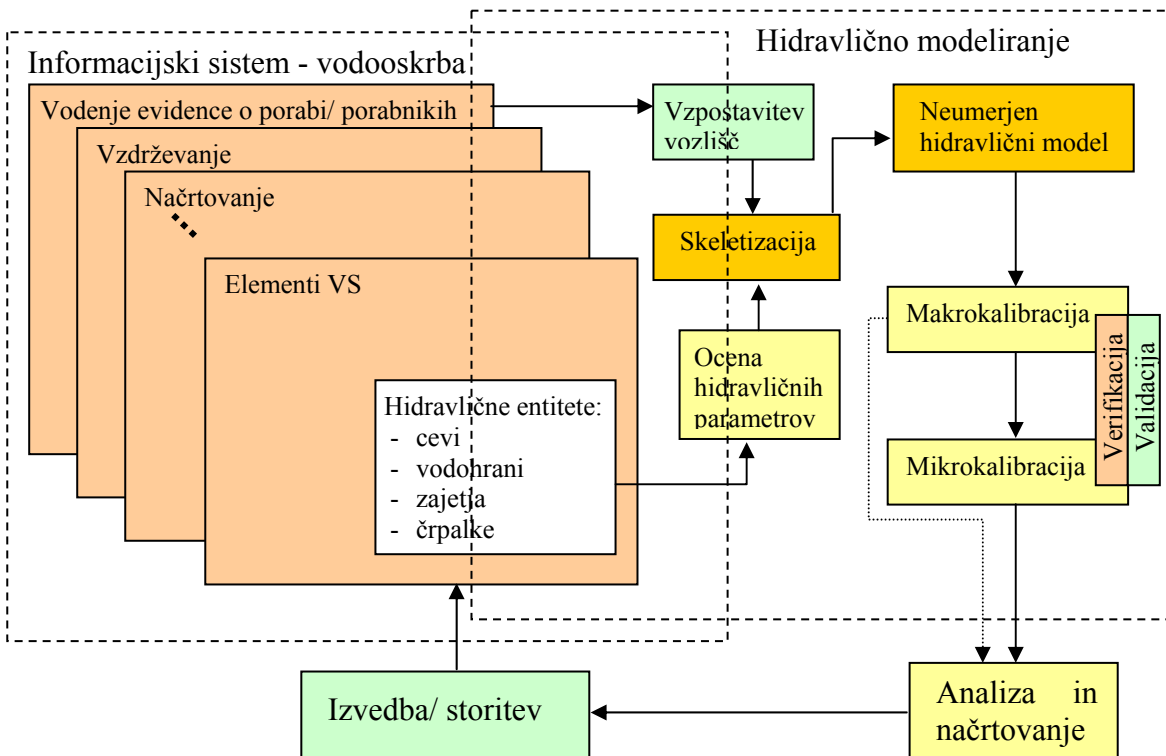
Za skladno upoštevanje omenjenih vidikov in obvladovanje procesov učinkovite oskrbe z vodo je danes na razpolago ustrezna podpora predvsem s področja vodenja evidenc tako podatkovnih kot geografskih in obravnave hidravličnega obnašanja VS, kar bo podrobneje predstavljeno v naslednjem podpoglavju.

2.3 Zasnova in informacijska podpora upravljanju

Razvoj informacijske tehnologije zagotavlja vse boljše ravnanje, razpoložljivost in dostopnost podatkov o vodooskrbnih sistemih, kar je pospešilo tudi uporabo hidravličnih modelov. GIS podpora v povezavi z ostalo informacijsko tehnologijo omogoča hitro in učinkovito vzpostavitev hidravličnih modelov ter njihovo vključitev v postopek analiziranja hidravličnih razmer, načrtovanja in v končni fazi tudi izvajanja potrebnih ukrepov za optimizacijo delovanja vodooskrbnih sistemov. Slika 6 prikazuje prepletenost upravljanja vodooskrbnih sistemov s poudarkom na hidravličnem modeliranju. Informacijski sistem služi kot vir razpoložljivih podatkov o fizičnih karakteristikah vodooskrbnega sistema, ki izhajajo iz dejansko znanih podatkov oziroma meritev posameznih elementov vodooskrbnega sistema. S

temi podatki je mogoče vzpostaviti neumerjen hidravlični model, katerega obsežnost je treba prilagoditi upravljavsko obvladljivim razmeram.

Hidravlično modeliranje ima pri organizaciji informacijskega sistema določene zahteve, saj je treba entitete, ki so podlaga za izdelavo hidravličnega modela ustrezno voditi in pripraviti.



Slika 6 Primer uporabe informacijskega sistema upravljalca za potrebe hidravličnega modeliranja.

Določene entitete, ki so sestavni del VS, kot so na primer jaški, merilne ure ipd., se načeloma ne vključijo v hidravlični model, zato se lahko vodijo ločeno le kot osnovne entitete VS v evidencah za upravljalca, predvsem zaradi nalog vzdrževanja. Podobno velja za podatke o porabi vode, vendar je v tem primeru ustrezno, če se ti podatki vodijo geografsko določljivo in z določenimi dodatnimi atributi. S tem je omogočeno pridobivanje informacij o porabi vode in njeni alokaciji, saj je pravilna porazdelitev porabe vode po vozliščih, ki so sestavni del hidravličnega modela, pomemben element pri umerjanju.

Iz podatkovnih virov različnega obsega in kakovosti je možno izdelati osnovni hidravlični model VS. Prvi korak je vzpostavitev neumerjenega hidravličnega modela, pri čemer mora biti podatkovna baza že ustrezno pripravljena, saj je v procesu zbiranja podatkov možnost vključevanja napačnih oziroma pomanjkljivih podatkov velika. Pri pridobivanju podatkov iz različnih virov in v različnih formatih je treba posebno pozornost nameniti preoblikovanju v enotno obliko. Hkrati je treba vzpostaviti ustrezno organizacijo vodenja informacijskega sistema, ki že iz ugotovitev hidravličnega modeliranja, predvsem umerjanja in kasneje tudi iz načrtovanja in izvedbe v stvarnem VS, z ustrezno povratno informacijo, sproti posodablja podatkovne baze.

Tudi področje ocene hidravličnih parametrov in skeletizacije je lahko že sestavni del podatkovne baze, saj se na primer hrapavost cevi kot pomemben hidravlični parameter pri obnašanju VS oceni na podlagi ostalih vodenih atributov, kot je na primer starost cevi in kemijske lastnosti vode. Povedano drugače, hidravlično modeliranje se začne že takrat, ko se pridobivajo podatki in se vodijo njihove evidence na način, ki je ustrezen za modeliranje.

Podatki o vodooskrbnih sistemih so lahko zabeleženi v različnih formatih, saj se jih pridobi iz različnih virov, ki opisujejo njihove fizične in obratovalne lastnosti. Pomembna je tudi presoja natančnosti pridobljenih podatkov, ki sestavljajo hidravlični model, in zanesljivosti njihovih virov. Pred samo vzpostavitvijo modela se zahteva analiza in izločitev očitnih anomalij in napak v podatkih, ki bi v procesu modeliranja in kasnejših simulacij privedle do večjih nepravilnosti.

Strukturiran seznam podatkovnih virov o vodooskrbnih sistemih je povzet po smernicah centra Water Research Centre, ki navaja, da podatke pridobimo iz:

- načrtov vodooskrbnih sistemov (grafični prikaz topologije sistema),
- podrobnih podatkov o vodnih virih in vodohranah,
- podatkov o cevovodih, črpalkah in črpalnih krivuljah, ventilih itd.,
- podatkov o meritvah pretokov in tlakov na sistemu ter monitoringu objektov,
- podatkov o porabi, načrpani in prodani vodi,
- podatkov o številu odjemalcev,
- podatkov o starosti, materialu in stanju cevovodov,

- podatkov o predvideni porabi na sistemu v prihodnosti,
- podatkov o obratovanju sistema.

Kot je bilo že povedano, je treba pridobljene podatke preoblikovati v enoten format, primeren za uporabo v procesu modeliranja. Zahtevan format podatkov za modeliranje ponavadi narekuje tudi izbira programskega orodja za določevanje hidravličnih razmer v vodooskrbnih sistemih, ki se uporablja v procesu modeliranja, in je s tehniškega vidika oblike podatkov precej specifičen. Vsebinski del preoblikovanja podatkov pa je večinoma enoten, saj je vezan na matematično formulacijo modelov. V naslednjem poglavju je podan podroben opis ustrezne priprave oblike podatkov.

V sklop podatkovnih virov za vzpostavitev modela sodijo tudi izkušnje in ugotovitve upravljavcev vodooskrbnega sistema, ki se vključujejo v proces hidravličnega modeliranja, v kolikor so njihovi izsledki pomembni za poznavanje problematike modela. Če je po pregledu in ovrednotenju pridobljenih podatkov ugotovljen utemeljen sum o nepravilnostih, je potreben terenski ogled in morebitne dodatne meritve na sistemu.

Po opredelitvi ciljev in namenov uporabe modela in z ustrezno pripravljenimi podatki se lahko z aplicirano stopnjo poenostavitve vzpostavi neumerjen hidravlični model, nato pa se prične s postopki ovrednotenja modela in merjenja (Slika 6). Najprej je treba identificirati grobe napake, ki se odpravijo s primerjavo med izračuni in pridobljenimi meritvami predvsem z naslova obratovanja sistema (nihanje gladine vode, bilanca vtoka vode v sistem iz vodnih zajetij in črpališč). Hkrati se določen nabor podatkov prihrani za testiranje, to je izvedbo verifikacije modela. Na tej stopnji model že izkazuje določeno ujemanje z obnašanjem dejanskega VS, vendar je treba za sprejemljivo ujemanje dejansko izvesti še proces mikrokalibracije, pri kateri se izvede ustrezna časovna meritev v primernem številu merilnih mest. Merilna mesta se izberejo s pomočjo analize občutljivosti, s katero se poiščejo čim bolj reprezentativne točke, v katerih bodo meritve podale največ podatkov o obnašanju sistema.

V tej točki se lahko še enkrat poudari, da dobro vodenje in stalno posodabljanje informacijskega sistema zelo zmanjša potrebo po izvajanju mikrokalibracije. Ujemanje meritev po izvedbi makrokalibracije in verifikacije ter preveritev modela na podlagi drugega

seta meritev v drugačnem obratovalnem stanju je lahko že izredno dobro in že zadošča kriterijem sprejemljive tolerance odstopanja izračunov od meritev. V takem primeru se lahko upravljalec že na podlagi makrokalibracije odloči za nadaljnje načrtovanje oziroma ukrepanje na VS.

Vzpostavitev hidravličnega modela realnega vodooskrbnega sistema je zahtevna naloga in kot taka zahteva podrobnejšo seznanitev. Zato je naslednje poglavje namenjeno področju matematičnega modeliranja, kjer so podrobneje predstavljena teoretična izhodišča, priprava neumerjenega hidravličnega modela in sam proces umerjanja z delitvijo na makro in mikrokalibracijo.

3 HIDRAVLIČNO MODELIRANJE

Osnovni namen strateškega analiziranja in načrtovanja hidravličnih razmer v vodooskrbnih sistemih, ki se praksi stalno izkazuje, je zagotovitev zahtevane količine vode odjemalcem ob ustreznih tlačnih razmerah in s sprejemljivim delovanjem vodohranov. Tudi dnevne operativne naloge upravljalcev so podprte z uporabo hidravličnih modelov. Ti jim omogočajo zanesljivejšo presojo v procesu odločanja o uporabi posameznih ukrepov za izboljšanje razmer v sistemu. S pomočjo hidravličnih modelov je izobraževanje kadrov veliko hitrejšo, saj se z določenim vodooskrbnim sistemom ne srečajo le fizično in parcialno, ampak ga dojemajo celovito z vsemi pripadajočimi hidravličnimi veličinami, ki jih v omejenem času ni moč obravnavati samo s terenskimi ogledi in analizo različnih načrtov. Z uporabo hidravličnih modelov, ki obratujejo v pogojih z različnimi obtežnimi primeri, je spoznavanje karakteristik vodooskrbnega sistema hitrejšo in bolj učinkovito.

Hidravlični modeli VS so pomembno orodje v procesu odločanja, saj se z njimi simulira delovanje vodooskrbnega sistema in preverja različne ukrepe. Ena od splošnejših opredelitev deli namene hidravličnega modeliranja v naslednjih šest skupin (Walski et al, 2003):

1. splošno dolgoročno načrtovanje razvoja in obnove vodooskrbnih sistemov,
2. študije ustreznosti delovanja vodooskrbnega sistema kot hidrantnega omrežja za zagotavljanje požarne varnosti,
3. raziskovanje kakovosti pitnih voda,
4. upravljanje vodooskrbnih sistemov z vidika porabe energije,
5. projektno načrtovanje hidravličnih razmer v vodooskrbnih sistemih in
6. operativno (dnevno) upravljanje sistemov, vključujoč usposabljanje strokovnega kadra, načrt zaščite in reševanja na vodooskrbnih sistemih in odkrivanje napak na vodooskrbnih sistemih.

Navedene skupine namenov za hidravlično modeliranje so pomembna izhodišča za opredeljevanje pristopa k izdelavi oziroma uporabi hidravličnih modelov. Na primer, splošno dolgoročno načrtovanje oziroma analiziranje vodooskrbnih sistemov je vitalnega pomena za vzdrževanje zahtevanega nivoja standardov oskrbe s pitno vodo za planska obdobja od 5 do 20 let, kar pa ne vpliva samo na sam VS. Analize razvoja vplivajo tudi na prostorski in

gospodarski razvoj mesta, naselja in širšega območja upravljanja. V to skupino analiz spada tudi preverjanje različnih scenarijev obremenitve sistema, kar nam omogoča predčasno identifikacijo težav in napak, ki bi lahko v prihodnosti privedle do znižanja kakovosti oskrbe s pitno vodo.

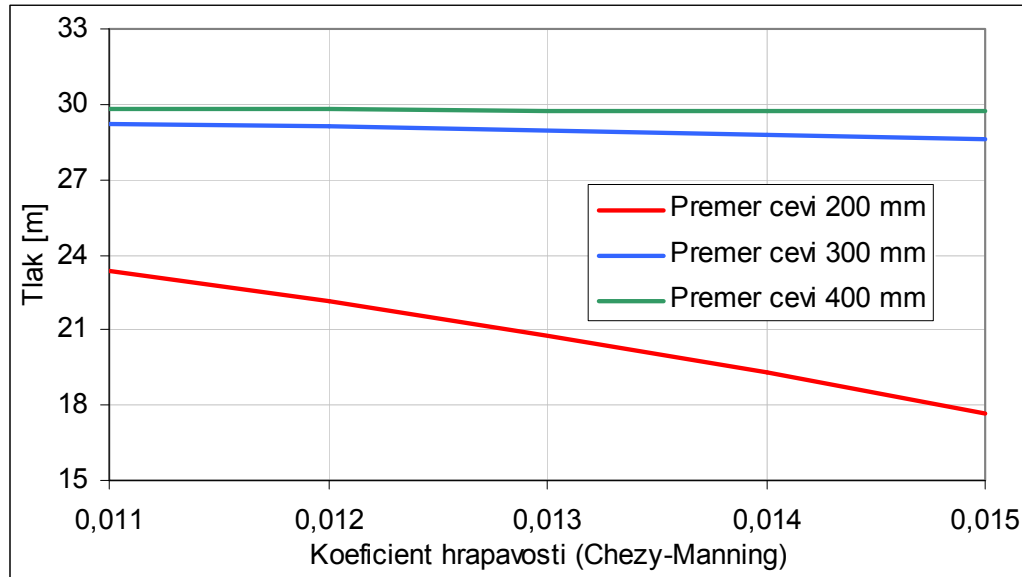
Hidravlični modeli so matematična formulacija obnašanja in odziva dejanskega vodooskrbnega sistema. S pomočjo podatkov o fizičnih karakteristikah sistema, obtežnih primerih in robnih pogojih simulirajo delovanje realnih vodooskrbnih sistemov. Računalniški program uporablja navedene podatke o sistemu, da izoblikuje sistem enačb, ki se rešujejo z uporabo določene metode reševanja tega sistema enačb.

Z umerjanjem hidravličnih modelov VS se je ukvarjalo mnogo raziskovalcev, ki so razvili različne pristope k temu problemu. Vsi pristopi k reševanju problema umerjanja hidravličnih modelov so iterativni, kar pomeni visoko časovno in delovno intenzivnost. Kot primer je podan pristop avtorjev Ormsbee in Lingireddy, ki je sestavljen iz naslednjih sedmih korakov:

1. identifikacija namena in uporabe hidravličnega modela,
2. določitev izhodišča ocene vrednosti parametrov umerjanja,
3. zbiranje podatkov oziroma meritev na VS,
4. vrednotenje napovedi hidravličnega modela (zanesljivost, točnost idr.),
5. izvedba »makro kalibracije« oziroma grobega umerjanja parametrov,
6. izvedba občutljivostne analize parametrov umerjanja in izbor merilnih mest in
7. izvedba »mikro kalibracije« oziroma finega umerjanja parametrov umerjanja.

Dobra opredelitev pričakovane uporabe hidravličnega modela je prvi in najpomembnejši korak, saj izdelovalcu modela omogoča izbrati ustrezen nivo natančnosti priprave modela, nabor potrebnih podatkov in sprejemljiv nivo tolerance napake med meritvami in izračuni (Ormsbee et al. 1997). Na primer, pri načrtovanju glavnih transportnih cevovodov, ki vodijo od objektov zajema vode skozi oskrbovalno cono do protiležnega vodohrana in katerih premeri so relativno veliki, je natančna analiza določevanja koeficienta hrapavosti pri modeliranju transportnih cevovodov vprašljiva, saj se glede na večanje premera cevi vpliv spremembe koeficienta hrapavosti lahko zmanjšuje, zlasti v primeru počasnejšega toka vode po cevi. Slika 7 prikazuje tak primer vpliva spremembe koeficienta hrapavosti na tlak v

določenem vozlišču pri različnih premerih cevi, kjer so izračuni potekali na enostavnem hidravličnem modelu, ki gravitacijsko povezuje vodno zajetje z vozliščem z višinsko razliko 30 m, dolžino cevi 10000 m in odvzemom vode 10 l/s.



Slika 7 Prikaz vpliva spremembe koeficienta hrapavosti na tlak v ceveh z različnim premerom

Glede na gornji primer se je treba vprašati, ali bo natančnejša določitev koeficienta hrapavosti sploh praktično izvedljiva. Čeprav je zgornji prikaz večjega vpliva spremembe koeficienta hrapavosti na tlak vode pri manjših premerih cevi razviden neposredno iz enačb, lahko tak enostavni ilustrativni hidravlični primer upravljalcu nudi nov prispevek k razumevanju hidravličnega obnašanja VS, kar je že poudarjeno v prvem odstavku tega poglavja.

3.1 Teoretična izhodišča

Z vidika hidravlike se lahko k obravnavi vodooskrbnih sistemov z upoštevanjem stalnega toka vode (Steinman, 1992) pristopi na dva načina. Prvi pristop izhaja iz predpostavke, da je poraba, ki je določena v vozliščih, vedno zagotovljena, in se imenuje »pristop s kriterijem porabe« (ang. demand-driven). Drugače povedano, hidravlične razmere v sistemu narekuje povpraševanje po vodi v posameznih vozliščih, glede na kar se na podlagi kontinuitete v vozliščih in ohranitvi energije po vseh obstoječih poteh in zankah formulira sistem enačb. Na

podlagi tega sistema enačb se v konvergentnem postopku izračunajo spremljajoči tlaki in pretoki ne glede na njihovo fizikalno stvarnost. Za izvajanje hidravličnih izračunov s tem pristopom so danes v uporabi številne metode (Hardy-Cross, Newton-Raphson, itd.).

Ta pristop privzema večina programov za hidravlične analize. Njegova teoretična izhodišča so ustrezno podana s »hibridno vozliščno-zankasto metodo« ali t.i. »gradientno metodo« (Todini et al, 1987, Salgado et al, 1988), kjer se, enostavno povedano, v vodooskrbnem sistemu z N stičnimi vozlišči s pomočjo reševanja določenega sistema enačb z iteracijskim procesom rešujejo enačbe ohranitve energije, ki določajo odnos pretok – energijske izgube v cevi med i -tim in j -tim vozliščem z izrazom

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2, \quad (1)$$

kjer so H celotna energija vozlišča, h energijske izgube, r koeficient upora (koeficient trenja), Q pretok, n eksponent pretoka in m skupni koeficient lokalnih izgub v cevi med i -tim in j -tim vozliščem, ter enačbe ohranitve pretokov (kontinuiteti) v posameznih vozliščih

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad \text{za } i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

kjer je D_i zahtevan iztok v vozlišču i . Po dogovoru je vtok v vozlišče označen kot pozitiven.

Ena od pomembnejših programskih oprem za hidravlično modeliranje vodooskrbnih sistemov, ki je tudi brezplačno dostopna na medmrežju, je programska oprema EPANET 2.0 (Rossman, 2000), ki ponuja uporabniku solidno delovno programsko okolje. Hkrati je omenjena programska oprema osnova tudi za številne druge programe (Preglednica 1), ki za plačljivo dodano vrednost ponujajo različno nadgradnjo za analize, optimizacijo, načrtovanje, enostavnejšo obdelavo vhodnih podatkov ipd.

V primeru ustreznega načrtovanja vodooskrbnega sistema hidravlični model izkaže primerne tlake, ki se izračunajo v posameznih vozliščih. Po drugi strani pa npr. previsoko določena obremenitev sistema s porabo rezultira v izračunu prenizkih tlakov, celo negativnih. Pri tem je ponavadi programska oprema opremljena z ustreznim naborom opozoril, ki uporabnika opozarja na slabosti načrtovanega sistema.

Preglednica 1 Razpoložljiva programska oprema za hidravlično modeliranje in modeliranja kakovosti vode v vodooskrbnih sistemih na angleškem govornem območju (WDSA, 2005)

Programska oprema	Podjetje	EPANET osnova	Spletna stran
AQUIS	Seven Technologies		www.7t.dk/aquis
EPANET	EPA	X	www.epa.gov/ord/nrmrl/wswrd/epanet.html
InfoWater H2ONET/H2OMAP	MWHSoft	X	www.mwhsoft.com
InfoWorks WS	Wallingford Software		www.wallingfordsoftware.com
MikeNet	DHI, Boss International	X	www.dhisoftware.com/mikenet
Pipe2000	University of Kentucky		www.kypipe.com
PipelineNet	SAIC, TSWG	X	www.tswg.gov/tswg/ip/pipelinettb.htm
SynerGEE Water	Advantica		www.advantica.biz
WaterCAD/ WaterGEMS	Haestad Methods	X	www.haestad.com
STANET	Fisher-Uhrig Engineering		www.stanet.net
Wadiso	GLS Eng. Software	X	www.wadiso.com

Glavna pomanjkljivost pristopa z zagotavljanjem porabe je v tem, da se ne da izmeriti vpliva izpada določenega dela sistema na samo vodooskrbo, torej kakšno je dejansko zagotavljanje določenih količin vode v posameznem vozlišču. Na primer, če je v nekem vozlišču pri normalnih obratovalnih pogojih zagotovljena določena poraba (rezultirajoči tlaki v tem vozlišču so zadostni) se pri izjemnih dogodkih (npr. požarni hidrantni odvzem ali lom cevi) ne da ugotoviti, koliko je v tem vozlišču motena vodooskrba, saj je zahtevana poraba še vedno zagotovljena, le rezultirajoči tlaki so lahko v tem ali več vozliščih celo negativni. Ugotoviti se da le, da sistem ne obratuje pravilno.

Drugi pristop se imenuje »pristop s kriterijem tlakov« (ang. pressure-driven), kjer je prioriteten pravi izračun tlakov v vodooskrbnem sistemu. V vozlišču je zagotovljena popolna vodooskrba le, če je zagotovljen minimalni zahtevani tlak v tem vozlišču. Drugače se v tem vozlišču zagotovi le določen del zahtevane porabe, katera se opredeli v funkcijski odvisnosti porabe od tlaka v tem vozlišču. Kot je bilo že omenjeno, je »pristop s kriterijem porabe« dovolj natančen v primeru normalnega obratovanja sistema, ki ga je treba v procesu

načrtovanja tudi zagotoviti. Pristop s kriterijem tlakov, kjer se določita dejanska poraba in tlak v vsakem vozlišču vodooskrbnega sistema (Mays L. W. et al., 2004), je vsekakor bolj primeren pri analizi zanesljivosti delovanja sistema oziroma pri izjemnih primerih (lom cevi, požarna oskrba), ko prihaja do pojava nizkih tlakov v sistemu, saj se z izračuni neustreznost oskrbe v posameznih območjih lahko ustrezno kvantitativno ovrednoti.

V nasprotju s pristopom z zagotavljanjem porabe se pri pristopu z določanjem tlakov poraba upošteva kot spremenljivka, ki jo določa relacija odvisnosti porabe od tlaka. Osnovna oblika relacije je podana z enačbo

$$H_j = H_j^{\min} + K_j Q_j^{n_j}, \quad (3)$$

kjer so H_j energija vozlišča j , ki ustreza porabi Q_j (iztoku) v vozlišču j , K_j koeficient iztoka, n_j eksponent porabe vozlišča j in H_j^{\min} minimalna zahtevana energija, pod katero je iztok v vozlišču j nezadovoljiv ali enak nič.

Ker je poraba neznanka, se enačba za reševanje sistema enačb preoblikuje v naslednjo obliko

$$Q_j = \left(\frac{H_j - H_j^{\min}}{K_j} \right)^{1/n_j}. \quad (4)$$

Pri analizi izračuna tlakov se prav tako upošteva enačba bilance pretoka, v kateri je treba izvesti še zamenjavo D_i z izračunano porabo Q_j v enačbi (2). Za določitev rešitev se prav tako po določenem iteracijskem postopku rešuje podani sistem enačb (Gupta et al., 1996; Tabesh, 1998).

Kot je bilo že podano, lahko analiza s pristopom zagotavljanja tlakov poda nerealne vrednosti, npr. negativne tlake, to je podtlake. V takih primerih je analiza s pristopom izračuna tlakov primernejša, saj analiza določi vozlišča, v katerih bo prišlo do neustrezne oskrbe z vodo. Po drugi strani pa je treba za ustrezno analizo izvesti obsežen postopek pridobivanja podatkov in umerjanja hidravličnega modela za določitev koeficientov iztokov K in eksponentne vrednosti n , v najslabšem primeru za vsako vozlišče hidravličnega modela posebej (Gupta et al., 1996). Prav tako zaradi preobčutljivosti in posledično nezanesljivosti slednje analize zaradi napačno določenih omenjenih koeficientov in parametrov dejansko na razpolago ni dovolj robustnih pristopov k reševanju in analizi. Glede na slednji dejstvi danes praktično vsa programska

oprema za hidravlično analizo in analizo zanesljivosti delovanja za splošno rabo temelji na »pristopu z zagotavljanjem porabe«.

Da bi se vseeno zagotovila ustrezna analiza, predvsem na področju ugotavljanja zanesljivosti delovanja vodooskrbnega sistema, je danes razvitih več metod, ki dokaj uspešno nadgrajujejo pristop zagotavljanja pretokov. S temi metodami se v matričnem reševanju sistema enačb poraba določi kot funkcija tlakov; metode so razvite iz osnovne enačbe za določitev odvisnosti iztoka od tlaka (Rossman, 2000)

$$Q_j = K_j H_j^c, \quad (5)$$

kjer je c iztočni eksponent, ki je odvisen od oblike odprtine. Takšni razviti algoritmi se vgrajujejo kot dodatek programski opremi (Cheung et al., 2005).

Da bi se izognili omenjenim slabostim hidravličnega modeliranja in analiz s »pristopom s kriterijem porabe«, je bilo razvitih še nekaj pristopov. Ena od njih je tudi tako imenovana »node flow« analiza, ki napoveduje učinkovitost vodovodnega sistema v okvari (Bhave, 1991). Metoda temelji na predpostavki, da na primer v primeru izpada določenega dela cevovoda na vodooskrbnem sistemu ni možno zagotoviti zahtevane porabe v vozliščih, in je metoda analize podana kot optimizacijski problem, ki povezuje gradiente tlaka z razpoložljivimi dotoki vode v vozlišča. Kot aplikacija »node flow« analize je bil razvit tako imenovan semi pristop s kriterijem porabe (SPDA, ang. prev. Semi-pressure-driven analysis), ki se na podlagi obstoječih orodij s »pristopom s kriterijem porabe« (EPANET 2.0) uporablja za napovedovanje delovanja vodooskrbnega sistema v primeru izrednih hidravličnih obremenitev, kot je na primer požarna poraba, izpad dela sistema ipd. (Ozger, 2003). Taka analiza je primerna predvsem za naslednja področja analiz:

- izoliranje (zaprtje) dela sistema,
- ugotavljanje dejanske porabe v vozliščih,
- določitev območij vodooskrbnega sistema z največjim tveganjem izpada in
- iskanje ustreznih ukrepov.

V nadaljevanju je obravnavano hidravlično modeliranje s "pristopom zagotavljanja porabe", ki je, kot je bilo v tem poglavju obdelano, tudi bolj razširjeno in zaradi enostavnosti primernejše za obravnavo vodooskrbnih sistemov. Če je vodooskrbni sistem zelo obvladljiv in

določljiv, na primer pri namakalnih sistemih ali ločenih sistemih za zagotavljanje požarne varnosti, kjer proizvajalci teh sistemov priskrbijo tudi vrednosti koeficientov iztoka K in eksponentne vrednosti n za tlačno soodvisnost, pa imajo različna orodja za hidravlično modeliranje s "pristopom z zagotavljanjem porabe" že vgrajene ustrezne algoritme (Rosmann, 2000).

3.2 Elementi hidravličnega modela

Hidravlični model je sestavljen iz funkcionalno pomembnih elementov VS, ki jih je treba ustrezno voditi v geografskem informacijskem sistemu vodooskrbe (Slika 8). Entitete, ki morajo zaradi hidravličnega modeliranja biti ustrezno pripravljene in so v nadaljevanju podrobneje predstavljene, so naslednje:

1. Cevi
2. Zajetja (zbiralniki)
3. Vodohrani
4. Črpalke
5. Ventili
6. Vozlišča in poraba
7. Sestavljeni objekti

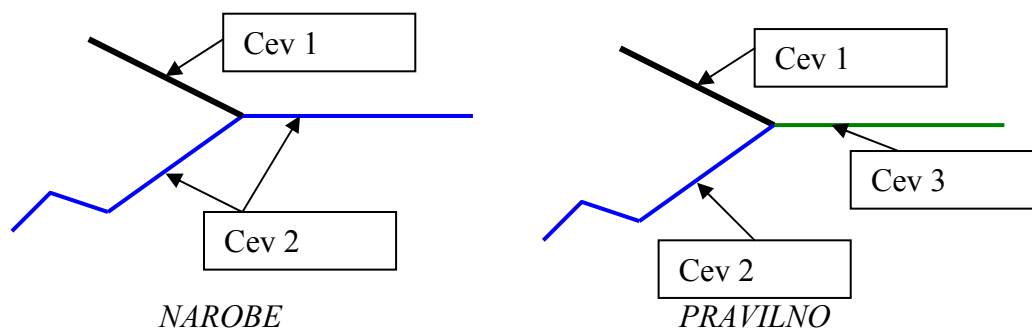
Entitete se v osnovi delijo v točkovne (zajetja, vodohrani, črpalke, ventili in vozlišča) in linijske elemente (cevi). Za točkovna elementa črpalka in ventil je potrebna uvedba novega izraza, saj se v GIS slednja vodita kot točkovna elementa, v hidravličnem modelu pa sta skonstruirana kot linijski element z začetno in končno točko. Zato se ju vodi kot virtualne (navidezne) linije, ki so podrobneje obdelane v podpoglavju 3.2.6.

V nadaljevanju tega podpoglavja so podrobneje opisani posamezni zgoraj naštetih elementi. Pri tem je poudarek predvsem na ustrezni pripravi atributov za vzpostavitev hidravličnega modela s »pristopom z zagotavljanjem porabe«.

3.2.1 Cevi

Cevi so eden od linijskih elementov. Osnovne geometrijske karakteristike za vzpostavitev hidravličnega modela so naslednje:

- cevi morajo biti predstavljene z linijskim elementom "polyline" ali "3D polyline",
- povezane cevi sistema se morajo stikati v skupnih točkah, v katerih se morajo posamezne cevi končati,
- v sistemu ne sme biti ločenih delov, ki nimajo lastne oskrbe (vodohran, vodni vir),
- zaradi ocene hrapavosti je ustrezno, če se vodi tudi evidenca o starosti cevi (Slika 9), o lomih in tudi o drugih podatkih, ki bi lahko pomagali pri ustrezni oceni hidravličnih parametrov cevi.



