





## Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Leskoškova 9e, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

## Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**  
**prof. dr. Matjaž Mikoš**  
**Jakob Presečnik**  
 MSG IZS: **Gorazd Humar**  
**mag. Črtomir Remec**  
**doc. dr. Branko Zadnik**  
 FGG Ljubljana: **doc. dr. Marijan Žura**  
 FG Maribor: **Milan Kuhta**  
 ZAG: **prof. dr. Miha Tomaževič**

## Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

## Sodelavec pri MSG IZS:

**Jan Kristjan Juteršek**

## Lektor:

**Jan Grabnar**

## Lektorica angleških povzetkov:

**Darja Okorn**

## Tajnica:

**Anka Holobar**

## Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

## Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

## Naklada:

**3000 izvodov**

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

<http://www.zveza-dgits.si>

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 22,95 EUR; za študente in upokojence 9,18 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 169,79 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je všteti DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:  
 SI56 0201 7001 5398 955

# Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774

Ljubljana, avgust 2009, letnik 58, str. 193-216

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Besedilo prispevkov mora biti napisano v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledkom med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev ter besedilo.
6. Besedilo člankov mora obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; imena in priimke avtorjev; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavlja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike, preglednice in fotografije morajo biti omenjene v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino. Vse slike in fotografije v elektronski obliki (slike v običajnih vektorskih grafičnih formatih, fotografije v formatih .tif ali .jpg visoke ločljivosti) morajo biti v posebnih datotekah, običajne fotografije pa priložene.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: **(priimek prvega avtorja, leto objave)**. V istem letu objavljena dela istega avtorja morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA, ki se je ne oštevilčuje, so uporabljena in citirana dela opisana z naslednjimi podatki: priimek, ime prvega avtorja (lahko krajšano), priimki in imena drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani *od do*; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Pod črto na prvi strani – pri prispevkih, krajših od ene strani, pa na koncu prispevka – morajo biti navedeni podrobnejši podatki o avtorjih: znanstveni naziv, ime in priimek, strokovni naziv, podjetje ali zavod, navadni in elektronski naslov.
15. Prispevke je treba poslati glavnemu in odgovornemu uredniku prof. dr. Janezu Duhovniku na naslov: FGG, Jamova 2, 1000 LJUBLJANA, oziroma po e-pošti: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V spremnem dopisu mora avtor članka napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD in v 8. točki določenih grafičnih formatih.

Uredništvo

# Vsebina • Contents

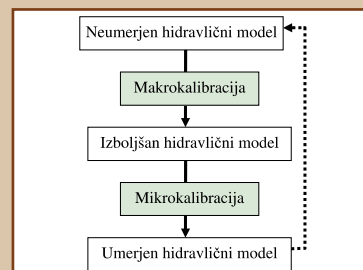
## Članki • Papers

stran **194**

mag. Sašo Šantl, univ. dipl. inž. grad.  
prof. dr. Franci Steinman, univ. dipl. inž. grad.

### **POSTOPEK MAKROKALIBRACIJE HIDRAVLIČNEGA MODELA VODOOSKRBNIH SISTEMOV**

MACROCALIBRATION IN THE PROCESS OF HYDRAULIC MODELLING  
OF WATER SUPPLY SYSTEMS

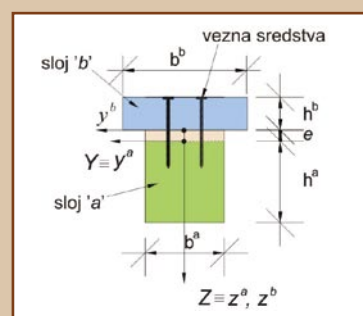


stran **204**

Aleš Kroflič, univ. dipl. inž. grad.  
izr. prof. dr. Igor Planinc, univ. dipl. inž. grad.  
doc. dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.

### **ANALIZA DVOSLOJNIH LESENIH NOSILCEV Z UPOŠTEVANJEM ZDRSA IN RAZMIKA**

ANALYSIS OF TWO-LAYERED TIMBER BEAMS CONSIDERING  
INTERLAYER SLIP AND UPLIFT

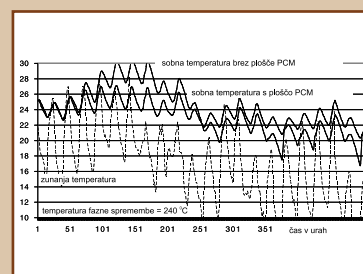


stran **213**

dr. Azra Korjenić, univ. dipl. inž.  
prof. dr. Jürgen Dreyer, univ. dipl. inž.

### **MOŽNOSTI ZA ZMANJŠANJE POTREBE PO OGREVALNI ENERGIJI S POVEČANJEM TOPLOTNE KAPACITETE STAVBE**

POSSIBILITIES FOR REDUCTION OF DEMAND FOR HEATING ENERGY  
WITH ENLARGEMENT OF THERMAL CAPACITY OF BUILDING



## Novi diplomanti

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

## Koledar prireditev

J. K. Juteršek, univ. dipl. inž. grad.

Slika na naslovnici: Sirov most čez Idrijco, foto: Janez Duhovnik

# 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

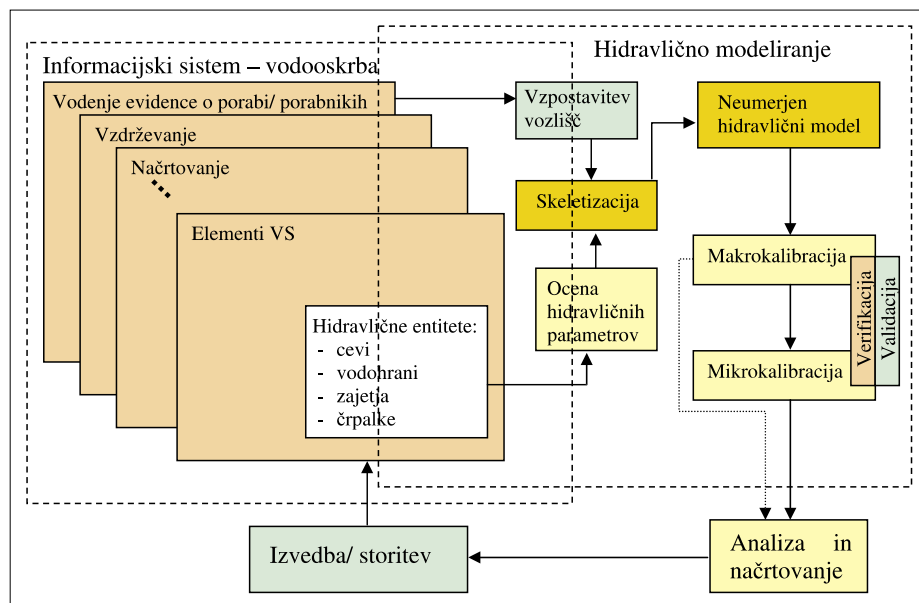
Z upravljanjem vodooskrbnih sistemov je povezanih več procesov spremljanja njihovega delovanja (tehnični, obračunski itd.), ki predvsem zaradi učinkovitosti zahtevajo temeljito in ažurirano vodenje (geografskega) informacijskega sistema (GIS). Zaradi avtomatizacije postopka vzpostavitve hidravličnega 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:

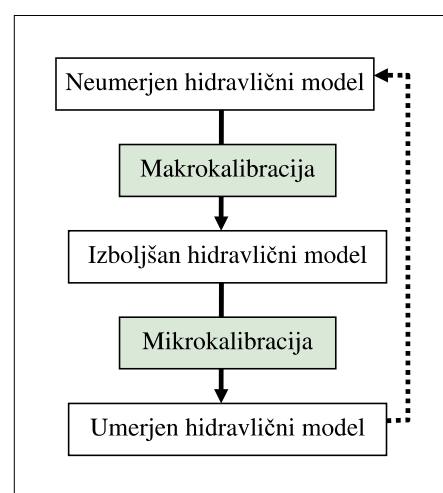
1. makrokalibracija ali grobo umerjanje in
2. mikrokalibracija ali fino umerjanje.

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)

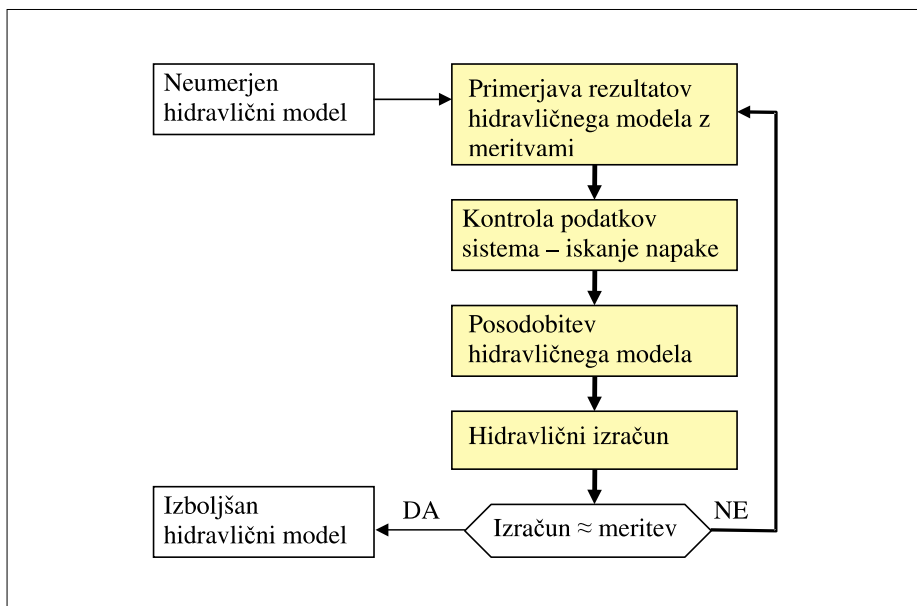
- napačne nastavitve atributov objektov (črpalna krivulja, premeri cevi ipd.)
- napačna topologija sistema (povezanost sistema, kote vozlišč ipd.) in
- napačni robni pogoji (kote zajetij, kote vode v vodohranih, delovanje ventila ipd.).

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



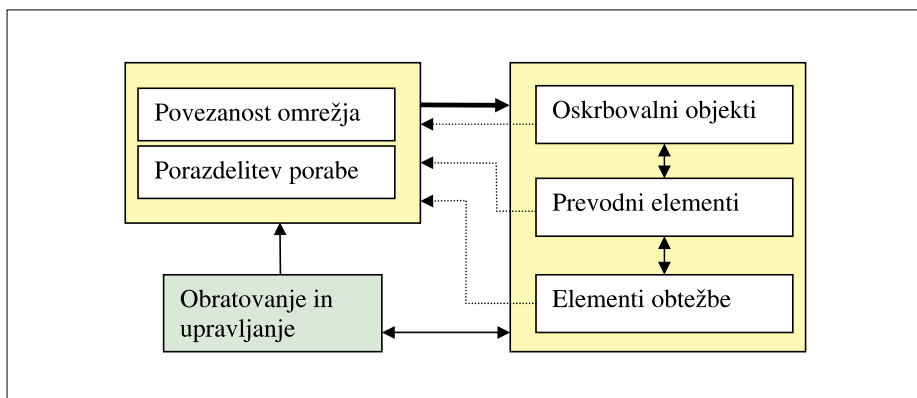
Slika 2 • Proces dvostopenjskega umerjanja



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

Če je informacijski sistem upravljanja z VS ustrežno 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.

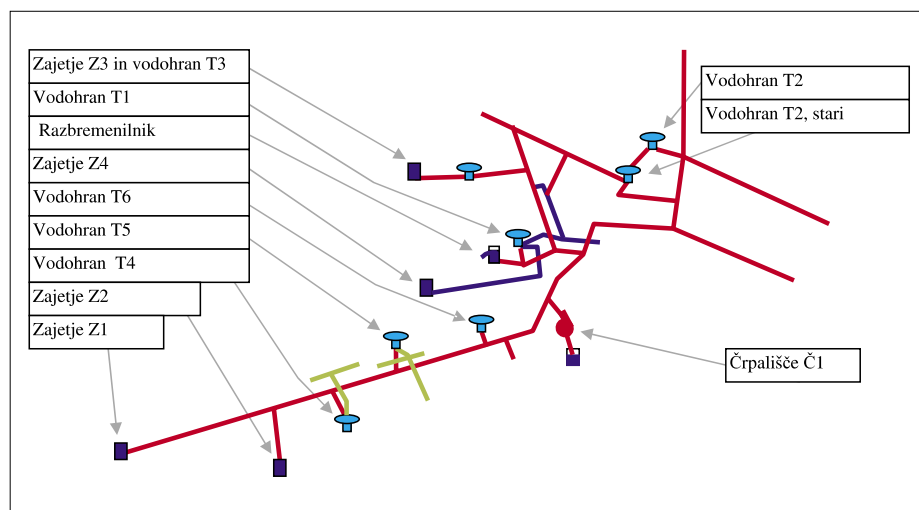
Zaradi učinkovitosti sodelovanja z upravljavcem, saj se je vzporedno vzpostavljala tudi GIS, sami podatki pa so bili tudi zelo pomanjkljivi, so se v prvem koraku preverile vse faze, ne glede na to, ali je v določeni fazi bila ugotovljena kakšna nepravilnost, zaradi katere bi se dejansko moralo ponovno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

### 3.1 Povezanost omrežja

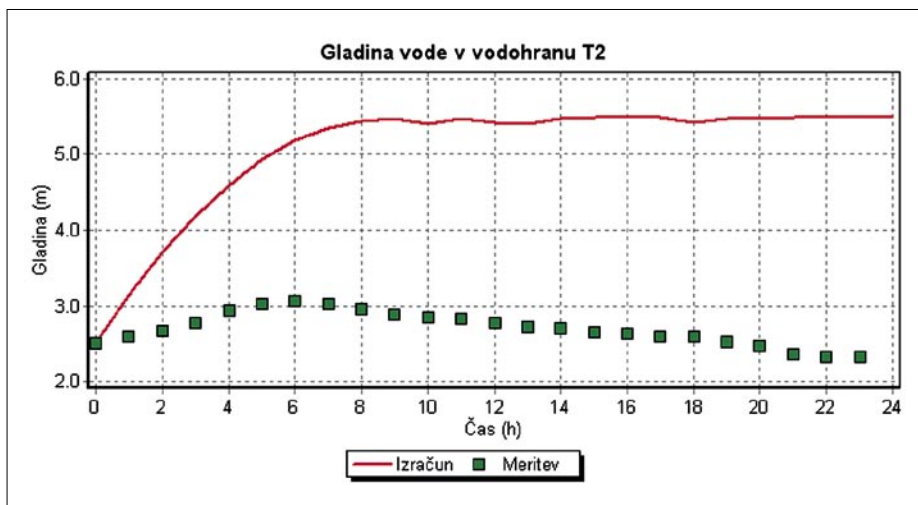
V začetku je bilo treba preveriti, ali je sistem pravilno povezan, in ugotoviti, ali glavne količine vode pravilno tečejo. V obravnavanem VS prihaja do veliko križanj cevi, ki med seboj niso povezane, zato se je v tej fazi sistem podrobno »prečesalo« z upravljavcem.

