

POSTOPEK MAKROKALIBRACIJE HIDRAVLIČNEGA MODELA VODOOSKRBNIH SISTEMOV

MACROCALIBRATION IN THE PROCESS OF HYDRAULIC MODELLING OF WATER SUPPLY SYSTEMS

mag. Sašo Šantl, univ. dipl. inž. grad.

saso.santl@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Franci Steinman, univ. dipl. inž. grad.

franci.steinman@fgg.uni-lj.si

UL, FGG, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem,
Hajdrihova 28, Ljubljana

Znanstveni članek

UDK: 004.6:519.61/.64:628.1:659.2:91

Povzetek | V članku je predstavljen celovit pristop k hidravličnemu modeliranju vodooskrbnih sistemov s poudarkom na pravilni vzpostavitvi geografskega informacijskega sistema in pripravi podatkovnih baz, zlasti hidravličnih entitet. Samo hidravlično modeliranje je sestavljeno iz več faz, ki se praviloma začnejo z vzpostavitvijo neumerjenega hidravličnega modela in oceno hidravličnih parametrov. Na podlagi takega neumerjenega hidravličnega modela se v nadaljnjih fazah umerjanja vzpostavi umerjen hidravlični model, ki z želeno natančnostjo predstavlja dogajanje v stvarnem vodooskrbnem sistemu, in je kot tak primeren za izvedbo podrobnejših analiz s področja ocen tveganja in načrtovanja vodooskrbe. Predstavljen je dvofazni način umerjanja, kjer je prva faza postopek makrokalibracije, v kateri se odpravi napake v samih podatkovnih bazah, predvsem geometrijske in topološke napake. Druga faza, postopek mikrokalibracije, pa je faza umerjanja hidravličnih parametrov, kot so koeficienti hrapavosti cevi in porazdelitev porabe po sistemu. V članku je na primeru dejanskega vodooskrbnega sistema podrobneje predstavljen postopek makrokalibracije s strokovnim pristopom.

Summary | The paper presents an integrated approach to hydraulic modelling of water supply systems, with the emphasis on the appropriate setting up of a geographic information system and the preparation of databases of hydraulic entities in particular. Hydraulic modelling consists of several phases, which as a rule begin with the establishment of a rough uncalibrated model and an estimation of hydraulic parameters. The uncalibrated model is a basis for further calibration that leads to a calibrated model. This model, with objective precision, represents a real water supply system and a suitable basis for further detailed analysis in the area of risk management and water supply planning. The calibration of hydraulic models itself can be divided into two phases. The first phase is a procedure of macrocalibration, i.e. the elimination of mainly geometric and topological errors, while the second one, i.e. microcalibration, comprises the calibration of mainly hydraulic parameters, such as pipe roughness coefficients and the distribution of consumption across the system. The paper also describes in more details the expert approach of the macrocalibration phase, which is presented by a real case.

1 • UVOD

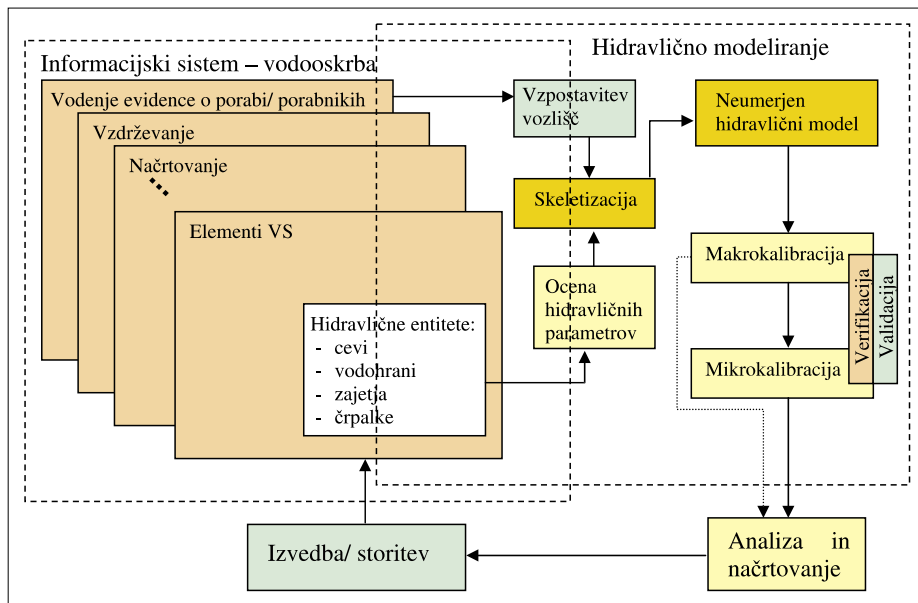
Z upravljanjem vodooskrbnih sistemov je povezanih več procesov spremljanja njihovega delovanja (tehnični, obračunski itd.), ki predvsem zaradi učinkovitosti zahtevajo temeljito in ažurirano vodenje (geografskega) informacijskega sistema (GIS). Zaradi avtomatizacije postopka vzpostavitve hidravličnega modela kot učinkovitega orodja za podporo optimiziranja in načrtovanja vodooskrbnega sistema je v skladu z razpoložljivimi programskimi orodji treba ustrezno voditi tudi hidravlične entitete (slika 1), to je entitete, katerih parametri so kasneje vključeni v hidravlični model in samo hidravlično analizo.

Na področju raziskav pri vzpostavitvi hidravličnega modela in iskanju optimalne različice pri načrtovanju in obratovanju so se že pred časom uveljavili sodobni pristopi, ki vključujejo tudi aplikacije umetne inteligence, od genetskih algoritmov ((Steinman, 2001a) in (Steinman, 2001b), nevronske mreže do raznih hibridnih metod, uporabe t.i. mehkih pogojev in klasifikacijskih algoritmov (Perez, 2003). Vendar se v praksi ugotavlja, da je vmesni člen med ustrezno podatkovno bazo in končnim hidravličnim modelom ostal nekako zapostavljen. Ta razkorak občutijo predvsem upravljavci, ki s področjem aplikativnih raziskav niso dobro seznanjeni in jim manjka osnovna navezava ter določitev

postopka od informacijskega sistema do izdelave neumerjenega hidravličnega modela in do izboljšanega hidravličnega modela, ki že nudi določen vpogled v stanja v dejanskem vodooskrbnem sistemu.

Zato se je pojavila potreba, da se z raziskavami sistematično predstavi tudi ta faza, to je faza makrokalibracije, katere postopek je treba

tudi ustrezno dokumentirati in prikazati na dejanskem primeru. Cilj je bil tudi, da se upravljavcu ponudi ustrezen strokoven vpogled v same postopke hidravličnega modeliranja, ki jih bo lahko bolj neodvisno opravil tudi sam, saj sam postopek ponuja tudi nov vpogled v vodooskrbni sistem in njegovo soodvisno obnašanje, predvsem s hidravličnega vidika. Omenjena je bila tudi naslovna tema magistrske naloge »Makrokalibracija pri hidravličnem modeliranju vodooskrbnih sistemov« (Šantl, 2007).



