

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, december 2014, letnik 63, str. 269-300

Izdajatelj:

Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 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 RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**, predsednik
Dušan Jukič
prof. dr. Matjaž Mikoš
IZS MSG: **Gorazd Humar**
Mojca Ravnikar Turk
dr. Branko Zadnik
UL FGG: **izr. prof. dr. Sebastjan Bratina**
UM FG: **doc. dr. Milan Kuhta**
ZAG: **doc. dr. Matija Gams**

Glavni in odgovorni urednik:

prof. dr. Janez Duhovnik

Lektor:

Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:

Darja Okorn

Tajnica:

Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:

Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

Kočevski tisk

Naklada:

3550 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 23,16 EUR; za študente in upokojenca 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 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

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. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledki med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) 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 (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
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 ali kratica ustanove, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen 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. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

Vsebina • Contents

Voščilo

stran **270**

doc. dr. Andrej Kryžanowski
VOŠČILO PREDSEDNIKA ZDGITS

In memoriam

stran **271**

prof. dr. Jože Panjgn, univ. dipl. inž. grad.
PROF.DR. BORIS KOMPARE, UNIV. DIPL. INŽ. GRAD., 1956 - 2014

Članki • Papers

stran **273**

mag. Marko Venta, univ. dipl. inž. rud. in geoteh.
prof. dr. Jakob Likar, univ. dipl. inž. rud. in geoteh.
asist. Tina Marolt, univ. dipl. inž. rud. in geoteh.

GEOMEHANSKE NUMERIČNE ANALIZE VPLIVOV GRADNJE PREDOROV NA POVRŠINO

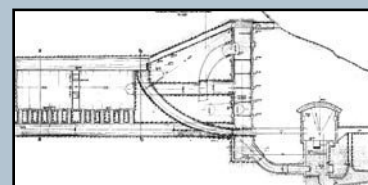
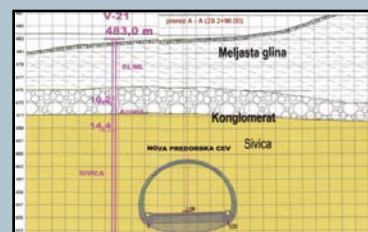
GEOMECHANICAL NUMERICAL ANALYSES OF TUNNEL
CONSTRUCTION INFLUENCES ON THE GROUND SURFACE

stran **290**

Jernej Mazij, univ. dipl. inž. grad.
dr. Anton Bergant, univ. dipl. inž. str.

HIDRAVLIČNI PREHODNI POJAVI – PROBLEMATIKA OBNOVE HIDROELE- KTRARN S KOMPLEKSNI MI PRETOČNIMI SISTEMI

HYDRAULIC TRANSIENT EVENTS – PROBLEMATICS OF RENOVATION OF HY-
DROPOWER PLANTS WITH COMPLICATED CONVEYANCE SYSTEMS



Obvestilo ZDGITS

stran **298**

**PRIPRAVLJALNI SEMINARJI IN IZPITNI ROKI ZA
STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2015**

Vsebina letnika 63/2014

stran **299**

Novi diplomanti

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Ribja brv čez Ljubljanico v Ljubljani, foto: Miran Kambič

VOŠČILO PREDSEDNIKA ZDGITS



Letošnje leto se nagiba h koncu. Ob izteku leta radi naredimo pregled prehojene poti in si na podlagi doseženega postavljamo nove izzive za prihodnost. V zaključku lanske novoletne poslanice sem izrazil tiho željo, da bi se v gradbeni stroki znali povezati in skupaj postaviti cilje za prihodnost gradbeništva v Sloveniji. Z radostjo ugotavljam, da smo v tem pogledu uspeli doseči tisto, kar se je še nedavno zdelo nemogoče. Razdrobljeno gradbeništvo smo povezali in stanovsko spodbudili razpravo o vlogi in mestu gradbeništva in stroke v naši družbi. Na julijskem zboru za oživitvev slovenskega gradbeništva smo javnosti predstavil Memorandum za oživitvev in razvoj slovenskega gradbeništva, v katerem smo poudarili zahteve, katerih cilj je izboljšanje stanja v panogi, ohranitev mednarodne konkurenčnosti, povečanje zaposlitvenih možnosti in doseganje multiplikativnih učinkov v celotnem gospodarstvu. Kako doseči zastavljene cilje, smo opredelili s programom dela, ki smo ga oktobra predstavili v Državnem svetu. Naše delo se pri tem ni ustavilo. Po vzoru sorodnih stanovskih združenj nadaljujemo pripravo akta, ki bi na državni ravni dolgoročno in celostno urejal gradbeništvo.

Aktivnosti v preteklem letu pa niso bile usmerjene zgolj v širšo razpravo in napore, da bi gradbeništvo zagotovili mesto, ki mu v slovenskem gospodarstvu in stroki pripada, temveč tudi v zagotavljanje prostora, kjer bi bila mogoča predstavitvev slovenskega znanja in idej s področja gradbeništva, s čimer bi bila tudi nadalje omogočena strokovna razprava. Pri tem imam v mislih problematiko izhajanja Gradbenega vestnika. Žal se kljub vsem naporom, vloženim v ohranitev revije, v obliki, kakršna nam je poznana zdaj, nismo mogli izogniti posledicam krize in zmanjšanja obsega sredstev za plačevanje stroškov izdajanja revije. Z zavestjo pomena naše revije, ki je pomemben glasnik dognanj in razvoja gradbene stroke in ki izhaja nepretrgano že 63 let, smo se spoprijeli z dejstvom, da bo treba poiskati način, kako omogočiti njegovo izhajanje tudi v prihodnje. Gradbeni vestnik je ena izmed redkih pozitivnih dejavnosti, s katerimi se trenutno ponaša slovensko gradbeništvo, in edina domača strokovno-znanstvena publikacija, ki pomembno pripomore k javni predstavitvi znanja slovenskih gradbenikov doma in v tujini. V vodstvu ZDGITS se zavedamo pomena izdajanja revije in ohranjanja statusa društva, ki deluje v javnem interesu pri raziskovalni dejavnosti, in obenem, da Gradbeni vestnik – kljub okrnjenemu obsegu stroškov – izhaja v nespremenjenem obsegu še naprej. V prihajajočem letu zato izkoriščamo možnosti, ki jih ponujajo sodobni mediji. Gradbeni vestnik bo odslej izhajal v papirni in digitalni obliki. Le tako bo namreč mogoče ohranjati prostor, v katerem bo dovolj možnosti za izmenjavo znanj in mnenj, ne da bi morali krčiti obseg. V naslednjem letu bomo – čeprav prehajamo v digitalno obliko –, aktivno delali, da bo Gradbeni vestnik še naprej revija, ki bo zagotavljala prostor za strokovno razpravo in prenašala dosežke gradbene stroke med strokovno javnost.

Ob tej priložnosti mi dovolite, da vam v prihajajočem letu iskreno zaželim veliko veselja, sreče, osebnih uspehov in miru.

doc. dr. Andrej Kryžanowski,
predsednik ZDGITS

*Vsem bralcem, avtorjem in recenzentom Gradbenega vestnika želita
vesele božične praznike in srečno ter zdravo novo leto 2015
Izdajateljski svet in uredništvo*



IN MEMORIAM

PROF. DR. BORIS KOMPARE, UNIV. DIPL. INŽ. GRAD., 1956–2014

Svojo življenjsko pot je po kratki bolezni konec oktobra 2014 prehitro sklenil naš spoštovani sodelavec in kolega prof. dr. Boris Kompare. Prof. Kompare se je skoraj vso svojo profesionalno delovno dobo po mojem mnenju ukvarjal z najplemenitejšim inženirskim delom, to je z oskrbo ljudi z zdravo pitno vodo. Vsi ljudje, živali in tudi rastline ne moremo brez najplemenitejše tekočine v vesolju. Vode na naši Zemlji je le na videz zelo veliko, vendar kvalitetne, zdrave pitne vode ni v izobilju, zato moramo z njo ravnati skrbno in odgovorno do vseh v okolju, še posebno tam, kjer jo lahko primanjkuje. Boris je o vodi, njeni kakovosti, uporabi in čiščenju vedel največ v slovenskem prostoru. Bil je redni profesor Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na Inštitutu za zdravstveno hidrotehniko, nosilec predmetov za oskrbo z zdravo pitno vodo ter pristojen za poučevanje zdravstvene hidrotehniko.

Boris Kompare se je rodil 17. junija 1956 v Postojni. Leta 1975 je dokončal I. gimnazijo Bežigrad v Ljubljani. Po končani gimnaziji se je vpisal na Fakulteto za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo. Diplomiral je na hidrotehnični smeri leta 1980. Po diplomi se je 6. junija 1980 zaposlil na fakulteti, najprej kot strokovni sodelavec na Inštitutu za zdravstveno hidrotehniko, nato pa na vabilo prof. dr. Mitje Rismala kot pedagoški in raziskovalni sodelavec IZH-ja, kjer je prehodil celotno pot, od asistenta do rednega profesorja. Leta 1991 je zaključil podiplomski študij hidrotehniko in odšel na petmesečno študijsko izpopolnjevanje o ekološkem modeliranju na danski kraljevi šoli za farmacijo pri svetovno znanem prof. Svenu Eriku Jørgensenu v Københavnu. Na njegovo vabilo smo ga tam tudi obiskali in skupaj z njim, ob znani morski dekllici, zrl čez preliv proti Malmöju v Švedski, ker takrat še ni bilo zgrajenega mostu.

Leta 1983 je bil prvič izvoljen v naziv asistenta za predmeta vodovod in čiščenje pitne vode, leta 1996 prvič v naziv docent, 2002. v naziv izredni profesor za zdravstveno hidrotehniko in ekološko inženirstvo in leta 2007 v naziv rednega profesorja za okoljsko inženirstvo.

Težko je na kratko zaobjeti celovito življenjsko delo profesorja Kompareta na področju hidrotehniko in okoljskega inženirstva, kjer je uspešno združil delo visokošolskega učitelja, odličnega raziskovalca in vrhunskega strokovnjaka.

Naj najprej omenim njegovo pedagoško delo. Bil je mentor petim doktorandom in šestim magistratom ter mentor ali somentor več kot 100 diplomantom, od katerih so bili trije nagradjeni s fakultetno Prešernovo nagrado. S študenti, diplomanti in mladimi raziskovalci je znal vzpostaviti dober odnos in jih motivirati za delo. To se odraža tudi v dobri kvaliteti diplom, magisterijev in doktoratov.

Bil je nosilec predmetov vodovod in čiščenje pitne vode ter sonosilec pri predmetih osnove čiščenja voda, komunalne naprave in zaščita voda. Na Zdravstveni fakulteti v Ljubljani pa je bil sonosilec pri predmetu tehnologija in tehnika pitnih in odpadnih voda.

Napisal je učbenik iz urbane odvodnje, za predmeta osnove čiščenja vode in priprava pitne vode pa ima na spletnih straneh objavljena skripta in delno prosojnice predavanj, rešene primere vaj in dodatno študijsko gradivo.

Kolega Boris Kompare je skrbel tudi za strokovni razvoj okoljskega inženirstva, skupaj s sodelavci je objavil dve poljudnoznanstveni knjigi ter več deset strokovnih člankov. Bil je pooblaščen inženir in revident pri Inženirski zbornici Slovenije. Imel je številne stike v domačih in tujih institucijah. Kot konzultant je sodeloval pri številnih domačih in tujih komisijah, kot je mednarodna komisija za rešitev poplavne varnosti Nove in Stare Gorice, bil je v ekspertni skupini za pripravo Nacionalnega programa vodnega gospodarstva Slovenije, pri Celostni okoljski študiji povodja Donave ter član ekspertne skupine PHARE. Bil je konzultant pri pripravi zakona o vodah (MOP), konzultant pri pripravi uredbe za določitev vodovarstvenih območij v RS v MOP ter sodni izvedenec za vodovode pa še bi lahko našteval.

Aktivno se je udeležil številnih strokovnih in znanstvenih srečanj, seminarjev in simpozijev. Bil je predsednik Slovenskega društva za zaščito voda, član društva vodarjev DVS, član slovenskega društva za hidravlične raziskave SDHR in še številnih drugih ter član mednarodnega društva za ekološka modeliranja (ISEM), redni član Ney York Academy of Science (NYAS),

član European Engineering Graduate Schoole of Environment – Water (EWG,) in član EC-Socrates-ENTNET for Environment.

Skupaj s prof. Steimanom je v okviru Evropske skupnosti vodil mednarodni projekt TEMPUS z naslovom Podiplomski študij vodnega gospodarstva in zdravstvene hidrotehnike, v okviru katerega je bilo organiziranih v treh letih 16 seminarjev. Poleg oskrbe z vodo se je intenzivno ukvarjal s problemi ekologije in umetne inteligence. Sodeloval je pri razvoju orodij umetne inteligence s Fakulteto za elektrotehniko in računalništvo ter z Inštitutom Jožef Stefan.

Znanstvenoraziskovalna dejavnost prof. Kompareta je obširna in kvalitetna. Kot samostojni raziskovalec je imel številko 3540, kar nam pove, da jo je dobil še kot zelo mladi raziskovalec. Sprva je sodeloval pri raziskovalnih nalogah kot sodelavec raziskovalne skupine v hidrotehničnem odseku pod vodstvom prof. Rudija Rajarja. V času obiska na Danskem pa je bil član znanstvenoraziskovalne skupine za ekološko modeliranje. Poudarek je bil na modelih eutrofikacije jezer, na procesih transporta in preobrazbe toksičnih snovi v okolju in na novih postopkih nitrifikacije in denitrifikacije močno organsko obremenjenih voda.

Od leta 1992 je bil član znanstvenoraziskovalne skupine pri projektu Bio-geo-kemični cikli v ekologiji pod vodstvom dr. Jožeta Pezdčiča (IJS – Inštitut Jožef Stefan) in prof. Rudija Rajarja. Prav tako je bil od leta 1992 zunanji, neformalni član, od 1995. pa formalni član raziskovalnih skupin za umetno inteligenco na Fakulteti za elektrotehniko in računalništvo in na Inštitutu Jožef Stefan v Ljubljani pod vodstvom prof. Ivana Bratka. Tako je pri nas v ekologiji oral ledino z uporabo umetne inteligence pri gradnji ekoloških modelov. Od leta 1995 je bil samostojni odgovorni nosilec več temeljnih, aplikativnih in ciljanih (CRP) raziskovalnih programov pri MZT (zdaj MŠZŠ) in MOP. Med letoma 1997 in 2000 je bil vodja raziskovalne skupine Vodogradbeni laboratorij na Inštitutu za hidravlične raziskave – Hidroinštitutu.

Med letoma 2004 in 2007 je bil vodja raziskovalno-razvojnega projekta Biološke metode čiščenja odpadnih voda v okviru Centra odličnosti Okoljske tehnologije (nosilec IJS). V letih 2006 do 2009 pa je bil nacionalni koordinator EU-projekta ScoreP.

Na sposobnost in uspešnost reševanja znanstvenih problemov kažejo njegova objavljena in recenzirana pomembna dela v domačih in predvsem v tujih znanstvenih SCI-revijah, ki jih je skupaj 40. Imel je več vabljenih predavanj doma in v tujini, naj jih naštejemo le nekaj: New methods and their application in ecosystem analysis (1993), The Environmental Management Issues Related to the Lake of Bled (1995), The Application of Artificial Intelligence in Environmental Sciences and Modelling (1995); vse tri na danski kraljevi šoli za farmacijo, Köbenhavn, več predavanj v okviru TEMPUS-ovega projekta: The use of artificial intelligence in ecological modelling: An overview of Successful applications (Uporaba umetne inteligence pri ekološkem modeliranju: Pregled uspešnih rešitev), The Tenth International Conference on State-of-the-Art of Ecological Modelling, ISEM '95 (Deseta mednarodna konferenca o najnovejših dosežkih v ekološkem modeliranju ISEM '95), 11.–15. 8. 1995, Peking, Kitajska, o uporabi umetne inteligence pri ekološkem modeliranju na Univerzi Zvezne vojske v Münchnu, 1997, Management training for municipal water authorities in the Danube River basin. Phase III, International conference, 1997, TIMCED, Ploiesti, Romania.

Bil je tudi urednik in sourednik pri več tujih in domačih revijah, kot so International Journal on Ecological Modelling and Systems Ecology, ELSEVIER, Amsterdam, Nizozemska, Acta Hydrotechnica, Web Ecology, pri American Bibliographic Institute (ABI), WIT (Wessex Institute of Technology, GB), 1. sf International Conference on Environmental Restoration, 1997, CD, Ljubljana, Goljevščkovi dnevi med letoma 1998 in 2007 idr.

V Cobissu ima vpisanih 808 znanstvenih, pedagoških in strokovnih del.

Bil je predstojnik hidrotehnične smeri in Inštituta za zdravstveno hidrotehniko.

Poslovili smo se od spoštovanega in dragega kolege le v fizičnem smislu, med nami pa bo živel s svojimi deli in dejanji, na katera smo v slovenskem prostoru lahko resnično ponosni.

Hvala, Boris!

izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.

GEOMEHANSKE NUMERIČNE ANALIZE VPLIVOV GRADNJE PREDOROV NA POVRŠINO

GEOMECHANICAL NUMERICAL ANALYSES OF TUNNEL CONSTRUCTION INFLUENCES ON THE GROUND SURFACES

mag. Marko Venta, univ. dipl. inž. rud. in geoteh.

RGP, d. o. o., Rudarska 6, 3320 Velenje

prof. dr. Jakob Likar, univ. dipl. inž. rud. in geoteh.

asist. Tina Marolt, univ. dipl. inž. rud. in geoteh.

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta,

Oddelek za rudarstvo in geotehnologijo

Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 519.6:624.19

Povzetek | Z razvojem informatike so bile možnosti izvedbe poglobljenih geomehanskih analiz z uporabo numeričnih metod veliko večje, tako da je tovrstna programska oprema postala nepogrešljivo orodje pri načrtovanju podzemnih objektov v različnih hribinskih okoljih. V praksi se pri uporabi numeričnih analiz pogosto srečujemo s problematiko vhodnih parametrov in robnih pogojev. Premalo natančno vedenje o njihovem vplivu na rezultate izračunov lahko privede do napačne interpretacije in posledično do nestrokovnih zaključkov pri projektiranju podzemnih objektov. Raziskave vpliva vhodnih parametrov na rezultate izračunov deformacij na površini in obremenitev v oblogi podzemnega objekta so bile opravljene v obliki parametričnih numeričnih analiz 2D in 3D z uporabo programskih paketov Midas GTS 2013 in Midas GTS NX. Analizirani so bili vplivi robnih pogojev, gostote mrež in primarnega napetostnega stanja na računsko določene pomike in napetosti v sistemu hribina–podporje. Postopki modeliranja 2D in 3D z uporabo različnih elastoplastičnih konstitutivnih modelov so bili preverjeni na dveh praktičnih primerih gradnje predorov v različnih geotehničnih razmerah. Narejena je bila primerjava med rezultati izračunov analiz 2D in 3D z uporabo Mohr-Coulombovega in Hardening-Soil konstitutivnega modela plastičnega tečenja. Vrednosti izračunanih pomikov so bile primerjane z rezultati meritev, ki so bile pridobljene med gradnjo dveh cestnih predorov.

Ključne besede: cestni predor, numerična analiza, metoda končnih elementov, konstitutivni model, posedek, deformacija.

Summary | With the development of information technology, the possibilities of a detailed geomechanical analysis with the application of numerical methods have become an indispensable design tool for underground structures in different ground. Using numerical analyses, we often come across with input parameters problems and boundary conditions. Too little awareness of the influence on analysis results of the latter can easily lead us to an incorrect interpretation of the performed analyses and consequently inappropriate input parameters for underground structure design. With the purpose to research the influences of input parameters on ground deformation and structural forces in lining results, several 2D and 3D parametric analyses have been performed. The influence of boundary conditions, mesh density and initial stress on calculated movements and stresses in ground-support system has been researched.

2D and 3D modelling procedures with different elasto-plastic constitutive models have been verified on the case study of two tunnels, which were constructed in different geotechnical conditions. A comparison has been made between the results of 2D and 3D analyses by using the Mohr Coulomb and Hardening Soil models. The calculated deformation values have been compared with the measurements that were carried out during the construction of two road tunnels.

Key words: numerical analysis, finite element method, constitutive model, surface settlement, deformation.

1 • UVOD

Pri projektiranju podzemnih objektov je pomembno poznavanje osnovnih mehanizmov nastanka in razvoja deformacij v bližini objekta in na površini kot tudi poznavanje interakcije med samonosilnostjo hribine in obremenitvami v podpornem sistemu. Posedki na površini in obremenitve v vgrajenih podpornih elementih podzemnega prostora so bistveni podatki, ki posredno določajo hitrost izkopa in vgradnje ter intenzivnost podpiranja med gradnjo podzemnega prostora.

Danes večino geotehničnih problemov analiziramo z uporabo numeričnih metod predvsem z metodo končnih elementov. Poznano je, da na razvoj posedkov na površini in obremenitve v oblogi poleg danih geološko-geotehničnih pogojev gradnje vpliva tudi metoda izkopa in podgradnje podzemnega objekta, zato je bila v numeričnih analizah modelirana faznost gradnje, kar je omogočilo simulacije, ki so se približale dejanskim fazam gradnje podzemnega objekta. Kakovostna uporaba numeričnih analiz zahteva

poleg dobre inženirske presoje in poznavanja geotehnike tudi dobro razumevanje numeričnih analiz, predvsem modeliranja faznosti gradnje, vpliva robnih pogojev, gostote mrež in vhodnih parametrov. Pomembna je tudi izbira primernega konstitutivnega modela, s katerim se določa obnašanje hribine, ki je izpostavljena napetostnim in deformacijskim spremembam med gradnjo podzemnega objekta. Vse analize 2D in 3D so bile narejene s programskima paketoma Midas GTS 2013 in Midas GTS NX. Pri izračunih sta bila upoštevana spremenljiva morfologija terena in vpliv predhodno izvedenih objektov, zato so bili uporabljeni asimetrični modeli.