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
<b>Skupaj</b>		<b>85,1</b>

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

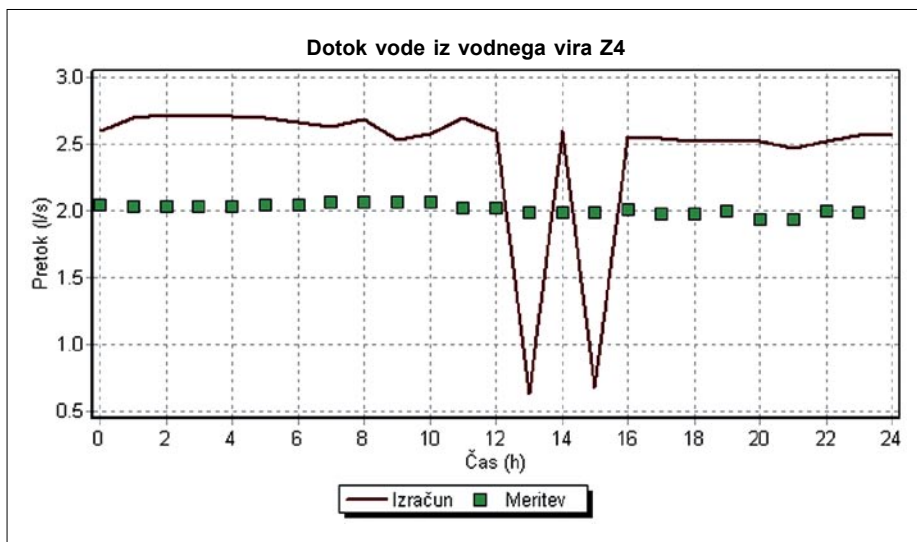
Za ustrežnejšo porazdelitev, če bi se alokacija izgub v nadaljevanju izkazala za pomemben faktor, bo treba upoštevati velikost tlakov po vozliščih, starost cevi in tudi oceno upravljavca ali druge izvedene meritve ter alokacijo izgub ponovno izvesti. Omenjeno je že proces mikrokalkulacije, še posebej, 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

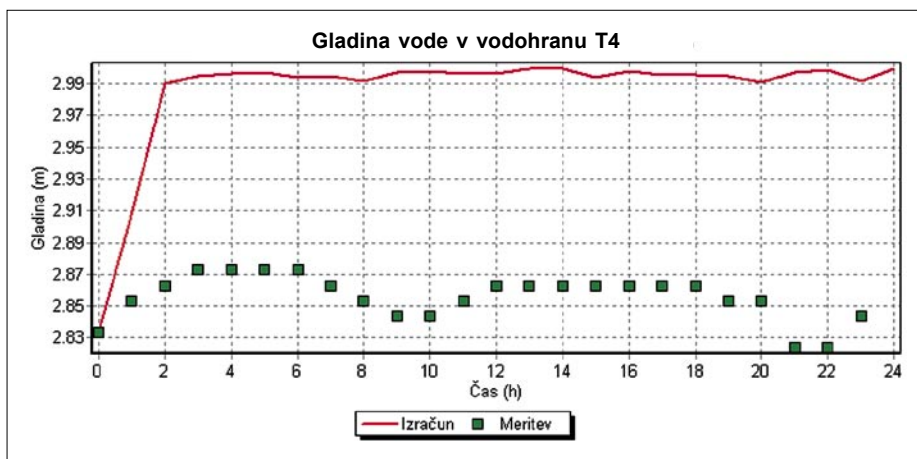
Datum meritve:		13. 6. 2006			Evidentirana povpr. poraba (l/s):		80,3	
(l/s)								
Ura	Zajetje Z1	Zajetje Z2	Črpališče Č1	Zajetje Z3	Vodohrani T1, T4 in T5	Vodohran T2 - bilanca	Bilanca visoke cone	Urni koeficient porabe
0:00	91,08	16,33	17,77	1,13	-4,14	-20,54	102,14	1,272
2:00	89,45	16,88	17,13	1,11	-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
<b>Povprečno</b>							<b>119,23</b>	

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

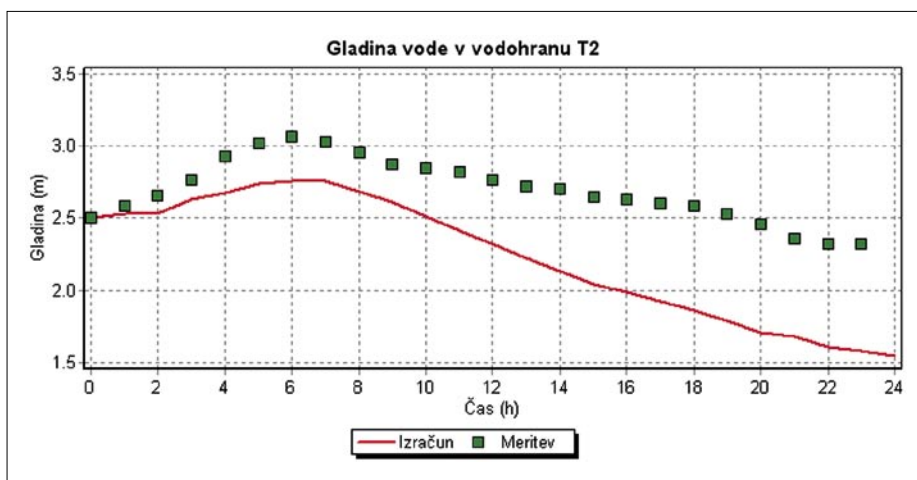




Slika 7 • Primerjava dotoka vode iz vodnega vira Z4 v vodohran T1 med dejanskimi meritvami in izračunanimi vrednostmi na neumerjenem modelu v postopku makrokalibracije



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.

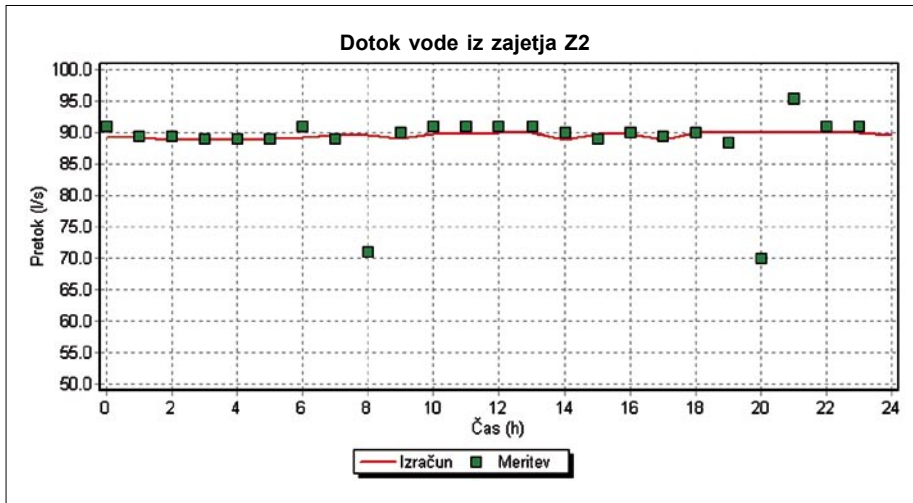
Uporabljen pristop je v tej fazi obdelave dovolj natančen, saj podatki o urnem dnevnem nihanju porabe vode za velike odjemalce niso bili na razpolago, kar pa je v tem primeru pomembno, saj večji del porabe predstavlja prav industrijsko-storitvena dejavnost (preglednica 2). Ta ugotovitev že zahteva zbiranje 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

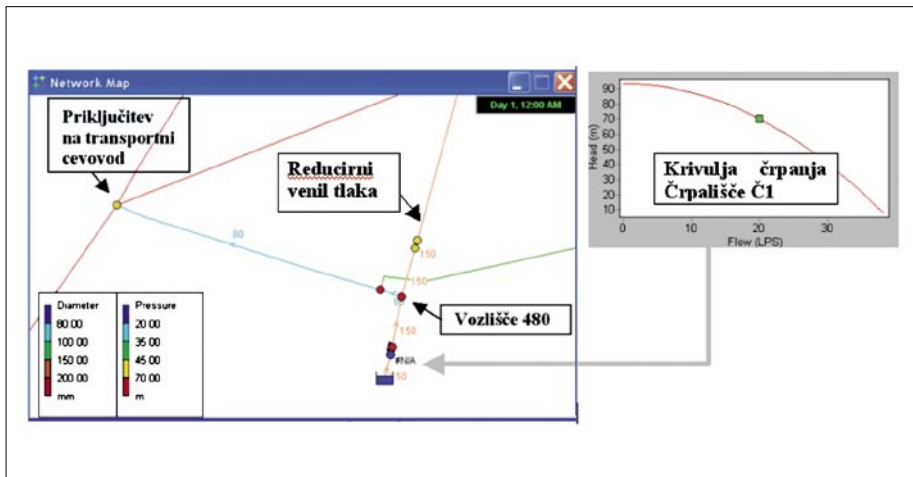
Pri ponovni računski kontroli sistema se je zopet ugotovilo, da v vodohran T1 kljub povečani porabi v sistemu iz visoke cone doteka občutno preveč vode, kar bi lahko bila posledica napačne določitve premerov cevi. Ker je za vtok iz visoke cone v vodohran T1 obstajala izvedena meritev pretokov, se je 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.

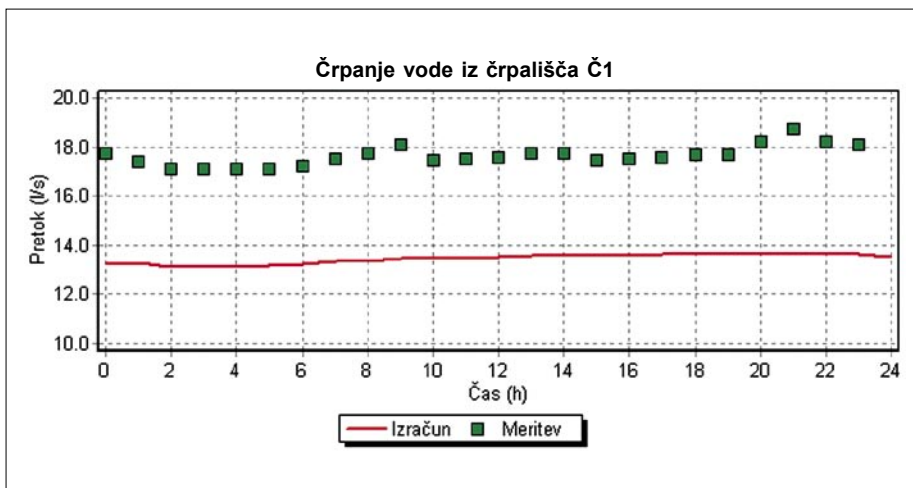
Izračuni so se z meritvami namreč veliko bolje uskladili, ko se je koeficient hrupavosti po ceveh v celotni dolžini od vira Z4 do vodohrana T1 iz začetnega ocenjenega  $n_e = 0,015$  zvišal na  $n_e = 0,020$ . Če so cevi v tem delu VS zelo stare, bi bila taka predpostavka lahko ustrezna, vendar tega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

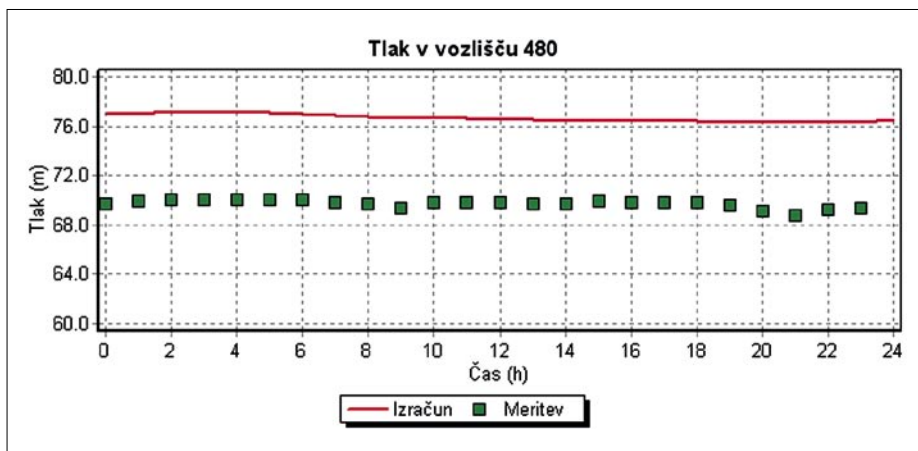
### 3.4 Črpalnica

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

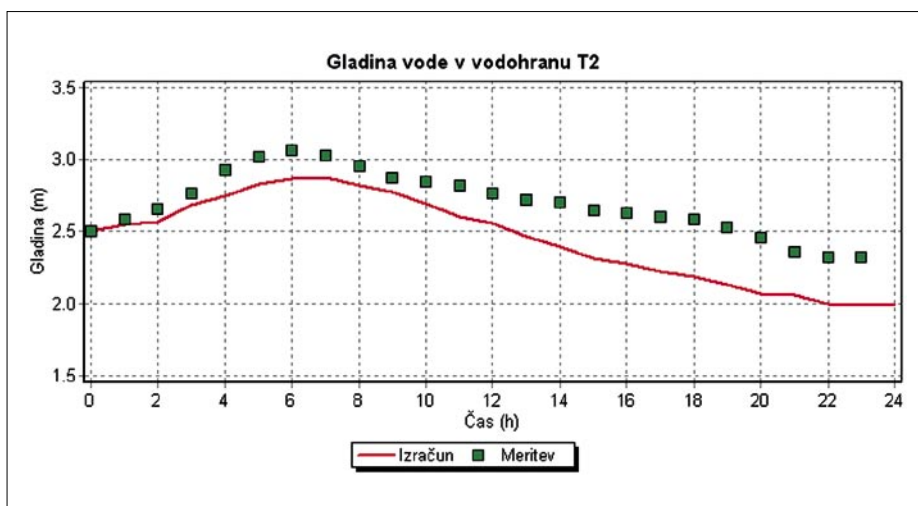
Glede na predpostavljeno črpalno krivuljo Q/H se iz črpalšča dobavlja premalo vode (slika 12). Hkrati so tlaki previsoki (slika 13), kar nakazuje, da se je treba po črpalni krivulji »premakniti«  
proti nižjim tlakom in višjim pretokom.

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.