Slika 1 • Primer uporabe informacijskega sistema upravljavca za potrebe hidravličnega modeliranja.

2 • MAKROKALIBRACIJA

Umerjanje hidravličnih modelov vodooskrbnih sistemov se lahko označi kot dvostopenjski proces (Walski, 2001), slika 2:

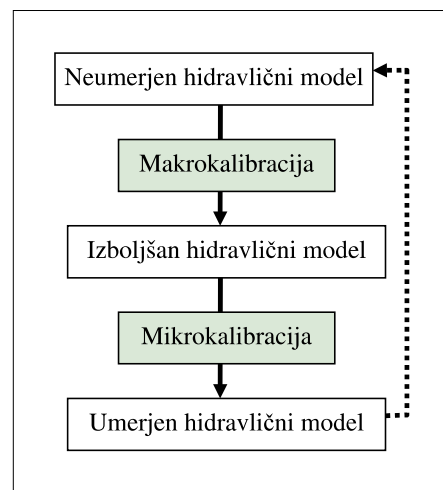
1. makrokalibracija ali grobo umerjanje in
2. mikrokalibracija ali fino umerjanje.

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

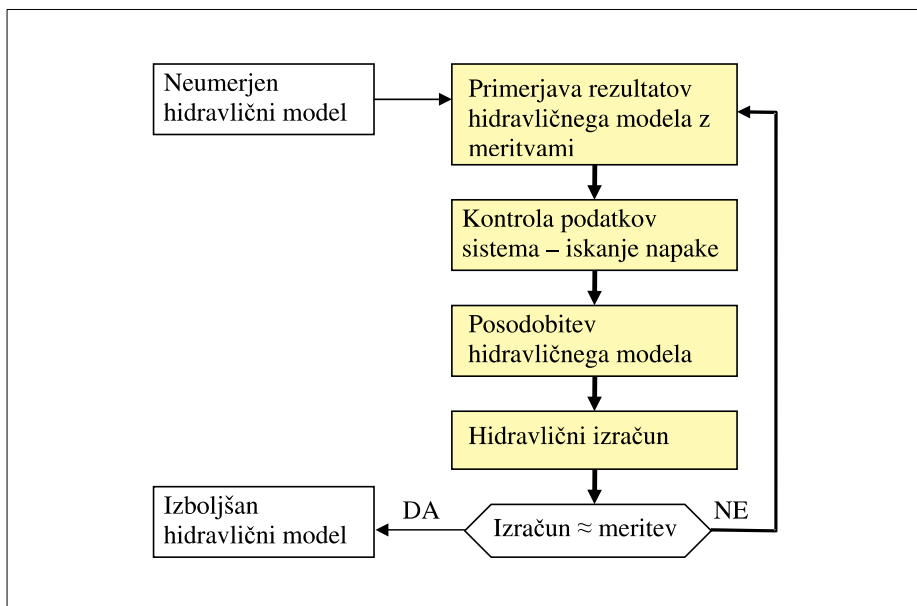
- napačne nastavitve atributov objektov (črpalna krivulja, premeri cevi ipd.)
- napačna topologija sistema (povezanost sistema, kote vozlišč ipd.) in
- napačni robni pogoji (kote zajetij, kote vode v vodohranih, delovanje ventila ipd.).

Mikrokalibracija pa zajema pravilno določitev hidravličnih atributov, predvsem določitev hrpavosti cevi in porabo v vozliščih – jakost in lokacijo, ki sta atributa, ki sta v času zelo variabilna in težko določljiva brez podrobnejše izvedenih meritev. Postopek mikrokalibracije zajema tudi izvedbo občutljivostne analize za optimalen izbor merilnih mest hidravličnega modela, kar zagotavlja reprezentativne vzorce meritev, s katerimi je mogoče hidravlični model umeriti čim natančneje ob obvladovanju stroškov izvajanja meritev. Omenjeno področje je v različni strokovni in znanstveni literaturi dobro predstavljeno ((Kapelan, 2002), (Kozelj, 2004), (Banovec, 2006)).

Osnovni način izvedbe makrokalibracije je postopek, v katerem se iterativno primerja



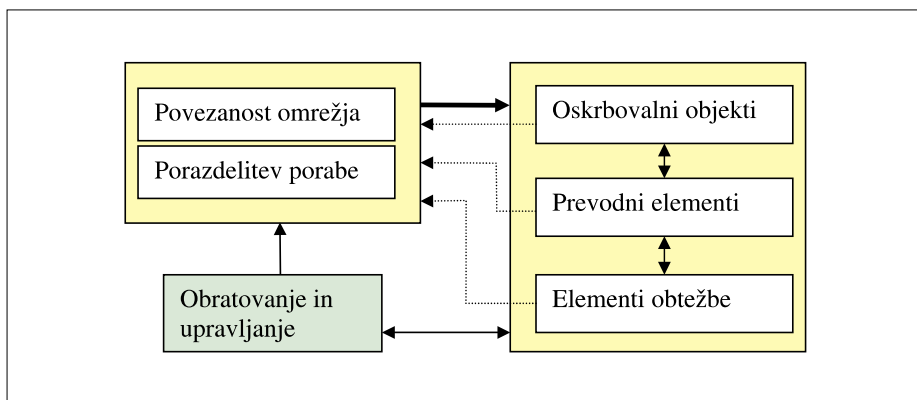
Slika 2 • Proces dvostopenjskega umerjanja



Slika 3 • Primer procesa izvajanja postopka makrokalibracije

Element	Napaka
Vodni viri	Topografija (kota, lokacija) Nihanje gladine (zajetje, vodnjak)
Vodohrani	Topografija (kota, lokacija) Prostornina
Črpališča	Črpalna krivulja Kota izhodiščne točke (vozlišče, vodnjak)
Cevi	Povezanost z omrežjem in objekti Premer Hrapavost
Ventili	Nastavitev redukcije, odpiranja Smer delovanja Kota izhodiščne točke
Vozlišča	Topografija (kota, lokacija) Poraba

Preglednica 1 • Primeri možnih napak, ki se lahko pojavijo za elemente hidravličnega modela VS



Slika 4 • Shematski prikaz strokovnega pristopa pri makrokalibraciji hidravličnega modela

rezultate modela z dejanskimi meritvami, ugotavlja napako, izvede posodobitev modela in ponovno primerja rezultate modela z dejanskimi meritvami (slika 3).

Ko je dosežena 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 lahko ugotovi, da je dosežena faza izboljšane hidravličnega modela. Ocenjuje se, da se morajo izračuni izboljšane hidravličnega modela ujemati z dejanskim stanjem znotraj meja 30 % (Ormsbee, 1997). Z ustreznim vodenjem in sprotnim posodabljanjem informacijskega sistema VS se lahko v fazi makrokalibracije doseže občutno boljše ujemanje izračunov z meritvami.