2 • VPLIVNI PARAMETRI PRI NUMERIČNEM MODELIRANJU

2.1 Vpliv robnih pogojev

Za nadrobnejšo analizo vpliva robnih pogojev je bila opravljena 3D-analiza predora krožnega prečnega preseka premera 8 m, ob upoštevanju zaporednih korakov gradnje na dolžini 80 m. Analizirano je bilo območje dimenzij 88 x 36 x 100 m, diskretizirano z 23.542 volumskimi končnimi elementi. Izbrana sta bila korak izkopa 2 m in višina

nadkritja 16 m. Obnašanje hribine je bilo določeno z elastoplastičnim Mohr-Coulombovim konstitutivnim modelom, ki opisuje linearno elastično idealno plastično obnašanje materialov. Obnašanje obloge iz brizganega betona je določeno z elastičnim konstitutivnim modelom. Vhodni podatki, ki so bili izbrani le za izdelavo primerjalnih analiz, so prikazani v preglednici 1. Upoštevan je princip učinkovitih

napetosti, ki so v obravnavanem primeru enake totalnim napetostim.

Na sliki 1 je prikazan razpored vertikalnih pomikov na površini v vzdolžni ravnini po 80 m dolgem odseku izkopa predora. Razvidna je značilna oblika ugreznine v vzdolžni ravnini, pri čemer lahko opazujemo nekoliko manjše vrednosti vertikalnih premikov (11 mm) zaradi vpliva robnih pogojev v dolžini 30 m, nato pa premiki dosežejo normalizirane vrednosti (13 mm). Normalizirane vrednosti so tiste vrednosti, ki so zunaj območja vpliva robnih pogojev.

Ker sega vpliv robnih pogojev na posedke na površini približno 30 m od meje analiziranega območja, je treba modelirati izkop po zaporednih korakih gradnje v precejšnji dolžini, da so rezultati izračunov posedkov na površini realni. Podobno kot je ugotovljen vpliv robnih pogojev na razvoj vertikalnih premikov v vzdolžni ravnini, se lahko pričakuje vpliv robnih pogojev na vertikalne premike tudi v prečni ravnini. Če je izbrano preozko območje analize in krivulja posedkov v prečni ravnini sega v območje vpliva robnih pogojev, so rezultati izračunov ob mejah analiziranega območja prav tako napačni.

Iz analize rezultatov izračuna osnih sil in upogibnih momentov v primarni oblogi, ki so

Parameter	Simbol in Enota	Hribina	Brizgani beton (d=0,2m)
Konstitutivni model		Mohr Coulomb	Elastic
Prostorninska teža	γ (kN/m ³)	24	25
Modul elastičnosti	E (kPa)	35000	20000000
Poissonov količnik	ν (/)	0,25	0,15
Kohezija	c (kPa)	80	
Kot notranjega trenja	φ (°)	28	
Kot dilatacije	ψ (°)	0	

Preglednica 1 • Vhodni podatki za M-C konstitutivni model pri 3D-analizi normaliziranih vrednosti

prikazani v vzdolžni ravnini, je ugotovljeno, da se vrednosti obremenitev v oblogi za vsak podgrajen segment spreminjajo. Na vsakem segmentu obloge je ugotovljen velik upad osnih sil in momentov od maksimalne vrednosti na sprednjem delu segmenta do minimalne vrednosti na zadnjem delu segmenta (slika 2).

Spremenljive vrednosti so posledica preazopreditev napetosti okrog čela izkopa. Pri izkopu se dogajajo največje spremembe napetostnih stanj predvsem v prednjem delu nepodprtega dela koraka izkopa, kjer se z razvojem deformacij aktivira samonosilnost hribine. Po vgradnji obloge nastajajo večje obremenitve obloge v prednjem delu vgrajenega podpornega segmenta (Brinkgreve, 2005).

Če opazujemo povprečne vrednosti osnih sil in momentov v oblogi, lahko opazimo, da prav tako kot pri vertikalnih pomikih nastaja tudi tukaj vpliv robnih pogojev v dolžini približno 30 m, dokler niso dosežene normalizirane vrednosti.

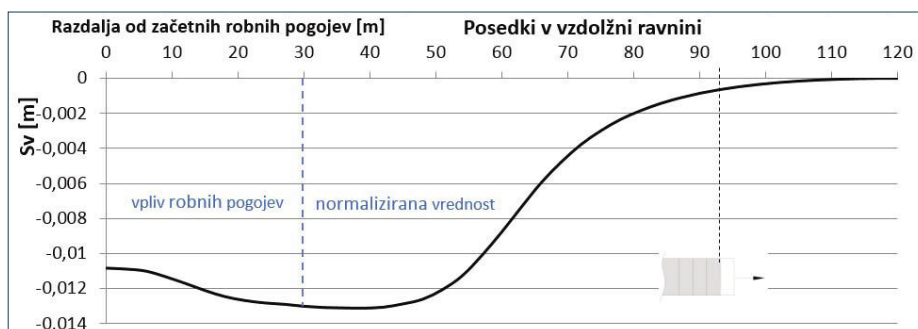
2.2 Vpliv gostote mreže končnih elementov

Gostota mreže v 2D-analizah

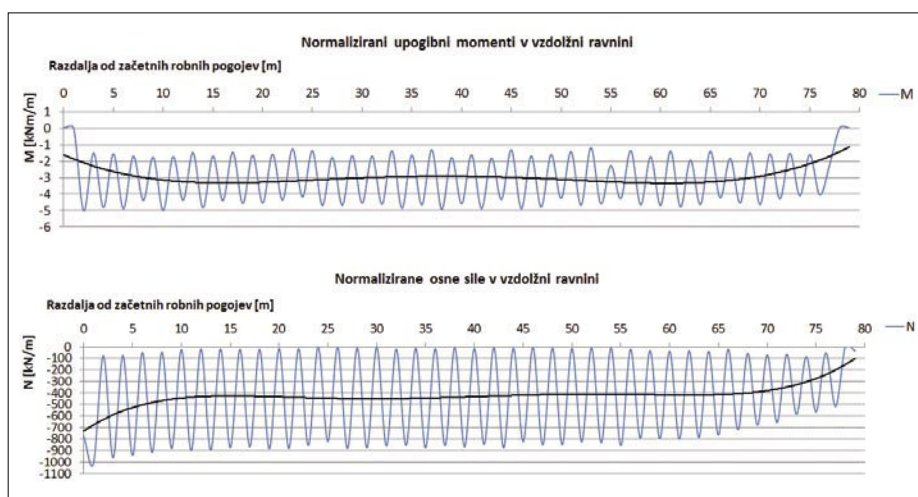
Analiza vpliva gostote mreže končnih elementov pri 2D-analizah na zanesljivost rezultatov izračunov je bila narejena s parametričnim spreminjanjem gostote mrež. Analizirano je območje dimenzij 88 x 36 m s predorom krožnega preseka premera 8 m in višino nadkritja 16 m. Geometrija modela je prikazana na sliki 3. Obnašanje hribine je bilo določeno z nelinearnim elastoplastičnim Hardening-Soil konstitutivnim modelom, ki omogoča izračun deformacij s pomočjo deformacijskih modulov, odvisnih od napetostnega stanja v fazi primarnega obremenjevanja kot tudi razbremenjevanja in ponovnega obremenjevanja, ter upošteva nelinearno elastičnoplastično obnašanje (hiperbolični model). Utrjevanje je izotropno in je odvisno tako od plastičnih strižnih kot od volumskih deformacij.

Obnašanje obloge iz brizganega betona je določeno z elastičnim konstitutivnim modelom. Vhodni podatki, ki so bili izbrani, so prikazani v preglednici 2.

Narejeni so bili izračuni s štirimi različnimi gostotami mrež končnih elementov. V prvem primeru je bila velikost elementov 4–8 m, v drugem primeru je bila velikost elementov 2–6 m, v tretjem primeru je bila velikost elementov 1–4 m, v četrtem primeru pa je bila velikost elementov 0,5–3 m. Uporabljeni so bili ravninski elementi trikotne oblike višjega reda (6 vozlišč in 3 integracijske točke).



Slika 1 • Vertikalni pomiki po 80 m izkopa



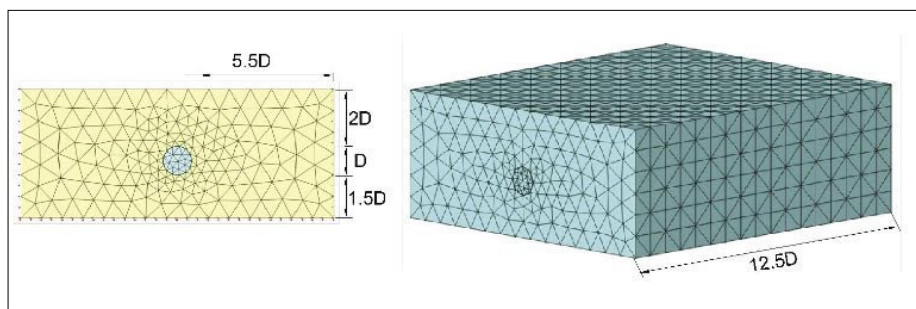
Slika 2 • Spremenljive vrednosti osnih sil in upogibnih momentov v vzdolžni ravnini po 80 m izkopa

Parameter	Simbol in Enota	Hribina	Brizgani beton (d=0,2m)
Materialni model		Hardening Soil	Elastic
Prostorninska teža	γ (kN/m ³)	24	25
Sekantni deformacijski modul	E50 ref (kPa)	40000	20000000
Tangentni edometerski modul	Eoed ref (kPa)	40000	0,15
Modul razbrem./obremen.	Eur ref (kPa)	120000	
Stopnja nap. odvisnosti	m (/)	0,7	
Referenčna napetost	pref (kPa)	100	
Poissonov količnik	ν (/)	0,30	
Faktor horizontalnih napetosti	K0 NC (/)	0,58	
Kohezija	c (kPa)	80	
Kot notranjega trenja	ϕ (°)	28	
Kot dilatacije	ψ (°)	0	

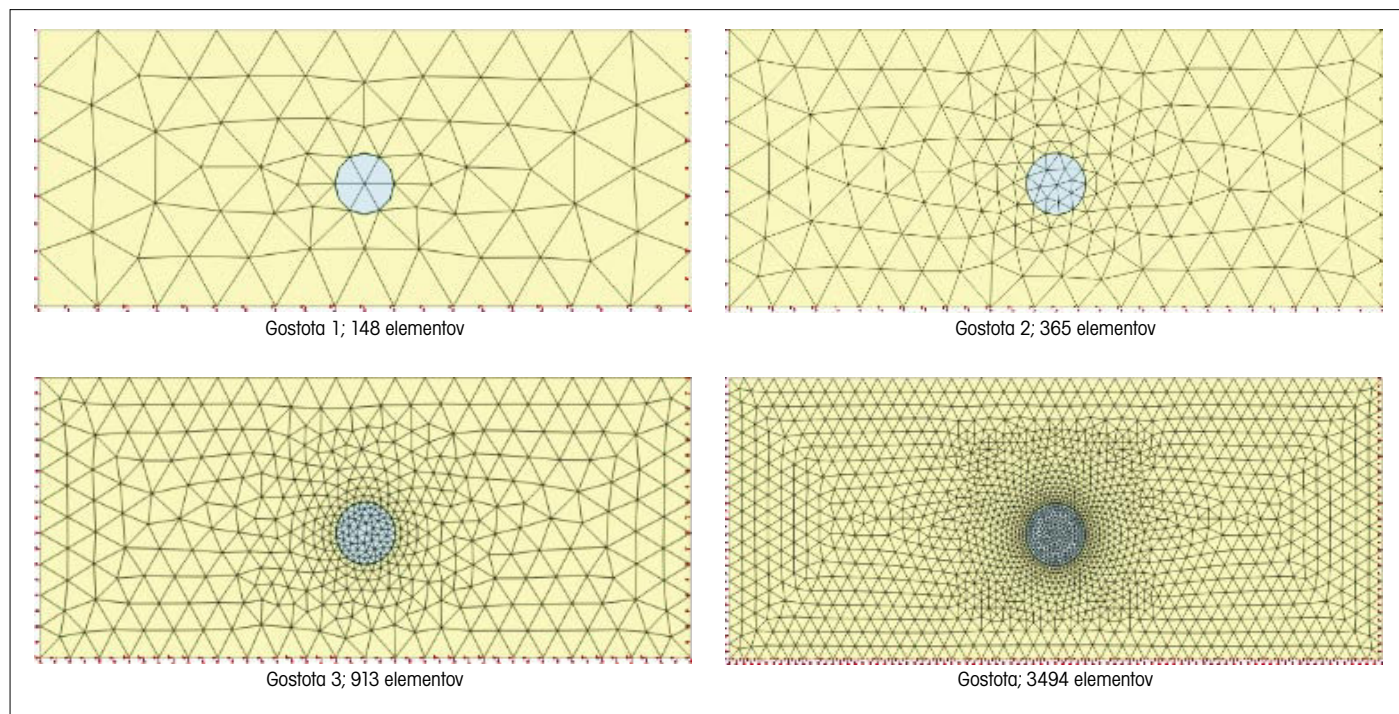
Preglednica 2: Vhodni podatki za H-S konstitutivni model pri 2D in 3D analizi elementov

Faznost gradnje je bila modelirana tako, da je po izračunu primarnega napetostnega stanja v prvi fazi sledil modeliran izkop predora pri faktorju razbremenitve $\beta = 0,5$, v drugi fazi pa vgradnja obloge.

Faktor razbremenitve β običajno uporabimo pri 2D-analizah za pravilno ponazoritev tridimenzionalnih napetostnodeformacijskih odnosov. Pri tej metodi je modelirana vgradnja obloge po določeni vrednosti razbremenitve oziroma relaksacije hribine, ki je posledica nastalih de-



Slika 3 • Geometrija 2D- in 3D-modela pri analizi vpliva gostote mrež

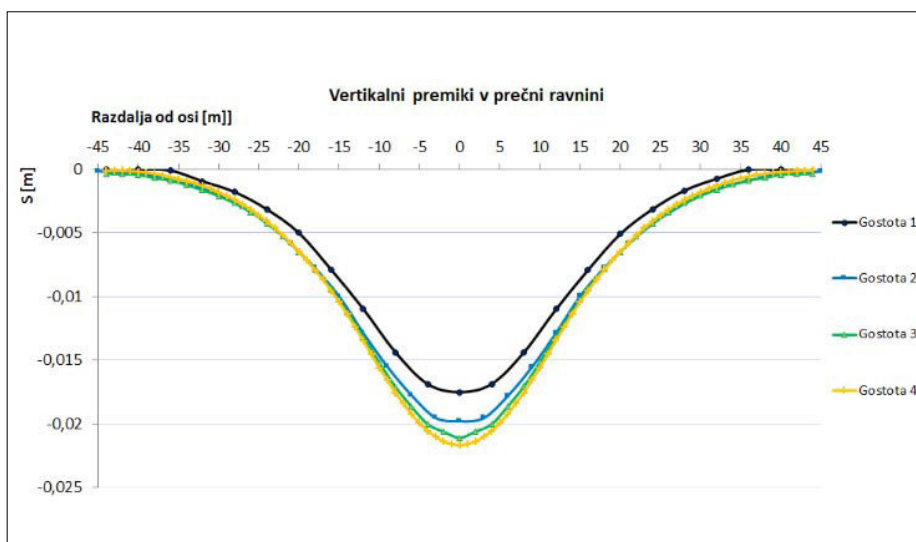


Slika 4 • Različne gostote mrež končnih elementov pri 2D-analizah

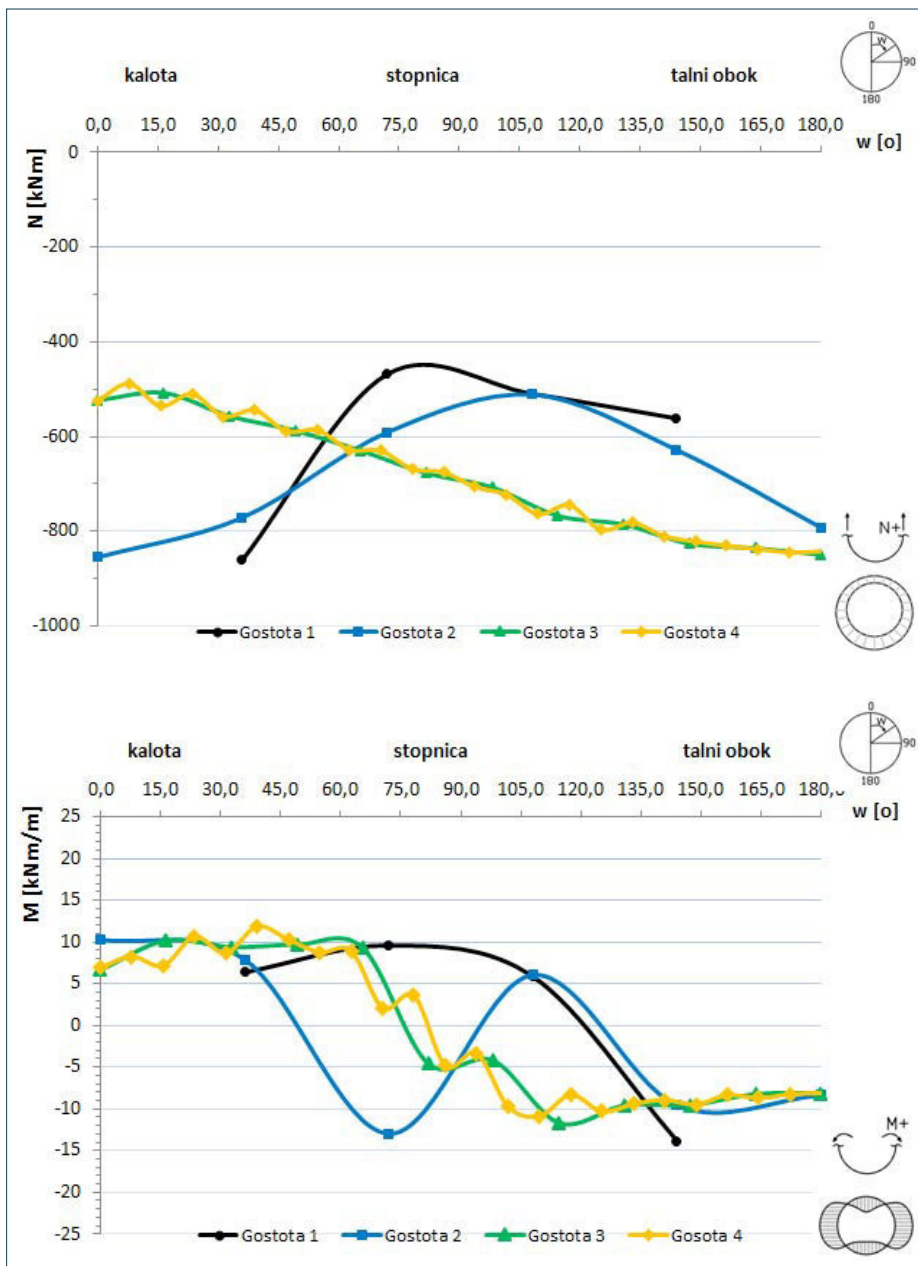
formacij zaradi vgradnje podpornega sistema po določenem času po izkopu. Po izračunu primarnega napetostnega stanja β metoda zajema dve fazi izračuna (Brinkgreve, 2005). Na sliki 5 so prikazani vertikalni pomiki na površini, izračunani z različnimi gostotami mrež. Maksimalna vrednost vertikalnih pomikov pri gostoti mreže 1 (148 elementov) znaša 17 mm, pri gostoti mreže 2 (365 elementov) 20 mm, pri gostoti mreže 3 (913 elementov) 23,5 mm in pri gostoti mreže 4 (3494 elementov) 24 mm.

Ugotovimo lahko, da so pri gostoti mreže 1 in gostoti 2 vertikalni premiki nekoliko podcenjeni, pri gostoti mreže 3 in 4 pa se vrednosti dobro ujemajo.

Na sliki 6 so prikazani osne sile in upogibni momenti v primarni oblogi po izračunih z različnimi gostotami mrež. Pri primerjavi lahko



Slika 5 • Vrednosti vertikalnih pomikov na površini pri različnih gostotah 2D-mrež

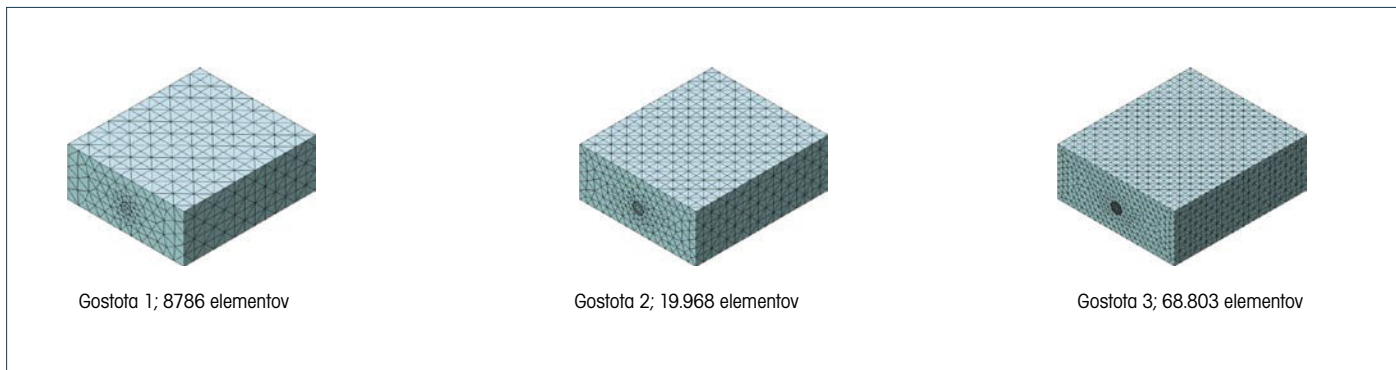


ugotovimo, da pri mrežah gostote 1 in gostote 2 osne sile in upogibni momenti precej odstopajo od izračunov pri mrežah gostote 3 in gostote 4. Izračuni pri mrežah gostote 3 in 4 pa se med seboj dobro ujemajo. To pomeni, da je v danem primeru pri 2D-analizi osnih sil in upogibnih momentov v oblogi s programskim paketom Midas GTS za zadovoljive rezultate potrebna diskretizacija v območju obloge s končnimi elementi maksimalne velikosti 1 m oziroma ene osmine premera predora ($0,125 \times D$) (Midas, 2014). Na ta način je na voljo dovolj vozlišč končnih elementov, ki so potrebna za pravilni izračun obremenitev v notranji oblogi. Če je območje diskretizirano z večjimi elementi, je vozlišč premalo in rezultati niso zadovoljivi.