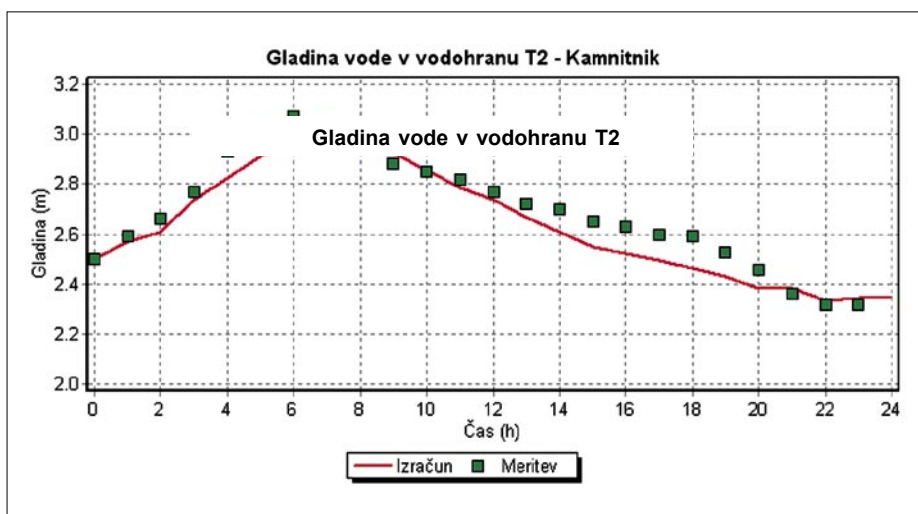
Ugotavlja se tudi, da reducirni ventil (oskrbovalni element) pri črpalšču Č1 ne služi



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 upravljavcem 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,

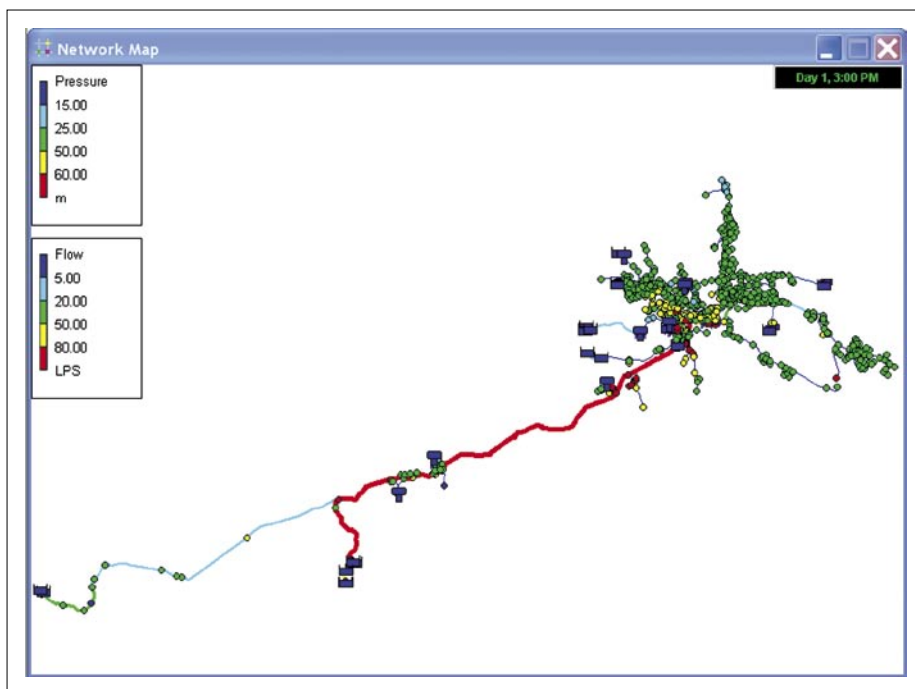
saj so bile kote vozlišč ocenjene in določene na podlagi kote terena, vendar natančnejše meritve niso bile na razpolago. Ob tem je treba tudi poudariti, da omenjena ocena kot vozlišč ne vpliva širše na hidravlične razmere v VS, ki jih določajo predhodno določeni atributi elementov VS (povezanost omrežja,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

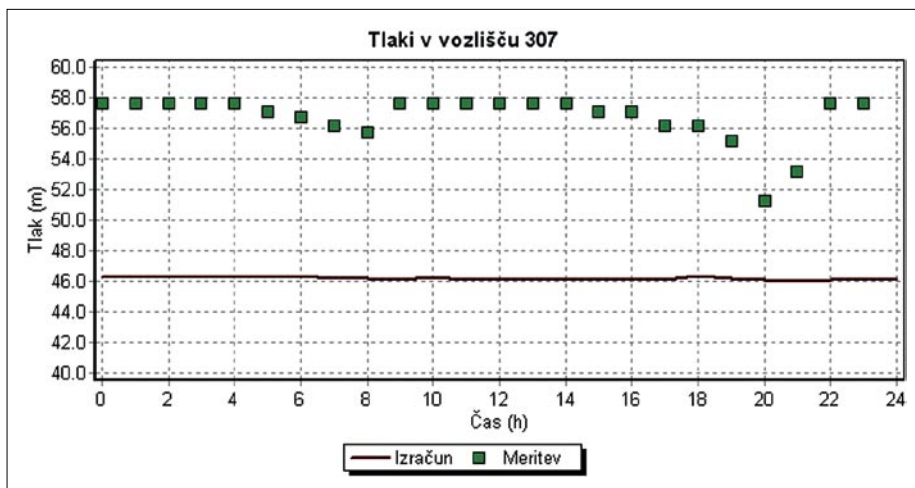
je vozlišč, dokler se ne preverijo in ustrezno obravnavajo že do sedaj ugotovljena odstopanja. Vseeno pa je zaradi obravnave in prikaza celotnega cikla postopka makrokalibracije zanimiv prikaz primerjave izračunanih tlakov z merjenimi v določenem vozlišču na cevovodu iz smeri zajetja Z2, preden se združi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

# ANALIZA DVOSLOJNIH LESENIH NOSILCEV Z UPOŠTEVANJEM ZDRSA IN RAZMIKA

## ANALYSIS OF TWO-LAYERED TIMBER BEAMS CONSIDERING INTERLAYER SLIP AND UPLIFT

Aleš Kroflič\*, univ. dipl. inž. grad.<sup>1</sup>  
izr. prof. dr. Igor Planinc, univ. dipl. inž. grad.<sup>1</sup>  
doc. dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.<sup>1,2</sup>

Znanstveni članek  
UDK: 624.011.1:624.072.2

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,  
Jamova 2, 1000 Ljubljana

<sup>2</sup> Gradbeni inštitut ZRMK, d. o. o., PE Maribor,  
Jezdarska ulica 3, 2000 Maribor

akroflic@fgg.uni-lj.si  
iplaninc@fgg.uni-lj.si  
bojan.cas@gi-zrmk.si

\* Za predstavljeno delo je prvi avtor prejel Prešernovo nagrado Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani decembra 2007.

**Povzetek** | V članku je predstavljen nov matematični model in pripadajoča analitična rešitev za analizo napetostnega in deformacijskega stanja dvoslojnih lesenih nosilcev z upoštevanjem zdrsa in razmika med slojema. S predstavljenimi analitičnimi rešitvijo je bila izdelana parametrična študija vpliva prečne togosti stika in debeline vmesnega sloja na togost dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca. Ugotovljeno je bilo, da ima prečna togost stika pomemben vpliv predvsem na normalno komponento vektorja napetosti na stiku med slojema ter na prerazporeditev upogibnih momentov in prečnih sil med slojema, medtem ko debelina vmesnega sloja nima bistvenega vpliva na togost obravnavanega dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca.

**Summary** | A mathematical model and its analytic solution for the analysis of stress-strain state of elastic two-layered beams is presented. The theory considers a possibility of slip and uplift at the interface. The developed analytical solution is used for studying the effect of the vertical stiffness and thickness of inner layer on the behaviour of two-layered timber beams. Parametric study has confirmed that vertical stiffness between the layers has substantial influence on the stress-strain state of the two-layer timber beams, while the thickness of inner layer can be neglected in practical analysis of serviceability limit states.

## 1 • UVOD

Sestavljeni oziroma slojeviti leseni nosilci, sovprežni nosilci iz betona in jekla, sovprežni nosilci iz betona in lesa in številni drugi sodijo med bolj inovativne konstrukcijske elemente. Umeščamo jih med tako imenovane kompozitne konstrukcije in jih v nadaljevanju imenujemo kompozitni nosilci. Njihova uporaba v gradbeništvu strmo narašča. Vzrokov za razširjenost uporabe je več. V osnovi lahko s kompozitnimi nosilci v večji meri izkoristimo ugodne lastnosti materialov posameznih sestavnih elementov. Do uporabe pogosto pripeljejo tehnološki postopki gradnje, kot sta na primer montažna in polmontažna gradnja. Uporabljamo jih pri sanacijah in ojačitvah obstoječih dotrajanih in funkcionalno zastarelih konstrukcij. Zelo uporabni so tudi v primeru premoščanja velikih razpetin, saj z njimi enostavneje zagotovimo potrebno statično višino.

Na obnašanje kompozitnih konstrukcij bistveno vpliva način povezave med sloji. Najpogostejše izvedemo povezavo med sloji z žebli, mozniki, svorniki in podobnimi veznimi sredstvi. Če je povezava slojev popolnoma toga, lahko za analizo kompozitnih konstrukcij uporabimo standardne matematične modele. Ker pa je večina povezav med sloji gradbenih kompozitnih konstrukcij podajnih in ker le-ta bistveno vpliva na njihovo togost, duktilnost in nosilnost, morajo matematični modeli za analizo kompozitnih konstrukcij upoštevati tudi podajnost stika. Ta med sloji kompozitnih konstrukcij povzroči nezveznosti komponent pomikov tako v vzdolžni kot tudi v prečni smeri. Ko se pojavijo nezveznosti pomikov v vzdolžni smeri, govorimo o zdrsu med slojema, ko pa se pojavijo nezveznosti pomikov v prečni smeri, pa govorimo o razmikanju slojev oziroma o vtiskanju slojev (v nadaljevanju razmikanje in vtiskanje slojev označimo s skupnim izrazom *razmik*).

Začetki matematičnega modeliranja kompozitnih konstrukcij (predvsem nosilcev) segajo v sredino prejšnjega stoletja (Newmark, 1951). Raziskovalci tega časa so skušali predvsem z relativno preprostimi matematičnimi modeli čim natančneje opisati vpliv delne povezanosti med slojema kompozitnega nosilca, ki so jo ugotovili z eksperimentalnim opazovanjem kompozitnih mostnih konstrukcij (Viest, 1960). V novejšem času so se z razvojem računalništva razvili številni numerični modeli za analizo vseh vrst kompozitnih nosilcev. Večina teh modelov je zasnovanih na metodi končnih elementov in t. i. linearni teoriji ravninskih nosilcev. Modeli pa so prirejani za analizo dvoslojnih kompozitnih nosilcev z upoštevanjem zgolj zamikov na stiku med slojema. Razlikujejo pa se predvsem glede na uporabljene materialne modele slojev in stika med slojema, ki so najpogosteje nelinearni ((Wheat, 1994), (Gattesco, 1999), (Čas, 2004), (Planinc, 2008)). Poleg omenjenih modelov pa v literaturi zasledimo tudi modele, ki so zasnovani na t. i. geometrijsko nelinearni teoriji ravninskih nosilcev. S temi modeli raziskovalci analizirajo predvsem vpliv zdrsa na uklonsko nosilnost dvoslojnih kompozitnih stebrov ((Rassam, 1970), (Girhammar, 2007), (Čas, 2007), (Kryżanowski, 2009)). Adekola je najverjetneje prvi raziskoval vpliv zdrsa in razmika na obnašanje kompozitnih nosilcev (Adekola, 1968). Izpeljal je matematični model za analizo sovprežnega prostoležečega nosilca iz jekla in betona z upoštevanjem zamikov in razmikov. Dobljeni sistem navadnih diferencialnih enačb je rešil z diferenčno metodo. V nadaljevanju sta analitično rešitev za delno modificiran Adekolov sistem diferencialnih enačb v obliki eksplicitnih izrazov predstavila Robinson in Naraiane (Robinson, 1988). Poleg analitičnih rešitev najdemo v zadnjem času v literaturi tudi numerične modele za analizo dvoslojnih

kompozitnih nosilcev z upoštevanjem zamikov in razmikov. Za zdaj pa so ti modeli prirejani zgolj za geometrijsko in materialno linearno analizo dvoslojnih kompozitnih nosilcev ((Gara, 2006), (Ranzi, 2006)).

V članku predstavimo nov matematični model in pripadajočo analitično rešitev za določitev napetostnega in deformacijskega stanja dvoslojnih lesenih linijskih konstrukcij z upoštevanjem zdrsa in razmika med slojema. Čeprav prikažemo izpeljavo matematičnega modela za dvoslojne lesene nosilce, je izpeljava praktično enaka za vse elastične dvoslojne kompozitne nosilce. Pri izpeljavi matematičnega modela bomo upoštevali linearno teorijo ravninskih nosilcev in elastično obnašanje obeh slojev kompozitnega nosilca ter stika med slojema. Predpostavili pa bomo, da se interakcija med slojema vzpostavi preko vmesnega sloja, katerega debelina je odvisna od mehanskih lastnosti lesa in veznih sredstev. Tako v model vpeljemo posplošene zamike in razmike med slojema, kar predstavlja posplošitev dosedanjih, v literaturi znanih materialnih modelov stika med sloji (Čas, 2004). Poleg novega matematičnega modela bomo v članku predstavili tudi pripadajočo analitično rešitev. Ta omogoča točno analizo tudi statično nedoločenih dvoslojnih lesenih linijskih konstrukcij z upoštevanjem zamika in razmika med slojema, kot so to na primer dvoslojni leseni kontinuirni nosilci. Taka razširjena analitična rešitev dvoslojnih lesenih nosilcev predstavlja pomembno razširitev v literaturi poznanih analitičnih rešitev, ki so omejene zgolj na prostoležeče dvoslojne elastične nosilce ((Adekola, 1968), (Robinson, 1988)). Članek ima poleg uvoda še tri poglavja. V drugem poglavju predstavimo nov matematični model za analizo dvoslojnih lesenih nosilcev z upoštevanjem zamikov in razmikov med slojema in analitično rešitev pripadajočega sistema navadnih diferencialnih enačb. Vpliv prečne togosti stika in debeline vmesnega sloja na togost dvoslojnih lesenih nosilcev prikažemo v tretjem poglavju. Na koncu podamo zaključke.

ter pomen osnovnih kinematičnih količin prikazujemo na sliki 2.

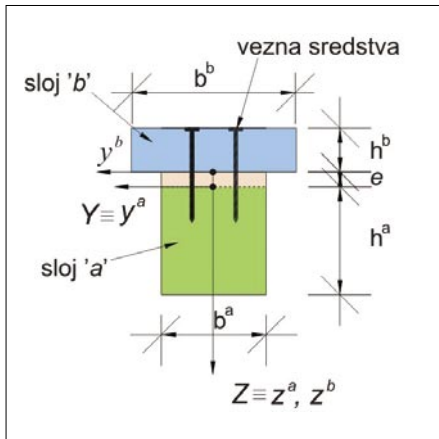
Dodatno pri izpeljavi osnovnih in veznih enačb matematičnega modela dvoslojnega lesenega nosilca upoštevamo geometrijsko in materialno linearno teorijo ravninskih nosilcev. Skladno s tem privzamemo za vsak sloj posebej znano Bernoullijevo predpostavko o ravnih prečnih prerezhih ter predpostavko, da se velikost in

## 2 • MATEMATIČNI MODEL DVOSLOJNEGA LESENEGA NOSILCA

### 2.1 Osnovne predpostavke

Opazujemo raven dvoslojen leseni nosilec z dolžino  $L$  in s konstantnim prečnim prerezom (slika 1). Deformiranje nosilca opazujemo v ravnini  $(X, Z)$  evklidskega prostora

z desnosučnim Kartezijevim prostorskim koordinatnim sistemom  $(X, Y, Z)$ . Materialna koordinatna sistema sloja 'a' označimo z  $x^a, y^a, z^a$ , sloja 'b' pa z  $x^b, y^b, z^b$ . Lego prostorskega ter materialnih koordinatnih sistemov

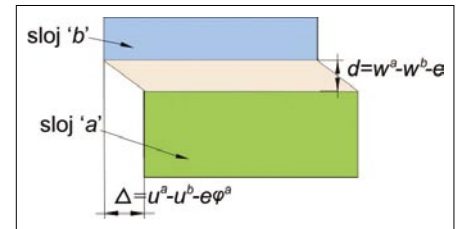


Slika 1 • Značilni prečni prerez dvoslojnega lesenega nosilca

veznih sredstev v sloja ali pa prečno vtiščanje med slojema, potem pripišemo zdrsa in razmik tankemu vmesnemu sloju z debelino  $e \neq 0$ . Glede na povedano, definiramo zdrsa in razmik kot »povprečen zdrsa« in »povprečen razmik« tankega vmesnega sloja (Čas, 2004). Taka definicija zdrsa in razmika je splošnejša, kot jo zasledimo v literaturi ((Adekola, 1968), (Robinson, 1988), (Gara, 2006), (Ranzi, 2006)). Geometrijski pomen zdrsa,  $\Delta$ , in razmika,  $d$ , med slojema dvoslojnega lesenega nosilca prikazujemo na sliki 3.