Če je informacijski sistem upravljanja z VS ustrezen vzpostavljen, podatkovno čim popolnejši (npr. obstajajo tudi podatki o letu vgradnje, materialu cevi) oziroma je VS novejši, tako da je izgub vode malo in so hidravlične karakteristike elementov in objektov (npr. hrapavost cevi) lažje določljive, se na podlagi makrokalibracije že lahko ugotovi, da hidravlični sistem dosega sprejemljivo natančnost s stvarnimi meritvami in je torej že v veliki meri tudi umerjen hidravlični model. V takem primeru se glede na želen nivo natančnosti lahko preide v analize in načrtovanje brez izvedbe naslednje faze umerjanja, to je mikrokalibracije.

Ker je cilj, 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). Zato se je v raziskavi preverila in določila metoda (strokovni pristop), ki ustrezno klasificira entitete in njihove atribute v postopku preverjanja odstopanj med rezultati modela in dejanskimi meritvami. Na ta način se zagotovi enoznačna ugotovitev izvora napake in se prepreči nekonistentna obravnava sistema.

Na podlagi ugotovitev aplikativnega raziskovalnega projekta (Kompore, 2007), pri katerem so se v postopku hidravličnega modeliranja obravnavali trije VS, se je v postopku makrokalibracije v prvi fazi podrobno obdelalo možne tipe napak in klasificiralo entitete in atribute hidravličnega modela. Preglednica 1 prikazuje možne napake po posameznih entitetah hidravličnega modela.

Pri raziskavi soodvisnosti posameznih napak in iskanja njihovega primarnega vzroka se je ugotovilo, da je treba zaradi izločitve nekonsistentnosti pri makrokalibraciji predvsem določiti prioriteto preverjanja posameznih elementov. Sosledje odpravljanja napak določa naslednje zaporedje (slika 4):

1. preveritev osnovne vzpostavitve mreže (pravilna povezanost cevovoda),
2. alokacija ali porazdelitev porabe vode kot elementa obtežbe,
3. preveritev glavnih oskrbovalnih objektov (vodni viri, vodohrani in črpališča), ki za-

- gotavljajo energijski in količinski potencial (tlačna razlika pri različnih pretokih),
4. preveritev prevodnih elementov, to je vodov in zapornih elementov (cevi in ventili), ki zagotavljajo transport vode in redukcijo energijskega in količinskega potenciala,
5. preveritev atributov samih vozlišč kot nosilcev obtežbe (poraba vode, kote),
6. preveritev pravil obratovanja z objekti.

Zaradi soodvisnosti posameznih napak je treba v postopku upoštevati iterativnost. To pomeni, ko se na določeni stopnji makrokalibracije odpravi določena napaka, se ponovno preveri predhodne faze makrokalibracije. Na ta način se ugotavlja, ali ni prišlo do novih odstopanj med meritvami in izračuni, ki predhodno niso bili zaznani.

V skladu z zgoraj predstavljenim strokovnim pristopom in ugotovitvami tipičnih napak je v nadaljevanju na dejanskem primeru VS predstavljen del postopka makrokalibracije na primeru stvarnega vodooskrbnega sistema, pri katerem je bilo vodenje podatkov z vidika hidravličnega modeliranja zelo pomanjkljivo.

onemogočilo nepravilno pretakanje vode iz visoke v nizko in druge tlačne cone.

onemogočilo nepravilno pretakanje vode iz visoke v nizko in druge tlačne cone.

3.2 Dobava in poraba vode

Upravljevec 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, kar je treba uskladiti.

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

Sama primerjava polnjenja vodohrana T2 oziroma nihanja gladine vode med izračunom in meritvijo potrjuje, da je v sistemu porazdeljeno premalo porabe vode, saj je vodohran T2 pri izračunu ves čas poln in se voda stalno preliva (slika 6).

3 • PRIMER MAKROKALIBRACIJE

Za potrebe načrtovanja in rekonstrukcije vodooskrbe manjšega mesta je za postopek priprave hidravličnega modela upravljavec obravnavanega VS 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.

S temi podatki in dodatnimi dopolnitvami upravljavca (dopolnitev podatkov o premerih cevi, volumnih vodohranov, višinskih kotah vodnih zajetij ipd.) se je vzpostavil GIS in izdelal neumerjen hidravlični model. Ko je bil neumerjen hidravlični sistem vzpostavljen, je sledil postopek makrokalibracije, ki se je opiral na strokovni pristop, predstavljen v prejšnjem poglavju.

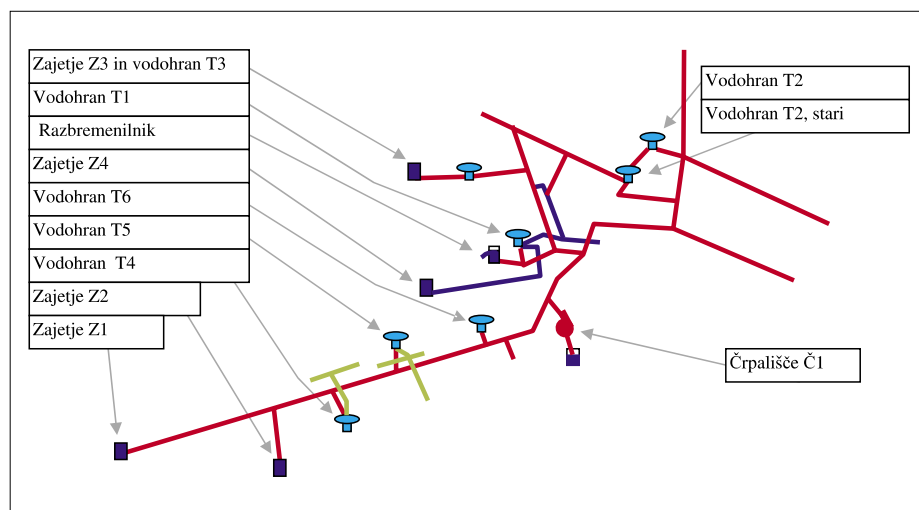
Zaradi učinkovitosti sodelovanja z upravljavcem, saj se je vzporedno vzpostavljala tudi GIS, sami podatki pa so bili tudi zelo pomanjkljivi, so se v prvem koraku preverile vse faze, ne glede na to, ali je v določeni fazi bila ugotovljena kakšna nepravilnost, zaradi katere bi se dejansko moralo ponovno preveriti že izvedene faze makrokalibracije.