Gostota mreže v 3D-analizah

Raziskave vpliva gostote mreže končnih elementov v 3D-analizah so bile narejene s parametrično študijo različnih gostot mrež. Uporabljena je bila geometrija in diskretizacija mrež kot pri 2D-analizah, ekstrapolirana v vzdolžni smeri v dolžini 100 m. Izbran je korak izkopa 2 m, modeliranje izkopa in podgradnje je izvedeno po zaporednih korakih gradnje v dolžini 60 m (slika 3). Narejeni so bili izračuni s tremi različnimi gostotami mrež. Uporabljeni so bili prostorski elementi v obliki pentaedra višjega reda (15 vozlišč in 9 integracijskih točk). V primeru velikosti elementov 0,5–3 m je 3D-mreža vsebovala preko 235.000 elementov, tako da račun v tem primeru zaradi predolgotrajne analize ni bil možen. Na sliki 7 so prikazane različne gostote mrež, ki so bile uporabljene pri 3D-analizah.

Slika 6 • Vrednosti osnih sil in momentov v oblogi pri različnih gostotah 2D-mrež



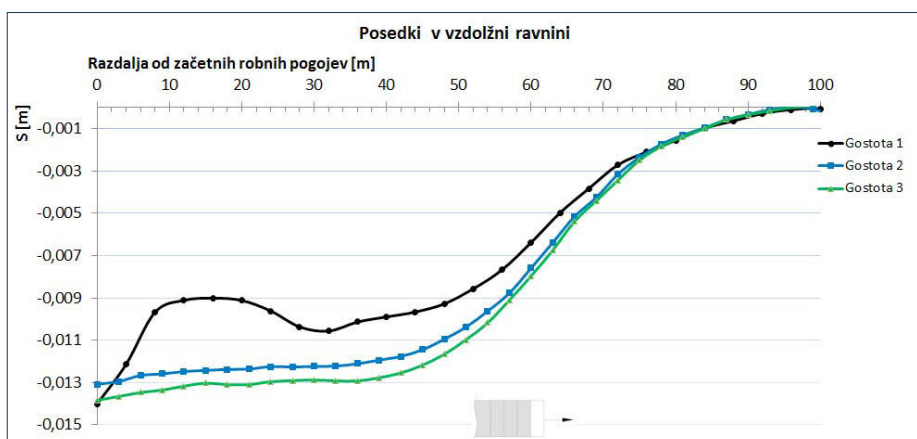
Slika 7 • Različne gostote mrež končnih elementov pri 3D analizah

Na sliki 8 so prikazani vertikalni pomiki na površini v vzdolžni ravnini, izračunani z različnimi gostotami mrež. Normalizirana vrednost vertikalnih pomikov pri gostoti mreže 1 (8786 elementov) znaša 9 mm, pri gostoti mreže 2 (19.968 elementov) 12 mm in pri gostoti mreže 3 (68.803 elementov) 13 mm. Ugotovimo lahko, da so pri gostoti mreže 1 vertikalni pomiki nekoliko podcenjeni, prav tako je opaziti večji vpliv robnih pogojev na vertikalne pomike. Pri gostoti mrež 2 in 3 so razlike med vrednostmi vertikalnih pomikov majhne. Tako kot pri 2D- je imela tudi pri 3D-analizah gostota mreže vpliv na izračun posedkov na površini. Zadovoljivi rezultati so v danem primeru doseženi s končnimi elementi velikosti 2–6 m, za kvalitetnejše rezultate pa je priporočljivo uporabiti končne elemente velikosti 1–4 m.

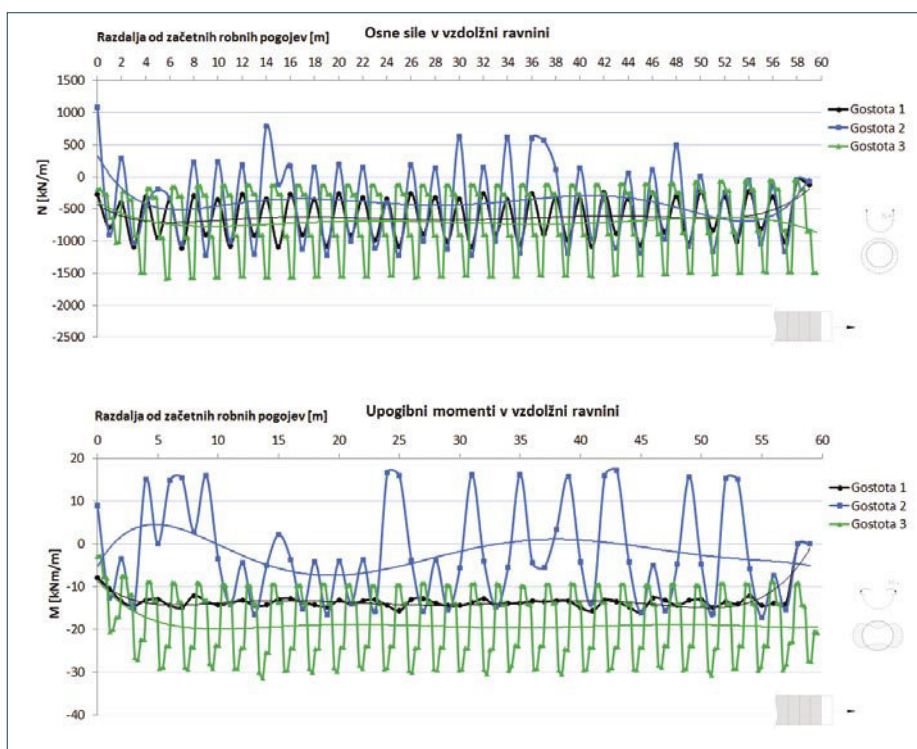
Na sliki 9 so prikazani osne sile in upogibni momenti v oblogi v vzdolžni smeri po izračunu z različnimi gostotami mrež. Za vsak izračun je prikazana tudi povprečna vrednost. Ugotovimo lahko, da podobno kot pri 2D-analizah gostota mreže z velikostjo elementov na območju obloge 4 m in 2 m (gostota 1 in 2) ne da ustreznih rezultatov osnih sil in upogibnih momentov v primarni oblogi. Vrednosti osnih sil in momentov so v vzdolžni ravnini precej spreminjajoče se in ne prikazujejo tipične »žagaste« vrednosti na vsakem segmentu obloge (Brinkgreve, 2005). Pri gostoti 3 z velikostjo elementov na območju obloge 1 m pa lahko opazujemo tipične »žagaste« vrednosti osnih sil in momentov. Razlog nezadovoljivih rezultatov osnih sil in upogibnih momentov pri gostotah mrež 1 in 2 je v premajhnem številu vozlišč in integracijskih točk na vsakem segmentu obloge oziroma koraku podgradnje (Midas, 2014). Pri gostoti mreže 1 so v tem primeru pri uporabi ravninskih elementov trikotne oblike višjega reda z vmesnimi vozlišči, vozlišča samo na začetku in koncu segmenta obloge. Pri gostoti 2 so vozlišča na začetku, na sredini in na koncu segmenta, pri gostoti 3 pa so poleg vozlišč na začetku in koncu segmenta še tri vozlišča na sredini segmenta. Očitno je, da šele v zadnjem omenjenem primeru, kjer sta dva končna elementa v vzdolžni smeri na segment obloge, dobimo zadovoljive rezultate.

2.3 Vpliv faktorja horizontalnih napetosti

Obremenitve v oblogi podzemnega prostora in razvoj deformacij na površini so v veliki meri odvisni od anizotropnosti polja primarnih napetosti, kjer se morata upoštevati tako velikost



Slika 8 • Vrednosti vertikalnih pomikov na površini v vzdolžni ravnini pri različnih gostotah 3D-mrež



Slika 9 • Vrednosti osnih sil in momentov v oblogi v vzdolžni ravnini pri različnih gostotah 3D-mrež

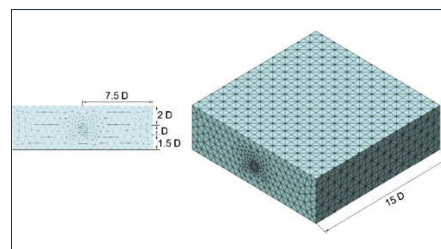
koj lega primarnih napetosti. Raziskani so bili vplivi faktorja K_0 na podoben način kot drugi vplivni parametri, tako da so bile narejene parametrične analize 2D in 3D pri vrednostih faktorja K_0 (0,5; 1,0; 1,25; 1,5 in 2,0). Modelirano je bilo območje 120 x 36 m pri 2D-analizi in 120 x 36 x 120 m pri 3D-analizi s predorom krožnega preseka premera 8 m in višino nadkritja 16 m. 2D-mreža je vsebovala 717 končnih elementov, 3D-mreža pa 23.542 elementov. V 2D-analizah so bili uporabljeni

ravninski elementi velikosti 1–4 m trikotne oblike višjega reda (6 vozlišč in 3 integracijske točke), pri 3D-analizah pa so bili uporabljeni prostorni elementi velikosti 1–4 m v obliki pentaedra višjega reda (15 vozlišč in 9 integracijskih točk).

Izbrani vhodni podatki parametrične analize so prikazani v preglednici 3. Za pravilno ponazoritev tridimenzionalnih napetostnodeformacijskih odnosov so bili pri 2D-analizah uporabljeni različni faktorji razbremenitve β .

Parameter	Enota	Hribina	Brizgani beton (d=0,2 m)
Materialni model		Hardening Soil	Elastic
Prostorninska teža	γ (kN/m ³)	24	25
Sekantni deformacijski modul	E50 ref (kPa)	40000	20000000
Tangentni edometerski modul	Eoed ref (kPa)	40000	0,15
Modul razbrem./obremen.	Eur ref (kPa)	120000	
Stopnja nap. odvisnosti	m (/)	0,95	
Referenčna napetost	pref (kPa)	100	
Poissonov količnik	ν (/)	0,30	
Faktor horiz. napetosti	K0 NC (/)	0,5, 1,0, 1,25, 1,5, 2,0	
Kohezija	c^{\prime} (kPa)	80	
Kot notranjega trenja	φ^{\prime} (°)	28	
Kot dilatacije	ψ (°)	0	

Preglednica 3 • Vhodni podatki za H-S konstitutivni model pri analizi 2D in 3D vpliva faktorja K0



Slika 10 • Geometrija 2D- in 3D-mreže pri analizah vpliva faktorja K0

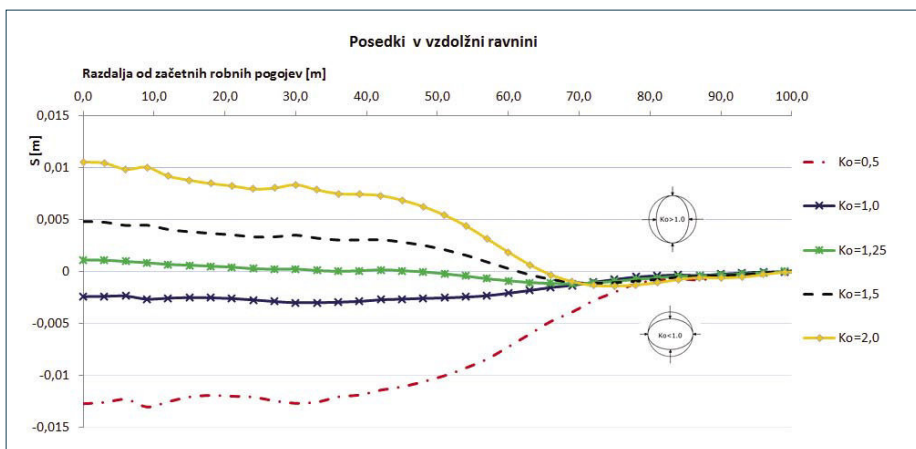
Pri 3D-analizah je bil izbran korak izkopa 2 m, modeliranje izkopa in podgradnje je bilo izvedeno po zaporednih korakih gradnje v dolžini 60 m.

Rezultati parametrične analize 3D pri različnih vrednostih faktorja K_0 po simulaciji 60 m izkopa in primarnega podpiranja kažejo na velik vpliv faktorja K_0 na razvoj posedkov na površini. Na sliki 11 so prikazane krivulje vertikalnih pomikov v vzdolžni ravnini po 60 m dolgem izkopu.

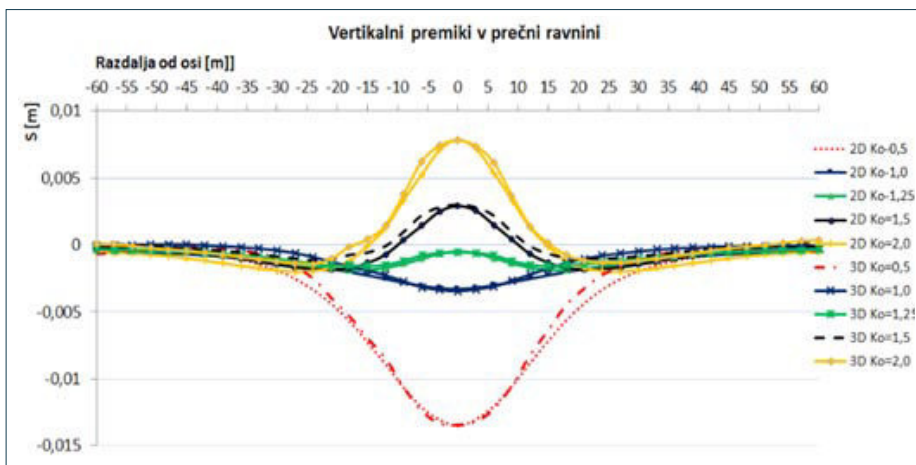
V strokovni literaturi ni poznanega primera, kjer bi meritve premikov na površini kazale na dviganje tal pri gradnji podzemnih prostorov v hribinah z večjimi vrednostmi faktorja K_0 . Če se možnost tega pojava ocenjuje z geomehanskega stališča, bi pozitivni premiki teoretično lahko obstajali. Pri vrednostih $K_0 > 1$ so vrednosti glavnih napetosti večje v horizontalni kot v vertikalni smeri, tako da nastajajo večje deformacije v horizontalni smeri, kot je razvidno na sliki 11 (sploščena oblika obloge predora v vertikalni smeri pri $K_0 < 1$ in horizontalni smeri pri $K_0 > 1$).

Na sliki 12 so skupaj prikazani izračunani vertikalni pomiki v prečni ravnini za izvedene analize 2D in 3D pri različnih vrednostih faktorja K_0 . Vertikalni pomiki pri 3D-analizi so prikazani v prečni ravnini na razdalji 36 m od začetnih robnih pogojev, ki je v območju normaliziranih posedkov. Podobno kot pri prikazu vertikalnih pomikov v vzdolžni ravnini so z večanjem vrednosti faktorja K_0 ugreznine plitvejšje in širše. Pri vrednosti $K_0=1,5$ in 2,0 dobimo pozitivne vertikalne pomike na območju nad predorom, in sicer 10 m od osi pri $K_0 = 1,5$ in 15 m od osi pri $K_0 = 2,0$, dalje od osi pa se zopet pojavijo posedki. Pri primerjavi krivulj ugreznin z analizami 2D in 3D lahko razberemo, da so pri vrednostih $K_0 = 0,5$ in $K_0 = 1,0$ krivulje 3D-analiz ožje (bolj strme), pri vrednostih $K_0 = 1,25$ so krivulje enake, pri vrednostih $K_0 = 1,5$ in $K_0 = 2,0$ pa so ožje krivulje dobljene z 2D-analizami.

Faktor K_0 ima občuten vpliv tudi na osne sile in upogibne momente v oblogi. Pri $K_0 = 0,5$ zara-



Slika 11 • Vertikalni pomiki v vzdolžni ravnini po 60 m izkopa



Slika 12 • Vertikalni pomiki analiz 2D in 3D v prečni ravnini

di večjih deformacij v vertikalni smeri prihaja do sploščenosti obloge predora v vertikalni smeri oziroma do upogibanja obloge navzven v bokih predora, kar povzroči negativne upogibne momente. Narejena je bila primerjava upogibnih momentov in osnih sil, izračunanih z analizami 2D in 3D pri različnih vrednostih faktorja K_0 . Pri 3D-analizah so rezultati zeti na sprednjem in zadnjem delu segmenta obloge, ki leži v območju normaliziranih vrednosti. Na sliki 13 so prikazani rezultati izračunov osnih sil in upogibnih momentov z analizami 2D in 3D pri različnih vrednostih faktorja K_0 .

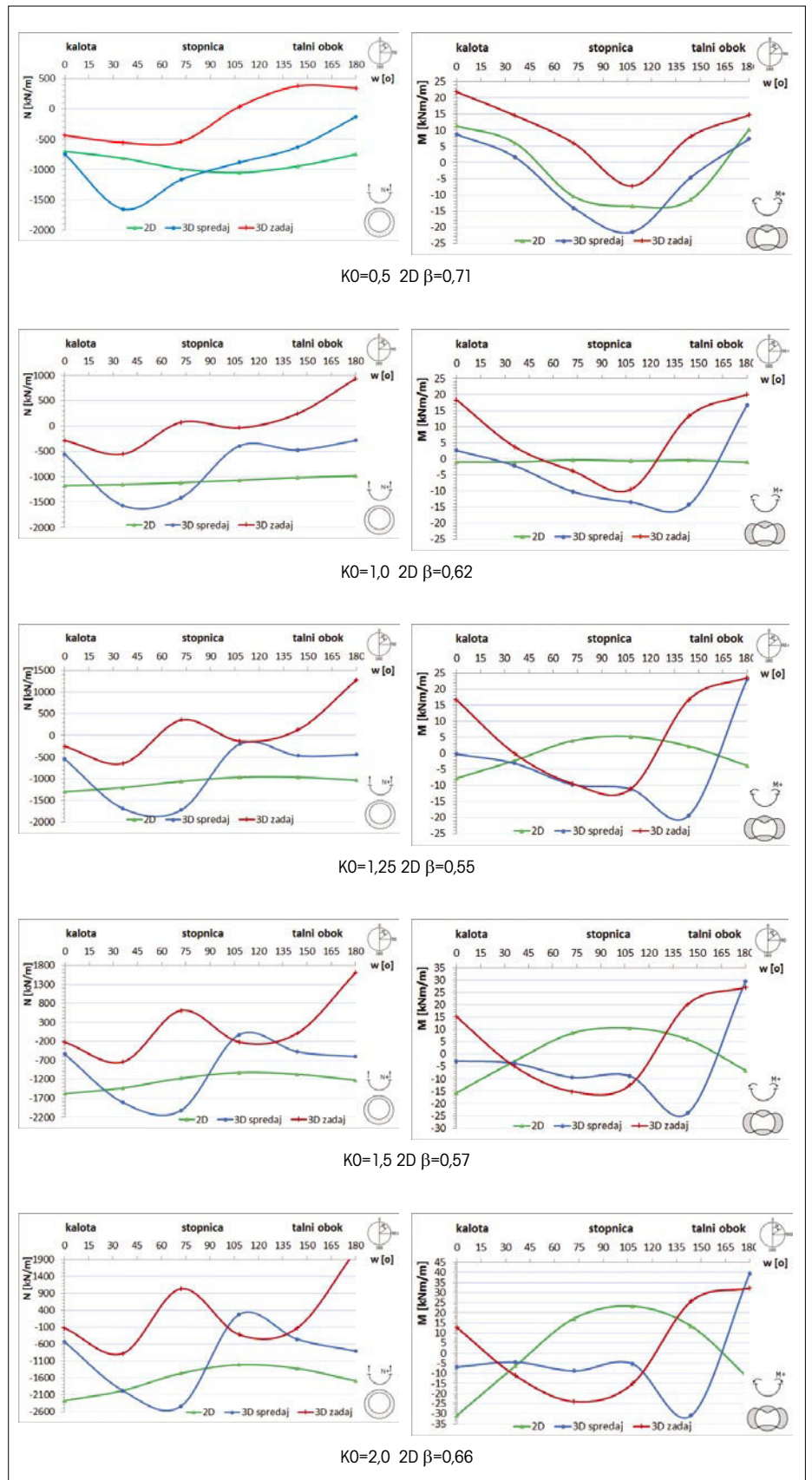
Analiza izračunanih upogibnih momentov v 2D-simulacijah pokaže, da imajo pri $K_0 = 0,5$ pozitivni upogibni momenti vrednost 10 kNm/m na območju kalote in talnega oboka zaradi pomikanja obloge v notranjost predora, na območju stopnice pa imamo negativne momente -14 kNm/m zaradi pomikanja obloge navzven. Pri $K_0 = 1,0$ imajo upogibni momenti na območju kalote, stopnice in talnega oboka vrednost okrog 0 kNm/m.

Primerjava med upogibnimi momenti, izračunanimi z analizami 2D in 3D, pokaže ujemanje samo pri faktorju $K_0 = 0,5$, pri večjih vrednostih K_0 pa so upogibni momenti, izračunani s 3D -modelom, na območju kalote in talnega oboka manjši, na območju stopnice pa večji kot pri 2D-modelu.

Izračunane osne sile z 2D-modelom imajo podobne vrednosti kot pri upogibnih momentih pri $K_0 = 0,5$ manjše osne sile, -700 kN/m, so na območju kalote in talnega oboka, na območju stopnice pa so ugotovljene večje osne sile -1050 kN/m. Pri $K_0 = 1,0$ so osne sile na območju kalote, stopnice in talnega oboka okrog -1100 kN/m.

Primerjava med osnimi silami, izračunanimi z modeloma 2D in 3D, pokaže, da so nižje vrednosti, dobljene s 3D-modelom, na prednjem delu segmenta obloge, medtem ko so oblike krivulj precej bolj spreminjajoče.

Nadaljnje primerjave pokažejo, da je z uporabo ustreznega faktorja razbremenitve β pri 2D-analizah ujemanje rezultatov posedkov na površini, pridobljenimi s 3D-analizami, relativno ustrezno.