**2.2 Osnovne in vezne enačbe**

Osnovne enačbe dvoslojnega lesenega nosilca sestavljajo kinematične, ravnotežne



Slika 3 • Geometrijski pomen zdrsa,  $\Delta$ , in razmika,  $d$ , med slojema

$$w^{b'} + \varphi^b = 0, \tag{5}$$

$$\varphi^{b'} - \kappa^b = 0, \tag{6}$$

ravnotežne enačbe:

$$N^{a'} + \mathcal{P}_x^a = 0, \tag{7}$$

$$Q^{a'} + \mathcal{P}_z^a = 0, \tag{8}$$

$$M^{a'} - Q^a + M_y^a = 0, \tag{9}$$

$$N^{b'} + \mathcal{P}_x^b = 0, \tag{10}$$

$$Q^{b'} + \mathcal{P}_z^b = 0, \tag{11}$$

$$M^{b'} - Q^b + M_y^b = 0, \tag{12}$$

konstitucijske enačbe:

$$N^a = C_{11}^a \varepsilon^a + C_{12}^a \kappa^a, \tag{13}$$

$$M^a = C_{21}^a \varepsilon^a + C_{22}^a \kappa^a, \tag{14}$$

$$N^b = C_{11}^b \varepsilon^b + C_{12}^b \kappa^b, \tag{15}$$

$$M^b = C_{21}^b \varepsilon^b + C_{22}^b \kappa^b, \tag{16}$$

vezne enačbe:

$$x^b + u^b = x^{a^*} + u^a - e\varphi^a, \tag{17}$$

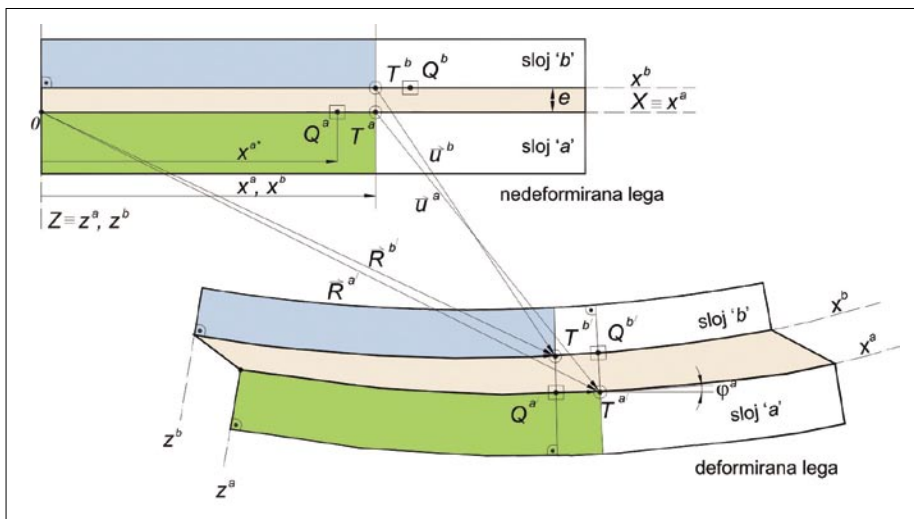
$$d = w^a - w^b - e, \tag{18}$$

$$\Delta = u^a - u^b - e\varphi^a, \tag{19}$$

$$p_t = K \Delta, \tag{20}$$

$$p_n = C d. \tag{21}$$

Pomen količin v enačbah (1)–(21) je dobro znan. Tako  $u^a, u^b, w^a, w^b$  predstavljajo komponente pomikov referenčnih osi sloja 'a' in sloja 'b' dvoslojnega lesenega nosilca v vzdolžni in



Slika 2 • Nedeformirana in deformirana lega matematičnega modela dvoslojnega lesenega nosilca ter geometrijski pomen osnovnih kinematičnih količin

oblika prečnih prerezov med deformiranjem ne spreminjata. Pri tem zaradi delovanja zunanje obtežbe med slojema dopuščamo tako možnost zamika kot tudi razmika med slojema. Interakcija med slojema 'a' in 'b' dvoslojnega lesenega nosilca pa se vzpostavi preko vmesnega sloja z začetno debelino  $e$ . Debelina vmesnega sloja je odvisna od dejanskega razmika med slojema in tudi od materialnih lastnosti obeh slojev nosilca in od obdelave stika ter povezave med slojema – vezni sredstev. Ko debelino določajo materialne lastnosti slojev in veznih sredstev, jo določimo na podlagi eksperimentov. V splošnem pa za kompozitne nosilce velja: ko sta sloja nosilca mnogo bolj toga kot vezna sredstva ali pa sloja med seboj sploh nista povezana z veznimi sredstvi, potem običajno privzamemo  $e \approx 0$ . Če pa so materialne lastnosti enega ali obeh slojev takšne, da dopuščajo delno vzdolžno vtiščanje

in konstitucijske enačbe s pripadajočimi robnimi pogoji za vsakega izmed slojev. Poleg osnovnih enačb so za določitev napetostnega in deformacijskega stanja kompozitnih konstrukcij izjemnega pomena tudi vezne enačbe, s katerimi povežemo posamezne sloje kompozitne konstrukcije v enovito celoto. Podrobna izpeljava osnovnih in veznih enačb dvoslojnega lesenega nosilca je predstavljena v Krofličevi raziskovalni nalogi (Kroflič, 2007), zato v članku enačbe le povzamemo:

kinematične enačbe:

$$u^{a'} - \varepsilon^a = 0, \tag{1}$$

$$w^{a'} + \varphi^a = 0, \tag{2}$$

$$\varphi^{a'} - \kappa^a = 0, \tag{3}$$

$$u^{b'} - \varepsilon^b = 0, \tag{4}$$



prečni smeri ter  $\varphi^a$  in  $\varphi^b$  zasuka referenčnih osi, statične količine  $N^a, N^b, Q^a, Q^b, M^a, M^b$  predstavljajo osne in prečne sile ter upogibna momenta vsakega sloja nosilca posebej,  $\varepsilon^a, \varepsilon^b, \kappa^a, \kappa^b$  pa predstavljajo specifične spremembe dolžin referenčne osi spodnjega in zgornjega sloja dvoslojnega lesenega nosilca ter pripadajoče ukrivljenosti. Linijsko obtežba dvoslojnega lesenega nosilca  $\mathcal{P}_x^a, \mathcal{P}_x^b, \mathcal{P}_z^a, \mathcal{P}_z^b, \mathcal{M}_y^a, \mathcal{M}_y^b$  sestavlja zunanja obtežba  $p_x^a, p_x^b, p_z^a, p_z^b$  in  $m_y^a$  ter komponenti kontaktne linijske obtežbe med slojema v vzdolžni smeri  $p_t$  in v prečni smeri  $p_n$ :

$$\mathcal{P}_x^a = p_x^a - p_t, \quad (22)$$

$$\mathcal{P}_z^a = p_z^a - p_n, \quad (23)$$

$$\mathcal{P}_x^b = p_x^b + p_t, \quad (24)$$

$$\mathcal{P}_z^b = p_z^b + p_n, \quad (25)$$

$$\mathcal{M}_y^a = m_y^a, \quad (26)$$

$$\mathcal{M}_y^b = m_y^b. \quad (27)$$

Konstante  $C_{11}^a, C_{12}^a, C_{22}^a, C_{11}^b, C_{12}^b, C_{22}^b$  v konstitucijskih enačbah (13)–(16) predstavljajo koeficiente materialne matrike prečnega prereza vsakega sloja dvoslojnega lesenega nosilca in so določene z enačbami:

$$C_{11}^a = \int_{A^a} E^a dA^a = E^a A^a, \quad (28)$$

$$C_{12}^a = C_{21}^a = \int_{A^a} z E^a dA^a = E^a S^a, \quad (29)$$

$$C_{22}^a = \int_{A^a} z^2 E^a dA^a = E^a I^a, \quad (30)$$

$$C_{11}^b = \int_{A^b} E^b dA^b = E^b A^b, \quad (31)$$

$$C_{12}^b = C_{21}^b = \int_{A^b} z E^b dA^b = E^b S^b, \quad (32)$$

$$C_{22}^b = \int_{A^b} z^2 E^b dA^b = E^b I^b, \quad (33)$$

kjer so  $A^a, A^b, S^a, S^b, I^a$  in  $I^b$  geometrijske karakteristike spodnjega oziroma zgornjega sloja dvoslojnega lesenega nosilca,  $E^a$  in  $E^b$  pa sta pripadajoča elastična modula. Materialni

konstanti v veznih enačbah (20) in (21) sta vzdolžna ali strižna togost stika  $K$  in prečna togost stika  $C$ . Geometrijski pomen količine  $x^a$  pa je prikazan na sliki 2.

Pri reševanju enačb (1)–(21) je treba upoštevati še pripadajoče statične in kinematične robne pogoje (Kroflič, 2007). Sistem enačb (1)–(21) sestavlja 21 navadnih diferencialnih in algebrskih enačb za prav toliko neznanih funkcij:  $u^a, w^a, \varphi^a, u^b, w^b, \varphi^b, N^a, Q^a, M^a, \varepsilon^a, \kappa^a, N^b, Q^b, M^b, \varepsilon^b, \kappa^b, \Delta, d, x^a, p_t$  in  $p_n$ .

### 2.3 Analitično reševanje

Kot smo prikazali v prejšnjem poglavju, sestavlja osnovne in vezne enačbe matematičnega modela dvoslojnega lesenega nosilca 21 linearnih algebrskih in navadnih diferencialnih enačb s konstantnimi koeficienti za prav toliko neznanek. Znano je, da za take sisteme diferencialnih enačb obstajajo analitične rešitve (Deo, 1994). Splošni sistem enačb (1)–(21) najlažje rešimo, če ga pretvorimo v linearno diferencialno enačbo sedmega reda s konstantnimi koeficienti za zamik na stiku

$$\Delta^{(VII)} - k_1 \Delta^{(V)} - k_5 \Delta''' + (k_5 k_1 - k_2 k_4) \Delta' + k_5 k_3 - k_2 k_6 = 0, \quad (34)$$

kjer so konstante  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  odvisne od materialnih in geometrijskih lastnosti obeh slojev obravnavanega nosilca. Ker je rešitev navadne diferencialne enačbe s konstantnimi koeficienti odvisna od ničel pripadajočega karakterističnega polinoma

$$y^7 - k_1 y^5 - k_5 y^3 + (k_5 k_1 - k_2 k_4) y' + k_5 k_3 - k_2 k_6 = 0, \quad (35)$$

smo s parametrično analizo v računalniškem okolju Mathematica ugotovili, da ima karakteristični polinom (35) za inženirsko zanimive parametre  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$  tri realne in dve konjugirano kompleksni ničli. Karakteristični polinom (35) lahko tako zapišemo v obliki

$$(y - r_1)(y - r_2)(y - r_3)(y - c_1)(y - \bar{c}_1)(y - c_2)(y - \bar{c}_2) = 0, \quad (36)$$

kjer so  $r_1, r_2, r_3$  realne ničle,  $c_1 = \alpha_1 + \alpha_2 i$ ,  $\bar{c}_1 = \alpha_1 - \alpha_2 i$ ,  $c_2 = \beta_1 + \beta_2 i$ ,  $\bar{c}_2 = \beta_1 - \beta_2 i$ , pa konjugirano kompleksni ničli karakterističnega polinoma (35). S pomočjo ničel karakterističnega polinoma je splošna rešitev diferencialne enačbe (34) (Deo, 1994)

$$\Delta(x) = C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x} + C_3 e^{r_3 x} + e^{\alpha_1 x} (C_4 \cos \alpha_2 x + C_5 \sin \alpha_2 x) + e^{\beta_1 x} (C_6 \cos \beta_2 x + C_7 \sin \beta_2 x). \quad (37)$$

Neznane konstante  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$  v enačbi (37) določimo s pomočjo robnih pogojev, ki so vrednosti zdrsa in prvih dveh odvodov zdrsa ter vrednosti razmika in prvih treh odvodov razmika na začetku dvoslojnega lesenega nosilca. Ko poznamo zdrs na stiku med slojema, določimo razmik med slojema z enačbo

$$d(x) = \frac{1}{k_2} (\Delta'''(x) - k_1 \Delta'(x) - k_3). \quad (38)$$

Ostale kinematične, statične in deformacijske količine dvoslojnega lesenega nosilca pa določimo z integracijo osnovnih enačb (1)–(12) oziroma z rešitvijo enačb (13)–(16), pripadajoče integracijske konstante pa s pomočjo statičnih in kinematičnih robnih pogojev. Tak način reševanja osnovnih in veznih enačb nam omogoča tudi relativno preprosto reševanje statično nedoločenih dvoslojnih linijskih konstrukcij, kot so to na primer dvoslojni kontinuirni leseni nosilci. Za take konstrukcije tvorimo podobno kot pri metodi končnih elementov enačbo konstrukcije

$$\mathbf{K}_T \mathbf{u} = \mathbf{g}, \quad (39)$$

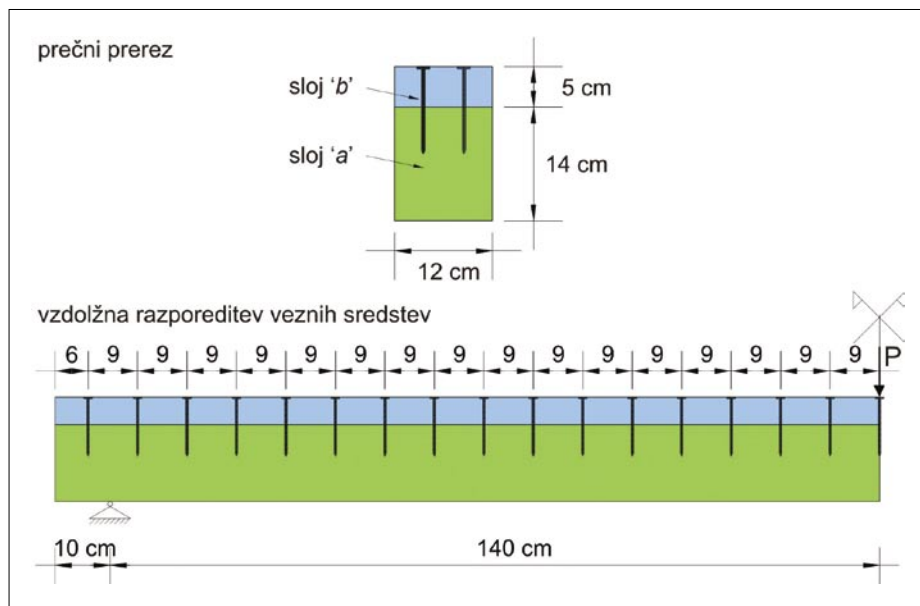
kjer  $\mathbf{K}_T$  predstavlja posplošeno tangentno togostno matriko konstrukcije,  $\mathbf{u}$  vektor vzdolžnih in robnih vrednosti, stolpec  $\mathbf{g}$  pa predstavlja vektor desnih strani. Rešitve linearnega sistema enačb (39) določajo napetostno in deformacijsko stanje poljubne dvoslojne lesene linijske konstrukcije.

deformacijsko stanje prostoležečega dvoslojnega lesenega nosilca z dolžino  $L = 280$  cm. Obravnavani nosilec je v svoji diplomski nalogi detajlno eksperimentalno in numerično analiziral Čas (Čas, 1999).