3.1 Povezanost omrežja

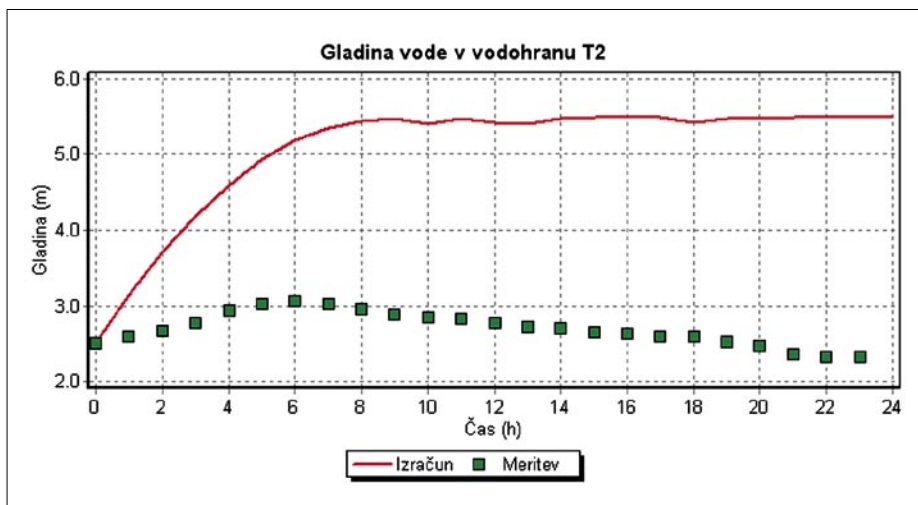
V začetku je bilo treba preveriti, ali je sistem pravilno povezan, in ugotoviti, ali glavne količine vode pravilno tečejo. V obravnavanem VS prihaja do veliko križanj cevi, ki med seboj niso povezane, zato se je v tej fazi sistem podrobno »prečesalo« z upravljavcem.

VS je ločen v dve glavni tlačni cone. Ob transportnem vođu se pojavi tudi nekaj naselij, ki se tlačno ločeno oskrbujejo iz istoležnih vodohranov, ki se oskrbujejo iz visoke tlačne cone. Slika 5 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 in manjši vodni vir z istoležnim lastnim vodohranom, ločen z zapornim ventilom, ki pa so izklopljeni in na shemi niso prikazani.

Ker sta visoka in nizka tlačna cona fizično povezani prek več cevi, ki pa so dejansko zaprte, je bilo treba precej pozornosti nameniti preverjanju, ali so določene cevi oziroma ventili tudi dejansko zaprti. Na ta način se je



Slika 5 • Shema vodooskrbnega sistema s prikazom bistvenih objektov in različnih tlačnih con (rdeča – visoka tlačna cona, modra – nizka tlačna cona, zelena – dve manjši ločeni tlačni coni)



Slika 6 • Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu

Prav tako izračun na podlagi hidravličnega modela v tej fazi izkazuje, da iz visoke cone doteka preveč vode v vodohran T1, namesto merjenega vtoka (maks. pribl. 6 l/s) priteka največ približno 31 l/s. Ker so kote vodohranov in vodnih virov še enkrat potrjene s strani upravljavca 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 pre nizko določena poraba v sistemu. 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). Ob taki porazdelitvi je največji delež izgub pripadel območju visoke cone.

Alokirana poraba vode (l/s)		
Gospodinjstva	Gospodarstvo	Izgube
17,1	33,1	35,0
Skupaj		85,1

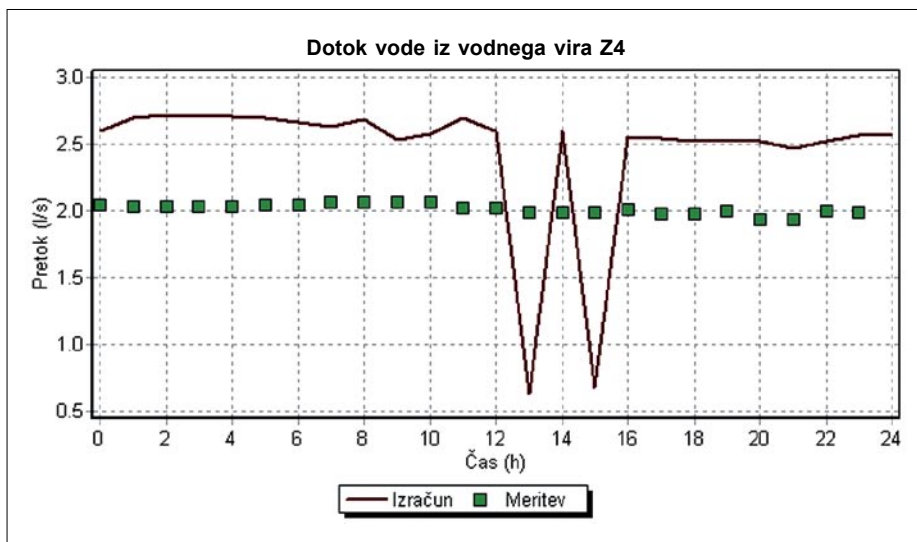
Preglednica 2 • Alokacija vode glede na tip porabe (evidentirana poraba in ocenjene izgube vode)

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 upravljavca ali druge izvedene meritve ter alokacijo izgub ponovno izvesti. Omenjeno je že proces mikrokalibracije, še posebej, če bi bilo treba izvesti dodatne sistematične meritve na VS.

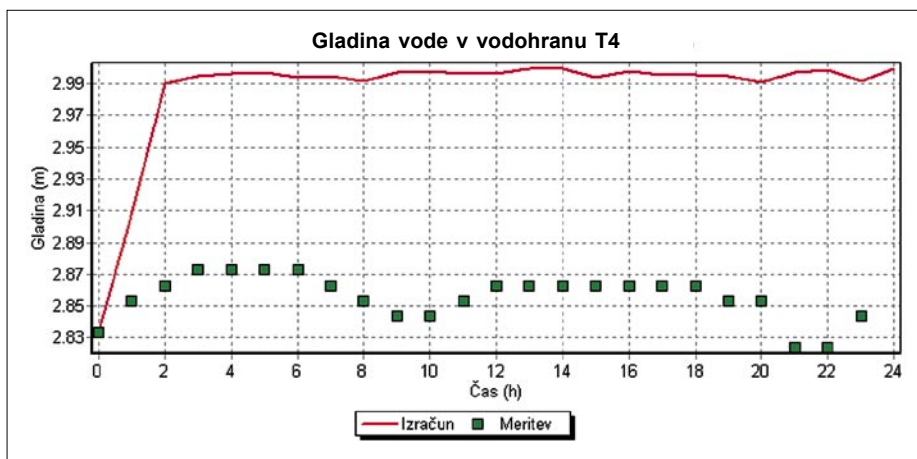
Ker je celotni merjeni vtok vode v VS višji, se je za izenačitev že določene porabe vode po vozliščih s celotno bilanco vtoka vode v visoko cono prilagodil urni koeficient porabe po posameznih vozliščih v visoki coni (preglednica 3). Prvi štirje stolpci predstavljajo vodne vire, ki napajajo visoko, četrti in peti stolpec pa vodohrane, v katere teče voda iz visoke cone. Za določitev bilance visoke cone so se pretoki vode v vodohrane T1, T4 in T5 odštevali od skupne količine dotoka vode iz vodnih virov, v