Slika 13 • Primerjava osnih sil in upogibnih momentov 2D in 3D analiz pri $K_0 = 0,5, 1,0, 1,25, 1,5$ in 2,0

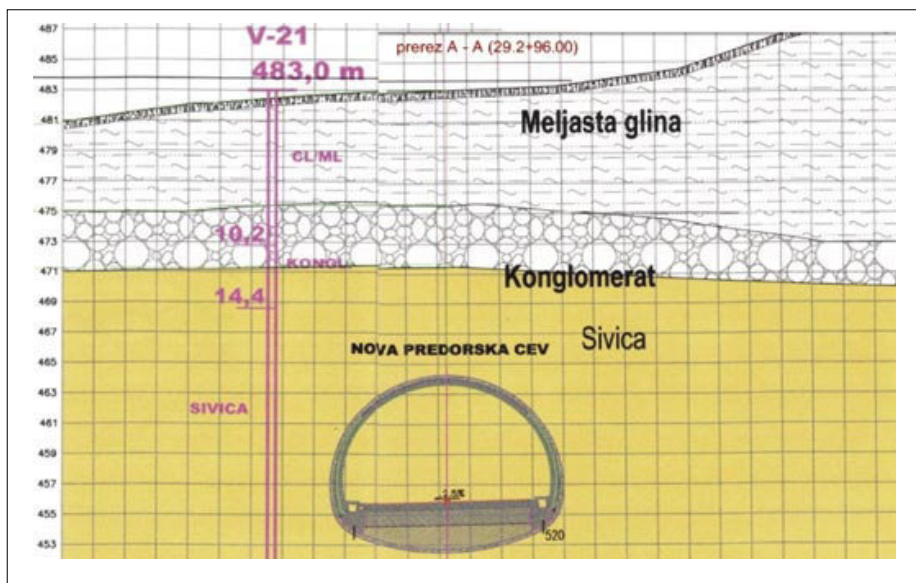
3 • ANALIZA GRADNJE PREDORA LJUBNO

Za potrebe geomehanske analize gradnje dvopasovnega predora Ljubno z odstavnim pasom z nizkim nadkritjem sta bila narejena modela 2D in 3D. Uporabljeni so bili Mohr-Coulombov in Hardening-Soilov konstitutivni model ter primerjava med izračunanimi in merjenimi pomiki, ki so se razvili med gradnjo predora. Predor Ljubno dolžine 232 m je na gorenjskem avtocestnem odseku Peračica–Podtabor. Desna cev predora Ljubno brez talnega oboka je bila zgrajena leta 1965 kot dvopasovni predor. Med letoma 2009 in 2011 je bila izvedena rekonstrukcija obstoječe predorske cevi z razširitvijo profila, ki zagotavlja dvopasovno vozišče z odstavnim pasom. Gradnja je potekala po načelih nove avstrijske metode (NATM) tako, da je vsak izkopni korak vključeval rušitev stare predorske obloge in izkop hribine na predpisan prečni profil, ki mu je sledila vgradnja primarnega podpornega sistema.

Gradnja predora je potekala v plasteh oligocenske sivice, nad katerimi sta v povprečni debelini 1–3 m delno sprijet konglomerat in meljasta glina v največji debelini 13 m. Plasti oligocenske sivice in pleistocenskih prodov, meljev in glin ležijo skoraj horizontalno (IRGO Consulting, 2005), kot je prikazano na sliki 14.

V fazi projektiranja so bile na osnovi laboratorijskih in *in situ* preiskav določene geomehanske karakteristike za posamezne plasti na območju predora Ljubno (pleistocensko glino, konglomerat, sivico in preperino sivico) (IRGO Consulting, 2005). Ker je bilo med gradnjo ugotovljeno, da predstavlja plast sivice trdno kompaktno hribino brez razpok in prisotnosti vode, so bili za plast sivice trdnostni in deformacijski parametri zvišani. V programu RocLab je bila izbrana vrednost geološkega trdnostnega indeksa $GSI = 88$, kar je podalo strižna parametra $c = 0,486$ mPa in $\phi = 46^\circ$. V obstoječi desni predorski cevi predora Ljubno je bila betonska obloga povprečne enoosne tlačne trdnosti 8,2 mPa. Zaradi potencialnega nabrekanja sivice ob prisotnosti vlage so bile opravljene laboratorijske meritve nabrekalnega tlaka. Ugotovljeni so bili povprečni nabrekalni tlaki od 200 do 350 kPa (IRGO Consulting, 2005).

Projekt za izvedbo del (PZI), ki ga je izdelal Geoport, d. o. o. (Geoport, 2009), je vseboval vse detajle podpornih elementov, ki so bili dimenzionirani na podlagi geotehničnih para-



Slika 14 • Geološki prečni prežez na stacionaži 29.2+96.00 (IRGO Consulting, 2005)

Parameter	Enota	Meljasta glina	Konglomerat	Sivica	Stara betonska obloga
Konstitutivni model		Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Elastic
Prostorninska teža	γ (kN/m ³)	20	25	24	25
Modul elastičnosti	E_{ref} (kPa)	5.000	4.000.000	350.000	8.200.000
Poissonov količnik	ν (/)	0,35	0,3	0,3	0,15
Kohezija	c (kPa)	0	500	486	\
Kot notranjega trenja	ϕ (°)	25	40	46	\
Kot dilatacije	ψ (°)	0	10	16	\

Parameter	Enota	Meljasta glina	Konglomerat	Sivica
Konstitutivni model		Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil
Prostorninska teža	γ (kN/m ³)	20	25	24
Sekantni deformacijski modul	$E_{50 ref}$ (kPa)	13.000	4.527.000	311.000
Tangentni edometerski modul	$E_{oed ref}$ (kPa)	13.000	4.527.000	311.000
Modul razbrem./obremen.	$E_{ur ref}$ (kPa)	39.000	13.581.000	933.000
Stopnja nap. odvisnosti	m (/)	0,9	0,5	0,5
Referenčna napetost	p_{ref} (kPa)	100	100	100
Poissonov količnik	ν (/)	0,35	0,30	0,30
Faktor horiz. napetosti	$K_0 NC$ (/)	0,58	0,36	0,48
Kohezija	c (kPa)	0	500	486
Kot notranjega trenja	ϕ (°)	25	40	46
Kot dilatacije	ψ (°)	0	10	16

Preglednica 4 • Vhodni geomehanski parametri za uporabljene konstitutivne modele

metrov nastopajočih hribin (preglednica 4). V pričujočih modelih, ki so omogočili analize in primerjave deformacij, pa so bili upoštevani parametri staranja primarne obloge iz brizganega betona tako, da so bile uporabljene različne mehanske karakteristike za t. i. sveži in strjeni beton. V izračunih so bili upoštevani že izvedeni podporni ukrepi v levi predorski cevi, kjer je bila vgrajena primarna obloga iz brizganega betona debeline 30 cm. Vhodni parametri podpornih elementov so podani v preglednici 5.

Izkop prečnega profila predora je bil razdeljen na kaloto in stopnico s talnim obokom, medtem ko je rušenje stare obloge skupaj z izkopom hribine bilo opravljeno z izkopnim bagrom. Pretežni del izkopa je bil izveden v hribinski kategoriji C2 z litim betonom v talnem oboku po standardu ÖNORM B 2203 (Cosar, 2004). Primarni podporni sistem je bil izdelan iz jeklenih ločnih segmentov K24 in armiranega brizganega betona C20/25 v debelini 30 cm (Geoportall, 2009) (slika 15).

3.1 Geotehnično modeliranje 2D in 3D

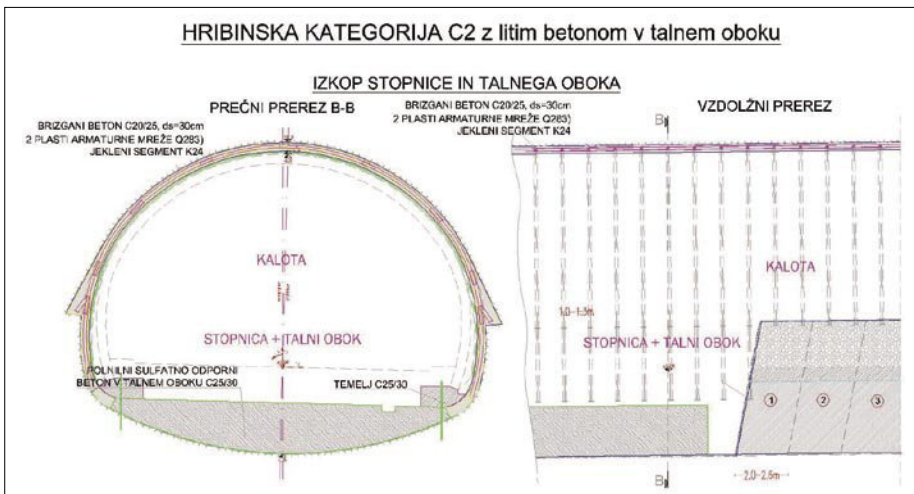
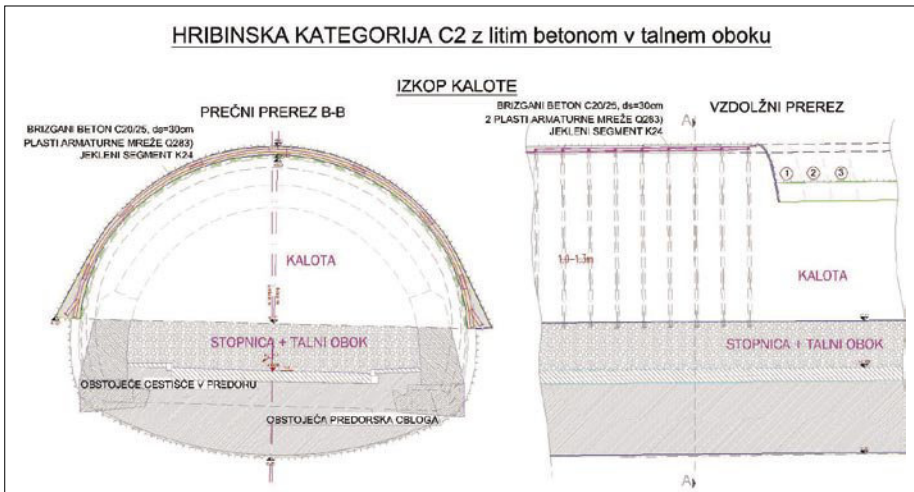
Velikost analiziranega območja je bila izbrana tako, da je bil izločen vpliv robnih pogojev z upoštevanjem območja t. i. normaliziranih vrednosti.

Tako je pri 2D-modelu analizirano območje dimenzij 140 x 50 m (prerez na stac. 29.2+96.00), pri 3D-modelu pa območje dimenzij 140 x 59 x 100 m (območje med stac. 29.2+46.00 in 29.3+46.00). Višina modela je določena s plastnicami terena in se giblje med 45 in 59 m. Geometrija modela je prikazana na sliki 16.

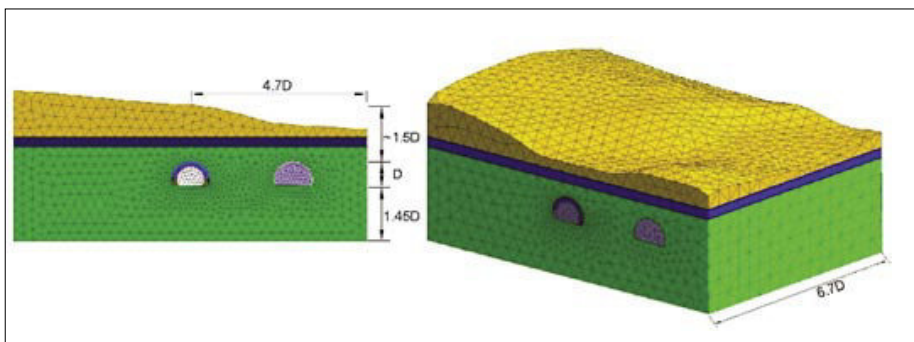
Območje predora je bilo diskretizirano z elementi velikosti 0,75 m, druge pa z elementi velikosti 1,5 do 6 m. 2D-mreža je vsebovala 1471 končnih elementov, 3D-mreža pa 105.507 elementov. Simulacija izkopa in primarnega podpiranja je bila opravljena pri koraku izkopa 1,5 m. Modeliranje faznosti gradnje je bilo izvedeno tako, da so bile zajete vse faze izkopa in vgradnje primarne obloge po zaporednih korakih gradnje kalote in stopnice v vzdolžni smeri. Zaradi obsežnega izračuna pri 3D analizi ob upoštevanju območja normaliziranih vrednosti je bila uporabljena poenostavljena 3D-analiza za izračun posedkov na površini (Brinkgreve, 2005). V eni fazi sta bila modelirana izkop in podgradnja celotnega profila v dolžini 30 m. Po »resetiranju«
deformacij na vrednost nič sta bila nato modelirana izkop in podgradnja kalote v dolžini 15 m, zatem pa vzporeden izkop in podgradnja kalote in stopnice v dolžini 15 m. Vsaka faza

Parameter	Enota	Brizgani beton DC ("svež" d=0,3m)	Brizgani beton DC ("star" d=0,3m)	Brizgani beton LC ("star" d=0,3m)
Konstitutivni model		Elastic	Elastic	Elastic
Prostorninska teža	γ (kN/m ³)	25	25	25
Modul elastičnosti	Eref (kPa)	3.000.000	15.000.000	15.000.000
Poissonov količnik	ν (/)	0,15	0,15	0,15

Preglednica 5 • Togostni parametri podpornih elementov (LC – leva cev, DC – desna cev)



Slika 15 • Hribinska kategorija C2 z litim betonom v talnem oboku – podporni ukrepi (Geoportall, 2009)



Slika 16 • Geometrija 2D- in 3D-modela pri analizi desne cevi predora Ljubno

izračuna kalote in stopnice je vsebovala modeliranje izkopa trenutnega koraka, v kateri so deaktivirani volumski elementi hribine v dolžini koraka izkopa, v isti fazi pa tudi modeliranje podpiranja predhodnega koraka, kjer so aktivirani elementi obloge v predhodnem koraku. Upoštevano je bilo tudi dvostopenjsko strjevanje betona in naraščanje nabrekalnega tlaka sivice. Strjevanje betona je bilo izvedeno z zamenjavo mehanskih karakteristik svežega betona s strjenim betonom, nabrekalni tlak

modelov, kaže na precej manjše deformacije tal predora zaradi razbremenitve pri Hardening-Soilovem modelu, kar gre predpisati temu, da ta model upošteva različno plastifikacijo materiala pri razbremenjevanju in ponovnem obremenjevanju. Podobno velja za nekoliko manjše izračunane deformacije stropa in površine nad predorom. Primerjava med izračuni 2D in 3D kaže na manjše vrednosti vertikalnih premikov na površini pri 3D-izračunih, kar gre pripisati 3D-

jem izkopa vgrajeni vsakih 10 m v oblogo zadnjega koraka podpiranja. Na sliki 17 so prikazane izračunane vrednosti vertikalnih pomikov skupaj z izmerjenimi vrednostmi v vzdolžni ravnini obravnavanega območja za mersko točko v stropu predora (Geograd, 2010). Upoštewane so meritve, ko je bilo čelo izkopa na stacionaži 29,2+81, kar je omogočilo realno primerjavo s simulacijo s 3D-modelom, v kateri je bil simuliran izkop kalote do stacionaže 29,2+80.

MOHR COLOUMB	Uy ↓ (površina) (mm)		Uy ↓ (strop predora) (mm)		Uy ↑ (tla predora) (mm)		Mmax (kNm/m)		Nmax (kN/m)	
<i>IZRAČUN (2D-3D) FAZA GRADNJE</i>										
Izkop kalote	-7	-2	-11	-7	9	6	-33	-16	-1159	-966
Izkop stopnice in talnega oboka	-11	-4	-17	-11	13	9	-41	-20	-1073	-1052

HARDENING-SOIL	Uy ↓ (površina) (mm)		Uy ↓ (strop predora) (mm)		Uy ↑ (tla predora) (mm)		Mmax (kNm/m)		Nmax (kN/m)	
<i>IZRAČUN (2D-3D) FAZA GRADNJE</i>										
Izkop kalote	-5	-1	-8	-5	5	4	-35	-9	-787	-735
Izkop stopnice in talnega oboka	-7	-3	-11	-17	6	5	-40	-12	-784	-839

Preglednica 6 • Vrednosti vertikalnih deformacij, upogibnih momentov in osnih sil

sivice pa je bil modeliran z zvezno radialno obremenitvijo obloge. Oba parametra sta se spreminjala šest korakov za izkopnim čelom, kar je v praksi pri napredku dva koraka na dan pomenilo tri dni. Pri gradnji je bil uporabljen brizgani beton C 20/25 z dodanim pospeševalcem.

Pri 2D-analizi je bila na podlagi primerjalnega 3D-izračuna določena vrednost faktorja razbremenitve $\beta = 0,63$. Pred pričetkom modeliranja faz gradnje desne cevi sta bila v eni fazi modelirana izkop in podgradnja že izgrajene leve cevi, pri čemer so bile izračunane deformacije resetirane na vrednost nič.

3.2 Rezultati izračunov

Primerjava rezultatov izračunov, ki so bili narejeni z upoštevanjem navedenih konstitutivnih

učinku prerazporeditve napetosti in deformacij pri izkopu in primarnem podpiranju.

V preglednici 6 so podane izračunane vrednosti vertikalnih pomikov na površini in v predoru pri posameznih fazah gradnje ter vrednosti upogibnih momentov in osnih sil v oblogi za oba uporabljena materialna modela pri 2D- in 3D-modelu.

3.3 Primerjava izračunov z meritvami

Kontrolo deformacij podpornega sistema in določanje vplivnega območja gradnje desne cevi predora Ljubno so omogočile geotehnične meritve, ki so zajemale tudi vgradnjo merskih točk za opravljanje geodetskih meritev premikov v predoru in na površini. Merski profili so bili v predoru skladno z napredovan-

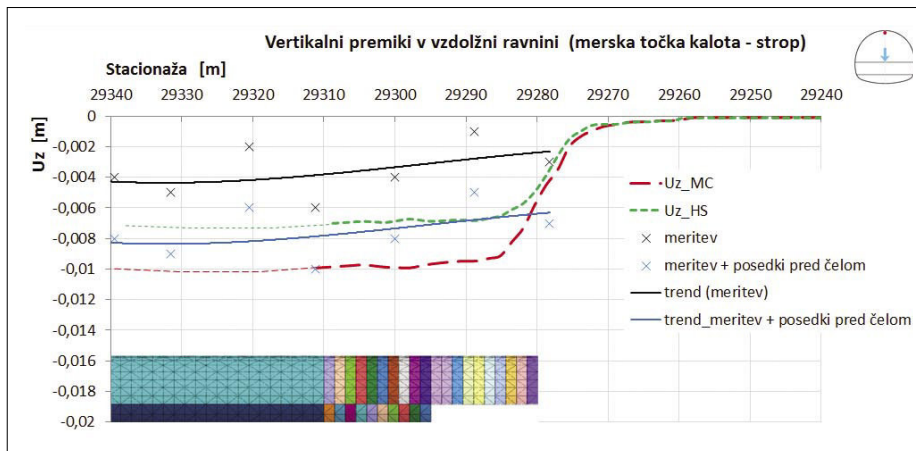
Pri analizi meritev pomikov merskih točk je treba upoštevati tudi razvoj deformacij hribine pred izkopnim čelom, ki pa z navedenimi meritvami ni bil izveden, ker je bila merska točka vgrajena približno 1 m za izkopnim čelom po končani fazi vgradnje podpornega sistema, kot je razvidno na sliki 18.

V danem primeru je bilo na podlagi 3D-izračuna vertikalnih premikov stropa predora v vzdolžni ravnini ocenjeno, da se pred izkopnim čelom razvijejo posedki v velikosti 4 mm.

Če se upošteva posedke pred izkopnim čelom, se meritve najbolj ujemajo z izračunanimi vrednostmi pri uporabi Hardening-Soil modela.

Pri izračunu posedkov v prečni ravnini je pri 3D-izračunu vzeta prečna ravnina 50 m od

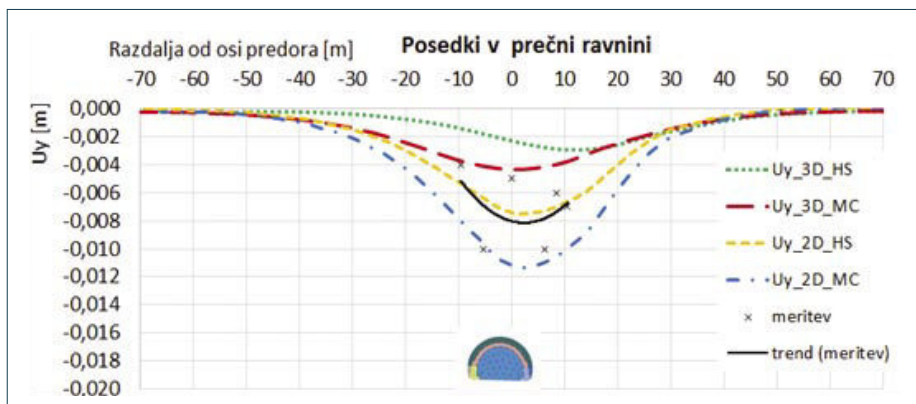
začetnih robnih pogojev (prerez na stacionaži 29,2+96). Zaradi spremenljive morfologije terena (večje debeline nadkritja levo od osi – slika 16) so krivulje posedkov nekoliko zamaknjene glede na predorsko os, kar je še posebno opazno pri 3D-izračunu s Hardening-Soil modelom. Merske točke na površini so bile na območju portalov vgrajene pred izvedenimi izkopsnimi in podpiralnimi deli. Na območju severnega portala so bili izmerjeni vertikalni pomiki površine med 4 mm in 10 mm, v povprečju pa 8 mm (Geograd, 2010). Povprečna vrednost vseh meritev se najbolje ujema s krivuljo posedkov, določeno z 2D-analizo pri uporabi Hardening-Soil modela.