Slika 8 Prikaz načina stikanja posameznih cevi vodooskrbnega sistema – vsak stik zahteva ločene entitete za vse stične elemente

Atributi o ceveh, ki so potrebni za vzpostavitev hidravličnega modela, so:

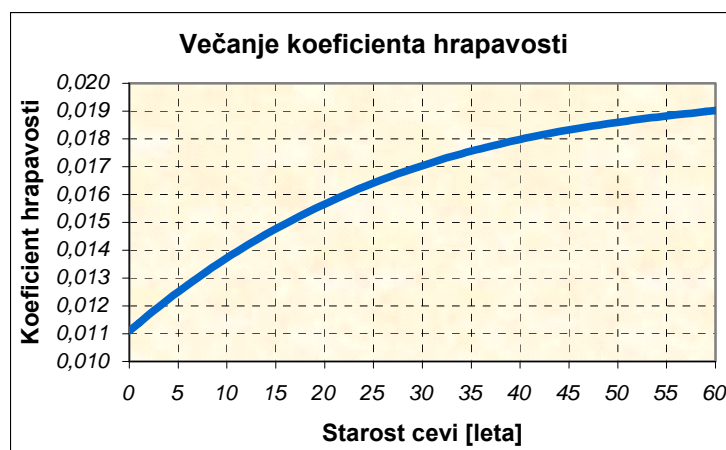
- *identifikacijska oznaka*, ki je ponavadi identifikacijska številka (neponovljiva)
- *premer*, [mm]; podan mora biti notranji premer cevi
- *dolžina*; avtomatična določitev z današnjimi programskimi orodji (GIS)
- *začetno (Node1) in končno (Node2) vozlišče*; avtomatična določitev s programskimi orodji

Ostali podatki o ceveh, ki so potrebni za analizo hidravličnega modela:

- *lokalne izgube*. Določi se jih, če so zaznavne, na primer, če predstavljajo >10 % od vseh izgub na dolžino cevi, to je predvsem v območjih, kjer se pojavljajo velike hitrosti

vode, to je predvsem v območju črpalk, ali se nahaja veliko spojnih in zapornih elementov, zavojev ipd.

- *status*, ki določa ali je cev odprta ali zaprta. Možno je določiti tudi enosmernost, ki dopušča tok samo v eni smeri. Smer toka je določena od začetnega vozlišča proti zaključnemu vozlišču.



Slika 9 Primer večanja koeficienta hrapavosti glede na staranje cevi (jeklene in litoželezne cevi), saj se lahko pojavijo obloge ali razjede na ostenju – Priceov diagram.

3.2.2 Zajetja (zbiralniki)

V to skupino elementov spadajo poleg različnih tipov objektov zajetij tudi vodnjaki in ostali elementi, ki predstavljajo vir vode s stalno gladino, kamor spadajo tudi jezera. Če kota vode v zajetjih niha, se nihanje lahko v modeliranju zajame s koeficienti nihanja.

Zahtevani podatki:

- *identifikacijska oznaka*, npr. **Vir_1**

Ostali podatki, ki so potrebni za analizo hidravličnega modela:

- *kota gladine vode*, [m.n.v.]
- *vzorec nihanja gladine*, s katerim se določi časovno spreminjanje gladine po urah glede na pripisano *gladino vode*;

Za vodni vir, na primer jezero, se lahko uporabi tudi nadomestni element vodohran, pri čemer pa je treba ustrezno zmodelirati volumen, površino jezera pri določeni koti gladine vode in vtoke v jezero. Primer je podan v poglavju 3.2.8.

3.2.3 Vodohrani

Vodohrani so elementi z določeno prostornino, v katerih gladina niha glede na trenutno bilanco vtoka in iztoka vode ter njihove dimenzije. Določijo se robni pogoji maksimalne in minimalne kote gladine vode.

Zahtevani podatki:

- *identifikacijska oznaka*, npr. **VH_4**

Ostali podatki, ki so potrebni za analizo hidravličnega modela:

- *višina*, s katero se opredeli nadmorska višina **dna** vodohrana [m.n.v.]
- *premer* [m]
- *začetna gladina* je privzeta gladina vode v vodohranu [m]
- *maksimalna gladina* določa najvišji nivo vode v vodohranu [m]
- *minimalna gladina* določa najnižji nivo vode v vodohranu [m]
- *prostorninska krivulja* za vodohrane s spreminjajočo prostornino glede na višino, s katero se določi način spreminjanja prostornine ([m³]) glede na gladino vode ([m]) v vodohranu (Preglednica 2).

Preglednica 2 Primer določitve spreminjanja prostornine vodohrana glede na globino vode v vodohranu

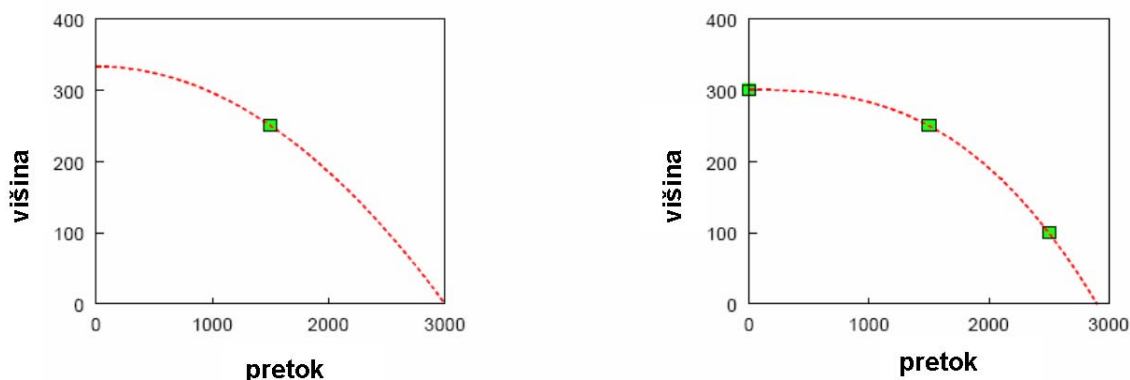
Id	Globina	Prostornina
Vodohran1	1	100
Vodohran1	2	300
Vodohran1	3	400

3.2.4 Črpalke

Pretakanje tekočin po ceveh je običajno posledica težnosti, ki je izražena v razliki potencialne energije (višja kota vodnih virov od točk porabe vode). Pretok pa se lahko doseže tudi s pomočjo dodane energije črpalke, če je treba zagotoviti tok vode navzgor (na višjo koto) ali pa za povečanje navzdol, če je treba zagotoviti večji dotok vode.

Zahtevani podatki:

- *identifikacijska oznaka*, npr. **CR1**
- *karakteristike*, s katerimi se določijo lastnosti črpalke:
 - *Višina črpanja**, ki je določena s krivuljo (Slika 10), ki določa odvisnost višine črpanja [m] od količine črpanja [l/s], (Preglednica 3),
 - *Moč črpalke*, ki se določi v kW. Pri taki določitvi se predvideva, da črpalka vzdržuje enak nivo energije ne glede na pretok vode. Če se določi *Moč črpalke*, ni treba določiti *Višine črpanja* in obratno. Ponavadi se uporablja določitev moči črpalke, če črpalna krivulja ni na voljo,

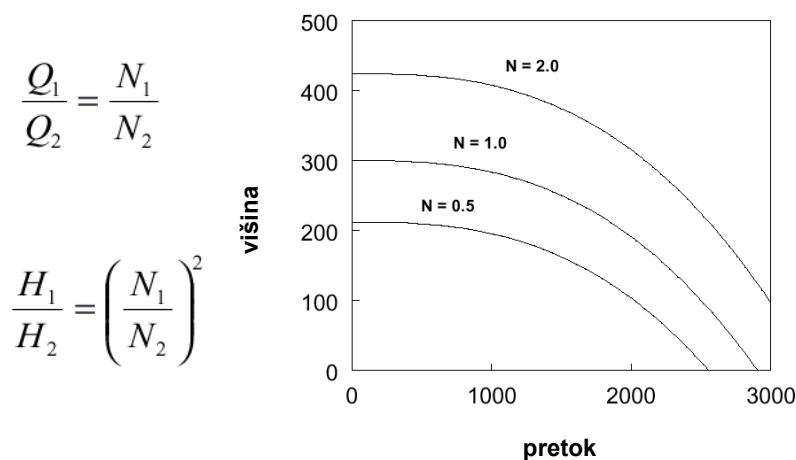


Slika 10 Primer določitve črpalne krivulje z eno točko (levo) ali tremi točkami (desno) (Rossman, 2000)

Preglednica 3 Primer določitve črpalne krivulje

Id	[l/s]	[m]
CR1	20	80
CR1	30	70
CR1	40	40

- *Hitrost črpalke*, s katero se relativno določi odstopanje črpalnih karakteristik črpalke od privzete črpalne krivulje. Če gre za črpalko, pri kateri je možna regulacija različnih hitrostih (N), se pretoki (Q) in višine črpanja (H) spreminjajo po enačbah, ki jih prikazuje slika 11,
- *Vzorec delovanja črpalke*, s katerim se določi časovno spreminjanje delovanja črpalke po urah, na primer z vrednostima 1 (vključena) in (izključena).



Slika 11 Spreminjanje črpalnih krivulj glede na različno nastavljeno hitrost

3.2.5 Ventili

Zahtevani podatki:

- *identifikacijska oznaka*, npr. VN_1
- *premer*, [mm]
- *tip ventila*, na primer:
 - *Ventil za znižanje tlaka* (reducirni ventil), zniža tlak na določeno vrednost [bar]/[m]
 - *Ventil za vzdrževanje tlaka* (razbremenilni ventil) [bar]/[m]
 - *Ventil za zmanjšanje tlaka*, zniža tlak za določeno vrednost [bar]/[m]
 - *Ventil za uravnavanje pretoka*, zniža pretok na določeno vrednost [l/s]
 - *Pripirni ventil*, pri katerem se zniža tlak s pomočjo povzročanja lokalne izgube
 - *Splošni ventil*, pri katerem določimo krivuljo, ki določa odvisnost izgub [bar]/[m] od pretoka [l/s]

- *nastavitev*, vnos nastavljene vrednosti ([m], [l/s], lok. izguba) ali identifikacijske oznake krivulje

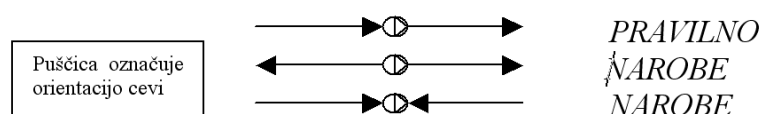
Zaporni ventili t.i. zapirachi se lahko ustrezno zmodelirajo že z uporabo nadomestnega elementa cevi, ki se ji v primeru zaprtja zapiracha določi status zaprto. V takem primeru se lahko tudi hidravlični vpliv odprtega ventila nadomesti z lokalno izgubo v cevi, seveda če bi se s tem bistveno izboljšala natančnost izračunov.

3.2.6 Virtualne linije

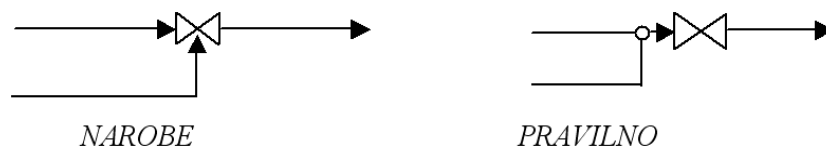
Elementa črpalka in ventil spadata med t.i. virtualne linije. S pojmom virtualna linija se označi elemente, ki so v prostorskih podatkovnih bazah predstavljeni kot točke, vendar so v hidravličnih modelih (npr. v Epanet-u) predstavljeni kot linijski elementi.

Predstavitev črpalke in ventila kot virtualni liniji zahteva nekaj dodatnih določil pri pripravi podatkov glede na ostale točkovne elemente (vozlišče, zbiralnik in vodohran):

- *orientiranost virtualne linije*, ki se določi z orientiranostjo stičnih cevi. Virtualna linija se mora obvezno nahajati med dvema cevema (ne na koncu cevi), ki sta orientirani v isto smer, in to v smer, v katero deluje virtualna linija. Orientacija cevi se določi iz začetnega v končno vozlišče (Slika 12),
- virtualna linija je lahko stičišče samo dveh orientiranih cevi (Slika 13).



Slika 12 Pravilno orientiranje cevi v črpalki.



Slika 13 Pravilno stikanje več cevi v bližini črpalke ali ventila.

3.2.7 Vozlišča in poraba

Vozlišče je tip elementa, v katerem se lahko določi poraba in izgube vode. Hidranti v vodooskrbnem sistemu se prav tako določijo z elementom vozlišče. Vozlišče se mora nahajati v vseh stičiščih in na koncih posameznih cevi, v katerih ni drugih točkovnih vodooskrbnih objektov (zbiralnik, vodohran, črpalka in ventil).

Podatki o vozliščih, ki so potrebni za vzpostavitev hidravličnega modela:

- *identifikacijska oznaka*, ponavadi zaporedna številka. Večina programskih orodij na področju hidravličnega modeliranja omogoča avtomatično oštevilčenje vseh elementov vodooskrbnega sistema.

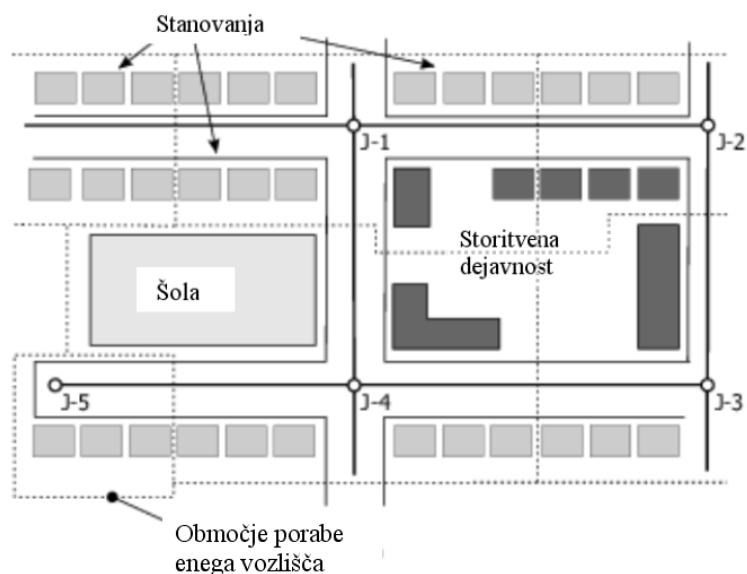
Ostali podatki, ki so potrebni za analizo hidravličnega modela:

- *višina*, nadmorska višina [m.n.v.]
- *poraba*, [l/s]
- *vzorec nihanja porabe*, s katerim se določi časovno spreminjanje porabe po urah glede na pripisano *porabo* (npr. srednja dnevna poraba); vzorce se posebej definira v lastnih Preglednicah, na primer določitev količnika porabe vode v vozlišču, s katerim se množi pripisana poraba, prikazuje Preglednica 4.

Preglednica 4 Določitev količnika porabe vode v vozlišču

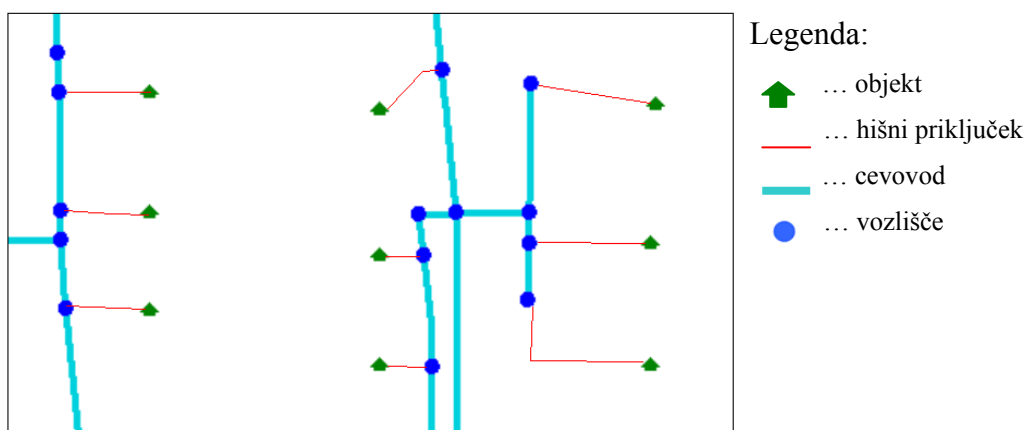
Id	Koeficient
Poraba_1	0.4
Poraba_1	0.6
Poraba_1	0.9
Poraba_1	1.2
Poraba_2	1
Poraba_2	1.5
Poraba_2	1.5

Ker so lahko na vozlišča vezani različni tipi porabnikov (gospodinjstva, industrija, storitvena dejavnost), se lahko vzorec porabe od vozlišča do vozlišča razlikuje in je lahko tudi kombinacija več vzorcev porabe, če so nanj vezani porabniki različnega tipa (Slika 14).



Slika 14 Primer porazdelitve porabe različnega tipa po vozliščih.

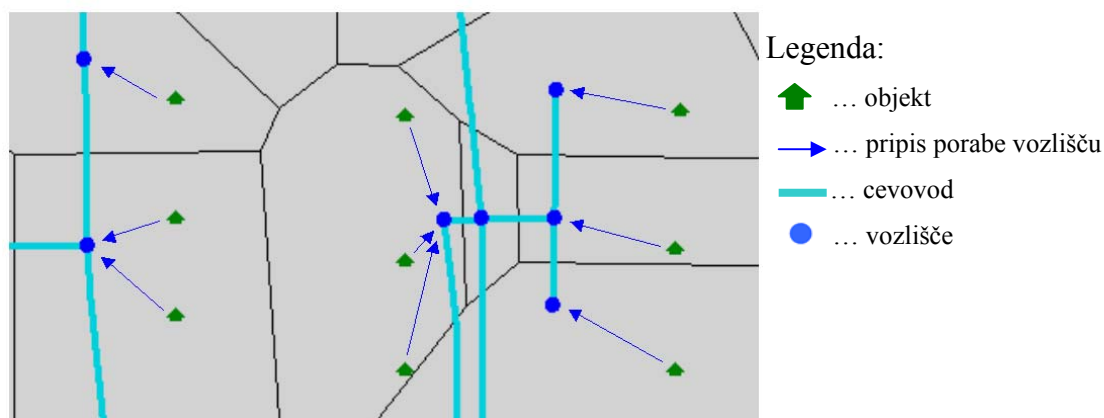
V primeru, da je vodenje evidence o ceveh celovito, to je, da se vodi prostorska podatkovna baza tudi o hišnih priključkih, na katere je v zaključni točki vezan tudi sam objekt ali podatek o porabniku, na primer število prijavljenih oseb, je postopek določevanja porabe vozlišču enostaven (Slika 15). Tudi pri izvedbi skeletizacije se v takem primeru poraba enostavno deduje do preostalih vozlišč hidravličnega modela.



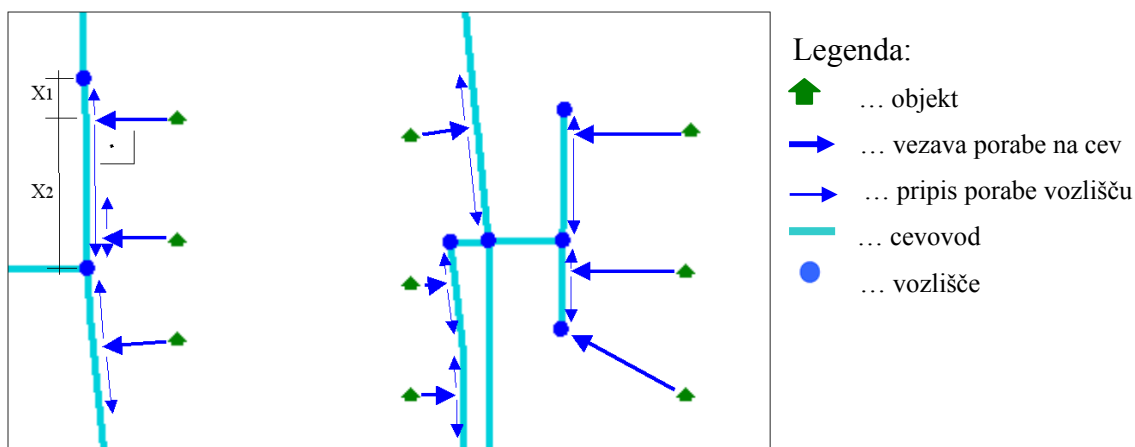
Slika 15 Neposredno upoštevanje (vezava) porabe objekta prek hišnih priključkov v primeru popolnega informacijskega sistema.

Če pa se v evidenci ne vodi podatkov o vseh ceveh oziroma so ti pomanjkljivi, se lahko v postopku alokacije porabe ustvarijo vozliščno vezani poligoni, kjer se poraba (evidenca hiš s

porabniki), ki se nahaja znotraj določenega poligona, npr. izraženega s Thiessenovim poligonom (Slika 16), pripiše (sešteje) pripadajočemu vozlišču. Postopek ustvaritve poligonov okoli vozlišč je s programsko opremo avtomatičen, vendar je treba v določenih primerih, npr. ko vzporedno potekata dve cevi, porabniki pa so vezani samo na eno, ker je druga le transportna, poligone tudi ročno prilagoditi, če se s tem bistveno izboljšajo izračuni.



Slika 16 Pripis porabe posameznega objekta na podlagi prekritosti z vozliščnimi Thiessenovimi poligoni.



Slika 17 Pripis porabe najbližjih cevi in delitev na pripadajoči vozlišči obratno sorazmerno glede na oddaljenost od točke pravokotne projekcije porabe na cev

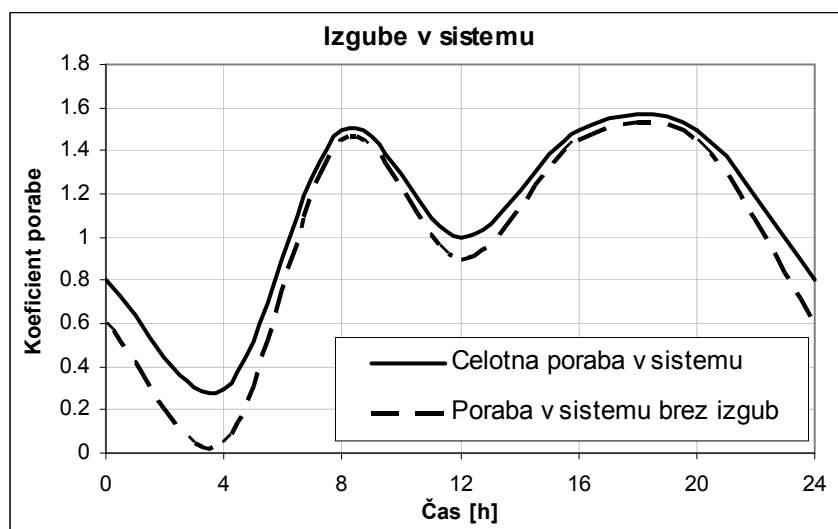
Drug način je, da se poraba ali prostorska evidenca porabnikov pravokotno, to je z najkrajšo povezavo, veže na najbližjo cev, zatem pa se glede na oddaljenost od vozlišč (končno in začetno vozlišče cevi), ki določata pripadajočo cev ali več cevi, poraba sorazmerno glede na

oddaljenost od točke pravokotne projekcije porabe objekta na cev porazdeli med ti dve vozlišči. Tudi v tem primeru je treba ročno pregledati vezavo porabe na cevi. Da bi se razvijali posebne algoritme, s pomočjo katerih bi se avtomatizirala kontrola pravilne navezave porabe na posamezno vozlišče, verjetno ni smiselno (preveč raznolikosti v stvarnosti), lažje je namreč vzpostaviti vodenje hišnih priključkov.

Kljub vključitvi avtomatizacije, ki je predstavljena v gornjih dveh primerih, je še vedno treba v nadaljevanju izvesti vsaj osnovno ročno kontrolo. Tudi če bi se razvijali posebni, bolj učinkoviti algoritmi, verjetno to ni smiselno, saj je lažje nadgraditi vodenje evidence s podatki o hišnih priključkih, s katerim se pridobi tudi učinkovito spremljanje stanja na drugih področjih vodooskrbe. Pri porazdelitvi porabe po vozliščih je treba tudi preveriti, ali je vsota celotne porazdeljene porabe po vozliščih usklajena z evidenco celotne porabe v posameznih conah in vodooskrbnem sistemu kot celoti, kar je podrobneje obdelano v poglavju makrokalibracije.

Pri določevanju porabe po vozliščih je poleg obračunane vode in porabe vode za gašenje požarov pomembna tudi neobračunana voda, kamor spadajo tudi izgube vode (Walski et al., 2003). Ker so izgube vode v sistemu odvisne od velikosti tlakov, običajno drugače nihajo kot poraba vode preko dneva (Slika 18). Tako so v nočnem času, ko je poraba najnižja, tlaki v sistemu višji in s tem posledično tudi izgube vode.

Glede na natančnost ocene porazdelitve se izgube vode lahko enostavno porazdeli po vozliščih. Porazdelitev izgub po sistemu oziroma vozliščih brez izvedbe ustreznih meritev in umerjanja hidravličnega modela (mikrokalibracija) je težko natančno določiti, še zlasti njihovo časovno nihanje. Zato se izgube običajno najenostavneje veže na vozlišča na podlagi ustreznih strokovnih ocen in se jih bolj ali manj razprši po več vozliščih, pri čemer se za časovno nihanje izgub uporabijo že obstoječi ali prirejeni koeficienti porabe vode.



Slika 18 Delež izgube vode glede na celotno porabo vode preko dnevnega nihanja.

Pri natančnejšem modeliranju izgub vode, pri čemer bi se upoštevala tudi soodvisnost izgub od tlaka (poglavje 3.1) z oceno koeficientov iztoka K in eksponentne vrednosti n , je z vidika zagotovitve natančnejših izračunov takšno početje zelo vprašljivo.

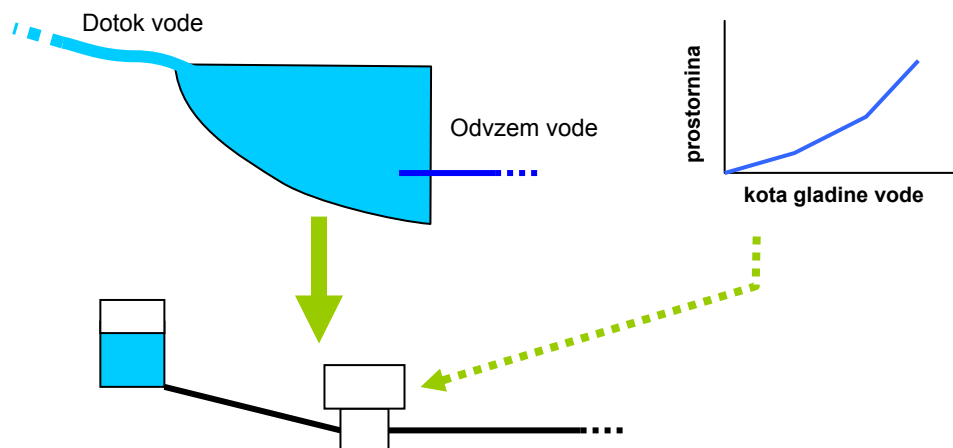
3.2.8 Sestavljeni objekti

Elementi hidravličnih modelov, ki so opisani v prejšnjih podpoglavjih, so osnovni nabor, ki se jih za modeliranje drugih objektov in elementov lahko med seboj poveže. Kot je bilo že omenjeno (poglavje 3.2.2), je možno na primer manjše akumulacijsko jezero, v katerem se gladina spreminja v skladu z bilanco vtoka in iztoka vode iz njega, zmodelirati tudi z elementom vodohrana.

Pri takem vodohranu (jezeru) je treba dovolj natančno poznati spreminjanje volumna jezera v odvisnosti od kote gladine vode, kar je podlaga za določitev prostorninske krivulje (Slika 19), in tudi dotok v jezero, ki se ga zmodelira z zajetjem in hidravlično izbiro ustrezne cevi, s katero se zagotovi dejanski dotok vode v jezero.

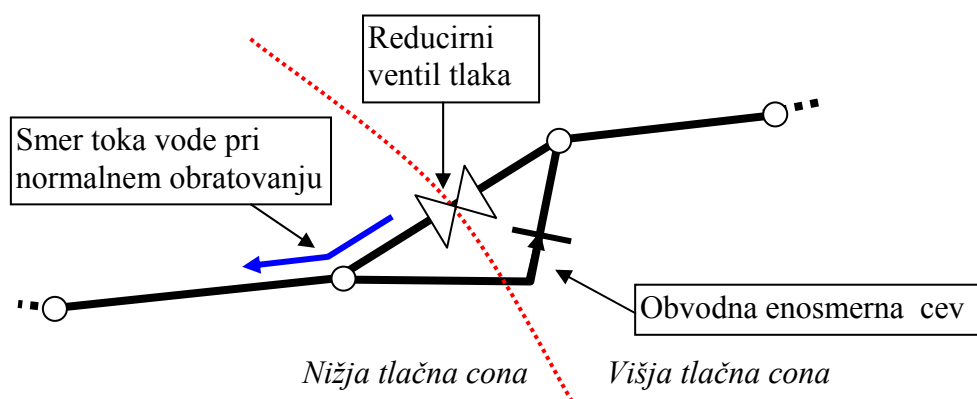
Pogost primer je tudi modeliranje vodohrana s prelivom na maksimalni koti gladine vode v vodohranu. V takem primeru se lahko vodohran s cevjo velikega premera poveže z dodatnim

rezervoarjem (zajetjem) s stalno gladino, ki se jo določi na koti maksimalne gladine vodohrana.



Slika 19 Določitev prostorninske krivulje akumulacijskega jezera za uporabo nadomestnega elementa - vodohrana

Če se v sistemu med dvema tlačnima conama nahaja reducirni ventil tlaka, ki deluje v smeri nižje tlačne cone, želi pa se zagotoviti vodooskrbo tudi v primeru motene oskrbe v višji tlačni coni, se lahko v modelu predvidi obvod mimo reducirnega ventila, ki pa prevaja vodo samo v eno smer, to je v smeri iz nižje v višjo tlačno cono (Slika 20).



Slika 20 Primer redukcije tlaka v eno smer z obvodno enosmerno cevjo za tok vode v višjo tlačno cono v izjemnih dogodkih.

Predstavljeno je le nekaj načinov modeliranja sestavljenih objektov ali elementov, saj je to področje zelo široko, pa tudi na več načinov je možno zmodelirati isti objekt. Pomembno

področje, ki se prav tako šteje med potrebne podatke za ustrezno modeliranje, je tudi ustrezna podaja obratovanja in upravljanja s posameznimi objekti vodooskrbnega sistema, kar je podrobneje obdelano v naslednjem poglavju.

3.3 Tehnični vidiki obratovanja in upravljanja

Ob vzpostavitvi modela vodooskrbnega sistema so poleg fizičnih karakteristik sistema zanimivi tudi obratovalni pogoji, pod katerimi vodooskrbni sistem deluje. Glavne skupine obratovalnih pogojev so prikazane s karakterističnimi krivuljami obratovanja posameznih objektov, z vzorci in zlasti pravili obratovanja.

Zadnja skupina podatkov o obratovanju vodooskrbnih sistemov so opisana pravila, s katerimi se določa delovanje posameznih elementov sistema glede na pogoje, ki vladajo v sistemu. Obstajata dve skupini obratovalnih pravil, in sicer enostavna nadzorna obratovalna pravila (ang. simple controls) ter na nadzoru temelječa pravila (ang. rule based controls). S prvo skupino pravil se spreminjajo status oziroma lastnosti linijskih elementov (cevi, črpalke, ventili) modela glede na nivo vode v vodohranu, tlak v vozliščih in časovno obdobje simulacije.

Preglednica 5 Strukturiranje enostavnih nadzornih pravil (Rossman, 2000)

LINK linkID status IF NODE nodeID ABOVE/BELOW value
LINK linkID status AT TIME time
LINK linkID status AT CLOCKTIME clocktime AM/PM
Primer:
LINK 12 CLOSED IF NODE 23 ABOVE 20
LINK 12 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM

Druga skupina pravil pa nam omogoča bolj kompleksno nadzorovanje modela, kjer se linijskemu elementu modela spremeni status obratovanja oziroma njegove nastavitve z upoštevanjem večjega števila pogojev v sistemu. Ta pravila so lahko sestavljena iz para pogojnega stavka in akcijskega stavka ali pa iz več pogojnih in tudi akcijskih stavkov (Rossman, 2000).

Preglednica 6 Strukturiranje na nadzoru temeljčih pravil (Rossman, 2000)

RULE ruleID
IF condition_1
AND condition_2
OR condition_3
etc.
THEN action_1
AND action_2
etc.
ELSE action_3
AND action_4
etc.
PRIORITY value
Primer:
RULE 1
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 8 AM
AND SYSTEM CLOCKTIME < 6 PM
AND TANK 1 LEVEL BELOW 12
THEN PUMP 335 STATUS IS OPEN
AND PIPE 330 STATUS IS OPEN

Kot primer obratovalnih pogojev je v nadaljevanju opisan primer vodooskrbnega sistema manjšega slovenskega mesta, v katerem je delovanje črpalk pogojeno z gladino vode v protiležnih vodohranih in s ceno električne energije (cenejša, nizka tarifa velja ponoči od 22⁰⁰ do 8⁰⁰ ure in tekom dneva od 14⁰⁰ do 17⁰⁰ ure). Zato veljajo pogoji delovanja črpalk, ki jih prikazuje Preglednica 7.

Preglednica 7 Prikaz obratovalnih pogojev črpalk v odvisnosti od električne tarife in nivoja gladine vode v vodohranih

Element	Pogojno stanje	Ukrep
Črpalka 1	Visoka tarifa in gladina v vodohranu 1 pade pod globino 1,60 m	Vklop
	Visoka tarifa in gladina v vodohranu 1 preseže globino 2,20 m	Izklop
	Nizka tarifa in gladina v vodohranu 1 pade pod globino 2,52 m	Vklop
	Nizka tarifa in gladina v vodohranu 1 preseže globino 3,32 m	Izklop
Črpalka 2	Visoka tarifa in gladina v vodohranu 2 pade pod globino 1,44 m	Vklop
	Visoka tarifa in gladina v vodohranu 2 preseže globino 1,72 m	Izklop
	Nizka tarifa in gladina v vodohranu 2 pade pod globino 2,01 m	Vklop
	Nizka tarifa gladina v vodohranu 2 preseže globino 2,32 m	Izklop
Črpalka 3	Visoka tarifa in gladina v vodohranu 2 pade pod globino 0,96 m	Vklop
	Visoka tarifa in gladina v vodohranu 2 preseže globino 1,20 m	Izklop
	Nizka tarifa in gladina v vodohranu 2 pade pod globino 1,16 m	Vklop
	Nizka tarifa in gladina v vodohranu 2 preseže globino 1,40 m	Izklop

Z uporabo opisanih obratovalnih lastnosti se lahko zelo natančno obravnava delovanje realnega vodooskrbnega sistema.