Datum meritve:		13. 6. 2006			Evidentirana povpr. poraba (l/s):		80,3	
(l/s)								
Ura	Zajetje Z1	Zajetje Z2	Črpališče Č1	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
2:00	89,45	16,88	17,13	1,11	-7,03	-33,11	84,95	1,058
4:00	88,91	16,88	17,13	1,11	-6,85	-23,68	93,89	1,169
6:00	91,06	17,17	17,21	1,12	-6,31	-10,48	110,31	1,374
8:00	71,02	17,47	17,74	1,12	-6,44	+22,21	123,53	1,538
10:00	91,08	16,33	17,45	1,14	-4,19	+12,15	134,49	1,675
12:00	91,08	16,33	17,56	1,14	-4,98	+11,74	133,49	1,662
14:00	89,99	16,33	17,74	1,12	-4,84	+10,90	131,78	1,641
16:00	89,99	16,59	17,49	1,15	-3,74	+3,56	125,58	1,564
18:00	89,98	17,47	17,67	1,15	-3,43	+4,19	127,68	1,590
20:00	69,93	17,47	18,23	1,12	-3,20	+15,30	119,37	1,486
22:00	91,08	16,06	18,23	1,14	-3,79	-5,24	118,38	1,474
Povprečno							119,23	

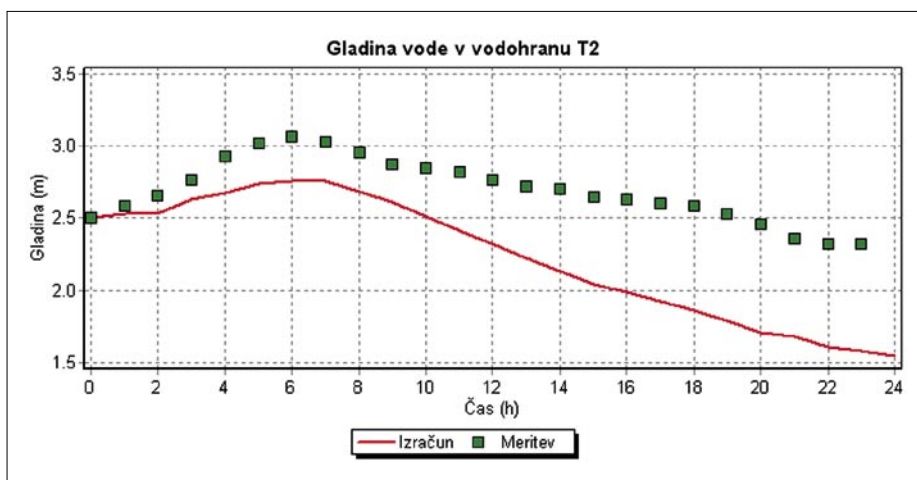
Preglednica 3 • Določitev urnih koeficientov porabe za visoko cono prek izenačitve z bilanco vtoka in iztoka v visoko cono (prikazana je vsaka druga ura)



Slika 7 • Primerjava dotoka vode iz vodnega vira Z4 v vodohran T1 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu v postopku makrokalibracije



Slika 8 • Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T4 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu



Slika 9 • Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu v postopku makrokalibracije

primeru vodohrana T2, ki je profiležni vodohran visoke cone, pa se je določila skupna bilanca vtoka (T2 je ločeno prikazan v tabeli).

Urni koeficient porabe je bil zatem določen kot razmerje med bilanco in že alocirano povprečno porabo (80,3 l/s) ter se je pripisal vsem 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 enake urne koeficiente porabe kot za visoko cono.

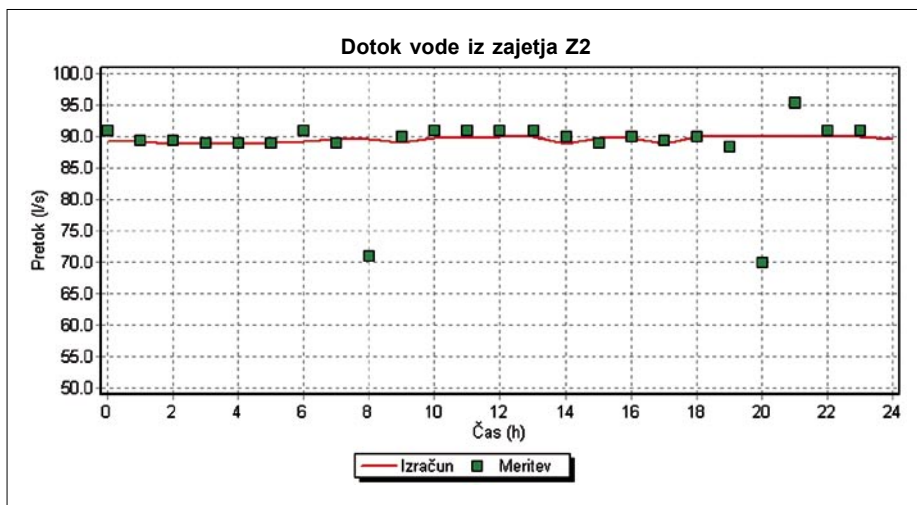
Uporabljen pristop je v tej fazi obdelave dovolj natančen, saj podatki o urnem dnevnem nihanju porabe vode za velike odjemalce niso bili na razpolago, kar pa je v tem primeru pomembno, saj večji del porabe predstavlja prav industrijsko-storitvena dejavnost (preglednica 2). Ta ugotovitev že zahteva zbiranje dodatnih informacij. Enak postopek se je izpeljal še za nizko cono in drugi dve manjši tlačni coni, ki se napajata iz istoležnih vodohranov T4 in T5.

3.3 Vodni viri in vodohrani – oskrbovalni elementi

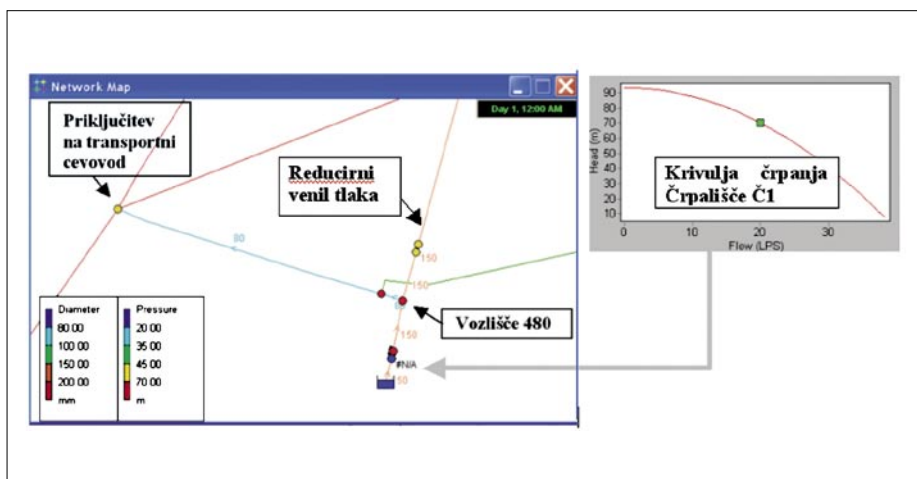
Pri ponovni računski kontroli sistema se je zopet ugotovilo, da v vodohran T1 kljub povečani porabi v sistemu iz visoke cone doteka občutno preveč vode, kar bi lahko bila posledica napačne določitve premerov cevi. Ker je za vtok iz visoke cone v vodohran T1 obstajala izvedena meritev pretokov, se je 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 7), da iz zajetja Z4 dotekajo večje količine vode (približno 2,75 l/s) od merjenih (približno 2,0 l/s). Nenadna znižanja dotoka 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.