Slika 17 • Vertikalni pomiki stropa predora v vzdolžni ravnini pri 3D-izračunih in primerjava z meritvami



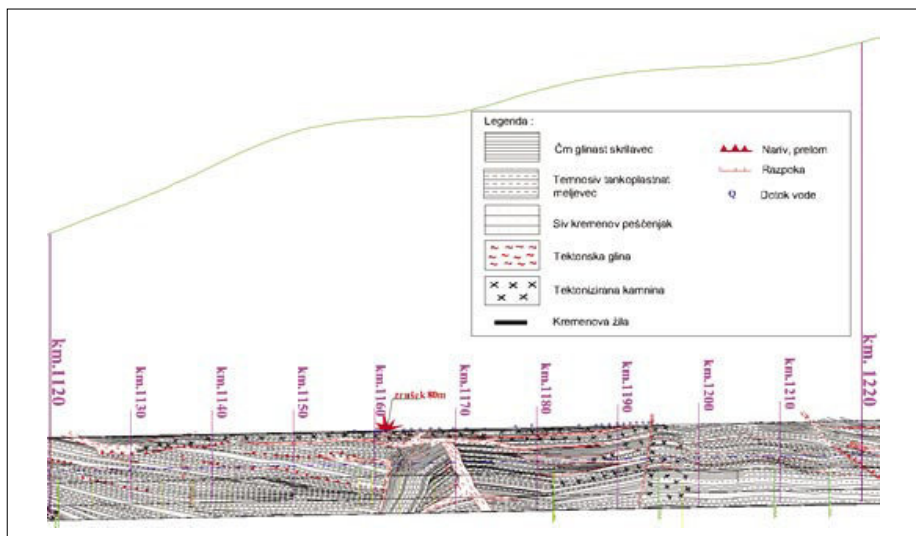
Slika 18 • Prikaz vgrajene merske točke v stropu kalote desne cevi predora (Vir: arhiv SCT, avtor Marko Venta)



Slika 19 • Primerjava meritev s krivuljami posedkov na površini v prečni ravnini pri izračunih 2D in 3D predora Ljubno

4 • ANALIZA GRADNJE PREDORA ŠENTVID

Predor Šentvid je dvocevni predor na avtocestnem odseku Šentvid–Koseze. Gradnja je trajala od 2004.do 2009. Izkop obravnavanega območja leve cevi dvopasovnega predora je potekal skozi tektonizirane kamnine s tektonsko glino, pogostimi prelomi in precejšnjimi dotoki vode (IRGO Consulting, 2005). Analize sprememb deformacijskih polj so bile narejene z geomehanskimi modeli 2D in 3D. Modelirana je bila tudi vgradnja cevnega ščita. V kompleksnih postopkih numerične simulacije izkopa in primarnega podpiranja sta bila uporabljena Mohr-Coulombov in Hardening-Soilov konstitutivni model. Tudi v tem primeru je bila narejena primerjava med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi pomikov med gradnjo določenega odseka predora. Zaradi izjemno zahtevnih geotehničnih razmer gradnje je na stacionaži 1+132,5 in 1+161,5



Slika 20 • Vzdolžni prerez – geološka spremljava leve cevi (IRGO Consulting, 2005)

prišlo do geoloških zruškov. Zrušek velikosti okrog 80 m³ na stac. 1+161,5 je bil povod za sistematično vgrajevanje jeklenega cevnega ščita pri nadaljevanju gradnje. Vzdolžni prerez z interpretirano geološko zgradbo je prikazan na sliki 20.

Pri projektiranju so bile na osnovi laboratorijskih in terenskih preiskav določene geomehanske karakteristike za posamezne plasti na območju predora Šentvid (muljevec in glinovec, meljevec in peščenjak, tektonska cona, preperela hribina) (ELEAIČ, 2005). Pri gradnji je bilo z geološko spremljavo izkopa

leve cevi ugotovljeno, da območje v niveleti predora med stacionažo 1+120,0 in 1+220,0 gradijo tektonizirane kamnine s tektonsko glino, pogostimi prelomi in precejšnjimi dotoki vode (IRGO Consulting, 2005). Tako so bile v širšem območju predorske cevi upoštevane geomehanske karakteristike tektonske cone. V preglednici 7 so podani geomehanski parametri, ki so bili uporabljeni za geomehanske numerične simulacije ob upoštevanju navedenih konstitutivnih modelov. Tudi v tem primeru so bile numerične simulacije narejene z upoštevanjem mehanskih lastnosti svežega

in strjenega brizganega betona. Vhodni parametri podpornih elementov so podani v preglednici 8.

Na analiziranem odseku gradnje je bil izkop predorske cevi deljen na kaloto, stopnico in talni obok. Od stacionaže 1+121,4 do 1+161,5 je potekala gradnja v hribinski kategoriji C3 po standardu ÖNORM B 2203 (Cosar, 2004), od stacionaže 1+161,5 do 1+259,7 pa v modificirani hribinski kategoriji C3, v kateri je bil kot pomožni podporni element za izboljšanje pogojev gradnje in omejitev deformacij uporabljen jekleni cevni ščit. Podporni elementi

Parameter	Enota	Muljevec in glinovec (mu-gs CP)	Meljevec in peščenjak (pem CP)	Tektonska cona (in obm. poleg gube)	Preperela hribina	Injektirana zemljina
Materialni model		Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb
Prostorninska teža	γ (kN/m ³)	27	23	23	27	27
Modul elastičnosti	E _{ref} (kPa)	500.000	1.000.000	100.000	300.000	650.000
Poissonov količnik	ν (/)	0,26	0,25	0,30	0,26	0,26
Kohezija	c (kPa)	50	100	50	20	100
Kot notranjega trenja	φ (°)	25	27	20	26	27
Kot dilatacije	ψ (°)	0	0	0	0	0

Parameter	Enota	Muljevec in glinovec (mu-gs CP)	Meljevec in peščenjak (pem CP)	Tektonska cona (in obm. poleg gube)	Preperela hribina	Injektirana zemljina
Materialni model		Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb
Prostorninska teža	γ (kN/m ³)	27	23	23	27	27
Sekantni deformacijski modul	E50 ref (kPa)	170.000	895.000	35.000	323.000	594.000
Tangentni edometerski modul	E _{oed} ref (kPa)	170.000	895.000	35.000	323.000	594.000
Modul razbrem./obremen.	E _{ur} ref (kPa)	510.000	2.685.000	105.000	969.000	1.782.000
Stopnja nap. odvisnosti	m (/)	0,8	0,5	0,9	0,8	0,5
Referenčna napetost	p _{ref} (kPa)	100	100	100	100	100
Poissonov količnik	ν (/)	0,26	0,25	0,30	0,26	0,26
Faktor horiz. napetosti	K0 NC (/)	0,58	0,50	0,66	0,56	0,50
Kohezija	c (kPa)	50	100	50	20	100
Kot notranjega trenja	φ (°)	25	27	20	26	

Preglednica 7 • Vhodni geomehanski parametri za Mohr Coulombov in Hardening Soil model

Parameter	Enota	Brizgani beton	Brizgani beton	Brizgani beton	Cevni ščit (D=114mm, S=6mm)	IBO sidra (D=28mm)
		(svež, d=0,3m)	(star, d=0,3m)	- raziskovalni rov (d=0,2m)		
Konstitutivni model		Elastic	Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
Prostorninska teža	γ (kN/m ³)	25	25	25	78	78
Modul elastičnosti	E _{ref} (kPa)	3.000.000	15.000.000	15.000.000	210.000.000	210.000.000
Poissonov količnik	ν (/)	0,15	0,15	0,15	0,3	0,3

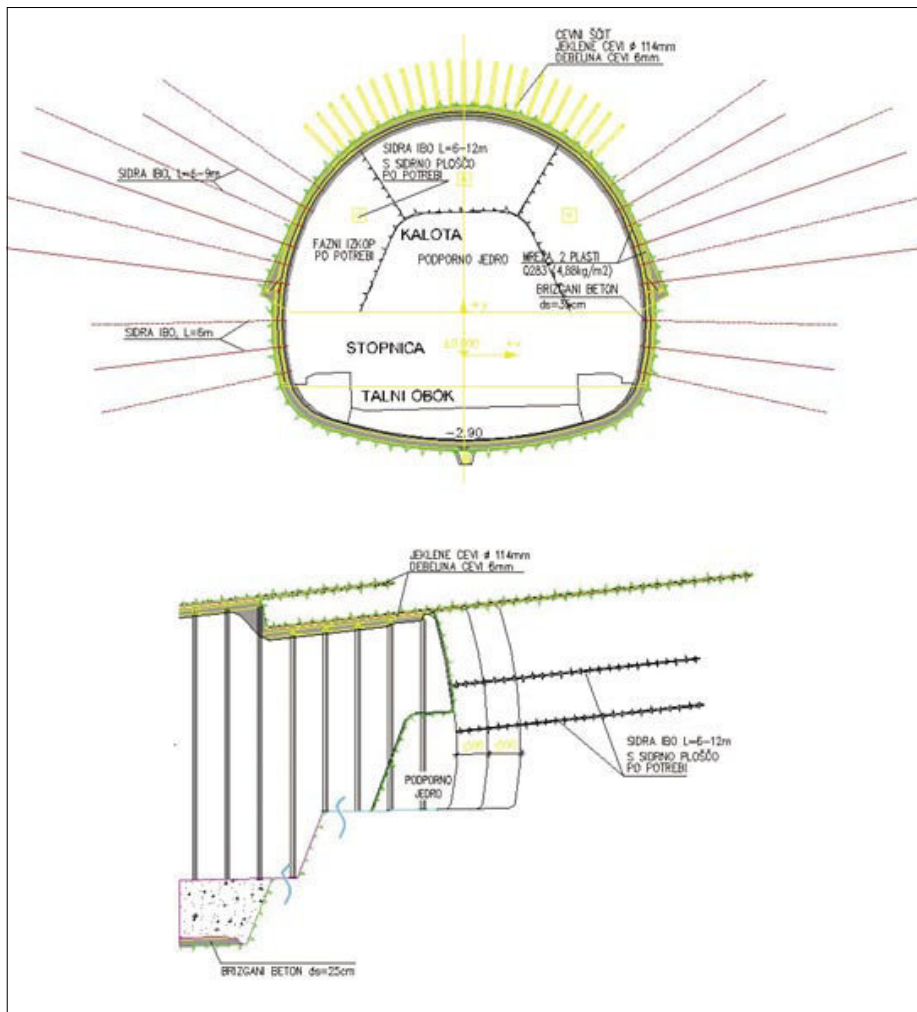
Preglednica 8 • Togostni parametri podpornih elementov

so zajemali armirani brizgani beton C20/25 debeline 30 cm, IBO-sidra dolžine od 6 do 9 m in jeklene segmente TH21 za vsak korak napredovanja (slika 21). Cevni ščit dolžine 15 m je obsegal 23 jeklenih cevi premera 114 mm z debelino stene 6 mm. Cevi so bile vgrajene v temenu predora na razmiku 40 cm (Elea iC, 2005a). Izkop je potekal v fazah s sprotnim varovanjem čela izkopa z armiranim brizganim betonom in IBO-sidri.

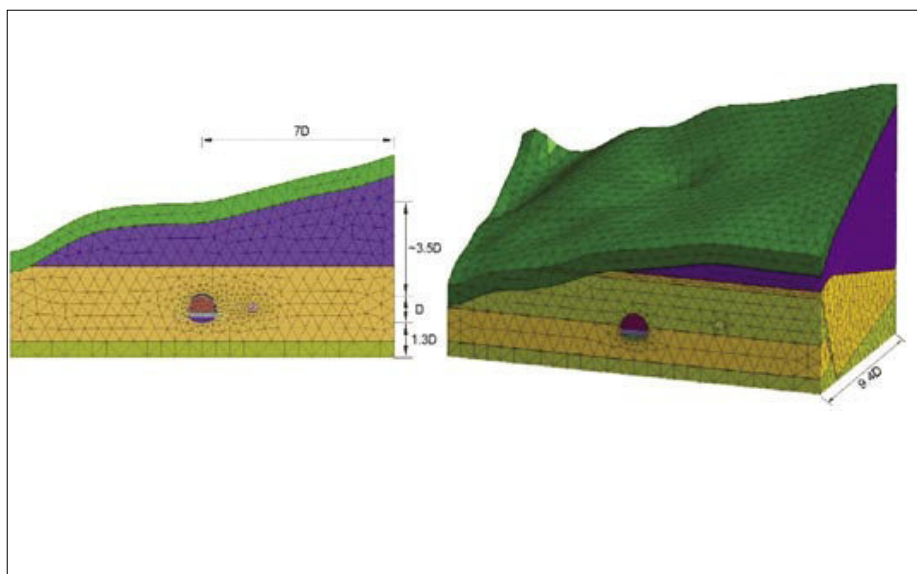
4.1 Geostatični izračuni

Velikost analiziranega območja je bila izbrana tako, da je bil izločen vpliv robnih pogojev ob upoštevanju t. i. normaliziranih vrednosti. Za 2D-model je bilo analizirano območje dimenzij 168 m x 61 m (prerez na stacionaži 1+170,0), za 3D-model pa območje dimenzij 168 m x 98 m x 100 m (območje med stacionažo 1+120,0 in 1+220,0). Višina geotehničnega modela je bila določena s plastnicami terena med 28 in 98 m, medtem ko je model, prikazan na sliki 22, iz katere je razvidno, da je bilo območje predora diskretizirano, z elementi velikosti 0,75 m, drugje pa z elementi velikosti 1,5–6 m. 2D-mreža je vsebovala 1709 končnih elementov, 3D-mreža pa 98.321 prostorskih elementov. Numerična simulacija je bila narejena ob upoštevanju koraka izkopa 1,5 m ob upoštevanju faznosti gradnje, v kateri so bile zajete vse faze izkopa in primarnega podpiranja. 3D-analiza je bila opravljena z upoštevanjem območja normaliziranih vrednosti, za izračun posedkov na površini pa sta bila uporabljena poenostavljena 3D-analiza (Brinkgreve, 2005) in dvostopenjsko strjevanje brizganega betona. Od stacionaže 1+160,0 naprej je bila modelirana vgradnja cevnega ščita in injektiranje hribine v območju cevnega ščita. Upoštevana je bila vgradnja cevnega ščita dolžine 15 m s prekritjem 5 m. Modelirane so bile jeklene cevi premera 114 mm z debelino stene 6 mm, vgrajene v temenu predora na razdalji 40 cm. Pri faznosti gradnje sta bila upoštevana tudi časovni potek strjevanja brizganega betona in injektiranje hribine v območju cevnega ščita z zamenjavo mehanskih karakteristik hribine v območju injektiranja.

Pri 2D-analizi je bila na podlagi primerjalnega 3D-izračuna določena vrednost faktorja razbremenitve $\beta = 0,55$. Pred pričetkom modeliranja faz gradnje dvopasovnega predora sta bila v eni fazi modelirana izkop in podgradnja že zgrajenega raziskovalnega rova, pri čemer so bile izračunane deformacije resetirane na vrednost nič.



Slika 21 • Hribinska kategorija C3 modificirana – podporni ukrepi (Elea iC, 2005)



Slika 22 • Geometrija 2D- in 3D-modela pri analizi leve cevi predora Šentvid

4.2 Rezultati geostatičnih numeričnih analiz

Rezultati izračunov numeričnih simulacij gradnje predora z upoštevanjem navedenih konstitutivnih modelov kažejo, da je vzrok v precej manjših deformacijah tal predora v vplivu Hardening-Soil modela, v katerem se upoštevajo različne deformabilnostne lastnosti hribine pri razbremenjevanju in

ponovnem obremenjevanju. Primerjava med rezultati izračunov z 2D- in 3D-modelom pokaže, da so vrednosti vertikalnih pomikov na površini pri 3D-izračunih manjše v primerjavi z 2D-modelom. To je posledica prostorskega učinka računske prerazporeditve napetostnega in deformacijskega stanja v okolici simulacije napredovanja izkopa in

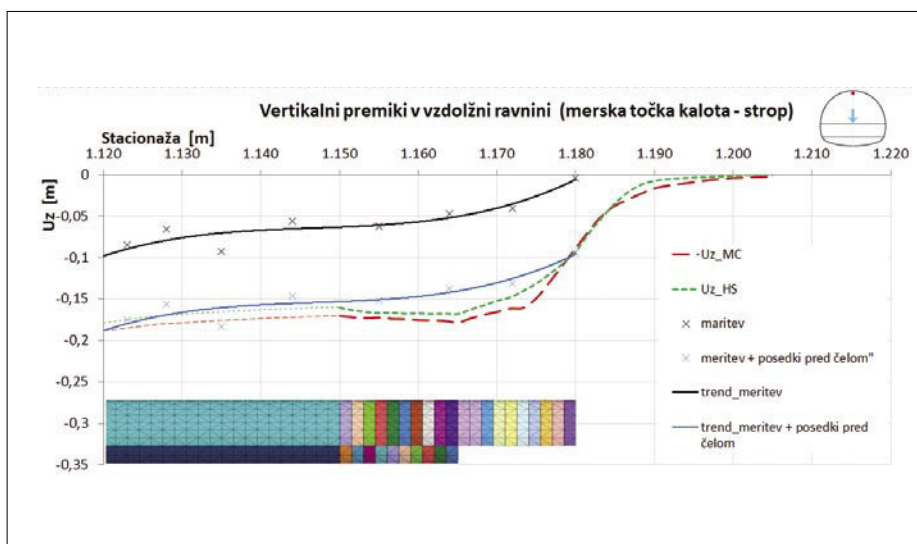
sprotne vgradnje primarnega podpornega sistema.

V preglednici 9 so podane vrednosti vertikalnih pomikov na površini in v predoru pri posameznih fazah gradnje ter vrednosti upogibnih momentov in osnih sil v primarni oblogi za oba uporabljena materialna modela v numeričnih simulacijah 2D in 3D.

MOHR COLOUMB	Uy ↓ (površina) (mm)		Uy ↓ (strop predora) (mm)		Uy ↑ (tla predora) (mm)		Mmax (kNm/m)		Nmax (kN/m)	
IZRAČUN (2D-3D) FAZA GRADNJE										
Izkop kalote	-39	-21	-119	-98	121	105	78	69	-949	-1129
Izkop stopnice in talnega oboka	-51	-46	-183	-178	188	151	-190	-220	-1330	-1509

MOHR COLOUMB	Uy ↓ (površina) (mm)		Uy ↓ (strop predora) (mm)		Uy ↑ (tla predora) (mm)		Mmax (kNm/m)		Nmax (kN/m)	
IZRAČUN (2D-3D) FAZA GRADNJE										
Izkop kalote	-21	-16	-148	-145	85	84	-88	-56	-1013	-1058
Izkop stopnice in talnega oboka	-37	-30	-171	-167	93	92	-177	-155	-1018	-1006

Preglednica 9 • Vrednosti vertikalnih deformacij, upogibnih momentov in osnih sil



Slika 23 • Vertikalni pomiki stropa predora v vzdolžni ravnini pri 3D-izračunih in primerjava z meritvami

4.3 Primerjava med rezultati izračunov in meritvami pri gradnji predora

Geotehnična spremljava gradnje predora Šentvid je obsegala več vrst meritev in opazovanj. V pričujočih analizah so ovrednotene meritve pomikov merskih točk v predoru in na površini. Merski profili (prečni) so bili vgrajeni v oblogo iz brizganega betona na vsakih 10 m in merjeni v predpisanih časovnih intervalih tako, da je bila zagotovljena stalna kontrola razvoja deformacij v predoru. Na sliki 23 so prikazane izračunane vrednosti vertikalnih pomikov točke v stropu predora skupaj z izmerjenimi vrednostmi (Elea iC, 2005b) v vzdolžni ravnini oziroma v vzdolžnem prerezu obravnavanega območja. Upoštevanje so meritve do takrat, ko je bilo čelo izkopa na stacionaži 1+183, kar je omogočilo realno primerjavo z izračunanimi vrednostmi. V navedenih analizah je bil upoštevan tudi raz-

voj deformacij hribinske mase pred izkopnim čelom, ki pa ga z meritvami ni bilo mogoče zajeti. Na podlagi 3D-izračuna vertikalnih pomikov stropa predora v vzdolžni ravnini je bilo ocenjeno, da se pred izkopnim čelom zgodijo posedki v velikosti 90 mm. Glede na navedeno so se izračunani premiki z upo-

rabo Hardening-Soil modela najboljše ujemali z izmerjenimi.

Primerjava med izračunanimi in izmerjenimi pomiki na površini nad severnim portalom predora Šentvid je pokazala, da so bili izmerjeni vertikalni pomiki med 6 in 93 mm, v povprečju pa 40 mm (IRGO Consulting,

2005), oziroma da se najboljše ujemajo s krivuljo posedkov, določeno z 2D-analizo pri uporabi Hardening-Soil modela. Za realno primerjavo so upoštevane meritve pomikov na površini v obdobju, ko je bilo čelo izkopa na stacionaži 1+184.

5 • SKLEP

Analiza vplivov več parametrov na rezultate numeričnega modeliranja je pokazala, da je pri izvedbi raznih simulacij gradnje podzemnih objektov treba skrbno upoštevati omejitve in se izogniti vplivom, povezanih z velikostjo mreže in končnih elementov.

Ugotovljeno je bilo, da je pri 3D-analizi podzemnega objekta po zaporednih korakih gradnje treba modelirati izkop in podgradnjo v precejšnji dolžini, da se doseže t. i. normalizirane vrednosti posedkov na površini in obremenitev v oblogi zaradi vpliva robnih pogojev.

Izračunane obremenitve v oblogi v 3D-analizi z upoštevanjem faz gradnje so prikazane v obliki »žagastega« vzorca, z večjo vrednostjo osnih sil in momentov na sprednji strani in manjšo vrednostjo na zadnji strani vsakega segmenta obloge.

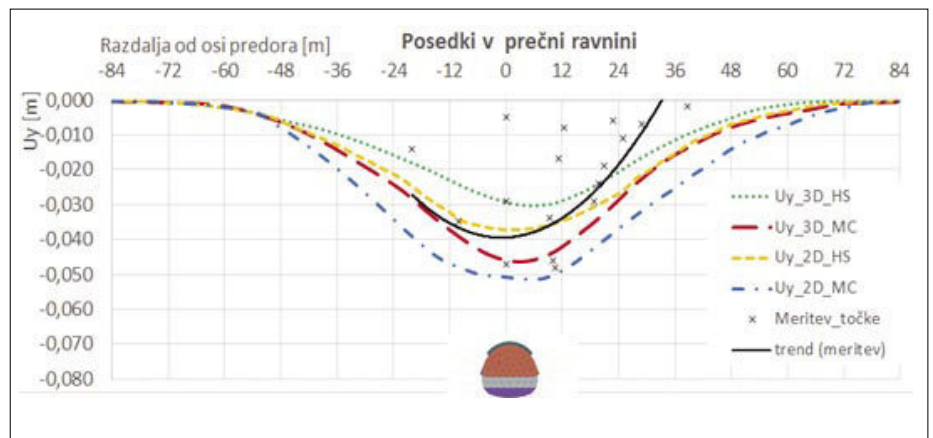
Izračuni z različnimi gostotami mreže v analizah 2D in 3D so pokazali, da ima gostota mreže velik vpliv na rezultate posedkov na površini in obremenitev v oblogi. Pri diskretizaciji območja z večjimi elementi so rezultati pogosto podcenjeni glede na rezultate, dobljene z gostejšo mrežo.

Vpliv je še zlasti opazen pri osnih silah in upogibnih momentih, kjer lahko premalo gosta mreža močno vpliva na rezultate. V primeru izračuna za predor premera 8 m s korakom izkopa 2 m so bili dovolj kvalitetni rezultati doseženi z velikostjo elementov 1 m v območju predora.