## 3 • PARAMETRIČNA ANALIZA

V tem poglavju s prikazanim analitičnim modelom dvoslojnega lesenega nosilca de-

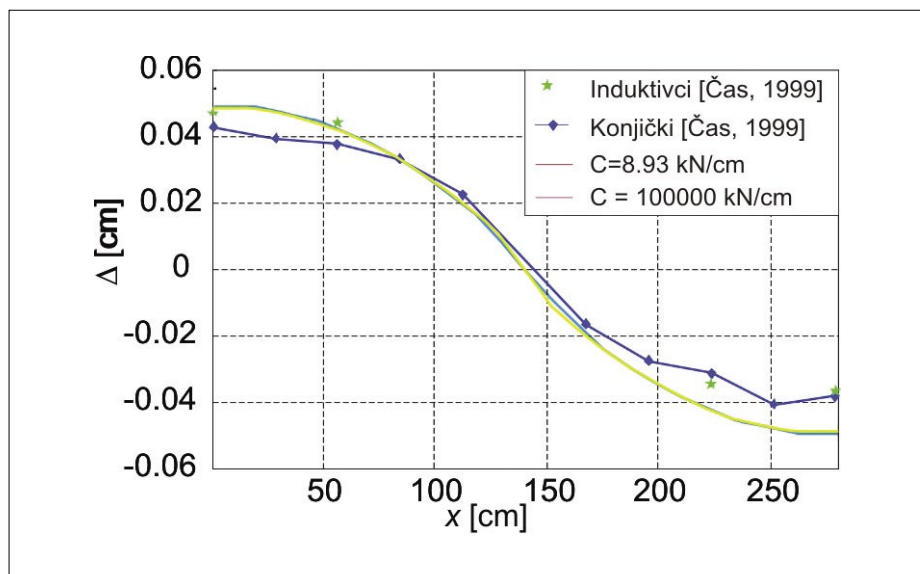
tajno analiziramo vpliva prečne togosti stika in debeline vmesnega sloja na napetostno in



Slika 4 • Geometrijski podatki dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca in razporeditev veznih sredstev (Čas, 1999)

Geometrijske podatke obravnavanega nosilca ter razporeditev veznih sredstev prikazujemo na sliki 4. Za vezna sredstva, ki povezujejo zgornji in spodnji sloj nosilca, so bili izbrani žebli  $d/l = 4,0/100$  mm. Razporejeni so bili v dveh vzporednih vrstah simetrično glede na

ravnino deformiranja nosilca. V analizi smo previsna dela nosilca v dolžini 10 cm zanemarili (slika 4). Skladno s prikazanim matematičnim modelom dvoslojnega lesenega nosilca smo mehanske lastnosti žebeljev enakomerno »razmazali« po celotnem vmesnem sloju.



Slika 5 • Primerjava med analitičnimi in izmerjenimi zamiki na stiku dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca

Prečna togost	Značilne vrednosti (kN/CM)				
$C$	$\infty$	100000	8,93 (eksperiment)	1	0,1

Preglednica 1 • Značilne vrednosti prečne togosti stika

Obtežbo obravnavanega nosilca sestavljata lastna teža in navpična točkovna sila na sredini razpona zgornjega sloja.

Meritve so bile izvedene za tri različne obtežne nivoje (Čas, 1999):

- karakteristično obtežbo ( $P = 7,624$  kN),
- projektno obtežbo ( $P = 11,055$  kN) in
- porušno obtežbo ( $P = 16,123$  kN).

Ker je predstavljeni matematični model za analizo dvoslojnih lesenih nosilcev zasnovan na elastičnem modelu za les, prikazujemo parametrično študijo samo za najnižji nivo obtežbe, tj. pri sili  $P = 7,624$  kN, ko se nosilec še obnaša elastično. Skladno s tem smo elastični modul lesa določili z linearizacijo eksperimentalno določenega nelinearnega materialnega modela okoli nedeformirane lege. Hkrati pa predpostavimo tako v tlaku kot v nategu tlačni elastični modul, ki je  $E = 1500$  kN/cm<sup>2</sup>.

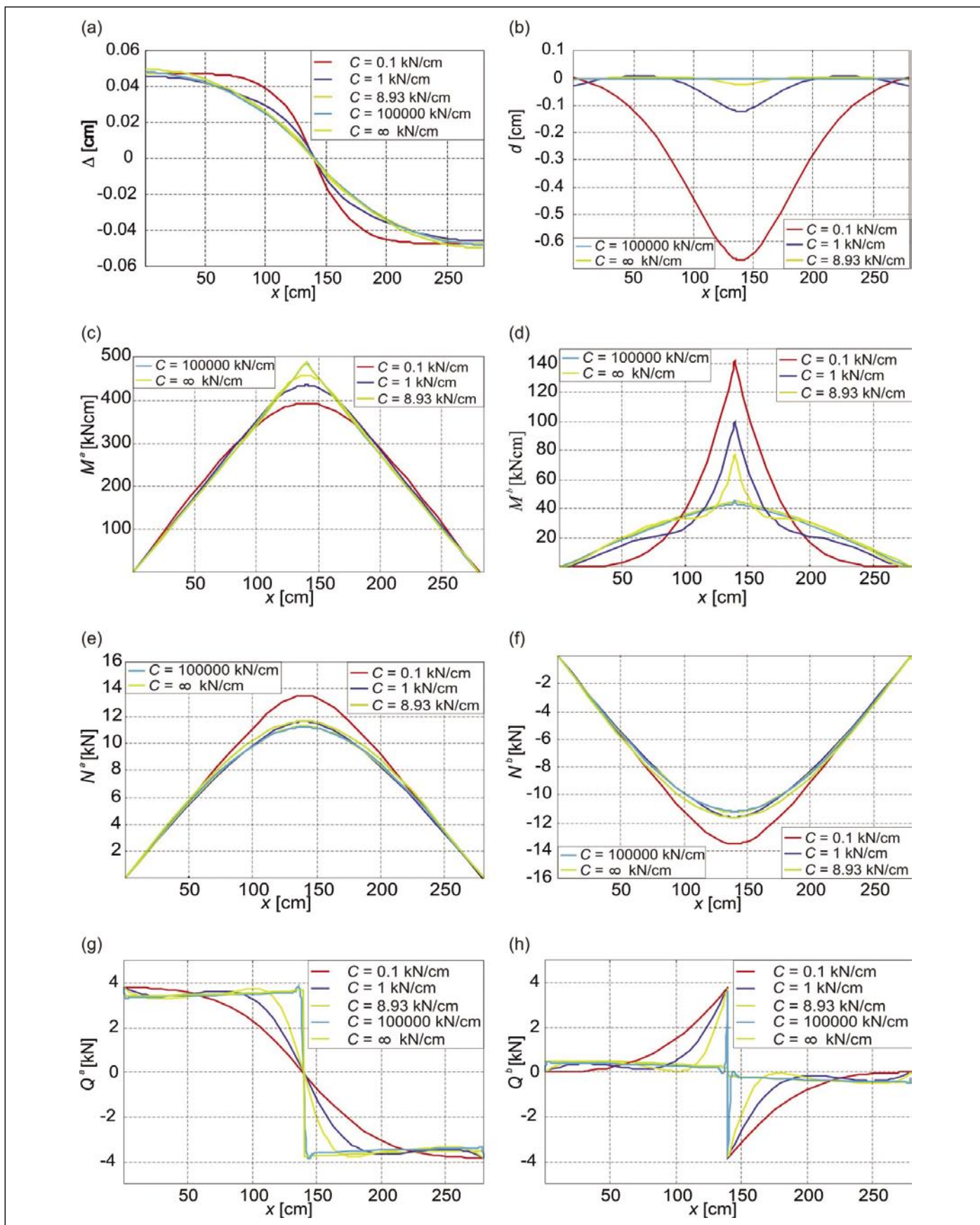
Podobno določimo tudi materialne lastnosti stika med slojema. Tako z linearizacijo eksperimentalno določenega nelinearnega modela stika določimo strižno in prečno togost stika, ki sta:  $K = 2,448$  kN/cm in  $C = 8,93$  kN/cm (na izvlek) oziroma  $C = 100000$  kN/cm (na vtisk). Opozorimo pa, da je prečna togost stika na vtisk odvisna od mehanskih lastnosti žebeljev in obeh slojev obravnavanega lesenega nosilca.

Na sliki 5 prikazujemo primerjavo izmerjenih (induktivni merilci pomikov – induktivci in merilci pomikov – konjički) in analitičnih zamikov na stiku med slojema obravnavanega nosilca. Dobro ujemanje zamikov dokazuje ustreznost predstavljenega elastičnega matematičnega modela za analizo togosti dvoslojnih lesenih nosilcev. V nadaljevanju detajlneje prikažemo vpliva prečne togosti stika in debeline vmesnega sloja na velikosti kinematičnih in statičnih količin dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca.

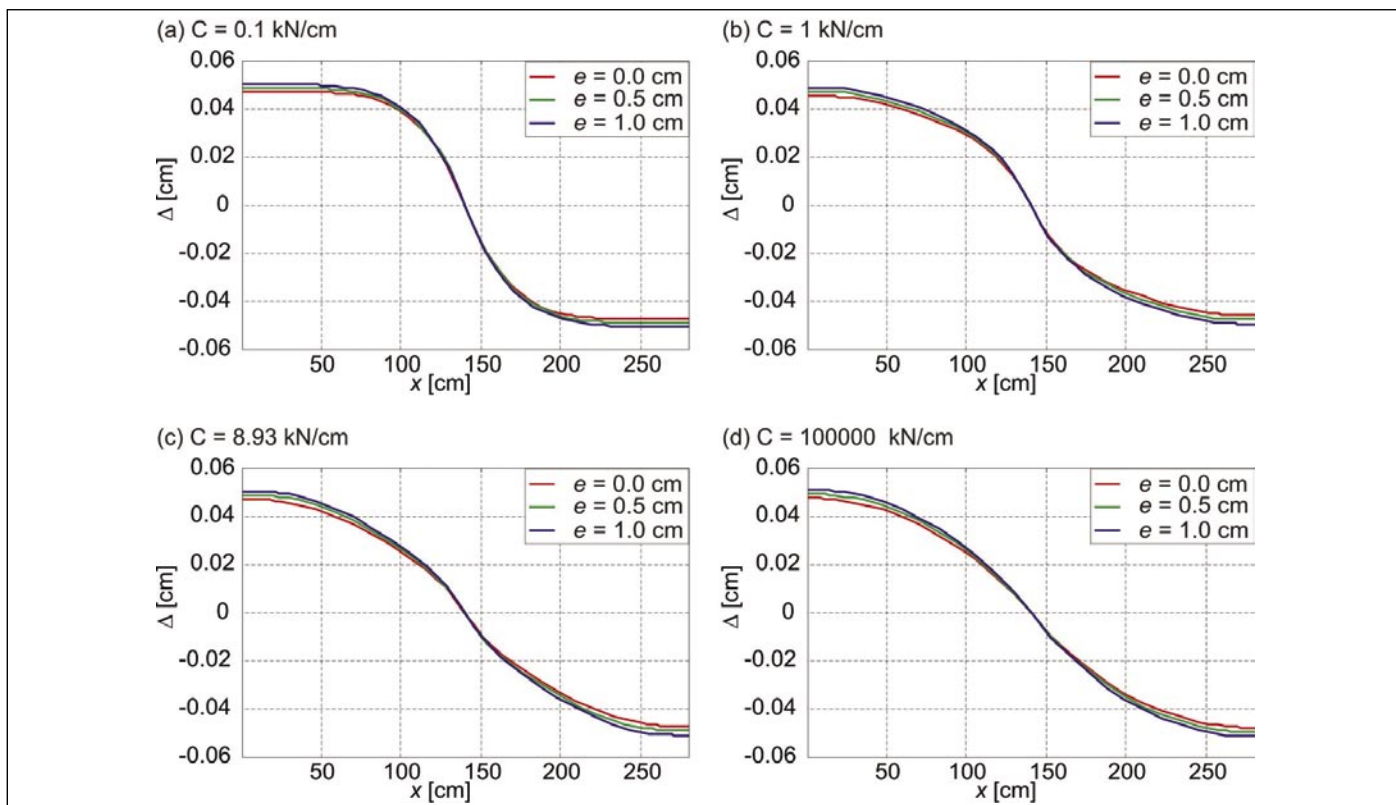
### 3.1 Vpliv prečne togosti stika med slojema

V prvem koraku analiziramo vpliv prečne togosti stika na statične in kinematične količine obravnavanega dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca. Značilne prečne togosti stika so prikazane v preglednici 1. Izbrane so tako, da se prečna povezava med slojema nosilca spreminja od praktično toge povezave pa do zelo podajne. V vseh prikazanih študijah smo za debelino vmesnega sloja izbrali  $e = 0$  cm.