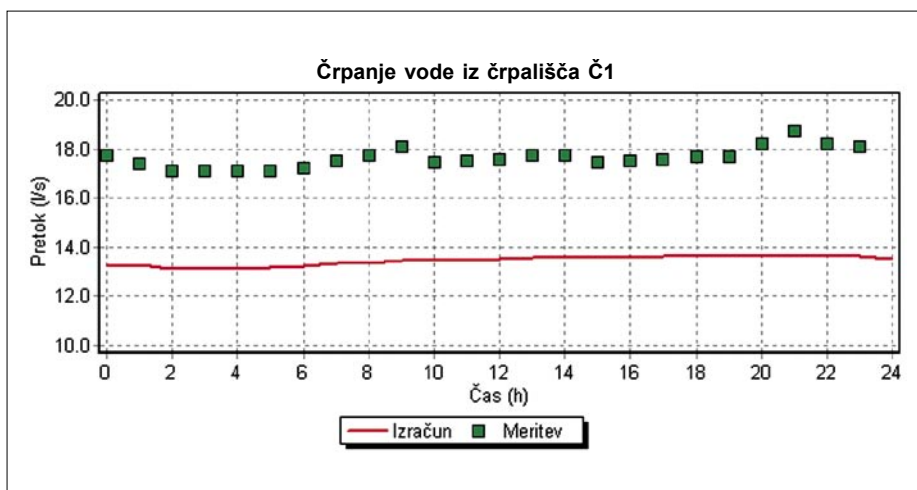
Izračuni so se z meritvami namreč veliko bolje uskladili, ko se je koeficient hrupavosti po ceveh v celotni dolžini od vira Z4 do vodohrana T1 iz začetnega ocenjenega $n_e = 0,015$ zvišal na $n_e = 0,020$. Če so cevi v tem delu VS zelo stare, bi bila taka predpostavka lahko ustrezna, vendar tega podatka za ta del sistema ni bilo na razpolago.



Slika 10 • Primerjava dotoka vode iz zajetja Z2 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu v postopku makrokalibracije



Slika 11 • Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T4 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu v postopku makrokalibracije



Slika 12 • Primerjava dotoka vode iz črpalnice Č1 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu v postopku makrokalibracije

Pri kontroli nihanja gladine v vodohranu T5 se pri izračunu prav tako ugotavlja stalna popolna napolnitev vodohrana (slika 8). 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 povsem verjetno.

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 9).

Izračuni dotoka vode iz glavnih zajetij Z1 (slika 10) in Z2 izkazujejo zadostno ujemanje. Nenadno zanihanje pretoka vode je posledica vsrkavanja zraka v nategi, prek katere se polni zbirni rezervoar iz zajetja Z2. O tem pojavu je poročal tudi sam upravljavec vodooskrbnega sistema.

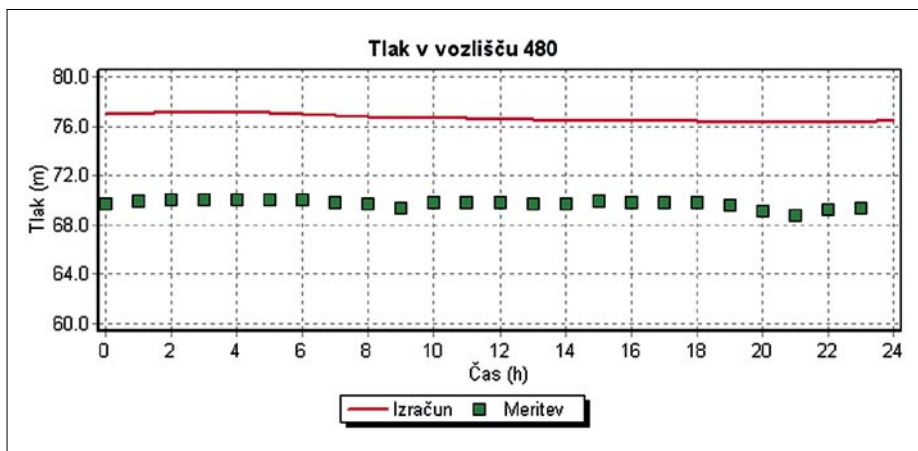
3.4 Črpalnica

V obravnavanem vodooskrbnem sistemu se nahaja več črpalnic, vendar je trenutno delujoče samo eno, to je črpalnica Č1, ki z vodo oskrbuje visoko tlačno cono (slika 5). Slika 11 prikazuje del visoke tlačne cone VS s črpalnicom Č1 s predpostavljeno črpalno krivuljo Q/H.

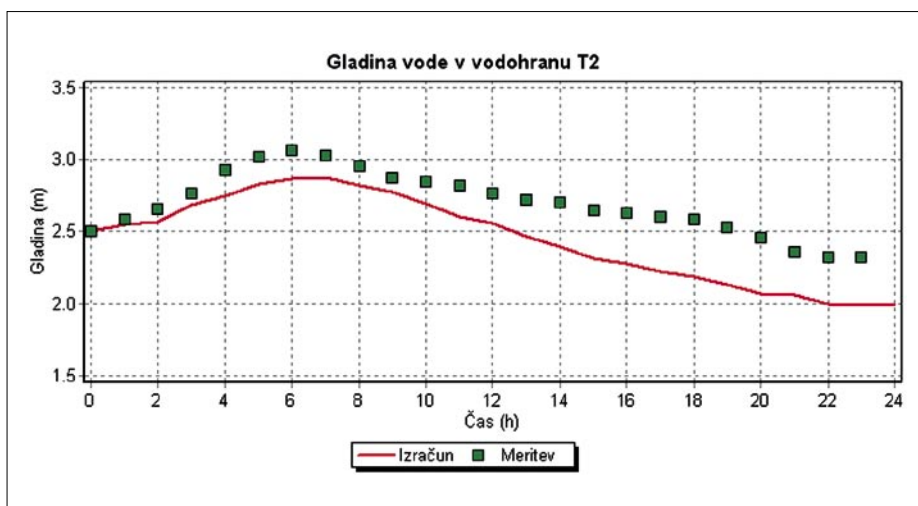
Glede na predpostavljeno črpalno krivuljo Q/H se iz črpalnice dobavlja premalo vode (slika 12). Hkrati so tlaki previsoki (slika 13), kar nakazuje, da se je treba po črpalni krivulji »premakniti«
proti nižjim tlakom in višjim pretokom.