Pri izvedbi parametričnih analiz 2D in 3D z uporabo različnih vrednosti faktorja horizontalnih napetosti K_0 je ugotovljen velik vpliv primarnega napetostnega stanja na vrednosti posedkov na površini in obremenitev v oblogi. Z večanjem vrednosti faktorja K_0 so dobljene plitvejše in širše ugreznine na površini ter večje obremenitve obloge v bokih predora zaradi večjih deformacij v horizontalni smeri. Primerjava krivulj ugreznin 2D- in 3D-analiz kaže, da so krivulje 3D-analiz ožje (bolj strme) pri nižjih vrednostih faktorja K_0 , pri višjih vrednostih faktorja K_0 pa so ožje krivulje pri 2D-analizah.

Primerja 2D- in 3D-numeričnih simulacij gradnje dveh predorov, grajenih v različnih geotehničnih razmerah z uporabo obeh elastoplastičnih konstitutivnih modelov, sta pokazala, da ima veliko prednosti Hardening-Soil model, ki upošteva tudi deformabilnost in trdnost hribine pri razbremenjevanju in ponovnem obremenjevanju v tlačnem kot tudi strižnem območju.

Primerjava med izračunanimi in izmerjenimi pomiki kaže na relativno dobro ujemanje v primeru, ko se upošteva razvoj deformacij pred izkopnim čelom predora, ki pa jih s klasičnimi geometričnimi meritvami ni mogoče izmeriti. Tudi primerjava med izračunanimi in izmerjenimi pomiki na površini terena nad predorom pokaže, da je ujemanje najboljše z 2D-izračuni, narejenimi s Hardening-Soil modelom.



Slika 22 • Primerjava meritev s krivuljami posedkov na površini v prečni ravnini pri izračunih 2D in 3D predora

6 • LITERATURA

Brinkgreve, R., Vermeer, P., Plaxis 3D Tunnel, Validation and verification manual, On a smart use of 3D-FEM in tunnelling, by P.A. Vermeer, Stuttgart University, Balkema Rotterdam, str. 12-20, 2005.

Cosar, S., Application of rock mass classification systems for future support design of the Dim Tunnel near Alanya, Master's thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara, 2004.

ELEAiC, Predor Šentvid s polnim priključkom na Celovško cesto, Načrt gradbenih konstrukcij, faza PZI, št. proj. 415484P, Ljubljana, februar 2005a.

ELEAiC, Predor Šentvid, leva cev sever: dnevno poročilo merjenja konvergenca za dan 20. 3. 2005, naročnik: DARS, Ljubljana, 2005b.

- ELEAIC, IRGO Consulting, Geološko-geotehnično poročilo Raziskovalnega rova Šentvid, št. proj. ic 66/05, naročnik: DARS, Ljubljana, 2005.
- GEOPORTAL, Predor Ljubno–desna cev na AC A2 Karavanke–Obrežje, Načrt gradbenih konstrukcij, faza PZI, št. proj. gp-pr-031/09, Ljubljana, 2009.
- GEOGRAD, Predor Ljubno, desna cev, geodetske meritve pomikov v predoru in na površini za dan 24. 1. 2010, naročnik: DARS, Ljubljana, 2010.
- IRGO Consulting, Geološko-geotehnično poročilo o zgradbi tal in pogojih gradnje na AC Brezje–Podtabor za predor Ljubno (razmaknjena varianta), km 29+165 do km 29+425 (po reviziji), faza PGD, naročnik: PNZ, Ljubljana, 2005.
- IRGO Consulting, Geoinženiring, Geološko-geotehnično poročilo gradnja predora Šentvid; Poročilo št. 11, naročnik: DARS, Ljubljana, marec 2005.
- Midas user support system, User manual for GTS NX, povzeto po: http://en.midasuser.com/downloads/programs_view.asp?idx=182218&bid=76&strPro=&nCat=, 2014.

HIDRAVLIČNI PREHODNI POJAVI – PROBLEMATIKA OBNOVE HIDROELEKTRARN S KOMPLEKSNIMI PRETOČNIMI SISTEMI

HYDRAULIC TRANSIENT EVENTS – PROBLEMATICS OF RENOVATION OD HYDROPOWER PLANTS WITH COMPLICATED CONVEYANCE SYSTEMS

Jernej Mazij, univ. dipl. inž. grad.

jernej.mazij@litostrajpower.eu

dr. Anton Bergant, univ. dipl. inž. str.

anton.bergant@litostrajpower.eu

Litostroj Power, d. o. o., Litostrojska cesta 50

SI-1000 Ljubljana, Slovenija

Strokovni članek

UDK 621.311.21(497.4)

Povzetek | Hidravlični prehodni pojav pomeni spremembo hidrodinamičnih količin obravnavanega hidravličnega pretočnega sistema. Obravnavanje prehodnih pojavov je ključno z vidika varnega obratovanja hidroelektrarne in ustrezne zasnove posameznih turbinskih komponent, pripadajoče hidromehanske opreme in elementov pretočnega sistema. Obseg analize hidravličnih prehodnih pojavov je odvisen od kompleksnosti hidravličnega pretočnega sistema, zahtev naročnika, faze projekta in tipa vgrajene turbinske in hidromehanske opreme. Rezultati analize nam podajo celovit vpogled v delovanje hidroelektrarne v času prehodnih pojavov, omogočajo določiti kritične obratovalne režime, možne omejitve obratovanja in ustrezne metode za blaženje negativnih posledic hidravličnih prehodnih pojavov. Za zagotavljanje visoke stopnje zanesljivosti in natančnosti mora imeti odgovorni inženir za izdelavo analize široko interdisciplinarno znanje s področij gradbeništva, strojništva in elektrostroke. Praktični pristop je prikazan pri dveh industrijskih primerih. To sta obnova hidroelektrarne Doblar I in hidroelektrarne Moste, ki imata obe za pogonske agregate vgrajene Francisove turbine.

Ključne besede: hidravlični prehodni pojavi, Francisova turbina, hidroelektrarna, hidravlični pretočni sistem, primerjava izračuna z meritvijo.

Summary | Hydraulic transient events are the changes of hydrodynamical quantities in the water conveyance system. The treatment of hydraulic transient events is essential to ensure the safe operation of the hydropower plant and suitable design of the turbine components and appurtenant hydromechanical equipment. The extent of the analysis depends on the particular customer specifications, the complexity of the water conveyance systems, design phase, the type of the mechanical and hydromechanical equipment installed. The results of the analysis give us a comprehensive insight into the hydropower plant operation during transient events, critical operation regimes, possible limitations of operation and suitable methods for transient control. In order to assure a high level of reliability and accuracy, the responsible engineer must have a broad interdisciplinary range of knowledge in civil, mechanical, and electrical engineering. A practical implementation is presented on two case studies: the refurbishments of Doblar I HPP and Moste HPP. Both hydropower plants are equipped with Francis turbine units.

Key words: hydraulic transient analysis, Francis turbine, hydropower plant, water conveyance system, numerical results and measurement comparison

1 • UVOD

Namen članka je s primeri obnove hidroelektrarn gradbenim inženirjem in tehnikom predstaviti problematiko hidravličnih prehodnih pojavov. V prvem delu članka se osredotočimo na kritične obratovalne režime in metode blaženja negativnih posledic hidravličnih prehodnih pojavov z dodatnim pregledom uporabljenih teoretičnih modelov in opisom Francisove turbine kot hidravličnega turbinskega stroja. V drugem delu predstavimo praktično uporabo komerci-

alnega računalniškega programa in primerjavo med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi hidrodinamičnih količin, opravljeno v podjetju Litostroj Power iz Ljubljane, ki ima pri analizah in raziskavah hidravličnih prehodnih pojavov v črpalnih in turbinskih sistemih več kot 50-letno tradicijo. Hidravlični prehodni pojav povzroči motnja, katere posledica je sprememba stacionarnega stanja. Tu obravnavamo prehodne pojave pri toku pod tlakom, kjer kot delovni medij

nastopa voda. Posledice prehodnih pojavov so lahko poškodbe na turbinski in hidromehanski opremi, na segmentih pretočnega sistema ali motnje v obratovanju. Za lastnike in upravljavce hidroelektrarn to pomeni visoke stroške v obliki dragih popravil, pogostejšega vzdrževanja in manjše proizvodnje električne energije (HydraTek, 2009). Ozaveščenost o nevarnostih prehodnih pojavov je v zadnjih nekaj desetletjih napredovala, še posebno po uveljavitvi osebnih računalnikov, razvoju komercialnih programskih paketov in širitvi v druga tehnična področja, kjer so prisotni prehodni pojavi (veter, električna omrežja, tok s prosto gladino).

2 • PREHODNI POJAVI V HIDROELEKTRARNAH

Glavni vzrok za nastanek prehodnih pojavov v hidroelektrarnah so pogonski manevri turbine. V stacionarnem stanju je obremenitev turbine enaka obremenitvi generatorja, zato se mora krmilnik turbine odzvati na vsako spremembo obremenitve, saj se drugače spremenijo vrtilna frekvenca, pretok in tlak v sistemu. Po vsakem manevru pa motnje v sistemu trajajo še nekaj časa po vzpostavitvi novega ravnovesnega stanja kot nihanja, ki se zaradi trenja zadržijo. Ekstremne tlačne pulzacije v pretočnem sistemu in vrtilno frekvenco turbine pa je treba omiliti, kar se doseže z ustreznimi obratovalnimi manevri (odpiranje in zapiranje vodilnika turbine) in vgradnjo zaščitne opreme.

2.1 Hidravlični turbinski stoji

Hidravlični turbinski stroji so pogonske enote hidroelektrarn, katerih naloga je izkoriščanje

vodne energije za proizvodnjo električne energije.

Najprimernejši tip hidravličnega turbinskega stroja določimo na podlagi hidroloških in geomorfoloških lastnosti lokacije, ekonomskih vidikov proizvodnje, dinamike obratovanja, stroškov vzdrževanja in varnosti. Poznamo naslednje običajne tipe hidravličnih turbinskih strojev: Peltonove turbine, Francisove turbine, Kaplanove turbine in cevne turbine. Poleg izraza turbina lahko uporabljamo besedo agregat kot skupno ime za zaključeno celoto. Francisova turbina spada med radialno-aksialne turbine. Voda vteka v gonilnika v radialni smeri in ga zapušča v aksialni smeri. Vsa potencialna energija vode se ne pretvori v kinetično, zaradi česar sodijo Francisove turbine med nadtladne ali reakcijske turbine. Konstrukcijska izvedba je možna s horizontalno ali vertikalno gradnjo,

pri horizontalni izvedbi je gonilnik lahko enojen ali dvojen. Francisova turbina je primerna za široko obratovalno območje padcev in pretokov, zato spadajo tovrstne turbine med najbolj razširjene (Nicolet, 2007).

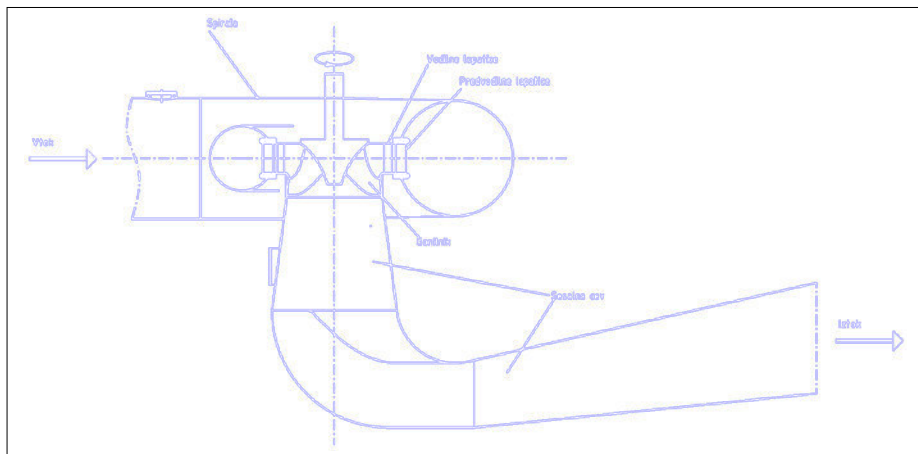
Pomembni sestavni deli Francisove turbine so prikazani na sliki 1.

Naloge posameznih gradnikov so naslednje:

- Spiravno ohišje omogoča nastanek vodnega vrtinca in enakomerno porazdeli tok vode na predvodilne lopatice.
- Predvodilne lopatice so fiksno pritrjene na zgornji in spodnji predvodilnikov obroč. Z ustrezno hidravlično obliko usmerjajo vodni tok na vodilne lopatice.
- Vodilne lopatice so gibljive in usmerjajo vodo na gonilnik. S spreminjanjem njihovega kota s servomotorjem vodilnika se spreminja širina pretočnega prereza med posameznimi lopaticami – odprtje vodilnika. S tem uravnavamo pretok in vpadni kot vodnega toka na gonilnik.
- Gonilnik: pretvarja vodno energijo (potencialno in kinetično) v mehansko energijo. Gonilnik se vrti zaradi odklanjanja vodnega vrtinca iz njegove smeri gibanja in zaradi reakcijskega pritiska, ki je posledica iz gonilnika izstopajoče vode.
- Sesalna cev: zaključi pretočni trakt turbine, z njo poskušamo izkoristiti del kinetične energije pri izstopu iz gonilnika. To omogoča izkoriščanje celotnega razpoložljivega padca, vključno z višino med gonilnikom in spodnjo vodo.

Teoretična razpoložljiva hidravlična moč turbine P_h je določena z naslednjo enačbo:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q_T \cdot H_n, \quad (1)$$



Slika 1 • Sestavni deli Francisove turbine

kjer so ρ gostota vode (kg/m^3), g gravitacijski pospešek (m/s^2), Q_T pretok turbine (m^3/s) in H_n neto padeč (m).

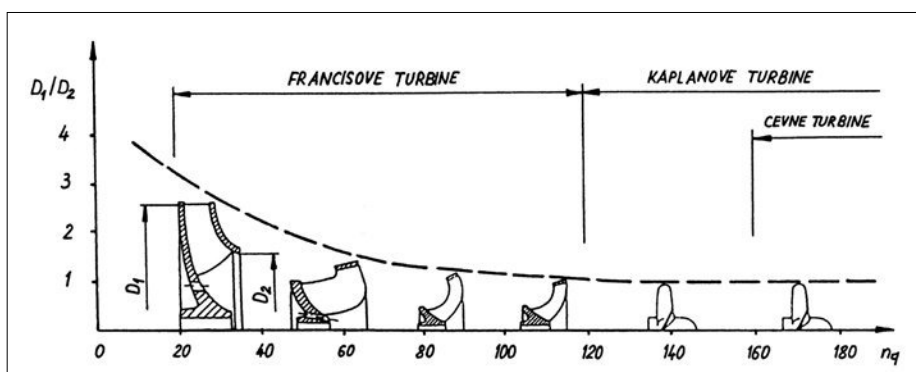
Dejanska pridobljena moč je nižja zaradi izgub, ki se pojavijo pri obratovanju turbine. Izkoristek turbine η predstavlja razmerje med dejansko pridobljeno močjo P_b , ki jo dobimo na gredi turbine, in razpoložljivo hidravlično močjo turbine P_r .

$$\eta = \frac{P_b}{P_r} \quad (2)$$

Izkoristek turbine izmerimo na modelu turbine v certificiranem hidravličnem laboratoriju in ga prikažemo v obliki školjčnega diagrama (Benišek, 1998). Izjemno pomembno vlogo v teoriji hidravličnih turbinskih strojev imajo zakoni modelne podobnosti, saj omogočajo primerjave turbin različnih tipov in velikosti. Z njihovo pomočjo lahko iz eksperimentalnih rezultatov na modelu turbine napovemo lastnosti prototipa vgrajene turbine. Turbino enoznačno določimo in oblikovno opišemo s specifično vrtilno frekvenco n_q (Bergant, 2006):

$$n_q = \frac{n\sqrt{Q_T}}{\sqrt[4]{H_n^3}} \quad (3)$$

kjer so n vrtilna frekvenco turbine (min^{-1}), Q_T pretok turbine (m^3/s) in H_n neto padeč (m). Specifična vrtilna frekvenco turbine je konstanta vrednosti in je definirana za optimalno obratovalno točko turbine (točko najvišjega izkoristka). Vpliv specifične vrtilne frekvence



Slika 2 • Vpliv specifične vrtilne frekvence na izbiro reakcijske turbine (Bergant, 2006)

na izbiro primerne reakcijske turbine je prikazan na sliki 2.

S slike je razvidno, da se z naraščanjem specifične vrtilne frekvence spreminja oblika turbine, radialna turbina prehaja v aksialno. S specifično vrtilno frekvenco je povezana tudi značilna oblika Francisove turbine. Francisove turbine z majhnimi vrednostmi specifične vrtilne frekvence imajo manjšo višino vstopnega roba, vstopni premer na vencu pa je večji kot izstopni na pestu.

2.2 Kritični obratovalni režimi

Obremenitve, ki so posledica hidravličnih prehodnih pojavov, nastanejo zaradi različnih obratovalnih režimov. Razdelimo jih glede na stopnjo nevarnosti za pretočni sistem hidroelektrarne ((Chaudhry, 2014), (Wylie, 1993)):

(i) Normalni obratovalni režimi
Vsi varnostni elementi v sistemu delujejo ustrezno glede na svoje načrtovane funkcije. Ti režimi zajemajo zagon hidroelektrarne in priklop na omrežje, razbremenitev s krmilnikom, hitro zaporo turbine.

(ii) Varnostni obratovalni režimi
V tem primeru se okvari eden od varnostnih elementov, kar lahko povzroči delni pobeg turbine in zapiranje predturbinske lopute ali kroglastega zasuna.

(ii) Izjemni obratovalni režimi
Na hidroelektrarni se okvari večje število varnostnih elementov na najbolj neugoden način. To povzroči polni pobeg turbine ali zapiranje vodostanske lopute pod maksimalnim pretokom. Za zmanjšanje posledic kritičnih obratovalnih režimov so potrebni varnostni in omilitveni ukrepi.

3 • VARNOSTNI IN OMILITVENI UKREPI

Varnostni elementi in omilitveni ukrepi za blaženje negativnih posledic prehodnih pojavov morajo izpolnjevati naslednje pogoje (ASME, 1996):

- zagotoviti najvišjo možno stopnjo varnosti hidroelektrarne za vse predvidene obratovalne režime,
- določiti in upoštevati ustrezne mejne vrednosti za specifične obratovalne parametre,
- identificirati najbolj neugodne obratovalne režime in zagotoviti, da mejne vrednosti obratovalnih parametrov ne bodo presežene.

Operativni, varnostni in gospodarski dejavniki so odločilni pri izbiri zaščite pred nezaželenimi učinki prehodnih pojavov, največkrat je najboljša rešitev hkratna uporaba naslednjih pristopov (Bergant, 1997):

- sprememba obratovalnih manevrov. To vključuje ustrezno določitev primernih manevrov vodilnih lopatic in časovnih intervalov zapiranja/odpiranja loput ali kroglastih zasunov. Uveljavljen je dvostopenjski način zapiranja vodilnih lopatic z dodatnim dušenim gibom servomotorja vodilnika (IEC 60308, 2005). Sprememba obratovalnih manevrov je najučinkovitejša in stroškovno najbolj ugodna metoda za blaženje negativnih posledic prehodnih pojavov v primeru obnove hidroelektrarn.
- vgradnja varnostnih elementov v pretočni sistem in turbino: povečana vztrajnost rotirajočih delov turbine, vtočni ali iztočni vodostan, tlačni regulator, tlačna membrana, zračni ventil. Vgradnja varnostnih elementov je primerna pri gradnji novih

hidroelektrarn in v manjši meri pri obnovi obstoječih hidroelektrarn.

- ustrezno načrtovanje pretočnega sistema hidroelektrarne skupaj s spremembo obratovalnih manevrov je najbolj učinkovita metoda pri gradnji novih hidroelektrarn, medtem ko so stroški takih posegov pri obnovi preveliki.

4 • MODERNI PRISTOP OBRAVNAVE

Zaradi dinamičnega obratovanja hidroelektrarne so prehodni pojavi neizogibni. Motnje v delovanju, zagonu, zaustavitvi ali spremembi obremenitve so prisotni celotno dobo obratovanja. Naloge odgovornega inženirja za izdelavo analize prehodnih pojavov so identifikacija in obravna obratovalnih režimov, ki lahko predstavljajo nevarnost za varno obratovanje in priprava rešitve. Iz navedenega obsega kritičnih obratovalnih režimov in možne uporabe varnostnih elementov (poglavji 2.2 in 3) izhaja, da mora imeti odgovorni inženir široko interdisciplinarno znanje na različnih področjih:

(i) gradbeništvo (vodna hidravlika in vodne zgradbe), (ii) strojništvo (hidravlični turbinski stroji, hidromehanska in pomožna oprema), (iii) elektrotehnika (generatorji, krmiljenje moči in distribucijski sistemi). Obseg analize je odvisen

od posebnih zahtev naročnika, tipa turbinskega stroja, kompleksnosti pretočnega sistema in faze projektiranja. Naročnik lahko določi obseg analize glede na predvideni način obratovanja hidroelektrarne. Tip vgrajenega turbinskega stroja pogojuje uporabo karakteristik in kompleksnost pretočnega sistema.

Hidroelektrarne z vgrajenimi Francisovimi in Peltonovimi turbinami imajo na splošno bolj kompleksne pretočne sisteme (tuneli, cevovodi, vodostani, dodatni vtoki ...). Analiza je v zgodnji fazi načrtovanja (idejna zasnova, idejni projekt) lahko izdelana s poenostavljenimi analitičnimi modeli, ki temeljijo na izkušnjah, smernicah in pravilnikih ((Chaudhry, 2014), (Wylie, 1993), (Pejović, 1987)). V tej fazi že lahko izberemo ustrezne varnostne elemente in postopke za blaženje negativnih posledic prehodnih po-

javov, še posebno spremembo vzdolžnega profila pretočnega sistema, lokacijo in osnovne parametre varnostnih elementov. V kasnejši fazi (projekt za izvedbo) uporabljamo komercialne ali lastniške, t. i. in-house programske pakete, da določimo kritične obratovalne režime in končne parametre in lokacijo varnostnih elementov. Vključeni naj bodo obratovalni režimi pri maksimalnih pretokih in padcih za obratovanje ene ali več enot hkrati, odpoved ene ga ali več varnostnih elementov in neugodno zaporedje dogodkov. Ti rezultati predstavljajo osnovo za izdelavo analize tveganja (Zobeiri, 2011). V času zagonskih preizkusov pa odgovorni inženir predstavlja podporo ekipi na terenu z dodatnimi analizami v primeru, da se robni pogoji na terenu razlikujejo od tistih v projektu za izvedbo.