S hidravličnim modeliranjem se preverja in dokazuje, ali so v trenutnem ali načrtovanem stanju zagotovljeni standardi oskrbe, torej ali sistem ustrezno deluje, kar pokažejo zadovoljivi tlaki, pretoki pri različnih nivojih oskrbe (normalna, min. in max. poraba, primer zagotavljanja vode v primeru požara), zanesljivost sistema (lom cevi, zaprtje določenega vodnega vira npr. zaradi onesnaženja) itd.

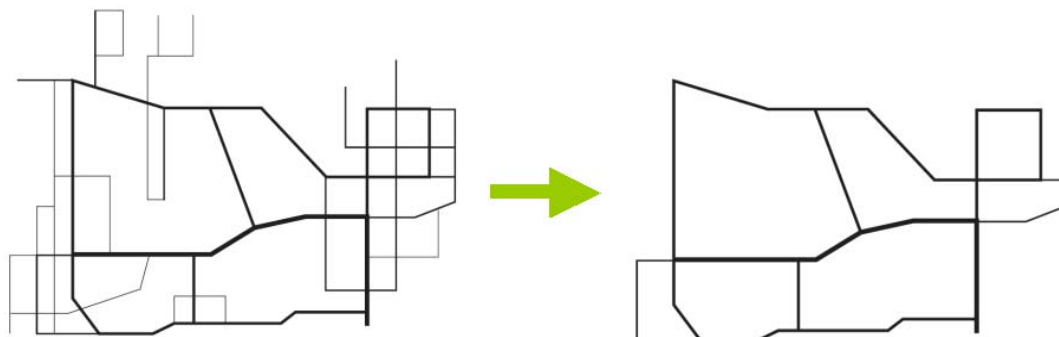
V procesu hidravličnega modeliranja je seveda najpomembneje vzpostaviti hidravlični model, ki bo verodostojno predstavljal dejanski vodooskrbni sistem. Zato so v nadaljevanju tega poglavja predvsem predstavljeni postopki skeletizacije, makro/mikrokalibracije in uporaba optimizacijskih orodij.

3.4 Skeletizacija ali poenostavitev sistema

Preden se je razvila dovolj zmogljiva računalniška in programska oprema, so se hidravlično modeliranje in izračuni hidravličnih parametrov ukvarjali le s poenostavljenimi modeli, v katerih so bile zajete le najpomembnejše cevi, to je cevi od virov vode do vodohranov in druge transportne cevi večjih premerov. V ceveh z manjšimi premeri kot tudi v ceveh za hišne priključke so se delali posamezni izračuni ali pa so se že uporabljale določene tabele, ki so preverjale ustreznost načrtovanja (zlasti izhodni tlak) na podlagi vhodnih tlakov, dolžin in hrapavosti samih obravnavanih cevi. Danes ovir, omenjenih na začetku tega odstavka, ni več, zato se lahko hidravlično modeliranje izvaja na celovitem modelu vodooskrbnega sistema, ki vključuje prav vsako cev, celo vsak hišni priključek.

Vseeno pa se npr. v primeru, ko se načrtuje in dimenzionira transportne cevovode, vodohrane, črpališča in redukcije tlakov, ohranijo samo tisti deli VS, ki bistveno vplivajo na hidravlično obnašanje sistema, to je na pretoke in tlake v obravnavanih ceveh, ali ne vplivajo na topologijo omrežja, to je na povezanost posameznih delov. Pri tem je treba ohraniti predvsem osnovno vodilo, da se ohranijo cevi manjšega premera, le če s preostalimi cevmi tvorijo

posamezne zanke/zaključene kroge cevovoda. Slika 21 prikazuje primer skeletizacije ali poenostavitve omrežja, ki ohranja samo cevi večjega premera.



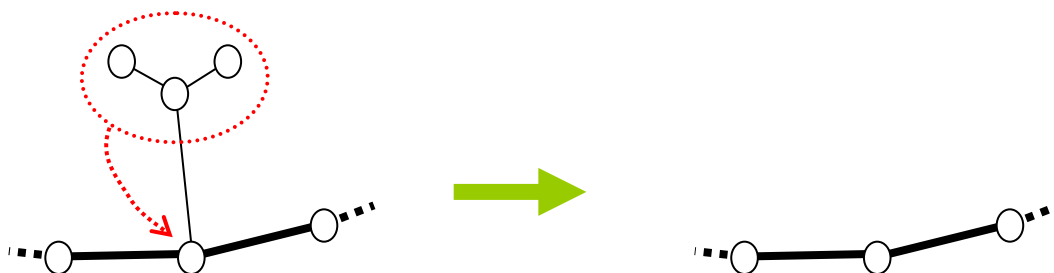
Slika 21 Primer skeletizacije hidravličnega modela (debelejše črte označujejo cevi z večjim premerom)

Rezultati tako skeletiziranega hidravličnega modela, ki ne vsebuje manjših premerov cevi, so veliko bolj obvladljivi za pregled in interpretacijo ter tudi dovolj natančni, če je bil model ustrezno umerjen. Čeprav ima lahko skeletizacija določen vpliv na proces umerjanja, so ti učinki v glavnem neznatni (Walski, 2003). Če je v procesu umerjanja težko doseči ustrezno natančnost na podlagi zelo skeletiziranega modela, je verjetno treba v hidravličnem modelu obdržati večje število cevi. Na primer, če se v procesu skeletizacije v določenem območju izloči gosto mrežo manjših cevi, še posebej, če so zankasto povezane med seboj, je to lahko vprašljivo, saj te cevi kot skupina lahko povzročajo velik vpliv na hidravlične razmere v vodooskrbnem sistemu.

Proces skeletizacije je podvržen principu »Trade-off«, to je iskanju zadovoljivega razmerja med stopnjo poenostavitve modela in natančnostjo hidravličnega modela. Izključevanje prevelikega števila cevovodov bi privedlo do nezaželene posledice, to je nenatančnosti modela glede na dejanske razmere v obstoječem vodooskrbnem sistemu. Glavno načelo skeletizacije je torej ohranitev tistih elementov hidravličnega modela, ki pomembno vplivajo na hidravlične razmere v vodooskrbnem sistemu (Kozelj, 2004).

3.4.1 Rezanje vej cevovoda

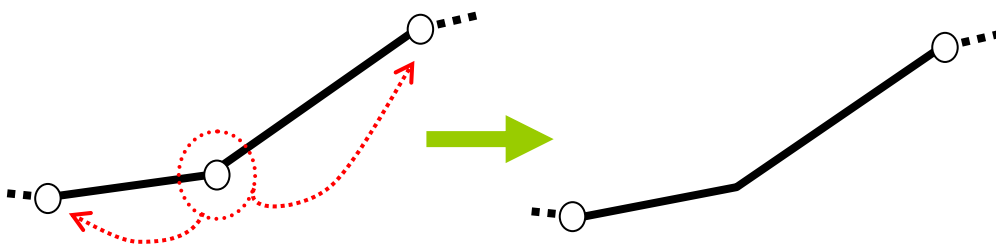
Obstaja več postopkov skeletizacije. Najenostavnejši je odstranitev nevplivnih vej cevovoda (Slika 22), pri čemer je treba porabo, ki je bila vezana na izpuščena vozlišča, dodati k porabi v preostalem vezanem vozlišču.



Slika 22 Primer odstranjevanja nevplivnih vej cevovoda z dodajanjem porabe na vezno vozlišče

3.4.2 Združevanje cevi enakih hidravličnih karakteristik

Drug primer je združevanje posameznih zaporedno vezanih cevi s hkratnim odstranjevanjem nepotrebnih vozlišč, katerih poraba se doda preostalima sosednjima vozliščema obratno sorazmerno glede na oddaljenost od odstranjenega vozlišča (Slika 23).



Slika 23 Združevanje cevi z dodajanjem porabe odstranjenega vozlišča preostalima sosednjima vozliščema

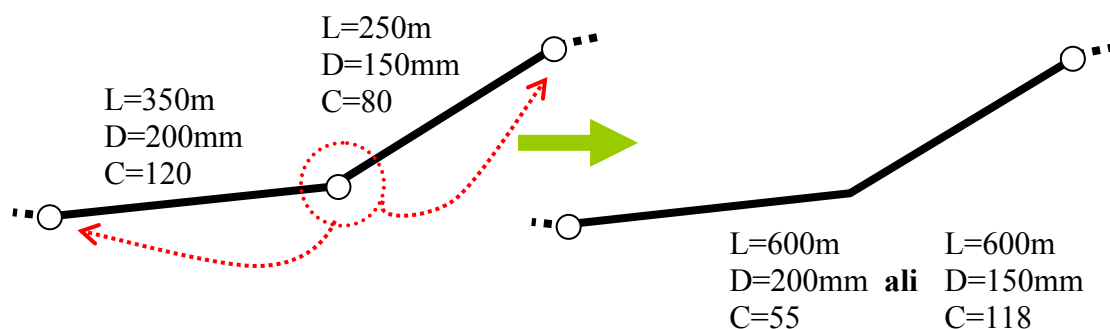
Če je poraba, ki je bila določena v vozlišču, ki se ga zaradi združevanja cevi enakih karakteristik želi odstraniti, relativno velika v primerjavi z ostalimi vozlišči, je smiselno, da se ga ohrani, saj bistveno vpliva na hidravlične karakteristike na preostalih dveh ceveh.

3.4.3 Združevanje cevi različnih hidravličnih karakteristik

Sam postopek združevanja cevi je hidravlično nesporen, če so hidravlične karakteristike cevi, ki so bile združene, enake (hrapavost cevi in premer cevi). V nasprotnem primeru pa je treba, da se ohranijo enake hidravlične izgube v tem območju, izvesti transformacijo ali prireditev določene hidravlične karakteristike (Slika 24). Pri tem se pripravljalec modela sam odloči, ali bo združeni cevi prilagodil koeficient hrapavosti ali premer cevi. Npr. če se izbere premer cevi, se rezultirajoča hrapavost (Hazen – Williams) določi po naslednji enačbi:

$$C_r = \left(\frac{L_r}{D_r^{4.87}} \right)^{0.54} \left(\sum_i \frac{L_i}{D_i^{4.87} C_i^{1.85}} \right)^{-0.54} \quad (5)$$

kjer je L = dolžina (m), D = premer cevi (m), C = Hazen-Williamov koeficient hrapavosti, r = indeks cevi, ki bo nadomestila odstranjene cevi in i = indeks cevi, katerih karakteristike se bodo prek enačbe posredovale v skupni koeficient hrapavosti.



Slika 24 Združevanje cevi z dodajanjem porabe odstranjenega vozlišča preostalima sosednjima vozliščema in določitvijo nadomestnih ekvivalentnih hidravličnih karakteristik preostali cevi

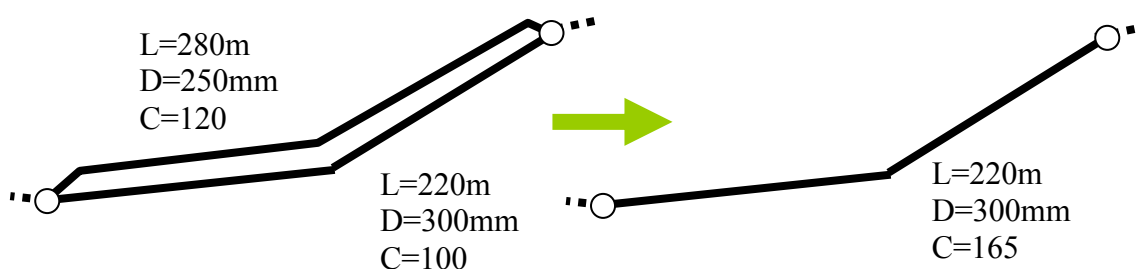
3.4.4 Združevanje vzporednih cevi

Dve cevi sta vzporedni med seboj, če imata isto končno in začetno vozlišče (Slika 25), ne glede na to ali imata isto dolžino. V primeru odstranitve ene cevi zaradi poenostavitve sistema

se cev, ki ostane, določi kot primarna in je v naslednji enačbi za račun skupnega koeficienta hrapavosti (lahko se določi skupni premer cevi), ki je glede parametrov sorodna prejšnji, označena z indeksom r , ostale cevi, ki se bodo odstranile, pa so označene z indeksom i (Walski et al., 2003).

$$C_r = \frac{L_r^{0.54}}{D_r^{2.63}} \sum_i \frac{C_i D_i^{2.63}}{L_i^{0.54}} \quad (6)$$

Pri vzporednih ceveh (tudi pri zaporednih) je treba pri skeletizaciji upoštevati tudi lokalne izgube, kar je težje natančno določljivo, vendar se lahko zadovoljivo približa dejanskemu stanju, zlasti če so lokalne izgube precej manjše od dolžinskih izgub v cevovodu, z uporabo povprečnega koeficienta lokalnih izgub.



Slika 25 Združevanje vzporednih cevi – primer določitve ekvivalentnega koeficienta hrapavosti

Opisani primer je tudi že nekakšna vrsta skeletizacije zanke, vendar je ta primer dveh cevi najenostavnejši. Pri skeletizaciji zank je še posebej treba imeti v mislih namen uporabe hidravličnega modela. Čeprav je cev v zanki, ki smo jo odstranili, lahko nepomembna v transportnih funkcijah v vodooskrbnem sistemu, je v primeru loma kakšne od cevi v tej zanki in zagotavljanja na primer požarnih vod lahko bistven faktor pri zmanjševanju tveganja ali ogroženosti.

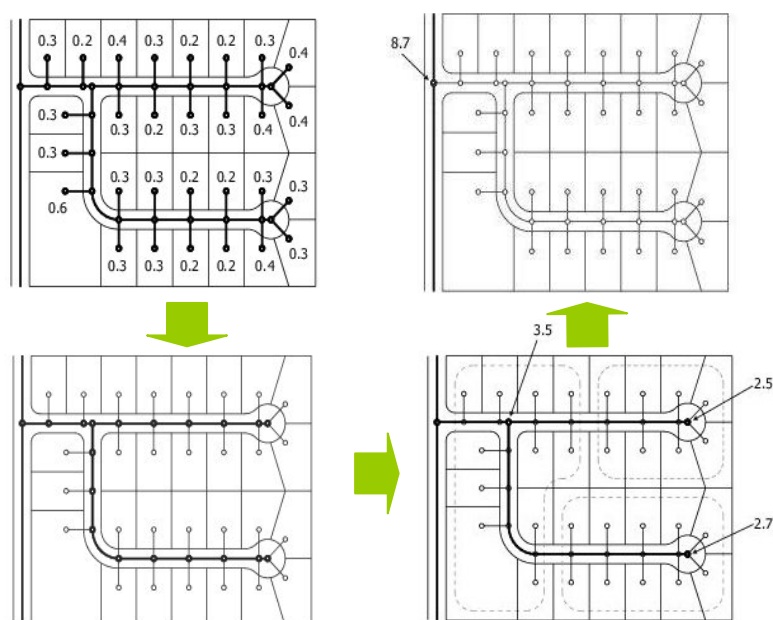
3.4.5 Avtomatizacija skeletizacije

Vodooskrbni sistemi ter posledično tudi hidravlični modeli so lahko sestavljeni iz več tisoč cevi in dodanih vozlišč. To predstavlja pri ročni skeletizaciji veliko porabo časa, saj je sama skeletizacija eden od začetnih postopkov pri hidravličnem modeliranju (Slika 26). Ta

postopek se lahko večkrat ponovi, saj se na podlagi makro in mikrokalibracije in zatem tudi po načrtovanju in izvedbi lahko poenostavljanje sistema velikokrat ponovi.

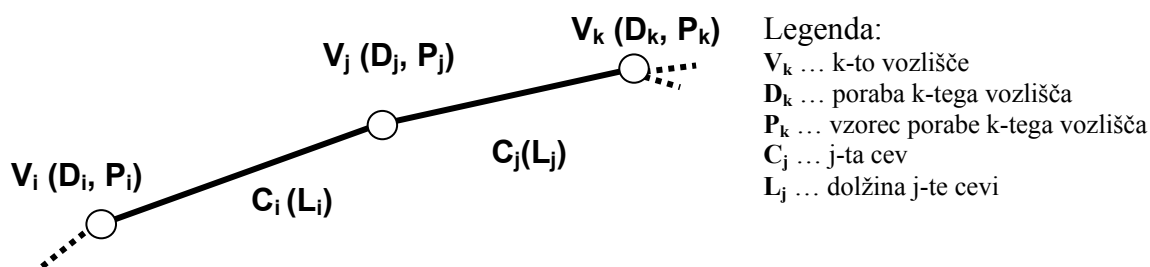
Zato je treba za podane načine skeletizacije najprej razviti določena programska orodja, ki bodo zajela in predpisala vrstni red izvajanja določenih načinov skeletizacije ter določila, kako se posamezna skeletizacija avtomatično izvaja. Na primer, smiselno je naprej odstraniti vse hišne priključke gospodinjske rabe in zatem, glede na cilj modeliranja, sistem še bolj poenostavljati (Slika 26).

Sam postopek izvajanja skeletizacije, to je brisanja cevi določenega premera, združevanja cevi, dodajanja porabe veznemu vozlišču oziroma sosednjima vozliščema glede na oddaljenost od odstranjenega vozlišča, je lahko že precej kompleksen. Postopek je treba prilagoditi tudi sami obstoječi programski opremi, ki se uporablja za vodenje evidenc in vzpostavitev hidravličnega modela ter kasnejše izračunavanje rezultatov. Zato je bilo treba raziskati najprimernejše pristope, nato pa predhodno razviti ustrezne algoritme, ki so kasneje podlaga samemu programiranju avtomatiziranega postopka skeletizacije.



Slika 26 Različne stopnje izvedene skeletizacije – do enega vozlišča s pripisano celotno porabo območja izhodiščne situacije

Slika 27 prikazuje shematiziran odsek cevovoda z oznakami posameznih elementov. Cevi so označene z indeksiranimi oznakami C , vozlišča pa z oznakami V . Karakteristike, ki jih je treba upoštevati pri izvedbi skeletizacije združevanja cevi enakih hidravličnih karakteristik, so pri vozliščih še poraba (D), vzorec porabe (P) in pri ceveh dolžina cevi (L).



Slika 27 Shematiziran odsek cevovoda z oznakami in atributi cevi in vozlišč

Kako se v programskem jeziku napiše koda, s katero se v informacijskem sistemu zbrise posamezno vozlišče, dve cevi združita in poraba izbrisanega vozlišča doda sosednjima preostalima vozliščema, je značilnost posamezne vrste programske opreme in načina formiranja programske kode. Zato je dovolj, če se za posamezen način skeletizacije poda le osnovni algoritem, ki je dovolj ustrezna podlaga za končni zapis.

Kot primer je v Prilogi 1 podan algoritem za avtomatizacijo skeletizacije sistema v postopku združevanja cevi enakih karakteristik. Podlago za indeksacijo, ki je upoštevana v algoritmu, prikazuje slika 27.

Čeprav je primer skeletizacije na prvi pogled enostaven, je iz algoritma v Prilogi A razvidno, da je proceduralni pristop kompleksen, saj je treba med drugim poleg kontrol paziti tudi na enostavno indeksacijo in orientiranost obstoječih cevi, ki pogojuje izdelavo algoritma za tvorbo nove združene cevi.

3.5 Umerjanje

Pri modeliranju vodooskrbnih sistemov se pojavljajo mnogi viri napak, ki vplivajo na napovedovanje hidravličnih razmer vodooskrbnega sistema. Zato se v procesu modeliranja

upošteva določena negotovost v povezavi z napovedmi modela, povezanimi z napakami oziroma pomanjkljivostmi podatkov.

Vrste napak podatkov se lahko deli v več skupin. Prve spadajo v skupino topografskih napak, ki odražajo napake v zvezi s fizičnimi lastnostmi elementov vodooskrbnega sistema (notranji premeri cevi, dolžina cevi, višina vozlišč, volumen vodohrana ali njegov premer, ...), ki jih je mogoče enostavno odpraviti, vendar razmeroma težko odkriti.

Druge najpogostejše napake so povezane z delovanjem oziroma obratovanjem objektov na vodooskrbnih sistemih, kjer je verjetnost nepoznavanja dejanskega stanja oziroma nepopolnosti ter zastarelosti podatkov največja. Problematično je predvsem modeliranje črpalk, ki zahtevajo precejšno natančnost pri določevanju njihovih obratovalnih lastnosti. Problemi pa so še večji pri starih sistemih. Tudi ventili in zasuni predstavljajo velik vir napak, kjer se zastavlja vprašanje o njihovih nastavitvah oziroma o odprtosti ventilov in zasunov.

Zelo pogosto pri modeliranju nastajajo napake v postopku skeletizacije oziroma pri poenostavljanju omrežja. Tu napake nastajajo kot kompromis med preglednostjo in obvladljivostjo hidravličnega modela. Izdelovalec modela mora zato strokovno presoditi, kateri cevovodi so bistveni v smislu določevanja hidravličnih razmer v sistemu in katere cevovode je mogoče izločiti.

Porazdelitev porabe v vozlišča predstavlja še eno skupino možnih napak v procesu modeliranja vodooskrbnih sistemov. Napake nastanejo zaradi porazdelitve porabe v vozlišča hidravličnega modela, medtem ko je na vodooskrbnem sistemu poraba razporejena linijsko po cevovodih (t.i. zvezni odvzem, praviloma majhen vpliv). Poleg omenjene aproksimacije porabe vode napake nastanejo tudi pri določevanju velikosti porabe v vozliščih (velik vpliv) in pri porazdelitvi nihanja porabe v razširjenih časovnih simulacijah (največji vpliv).

Naslednjo zelo pogosto skupino napak pa predstavlja človeška zmotljivost. Te napake se pojavljajo na vseh navedenih področjih, kot na primer pri: vnosu podatkov o omrežju, določevanju topologije omrežja, poenostavljanju omrežja ali skeletizaciji, določevanju porabe, porazdelitvi porabe v razširjenih časovnih obdobjih itd.

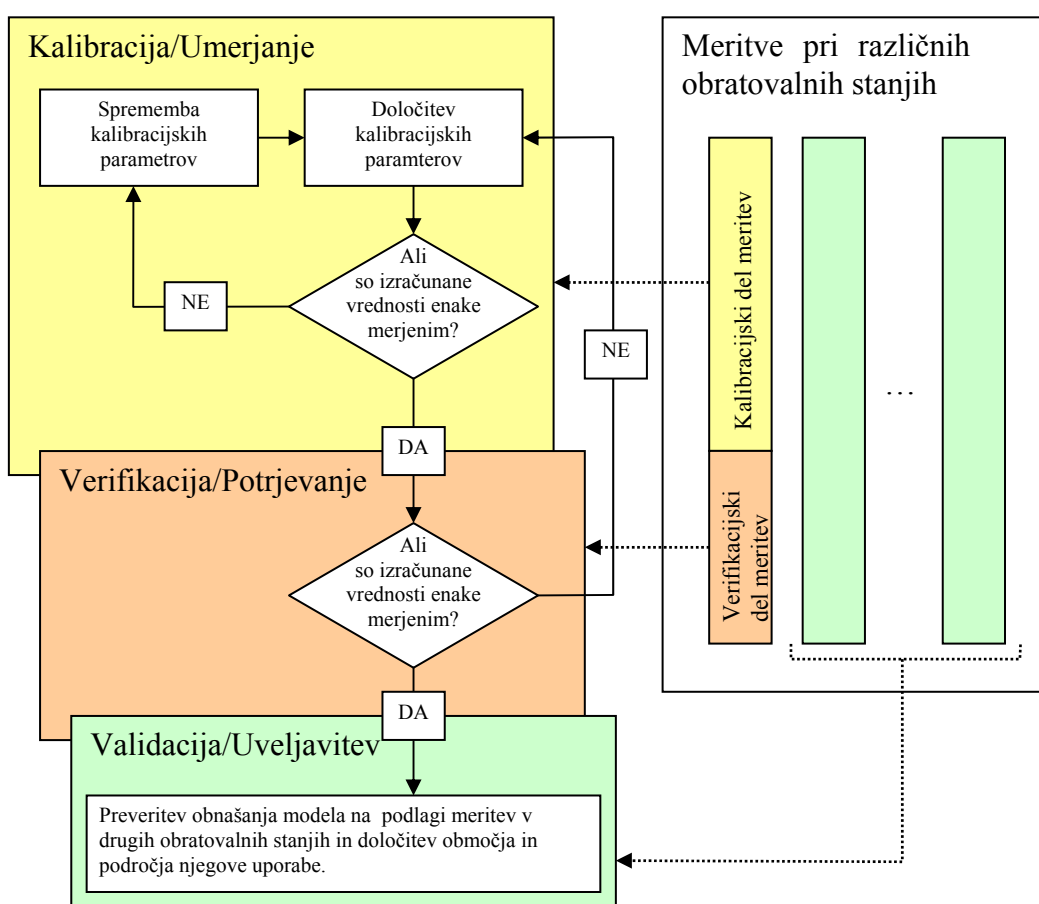
Različni avtorji in organizacije, ki se ukvarjajo z modeliranjem vodooskrbnih sistemov, so izdelali smernice za identifikacijo virov napak. Njihovi naporji so pripomogli k zanesljivejšemu modeliranju in kasnejšemu umerjanju hidravličnih modelov. Tako je organizacija ECAC (ang. Engineering Computer Applications Committee) v svoji raziskavi poudarek posvetila prav identifikaciji in vplivu virov napak na delovanje modela.

Pregled njihovega seznama virov napak priča o pomembnosti njihove identifikacije in je razdeljen na naslednje sklope (ECAC, 1999):

- napake v vhodnih podatkih zaradi topografskih in merilnih napak fizičnih elementov modela,
- napake zaradi neznanih koeficientov hrapavosti cevovodov,
- napake zaradi neznane vrednosti in porazdelitve porabe na vodooskrbnem sistemu,
- napake zaradi pomanjkljivih načrtov vodooskrbnih sistemov,
- napake zaradi določevanja nadmorskih višin vozlišč,
- napake zaradi izbire časovnega koraka hidravlične simulacije modela,
- napake zaradi poenostavitve reprezentacije vodooskrbnega sistema (skeletizacija),
- napake zaradi vpliva zastarelih črpalnih krivulj in nastavitve regulacijskih ventilov,
- napake zaradi vpliva slabo umerjene merilne opreme, katere meritve so uporabljene v procesu umerjanja.

Ker je hidravlični model matematična predstavitev stvarnega vodooskrbnega sistema, je seveda edino umestno, da vrednosti izračunanih parametrov izkazujejo dejansko dogajanje v vodooskrbnem sistemu. V nasprotnem primeru je izdelava hidravličnega modela omejena le na učne postopke in analizo obnašanja vodooskrbnih sistemov v različnih obratovalnih obremenitvah in stanjih. Posledično je zato treba hidravlični model umeriti, to je izvesti proces, s katerim se prilagaja parametre, ki opisujejo matematični model, dokler se med merjenimi parametri na dejanskem vodooskrbnem sistemu (predvsem tlaki in pretoki) v različnih obratovalnih stanjih in izračuni matematičnega modela ne doseže želen nivo usklajenosti. Čeprav se v praksi izraz kalibracija ali umerjanje uporablja za cel postopek izdelave verodostojnega hidravličnega modela, gre za zahteven postopek, ki je praviloma sestavljen iz treh splošno uveljavljenih faz na področjih modeliranja, to so kalibracija, verifikacija in validacija. Enega od pristopov k vzpostavitvi zanesljivega hidravličnega

modela, kjer so predstavljeni posplošeni postopki kalibracije, verifikacije in validacije, prikazuje slika 28. Na podlagi ustreznih meritev se najprej izvede postopek kalibracije ali umerjanja, to je proces prilagajanja parametrov računskega modela, s čimer se želi izboljšati ujemanje med izračunanimi in merjenimi vrednostmi. V naslednji fazi, to je postopku verifikacije ali potrjevanja, se na podlagi izbranega neodvisnega, v procesu kalibracije neuporabljenega niza meritev iz enakega obratovalnega stanja preveri in potrди ustreznost procesa umerjanja. V tej fazi se lahko potrди, da v določenem obratovalnem stanju model izkazuje želeno ujemanje s stvarnim sistemom.



Slika 28 Primer postopka umerjanja hidravličnega modela VS

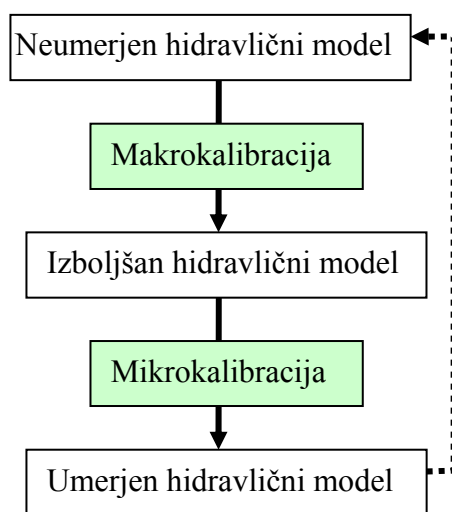
Da pa se preveri in oceni širša uporabnost modela, ga je treba preveriti in potrđiti tudi v območju drugih obratovalnih stanj (povečana poraba, izpad dela sistema, požarna poraba ipd.) oziroma na drugih sistemih. Zato se ponavadi proces umerjanja zaključi s postopkom validacije ali uveljavitve, s katero se določi in potrđi območje oziroma področje, v katerem model z želeno natančnostjo predstavlja stvarni sistem.

Kot primer so navedene izkušnje, ko se je v procesu validacije samega pristopa hidravličnega modeliranja z zagotavljanjem porabe ugotovilo, da je njegova uporaba ustrezna v območju normalnega delovanja sistema, ne pa tudi v obratovalnem stanju motene vodooskrbe (Poglavje 3.1).

Umerjanje hidravličnih modelov vodooskrbnih sistemov se lahko označi kot dvostopenjski proces (Walski et al., 2001):

1. makrokalibracija ali grobo umerjanje in
2. mikrokalibracija ali fino umerjanje.

V postopku makrokalibracije se postopoma zagotovi, da neumerjen hidravlični model prek grobega umerjanja preide v izboljššan hidravlični model in po drugi fazi umerjanja v umerjen hidravlični model (Slika 29).



Slika 29 Proces dvostopenjskega umerjanja

Sam postopek prikazuje tudi slika 6 (podpoglavje 2.3), kjer je postopek umerjanja že ustrezno vključen v celovito vodenje geografskega informacijskega sistema za upravljanje z vodovodnimi sistemi.

Šele po ustrezno izvedeni makrokalibraciji, v postopku katere naj bi se odpravilo večino razhajanj pri geometrijskih podatkih med dejanskim VS in hidravličnim modelom, se lahko preide v fazo mikrokalibracije, kjer se v ustreznem postopku umerijo zlasti hidravlične

spremenljivke, kot je koeficient hrapavosti cevi, in natančneje porazdeli poraba po vozliščih sistema.

3.5.1 Makrokalibracija

Makrokalibracija v osnovi zajema predvsem postopek zagotovitve geometrijske in topološke enakosti med matematičnim modelom in dejanskimi elementi vodooskrbnega sistema. To pomeni, da je treba v začetku postopka umerjanja najprej odpraviti grobe napake, ki so predvsem (Perez, 2003):

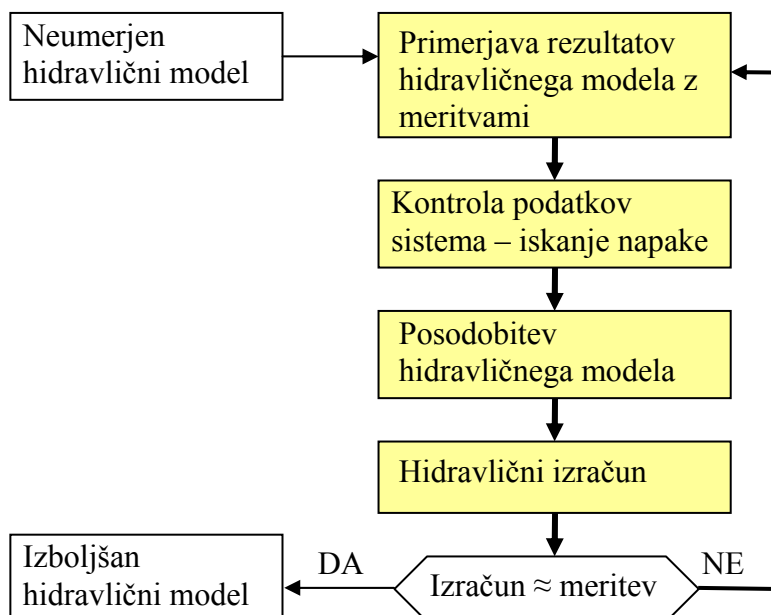
- napačne nastavitve atributov objektov (črpalna krivulja, premeri cevi ipd.)
- napačna topologija sistema (povezanost sistema, kote vozlišč ipd.) in
- napačni robni pogoji (kote zajetij, kote vode v vodohranih, delovanje ventila ipd.).

Makrokalibracija je postopek, v katerem se iterativno primerja rezultate modela z dejanskimi meritvami, ugotavlja napako, izvede posodobitev modela in ponovno primerja rezultate modela z dejanskimi meritvami (Slika 30).