Zato se je v prvi fazi preverila ustreznost črpalne krivulje. S povečevanjem moči se je doseglo merjene pretoke, vendar le 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. Seveda je tako predpostavko treba preveriti in uskladiti z upravljavcem VS.

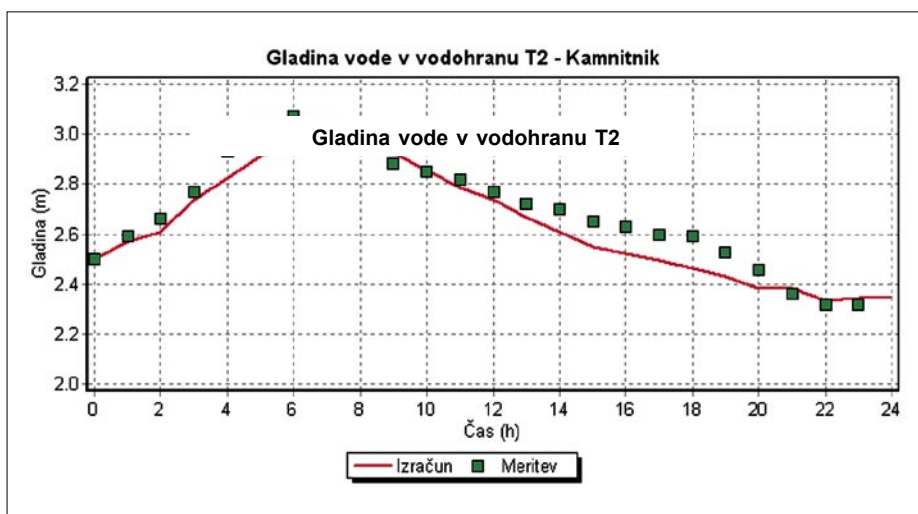
Ugotavlja se tudi, da reducirni ventil (oskrbovalni element) pri črpalnici Č1 ne služi



Slika 13 • Primerjava tlačne črpalne višine v črpalnišču Č1 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu v postopku makrokalibracije



Slika 14 • Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu v postopku makrokalibracije



Slika 15 • Primerjava nihanja gladine vode v vodohranu T2 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu v postopku makrokalibracije z dodatnimi spremembami

namenu, saj tlak na drugi strani ventila po izračunih s hidravličnim modelom v tej fazi makrokalibracije znaša 4,70 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 14). V primerjavi s prejšnjo primerjavo se je izračun še bolj približal meritvam, kar je bilo zaradi povečanja vtoka črpanja iz črpalnišča Č1 tudi pričakovano.

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 občutneje 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 črpalno Č1 ($Q_1 = 14 \text{ l/s}$, $H_1 = 79 \text{ m}$ in $Q_2 = 25 \text{ l/s}$, $H_2 = 69 \text{ m}$),
- znižanje kote dna vodohrana T2 iz 404,50 m. n. v. na 401,00 m. n. v. in
- premeri cevi od črpalnišča do transportnega cevovoda se povečajo na $D = 100 \text{ mm}$ 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 15).

Vendar je takšno umerjanje sistema, dokler se ne razjasni 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.

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

3.5 Tlaki v sistemu

Izvedeni izračuni časovne simulacije pokažejo (slika 16), da se tlaki v VS gibljejo v mejah »normalne« (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.

V postopku umerjanja bi se verjetno v določenih vozliščih ugotovilo več odstopanj med izračuni in merjenimi vrednostmi tlakov,

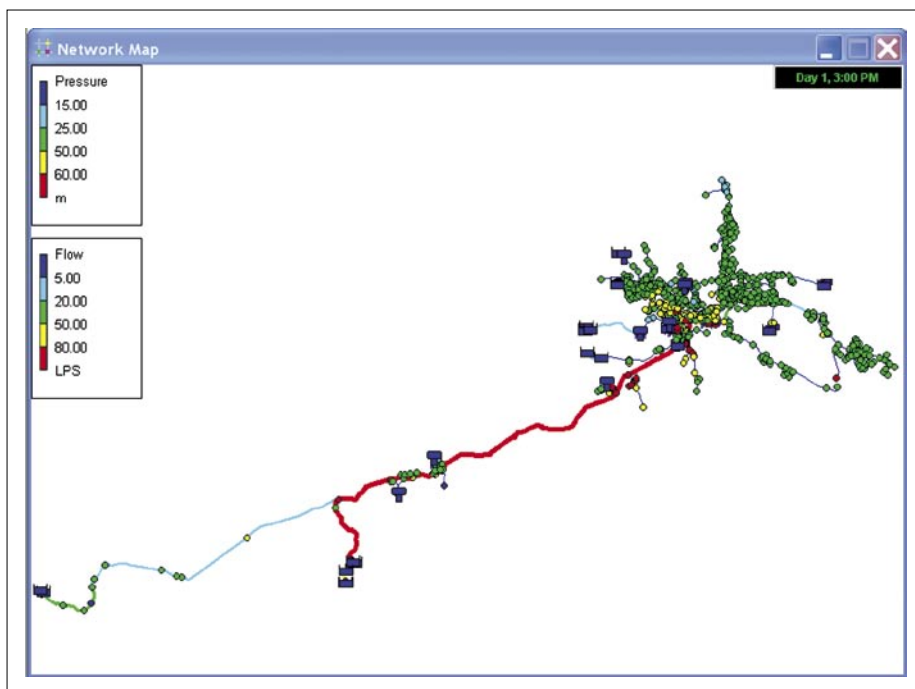
saj so bile kote vozlišč ocenjene in določene na podlagi kote terena, vendar natančnejše meritve niso bile na razpolago. Ob tem je treba tudi poudariti, da omenjena ocena kot vozlišč ne vpliva širše na hidravlične razmere v VS, ki jih določajo predhodno določeni atributi elementov VS (povezanost omrežja, alokacija porabe vode, atributi oskrbovalnih elementov ...).