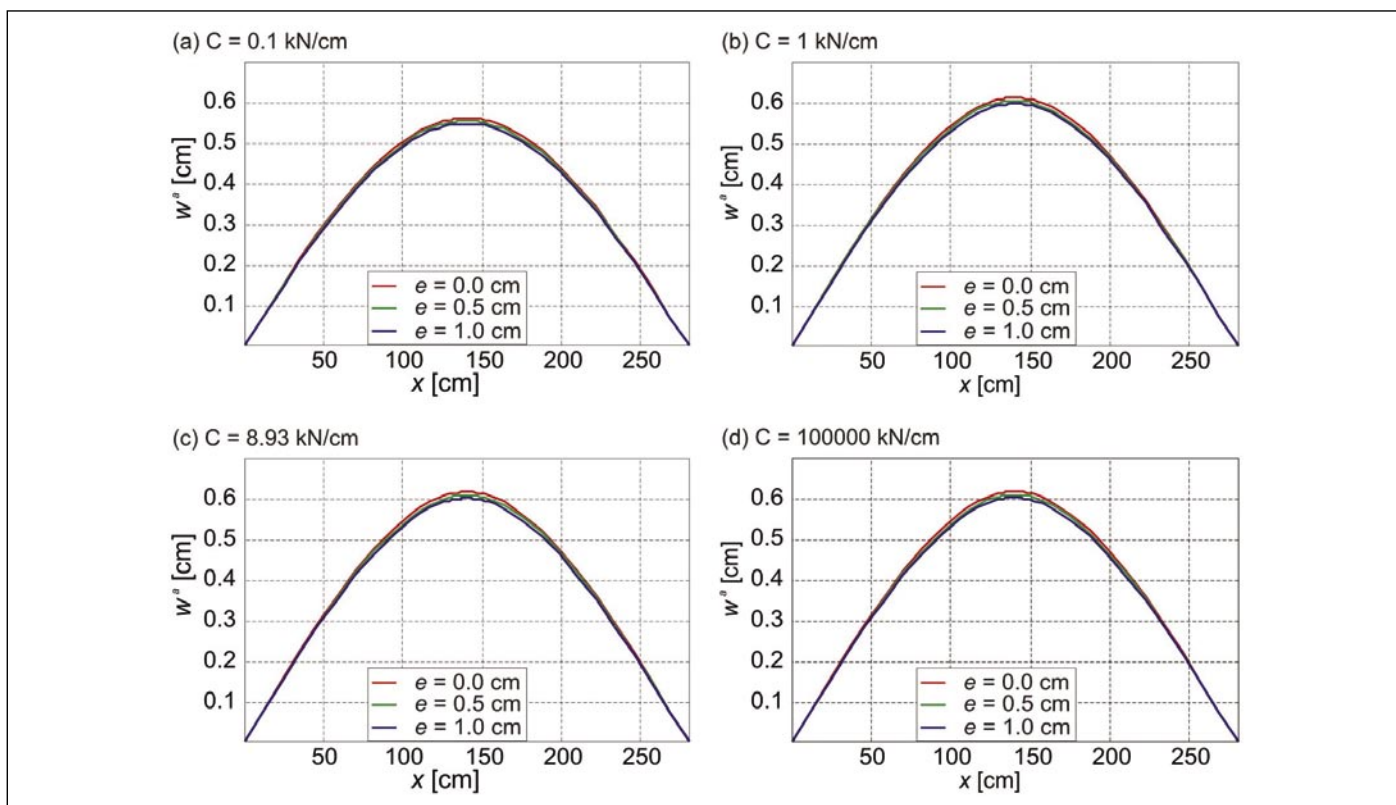
Na sliki 6a prikazujemo spreminjanje zamika na stiku med slojema obravnavanega nosilca v odvisnosti od prečne togosti stika. Kot vidimo, je vpliv prečne togosti stika na zamike



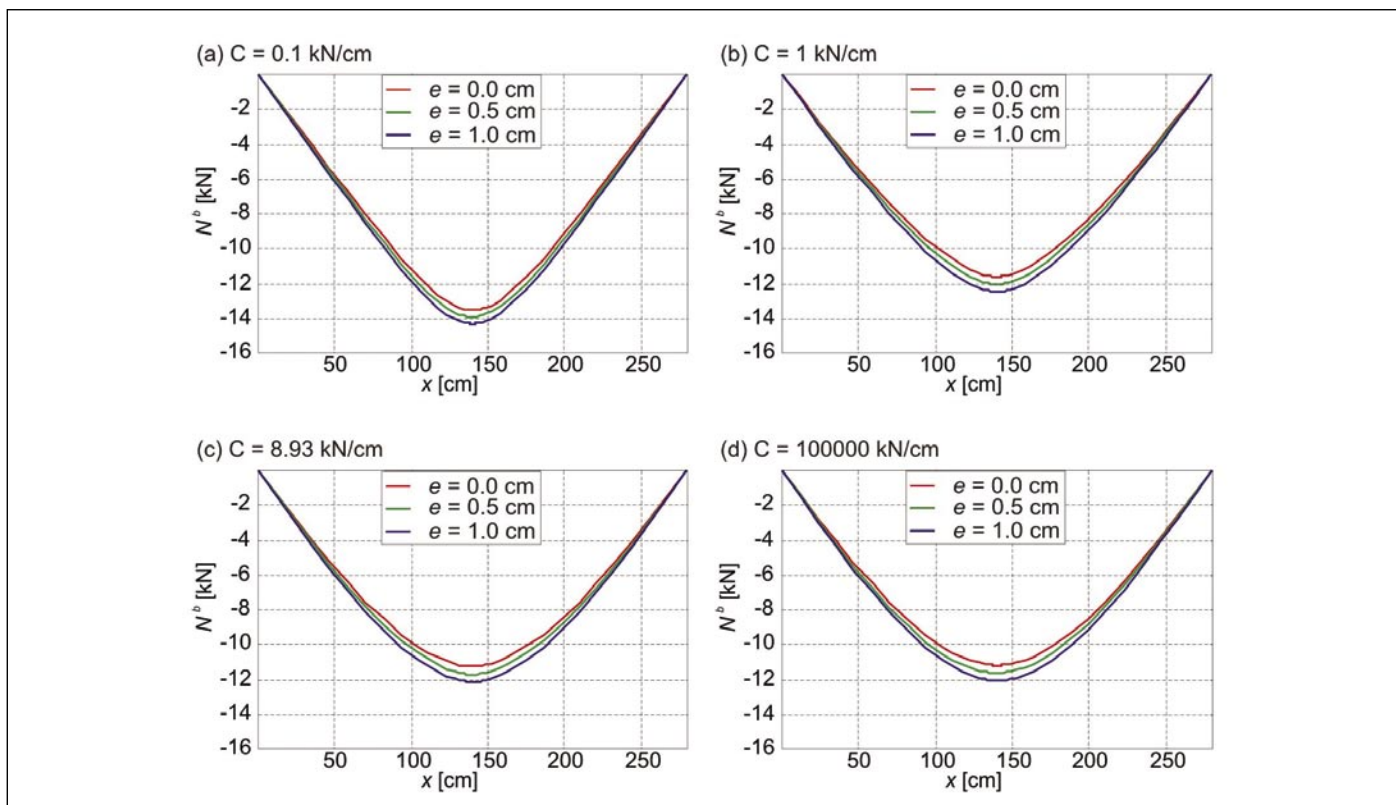
Slika 6 • Vpliv prečne togosti stika na velikosti kinematičnih in statičnih količin dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca



Slika 7 • Spreminjanje zamika med slojema dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca v odvisnosti od debeline vmesnega sloja za značilne prečne togosti stika med slojema ( $K = 2,488$  kN/cm,  $E^a = E^b = 1500$  kN/cm<sup>2</sup>,  $P = 7,624$  kN)



Slika 8 • Spreminjanje navpičnega pomika spodnjega nosilca v odvisnosti od debeline vmesnega sloja za značilne prečne togosti stika med slojema ( $K = 2,488$  kN/cm,  $E^a = E^b = 1500$  kN/cm<sup>2</sup>,  $P = 7,624$  kN)



Slika 9 • Spreminjanje osne sile zgornjega nosilca v odvisnosti od debeline vmesnega sloja za značilne prečne togosti stika med slojema ( $K = 2,488 \text{ kN/cm}$ ,  $E^a = E^b = 1500 \text{ kN/cm}^2$ ,  $P = 7,624 \text{ kN}$ )

ob robovih nosilca minimalen, nekoliko večji pa je v polju. Se pa zamik z zmanjševanjem prečne togosti stika povečuje proti sredini nosilca. Slika 6b prikazuje spreminjanje razmika v odvisnosti od prečne togosti stika. Jasno je vidno, da se zgornji sloj vtisne v spodnjega in manjša kot je prečna togost stika, bolj se vtisne. To je tudi pričakovano, saj je s točkovno silo obtežen zgornji sloj obravnavanega nosilca, in je togost zgornjega sloja manjša od togosti spodnjega. Zanimivo pa je, da izmerjena prečna togost stika (število veznih sredstev) predstavlja zelo togo prečno povezavo med slojema. Največji vtisk med slojema se po pričakovanjih pojavi na mestu delovanja točkovne sile. Spreminjanje upogibnih momentov spodnjega in zgornjega sloja obravnavanega nosilca v odvisnosti od prečne togosti stika prikazujemo na slikah 6c in 6d. Pri spodnjem sloju se največja vrednost upogibnega momenta z zmanjševanjem prečne togosti stika manjša. Hkrati pa se značilna trikotna oblika grafov upogibnih momentov spremeni v parabolčno. Posledično se s povečevanjem prečne togosti stika upogibna obremenitev zgornjega sloja manjša. Ob tem pa se z zmanjševanjem prečne togosti stika obremenitev zgornjega sloja povečuje na mestu delovanja točkovne sile, proti robovom

pa manjša. Prav tako je na sliki 6d jasno vidna sprememba oblike grafa upogibnega momenta. S slik 6e in 6f vidimo, da prečna togost stika nima bistvenega vpliva na velikost osnih sil tako v zgornjem kot tudi v spodnjem sloju obravnavanega nosilca. Na koncu na slikah 6g in 6h prikazujemo vpliv prečne togosti stika na velikost prečnih sil v obeh slojih obravnavanega nosilca. Podobno kot pri upogibnih momentih se tudi diagrami prečnih sil zaradi prečne togosti stika spremenijo od značilne stopničaste oblike ( $C = \infty$ ) do parabolčne oblike ( $C = 0,1 \text{ kN/cm}$ ). Prav tako tudi pri prečnih silah vidimo opazen vpliv prečne togosti stika med slojema obravnavanega nosilca na njihovo prerazporeditev med slojema.

### 3.2 Vpliv debeline vmesnega sloja

V nadaljevanju analiziramo tudi vpliv debeline vmesnega sloja na napetostno in deformacijsko stanje dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca. Parametrično študijo prikazujemo le za tri značilne količine obravnavanega nosilca: za zamik med slojema, za prečni pomik spodnjega sloja in za osno silo zgornjega sloja. V parametrični študiji za debelino vmesnega sloja izberemo:  $e = 0 \text{ cm}$ ,  $e = 0,5 \text{ cm}$ , in  $e = 1 \text{ cm}$ . Na sliki 7 najprej prikazujemo vpliv debeline vmesnega sloja na

zamike med slojema obravnavanega nosilca za štiri značilne vrednosti prečne togosti stika. Kot lahko vidimo na sliki 7, debelina vmesnega sloja nima bistvenega vpliva na velikost zamikov med slojema obravnavanega dvoslojnega prostoležečega nosilca. Na sliki 8 prikazujemo spreminjanje navpičnega pomika spodnjega sloja obravnavanega nosilca v odvisnosti od debeline vmesnega sloja za značilne prečne togosti stika. Tudi sedaj opazimo, da ima debelina vmesnega sloja minimalen vpliv na velikost navpičnega pomika spodnjega sloja obravnavanega nosilca.

Na koncu analiziramo še vpliv debeline vmesnega sloja na spreminjanje osne sile zgornjega sloja obravnavanega nosilca za značilne prečne togosti stika. Analizo prikazujemo na sliki 9.

Kot lahko vidimo na sliki 9, je tudi vpliv debeline vmesnega sloja na velikost osne sile zgornjega sloja obravnavanega nosilca minimalen. Se pa osna sila povečuje s povečevanjem debeline vmesnega sloja. Ker je vpliv debeline vmesnega sloja na druge statične, kinematične in deformacijske količine podoben ali celo manjši, sklepamo, da je vpliv debeline vmesnega sloja na togost dvoslojnih lesenih nosilcev praktično zanemarljiv.

## 4 • SKLEP

V članku smo predstavili novi matematični model in pripadajočo analitično rešitev za analizo napetostnega in deformacijskega stanja dvoslojnih lesenih linijskih konstrukcij z upoštevanjem zdrsa in razmika med slojema. Pri izpeljavi matematičnega modela smo upoštevali t. i. linearno teorijo ravninskih nosilcev in linearno elastično obnašanje obeh slojev kompozitnega nosilca ter stika med slojema. Dodatno pa smo pri izpeljavi modela predpostavili, da se interakcija med slojema vzpostavi preko vmesnega sloja, katerega debelina je odvisna od mehanskih

lastnosti lesa in veznih sredstev. Poleg novega matematičnega modela smo v članku predstavili tudi novo analitično rešitev. Ta omogoča točno analizo tudi statično nedoločenih dvoslojnih lesenih linijskih konstrukcij, kot so to na primer kontinuirni dvoslojni leseni nosilci. S prikazanim analitičnim modelom za analizo dvoslojnih lesenih linijskih konstrukcij smo analizirali vpliv prečne togosti stika in debeline vmesnega sloja na napetostno in deformacijsko stanje dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca. Obravnavani nosilec je bil na sredini razpona zgornjega sloja obtežen

z navpično točkovno silo. S parametričnimi študijami smo ugotovili, da ima prečna togost stika bistven vpliv na normalno komponento vektorja napetosti na stiku med slojema ter na prerazporeditev upogibnih momentov in prečnih sil med slojema, medtem ko debelina vmesnega sloja nima bistvenega vpliva na togost obravnavanega dvoslojnega lesenega prostoležečega nosilca.

Upošteva je veljavno zakonodajo s področja projektiranja lesenih konstrukcij, bo v nadaljnjem raziskovalnem delu smiselno izdelati tudi primerjavo med rezultati predstavljenega matematičnega modela in rezultati t. i.  $\gamma$ -metode po slovenskem standardu SIST EN 1995-1-1: 2005: Projektiranje lesenih konstrukcij.

## 5 • ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujemo prof. dr. Miranu Sajetu za nesebično pomoč pri nastanku članka.

## 6 • LITERATURA

- Adekola, A. O., Partial interaction between elastically connected elements of a composite beam, *International Journal of Solids and Structures*, 4(11), 1125–1135, 1968.
- Čas, B., Vpliv podajnosti stika na togost in nosilnost sestavljenih nosilcev, *Diplomska naloga*, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, 1999.
- Čas, B., Bratina, S., Saje, M., Planinc, I., Non-linear analysis of composite steel-concrete beams with incomplete interaction, *Steel and Composite Structures*, 4(6), 489–507, 2004.
- Čas, B., Saje, M., Planinc, I., Buckling of layered wood columns, *Advances in Engineering Software*, 38(8–9), 586–597, 2007.
- Deo, S. G., Raghavendra, V., *Ordinary differential equations and stability theory*, Eighth Reprint, New Delhi, Tata McGraw – Hill Publishing Company Limited, 1994.
- Gara, F., Ranzi, G., Leoni, G., Displacement-based formulations for composite beams with longitudinal slip and vertical uplift, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 65(8), 1197–1220, 2006.
- Gattesco, N., Analytical modeling of nonlinear behavior of composite beams with deformable connection, *Journal of Constructional Steel Research*, 52(2), 195–218, 1999.
- Girhammar, U. A., Pan, D. H., Exact static analysis of partially composite beams and beam-columns, *International Journal of Mechanical Sciences*, 49(2), 239–255, 2007.
- Kryżanowski, A., Schnabl, S., Turk, G., Planinc, I., Exact slip-buckling analysis of two-layer composite columns, *International Journal of Solids and Structures*, 46 (14-15), 2929–2938, 2009.
- Kroflič, A., *Analiza obnašanja dvoslojnih elastičnih nosilcev z upoštevanjem zdrsa in razmika*, Raziskovalna naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2007.
- Newmark, N. M., Siess, C. P., Viest, I. M., Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction, *Proceeding of the Society for Experimental Stress Analysis*, 9, 75–92, 1951.
- Ranzi, G., Gara, F., Ansurian, P., General method of analysis for composite beams with longitudinal and transverse partial interaction, *Computers and Structures*, 84(31–32), 2373–2384, 2006.
- Rassam, H. Y., Goodman, J. R., Buckling behavior of layered wood columns, *Wood Science*, 2(4), 238–246, 1970.
- Robinson, H., Naraine, K. S., Slip and uplift effects in composite beams, *International Conference on Composite Construction in Steel And Concrete. Proceedings of an Engineering Foundation Conference ASCE*, New England College, Henniker, New Hampshire, 487–497, 1988.
- Planinc, I., Schnabl, S., Saje, M., Lopatič, J., Čas, B., Numerical and experimental analysis of timber composite beams with interlayer slip, *Engineering Structures*, 30(11), 2959–2969, 2008.
- Viest, I. M., Review of research on composite steel–concrete beams, *Journal of Structural Division*, *Proceeding of ASCE*, 86(6), 1–21, 1960.
- Wheat, D. L., Calixto, J. M., Nonlinear analysis of two-layered wood members with interlayer slip, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120(6), 1909–1929, 1994.