Ko se doseže dopustna stopnja odstopanja med obstoječimi meritvami (nihanje kote vodohranov, dotok vode v sistem, obstoječi podatki o tlakih ipd.) in izračuni, ki jih izkazuje model, oziroma se ugotovi, da so odstopanja v tej fazi predvsem posledica napačne ocene koeficienta hrapavosti cevi oziroma porazdelitve porabe, to je napak, ki se jih z dodatnimi meritvami ne da ugotoviti, se ugotovi, da je dosežena faza izboljšanega hidravličnega modela. Ocenjuje se, da se morajo izračuni izboljšanega hidravličnega modela ujemati z dejanskim stanjem znotraj meja 30 % (Ormsbee et al., 1997), vendar kot je bilo že poudarjeno, se z ustreznim vodenjem in sprotnim posodabljanjem informacijskega sistema vodooskrbe lahko doseže občutno boljše ujemanje izračunov z meritvami že v fazi makrokalibracije (poglavje 2.3).

Ta faza umerjanja se običajno izvaja ročno, kar pomeni, da je postopek kljub ustrezni strokovni podpori lahko dolgotrajen. Hkrati se ugotavlja, da je ta faza v celotnem procesu hidravličnega modeliranja premalo dorečena, zato se v zadnjem času posveča kar nekaj pozornosti, da bi se sam postopek makrokalibracije skušal ustrezno organizirati in celo

avtomatizirati. Kot naslovna tema te naloge je makrokalibracija podrobneje obdelana v naslednjem poglavju.



Slika 30 Primer procesa izvajanja postopka makrokalibracije

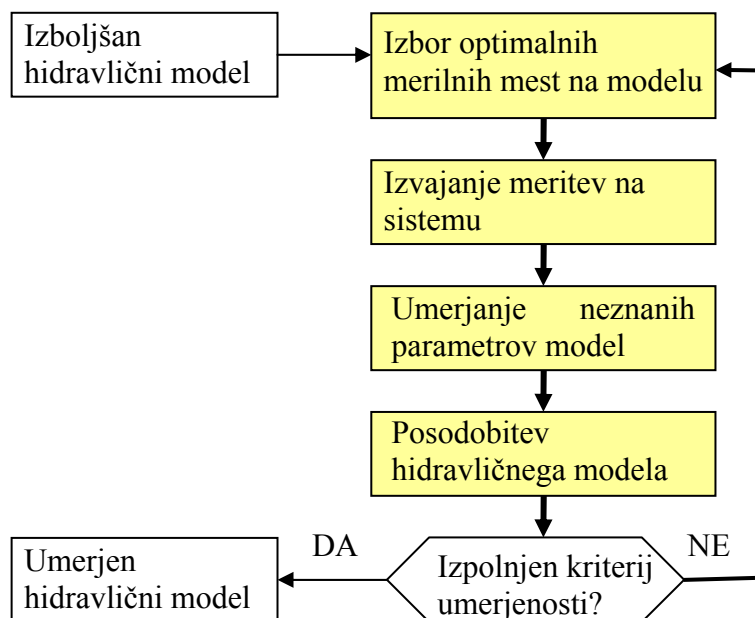
Če je informacijski sistem upravljanja z vodooskrbnim sistemom ustrezno vzpostavljen, podatkovno čim bolj popoln (npr. obstajajo tudi podatki o letu vgradnje, materialu cevi) oziroma je novejši, tako da je izgub vode malo in so hidravlične karakteristike elementov in objektov (npr. hrapavost cevi) lahko določljive, se na podlagi makrokalibracije že lahko ugotovi, da hidravlični sistem dosega želeno natančnost s stvarnimi meritvami in je torej že v veliki meri tudi umerjen hidravlični model. V takem primeru se lahko že v tej fazi umerjanja preide v analize in načrtovanje (6) brez izvedbe naslednje faze umerjanja, to je mikrokalibracije.

Ko se doseže določeno ujemanje med izračuni in meritvami, to je ko naj bi bile praviloma odpravljene vse geometrijske in topološke napake, je treba preiti v naslednjo fazo umerjanja, to je mikrokalibracijo, v kateri se skušajo pravilno določiti predvsem hidravlični atributi. Tipično se v tej fazi zajame določitev hrapavosti cevi in porabo v vozliščih (jakost in lokacija), ki sta atributa, ki sta v času zelo variabilna in težko določljiva brez podrobneje izvedenih meritev. Redkeje se v tej fazi umerjanja natančneje določa tudi nastavitvev reduciranih ventilov in kot gladine vode v vodohranih in vodnih virih.

3.5.2 Mikrokalibracija

Preden se prične s postopkom mikrokalibracije je umestno, če se v določeni meri izvede občutljivostna analiza hidravličnega modela, s čimer se lahko opredeli najbolj verjetno območje ali področje odstopanj oziroma napak. Analiza se izvede na podlagi postopnega variriranja parametrov modela in primerjave med rezultati. Na ta način se opredeli, kateri hidravlični parametri se bodo v postopku mikrokalibracije določili za umerjanje.

Kot uvod v postopek mikrokalibracije je pomemben dober izbor merilnih mest, kar zagotavlja reprezentativne vzorce meritev, s katerimi je mogoče hidravlični model umeriti čim bolj natančno ob obvladovanju stroškov izvajanja meritev (Slika 31) (Banovec et al., 2006). Ker pravilni izbor merilnih mest za mikrokalibracijo modela vpliva na natančnost umerjanja, je bilo več raziskav usmerjenih v razvoj metod za določitev merilnih mest, ki bi služile zbiranju meritev za določevanje lastnosti vodovodnega sistema, odkrivanje virov problemov in vzdrževanje nadzora nad delovanjem vodovodnega sistema ter seveda za določene raziskovalne potrebe (Kapelan, 2002).



Slika 31 Primer procesa izvajanja postopka mikrokalibracije

Pri umerjanju hidravličnih modelov vodovodnih sistemov običajno ni na razpolago zadostnega števila meritev, da bi se umerjali vsi neznani parametri. V primeru umerjanja

koeficientov hrapavosti cevovodov to še posebej velja glede na izjemno število cevovodov, ki sestavljajo hidravlični model kljub predhodni skeletizaciji.

Glede na število meritev in število parametrov poznamo naslednja stanja določenosti sistema:

- predoločen sistem enačb,
- določen sistem enačb,
- in nedoločen sistem enačb.

Ker ima nedoločen sistem enačb več neznank oz. parametrov kot meritev, umerjanje njihovih vrednosti vodi v nedoločljivost oziroma v nerealne vrednosti. Če je na razpolago enako število meritev in parametrov, je formalno zadoščeno pogoju določljivosti sistema, vendar se zaradi prostorske razporeditve meritev in parametrov ter zaradi nelinearne zveze med izmerjenimi tlaki in koeficienti hrapavosti njihovo umerjanje izkaže za nedoločljivo, vrednosti parametrov pa lahko dosežejo nerealne vrednosti enako kot pri nedoločenem sistemu. Zadnje stanje je predoločen sistem enačb in neznank, ko je na razpolago več meritev kot parametrov umerjanja. Tudi v tem primeru določljivost ni zagotovljena zaradi enakih razlogov kot pri predhodnem primeru. Zato je zaželeno, da je za umerjanje na razpolago skoraj polovico več meritev kot pa parametrov (Kapelan, 2002).

Ker je povečanje števila meritev veliko stroškovno breme, se predoločen sistem doseže z grupiranjem neznank glede na določene kriterije (Schaetzen, 2000). Koeficienti hrapavosti se običajno grupirajo, če imajo cevovodi sprejemljivo enake naslednje karakteristike:

- starost in material cevi,
- premer cevi,
- relativno lokacijo,
- in občutljivost tlačnih meritev glede na spremembe koeficientov hrapavosti.

Proces izbora merilnih mest se uspešno izvaja z uporabo različnih naprednih optimizacijskih orodij, s katerimi se išče najbolj reprezentativna merilna mesta na eni strani (občutljivost točke v vodooskrbnem sistemu na spremembe tlakov in pretokov) in upošteva minimiziranje stroškov izvajanja meritev na drugi strani (Banovec et al., 2006). Drugače povedano, prva ciljna funkcija, ki obravnava določevanje reprezentativnih merilnih mest bo optimalna, če

bodo meritve zbrane na vseh potencialnih merilnih mestih. Druga ciljna funkcija pa bo optimalna, če bo število merilnih mest čim manjše, saj bodo s tem povezani tudi najnižji stroški. Ker sta si navedeni funkciji protislovni, je treba najti rešitev, ki bo v največji meri zadovoljevala tako prvo kot drugo ciljno funkcijo.

Po izvedenih meritvah se prične postopek umerjanja neznanih parametrov modela, ki se danes prav tako uspešno izvaja s pomočjo različnih naprednih optimizacijskih orodij. Cikel, ki ga prikazuje slika 31, je prav tako iterativen postopek, saj se na podlagi umerjanja in spremembe izhodiščnih parametrov lahko v postopku izbora optimalnih merilnih mest s takim novim izhodiščem določi drugačen nabor optimalnih merilnih mest (Kapelan, 2002).

Namen hidravličnega modela ima znaten vpliv na proces umerjanja, saj namen določa, katere parametre modela je treba umeriti in kakšna mora biti natančnost napovedi modela glede na dejansko stanje vodovodnega sistema, da lahko hidravlični model štejeemo za umerjenega (Walski, 1995). Slednje je načrtovalcem in upravljalcem povzročalo veliko preglavic, saj niso obstajale smernice, ki bi opredeljevale, do katere stopnje mora biti hidravlični model umerjen. Danes na tem področju obstaja troje smernic, ki postavljajo meje umerjenosti modela, s katerimi se zagotavlja zadostna natančnost napovedi modela glede na njegov namen. Vse smernice podajajo svoje kriterije umerjenosti v relativni oziroma absolutni obliki razlik med napovedmi hidravličnega modela in meritvami na vodovodnem sistemu. Smernice so objavili (Kozelj, 2004):

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

WRc je objavil numerične vrednosti, izražene tako v relativni kot v absolutni obliki odstopanj med napovedmi modela in meritvami na sistemu, ki določajo stopnje umerjenosti tlakov in pretokov pri statičnih simulacijah, poleg omenjenega pa pri dinamičnih simulacijah obravnava tudi odstopanja pri meritvah oziroma simulaciji gladin v vodohranih. Vrednosti odstopanj tlakov in pretokov so odvisne od obsega meritev oziroma tega, do kakšne mere smo pokrili možni nabor vseh meritev. WRc je svoje smernice podal brez upoštevanja namena uporabe

hidravličnega modela, kar je zagotovo pomanjkljivost, zato si pogledjmo preostale smernice, ki upoštevajo namen.

Smernice natančnosti umerjanja po WRc:

- Napovedi modela: **pretoki**
 - $\pm 5\%$ odstopanja pretokov, če meritve obsegajo več kot 10% vseh pretokov,
 - $\pm 10\%$ odstopanja pretokov, če meritve obsegajo manj kot 10% vseh pretokov.
- Napovedi modela: **tlaki**
 - ± 0.5 m oz. $\pm 5\%$ odstopanja tlakov, 85% vseh meritev tlakov,
 - ± 0.75 m oz. $\pm 7.5\%$ odstopanja tlakov, 95% vseh meritev tlakov,
 - ± 2.0 m oz. $\pm 15\%$ odstopanja tlakov, 100% vseh meritev tlakov.
- Napovedi modela: **delovanje vodohranov** (razširjena časovna simulacija - EPS)
 - $\pm 5\%$ odstopanja delovnega volumna vodohrana (volumen v in iz vodohrana) med dvema časovnima korakoma.

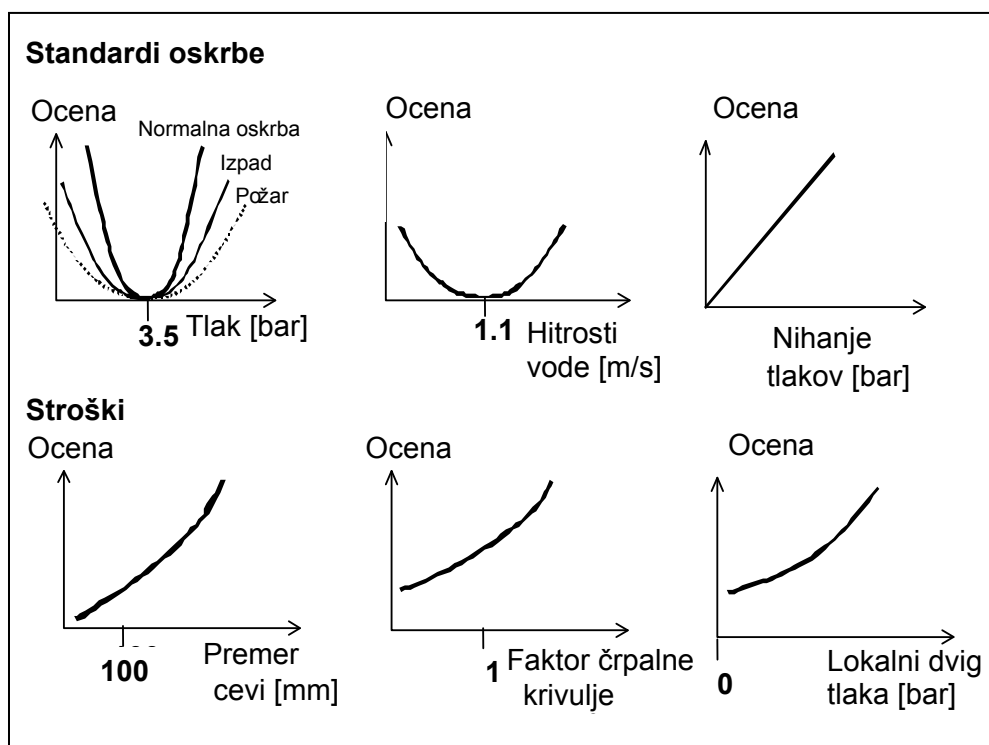
Po izvedenem umerjanju, ko se ugotovi, da hidravlični model predstavlja dejanski vodooskrbni sistem v sprejemljivem odstopanju, se lahko tak model prične uporabljati pri sami analizi stanja sistema in iskanja ustreznih rešitev, s katerimi se bo zagotovilo ustrezno delovanje vodooskrbnega sistema v trenutnem obratovanju kakor tudi v prihodnosti.

3.6 Analiza in načrtovanje

Kot je bilo že omenjeno, šele umerjen hidravlični model lahko zadovoljivo predstavlja dejanski vodooskrbni sistem in obratovalna stanja v njem. Z umerjenim hidravličnim modelom se tako lahko izvajajo simulacije dejanskega stanja, raznih obratovalnih in obtežbenih stanj ter se zato s spreminjanjem hidravličnih parametrov in vključitvijo novih povezav ter elementov (nov cevovod, črpališče, vodohran, ventil ipd.) opazuje hidravlično obnašanje sistema. V osnovi se lahko hidravlični model kot podpora odločanju uporablja za naslednje namene (Orel, 2004):

- analizo trenutnega stanja obstoječega vodovodnega omrežja in preverjanje različnih scenarijev obratovanja,

- dolgoročno planiranje razvoja in obnove dotrajanih sistemov,
- analize porabe energije in stroškov obratovanja,
- študije požarne varnosti in tudi
- analizo kvalitete pitne vode oziroma možne propagacije onesnaženja.



Slika 32 Kvantitativna ocena sprejemljivosti odstopanja od optimalnih vrednosti na področju iskanja optimalne rešitve pri analizi vodooskrbnega sistema (Steinman et al. 2001)

Analize vodooskrbnega sistema, s katerimi se posredno ugotavlja izpolnjevanje robnih pogojev (Podpoglavje 2.2), se opravi s pomočjo hidravličnega modela VS. Obseg in globina opravljenih analiz je odvisna od njihovega namena, ki se pojavlja na sistemu (obratovanje, rekonstrukcija, novogradnje ipd). V postopku analize in načrtovanja se s hidravličnim modelom preverja več različnih parametrov, zlasti:

- tlaki v vozliščih, ki se zagotavljajo glede na standarde oskrbe (maksimalni, minimalni tlaki, nihanje tlakov ipd.),
- hitrosti vode v ceveh, od katerih je odvisno časovno zadrževanje vode v sistemu in neposredne energijske izgube, in

- stroški obratovanja VS, pri katerih se upoštevajo energijski stroški (črpanje vode, inštalirana moč črpalk) in investicijski stroški (gradnja cevi različnih premerov in v različnih območjih, gradnja vodohranov ipd.).

Pri tem je treba upoštevati, da je iskanje optimalne rešitve večciljen problem, saj je treba hkrati zadostiti več kriterijem, ki imajo vsak zase svoj optimum (Slika 32). Na primer pri stroških vgradnje cevi je najceneje, če se cevi ne vgradi, vendar v takem primeru tlaki v kontrolnih vozliščih ne bodo blizu optimuma niti v primeru normalne oskrbe, zato taka rešitev vseeno ne pride v poštev.

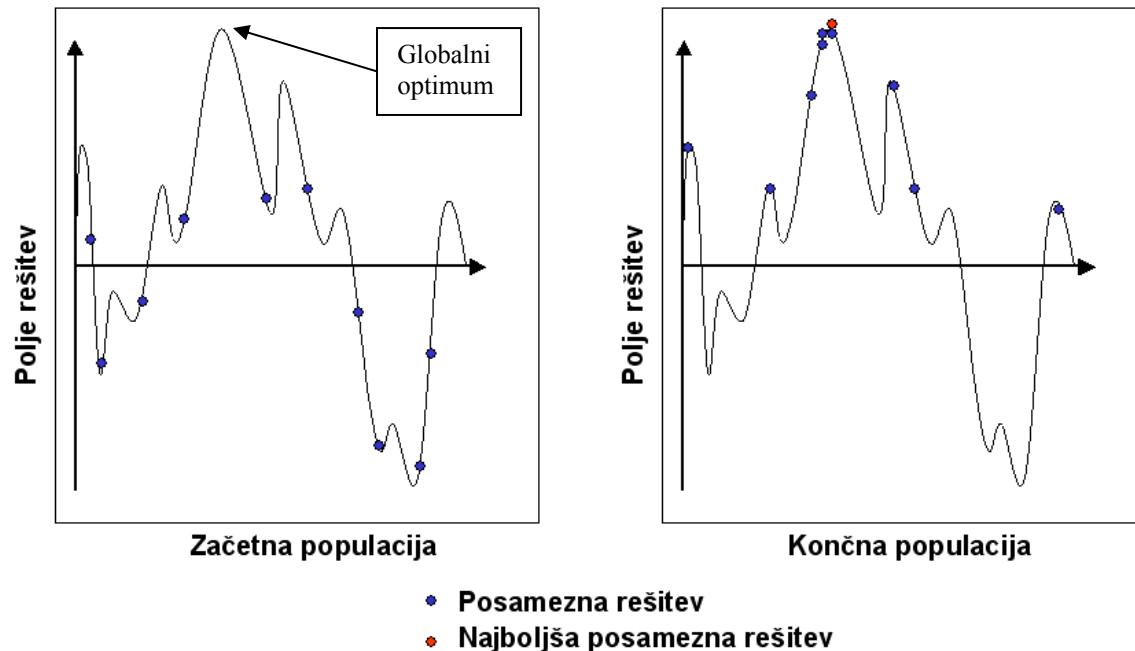
Pri iskanju optimalne rešitve je v takem primeru težko uporabiti ali določiti determinističen ali iterativen pristop. Z večanjem števila optimiziranih spremenljivk (večje število cevi, nastavitve črpalk, kote vodohranov ipd.) se namreč eksponentno večja polje rešitev ob tem pa tudi število lokalnih optimalnih rešitev. Poleg tega je vsak optimizacijski primer ravno dovolj unikaten, da je verjetno raziskava enovitih determinističnih pristopov težka.

Da se na področju optimizacije načrtovanja vodooskrbnih sistemov ne bi obstalo na pristopu "poizkus-napaka", ki je zaradi obsežnosti problema optimiziranja kakor tudi samega umerjanja hidravličnih modelov vodooskrbnih sistemov zelo počasen in nezanesljiv, so se na tem področju uveljavile razne nedeterministične metode, zlasti genetski algoritmi (Šantl, 2001; Steinman, 2001).

Ideja uporabe genetskih algoritmov kot optimizacijskega orodja je posnemanje procesa, ki ga pozna narava – evolucije in njenega osnovnega mehanizma – naravne selekcije. Z zornega kota evolucije so vsa živa bitja v naravi rezultat zgodovinskega optimizacijskega procesa, ki je v svojem bistvu enostaven, le polje možnih interakcij in gostote informacije je bistveno večje in kompleksnejše. Uporaba genetskih algoritmov na področju vodooskrbe se je izkazala za zelo učinkovito na več področjih, od iskanja optimalne rešitve pri dimenzioniranju cevovodov, umerjanju, coniranju in na področju obratovanja vodooskrbnih sistemov (Schaetzen, 2000).

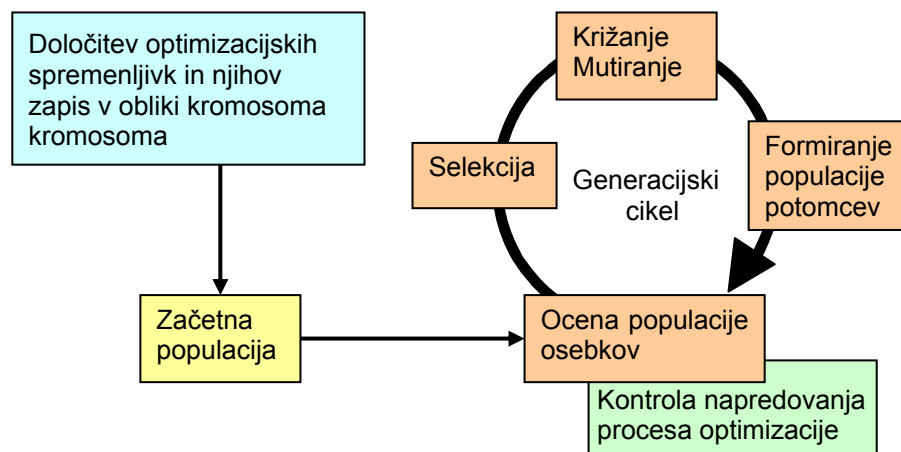
Osnovni principi uporabe genetskih algoritmov kot optimizacijskega orodja so bili raziskani že v preteklosti (Holland, 1975 in Goldberg, 1989), njihov aplikativni razvoj je omogočil šele razvoj močnejših računalnikov in učinkovitejših modelov vodooskrbnih sistemov, tako da se je namišljeni evolucijski proces naravnega izbora vzpostavil in pospešil do mere, da je bilo mogoče pridobiti rezultate v zadovoljivem času (Savič et al., 1995). Glavna značilnost genetskih algoritmov je ta, da se na začetku ustvari naključno določen nabor rešitev znotraj polja rešitev, ki se zatem z uporabo selektivnih, kombinatornih in majhnim deležem naključnih operacij po generacijah pride do nabora rešitev, kjer se ena od njih nahaja v globalnem optimumu ali vsaj blizu njega (Slika 33).

Za boljše razumevanje postopka uporabe genetskih algoritmov prikazuje Slika 34 primer osnovnih korakov, ki se izvajajo v postopku uporabe genetskih algoritmov (Banovec et al, 2003). V izhodiščnem koraku je treba opredeliti optimizacijski problem, to je katere spremenljivke in v kakšnem razponu so predmet optimizacije (npr. določene cevi z razponom možnih premerov cevi od 100 do 400 mm).



Slika 33 Ilustrativni prikaz optimizacijskega procesa z uporabo genetskih algoritmov

Optimizacijske spremenljivke je treba zapisati v obliki niza (kromosoma), tako da točno določeno območje (alel) predstavlja vrednosti (geni) za točno določeno spremenljivko. Na primer, na šestem mestu v kromosomu je zapisana vrednost premera cevi za cev št. 523.



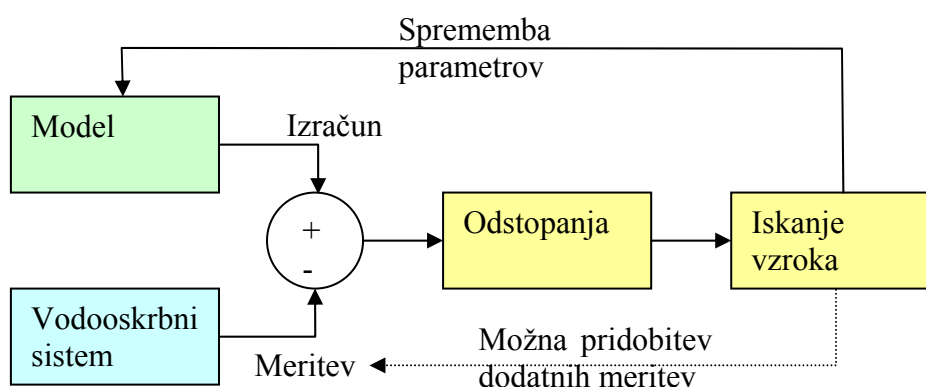
Slika 34 Primer optimizacije z uporabo genetskih algoritmov

Zatem se v določenem razponu vrednosti za posamezni gen (npr. premeri cevi imajo lahko vrednosti od 100 mm do 400 mm) ustvari začetni nabor (populacija) možnih rešitev (osebkov), ki se jih zatem oceni glede na ciljno funkcijo. Na primer rešitev, ki ne da zadovoljivih tlakov, je slabše ocenjena od rešitve, ki je bližje zelenim tlakom. Med rešitvami, ki bolje zadovoljujejo zastavljene kriterije, se v naslednjem koraku med seboj zamenjajo določeni deli niza in določene vrednosti naključno spremenijo.

Tako se ustvarijo nove rešitve, ki sestavljajo naslednji nabor rešitev (generacijo). Postopek se vrši tako dolgo, dokler se ocena ne izboljšuje več. Kot je bilo že omenjeno, se ugotavlja, da je faza makrokalibracije v celotnem procesu hidravličnega modeliranja premalo dorečena. Zato je bilo to raziskovalno delo usmerjeno v to področje in naslednje poglavje je namenjeno podrobnejši obravnavi prav makrokalibracije.

4 MAKROKALIBRACIJA HIDRAVLIČNEGA MODELA

Pri modeliranju vodooskrbnih sistemov se pojavljajo mnogi viri napak, ki vplivajo na napovedovanje hidravličnih razmer vodooskrbnega sistema in so lahko različnega izvora ali so celo posledica več izvorov. Zato je k procesu modeliranja in kalibraciji treba pristopiti sistematično (Slika 35).



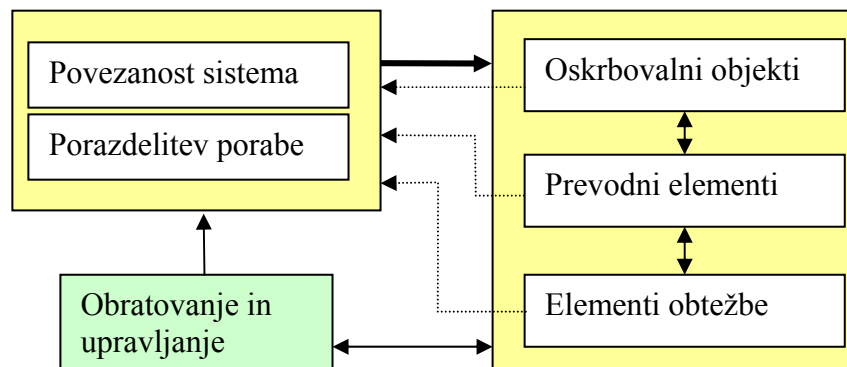
Slika 35 Pristop k procesu iskanja napak pri hidravličnem modeliranju (Perez, 2003)

Ker se želi, da je postopek makrokalibracije konvergenten, to je postopno, a zanesljivo približevanje rezultatov hidravličnega modela k meritvam na stvarnem vodooskrbnem sistemu, je treba uvesti sistematičen pristop k odpravljanju napak (Durkin, 1994). Tak strokovni pristop mora zlasti upoštevati ustrezen postopek in primerjavo rezultatov z meritvami, s katero se lahko čim bolj enoznačno ugotovi izvor napake in se izogne nekonsistentni obravnavi sistema.

4.1 Strokovni pristop

Z vidika posplošenega pristopa k obravnavi hidravličnega modela se lahko vodooskrbni sistem obravnava kot konstrukcijski pristop, pri katerem je najpomembnejša osnovna vzpostavitev mreže (pravilna povezanost cevovoda), ki je obremenjena z obtežbo, to je porabo vode (Slika 36). Zatem se prek sistematične obravnave najprej glavnih oskrbovalnih objektov (vodni viri, vodohrani in črpališča), ki zagotavljajo energijski in količinski potencial (tlačna razlika pri različnih pretokih), prek prevodnih elementov, to je vodov in zapornih elementov (cevi in ventili), ki zagotavljajo transport vode in redukcijo energijskega in

količinskega potenciala, in prek kontrole atributov samih vozlišč kot nosilcev obtežbe (poraba vode, kote) ter upoštevanjem pravil obratovanja z objekti preverjajo in na ta način z ugotavljanjem (skoraj) dejanskega stanja zmanjšujejo odstopanja izračunanih vrednosti hidravličnega modela od meritev na dejanskem VS.



Slika 36 Strokovni pristop k makrokalibraciji (Kompore, 2007)

Zaradi soodvisnosti je treba v postopku upoštevati iterativnost. To pomeni, ko se na določeni stopnji makrokalibracije odpravi določena napaka, je treba še enkrat preveriti predhodne faze makrokalibracije. Na ta način se ugotavlja, ali ni prišlo do kakšnih novih odstopanj med meritvami in izračuni, ki prej niso bili zaznani. Tipična področja napak po elementih prikazuje Preglednica 8.

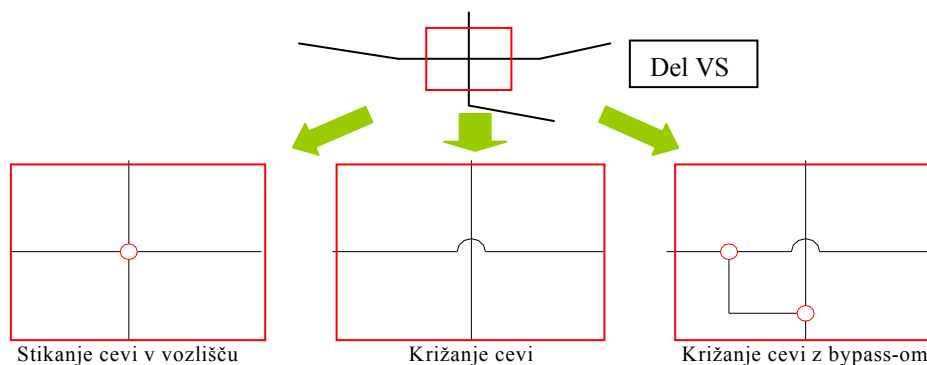
Preglednica 8 Primeri napak pri različnih elementih hidravličnega modela VS

Element	Napaka
Vodni viri	Topografske (kota, območje) Nihanje gladine (zajetje, vodnjak)
Vodohrani	Topografske (kota, območje) Prostornina
Črpališča	Črpalna krivulja Kota izhodiščne točke (vozlišče, vodnjak)
Cevi	Hrapavost Premer
Ventili	Nastavitev redukcije, odpiranja Smer delovanja Kota izhodiščne točke
Vozlišča	Topografske (kota) Poraba

V skladu z zgoraj predstavljenim pristopom in ugotovitvami tipičnih napak so v nadaljevanju podrobneje predstavljene metode, ki se izvajajo v podanem sosledju in s katerimi se določi in skuša odpraviti napaka.

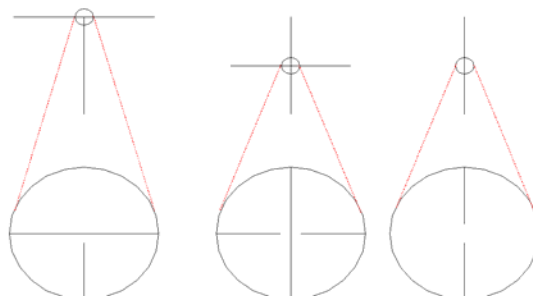
4.1.1 Povezanost omrežja

Pri avtomatskem vnašanju oziroma prenosu podatkov o cevovodih iz različnih podatkovnih baz, s katerim se prihrani veliko časa in truda, lahko pride do napak predvsem zaradi nenatančnosti vhodnih podatkovnih slojev o ceveh. Nekaj primerov stikanja in napak, do katerih lahko pride zaradi nenatančnega vnosa v podatkovno bazo, prikazujeta slika 37 in slika 38.



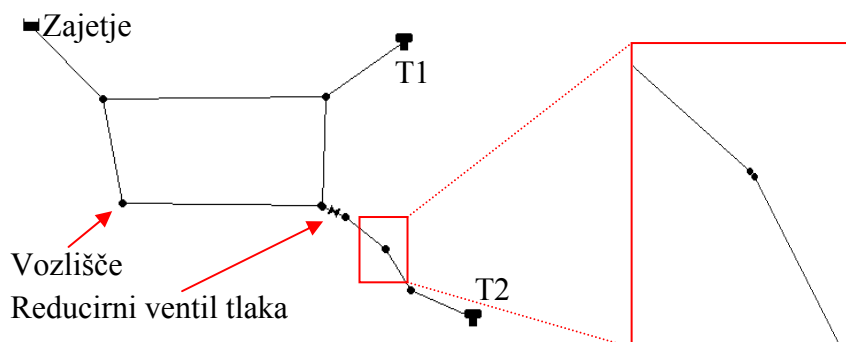
Slika 37 Možne variante poteka križanja cevi

Naslednji primer prikazuje hidravlični model enostavnega vodooskrbnega sistema z vodnim zajetjem, dvema vodohranoma in enim reducirnim ventilom tlaka za nižje ležeče območje – nižja tlačna cona (Vodohran T2).