V skladu s teoretičnimi izhodišči strokovnega pristopa, ki podaja iterativni pristop k makrokalibraciji, je prav tako neučinkovito preiti na umerjanje elementov obtežbe, to

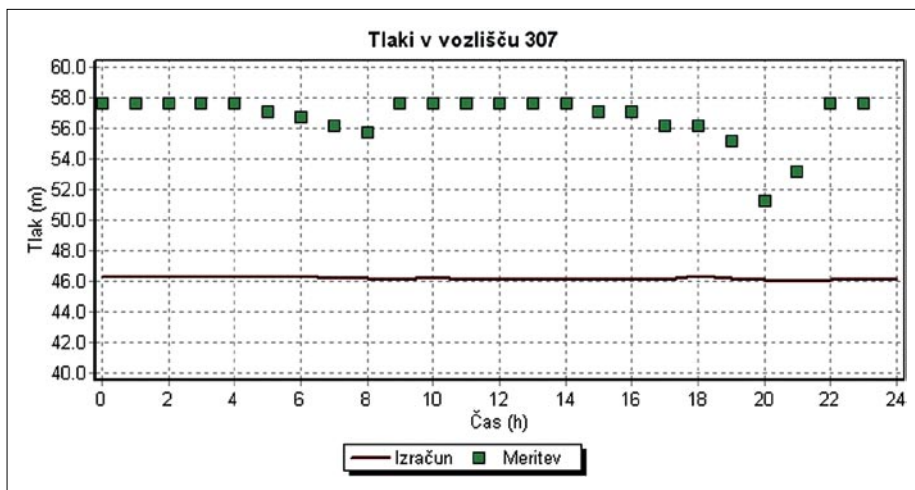
je vozlišč, dokler se ne preverijo in ustrezno obravnavajo že do sedaj ugotovljena odstopanja. Vseeno pa je zaradi obravnave in prikaza celotnega cikla postopka makrokalibracije zanimiv prikaz primerjave izračunanih tlakov z merjenimi v določenem vozlišču na cevovodu iz smeri zajetja Z2, preden se združi s cevovodom, ki prihaja iz smeri zajetja Z1 (Slika 17).

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 je treba preveriti koto tega vozlišča.

Iz slike je razvidno tudi nihanje tlaka, ki pa je posledica že prej omenjenega vsrkanja zraka v nategi, prek katere se polni zbirni rezervoar iz zajetja Z2. Ta pojav, ko iz smeri zajetja Z2 priteče manj vode, je možno zaznati tudi pri drugih meritvah. Na primer črpališče Č1 v tem času v sistem črpa večje količine vode (Slika 12), opazno je zmanjšanje dotokov vode iz smeri zajetja Z2 (slika 10) in pospešena je praznitev vodohrana T5 (slika 8).



Slika 16 • Prikaz tlakov in pretokov v vodooskrbnem sistemu na podlagi hidravličnega izračuna



Slika 17 • Primerjava izračunanih tlakov z merjenimi v vozlišču na cevovodu iz smeri zajetja Z2 pred združitvijo s cevovodom iz smeri Z1 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu

3.6 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 upravljavca.
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 pretočnost obravnavane cevi.

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 pretočnost 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. Izkazuje se potreba po podatkih 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 vodovodnega cevovoda je treba preveriti koeficient hrapavosti oziroma kote zajetja 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 makrokalibracije 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 upravljavca, tako da se bo hidravlični model s ponovnim »ciklom« makrokalibracije še bolj uskladal 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 hrapavost cevi, pa vključujejo tudi postopek mikrokalibracije, kjer bo prvi korak ustrezen izbor merilnih mest in izvedba samih meritev.

4 • SKLEP

Iz pričujočega prispevka, ki temelji na ugotovitvah aplikativnega razvojnega projekta Modeliranje in optimiranje življenjskega cikla vodooskrbnih omrežij (Kompere, 2007), in magistrske naloge Makrokalibracija pri modeliranju hidravličnih modelov vodooskrbnih sistemov (Šantl, 2007), sledi, da je en od pogojev za učinkovito vzpostavitev hidravličnega modela vodooskrbnega sistema tudi natančen in ustrezno vzpostavljen geografski informacijski sistem za vodenje

evidenc vodooskrbnih sistemov, ki mora biti po vzpostavitvi potrjen tudi stalnemu posodabljanju.

V prispevku je podan poudarek na umerjanju, zlasti makrokalibraciji ali grobem umerjanju, kjer je treba zaradi številnih možnih napak, ki so posledica pomanjkljivega vodenja evidenc o VS, in tudi dolgotrajnosti postopka k samemu postopku pristopiti ustrezno strokovno sistematično. Zato je podrobneje predstavljen način sistematičnega iterativnega odpravljanja

napak pri vodenih podatkih o vodooskrbnem sistemu, ki temelji na določitvi prioritete posameznih entitet hidravličnega modela in soodvisnosti posameznih napak.

Omenjeni strokovni pristop temelji na teoretičnih in praktičnih izkušnjah hidravličnega obnašanja vodooskrbnih sistemov, zlasti na dognanjih o soodvisnostih v tlačnih hidravličnih sistemih. Zaradi tega je primeren tudi kot učni poligon za upravljavce VS, ki jim nudi širši vpogled v hidravlično obnašanje in soodvisnost lastnega vodooskrbnega sistema ter posledično tudi podporo za učinkovito načrtovanje in razvoj vodooskrbe.

5 • LITERATURA

- Banovec, P., Kozelj, D., Šantl, S., Steinman, F., Izbira merilnih mest v vodovodnih sistemih z genetskimi algoritmi, *Strojniški vestnik*, let. 52, št. 12, str. 817–834, 2006.
- Durkin, J., *Expert Systems Design and Development*, New York, Macmillan Publishing Company, 1994.
- Kapelan, Z., *Calibration of Water Distribution Systems Hydraulic Models*, PhD Thesis, UK, University of Exeter, School of Engineering and Computer Science, 2002.
- Kompere, B., Banovec, P., Steinman, F., Kozelj, D., Šantl, S., Modeliranje in optimiranje življenjskega cikla vodooskrbnih omrežij, Aplikativni raziskovalni projekt, Ljubljana, Agencija za raziskovalno dejavnost RS, 2007.
- Kozelj, D., Uporaba genetskih algoritmov za izbor hidravličnih merilnih mest na cevovodnem omrežju: delo je bilo pripravljeno v skladu s Pravilnikom o podeljevanju Prešernovih nagrad študentom za leto 2004, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, 2004.
- Ormsbee, L., Lingireddy, S., *Calibrating hydraulic network models*, USA, *Journal of the American Water Works Association*, let. 89(2), str. 42–50, 1997.
- Perez, R., *Identifiability and calibration of water network models*, Doktorska dizertacija. Spain, Terrassa, The Technical University of Catalonia, 2003.
- Steinman, F., Banovec, P., Šantl, S., Uporaba genetskih algoritmov pri načrtovanju in upravljanju vodovodnih sistemov, Ljubljana, *Gradbeni vestnik*, avgust 2001a, let. 50, str. 195–204, 2001.
- Steinman, F., Banovec, P., Šantl, S., Načrtovanje razvoja vodovodnih sistemov z uporabo genetskih algoritmov, Ljubljana, *Strojniški vestnik*, *Journal of mechanical engineering*, let. 47, št. 6, str. 263–279, 2001.
- Šantl, S., *Makrokalibracija pri modeliranju hidravličnih modelov vodooskrbnih sistemov*, magistrsko delo, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2007.
- Walski, T., Chase, D., Savic, D., *Water Distribution Modeling*, UK, Waterbury, CT, Haestad Methods, 2001.