5 • NUMERIČNI MODEL HIDRAVLIČNI MI PREHODNI MI POJAVOV

V podjetju Litostroj Power za analizo hidravličnih prehodnih pojavov v cevni MI sistemi MI uporabljamo programski paket SIMSEN (EPFL, 2009). Programski paket ima modularno zgradbo in omogoča analizo sistema s poljubno topologijo. Moduli v programskem paketu predstavljajo posamezne elemente v sistemu, kjer vsaka enota vsebuje sklop diferencialnih enačb, ki opisujejo obnašanje posameznega elementa. Globalni sklop diferencialnih enačb rešujemo s sistemom Runge-Kutta četrte stopnje (Nicolet, 2009). Hidravlični elementi so modelirani na podlagi RLC-električnega tokokroga s pomočjo impendančne metode (Jaeger, 1977), kjer

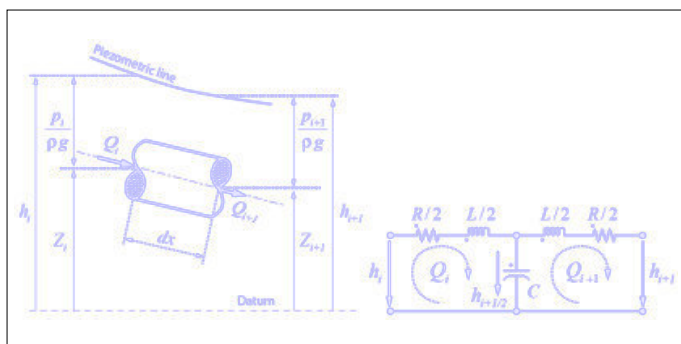
spremenljivki piezometrična tlačna višina H v vozlišču in pretok Q skozi posamezni element ustrežata električni napetosti U in električnemu toku i v enakovredni električni shemi. Dinamična in kontinuitetna enačba predstavljata osnovo za enakovredno modeliranje z električnim tokokrogom, kot je prikazano na sliki 3.

Električna analogija med modeliranjem širjenja tlačnih valov v cevovodih pod tlakom in napestnih valov v električnih vodnikih omogoča vpeljavo upornosti R , induktivnosti L in kapacitivnosti C (Nicolet, 2007). V odseku cevovoda z dolžino dx je kapacitivnost C povezana z akumulacijskim učinkom narastka tlaka in

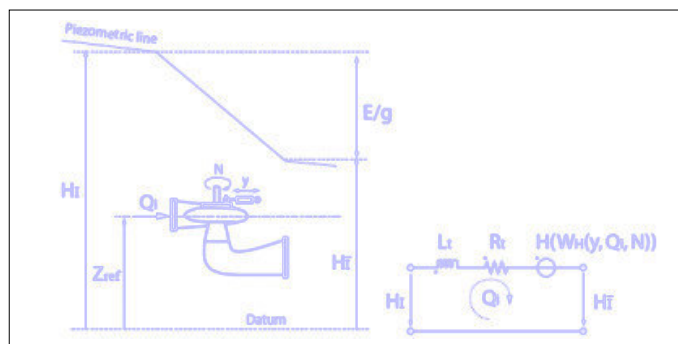
je funkcija hitrosti tlačnih valov, induktivnost L zajema maso vode v cevi, upornost R pa upošteva trenjske izgube v cevi.

Francisova turbina na sliki 4 je s stališča modeliranja, na podlagi RLC električnega tokokroga, tlačni element. Vpliv vztrajnosti vodne mase upošteva mo z vpeljavo induktivnega člena L_T , upornost R_T zajema vpliv zapiranja vodilnih lopat. Element tlaka H se spreminja na podlagi turbinske karakteristike.

S predpostavko, da prehod med dvema obratovalnima točkama turbine ustreza nizu stacionarnih obratovalnih točk, lahko prehodne pojave v turbini ustrezno modeliramo s stacionarno karakteristiko turbine (školjčni diagram). Za potrebe analize SIMSEN uporablja brezdimenzijske turbinske karakteristike n_{11} , M_{11} in Q_{11} . Rezultate numeričnega modeliranja bomo prikazali za dve slovenski HE v nadaljevanju.



Slika 3 • Modeliranje cevovoda z dolžino dx (levo) in ustrezna enakovredna shema električnega tokokroga (desno) (Nicolet, 2009)



Slika 4 • Model Francisove turbine (levo) in ustrezna enakovredna shema električnega tokokroga (desno) (Nicolet, 2009)

6 • HIDROELEKTRARNA DOBLAR I

Hidroelektrarna (HE) Doblar I je kombinirana akumulacijsko-pretočna hidroelektrarna na reki Soči. Začetki raziskovalnih del za gradnjo segajo v leto 1936, ko sta bila določena mesto za jez v soteski pri naselju Podselo in lokacija strojnice v kraju Doblar (SENG, 2014). Prvotno je bila v strojnici vgrajena oprema italijanskega proizvajalca Riva Milano in je do leta 1947 proizvajala električno energijo za italijansko omrežje z omrežno frekvenco 42 Hz. Leta 1950 je elektrarna v povezavi z ostalim slovenskim omrežjem prešla na omrežno frekvenco 50 Hz (IBE, 2008). V agregat št. 1 je bila leta 2001 vgrajena nova turbina proizvajalca Litostroj.

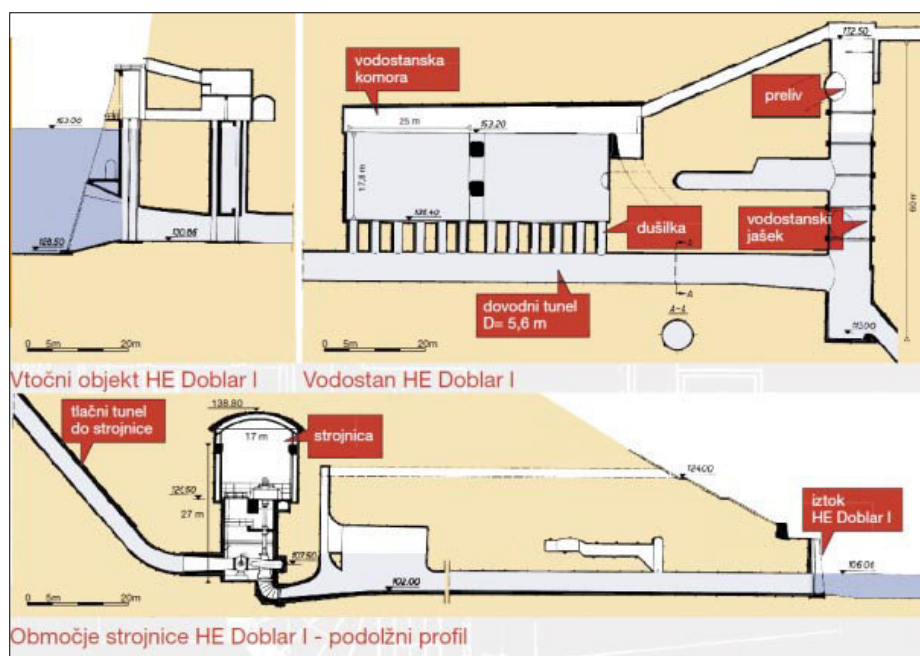
Zaradi zastarelosti je bila potrebna temeljita prenova turbinske, hidromehanske in pomožne opreme. Prenova je potekala v obdobju 2011–2013, parametri novih turbin so prikazani v preglednici 1. Pretočni sistem hidroelektrarne je sestavljen iz naslednjih elementov: dovodni rov z dolžino 3735 m in premera 5,6 m, gorvodni vodostanski sistem, sestavljen iz dveh medsebojno povezanih vodostanov elipsoidne oblike (skupne površine 879,65 m², dušenje na vtoku in iztoku poteka preko 12 odprtih), in cilindrični vodostanski jašek notranjega premera 8,0 m. Elipsoidna vodostana in cilindrični vodostanski jašek so še dodatno povezani z rovom dolžine 46,0 m in spremenljivim premerom 5,0–6,0 m.

Trije vzporedni cevovodi dolžine 46 m in premera 3,0 m dovajajo pretok v strojnico, kjer so vgrajene tri vertikalne Francisove turbine, vsaka s svojim ločenim odvodnim sistemom dolvodnih vodostanov in odvodnih rofov.

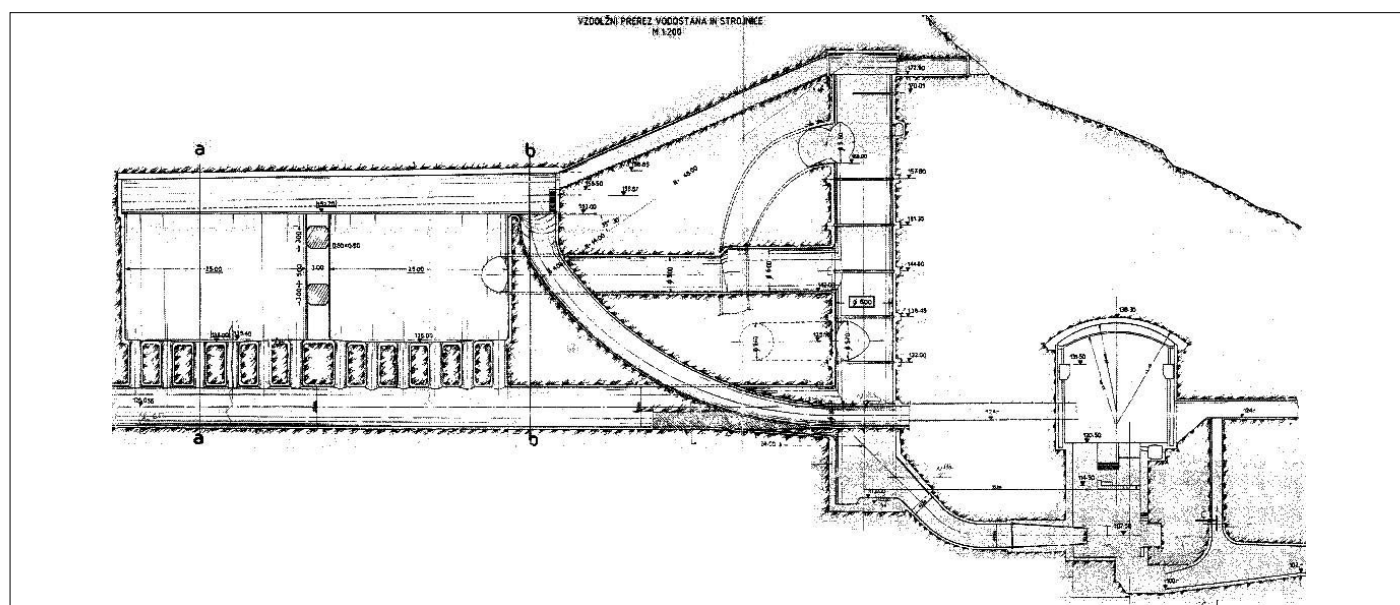
Vse turbine so opremljene s predturbinskimi kroglastimi zasuni premera 2,3 m.

Shema pretočnega sistema in konfiguracija gorvodnega vodostanskega sistema sta prikazani na slikah 5 in 6.

Zaradi starosti hidroelektrarne in zgodovinskega konteksta (sprememba državnega lastništva) je bila ena izmed glavnih ovir pri analizi pomanjkanje dokumentacije izvedenih del pretočnega in gorvodnega vodostanskega sistema. Kasnejše geodetske meritve so podale jasno sliko stanja, potrebno za ustrezno modeliranje in umerjanje računskega modela. Omejena razpoložljivost obstoječe dokumen-



Slika 5 • Shema pretočnega sistema HE Doblar I (SENG, 2014)



Slika 6 • Konfiguracija gorvodnega vodostanskega sistema HE Doblar I (IBE, 2008)

tacije v primerih obnove lahko povzroči zamude, nenatančno modeliranje in dodatne stroške. Naloga in odgovornost lastnika hidroelektrarne (naročnika analize) je, da priskrbi vsoto potrebno dokumentacijo.

V nadaljevanju bodo prikazani rezultati modeliranja različnih primerov obratovanja in primerjava z izmerjenimi veličinami.

6.1 Istočasna razbremenitev treh turbin

Istočasna razbremenitev z maksimalne moči na prosti tek je sprožena z izklopom generatorskega stikala. Elektromagnetni moment generatorja v trenutku pade na vrednost 0, rezultat je nenadna razbremenitev turbine in povečanje vrtilne frekvence agregata. V takem primeru turbinski krmilnik nadzira zapiranje servomotorja vodilnika s predpisanim dvostopenjskim načinom zapiranja, da se na turbini vzpostavi režim prostega teka. Turbine obratujejo v prostem teku in so pripravljene na obremenitev. Zapiranje vodilnika povzroči zmanjšanje pretoka in narastek tlaka v dovodnem cevovodu.

Tip turbine:	Francis FvT-2,127/320-11
Število turbin:	3
Maksimalni pretok turbine:	$Q_T = 25,00 \text{ m}^3/\text{s}$
Maksimalni bruto padec:	$H_b = 48,50 \text{ m}$
Maksimalna moč turbine:	$P_{maks} = 13,6 \text{ MW}$
Koča simetrane vodilnika:	$Z_{cl} = 107,25 \text{ m.n.m.}$
Izstopni premer gonilnika:	$D_{zv} = 2127 \text{ mm}$
Vrtilna frekvenca turbine:	$n = 300 \text{ min}^{-1}$
Vztrajnostni moment rotirajočih delov turbine (gonilnik, gred, generator):	$I = 84,7 \times 10^3 \text{ kgm}^2$

Preglednica 1 • Parametri turbine HE Doblar I

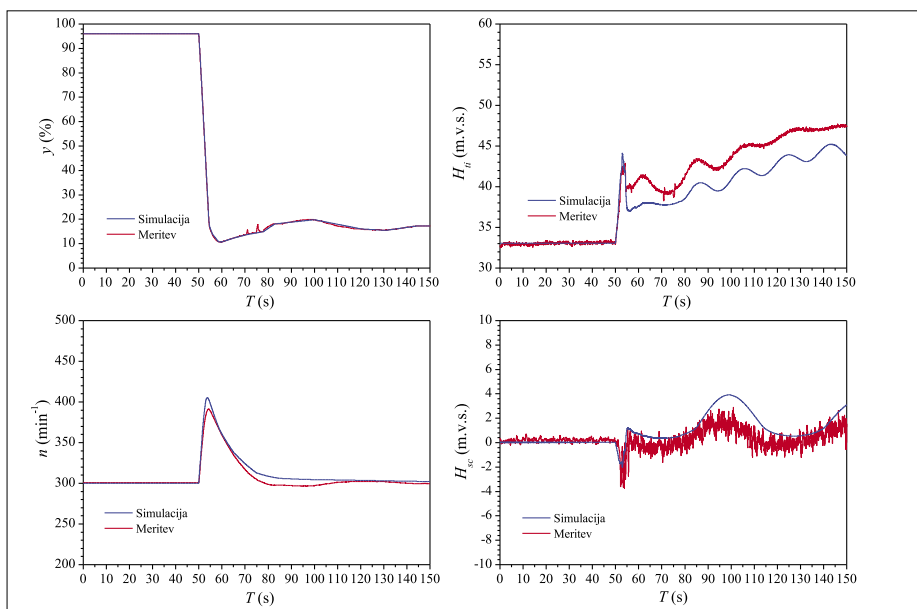
Za numerično modeliranje so bile upoštevane naslednje obratovalne razmere.

Enote obratujejo pri moči generatorja $P_{gen,1} = 11,0 \text{ MW}$, $P_{gen,2} = 12,0 \text{ MW}$, $P_{gen,3} = 10,2 \text{ MW}$ in nivoju zgornje vode $Z_{zg} = 152,4 \text{ m.n.m.}$ Rezultati za tlak v cevovodu pri vtoku v turbino (H_{ti}), vrtilno frekvenco turbine (n) in tlak v sesalni cevi (H_{sc}), ki so posledica giba servomotorja vodilnika (y), so prikazani na sliki 7 in veljajo za enoto 3 ($P_{gen,3} = 10,2 \text{ MW}$).

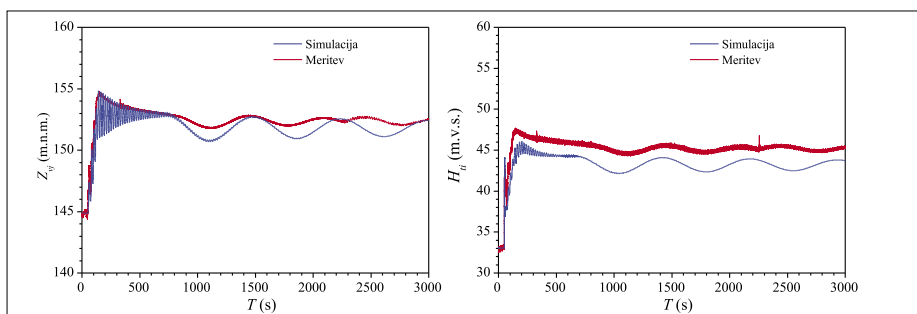
Iz prikaza na sliki 7 je razvidno, da je maksimalni izračunani (simulirani) tlak v cevovodu $H_{ti,maks,s} = 44,2 \text{ m.v.s.}$ višji od izmerjenega $H_{ti,maks,i} = 43,0 \text{ m.v.s.}$ Ta rezultat velja v obdobju zapiranja vodilnika, dinamika pa je prisotna tudi med obratovanjem v prostem teku turbine, ko tlak v cevovodu oscilira zaradi načrtovanega omilitvenega delovanja vodostana. Maksimalna izračunana vrtilna frekvenca agregata $n_{maks,s} = 405,5 \text{ min}^{-1}$ je višja od izmerjene $n_{maks,i} = 391,5 \text{ min}^{-1}$. Rezultati za tlak v sesalni cevi se zelo dobro ujemajo v stacionarnih pogojih obratovanja in v obdobju zapiranja vodilnika. Izračunani maksimalni tlak $H_{sc,maks,s} = 3,91 \text{ m.v.s.}$ je višji od izmerjenega $H_{sc,maks,i} = 1,83 \text{ m.v.s.}$ (povprečje konice tlakov).

Izračunani minimalni tlak je $H_{sc,min,s} = -2,0 \text{ m.v.s.}$ in izmerjeni $H_{sc,min,i} = -1,55 \text{ m.v.s.}$ (povprečje konice tlakov). Pri zapiranju vodilnika in obratovanju na nominalni vrtilni frekvenci so pri meritvi tlaka v sesalni cevi prisotne visokofrekvenčne pulzacije (šum). Slika 8 prikazuje primerjavo meritev in numeričnih rezultatov za oscilacije gladin v cilindričnem vodostanskem jašku (Z_{vj}) in tlaka v cevovodu na vtoku v turbino za daljši časovni interval.

Rezultati izračunanih in izmerjenih vrednosti nihanja vodne gladine se zelo dobro ujemajo v času zapiranja vodilnika. Vodostan elipsoidne oblike med časom zapiranja vodilnika nima vpliva na tlak v cevovodu. Njegov vpliv je opazen kasneje kot dviganje gladine v vodnem jašku, ki je posledica dotoka vode iz elipsoidnega vodostana preko povezovalnega rova. Odstopanje med izračunano in izmerjeno vrednostjo tlaka v cevovodu bi lahko pripisali poenostavljenemu modeliranju sistema vodostanov in negotovim podatkom za vtočno-iztočne izgube na dušilkah elipsoidnih vodostanov.



Slika 7 • Primerjava rezultatov simulacije in meritev za primer istočasne razbremenitve treh turbin - HE Doblar I



Slika 8 • Oscilacije v cilindričnem jašku in tlak v cevovodu pri vtoku v turbino za primer istočasne razbremenitve treh turbin - HE Doblar I

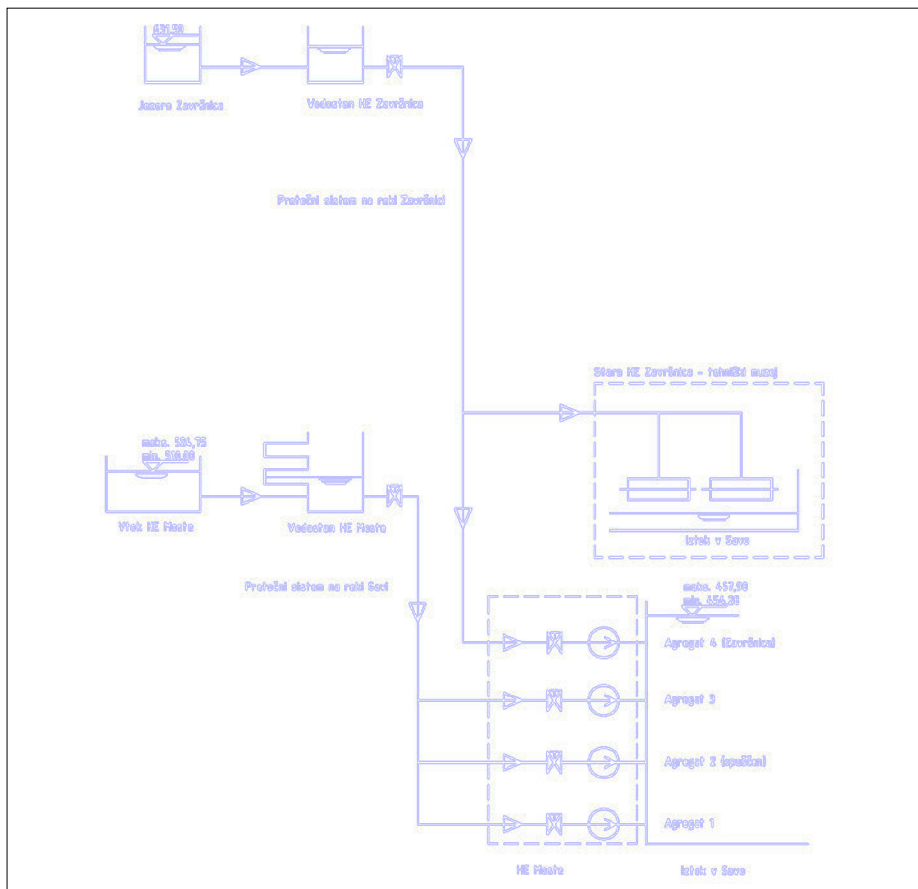
7 • HIDROELEKTRARNA MOSTE

Hidroelektrarna Moste obratuje kot prva gorvodna elektrarna na reki Savi od leta 1952. Pregrada je betonska, ločno-težnostna in leži v sofesi Kavčke, ki predstavlja najožji del savskega kanjona. S 60 m višine je tudi najvišja pregrada v Sloveniji. Akumulacijski bazen omogoča tedensko izravnavo pretokov. HE Moste je akumulacijska hidroelektrarna za proizvodnjo vršne energije in skupaj z ločenim agregatom, ki izkorišča energetski potencial

potoka Završnica, sestavlja enotni energetski sistem, kot je prikazan na sliki 9.