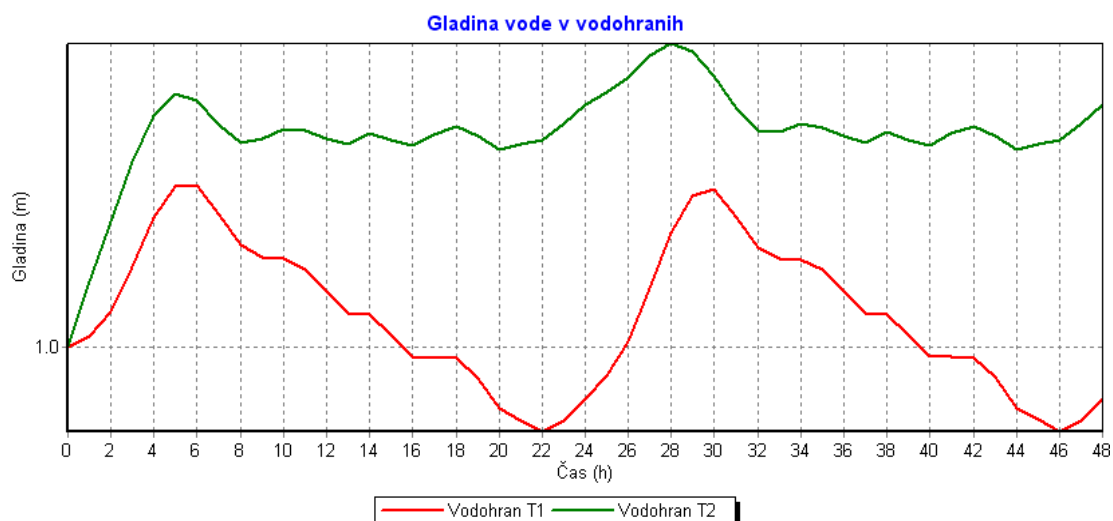
Slika 38 Možne napake, do katerih lahko pride pri avtomatiziranem vnosu oz. prenosu podatkovnih slojev v hidravlični model, ki so vidne pri podrobnejšem pregledu sistema

Pri vzpostavitvi modela je prišlo do napake, saj v določenem delu cevovoda ni prišlo do pravilnega stikanja, tako da je ločeni tlačni del sistema z vodohranom T2 ostal izločen.



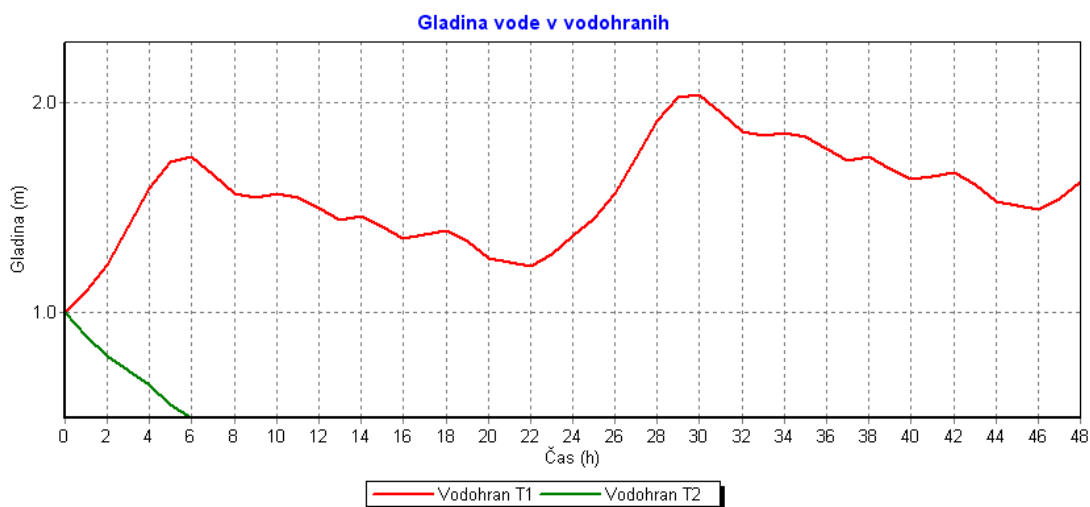
Slika 39 Hidravlični model enostavnega vodooskrbnega sistema z napako pri povezovanju cevovoda

V primeru, ko so cevi pravilno povezane med seboj, nihanje gladine vode v vodohranih T1 in T2 ustreza dejanskemu, medtem ko v primeru nepovezanosti pride do prehitrega polnjenja vodohrana T1 in praznjenja vodohrana T2. Razlika v opisu obnašanja sistema je razvidna iz primerjave spodnjih dveh slik, ki podajata rezultate modeliranja dogodkov.



Slika 40 Nihanje gladine vode v vodohranih – vodooskrbni sistem je povezan

Ker je celotna vsota časovne porabe vode enaka kot v primeru pravilnega delovanja, se lahko v procesu makrokalibracije pride do sklepa, da se določen del sistema napaja iz napačnega vodnega vira.



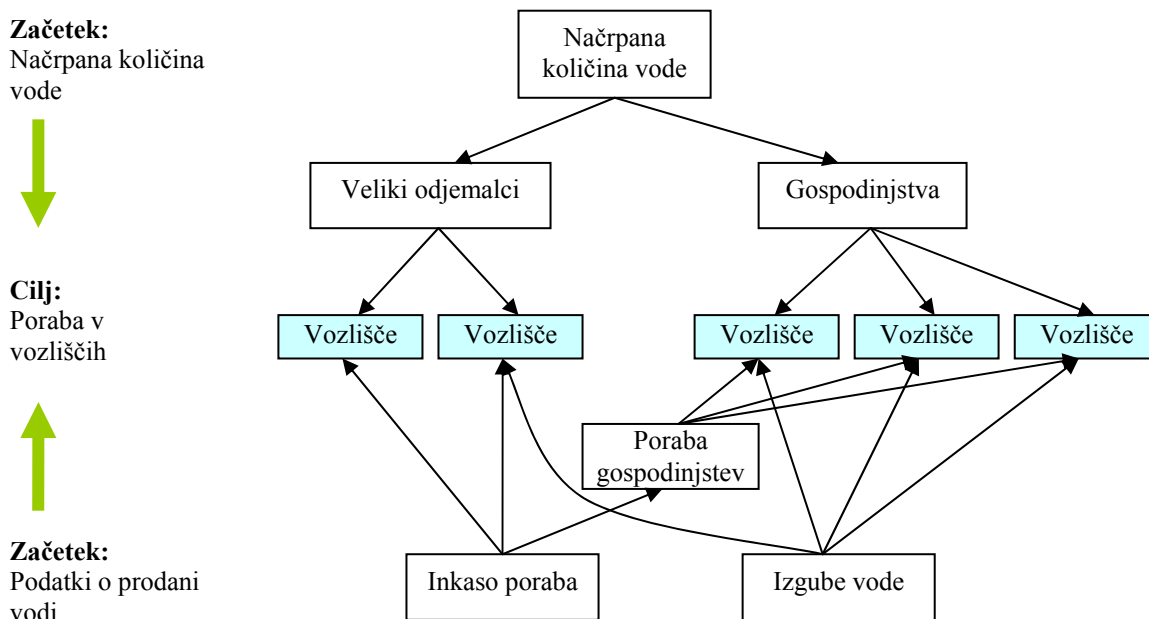
Slika 41 Nihanje gladine vode v vodohranih – vodooskrbni sistem ni povezan

V primeru velikih vodooskrbnih sistemov z veliko elementi se lahko pri vzpostavljanju podatkovne baze omrežja in surovega hidravličnega modela pojavi veliko število napak in nepovezanosti, kar za seboj potegne veliko preverjanja in vzporednega dela. Zato je na tem področju vsekakor dobrodošel razvoj avtomatskega postopka, s katerim bi se hitreje poiskalo in uredilo vsak del omrežja, ki ni povezan z ostalim delom omrežja.

4.1.2 Dobava in poraba vode na nivoju celotnega VS

Alokacija porabe je postopek prostorske porazdelitve enot porabe različnega tipa (gospodinjstvo, industrija) v vozlišča hidravličnega modela, pri čemer je treba upoštevati časovno nihanje porabe prek splošnih ali izmerjenih koeficientov. Na primer, določevanje gospodinske porabe zahteva njeno navezavo na prostorske podatke o razporeditvi prebivalstva prek objektov, priključenih na vodooskrbo, in upoštevanje statističnih enot porabe vode, na primer v obliki statističnih vrednosti [l/preb/dan]. Pred nadaljevanjem hidravličnega modeliranja je treba v tej fazi preveriti tako določeno alokacijo porabe vode s podatki o celotnih količinah načrpane in prodane vode ter ustrezno prilagoditi predvsem vzorce porabe, ki so lahko za določen VS bili že stari ali neprimerni.

Slika 42 prikazuje postopek določevanja porabe po vozliščih s hkratno uporabo dveh smeri. Vozliščne porabe se razlikujejo glede na izhodiščne podatke o porabljeni vodi.

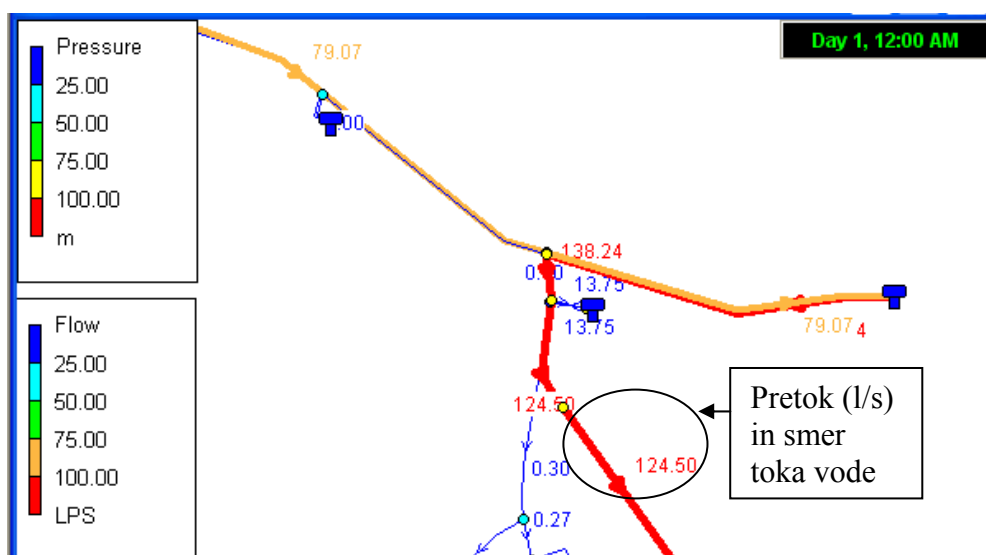


Slika 42 Alokacija porabe vode s kontrolo, izvedeno na podlagi upoštevanja celotne porabe vode v vodooskrbnem sistemu (Kozelj, 2004)

Prva smer je določitev dejanske porabe na podlagi podatkov o načrpani vodi (Slika 42 – od zgoraj navzdol). S podatki o načrpani vodi in podatki o porabi velikih odjemalcev je možno določiti razliko, to je količino vode, ki se jo razporedi med vozlišči z gospodinjstvo porabo. Ob znanih lokacijah gospodinjstev in velikih odjemalcev je alokacija porabe v najbližja vozlišča zelo enostavna. Druga smer pa je določitev porabe iz obračunane oziroma izmerjene ("inkaso") porabe vode (Slika 42 – od spodaj navzgor). V tem primeru je alokacija obračunane porabe že prostorsko vezana na objekt oziroma priključek. Razporeditev te porabe v vozlišča ne predstavlja velikih težav. Poleg obračunane porabe pa je treba po nekem ključu razporediti še izgube vode v vodooskrbnem sistemu, katerih količino je mogoče določiti iz razlike med načrpano in obračunano vodo. Kriteriji razporeditve izgub se pogosto določajo iz podatkov o starosti cevovodov, podatkov o okvarah vodooskrbnega sistema, relativnih tlakov v sistemu oziroma iz izkušenj upravljalca.

Podatek o dobavljeni vodi, zlasti če obstaja vsaj kakšna časovna meritev o dotokih vode iz vodnih virov ali določenih vodohranov, je primerna podlaga za preveritev, ali model pravilno

določi pretoke glavnih količin vode in njihovih smeri. Slika 43 prikazuje tak primer hidravlične analize na delu sistema. Iz slike so razvidni glavni pretoki vode, na podlagi katerih se lahko zelo hitro ugotovi, ali sistem na področju transporta vode deluje pravilno oziroma je povezan pravilno.

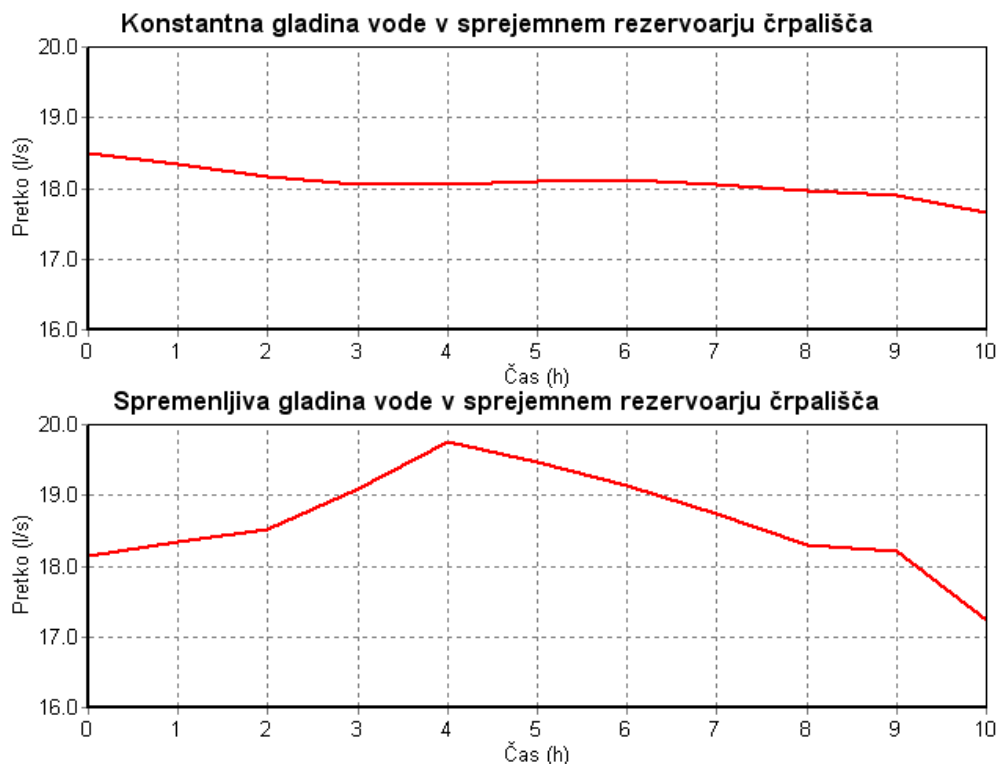


Slika 43 Pretoki in smeri vode v cevovodu – izrez iz opravljenih analiz (EPANET2)

Kot je bilo že povedano (Slika 36) se v takem primeru, ko se ugotovi napačna povezanost sistema, vrne v predhodne faze makrokalibracije, v tem primeru v fazo določitve pravilne povezanosti sistema.

4.1.3 Vodni viri

Na področju odkrivanja napak pri modeliranju vodnih virov je ena od pomembnih napak primer, ko voda v vodnem viru nima konstantne gladine, ampak dnevno niha, tako da tekom dneva pride do različnih tlačnih potencialov dobave vode v VS. Tak primer nastopi, ko se del vodooskrbnega sistema oskrbuje prek črpališča, ki polni sprejemni rezervoar. Ker zaradi razlik med jakostjo črpanja in nihanja porabe vode v sistemu gladina vode v sprejemnem rezervoarju črpališča niha, pride v delu sistema, ki ga oskrbuje takšno črpališče, do različnih izračunanih dotokov vode iz črpališča. Slika 44 prikazuje tak primer različnega odziva enakega črpališča glede načrpane vode.



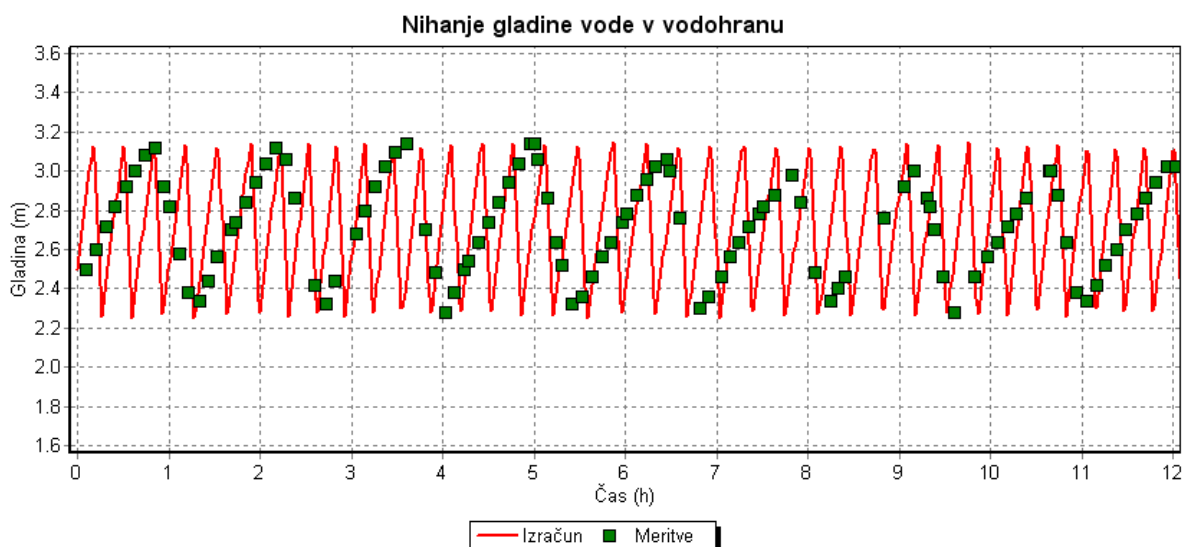
Slika 44 Razlika v načrpani količini vode v sprejemnem rezervoarju črpališča s konstantno in spremenljivo gladino vode

Če se po rezultatih izračuna ugotavlja, da gladina voda v sprejemnem rezervoarju vplivno niha, je treba zato v procesu makrokalibracije določeno pozornost nameniti tudi ustrezni določitvi gladine vode v sprejemnem rezervoarju. Pogosto ga je treba v takem primeru modelirati kot vodohran ali pa rezervoarju pripisati časovni vzorec koeficientov nihanja gladine vode.

4.1.4 Vodohrani

V primeru iskanja napak pri atributih vodohranov se v izračunih hidravličnega modela lahko na primer pojavi nepredvideno stalno prelivanje vode v vodohranu. Taka napaka je v prvi vrsti lahko posledica vnesenih napačnih dimenzij, kar se je v praksi izkazalo za precej pogosto napako. Na primer, v primeru vodohrana, ki ga napaja črpalka, ki se pri znižanju gladine vode v vodohranu pod določen nivo vključi in ponovno izključi pri dvigu gladine vode v

vodohranu nad določen nivo, je namesto premera vodohrana vnesen podatek polmera vodohrana. V takem primeru je interval polnjenja in praznjenja vodohrana časovno sorazmerno krajši (Slika 45).



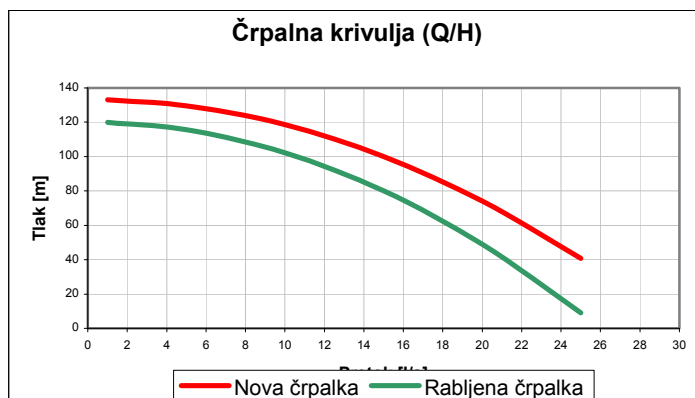
Slika 45 Napačno podane dimenzije vodohrana ter posledično prehitro nihanje gladine vode v vodohranu

Morebitni napačen dotok vode v vodohran v izračunih je treba izključiti tudi s preveritvijo kote vodohrana, to je s hidravlično razliko med virom vode in vodohranom oziroma ali v tej smeri obstaja kak redukcijski ventil, ki omejuje dotok vode v vodohran.

4.1.5 Črpališča

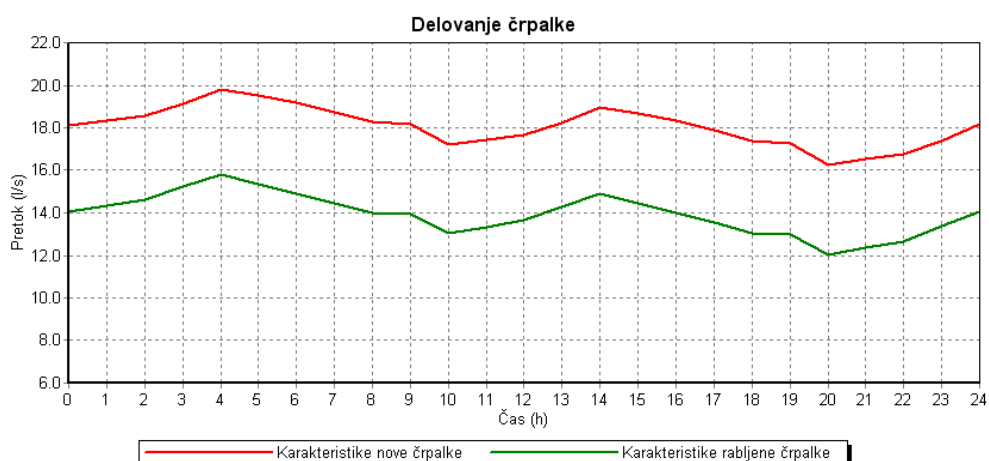
Osnovna hidravlična karakteristika črpalke pri hidravličnem modeliranju je njena črpalna krivulja, ki določa, s kakšnim potencialom črpalke črpa določene količine vode (Q/H krivulja). Pozornost je torej treba nameniti pravilni določitvi Q/H krivulje, katere karakteristike se s staranjem črpalke lahko znatno spreminjajo (Slika 46).

V primeru zmanjšane sposobnosti obrabljene črpalke tako prihaja do odstopanja izračunanih pretokov od podatkov o merjenih pretokih vode iz črpališča, ki so nižji od izračunanih pretokov, saj je bila črpalka zmodelirana s črpalno krivuljo na podlagi tehnične dokumentacije (Slika 47).



Slika 46 Sprememba črpalne krivulje zaradi staranja

Pomemben podatek je tudi, da mora biti v primeru uporabe Q/H krivulje za karakteristiko črpalke, le ta določena za celotni razpon delovanja. V nasprotnem večina programske opreme za hidravlično modeliranje s »pristopom s kriterijem porabe« ne bo nadaljevala z izračuni. Tak primer lahko nastopi, ko je skupna porazdeljena poraba vode po delu VS, ki se napaja prek omenjene črpalke, nižja (višja) kot je najnižje (najvišje) s Q/H krivuljo določeno območje delovanja črpalke.



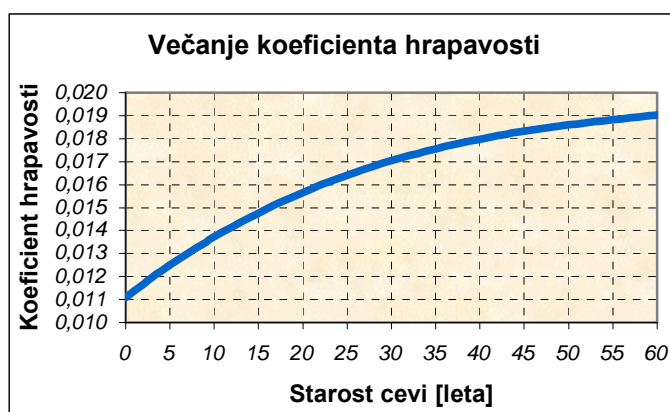
Slika 47 Sprememba pretoka zaradi staranja (izrabljenosti) črpalke

4.1.6 Cevovod

Pri cevovodih lahko pride do napake predvsem pri določitvi premera cevi oziroma hrapavosti. Oboje vpliva na hidravlične izgube. Manjši premer cevi in višje ocenjen (upoštevani)

koeficient hrapavosti vplivata na povišanje hidravličnih izgub, kar v primeru transporta vode pomeni manjši pretok in nižje oskrbovalne tlake.

Če pravilna določitev parametrov vodohrana in vodnega vira ne reši težav pri napačnem dotoku vode v vodohran, je lahko napaka v premeru cevi oziroma bolj verjetno v primeru starejših cevi v napačni oceni koeficienta hrapavosti (Slika 48).



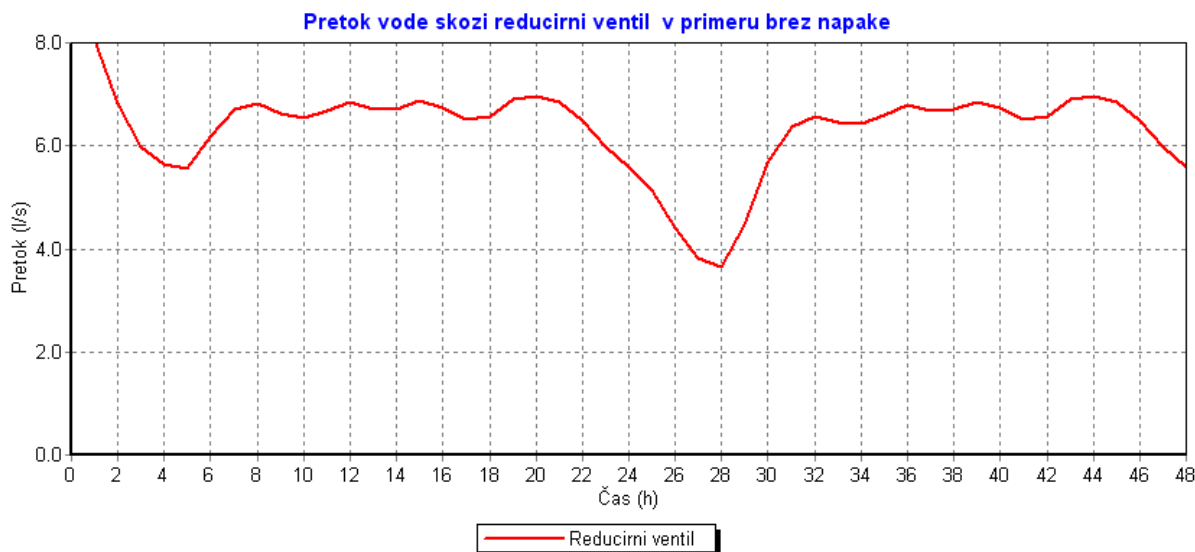
Slika 48 Večanje koeficienta hrapavosti glede na staranje cevi (jeklene in litoželezne cevi)

V fazi makrokalibracije se v takem primeru zagotovi predvsem pravilna določitev premera cevi in v skladu z zgornjo sliko približno ustrezno določi koeficient hrapavosti cevi. Natančnejše določevanje hrapavosti cevi pa je že stvar postopka mikrokalibracije.

4.1.7 Reducirni ventili

Pri reducirnih ventilih tlaka je treba biti predvsem pozoren na pretoke v njih, če so ti enaki nič, in na napačne izračunane tlake v določeni tlačni coni.

Previsoki tlaki v določeni tlačni coni so predvsem posledica dodatne povezave (napaka v povezanosti) tlačno ločenega dela. V takem primeru je pretok prek reducirnega ventila v večini stvarnih primerov enak nič. Na podlagi že predstavljenega testnega primera (Slika 39) je izračunan pretok vode skozi reducirni ventil z določitvijo izhodnega tlaka 1 bar (Slika 49). Reducirni ventil tlaka sistem loči v dve tlačni coni.



Slika 49 Prikaz izračunanega pretoka vode skozi reducirni ventil brez napake

V primeru, ko se tlačni coni povežeta z dodatno cevjo, je pretok prek reducirnega ventila tlaka enak nič. Poudariti je treba, da je pretok lahko enak nič tudi v primeru določitve napačne smeri delovanja ventila, kar je pri vzpostavitvi hidravličnega modela zelo pogosta in v začetku neopazna napaka.

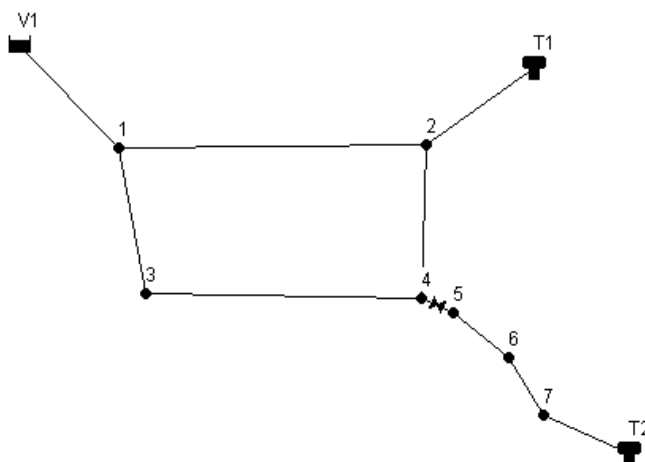
4.1.8 Tlaki v vozliščih

V fazi makrokalibracije hidravličnega sistema izračuni pogosto pokažejo izkažejo nizke ali celo negativne tlake v vozliščih ali skupini vozlišč. Ta odstopanja so posledica predvsem:

1. napake pri koti vozlišč,
2. napačne nastavitve ventilov, ki uravnavajo tlake v posameznih vozliščih ali območjih vodooskrbnega sistema,
3. neustrezne povezanosti sistema.

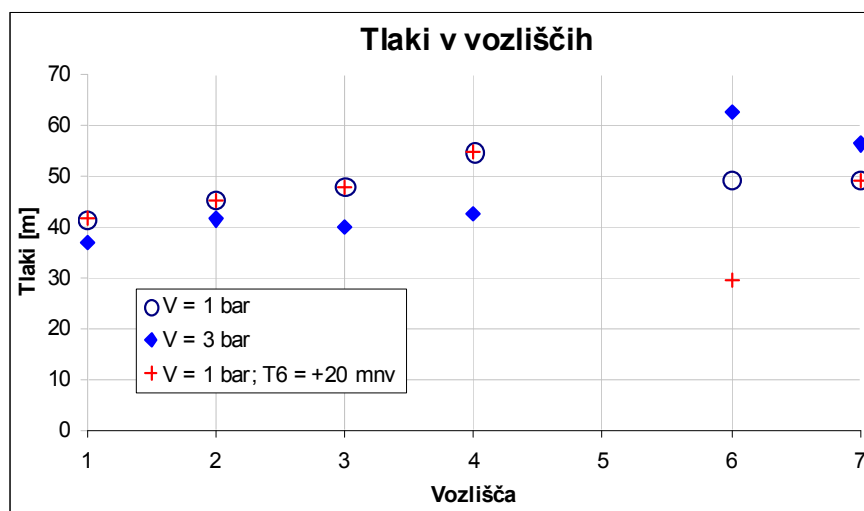
Pri preverjanju tlakov v vozliščih je treba biti predvsem pozoren, ali so odstopanja izračunanih tlakov glede na meritve zaznana v izoliranem vozlišču ali v skupini vozlišč. V prvem primeru je treba predvsem preveriti napake pri koti vozlišča.

Slika 50 prikazuje oštevilčenje vozlišč že predstavljenega testnega primera (Slika 39), ki je prek reducirnega ventila ločen v dve tlačni coni. Prva tlačna cona je neposredno vezana na vodni vir V1 in vodohran T1, druga, v kateri se nahaja tudi protiležni vodohran T2, pa se prek omenjenega reducirnega ventila tlaka med vozliščema 4 in 5 napaja iz prve tlačne cone.



Slika 50 Testni primer omrežja z oštevilčenjem vozlišč

Slika 51 prikazuje graf izračunanih tlakov v vozliščih omenjenega omrežja. Pri spremembi redukcije tlaka iz 1 bara na 3 bare je razviden padec tlaka v prvi tlačni coni in dvig tlaka v drugi tlačni coni v vseh vozliščih.



Slika 51 Izračunani tlaki pri različnih nastavitvah redukcije tlaka v ventilu in spremembi kote točke 6

Sprememba v tlakih je posledica napačne nastavitve reducirnega ventila tlaka. V primeru, ko pa je kota vozlišča 6 napačno določena za 20 m navzgor, pa je s slike razvidno, da tlaki odstopajo samo v tej točki.

4.1.9 Obratovanje in upravljanje

Vidik preverjanja nastavitve pravilnega obratovanja in upravljanja z elementi VS je postopek, ki se preverja vzporedno z že samimi nastavitvami posameznih elementov. Na tem področju je treba biti predvsem pozoren pri nastavitvi statusa delovanja črpalk, ki je v praksi v glavnem odvisno od kot v vodohranih ali potrebah po vodah v sistemu in se ustrezno uredi in vodi na nivoju informacijskega kontrolnega centra za zbiranje in obdelavo podatkov (ang. Supervisory Control And Data Acquisition – SCADA).