# MOŽNOSTI ZA ZMANJŠANJE POTREBE PO OGREVALNI ENERGIJI S POVEČANJEM TOPLOTNE KAPACITETE STAVBE

## POSSIBILITIES FOR REDUCTION OF DEMAND FOR HEATING ENERGY WITH ENLARGEMENT OF THERMAL CAPACITY OF BUILDING

**dr. Azra Korjenic, univ. dipl. inž.**

azra.korjenic@tuwien.ac.at

**prof. dr. Jürgen Dreyer, univ. dipl. inž.**

juergen.dreyer@tuwien.ac.at

Inštitut za gradnjo in tehnologijo stavb,

Oddelek za gradbeno fiziko in akustiko, Tehniška univerza Dunaj,  
Karlsplatz 13/206-2, 1040 Vienna, Austria

**Znanstveni članek**

UDK: UDK: 699.86

**Povzetek** | Glavni lastnosti kvalitete zraka v notranjih prostorih sta temperatura in vlaga. V novih ali starih stavbah so temperature zelo pogosto previsoke ali preveč spremenljive. Spuščen strop s fazno spremenljivimi materiali – PCM (*Phase Changed Material*) – ugodno vpliva na preprečevanje previsokih temperatur v notranjih prostorih. Dodaten toplotni prenosnik na zunanji strani stavbe lahko z nočnim delovanjem in ohlajanjem PCM poveča učinkovitost sistema, tako da je po tem ohlajanju na voljo celotna toplotna kapaciteta hranilnika. Nadalje velika toplotna kapaciteta PCM zmanjša potrebe zgradb po ogrevalni energiji.

**Summary** | Temperature and humidity are the main properties of the indoor air quality. In new and old buildings the temperature is very often too high or varies too strongly. A suspended ceiling with phase change materials has a good influence to prevent too high indoor air temperatures. An additional heat exchanger at the outside of the building can increase the efficiency of the system by working in the night and cooling down the phase change material (PCM), so that after this cooling the full heat storage capacity is attainable. Further, a great heat storage capacity of phase change materials decreases the heating energy demand of buildings.

### 1 • UVOD

V izogib neugodnim zračnim razmeram so v stavbah zelo pogosto potrebni klimatizacijski sistemi. Toplotna kapaciteta stavbe ima

izravnalni vpliv na nihanje temperature. Materiali PCM (*Phase Changed Material*) pomembno povečajo toplotno kapaciteto (Lane,

1983). Dodatno je lahko delovni razpon sistema prilagojen razmeram v zaprtih prostorih, saj je točko fazne spremembe možno prilagoditi s tipom PCM. Izboljšanje kvalitete zraka v zaprtih prostorih s shranjevalnim učinkom PCM je zanimivo, saj ta deluje pasivno in brez toplotnih črpalk.

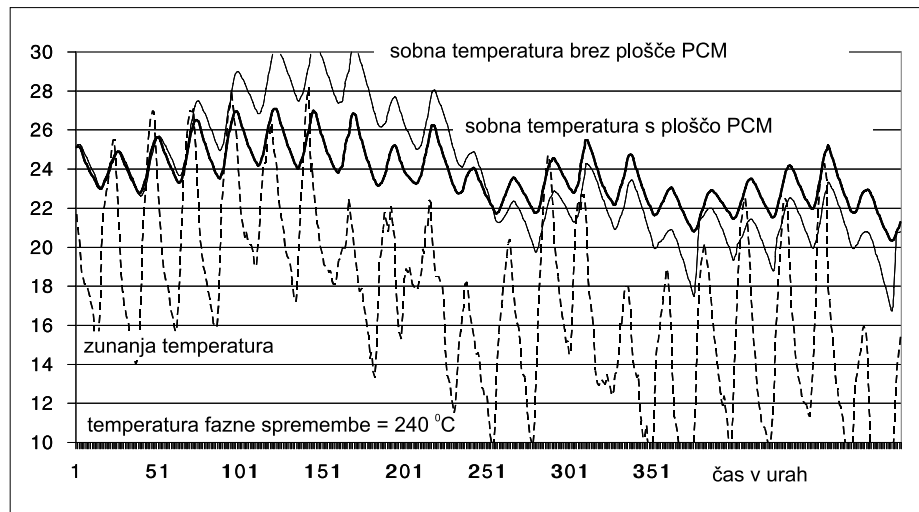
## 2 • RAZVOJ SISTEMA ZA SHRANJEVANJE TOPLOTE

Prva aplikacija je materiale PCM uporabila v obliki dodatkov h gradbenim materialom ((Kornadt, 2005), (Zubillaga, 2006), (Virgone, 2006), (Stritih, 2006), (Kalousek, 2006)). Za nadaljnje izboljšave so bili materiali PCM vgrajeni v ploščo, tako da je lahko uporabljenega več materiala in da je prenos toplote večji. Spuščen strop s PCM je odličen primer uporabe. Shranjevalec toplote v spuščnem stropu zniža temperature in časovno obdobje s temperaturami, ki so višje od tistih, ki še zagotavljajo ugodje. Na sliki 1 je prikazana sprememba temperature z in brez spuščnega stropa z materialom PCM. V obdobju shranjevanja toplote je rast temperature omejena. Če je sposobnost shranjevanja izčrpana in je ves material stopljen, je učinek zmanjševanja temperature ustavljen. V obdobju nižjih temperatur bo hrabna kapaciteta spei razbremenjena. V tem času latentna toplota fazno spremenljivih materialov segreje prostor in temperatura ne pade tako veliko. Učinek shranjevanja toplote fazno spremenljivega materiala se lahko uporabi kot odličen blažilec, ki lahko prepreči

previsoke ali prenizke temperature v notranjih prostorih.

Da bi ugotovili najboljše načine uporabe materialov PCM pri blaženju temperaturnih sprememb in izogibanju neugodnim visokim

temperaturam v zaprtih prostorih, je treba preučiti kvalitete sistema in medsebojne vplive. Učinkovitost uravnavanja temperature v zaprtih prostorih je odvisna od kvalitete stavbe in klimatskih pogojev, od prenosa toplote med notranjim zrakom in sistemom za shranjevanje toplote in toplotno kapaciteto oziroma maso fazno spremenljivih materialov.



Slika 1 • Odvisnost temperature in časa v poletnem mesecu z in brez stropa s sposobnostjo shranjevanja toplote iz materialov PCM

## 3 • MODELIRANJE PROCESA

Razvit je bil model za opis procesov in učinkov in za izračun temperature v notranjih prostorih. Temperatura v notranjih prostorih je rezultat ogrevanja, ohlajanja, toplotnih izgub toplotnih zalog in toplotnega dobitka. Učinkovitost naprave je možno obravnavati v zvezi z izmenjavo toplote, temperature fazne spremembe in toplotno kapaciteto materialov PCM.

Ogrevalni in ohlajevalni sistemi se uporabljajo za uravnavanje temperature v zaprtih prostorih. Enačba (1) opisuje ogrevalno in ohlajevalno moč  $Q$  (W) klimatizacijskih sistemov.

$$Q_{ogrev} = \alpha_i \cdot A_{ogrev} \cdot (t_{ogrev} - t_{notr}) \quad \text{in}$$

$$Q_{ohlaj} = \alpha_i \cdot A_{ohlaj} \cdot (t_{ohlaj} - t_{notr}) \quad (1)$$

Izmenjava toplote med prostorom in sistemom je opisana s koeficientom prenosa toplote  $\alpha_i$  ( $W/m^2K$ ), temperaturami prostora in ogrevalnega in ohlajevalnega sistema  $t$  (K) in površinami ogrevalnega ali ohlajevalnega sistema  $A$  ( $m^2$ ). Toplotna izguba prostora je

izražena v enačbi (2), kjer je  $Q_{prenos}$  toplotni tok s prenosom,  $U$  ( $W/m^2K$ ) toplotna prehodnost za steno in okno ter  $t$  temperatura notranjega in zunanjega zraka.

$$Q_{prenos} = U_{stena} \cdot A_{stena} \cdot (t_{notr} - t_{zunan}) +$$

$$U_{okno} \cdot A_{okno} \cdot (t_{notr} - t_{zunan}) \quad (2)$$

Enačba (3) opisuje toplotno izgubo s prežračevanjem  $Q_{prezr}$ . Toplotna izguba je odvisna od menjave zraka v eni uri  $n_{prezr}$  (1/h), toplotne kapacitete zraka  $c$  ( $J/kg.K$ ) in gostote zraka  $\rho$  ( $kg/m^3$ ), volumna zraka v zaprtim prostoru in razlike v temperaturah zraka v prostoru  $t_{notr}$  (K) in zunanjim zrakom  $t_{zunan}$ .

$$Q_{prezr} = n_{prezr} \cdot C \cdot \rho \cdot V_{notr} \cdot (t_{notr} - t_{zunan,zrak}) \quad (3)$$

Nadalje je treba upoštevati toplotni dobitek preko sevanja skozi okna. Ta učinek je odvisen od intenzivnosti sevanja  $q_{sonsev}$  ( $W/m^2$ ), koeficienta senčenja  $z$ , koeficienta orientacije okna  $f_o$ , transmisijskega koefi-

cienta stekla  $g$  in aktivne imisijske površine okna  $A_{imis}$  ( $m^2$ ).

$$Q_{sevprib} = q_{sonsev} \cdot z \cdot f_o \cdot g \cdot A_{imis} \quad (4)$$

Temperatura zraka v notranjem prostoru je rezultat toplotne oskrbe in toplotne izgube  $\{\sum Q_i \Delta \tau_i\}$ , na kar vpliva toplotna kapaciteta prostora  $\{\sum c_j m_j\}$ .

$$t_{prost(n+1)} = t_{prost(n)} + \{\sum Q_i \Delta \tau_i\} / \{\sum c_j m_j\} \quad (5)$$

V primeru spuščnega stropa z materiali PCM obstaja dodatna izmenjava toplote med zrakom v notranjem prostoru in sistemom PCM, izražena je s koeficientom prenosa toplote  $\alpha_i$ , površino spuščnega stropa  $A_{PCM}$  in temperaturno razliko med zrakom v notranjem prostoru in sistemom PCM. Učinek shranjevanja toplote PCM stropa je omejen. Zato je nujno treba upoštevati, da energija, shranjena v stropu  $Q_{PCM}$ , ne more biti večja kot talilna toplota  $Q_{PCM,max}$  celotne mase PCM ( $Q = c \cdot m \cdot \Delta \tau$ ).

$$Q_{PCM} = \alpha_i \cdot A_{PCM} \cdot (t_{PCM} - t_{notr}) \quad \text{in} \quad 0 \leq Q_{PCM(n+1)} =$$

$$= Q_{PCM(n)} + c_{PCM} \cdot m_{PCM} \cdot \Delta T \leq Q_{PCM,max} \quad (6)$$



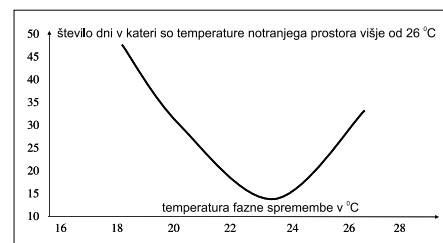
Razumljivo je, da mora biti shranjevalni učinek dovolj velik, da pride do učinka temperaturne izravnave. Zato je potrebna zadosti velika toplotna kapaciteta oziroma zadostna masa. Po drugi strani je možno uporabiti kapaciteto hrambe toplote učinkovitejše z dodatnim nočnim ohlajanjem sistema. Na ta način je možno, da je po veliki dnevni toplotni obremenitvi toplota ponoči oddvajana proč in je celotna kapaciteta hrambe toplote na razpo-

lago naslednji dan. Da bi lahko to možnost koristili, mora biti toplotni prenosnik nameščen znotraj PCM in na zunanji površini stavbe. Izmenjava toplote zunaj  $Q_{\text{zun.ohl}}$  je določena s koeficientom prehoda toplote  $\alpha_z$ , površino izmenjevalca toplote  $A_{\text{zun.ohl}}$  in temperaturno razliko med zunanjim zrakom in sistemom PCM.

$$Q_{\text{zun.ohl}} = \alpha_z \cdot A_{\text{zun.ohl}} \cdot (t_{\text{PCM}} - t_{\text{zun.zrak}}) \quad (7)$$

Ta opis in enačbe predstavljajo zelo osnovno predstavitev uporabljenega modela za preiskovanje sistema. Pri uporabi teh enačb je treba upoštevati odvisnost koeficientov od temperature in hitrosti zraka. Nadalje je treba preveriti čas in časovne korake, na katere se sistem enačb nanaša. Po drugi strani so procesi dovolj dovršeni, da je teoretično možno prikazati vse pomembne posledice. Zato rezultat predstavlja učinke dovolj dobro.

načini optimizacije lastnosti materialov so prikazani na sliki 2.



Slika 2 • Vpliv temperature taljenja PCM na število dni z notranjimi temperaturami, višjimi od 26 °C

izmenjavo toplote ponoči in učinkovitostjo sistema brez dodatne izmenjave toplote. Slika 4 prikazuje rezultate preiskave o vplivu količine PCM na zmanjšanje časa s previsokimi temperaturami notranjega zraka.

Število dni s temperaturami, višjimi od 26 °C, se bolj zmanjša, če je uporabljen dodaten prenosnik toplote. Prenos toplote in učinek shranjevanja toplote sistema PCM je lahko optimiziran. Sistem za shranjevanje je opazno bolj izkoriščen in izravnalni učinek dosežen z manj mase, če je uporabljen dodaten izmenjevalec toplote. Posebno v primeru majhne količine PCM je učinek večji.