Težave na tem področju lahko nastopijo predvsem pri pravilni programski logični formulaciji obratovalnih pogojev, kjer je več pogojev soodvisnih in jih je treba skupinsko gnezditi v pogojne stavke in zapisati v pravilnem vrstnem redu. Namreč različna programska oprema uporablja različen pristop k programiranju pogojev delovanja. Tipičen primer je napačen vklop ali izklop črpalk, ki je pogojen z gladino vode v vodohranih, ki pa je odvisna od tarife cene elektrike za različno obdobje tekom dneva (nočni in popoldanski čas – nizka tarifa ter dopoldanski in večerni čas – visoka tarifa).

4.2 Klasifikacijski algoritmi

Glavna pomanjkljivost strokovnega pristopa je v tem, da mora na podlagi ustreznih sistematičnih pravil v postopku makrokalibracije še vedno sodelovati strokovnjak s področja hidravlike tlačnih sistemov. Namreč odločanje in iskanje rešitev je še vedno tesno povezano z dobrim razumevanjem in poznavanjem hidravličnih razmer in soodvisnosti, ki obvladujejo vodooskrbni sistem in posledično hidravlični model. Zato se je na področju makrokalibracije pričelo z razvojem pristopov in orodij, ki bi upravljalcu neodvisno od njegove strokovne usposobljenosti na področju hidravlike omogočali izvedbo makrokalibracije.

Eno takih orodij so tudi klasifikacijske metode, kjer je glavni cilj klasifikacije vzpostaviti razpoznavanje struktur v podatkih, ki so podobne že znanim in ovrednotenim strukturam. Tak pristop ponuja zanimivo alternativo statističnim pristopom, saj ne potrebujejo izhodiščnih domnev, ki so značilne za statistične metode (Perez, 2003).

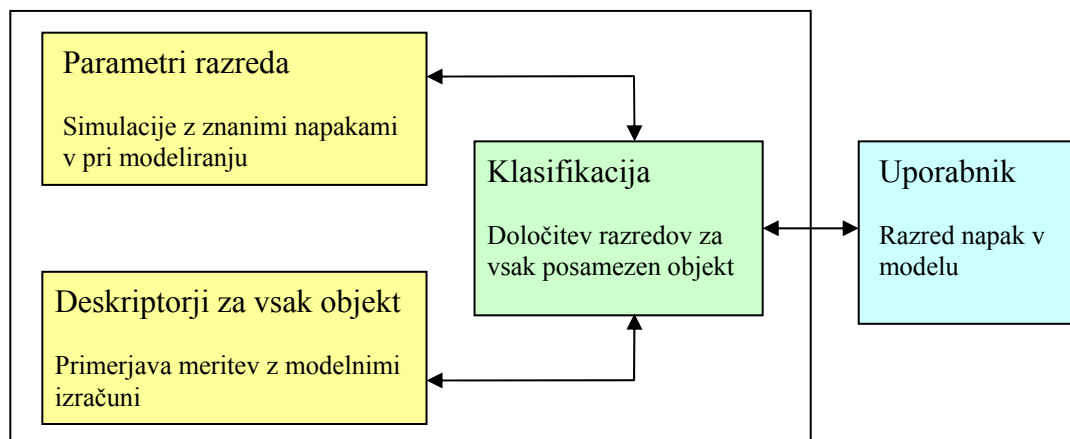
Cilj klasifikacije v kalibracijskem postopku so vozlišča in drugi elementi hidravličnega modela, kjer se vsakemu elementu dodeli razred (napaka), ki se opredeli z določenim koeficientom. Na podlagi vzpostavljenih mehkih (fuzzy) logičnih povezav in ovrednotenih »deskriptorjev« napak za posamezne razrede elementov se ugotovi, ali določen element hidravličnega modela pripada razredu, ki je izpostavljen določenemu ovrednotenju deskriptorjev (Aguado, 1998 in Perez, 2003).

V prvem koraku je treba najprej definirati deskriptorje napak za posamezne razrede. Ta del je v tej metodi najbolj heurističen, to je dognan na podlagi raziskav, izkušenj na področju umerjanja in na podlagi že dokumentiranih možnih napak. S številom vseh apliciranih deskriptorjev je določena tudi sama razsežnost prostora za klasificiranje objektov oziroma elementov hidravličnega modela. Objekt je zatem opredeljen s kvantifikacijo posameznega deskriptorja, ki je podlaga za klasifikacijski proces, v katerem se ugotavlja, ali določen objekt pripada razredu, ki je definiran z omenjeno kvantifikacijo posameznega deskriptorja.

Slika 52 prikazuje proces klasifikacije, kjer so lahko objekti na primer vsa vozlišča modela in vsi drugi elementi (vodohrani, črpalke itd.), ki imajo predoločene deskriptorje zajetih napak, ki se lahko pojavijo v postopku modeliranja. Razredi pa predstavljajo na primer napake v kotah, porabi, koeficientih hrapavosti, premerih cevi ipd.

Na podlagi predstavljenega postopka se sam postopek makrokalibracije zaključi, ko so vsi upoštevani elementi klasificirani kot elementi brez napake. Podani klasifikacijski postopek je treba ustrezno verificirati in validirati v drugih stvarnih postopkih makrokalibracije stvarnih hidravličnih modelov. Trenutno se ugotavlja, da je ena glavnih pomanjkljivosti omenjenega pristopa predvsem začetna strokovno izkustvena določitev deskriptorjev napak, kar pomeni, da mora biti sama omenjena klasifikacijska metoda podvržena vsaj osnovnemu testiranju

oziroma umerjanju. To pa zopet zahteva ustrezno usklajevanje med upravljalci in strokovnjaki s področja hidravličnega modeliranja.



Slika 52 Shematski prikaz procesa klasifikacije (Perez, 2003)

Področje avtomatizacije postopka makrokalibracije je vsekakor še odprto področje, na katerem bi ustrezne učinkovite avtomatske metode upravljalcu omogočile učinkovito in neodvisno izvedbo makrokalibracije. Vsekakor bi bilo zanimivo na področju makrokalibracije izvesti ustrezne raziskave za aplikacijo genetskih algoritmov, ki so se na drugih področjih optimizacije in podpore odločanju izkazali za učinkovito orodje (Banovec in Šantl, 2000 in 2003). Predvsem bi bilo treba dobro raziskati področje nastavitve problema, ugotoviti razsežnosti možnega polja rešitev, upoštevati grupiranje podobnih elementov in vzpostaviti ustrezen zapis niza spremenljivk umerjanja.

Postopek ustreznega strokovnega pristopa k izvedbi makrokalibracije se bo v nadaljevanju testiral oziroma verificiral na podlagi realnega vodooskrbnega sistema.

5 PRIMER MAKROKALIBRACIJE

Opravljen je bila analiza stanja tehnike, pregleda najpogosteje uporabljenih postopkov in lastnega razvoja potrebnih vmesnih orodij za uporabo različne programske opreme. Po posameznih sklopih so bili opravljeni testi, rezultati pa prikazani po posameznih podpoglavjih.

Predhodna podana metodologija v postopku makrokalibracije bo zato obravnavana tudi na primeru vodooskrbnega sistema (VS), katerega hidravlično modeliranje se je nahajalo v fazi makrokalibracije.

Upravljalac VS je predal naslednje podatke o sistemu:

- geometrijski podatki o poteku cevovoda s podatki o premeru cevi in materialu,
- podatki o objektih (vodohrani, vodni viri – zajetja, črpališča, ventili) in
- shema kontrolnega sistema in podatki o izvedenih meritvah tlakov in pretokov na glavnih virih vode in na nekaterih objektih.

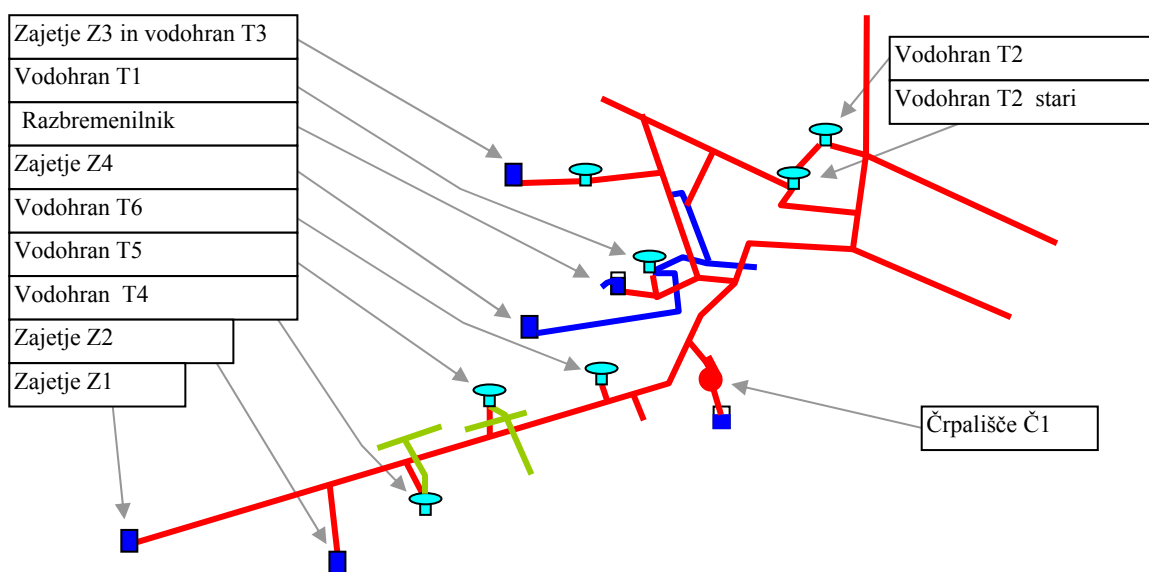
Že v fazi izdelave surovega hidravličnega modela je bilo treba izvesti predhodno usklajevanje z upravljalcem, ki je pomagal pridobiti vse manjkajoče podatke in dodatne informacije, ki so potrebni za vzpostavitev hidravličnega modela. Šlo je predvsem za pomanjkljivosti pri podatkovnih bazah, pri katerih so manjkali hidravlični podatki o ceveh (premeri cevi) in ostalih elementih in objektih (volumen vodohrana, višinska kota vodnega zajetja, ipd.). Ker je v VS veliko križanj cevi, za katere ni bilo jasno, ali so povezane ali gre samo za prečkanje, se je v tej fazi z upravljalcem podrobneje "prečesalo" samo omrežje.

Ko je bil surov hidravlični sistem vzpostavljen, se je lahko pričelo s postopkom makrokalibracije. V samem postopku se je sledilo opisanemu postopku v prejšnjem poglavju s tem, da so se nekateri postopki izvajali prirejeno. Tako se je postopek ugotavljanja povezanosti omrežja, preveritev ostalih hidravličnih karakteristik in alokacije porabe vode vršil pretežno vzporedno. S tem se je izognilo nepotrebnemu sestankovanju z upravljalcem.

5.1 Povezanost omrežja

V začetku je bilo treba preveriti, ali je sistem pravilno povezan, to pomeni, ali glavne količine vode pravilno tečejo. Kot je bilo že omenjeno, v VS prihaja do veliko križanj cevi, ki med seboj niso povezane, zato je treba biti v tej fazi zelo pazljiv.

VS je ločen v dve glavni tlačni coni. Ob transportnem vodu se pojavi tudi nekaj naselij, ki se ločeno napajajo iz istoležnih vodohranov. Slika 53 prikazuje zelo poenostavljen VS zaradi prikaza glavnih transportnih cevi z vodnimi viri in vodohrani ter zaradi prikaza prekrivanja visoke tlačne cone (rdeče) z nizko tlačno cono (modro). V sistemu je še nekaj črpališč, ki pa so izklopljena, in manjši vodni vir z istoležnim lastnim vodohranom, ločen z zapornim ventilom.



Slika 53 Poenostavljen vodooskrbni sistem s prikazom bistvenih objektov in različnih tlačnih con (rdeče – visoka tlačna cona, modro – nizka tlačna cona, zeleno – dve manjši ločeni tlačni coni)

Ker sta visoka in nizka tlačna cona povezani prek več cevi, ki pa so dejansko zaprte, je bilo treba precej pozornosti nameniti preverjanju dejanskega zaprtja določenih cevi oziroma ventilov.

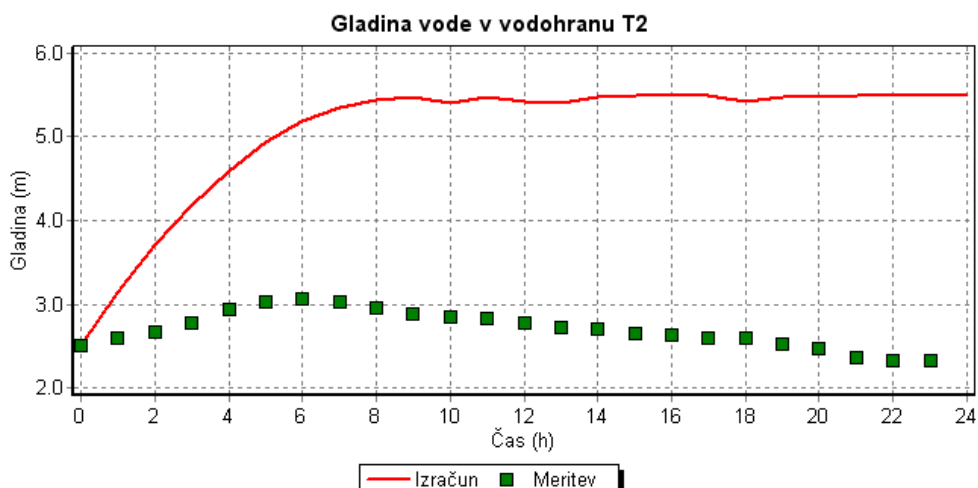
Na ta način se je onemogočilo nepravilno pretakanje vode iz visoke v nizko in druge tlačne cone.

5.2 Dobava in poraba vode

Upravljalca VS je na razpolago predal podatke o meritvah vodnih količin iz vodnih virov in mesečni porabi vode po odjemalcih. Glede na skupno mesečno porabo vode po odjemalcih je povprečna skupna poraba vode približno 50 l/s, skupni vtok vode v sistem iz vodnih virov pa je približno 120 l/s.

V tej fazi se je glede na prostorsko vodeno evidenco porabe po porabnikih (povprečna mesečna poraba) posameznemu vozlišču na podlagi njegovega vplivnega območja (glej Slika 16) dodelila pripadajoča poraba (v [l/s]).

Primerjava polnjenja vodohrana T2 oziroma nihanja gladine vode med izračunom in meritvijo nakazuje, da je v sistemu porazdeljeno premalo porabe vode, saj je vodohran T2 pri izračunu ves čas poln in se voda stalno preliva (Slika 54).



Slika 54 Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2

Prav tako izračun na podlagi hidravličnega modela v tej fazi izkazuje, da iz visoke cone doteka preveč vode v vodohran T1, namesto merjenega vtoka (max. pribl. 6 l/s) priteka max. približno 31 l/s. Ker so kote vodohranov in vodnih virov še enkrat potrjene s strani upravljalca

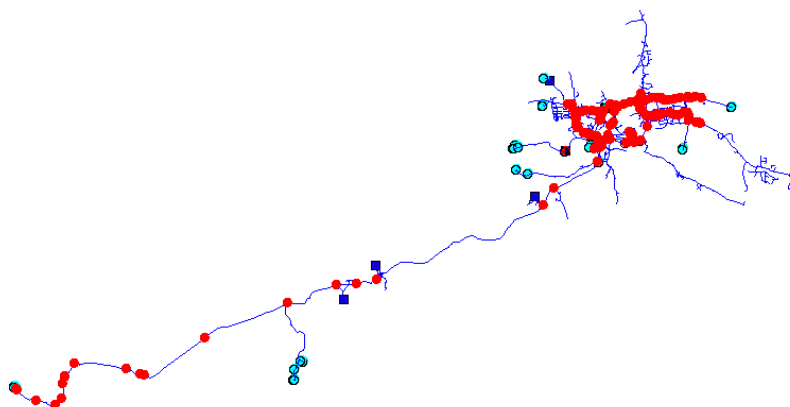
in ker se prek razbremenilnika pri vodohranu T1 voda v normalnih obratovalnih razmerah iz visoke tlačne cone ne preliva preko razbremenilnika, je verjetno razlog za previsok vtok v vodohran T1 prenizka računska (ne dejanska) poraba v sistemu.

Te ugotovitve poleg občutno višjih merjenih dotokov vode v sistem od same porabe vode nakazujejo, da je treba porabo vode v sistemu ustrezno popraviti. Pri alokaciji dodatne porabe vode se je izhajalo iz ocen, da je največ izgub na transportnih vodih. Tako se je po vozliščih hidravličnega modela, ki so del transportnega dela cevovoda, k že dodeljeni porabi na podlagi prostorske evidence porabnikov sorazmerno prištela še poraba ocenjenih izgub (35 l/s; Slika 55). Ob taki porazdelitvi je največji delež izgub pripadel območju visoke cone.

Preglednica 9 Alokacija vode glede na tip porabe

Alocirana poraba vode (povprečje [l/s])		
Gospodinjstva	Gospodarstvo	Izgube
17,1	33,1	35,0
	Skupaj	85,1

Za ustrežnejšo porazdelitev, če bi se alokacija izgub v nadaljevanju izkazala za pomemben faktor, bo treba upoštevati velikost tlakov po vozliščih, starost cevi in tudi oceno upravljalca ali druge izvedene meritve ter alokacijo izgub ponovno izvesti. Seveda je ta postopek lahko že proces mikrokalibracije, še posebej če bi bilo treba izvesti dodatne sistematične meritve na VS.



Slika 55 Razporeditev ocenjenih izgub po vozliščih na transportnih vodih po VS (rdeče točke)

Ker je celotna bilanca vtoka v VS višja, se je razlika med količino alocirane porabe vode (povprečje 85,1 l/s; evidenca porabe in ocena izgub ob transportnih vodih)) in količino celotnega vtoka (povprečje 126,2 l/s) upoštevala prek koeficientov urne porabe, in to po posamezni tlačni coni. Na ta način se je po celotnem omrežju enakomerno še dodatno povečala celotna poraba, s čimer so se zajele dodatne izgube in drugi neevidentirani odvzemi po celotnem omrežju.

Preglednica 10 Določitev urnih koeficientov porabe za visoko cono prek izenačitve z bilanco vtoka in iztoka v visoko cono

Datum meritve:	13.6.2006				Povprečna poraba		80,3	
	[l/s]							
Ura	Zajetje Z1	Zajetje Z2	Črpališč eČ1	Zajetje Z3	Vodohrani T1, T4 in T5	Vodohran T2 - bilanca	Bilanca visoke cone	Urní koeficient porabe
0:00	91,08	16,33	17,77	1,13	4,14	20,54	102,14	1,272
1:00	89,45	16,88	17,37	1,12	6,48	12,57	106,37	1,324
2:00	89,45	16,88	17,13	1,11	7,03	33,11	84,95	1,058
3:00	88,91	16,88	17,13	1,11	6,94	22,21	95,32	1,187
4:00	88,91	16,88	17,13	1,11	6,85	23,68	93,89	1,169
5:00	88,91	17,17	17,11	1,11	7,03	14,67	103,08	1,284
6:00	91,06	17,17	17,21	1,12	6,31	10,48	110,31	1,374
7:00	88,90	17,17	17,50	1,12	5,13	-4,61	124,56	1,551
8:00	71,02	17,47	17,74	1,12	6,44	-22,21	123,53	1,538
9:00	89,99	17,47	18,09	1,13	2,99	-9,85	133,98	1,668
10:00	91,08	16,33	17,45	1,14	4,19	-12,15	134,49	1,675
11:00	91,07	16,33	17,54	1,15	7,16	-7,75	127,29	1,585
12:00	91,08	16,33	17,56	1,14	4,98	-11,74	133,49	1,662
13:00	91,08	16,33	17,77	1,14	3,61	-9,22	132,48	1,650
14:00	89,99	16,33	17,74	1,12	4,84	-10,90	131,78	1,641
15:00	88,91	16,33	17,46	1,13	3,94	-3,98	124,42	1,549
16:00	89,99	16,59	17,49	1,15	3,74	-3,56	125,58	1,564
17:00	89,46	17,47	17,56	1,15	3,61	-4,61	127,19	1,584
18:00	89,98	17,47	17,67	1,15	3,43	-4,19	127,68	1,590
19:00	88,37	16,59	17,67	1,15	3,28	-9,64	130,73	1,628
20:00	69,93	17,47	18,23	1,12	3,20	-15,30	119,37	1,486
21:00	95,41	17,47	18,70	1,13	2,14	-0,63	131,66	1,639
22:00	91,08	16,06	18,23	1,14	3,79	5,24	118,38	1,474
23:00	91,08	16,33	18,09	1,19	4,52	4,19	118,84	1,480
							Povprečno	119,23

Uporabljen pristop je v tej fazi obdelave dovolj natančen, saj podatki o urnem dnevnem nihanju porabe vode za velike odjemalce niso bili na razpolago, kar pa je v primeru VS

pomembno, saj večji del porabe predstavlja prav industrijsko storitvena dejavnost (Preglednica 9). Ta ugotovitev že zahteva zbiranje dodatnih informacij.

Preglednica 10 prikazuje določitev urnega koeficienta porabe po posameznih vozliščih za visoko cono, s čimer se je izenačilo porabo vode po vozliščih s celotno bilanco vtoka vode v določeno cono. Pri tem so z zeleno označeni vodni viri, ki napajajo visoko cono, z oranžno pa vodohrani, v katere teče voda iz visoke cone. Za določitev bilance visoke cone so se pretoki vode v omenjene vodohrane odštevali od skupne količine dotoka vode iz vodnih virov, le v primeru, ko je protiležni vodohran visoke cone T2 oskrboval visoko cono, se je ta pretok k skupni bilanci vtoka prištel (ločeno označen v tabeli).

Preglednica 11 Določitev urnih koeficientov porabe za nizko cono prek izenačitve z bilanco vtoka in iztoka v nizki coni

Datum meritve: 13.6.2006		Povprečna poraba [l/s]:		4,52
		[l/s]		
Ura	Zajetje Z4	Vodohran T1	Bilanca nizke cone	Urni koeficient porabe
0:00	2,04	3,12	5,16	1,142
1:00	2,03	5,47	7,50	1,659
2:00	2,03	6,11	8,14	1,801
3:00	2,03	6,11	8,14	1,801
4:00	2,03	6,07	8,10	1,792
5:00	2,04	6,07	8,11	1,794
6:00	2,04	5,22	7,26	1,606
7:00	2,07	4,22	6,29	1,392
8:00	2,06	5,53	7,59	1,679
9:00	2,06	2,07	4,13	0,914
10:00	2,06	3,14	5,20	1,150
11:00	2,02	6,00	8,02	1,774
12:00	2,02	3,80	5,82	1,288
13:00	1,99	2,52	4,51	0,998
14:00	1,99	3,76	5,75	1,272
15:00	1,99	2,84	4,83	1,069
16:00	2,01	2,66	4,67	1,033
17:00	1,98	2,50	4,48	0,991
18:00	1,98	2,12	4,10	0,907
19:00	2,00	2,05	4,05	0,896
20:00	1,93	2,15	4,08	0,903
21:00	1,93	0,95	2,88	0,637
22:00	2,00	1,99	3,99	0,883
23:00	1,99	2,96	4,95	1,095
		Povprečno	5,74	

Urni koeficient porabe je bil zatem določen kot razmerje med bilanco in že alocirano povprečno porabo (80,3 l/s) ter se je pripisal posameznim vozliščem visoke cone. Ker podatka o dotoku vode ali nihanja gladine za vodohran T6 ni bilo na razpolago, se je v tej fazi za tlačno cono (poraba po vozliščih v tej tlačni coni), ki se napaja iz vodohrana T6, privzelo urne koeficiente porabe za visoko cono.

Enak postopek se je izpeljal še za nizko cono (Preglednica 11) in drugi dve manjši tlačni coni, ki se napajata iz istoležnih vodohranov T4 i nT5.

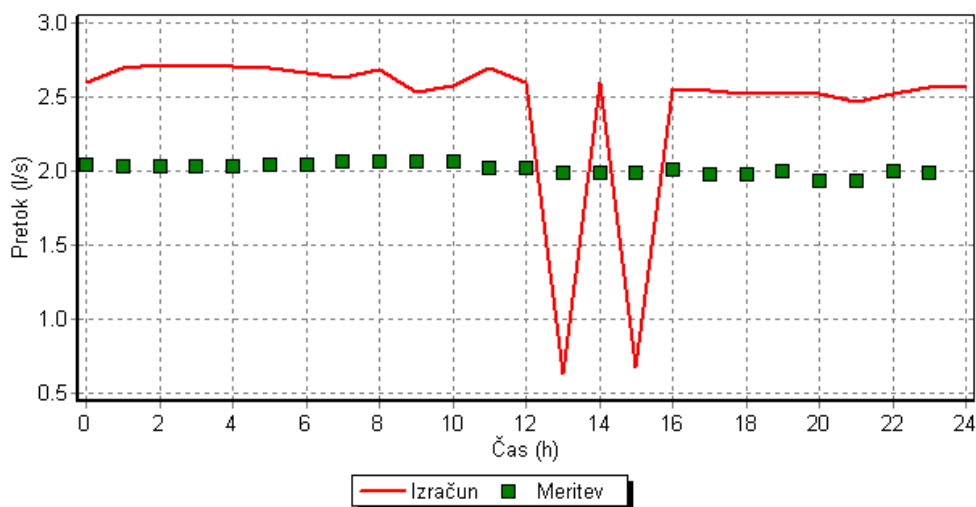
V fazi alokacije porabe po vozliščih VS se je preverila tudi sprememba koeficientov hrapavosti cevi. Ti so bili v začetku dokaj visoko predpostavljeni ($n_G = 0.018$), kar je povzročalo velike tlačne izgube pri transportu vode od vodnih virov do samega mesta.

5.3 Vodni viri in vodohrani

Pri ponovni računski kontroli sistema se je zopet ugotovilo, da v vodohran T1 kljub povečani porabi v sistemu iz visoke cone doteka občutno preveč vode, kar bi lahko bila posledica napačne določitve premerov cevi. Ker je za vtok iz visoke cone v vodohran T1 obstajala izvedena meritev pretokov, se je vgradil ventil za uravnavanje pretoka, ki se mu je pripisalo spreminjanje pretoka glede na podatke iz meritev (urna sprememba pretoka). Za natančnejšo določitev in kakršno koli natančnejše umerjanje bi bilo treba pridobiti tudi podatek o nihanju vode v vodohranu T1.

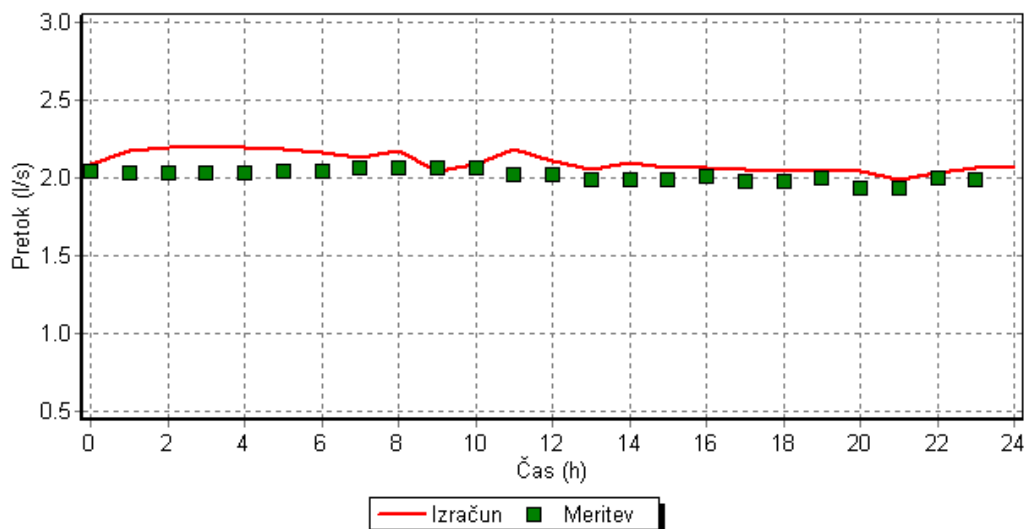
Izračun pokaže (Slika 56), da iz zajetja Z4 dotekajo večje količine vode (približno 2,75 l/s) od merjene (približno 2,0 l/s). Nenadna znižanja dotoka (spodnja slika) so posledica zaprtja vodohrana T1 zaradi polnosti. To pomeni, da se verjetno na tem odseku pojavljajo velike hidravlične izgube oziroma kote vodnih virov, zlasti vodohrana T1, niso dovolj natančne.

Izračuni so se z meritvami namreč veliko bolje uskladili, ko se je koeficient hrapavosti po ceveh v celotni dolžini od vira Z4 do vodohrana T1 z $n_G = 0,015$ zvišal na $n_G = 0,020$, kar ustrezno prikazuje Slika 57.



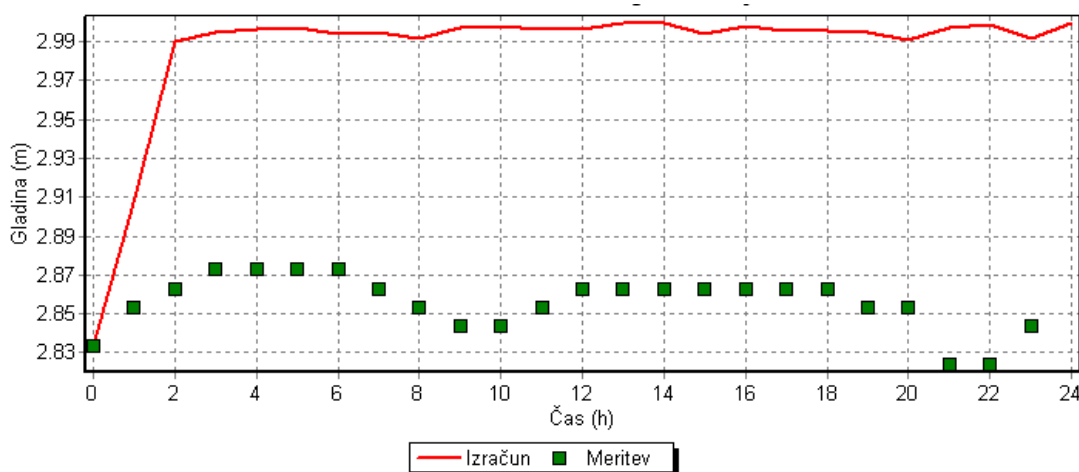
Slika 56 Dotok vode iz vodnega vira Z4 v vodohran T1

Če so cevi v tem delu VS zelo stare, bi bila taka predpostavka lahko ustrezna, vendar tega podatka za ta del sistema ni bilo na razpolago.

Slika 57 Dotok vode iz vodnega vira Z4 v vodohran T1 v primeru povečanja koeficienta hrapavosti na $n_G = 0,020$

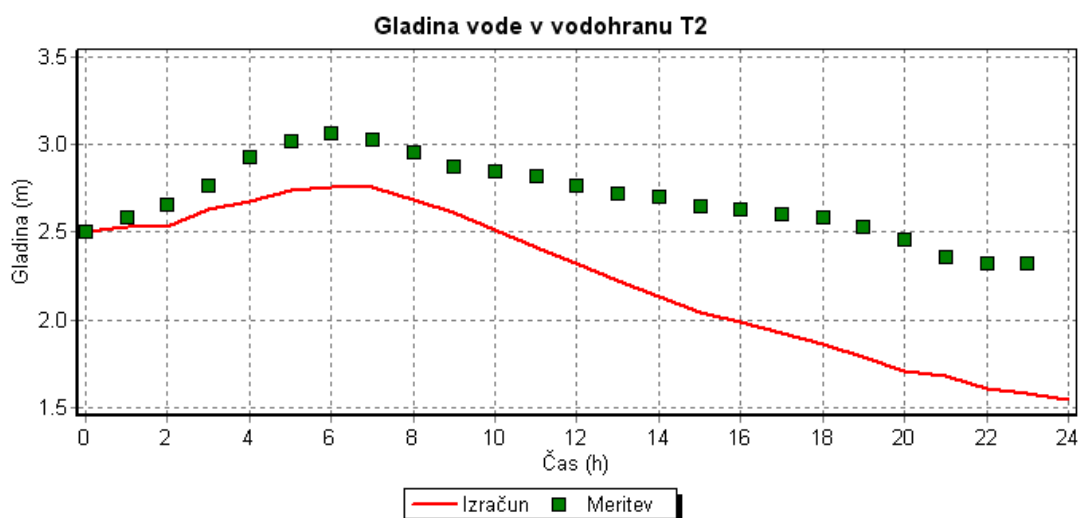
Pri kontroli nihanja gladine v vodohranu T5 se pri izračunu prav tako ugotavlja stalna popolna napolnitev vodohrana (Slika 58). Enako se ugotavlja za vodohran T4 in vodohran T6, za katera pa ni bilo na razpolago meritev.

Podobno kot v primeru dotekanja vode v vodohran T1 iz zajetja Z4 se pri dotekanju vode iz zajetja Z3 v vodohran T3 pri izračunih pojavljajo višji pretoki vode. Da se je uskladil dotok v vodohran T3, je bilo treba povečati koeficient hrapavosti na $n_G = 0,072$ ali zmanjšati premer cevi z $D = 80$ mm na $D = 50$ mm. Ker gre za zelo star del cevovoda (preko 100 let), bi bilo takšno zmanjšanje hidravlične prevodnosti verjetno.



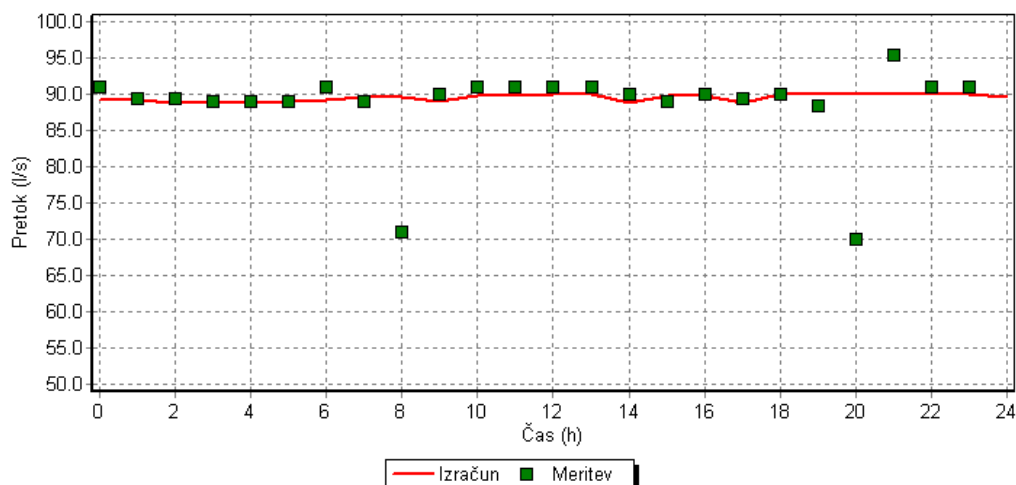
Slika 58 Nihanje gladine vode v vodohranu T5

V tej fazi makrokalibracije se je ponovno izvedla primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2. Ugotavljalo se je, da je trend polnjenja pravilen, vendar se vodohran polni prepočasi in prehitro prazni (Slika 59).

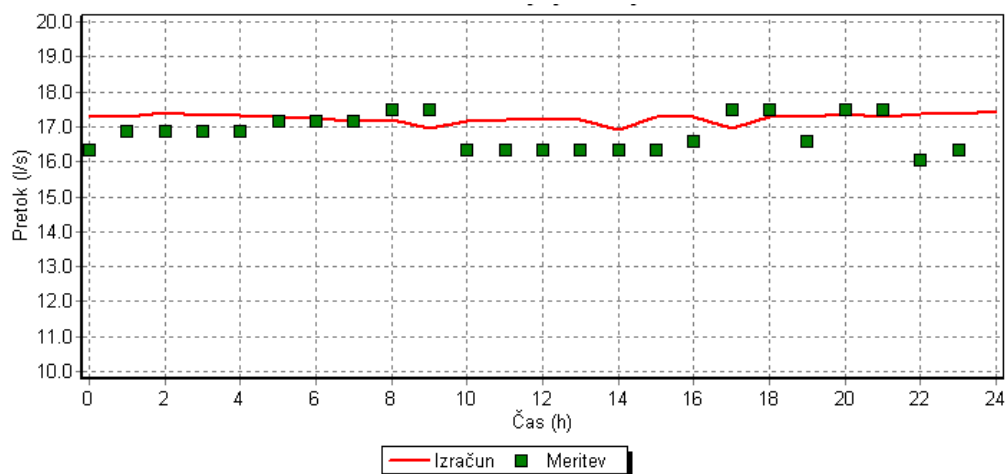


Slika 59 Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2

Izračuni dotoka vode iz glavnih zajetij Z1 in Z2 izkazujejo zadostno ujemanje (Slika 60 in Slika 61).



Slika 60 Dotok vode iz zajetja Z2

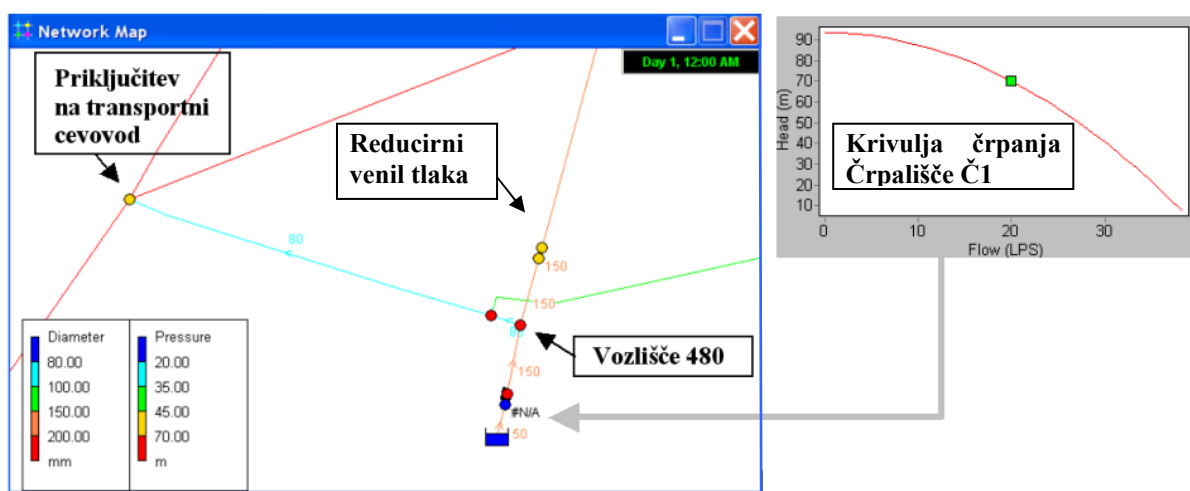


Slika 61 Dotok vode iz zajetja Z1

Nenadno zanihanje pretoka vode (Slika 61) je posledica vsrkavanja zraka v nategi, prek katere se polni zbirni rezervoar iz zajetja Z2. O tem pojavu je poročal tudi sam upravljalec vodooskrbnega sistema.

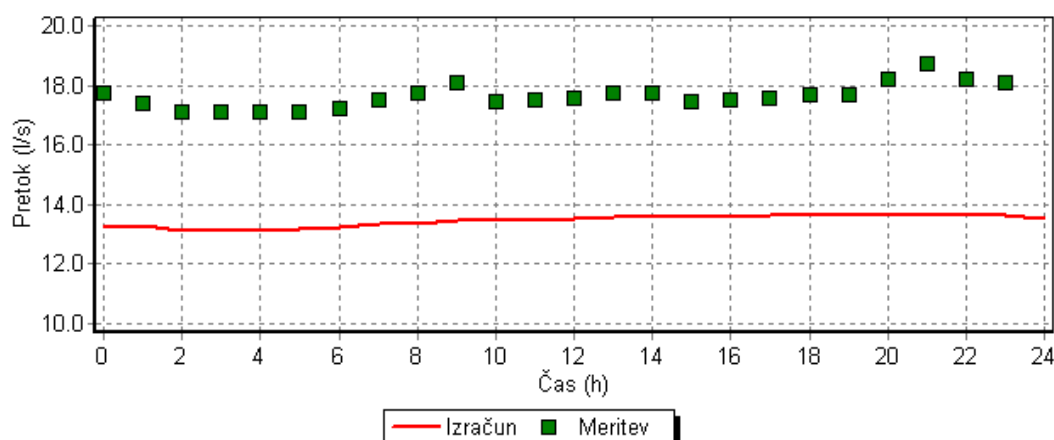
5.4 Črpališča

V obravnavanem vodooskrbnem sistemu se nahaja več črpališč, vendar je trenutno delujoče samo eno, to je Črpališče Č1, ki z vodo oskrbuje visoko tlačno cono (glej Slika 53). Spodnja slika prikazuje del visoke tlačne cone VS s črpališčem Č1 s predpostavljeno Q/H črpalno krivuljo.

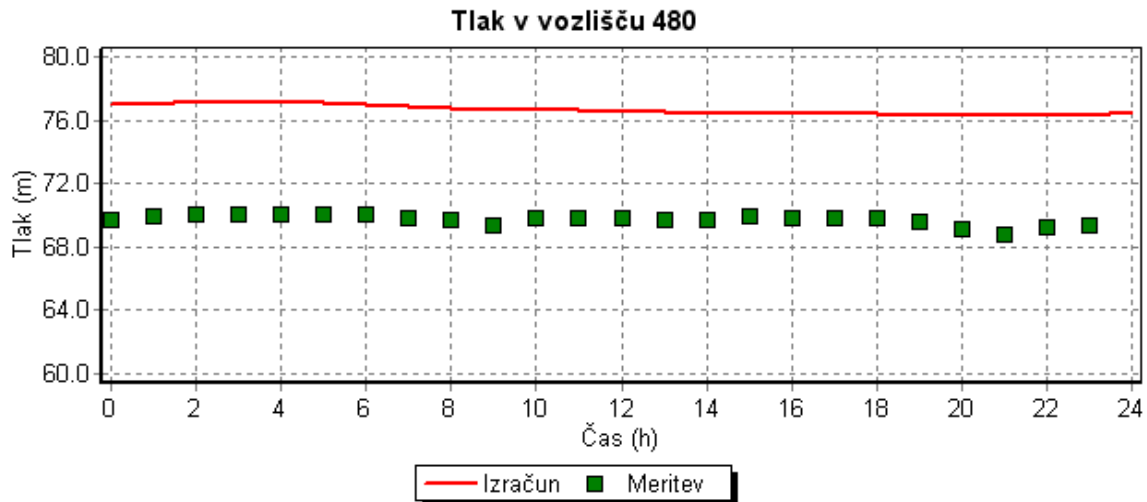


Slika 62 Črpališče Č1 z navezo na transportni cevovod

Glede na predpostavljeno Q/H črpalno krivuljo se iz črpališča dobavlja premalo vode (Slika 63). Hkrati so tlaki previsoki (Slika 64), kar nakazuje, da se je treba po črpalni krivulji premakniti proti nižjim tlakom in višjim pretokom.

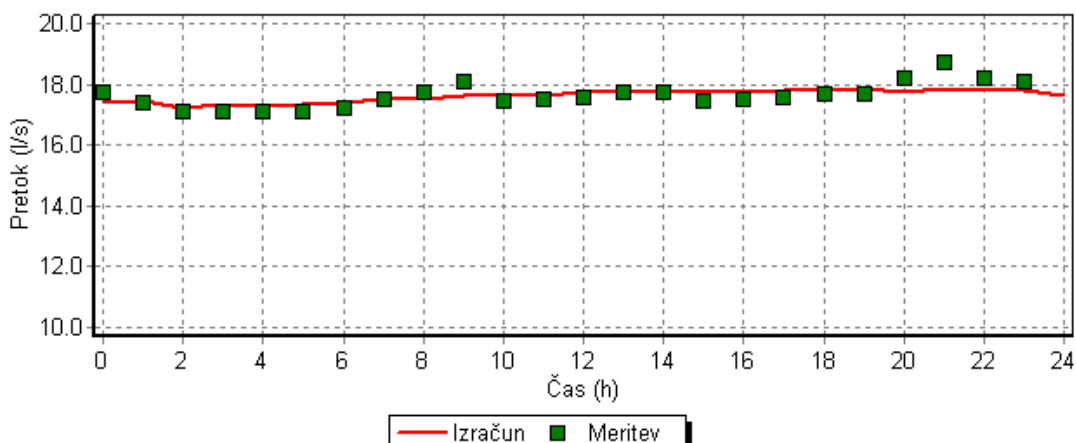


Slika 63 Dotok vode iz črpališča Č1

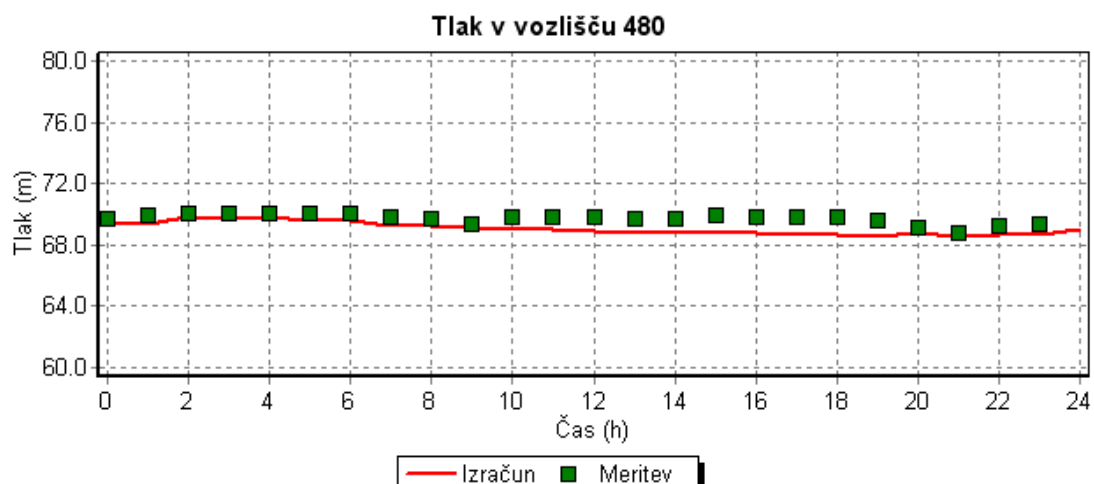


Slika 64 Črpalna višina v črpališču Č1

Zato se je v prvi fazi preverilo ustreznost črpalne krivulje. S povečevanjem moči se je doseglo merjene pretoke, vendar le tudi s hkratnim povečanjem tlaka, saj premer cevi od vozlišča 480 do priključitve na transportni cevovod znaša le 80 mm. To pomeni, da pri zagotavljanju pretoka okoli 18 l/s prihaja do velikih hidravličnih izgub, saj tlak pade za več kot 1 bar. V primeru, da se premer omenjenega dela cevovoda nadomesti s premerom 150 mm, izračuni pokažejo občutno boljše ujemanje pretokov in tlakov v merjenih točkah (Slika 65 in Slika 66). Seveda je tako predpostavko treba preveriti pri upravljalcu VS.



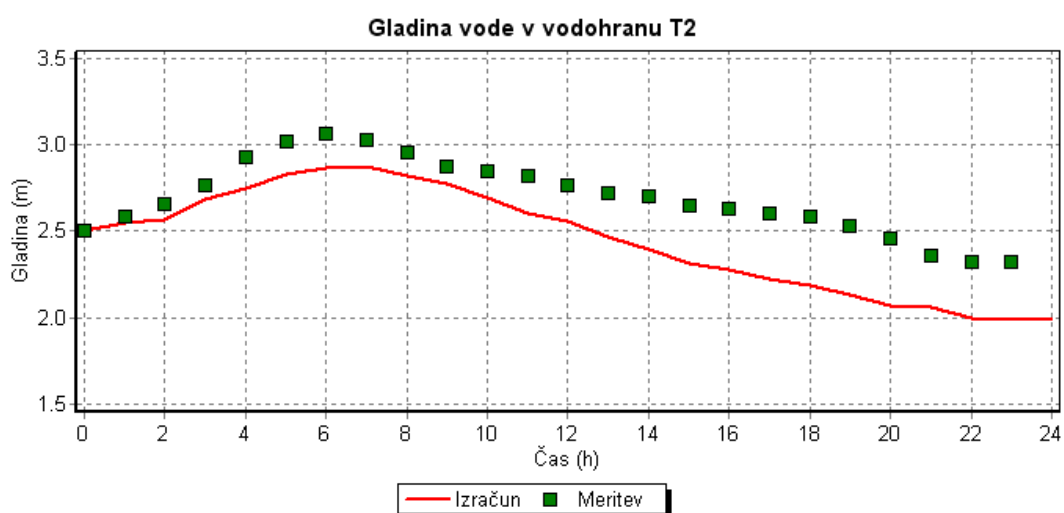
Slika 65 Dotok vode iz črpališča Č1 po povečanju premera cevi na 150 mm



Slika 66 Črpalna višina v črpališču Č1 po povečanju premera cevi na 150 mm

Ugotavlja se tudi, da reducirni ventil pri črpališču Č1 ne služi namenu, saj tlak na drugi strani ventila po izračunih s hidravličnim modelom v tej fazi makrokalibracije znaša 4,7 bara, kar je višje od njegove nastavitve redukcije tlaka, ki znaša 3,84 bara.

V tej fazi makrokalibracije se je ponovno izvedla tudi primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2 (Slika 67). V primerjavi s prejšnjo primerjavo se je izračun še bolj približal meritvam, kar je bilo zaradi povečanja vtoka črpanja iz črpališča Č1 tudi pričakovano.

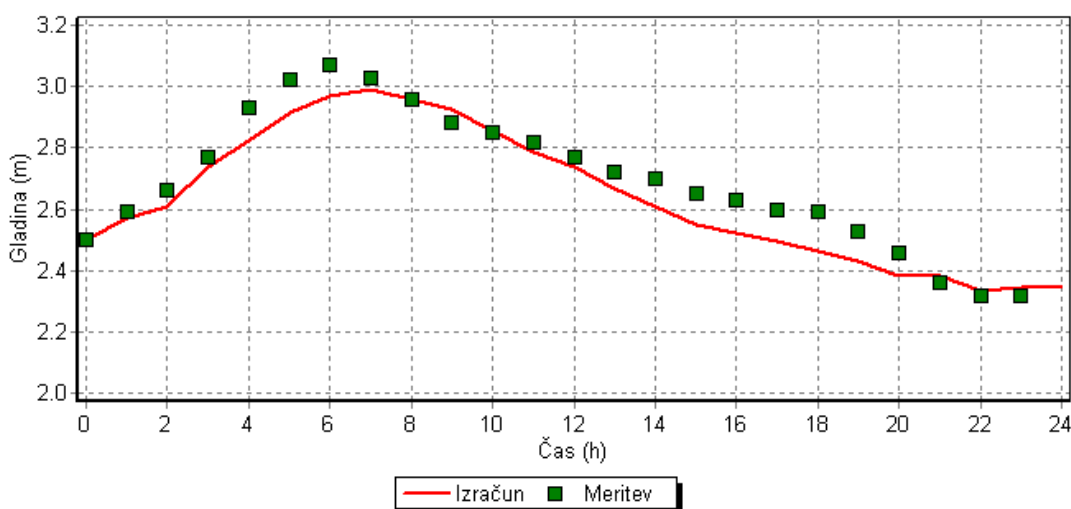


Slika 67 Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2

Še vedno je sicer opazna razlika med izračunanim in merjenim nihanjem gladine vode v vodohranu T2, vendar če bi se umerili dotoki vode v vodohrane T4, T5 in T6 (kot je bilo že povedano, v te vodohrane doteka v modelu preveč vode), bi dodatna količina vode, ki bi bila tako na razpolago in bi tekla v vodohran T2, še bolj zmanjšala razliko med izračunanim in merjenim nihanjem gladine vode v vodohranu T2. Če se na primer s hidravličnim modelom v tej fazi makrokalibracije upošteva naslednje spremembe:

- uravnava dotoka v vodohrane T4, T5 in T6,
- določitev linearne odvisnosti Q/H za črpalko Č1 ($Q_1 = 14$ l/s, $H_1 = 79$ m in $Q_2 = 25$ l/s, $H_2 = 69$ m),
- znižanje kote dna vodohrana T2 z 404,50 n.m.v. na 401,00 m.n.v. in
- premeri cevi od črpališča do transportnega cevovoda se povečajo na $D = 100$ mm s hrapavostjo $n_G = 0.013$

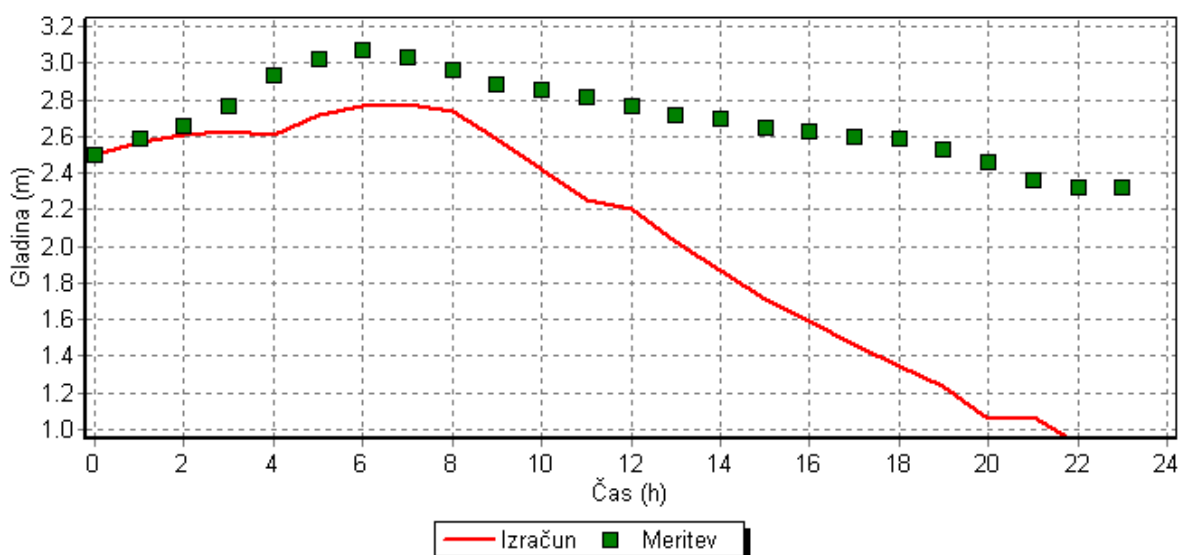
se izkaže, da se vodohran T2 veliko bolj usklajeno polni glede na meritve nihanja gladine vode v njem (Slika 68).



Slika 68 Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2 pri upoštevanju gornjega scenarija

Vendar je takšno umerjanje sistema, dokler se ne razjasnijo vse ostale ugotovljene neskladnosti med meritvami in izračuni, neustrezno. Na primer, če se pri omenjenem scenariju odstrani ventil kontrole pretoka za pretok vode iz visoke cone v vodohran T1, izračuni še vedno pokažejo hidravlični pretok vode okoli 30 l/s, kar je zdaleč več od merjenih.

Seveda se pri takem scenariju pri spremenjenih hidravličnih gradientih, ki so največji v smeri nižje ležečega vodohrana, to je vodohrana T1, vodohran T2 zopet premalo polni in prehitro prazni. Zaradi tega se razlika med izračuni in meritvami nihanja gladine vode v vodohranu T2 zopet občutno poveča (Slika 69).

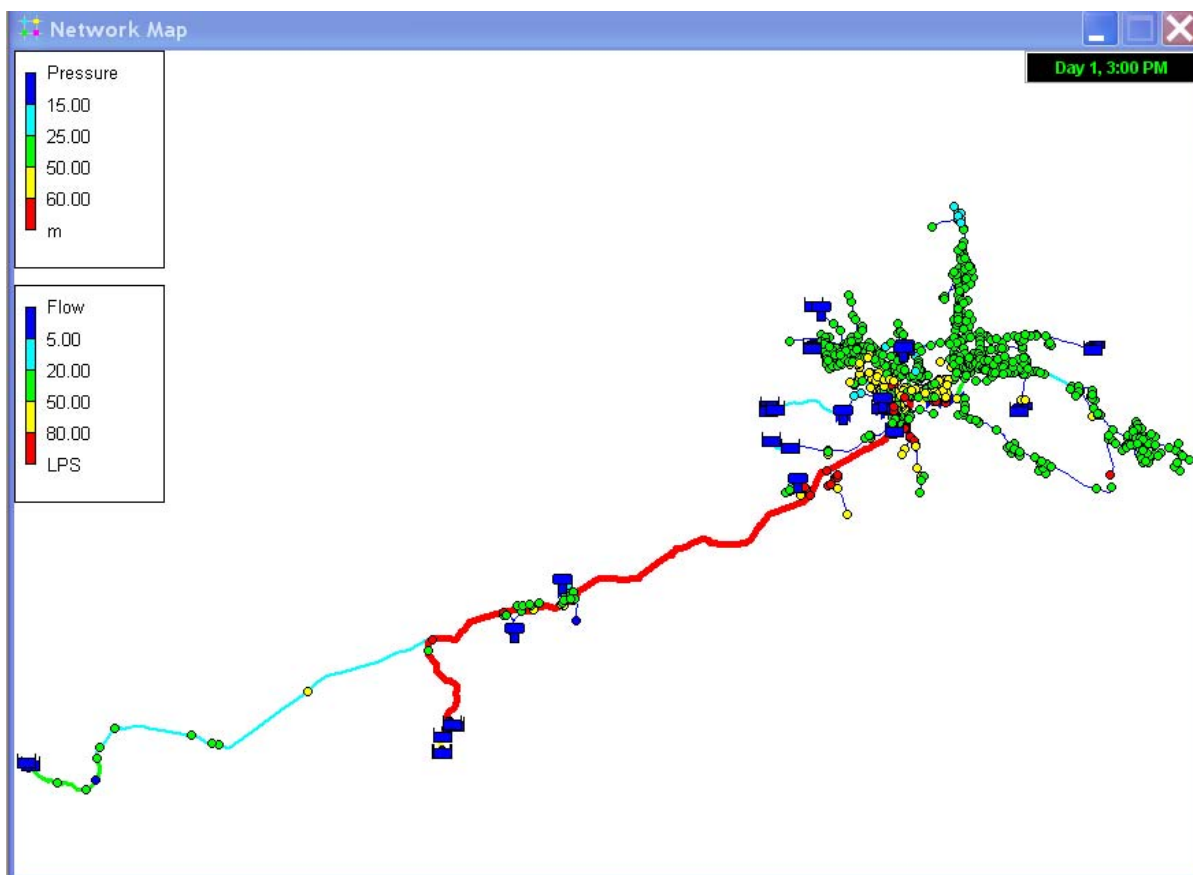


Slika 69 Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2 pri odstranitvi ventila za uravnavanje pretoka

Ta del cevovoda, to je povezavo med visoko cono in vodohranom T1, bo treba z upravljalcem, poleg ostalih omenjenih nejasnosti, še enkrat preveriti, zlasti povezanost sistema, premere cevi in morebitne kontrolne elemente.

5.5 Tlaki v sistemu

Izvedeni izračuni časovne simulacije pokažejo (Slika 70), da se tlaki v VS gibljejo v mejah "normale" (to je v primeru z vgrajenim ventilom kontrole pretoka v vodohran T1 iz visoke cone). Ob transportnem vodu do vstopa v mesto so tlaki najvišji (okoli 6,5 bara), najnižji tlaki pa se pojavijo na skrajnem severnem delu vodooskrbnega sistema, kjer padejo do 1,8 bara.

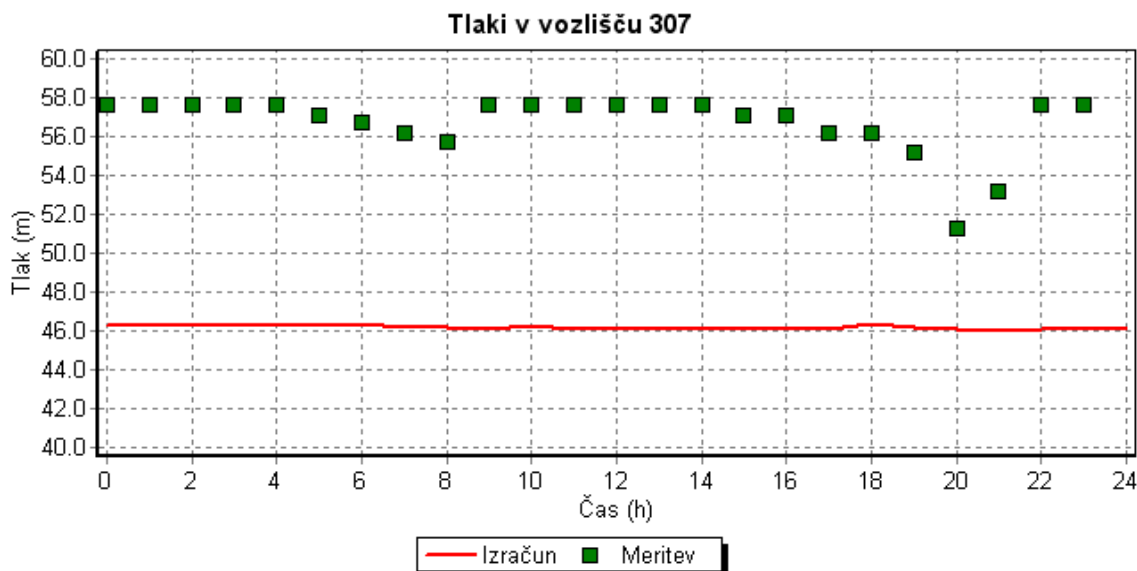


Slika 70 Tlaki in pretoki v vodooskrbnem sistemu

V postopku umerjanja bi se verjetno v določenih vozliščih ugotovilo več odstopanj med izračuni in merjenimi vrednostmi tlakov, saj so bile kote vozlišč ocenjene in določene na podlagi kote terena, vendar natančnejše meritve niso bile na razpolago. Ob tem je treba tudi poudariti, da omenjena ocena kot vozlišč ne vpliva širše na hidravlične razmere v VS, ki jih določajo predhodno določeni atributi elementov VS (povezanost omrežja, alokacija porabe vode, atributi oskrbovalnih elementov, ...)

V skladu s teoretičnimi izhodišči strokovnega pristopa (podpoglavje 4.1), ki podaja iterativni pristop k makrokalibraciji, je prav tako neučinkovito preiti na umerjanje elementov obtežbe, to je vozlišč, dokler se ne preverijo in ustrezno obravnavajo že do sedaj ugotovljena odstopanja. Vseeno pa je zaradi obravnave in prikaza celotnega cikla postopka makrokalibracije zanimiv prikaz primerjave izračunanih tlakov z merjenimi v določenem

vozlišču na cevovodu iz smeri zajetja Z2, preden se združi s cevovodom, ki prihaja iz smeri zajetja Z1 (Slika 71).



Slika 71 Primerjava izračunanih tlakov z merjenimi v vozlišču na cevovodu iz smeri zajetja Z2 pred združitvijo s cevovodom iz smeri Z1

Izračunani tlaki namreč zelo odstopajo od merjenih (več kot 1 bar). Ker gre za osamljeno napako, gre verjetno za napačno določitev kote samega vozlišča ali mesta merjenja, saj se v tem območju cevovod strmo spusti iz doline zajetja Z2. Vseeno bo treba preveriti koto tega vozlišča.

Iz slike je razvidno tudi nihanje tlaka, ki pa je posledica že prej omenjenega vsrkavanja zraka v nategi, prek katere se polni zbirni rezervoar iz zajetja Z2. Ta pojav, ko iz smeri zajetja Z2 priteče manj vode, je zaznaven tudi pri drugih meritvah. Na primer črpališče Č1 v tem času v sistem črpa večje količine vode (Slika 65), opazno je povečanje dotokov vode iz smeri zajetja Z1, pospešena je praznitev vodohrana T5 in pojavi se tudi nenadno znižanje vtoka vode v vodohran T1 iz cevovoda iz visoke cone.

5.6 Povzetek ugotovitev

Glede na ugotovljeno na podlagi dosedanjega postopka makrokalibracije in izvedenih izračunov časovne simulacije s hidravličnim modelom so povzete naslednje ugotovitve za obravnavani VS:

1. Povezanost sistema je v tej fazi pravilna.
2. Ker večji del porabe vode predstavlja industrijska poraba, bi bilo treba za natančnejšo porazdelitev dnevnega nihanja porabe pridobiti koeficiente nihanja urne porabe tudi za večje odjemalce.
3. Izgube vode v sistemu so velike. Za natančnejšo umeritev hidravličnega modela bo treba izvesti natančnejšo alokacijo izgub, predvsem na podlagi starosti cevi, upoštevanja velikosti tlakov (višji tlaki pomenijo večje izgube) in dodatnih ugotovitev upravljalca.
4. Za uravnavanje pretoka vode iz visoke cone v vodohran T1 se je vgradil ventil kontrole pretoka, ki se je uskladi s pridobljenimi meritvami. Preveriti je treba to območje cevovoda (omejitev pretoka, premer cevi, izdatne izgube, ...) in pridobiti podatke o nihanju vode v vodohranu T1.
5. Hrapavosti cevi po celotnem VS so ocenjene tako, da se je zagotovila ustrezna transportnost vode.
6. Iz zajetja Z4 dotekajo večje količine vode, zato je treba preveriti kote samega zajetja in vodohrana T1 (tudi v povezavi s točko 4) oziroma preveriti transportnost cevi od zajetja do vodohrana T1 (koeficient hrapavosti, premer cevi).
7. Vodohrani T4, T5 in T6 so glede na izračun stalno polni. Treba je natančneje pregledati topografske podatke, porabo in cevi, ki vodijo v te vodohrane. Verjetno bi bilo treba pridobiti podatke o nihanju gladine vode v teh vodohranih.
8. Podobno kot v primeru dotekanja vode v vodohran T1 iz zajetja Z4 se pri dotekanju vode iz zajetja Z3 v vodohran T3 pri izračunih pojavljajo višji pretoki vode. Glede na starost dovodnega cevovoda je treba preveriti koeficient hrapavosti oziroma kote zajeta in vodohrana.
9. Preveriti je treba premere cevi, ki vodijo od črpališča Č1 do navezave na glavni transportni vod.
10. Reducirni ventil pri črpališču Č1 ne služi namenu.

11. Preveriti je treba tudi kote nekaterih vozlišč, saj na primer v vozlišču, ki se nahaja na cevovodu iz smeri zajetja Z2, preden se združi s cevovodom, ki prihaja iz smeri zajetja Z1, merjeni tlaki občutno odstopajo od izračunanih.

V tej fazi hidravlični model izkazuje določeno usklajenost z dejanskim stanjem. Določen sklop ugotovitev in nejasnosti, ki so podane v prejšnjem poglavju, bo treba ustrezno obdelati s pridobitvijo dodatnih podatkov s strani upravljalca, tako da se bo hidravlični model s ponovnim "ciklom" makrokalibracije še bolj uskladil z dejanskim stanjem.

Nadaljnji koraki v postopku hidravličnega modeliranja, s katerimi se bo predvsem bolje alociralo porabo in izgubo vode po sistemu in natančneje določilo hrapavosti cevi, pa verjetno vključujejo tudi postopek mikrokalibracije, prva faza katere bo izbor merilnih mest in izvedba samih meritev.