## 4 • VPLIV TEMPERATURE FAZNE SPREMEMBE

Učinkovitost naprave je odvisna od toplotne izmenjave, temperature fazne spremembe in toplotne kapacitete oziroma mase materialov PCM. Slika 2 prikazuje število dni, v katerih je temperatura notranjega prostora višja od 26 °C. Če je temperatura fazne spremembe nizka, je kapaciteta shranjevanja toplote prezgodaj izčrpana. Če je temperatura fazne spremembe previsoka, se učinek izogibanja visokim temperaturam začne prepozno,

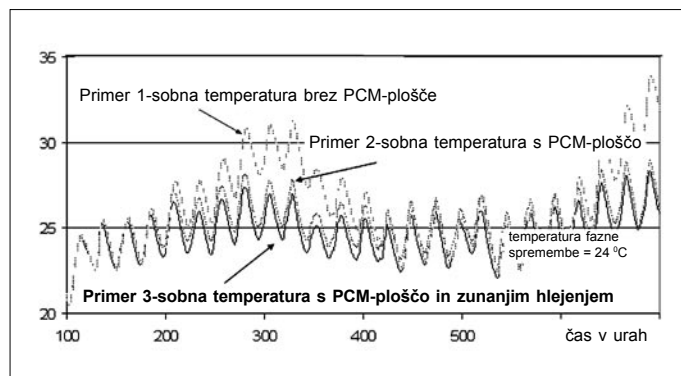
zmanjševalni vpliv pa je premajhen. Blažilni učinek za izogibanje notranjim temperaturam, ki so višje od 26 °C, postane učinkovitejši pri temperaturi fazne spremembe 23 °C. Za višje temperature fazne spremembe je učinkovitost blažilnega učinka spet zmanjšana. Temperatura taljenja mora biti izbrana v določenem razmerju do temperaturnega nivoja, ki ne sme biti presežen. Rezultati vpliva fazne spremembe na učinek izravnave temperatur in

## 5 • VPLIV DODATNEGA OHLAJANJA

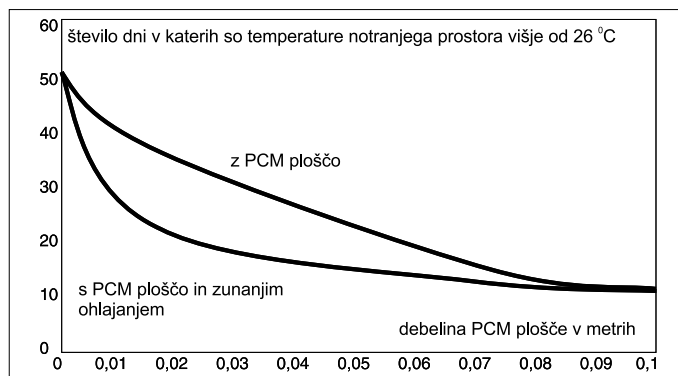
Učinek pasivnega uravnavanja temperature je boljši, če je uporabljen spuščeni strop z dodatnim toplotnim prenosnikom na zunanji strani stavbe. Izmenjevalec toplote je vgrajen v okno. Deluje ponoči in ohlaja material PCM, tako da je ta po hlajenju trden in da je na voljo celotna toplotna kapaciteta hranilnika. Na sliki 3 je prikazano obnašanje temperature notranjega zraka v poletnem času – 40 dni za več primerov. Primer 1 prikazuje temperature brez kakršnih koli vplivov materialov PCM. Primer

2 prikazuje situacijo s spuščnim stropom s fazno spremenljivimi materiali. Primer 3 prikazuje učinek spuščnega stropa s PCM in dodatno izmenjavo toplote ponoči z zunanjim izmenjevalcem toplote. Jasno je razvidno, da je učinek temperaturne izravnave vedno boljši, če je uporabljen sistem za shranjevanje toplote s PCM in če je prav tako uporabljeno dodatno nočno hlajenje.

Učinkovitost dodatne izmenjave toplote je bila raziskana s primerjavo sistema z dodatno



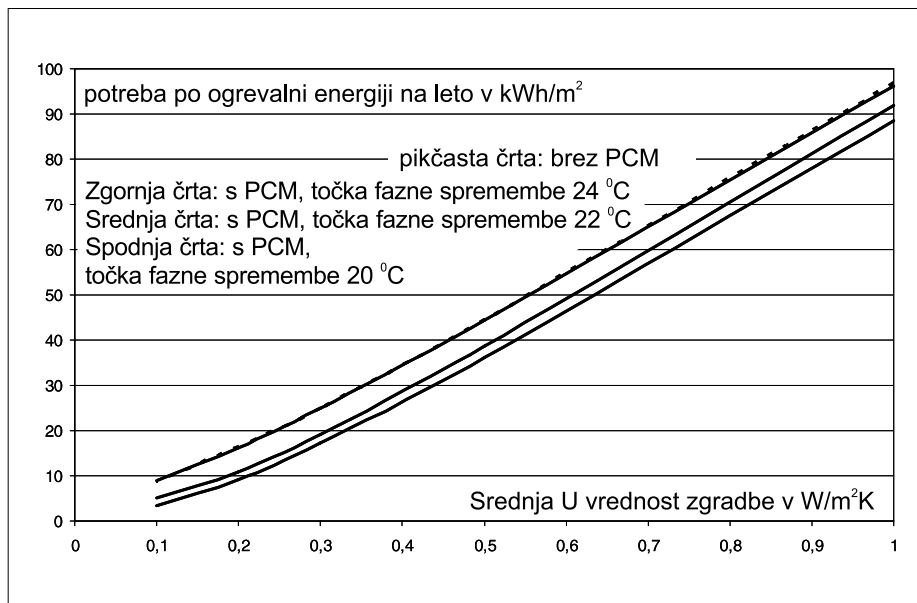
Slika 3 • Vpliv sistema PCM in dodatnega nočnega hlajenja



Slika 4 • Vpliv debeline oziroma količine PCM na zmanjšanje števila dni s previsokimi temperaturami

## 6 • MOŽNOSTI ZA ZMANJŠANJE POTREBE PO OGREVALNI ENERGIJI S PCM

Kapaciteta shranjevanja toplote, ki jo ima stavba, poveča učinkovitost solarnih in notranjih dobitkov. Uporaba PCM lahko izboljša učinek. Na sliki 5 je toplotna potreba stavbe prikazana v odvisnosti od stopnje izoliranosti. Grafikoni prikazujejo zmanjšanje letne potrebe po energiji v primeru večjega učinka shranjevanja toplote s PCM. Pri nižji stopnji izoliranosti so razlike relativno majhne. Za visoke stopnje izoliranosti in nizke transmissijske koeficiente ( $U \approx 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) je učinek zanimivejši, saj je zmanjšanje relativno večje. Za pasivne hiše z energijsko potrebo, nižjo od  $15 \text{ kWh/m}^2$ , je ta učinek zelo zanimiv, saj večja učinkovitost lahko še nadalje zmanjša potrebo po energiji. Pomembna je odvisnost temperature fazne spremembe. Učinek je boljši, če je temperatura fazne spremembe nižja. V primeru, ko je temperatura fazne spremembe v razponu  $19^\circ\text{C}$ – $20^\circ\text{C}$ , je lahko učinek shranjevanja toplote tako velik, da ogrevalna energija skoraj ni potrebna.



Slika 5 • Zmanjšanje potrebe po ogrevalni energiji z uporabo PCM za različne temperature fazne spremembe v odvisnosti od srednje U-vrednosti stavbe

## 7 • POVZETEK

Fazno spremenljivi materiali – PCM (Phase Changed Materials) – povečajo toplotno kapaciteto stavbe. Učinek shranjevanja toplote je

v določenih temperaturnih lestvicah zelo visok in PCM je lahko uporabljen kot odličen sistem za dušenje previsokih ali prenizkih temperatur

notranjega zraka na pasiven način. Energijska potreba za zimsko ogrevanje in poletno ohlajanje je lahko zmanjšana, če ima stavba visoko kapaciteto za shranjevanje toplote.

## 8 • VIRI, LITERATURA

Lane, G. A., Latent Heat Storage, Background and Scientific Principals, Volume 1, U.S.A CRC Press, 1983.

Kornadt, O., Einfluss von Phasenübergangsmaterial zur Verbesserung des Raumklimas, WKS, 50, Jahrgang, Heft 54, 2005.

Zubillaga, O., Marcos, J., Cano, F., Cabeza, L. F., Microcapsulated Phase Change Materials (PCM) for Energy-Efficient Buildings, Healthy Buildings Proceedings, Abstracts, 2006.

Virgone, J., Kuznik, F., Effect of PCM in Internal Temperature: Experiments in the Test Room MINIBAT, Healthy Buildings Proceedings, Volume II, 2006.

Stritih, U., Butala, V., Improving Indoor Comfort with PCM Cold Storage, Healthy Buildings Proceedings, Volume II, 2006.

Kalousek, M., Beckovsky, D., Thermal Comfort of Lightweight Building in Summer Time, Healthy Buildings Proceedings, Volume II, 2006.

# NOVI DIPLOMANTI

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Matej Babič**, Uporaba samozgoščevalnih betonov pri izdelavi Delta Bloc varnostnih ograj, mentor pred. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

**Sebastijan Balažič**, Sanacija in prizidava poslovno stanovanjskega objekta, mentor doc. dr. Andrej Štrukelj, somentor dr. Nataša Šuman

**Matija Kajba**, Digitalno modeliranje gradbenih objektov od zasnoave do fizičnega modela, mentor red. prof. dr. Danijel Rebolj, somentor doc. Janko Zadavec

**Miran Kreslin**, Prefabricirana betonska sanitarna kabina, mentor pred. Metka Zajc Pogorelničnik, univ. dipl. inž. grad.

**Denis Medić**, Predstavitev armiranobetonske montažne gradnje z uporabo PVP-plošč, mentor doc. dr. Andrej Štrukelj

**Dominik Pintarič**, Montažni armiranobetonski ločni most za pešce, mentor doc. dr. Peter Dobrila, somentor Matjaž Tajnik, univ. dipl. inž. grad.

**Erik Vodenik**, Statična in trdnostna analiza tročlenskega lepljenega nosilca športne dvorane dimenzije 40 x 80 m, mentor doc. dr. Peter Dobrila, somentor Matjaž Tajnik, univ. dipl. inž. grad.

**Davor Žvikart**, Tehnologija izvedbe kanalizacijskega sistema RZ-10 v industrijski coni Štore, mentor doc. dr. Andrej Štrukelj

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Marko Tučič**, Reološke lastnosti past za samozgoščevalne betone, mentor doc. dr. Lucija Hanžič, somentorja Alan Mautinger, univ. dipl. inž. grad. in mag. Bernardka Jurič

### MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Marko Tučič**, Reološke lastnosti past za samozgoščevalne betone, mentor doc. dr. Lucija Hanžič, somentorja Alan Mautinger, univ. dipl. inž. grad. in mag. Bernardka Jurič

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO – EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA

**Srdjan Brković**, Gradbene pogodbe po FIDIC in neposredna priprava na gradnjo, mentorja doc. dr. Uroš Klanšek – FG in izr. prof. dr. Borut Bratina – EPF, somentor dr. Nataša Šuman

Rubriko ureja • **Jan Kristijan Juteršek**, univ. dipl. inž. grad.

### Vsem diplomantom čestitamo!

Skladno z dogovorom med ZDGITS in FGG-UL vsi diplomanti gradbenega oddelka Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani prejemaajo Gradbeni vestnik (12 števil) eno leto brezplačno. Vse, ki bodo želeli po prejemu 12. številke postati redni naročniki, prosimo, naj to čimprej sporočijo uredništvu na naslov: GRADBENI VESTNIK, Leskoškova 9E, 1000 Ljubljana; telefon: (01) 52 40 200; faks: (01) 52 40 199; e-mail: [gradb.zveza@siol.net](mailto:gradb.zveza@siol.net).

ZDGITS in Uredništvo Gradbenega vestnika

# KOLEDAR PRIREDITEV

6.-11.9.2009

**IABSE Annual Meetings and IABSE Symposium Sustainable Infrastructure – Environment Friendly, Safe and Resource Efficient**

Bangkok, Tajska  
[www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents](http://www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents)

14.-18.9.2009

**CISM Environmental Wind Engineering and Wind Energy Structures**

Videm, Italija  
[www.cism.it](http://www.cism.it)

20.-23.9.2009

**8th International Symposium on Cable Dynamics**

Pariz, Francija  
<http://www.aimontefiore.org/iscd2009>

23.-25.9.2009

**14th European Parking Association Congress**

Dunaj, Avstrija  
[www.europeanparking.eu](http://www.europeanparking.eu)

25.9.2009

**10. jubilejni Šukljetov dan**

Brdo pri Kranju, Slovenija  
[www2.fgg.uni-lj.si](http://www2.fgg.uni-lj.si)

2.10.2009

**Fachtag Brückenbau Stahlbrücken im Wandel der Zeit – Bauen im Bestand**

Bonn, Nemčija  
[ftp://ftp2.stahl-online.de/bms/download/veranstaltungen/Flyer\\_Brueckenbau\\_Bonn.pdf](http://ftp2.stahl-online.de/bms/download/veranstaltungen/Flyer_Brueckenbau_Bonn.pdf)

8.-9.10.2009

**SDGK 2009**

**Zborovanje gradbenih konstrukterjev Slovenije**  
Rogaška Slatina, Slovenija  
[www.sdgk.si](http://www.sdgk.si)

5.-9.10.2009

**17th International Conference for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**

Alexandria, Egipt  
[www.2009icsmge-egypt.org](http://www.2009icsmge-egypt.org)

14.-16.10.2009

**EVACES'09 Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures**

Wrocław, Poljska  
[www.evaces09.pwr.wroc.pl/index.html](http://www.evaces09.pwr.wroc.pl/index.html)

15.-16.10.2009

**Stahl im Wasserbau 2009**

Braunschweig, Nemčija  
<http://www.igb.tu-bs.de/siw2009.pdf>

11.-12.11.2009

**Road Expo Scotland**

Edinburgh, Škotska  
<http://www.road-expo.com/re2008s/landing.html>

3.-5.5.2010

**IABSE Conference International Structural Codes**

Dubrovnik, Hrvaška  
[www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents](http://www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents)

23.-27.5.2010

**5th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE 2010)**

Chapel Hill, Severna Karolina, ZDA  
[www.cwe2010.org](http://www.cwe2010.org)

29.5.-2.6.2010

**The Third International fib Congress and Exhibition "Think Globally, Build Locally"**

Washington D.C., ZDA  
[www.fib2010washington.com](http://www.fib2010washington.com)

20.-23.6.2010

**8th fib International PhD Symposium in Civil Engineering**

Kopenhagen, Danska  
<http://conferences.dtu.dk/conferenceDisplay.py?confId=21>

21.-23.7.2010

**ICSA 2010**

**International Conference on Structures and Architecture**  
Guimares, Portugalska  
[www.arquitectura.uminho.pt](http://www.arquitectura.uminho.pt)

22.-24.9.2010

**34th IABSE Annual Meetings and IABSE Symposium**

Benetke, Italija  
[www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents](http://www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents)

10.-15.7.2011

**13th International Conference on Wind Engineering**

Amsterdam, Nizozemska  
[www.icwe13.org](http://www.icwe13.org)

20.-23.9.2011

**IABSE Annual Meetings and IABSE Symposium**

London, Anglija  
[www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents](http://www.iabse.ethz.ch/conferences/calendarofevents)

Rubriko ureja • **Jan Kristjan Juteršek**, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: [msg@izs.si](mailto:msg@izs.si)