5.7 Sinteza pregleda stanja in opravljenih raziskav

Na področju hidravličnega modeliranja vodooskrbnih sistemov je bilo znotraj širše delovne skupine na Katedri za mehaniko tekočin z laboratorijem (UL – FGG) izvedenih več raziskav, s katerimi so se obdelale različne faze v postopku izdelave verodostojnega hidravličnega modela ter tudi nadaljnjega iskanja optimalnih rešitev pri načrtovanju vodooskrbnih sistemov (Steinman et al., 2001a, 2001b). Predvsem področje umerjanja, zlasti mikrokalibracije, je bilo v zadnjem obdobju podrobneje obdelano (Kozelj, 2004; Kozelj et al., 2005; Banovec et al., 2006). Pri tem so je veliko raziskovalo tudi na področju uporabe orodij umetne inteligence, zlasti genetskih algoritmov (Šantl, 2001).

Prav tako je bilo treba raziskati različna vzporedna področja in izdelati ustrezna podporna orodja, s katerimi so se sami postopki hidravličnega modeliranja ustrezno poenostavili. Tako je bilo na primer na področju analize tveganja vodooskrbe za zagotavljanje požarne varnosti izvedenih več raziskav (Steinman et al., 2004; Šantl et al., 2004). Zaradi lažjega dela je bilo razvitih več pristopov, na primer uporaba Thiessenovih poligonov pri alociranju vode po vozliščih (Orel, 2004) in razvoj pristopa k skeletizaciji, to je k poenostavitvi hidravličnega modela (Kozelj, 2004).

Zaradi celovitega pristopa k hidravličnem modeliranju in njegovi uveljavitvi na področju upravljanja z vodooskrbnimi sistemi na območju RS Slovenije se je v letu 2004 pristopilo k izvedbi aplikativnega raziskovalnega programa "Modeliranje in optimiranje življenjskega cikla vodooskrbnih omrežij", ki ga je naročila Agencija RS za raziskovalno dejavnost s sodelovanjem treh upravljalcev vodooskrbnih sistemov (Kompore et al., 2007).

V sklopu omenjenega aplikativnega razvojnega programa so se preverila predvsem dosedanja dognanja na področju hidravličnega modeliranja ter njihova aplikativna vrednost in verifikacija pri izdelavi hidravličnih modelov dejanskih vodooskrbnih sistemov. Pri tem pa se je ugotovilo, da je razkorak med raziskavami in dejanskim stanjem v tem trenutku velik. Ugotovilo se je namreč, da je pri začetnih fazah pri vzpostavitvi neumerjenega hidravličnega modela veliko nedorečenosti.

Zlasti upravljalci vodijo evidenco o vodooskrbnih sistemih, ki je prirejena predvsem pregledu nad elementi in objekti VS in ni ustrezno vodena, da bi bila izdelava hidravličnega modela, ki zahteva ustrezno pripravo in vodenje podatkovne baze objektov VS, lahko bistveno bolj avtomatizirana. Zato se je cilj zadevnega projekta zlasti usmeril v razvoj postopkov za ustrezno pripravo vodenja evidence VS in vzpostavitev neumerjenega hidravličnega modela.

V času izvajanja projekta se je ugotovilo tudi, da je smiselna tudi delitev samega umerjanja v dve fazi, tako da se v prvi fazi izvede t. i. makrokalibracija, ki hkrati nudi tudi solidno podporo povratnemu posodabljanju informacijskega sistema. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi raziskovalci drugod po svetu (Walski et al., 2001; Perez, 2003).

Prav zato je pričujoča naloga ob ustrezno podrobni predstavitvi celovitega pristopa k vodenju geografskega informacijskega sistema VS in hidravličnem modeliranju bolj podrobno predstavila ustrezen pristop k makrokalibraciji. Sam predstavljen strokovni pristop pa je bil ustrezno verificiran tudi pri hidravličnem modeliranju dejanskega vodooskrbnega sistema.

Kot rezultat verifikacije strokovnega pristopa se predvsem ugotavlja, da je strokovni pristop ob upoštevanju osnovnega načela, to je sistematičnega vračanja v predhodne faze makrokalibracije, ustrezen. Pri tem pa je za učinkovito izpeljavo makrokalibracije in posodabljanja informacijskega sistema treba vzpostaviti stalno sodelovanje upravljalca in

strokovnjaka pri makrokalibraciji. Iz povzetkov v prejšnjem poglavju je namreč razvidno, da se makrokalibracija še ni končala, ampak je za zagotovitev dokončne vzpostavitve izboljšanega hidravličnega modela potrebna izvedba vsaj še enega cikla makrokalibracije.

V nalogi je predstavljen tudi naprednejši bolj avtomatiziran pristop, s katerim bi se zmanjšala tudi potreba po stalni prisotnosti strokovnjaka s področja hidravlike tlačnih sistemov v postopku makrokalibracije. Tu tudi delovna skupina na Katedri za mehaniko tekočin z laboratorijem vidi zanimivo področje nadaljnjih raziskav, zlasti na področju aplikacije genetskih algoritmov. Pri tem pa je treba poudariti, da bi bila njihova verifikacija in sploh kasnejša morebitna širša aplikacija na področju hidravličnega modeliranja VS veliko bolj konkretna, ko se bo na področju upravljanja vodooskrbnih sistemov uporaba hidravličnih modelov in ustrezno vodenje podatkovnih baz bolj razširila. To pa seveda ni samo v domeni raziskovalcev na področju hidravličnega modeliranja.

6 ZAKLJUČEK

Kot je bilo navedeno že v uvodu, so v tej nalogi celovito obdelani področje ustrezne uporabe oziroma vzpostavitve geografskega informacijskega sistema za vodenje evidenc vodooskrbnih sistemov in postopki, s katerimi bi se zagotovila vzpostavitev ustrezno umerjenega hidravličnega modela, ki bi verodostojno predstavljal stvarni vodooskrbni sistem. Tako bi upravljalcu nudil učinkovito orodje podpore odločanju v nadaljnjih fazah analiz in načrtovanja.

Ključni raziskovalni del naloge je bil namenjen področju makrokalibracije kot prvi fazi v procesu izdelave umerjenega hidravličnega modela, kjer se je predvsem podrobneje obdelalo področje zagotovitve geometrijske in topološke enakosti med matematičnim modelom in dejanskimi elementi vodooskrbnega sistema. Na ta način se ustrezno posodobijo in odpravijo napake tudi v samem geografskem informacijskem sistemu ter že zagotovi določen vpogled v dejansko hidravlično obnašanje stvarnega vodooskrbnega sistema.

Področje makrokalibracije še ni ustrezno raziskano in obdelano, saj je bila doslej večina raziskav na področju umerjanja hidravličnih modelov osredotočena na drugo fazo umerjanja, to je mikrokalibracijo, v kateri se predvsem umerja hidravlično neznane parametre. V stvarnosti, to je na področju dejanskega upravljanja vodooskrbnega sistema, kjer pa je področje hidravličnega modeliranja še vedno v začetnih fazah, pa se ugotavlja, da je področje geografskih in topoloških napak v samem upravljalnem informacijskem sistemu zelo pomanjkljivo obdelano, tako da k izvedbi mikrokalibracije v večini vodooskrbnih sistemov na območju Slovenije sploh še ni možno pristopiti.

Poudarek naloge je bil torej usmerjen v iskanje ustreznega strokovnega pristopa k makrokalibraciji, kjer se je v prvi vrsti obdelalo možne tipe napak in predstavilo organiziran strokovni pristop. S takim pristopom se upravljalcu namreč omogoča, da k umerjanju pristopi sistematično. Ko se v postopku iterativno primerja rezultate modela z dejanskimi meritvami, se ugotavlja napako, izvede posodobitev modela in ponovno primerja rezultate modela z dejanskimi meritvami. Ob tem se z novimi ugotovitvami hkrati ustrezno posodablja tudi sam informacijski sistem vodenja vodooskrbnega sistema.

Ker omenjeni strokovni pristop nudi tudi ustrezen učni poligon za seznanjanje s soodvisnostmi v tlačnih hidravličnih sistemih, omogoča izvajanje makrokalibracije tudi osebam, ki niso bile formalno strokovno usposobljene za področje hidravličnega modeliranja in obvladovanje hidravličnih razmer v tlačnih sistemih. Ker pa upravljalci načeloma nimajo časa in bi se zaradi učenja in seznanjanja z orodji hidravlike v vodooskrbnih sistemih sam proces makrokalibracije preveč časovno zavlekel, je glavna pomanjkljivost uporabe strokovnega pristopa prav v tem, da mora v procesu izvajanja makrokalibracije vseeno še vedno biti prisoten ustrezno usposobljen strokovnjak.

Prav zato se je tudi na področju makrokalibracije pričelo z razvojem pristopov in orodij, ki bi upravljalcu neodvisno od njegove strokovne usposobljenosti na področju hidravlike omogočale izvedbo makrokalibracije. Eno takih orodij so klasifikacijske metode, pri katerih se na podlagi vzpostavljenih mehkih (fuzzy) logičnih povezav in ovrednotenih »deskriptorjev« napak za posamezne razrede elementov ugotovi, ali določen element hidravličnega modela pripada razredu, ki je izpostavljen določenemu ovrednotenju deskriptorjev. Ena od pomanjkljivosti omenjenega pristopa je predvsem začetna strokovno izkustvena določitev deskriptorjev napak, kar pomeni, da mora biti sama omenjena klasifikacijska metoda podvržena vsaj osnovnemu testiranju oziroma umerjanju, kar pa zopet zahteva ustrezno usklajevanje med upravljalci in strokovnjaki s področja hidravličnega modeliranja.

Glede na rezultate te naloge in izkušnje na področju uporabe genetskih algoritmov na področju mikrokalibracije in iskanja optimalnih rešitev načrtovanja se ugotavlja, da bi bilo smiselno tudi na področju makrokalibracije aplicirati uporabo genetskih algoritmov. Ker so genetski algoritmi že dovolj ustrezno splošno razviti, bi bilo treba predvsem dobro raziskati področje nastavitve problema, ugotoviti razsežnosti možnega polja rešitev, upoštevati grupiranje podobnih elementov in vzpostaviti ustrezen zapis niza spremenljivk umerjanja. Na ta način se bo lahko ustrezno ovrednotila smiselnost oziroma učinkovitost uporabe genetskih algoritmov tudi na področju makrokalibracije.

Orodje, ki bi bilo v postopku makrokalibracije tudi dejansko uspešno, bi vsekakor moralo biti strokovno čim bolj neodvisno. Prispodoba, ki se pri tem poraja, je na primer uspešna uveljavitev ročnih kalkulatorjev. Le malo komu je znano, kako so znotraj omenjenega pripomočka integrirane zakonitosti postopka računanja, pa je kljub temu neodvisen in nepogrešljiv pomočnik v vsaki službi in domu.

7 POVZETEK

Upravljanje vodooskrbnih sistemov zahteva obvladovanje različnih zahtev in pričakovanj, ki jih izražajo različni subjekti, posredno in neposredno povezani s področjem vodooskrbe. Ob temeljnih pravnih okvirih pravice do oskrbe z vodo mora upravljalec poleg tehničnih predpisov pri načrtovanju upoštevati še ekonomiko in zlasti druge resorne vidike, ki se lahko kot celota predstavijo kot pravni vidiki. Ob tem mora učinkovita vodooskrba izpolnjevati pet bistvenih zahtev. Mednje se šteje varnost oskrbe (zagotavljanje ustreznih količin pitne vode), kakovost (zagotavljanje ustrezne kakovosti pitne vode), nivo storitve strankam (kakovost storitev, ki jih opravlja javna služba oskrbovancem), trajnostni razvoj (zagotavljanje razvoja in nemotenega delovanja javne službe v prihodnosti) in gospodarnost oziroma ekonomičnost opravljane dejavnosti oskrbe z vodo (povezana z infrastrukturo, organizacijskimi oblikami, idr.).

Upravljalec se za zagotovitev omenjenih vidikov zaveda potreb po vzpostavitvi pregledne evidence in ustrezne strokovne podpore, ki bi mu nudila predvsem hitro in zanesljivo podporo odločanju pri načrtovanju in vzpostavitvi učinkovitega obratovanja vodooskrbnega sistema. To podporo mu v obdobju današnje računalniške tehnologije lahko najboljše ponudi ustrezna vzpostavitev geografskega informacijskega sistema, ki združuje geografsko locirane informacije različnih vidikov upravljanja.

Za izvajanje simulacije različnih obratovalnih dogodkov in stanj na vodooskrbnem sistemu se uporabljajo hidravlični modeli, ki temeljijo na matematičnih formulacijah obnašanja in odziva dejanskega vodooskrbnega sistema. S pomočjo podatkov o fizičnih karakteristikah sistema, obtežnih primerih in robnih pogojih simulirajo delovanje realnih vodooskrbnih sistemov. Pri tem računalniški program uporablja podatke o sistemu, da izoblikuje sistem enačb, ki se rešujejo z uporabo določene metode reševanja tega sistema enačb. Z vidika hidravlike se lahko k obravnavi vodooskrbnih sistemov z upoštevanjem stalnega toka vode lahko pristopi na dva osnovna načina. Prvi pristop izhaja iz predpostavke, da je poraba, ki je določena v vozliščih, vedno zagotovljena, in se imenuje »pristop s kriterijem porabe« (ang. demand-driven). Drugače povedano hidravlične razmere v sistemu narekuje povpraševanje po vodi v posameznih vozliščih, glede na kar se na podlagi kontinuitete v vozliščih in ohranitvi energije

po vseh obstoječih poteh in zankah formulira sistem enačb. Poleg omenjenih dveh pristopov so razviti tudi drugi, s katerimi se združuje enostavnost prvega pristopa in natančnost rezultatov drugega.

Osnovni namen strateškega analiziranja in načrtovanja hidravličnih razmer v vodooskrbnih sistemih, ki se v praksi stalno izkazuje, je zagotovitev zahtevane količine vode odjemalcem ob ustreznih tlačnih razmerah in s sprejemljivim delovanjem vodohranov. Tudi dnevne operativne naloge upravljalcev so podprte z uporabo hidravličnih modelov. Le-ti jim omogočajo zanesljivejšo presojo v procesu odločanja o uporabi posameznih ukrepov za izboljšanje razmer v sistemu. S pomočjo hidravličnih modelov je izobraževanje kadrov veliko hitrejšo, saj se z določenim vodooskrbnim sistemom ne srečajo le fizično in parcialno, ampak ga dojemajo celovito z vsemi pripadajočimi hidravličnimi veličinami, ki jih v omejenem času ni moč obravnavati samo s terenskimi ogledi in analizo različnih načrtov. Z uporabo hidravličnih modelov, ki obratujejo v pogojih z različnimi obtežnimi primeri, je spoznavanje karakteristik vodooskrbnega sistema hitrejšo in bolj učinkovito.

Postopek hidravličnega modeliranja je sestavljen iz več faz. Praviloma se začne z vzpostavitvijo vozlišč, ki niso sestavni del geografskega informacijskega sistema in oceno hidravličnih parametrov, predvsem koeficientov hrapavosti cevi in porazdelitvijo porabe vode pripadajočim vozliščem. Glede na namen uporabe modela se izvede tudi skeletizacija hidravličnega modela, pri čemer se na podlagi namena uporabe hidravličnega modela določeni deli sistema poenostavijo, oziroma se izločijo hidravlično nepomembne cevi. Čeprav danes ovir glede zadostnih računskih kapacitet več, in bi hidravlični model lahko vključeval prav vsako cev, celo vsak hišni priključek, so rezultati tako skeletiziranega hidravličnega modela, ki ne vsebuje manjših premerov cevi, veliko bolj obvladljivi za pregled in interpretacijo, ter tudi dovolj natančni, če je bil model ustrezno umerjen.

Na podlagi takega neumerjenega hidravličnega modela se v nadaljevanju izvede postopek umerjanja, s čimer se, skupaj z izvedbo verifikacije in validacije, vzpostavi umerjen hidravlični model, ki verodostojno predstavlja stvaren vodooskrbni sistem. Samo umerjanje hidravličnih modelov se lahko deli v dve fazi. Prva faza je postopek makrokalibracije. To je odprava predvsem geometrijskih, topoloških napak in nastavitvev pravilnega upravljanja

delovanja z objekti. V tej fazi se mora torej odpraviti večino napak, ki so nastale zaradi napačno vodenih atributih objektih vodooskrbnega sistema, predvsem povezanosti sistema.

Druga faza, postopek mikrokalibracije, pa je faza umerjanja predvsem hidravličnih parametrov, kot so koeficienti hrapavosti cevi in porazdelitev porabe po sistemu. Na podlagi posameznih ugotovitev v fazah umerjanja je pomembno, da se podatkovne baze v informacijskem sistemu tudi ustrezno posodabljujejo, s čimer se sam postopek izdelave hidravličnega modela lahko zelo avtomatizira.

Upravljalci evidenco o vodooskrbnih sistemih vodijo predvsem z vidika pregleda nad elementi in objekti vodooskrbnega sistema, torej brez ustrezne evidence določenih atributov objektov, ki pa so nujno potrebni za vzpostavitev hidravličnega modela. Zato je del naloge namenjen tudi podrobnejšemu opisu posameznih objektov ter naboru in načinu vodenja njihovih atributov.

Na podlagi izvedene verifikacije strokovnega pristopa k makrokalibraciji se predvsem ugotavlja, da je za učinkovito izpeljavo makrokalibracije in posodabljanja informacijskega sistema treba vzpostaviti stalno sodelovanje upravljalca in strokovnjaka pri makrokalibraciji.

V nalogi je predstavljen tudi naprednejši bolj avtomatiziran pristop, s katerim bi se zmanjšala tudi potreba po stalni prisotnosti strokovnjaka s področja hidravlike tlačnih sistemov v postopku makrokalibracije. Tu tudi delovna skupina na Katedri za mehaniko tekočin z laboratorijem vidi zanimivo področje nadaljnjih raziskav, zlasti na področju aplikacije genetskih algoritmov.

8 SUMMARY

Water supply system management requires dealing with various demands and expectations expressed by various entities directly or indirectly connected to the water supply area. Besides the fundamental legal frameworks of the right to water supply and technical regulations, a manager has to take into account also economics and especially other sectoral aspects which can be, as a whole, presented as legal aspects. Considering all this, efficient water supply has to meet five essential demands. These comprise safety of water supply (ensuring suitable quantities of drinking water), quality (ensuring suitable quality of drinking water), level of service to customers (quality of services offered by a public service to users), sustainable development (ensuring development and undisturbed operation of a public service in the future), and economy of performing water supply activity (related to infrastructure, organisational forms, etc.).

Considering the fulfilment of the above-mentioned aspects a manager is aware of the need to set up clear records and a suitable technical support which would allow a quick and reliable support in the decision-making process related to planning and setting up of efficient operation of a water supply system. In the period of modern computer technology, such support can be best obtained by setting up of a geographic information system which combines geographically located information of various aspects of management.

To perform a simulation of various operation events and situations on a water supply system, hydraulic models are used which are based on mathematic formulations of behaviour and response of an actual water supply system. Using the data on physical characteristics of a system, loading conditions and constraints, they simulate the operation of real water supply systems. A computer programme uses the data on the system to design a system of equations which are solved by using a certain method of solving this system of equations. As far as hydraulics is concerned, there are two basic approaches to dealing with water supply systems, taking into account constant water flow. The first approach arises from the assumption that the demand assigned to the nodes is always met, i.e. "demand-driven approach". In other words, hydraulic conditions in the system are dictated by water demand in individual nodes, according to which and considering the continuity in the nodes and maintenance of energy

along all the existing paths and loops, a system of equations is formulated. In addition to the above-mentioned approaches, other approaches have been developed which combine the simplicity of the first one and the accuracy of the results of the second one.

The main purpose of strategic analysing and planning of hydraulic conditions in water supply systems is to provide the required quantities of water to consumers along with suitable pressure conditions and acceptable operation of tanks. Also daily operative tasks of managers rely on the use of hydraulic models. Hydraulic models allow them a more reliable assessment in the decision-making process related to the use of individual measures for improvement of conditions in the system. They also allow faster training of personnel since the latter do not get to know a certain water supply system only physically and partially, but they get to understand it integrally with all the belonging hydraulic quantities which due to a limited time can not be dealt with only by field visits and analysis of various plans. The use of hydraulic models operating in circumstances with different loading conditions makes the learning of water supply system characteristics faster and more efficient.

The hydraulic modelling procedure consists of several phases. As a rule, it begins with setting up of nodes, which are not part of geographic information system, and an assessment of hydraulic parameters, especially pipe roughness coefficients and distribution of water consumption between the belonging nodes. Regarding the purpose of model use, skeletonization of a hydraulic model is also carried out where certain parts of a system are simplified or hydraulically insignificant pipes are eliminated. Although today there are no more obstacles as regards sufficient calculation capacities, which means that a hydraulic model could include every single pipe, even every consumer connection, the results of such a skeletonized hydraulic model, without small pipe diameters, are much more manageable for inspection and interpretation as well as more accurate if the model was suitably calibrated.

On the basis of such an uncalibrated hydraulic model a calibration procedure is further on performed which, together with verification and validation, leads to a calibrated hydraulic model credibly representing a real water supply system. The calibration of hydraulic models itself can be divided into two phases. The first phase comprises a macrocalibration procedure. It includes elimination of mainly geometric and topological errors and setting of correct management of facilities operation. This phase must thus do away with the majority of errors

which are due to incorrectly assigned attributes of water supply system facilities, in particular connection of the system.

The second phase, i.e. microcalibration procedure, comprises calibration of mainly hydraulic parameters, such as pipe roughness coefficients and distribution of consumption across the system. Considering individual findings in the calibration phases it is important that databases in the information system are suitably updated which can very much automate the procedure of hydraulic model design.

Managers keep the records on water supply systems especially to have an overview of elements and facilities of a water supply system, thus without suitable records of certain attributes of facilities which are essential for setting up of a hydraulic model. Therefore part of the thesis involves also a more detailed description of individual facilities and a set and a method of assigning their attributes.

On the basis of the conducted verification of a professional approach to macrocalibration, it has been mainly established that efficient performance of macrocalibration and updating of an information system require constant cooperation between a manager and an expert in macrocalibration.

The thesis also presents an advanced more automated approach which would reduce the need for constant presence of an expert in the hydraulics of pressure systems in the macrocalibration procedure. A working group at the Chair of Fluid Mechanics with Laboratory considers this area as an interesting point of further research, in particular in the area of application of genetic algorithms.

VIRI

Aguado, J.C. 1998. A Mixed Qualitative-Quantitative Self-Learning Classification Technique Applied to Situation Assessment in Industrial Process. Thesis. Terrassa, Spain. Universitat Politècnica de Catalunya.

Handbook for the Economic Analysis of Water Supply Projects (HEAWSP). 1999. Manila, Philippines. Asian Development Bank.

Banovec, P., Šantl, S. 2000. Kalibracija in optimizacija vodovoda z genetskimi algoritmi. 11. Mišičev vodarski dan. *Zbornik referatov*. Maribor, Vodnogospodarski biro: str. 130-137.

Banovec, P., Šantl, S., Klasinc, R., Steinman, F. 2003. Genetic Algorithms Supported Analysis of Water Supply System Development. *Water Resources Management II*. Wessex, UK. Wessex Institute of Technology: str. 477-486.

Banovec, P., Kozelj, D., Šantl, S., Steinman, F. 2006. Izbira merilnih mest v vodovodnih sistemih z genetskimi algoritmi. *Strojniški vestnik*, letn. 52, št. 12: str. 817-834.

Bhave, P., R.. 1991. Analysis of flow in water distribution networks. Lancaster, PA, USA. Technomic Publishing Co.

Wasserleitfaden. Dokumentation Nr. 547 (WD). 2005. Deutschland. Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.

Cheung, P., B., Van Zyl, J., E., Reis, L., F., R. 2005. Extension Of Epanet For Pressure Driven Demand Modeling In Water Distribution System. *Water Management for the 21 st Century*. 1 ed. Exeter. Centre for Water Systems, University of Exeter, št.. 1: str. 311-316.

Durkin, J. 1994. Expert Systems Design and Development. New York. Macmillan Publishing Company.

Džeroski, S., Grbović, J., Walley, W., J., Kompare, B. 1997. Using machine learning techniques in the construction of models. 2, Data analysis with rule induction. *Ecol. model.*, letn. 95, št. 1: str. 95-111.

Engineering Computer Applications Committee. 1999. Calibration Guidelines for Water Distribution System Modelling. Information Management and Technology Conference. New Orleans, USA, Proc. American Water Work Association (AWWA).

Goldberg, D. E. 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Publishing Co.

Gupta, R., Bhave, P., R. 1996. Comparison of Methods for Predicting Deficient Network Performance. *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Št. 122(3): str. 214–217.

Holland, J.H. 1975. Adaptation in natural and artificial system. Ann Arbor, The University of Michigan Press.

Kapelan, Z.. 2002. Calibration of Water Distribution Systems Hydraulic Models. PhD Thesis. Exeter, UK. University of Exeter, School of Engineering and Computer Science.

Kleiner, Y., Adams, B. J., in Rogers, J. S. 2001. Water distribution network renewal planning. *Journal of computing in civil engineering*, letn. 15, Št. 1, str. 15-26.

Kompare, B., Bratko, I., Steinman, F., Džeroski, S. 1994. Using machine learning techniques in the construction of models. Part 1. Introduction. *Ecol. model.* letn. 75/76: str. 617-628.

Kompare, B., Banovec, P., Steinman, F., Kozelj, D., Šantl, S. 2007. Modeliranje in optimiranje življenjskega cikla vodooskrbnih omrežij. Aplikativni raziskovalni projekt. Ljubljana, Agencija za raziskovalno dejavnost RS.

Kozelj, D. 2004. Hidravlično modeliranje vodooskrbnih sistemov z optimalnim izborom merilnih mest. Diplomsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Kozelj, D., Šantl, S., Steinman, F. 2005. Sampling design for calibration of water distribution system models by genetic algorithms. Seoul, South Korea. Water Engineering for the Future, Choices and Challenges: Proceedings of XXXI IAHR congress, IAHR: str. 665-675.

Macke S. 2005. DC Water Design Extension Manual. DORSCH Consult.

Mays, L., W., Ozger, S. 2004. Water Resources Systems Management Tools. New Your, USA. McGraw-Hill.

Orel, B.. 2004. Vzpostavitev digitalne baze podatkov za hidravlični model vodovoda. Diplomaska naloga. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Ormsbee L., E., Lingireddy, S. 1997. Calibrating hydraulic network models. USA. Journal of the American Water Works Association, letn 89(2): str. 42-50.

Ozger, S., Mays, L., W. 2003. A semi-pressure driven approach to reliability assessment of water distribution networks. Thessaloniki, Greece. Proceedings of the Thirtieth Congress, International Association of Hydraulic Research, Theme B: str. 345-352.

Perez, R., Quevedo, J. 2001. Macrocalibration of water distribution system model using classification. UK. Water Software Systems: theory and applications. 1 ed. Hertfordshire: Research Studies Press Ltd.: str. 75-86.

Perez, R.. 2003. Identifiability and calibration of water network models. Doktorska dizertacija. Terrassa, Spain. The Technical University of Catalonia.

Rossman, L. A.. 2000. EPANET 2 – USERS MANUAL. USA. Environmental Protection Agency (EPA).

Salgado, R., Todini, E., O'Connell, P., E. 1988. Extending the gradient method to include pressure regulating valves in pipe networks. Kentucky, USA. Proc. Inter. Symposium on Computer Modeling of Water Distribution Systems, University of Kentucky.

Savic, D., A., Walters, G., A. 1995. Genetic Operators and Constraint Handling for Pipe Network Optimization, Evolutionary Computing. AISB Workshop: str. 154-165.

Schaetzen, W. 2000. Optimal Calibration and Sampling Design for Hydraulics Network Models. The thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, Exeter, UK. University of Exeter.

Steinman, F. 1992. Hidravlika. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Steinman, F., Banovec, P. and Šantl, S. 2001a. Uporaba genetskih algoritmov pri načrtovanju in upravljanju vodovodnih sistemov. Ljubljana. Gradbeni vestnik, avgust 2001: str. 195 – 204.

Steinman, F., Banovec, P. and Šantl, S. 2001b. Načrtovanje razvoja vodovodnih sistemov z uporabo genetskih algoritmov. Ljubljana. Strojnikski vestnik - Journal of mechanical engineering: str. 263 -279.

Steinman, F., Banovec, P., Gosar, L., Šantl, S., Kozelj, D. 2004. Delovanje javnih vodovodnih omrežij kot hidrantnih omrežij: končno poročilo o projektu. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Steinman, F., Kozelj, D., Banovec, P. 2006. Strokovne podlage za državne lokacijske načrte (DLN) regionalne oskrbe z vodo. Portorož. Vodni dnevi 2006, Zbornik referatov, Slovensko društvo za zaščito voda: str. 24-32.

Šantl, S.. 2001. Hidravlična analiza vodooskrbnih sistemov in iskanje optimalnih variantnih rešitev z uporabo genetskih algoritmov. Diplomsko delo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.

Šantl, S., Steinman, F., Banovec, P. 2004. Evaluation of Water Supply Systems as Hydrant Networks for Fire Protection. Exeter, UK. ACTUI 2004, University of Exeter – Centre for Water Systems.

Todini, E., Pilati, S. 1987. A gradient method for the analysis of pipe networks. International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution. Leicester, UK. Leicester Polytechnic.

Water Distribution System Analysis: Field Studies, Modeling and Management (WDSA). 2005. USA. Environmental Protection Agency.

Walski, T., M. 1995. Standards for Model Calibration. Norfolk, USA. Proceedings AWWA Computer Conference.

Walski, T., M., Chase, D., V., Savic, D., A. 2001. Water Distribution Modeling. Waterbury, UK. CT: Haestad Methods.

Walski, T., M., et al.. 2003. Advanced Water Distribution Modelling and Management. Waterbury, U.S.A. Heasted Press.

Tabesh, M. 1998. Implications of the Pressure Dependency of Outflows on Data Management, Mathematical Modelling and Reliability Assessment of Water Distribution Systems. Doktorska dizertacija. Liverpool, UK. University of Liverpool.

PRILOGA

Algoritem za skeletizacijo cevi enakih hidravličnih karakteristik – odstranitev vozlišča s pripisom porabe sosednjima vozliščema

Izberi vozlišče V_j ,

//Branje cevi C_i in C_j in določitev orientacije (ali je cev usmerjena v V_j ali iz njega)

//Kontrola za ugotovitev števila cevi, ki so vezane na to vozlišče

kontrolaštcevi = 0

V tabeli cevi beri stolpca ZačVozl in KončVozl

Če je V_j enak ZačVozl ali KončVozl in kontrolaštcevi enaka 0

Če V_j pri C_i enak ZačVozl je **orientacija_i = 1**

Drugače **orientacija_i = 2**

kontrolaštcevi = +1

Če je V_j enak ZačVozl ali KončVozl in kontrolaštcevi enaka 1

Če V_j pri C_j enak ZačVozl je **orientacija_j = 1**

Drugače **orientacija_j = 2**

kontrolaštcevi = +1

Če je V_j enak ZačVozl ali KončVozl in kontrolaštcevi enaka 2

Izpiši opozorilo »V vozlišču se stika število cevi večje od 2«

Končaj

//Kontrola enakosti hidravličnih parametrov

Preveri ali imata cevi C_i in C_j enaki ostale hidravlične parametre (premer, hrapavost, izgube)

Če ne, izpiši opozorilo in končaj

//branje porabe V_j in dolžin cevi C_i in C_j

Preberi porabo vozlišča V_j ($P(V_j)$)

Preberi dolžino cevi C_i in C_j ($D(C_i)$ in $D(C_j)$)

//branje ID vozlišč V_i in V_k

Če **orientacijai** enak 1 **drugo vozlišče_i = KončVozl** od cevi C_i

Drugače **drugo vozlišče_i = ZačVozl** od cevi C_i

Če **orientacijaj** enak 1 **drugo vozlišče_j = Vozlišče 2** od cevi C_j

Drugače **drugo vozlišče_j = KončVozl** od cevi C_j

//Kontrola enakosti vzorcev porabe

Ali vzorec porabe **drugo vozlišče_i** enak vzorcu porabe V_j

Ali vzorec porabe **drugo vozlišče_j** enak vzorcu porabe V_j

Če ne, izpiši opozorilo in končaj

//porazdelitev porabe med V_i in V_k

$P_{\text{drugo vozlišče}_i} = P(\text{drugo vozlišče}_i) + P_j * D(C_i) / (D(C_i) + D(C_j))$

$P_{\text{drugo vozlišče}_j} = P(\text{drugo vozlišče}_j) + P_j * D(C_j) / (D(C_i) + D(C_j))$

//združitev cevi v C_i

Izberi cev z nižjim indeksom (v našem primeru C_i)

Združi cevi C_i in C_j

Dolžina C_i je enaka dolžini C_i + dolžini C_j

//določitev novega vozlišča kot končnega ali začetnega novi skupni cevi C_i

Če **orientacija_i** = 1

Če **orientacija_j** = 1 je ZačVozl od C_i enak KončVozl od C_j

Če **orientacija_j** = 2 je ZačVozl od C_i enak ZačVozl od C_j

Če **orientacija_i** = 2

Če **orientacija_j** = 1 je KončVozl od C_i enak KončVozl od C_j

Če **orientacija_j** = 2 je KončVozl od C_i enak ZačVozl od C_j

//Brisanje V_j in C_j

Izbriši V_j in C_j

Opomba: Za raziskave, ki so bile opravljene v zvezi s to nalogo, je bilo treba izdelati vrsto podpornih programov ali podprogramov.