V strojnici HE Moste so bili prvotno vgrajeni trije agregati, kasneje pa je bil dodatno vgrajen četrti agregat (črpalka–turbina) s priključitvijo na dovodni cevovod HE Završnica (Savske Elektrarne, 1994). Ta je bil v črpalnem režimu namenjen prečrpavanju savske vode v višjeležeči bazen Završnica. Zaradi onesnaženosti Save je bil črpalni režim kasneje opuščen in novi

agregat obratuje samo kot klasična turbina. V obdobju 2009–2010 sta bila obnovljena dva agregata, prostor tretjega pa je bil namenjen gradbenim ojačitvam strojnice HE Moste. Prehodni pojavi so bili obravnavani v pretočnem sistemu na reki Savi, ki obsega: dovodni rov z dolžino 840 m in notranjim premerom 3,0 m, vodostan s spodnjo in zgornjo stransko komoro, vodostansko loputo, tlačni cevovod z dolžino 152,5 m in notranjim premerom 2,6 m – do razcepa, od koder ločeni cevi dovajata pretok v strojnico, kjer sta vgrajeni dve vertikalni Francisovi turbini. Obe turbini sta opremljeni s predturbinskimi loputami premera 1,6 m. Parametri obnovljenih turbin so prikazani v tabeli 2. Predstavljeni so rezultati analize za dva obratovalna režima: razbremenitev turbin in zapiranje predturbinskih loput.



Slika 9 • Pretočni sistem na reki Savi in Završnici

Tip turbine:	Francis FVT–1,350/300–15
Število turbin:	2
Maksimalni pretok turbine:	$Q_T = 13,00 \text{ m}^3/\text{s}$
Maksimalni bruto padec:	$H_b = 68,91 \text{ m}$
Maksimalna moč turbine:	$P_{maks} = 7,5 \text{ MW}$
Kota simetrale vodilnika:	$Z_{CL} = 457,53 \text{ m.n.n.m.}$
Izstopni premer gonilnika:	$D_{2v} = 1350 \text{ mm}$
Vrtilna frekvenca turbine:	$n = 500 \text{ min}^{-1}$
Vztrajnostni moment rotirajočih delov turbine (gonilnik, gred, generator):	$I = 20,25 \times 10^3 \text{ kgm}^2$

Preglednica 2 • Parametri turbine HE Moste

7.1 Istočasna razbremenitev dveh turbin

Ta analiza upošteva začetno stanje, ko enoti obratujeta pri moči generatorja $P_{gen} = 6,7 \text{ MW}$ in pri nivoju zgornje vode $Z_{zg} = 524,75 \text{ m.n.n.m.}$ Rezultati za tlak v cevovodu pri vstopu v turbino (H_{ti}) vrtilno frekvenco turbine (n) in tlak v sesalni cevi, ki so posledica giba servomotorja vodilnika (γ), so prikazani na sliki 10.

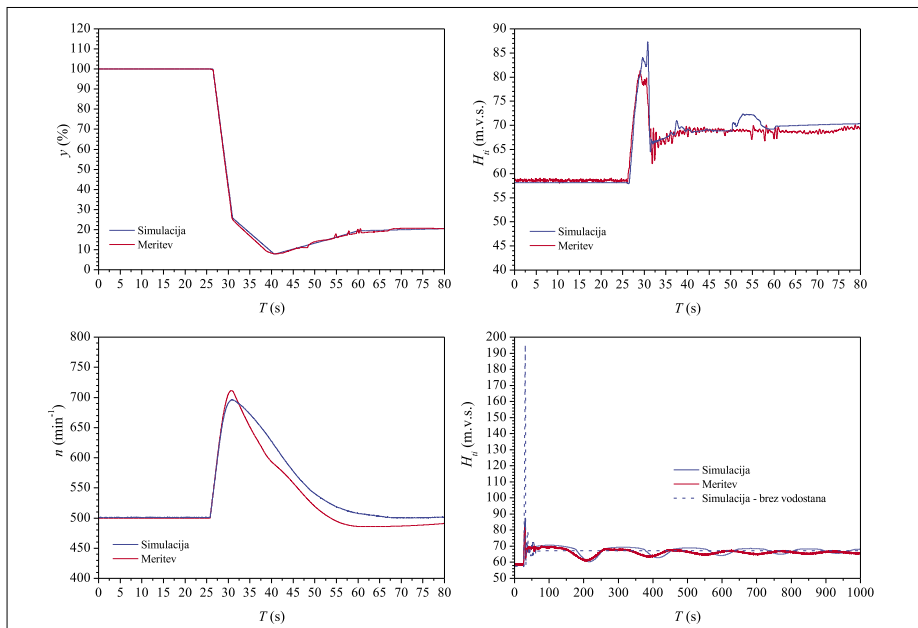
Maksimalni izračunani tlak v cevovodu $H_{ti,maks,s} = 87,3 \text{ m.v.s.}$ je višji od izmerjenega $H_{ti,maks,i} = 81,5 \text{ m.v.s.}$ in se pojavi v točki, ko servomotor vodilnika preide iz hitrega v dušeni gib, primerjava je zelo dobra v začetni fazi zapiranja vodilnika. Maksimalna izračunana vrtilna frekvenca agregata $n_{maks,s} = 711,5 \text{ min}^{-1}$ je višja od izmerjene $n_{maks,i} = 696,2 \text{ min}^{-1}$.

Na sliki 10 desno spodaj je predstavljen vpliv vodostana kot varnostnega elementa. Simulirana sta sistem brez vodostana in primerjava med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi; maksimalni tlak v sistemu z vodostanom ($H_{ti,maks,s} = 87,3 \text{ m.v.s.}$) je znatno manjši od maksimalnega tlaka v cevovodu sistema brez vodostana ($H_{ti,maks,i} = 194 \text{ m.v.s.}$).

Iz značilne oblike oscilacije tlaka v cevovodu je razvidno, da gladina vode v vodostanu doseže zgornjo komoro in se po približno $T = 180,0 \text{ s}$ spusti nazaj v vertikalni jašek. Oscilacije se zadušijo v časovnem intervalu, ki je daljši od $T_o = 1000 \text{ s}$. Zaradi večjih hidrauličnih izgub v dovodnem rovu od teoretičnih so izmerjene amplitude oscilacij manjše od izračunanih.

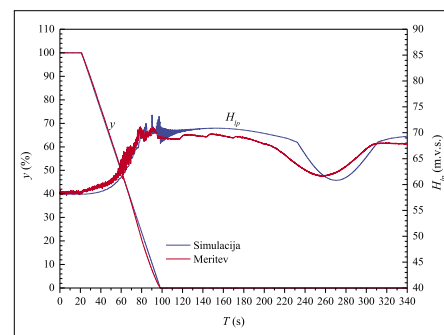
7.2 Istočasno zapiranje predturbinskih loput

Druga analiza upošteva začetno stanje, ko enoti obratujeta pri moči generatorja $P_{gen} = 6,7 \text{ MW}$ in pri nivoju zgornje vode $Z_{zg} = 524,75 \text{ m.n.n.m.}$ Loputa se zapira, kot je to predvideno, s predpisanim načinom obratovanja.



Slika 10 • Primerjava rezultatov simulacije in meritev za primer istočasne razbremenitve dveh turbin – HE Moste

Tlak na gorvodni strani lopute H_{lp} in odprtje lopute ($\gamma = 100\%$ - loputa je popolnoma odprta) sta prikazana na sliki 11. Maksimalni izračunani tlak $H_{lp,maks,s} = 73,4$ m.v.s. je rahlo višji od izmerjenega $H_{lp,maks,i} = 71,5$ m.v.s. Razlika se povečuje proti manjši stopnji odprtja lopute, oscilacije tlaka so podobne kot v primeru hitre zapore.



Slika 11 • Primerjava rezultatov simulacije inmeritve za primer zapiranja predturbinskih loput – HE Moste

8 • SKLEP

Predstavljena je problematika hidravličnih prehodnih pojavov v primeru obnov hidroelektrarn s kompleksnimi pretočnimi sistemi. Uvedba osebnega računalnika skupaj z namensko programsko opremo je povečala možnost določanja stopnje o nevarnosti hidravličnih prehodnih pojavov. Specifika hidroelektrarne kot

gradbenega objekta, vgrajene strojne opreme in načina delovanja v sklopu električnega omrežja zahtevajo široko interdisciplinarno znanje. Izbira varnostnih elementov in ustreznih postopkov za blažitev negativnih posledic hidravličnih prehodnih pojavov naj temelji na oceni varnosti, zanesljivosti in stroškov.

Predstavljena sta praktična primera opravljenih analiz v procesu obnove slovenskih hidroelektrarn; hidroelektrarne Doblar I na reki Soči in hidroelektrarne Moste na reki Savi. V obeh primerih predstavlja varnostni element vodostan, omilitveni ukrep pa dvostopenjski predpisani način zapiranja vodilnih lopatic. Rezultati modeliranja z ekvivalentnim električnim tokokrogom RLC se dobro ujemajo z rezultati terenskih meritev.

9 • LITERATURA

- ASME, The Guide to Hydropower Mechanical Design, HCI Publications, Kansas, 1996.
 Benišek, M., Hidravlične turbine, Mašinski fakultet, Beograd, 1998.
 Bergant, A., Sijamhodžić, E., Water hammer problems related to refurbishment and upgrading of hydraulic machinery, Proceedings of the Conference Hydropower in the Next Century, Portorož, Aqua Media International, str. 611–622, 1997.
 Bergant, A., Obratovanje hidravličnega stroja med prehodnimi pojavi, Litostroj E.I. in Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, Ljubljana, 2006.
 Chaudhry, M.H., Applied Hydraulic Transients, Springer, New York, 2014.
 EPFL, Programski paket SIMSEN, verzija 2.3 standard (Hidro verzija 1.9.4), Lausanne, 2009.
 HydraTek, Applied Hydraulic Transient FAQ, HydraTek, Woodbridge, 2009.
 IBE, Tenderska dokumentacija HE Doblar I, Zahteve Naročnika – splošne tehnične specifikacije, LOT TG – Knjiga 3, Ljubljana, 2008.
 IEC 60308, Turbines hydrauliques – Essais des systèmes de régulation, International Electrical Commission, Geneve, 2005.
 Jaeger, C., Fluid Transients in Hydro-electric Engineering practice, Blackie, Glasgow, 1977.
 Mazij, J., Hidravlični prehodni pojavi v hidroelektrarnah z vgrajenimi Francisovimi turbinami, Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Ljubljana, 2009.
 Nicolet, C., Avellan, F., Allenbach, P., Sapin, A., Simond, J. J., New toll for the simulation of transients phenomena in Francis turbine power plants, Proceedings of the Hydraulic Machinery and Systems 21st IAHR Symposium, International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, Lausanne, Switzerland, 2002.

- Nicolet, C., Hydroacoustic Modelling and Numerical Simulation of Unsteady Operation of Hydroelectric Systems, Disertacija, EPFL, Lausanne, 2007.
- Pejović, S., Boldy, A.P., Obradović, D., Guidelines to hydraulic transient analysis, Gower Technical Press Ltd., Aldershot, 1987.
- Savske elektrarne Ljubljana, Bilten: Hidroelektrarne Moste, Mavčiče, Medvode, Vrhovo, Savske elektrarne Ljubljana, Ljubljana, 1994.
- Soške elektrarne Nova Gorica, Brošura HE Doblar I, II, povzeto po: http://www.seng.si/medijsko_sredisce/predstavitvena_gradiva/, 12. 8. 2014.
- Wylie, E. B., Streeter, V. L., Fluid Transients in Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.
- Zobeiri, A., Nicolet, C., Vuandes, E., Risk analysis of the transient phenomena in a hydropower plant installation, Proceedings of the Conference Practical Solutions for a Sustainable Future, Prague, Aqua Media International, 2011.

PRIPRAVLJALNI SEMINARJI IN IZPITNI ROKI ZA STROKOVNE IZPITE ZA GRADBENO STROKO V LETU 2015

SEMINAR	IZPIT	
	Osnovni in dopolnilni	Revidiranje
9. - 11. 2. 2015	25. 3. 2015 (po potrebi še 24. 3.)	24. 3. 2015
	27. 5. 2015 (po potrebi še 26. 5.)	
5. - 7. 10. 2015	25. 11. 2015 (po potrebi še 24. 11.)	20. 10. 2015

A. PRIPRAVLJALNI SEMINARJI:

Seminarje organizira **Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana**;
 Telefon: (01) 52-40-200; Fax: (01) 52-40-199; e-naslov: gradb.zveza@siol.net; gradbeni.vestnik@siol.net.

Uradne ure:

ponedeljek, torek, sreda od 9.00 do 13.00 ure;
 četrtek od 12.00 do 16.00 ure.

V petek NI URADNIH UR za stranke!

Seminar vključuje **izpitne programe** za:

1. odgovorno projektiranje (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
2. odgovorno vodenje del (osnovni in dopolnilni strokovni izpit)
3. odgovorno vodenje posameznih del
4. Investicijski procesi in vodenje projektov (za kandidate, ki opravljajo dopolnilni strokovni izpit; predavanje se odvija v okviru rednih seminarjev).
5. Kandidati drugih strok lahko poslušajo posamezna predavanja v okviru rednih seminarjev.

(Vsi posamezni programi so dostopni na spletni strani IZS - MSG: <http://www.izs.si>, v rubriki »Strokovni izpiti«)

Cena za udeležbo na seminarju (za predavanje in literaturo) po izpitnih programih pod 1., 2. in 3. točko znaša 623,22 EUR z DDV, pod 4. točko pa 89,10 EUR z DDV. Cena za udeležbo na posameznem predavanju je 89,10 EUR z DDV.

Kotizacijo za seminar je potrebno nakazati ob prijavi na poslovni račun ZDGITS: **SI56 0201 7001 5398 955**. Prijavo je potrebno poslati organizatorju (ZDGITS) najkasneje **14 dni pred pričetkom** seminarja!

Prijavni obrazec je mogoče dobiti na spletni strani ZDGITS (<http://www.zveza-dgits.si>).

Izvedba seminarja je odvisna od števila prijav (najmanj 20).

B. STROKOVNI IZPITI

potekajo pri **Inženirski zbornici Slovenije (IZS), Jarška 10-B, 1000 Ljubljana**.

Informacije o strokovnih izpiti in izpitnih programih je mogoče dobiti na spletni strani IZS <http://www.izs.si>, po telefonu (01) 547-33-19 (uradne ure: ponedeljek, sreda, četrtek, petek: od 10.00 do 12.00 ure; v torek od 14.00 do 16.00 ure) ali osebno na sedežu IZS (uradne ure: ponedeljek, sreda, četrtek, petek: od 8.00 do 12.00 ure; v torek od 12.00 do 16.00 ure).

VSEBINA LETNIKA 63/2014

Članki – Papers

Cotič, P., Murn, P., Kolarič, D., Jagličič, Z., Bosilkov, V., UPORABA PULZNE TERMOGRAFIJE ZA NEPORUŠNE PREISKAVE V GRADBENIŠTVU, APPLICATION OF PULSED THERMOGRAPHY IN NON-DESTRUCTIVE TESTING IN CIVIL ENGINEERING, maj, stran 119.

Dobovšek, M., ODVIJANJE PROMETA NA REKONSTRUIRANEM KRIŽIŠČU ULICE PARIŠKE KOMUNE IN LJUBLJANSKE ULICE V MARIBORU, TRAFFIC PROGRESSION ANALYSIS IN RECONSTRUCTED INTERSECTION OF STREETS PARIŠKE KOMUNE AND LJUBLJANSKA IN THE CITY OF MARIBOR, april, stran 101.

Dolinar, B., SUSPENDIRANI SEDIMENTI V REKI DRAVI, SUSPENDED SEDIMENTS IN THE DRAVA RIVER, april, stran 94.

Donša, B., ENERGETSKA UČINKOVITOST KOT ODLOČITVENI DEJAVNIK NAKUPA NEPREMIČNINE, ENERGY EFFICIENCY AS A DECISION-MAKING FACTOR WHEN PURCHASING REAL ESTATE, marec, stran 71.

Fajfar, P., Polič, M., Klinc, R., ZAZNAVANJE POTRESNE OGROŽENOSTI PRI STROKOVNIAKIH IN NESTROKOVNIAKIH, PERCEPTION OF SEISMIC RISK BY EXPERTS AND LAY PEOPLE, maj, stran 111.

Fajfar, P., Klinc, R., Polič, M., ZAZNAVA MOŽNIH UKREPOV IN ODGOVORNOSTI ZA ZMANJŠANJE POTRESNE OGROŽENOSTI V SLOVENIJI, PERCEPTION OF POSSIBLE MEASURES AND RESPONSIBILITY FOR REDUCING SEISMIC RISK IN SLOVENIA, oktober, stran 221.

Germovnik, N., Jenko, A., Turk, B., Klinc, R., STANJE NA PODROČJU ELEKTRONSKIH VLOG ZA IZDAJO GRADBENEGA DOVOLJENJA V SLOVENIJI, CURRENT SITUATION IN THE FIELD OF ELECTRONIC APPLICATIONS FOR THE ISSUING OF BUILDING PERMITS IN SLOVENIA, avgust, stran 188.

Jukić, M., Brank, B., POSTOPEK ZA PORUŠNO ANALIZO RAVNINSKIH ARMIRANOBETONSKIH NOSILCEV IN OKVIRJEV, A PROCEDURE FOR FAILURE ANALYSIS OF PLANAR REINFORCED CONCRETE BEAMS AND FRAMES, januar, stran 13.

Kemperle, Š., Kristl, Ž., Dovjak, M., SREDSTVA ZA ODIŠAVLJANJE ZRAKA V NOTRANJIH OKOLJIH IN MOŽEN UČINEK NA ZDRAVJE LJUDI, AIR AROMATIZATION PRODUCTS IN INDOOR ENVIRON-

MENTS AND POTENTIAL IMPACT ON HUMAN HEALTH, junij, stran 141.

Mazij, J., Bergant, A., HIDRAVLICNI PREHODNI POJAVI – PROBLEMATIKA OBNOVE HIDROELEKTRARN S KOMPLEKSNIMI PRETOČNIMI SISTEMI, HYDRAULIC TRANSIENT EVENTS – PROBLEMATICS OF RENOVATION OF HYDROPOWER PLANTS WITH COMPLICATED CONVEYANCE SYSTEMS, december, stran 290

Mikoš, M., Istenič Starčič, A., PRENOVA ŠTUDIJA VODARSTVA IN OKOLJSKEGA INŽENIRSTVA NA UL FGG, REFURBISHMENT OF THE STUDY PROGRAMME ON WATER MANAGEMENT AND ECOLOGICAL ENGINEERING AT UL FGG, september, stran 210.

Maže, P., Beg, D., BOČNI PRITISK VIJAKA NA PLOČEVINO V SPOJIH Z ENIM VIJAKOM, BOLT BEARING IN SINGLE BOLT CONNECTIONS, marec, stran 53.

Oražem, M., Briški, V., KOTLOVNICA NA LESNO BIOMASO V PODJETJU MELAMIN, d.d., KOČEVJE, BIOMASS BOILERHOUSE IN THE COMPANY MELAMIN, d.d., KOČEVJE, november, stran 250.

Potočnik, D., Rošar, J., Lamot, A., Vulić, M., TEHNIČNO OPAZOVANJE VELIKIH OBJEKTOV – GEODETSKI MONITORING VELIKIH OBJEKTOV IN JEZER V PRIDOBIVALNEM PROSTORU PREMOGOVNIKA VELENJE, TECHNICAL OBSERVATIONS OF LARGE OBJECTS – GEODETIC MONITORING OF LARGE OBJECTS AND LAKES IN EXPLOITATION AREA OF VELENJE COAL MINE, oktober, stran 240.

Rajh, M., NAPAČNA UPORABA STANDARDA SIST EN 1991-2 ZA PROMETNE OBTEŽBE MOSTOV NA GLAVNIH, REGIONALNIH IN LOKALNIH CESTAH, INCORRECT USE OF STANDARD SIST EN 1991-2 FOR TRAFFIC LOADS ON BRIDGES ON MAJOR, REGIONAL AND LOCAL ROADS, september, stran 204.

Rak, G., Müller, M., Kompare, K., Steinman, F., VPLIV ZARAŠČENOSTI POPLAVNIH POVRŠIN NA POTOVANJE POPLAVNIH VALOV, THE IMPACT OF FLOODPLAIN VEGETATION ON FLOOD WAVE PROPAGATION, januar, stran 2.

Sinur, F., Beg, D., TESTI NA VZDOLŽNO OJAČANIH NOSILCIH V OBMOČJU INTERAKCIJE STRIGA IN UPOGIBA, TESTS ON STIFFENED PLATE GIRDER SUBJECTED TO MOMENT – SHEAR INTERACTION, april, stran 82.

Steigenberger, J., AVSTRIJSKE IZKUŠNJE Z BETONSKIMI VOZIŠČI, THE EXPERIENCE ON CONCRETE PAVEMENTS IN AUSTRIA, junij, stran 134.

Strojan, A., Rant, G., Sterle, F., Nučič, J., PREGLED PODROČJA DELA NA VIŠINI S POUČENOM NA VARNI TEHNIKI IN MOŽNOST UREDITVE TEGA PODROČJA V SLOVENIJI, AN OVERVIEW OF THE FIELD OF WORK AT HEIGHTS WITH THE EMPHASIS ON ROPE ACCESS AND THE POSSIBILITY OF IMPROVEMENT OF FIELD WORK REGULATIONS IN SLOVENIA, julij, stran 155.

Venta, M., Likar, J., Marolt, T., GEOMEHANSKE NUMERIČNE ANALIZE VPLIVOV GRADNJE PREDOROV NA POVRŠINO, GEOMECHANICAL NUMERICAL ANALYSES OF TUNNEL CONSTRUCTION INFLUENCES ON THE GROUND SURFACE, december, stran 273.

Vimpošek, B., Lerher, T., Potrč, I., Mikuljan, M., Kutnar, A., LESNI ODPADKI IN BIOMASA: PRAVNA UREDITEV V SLOVENIJI IN NEMČIJI; 1. DEL – GOSPODARJENJE Z ODPADNIM LESOM, WOOD WASTE AND BIOMASS: LEGAL REGULATION IN SLOVENIA AND GERMANY; PART 1 – MANAGEMENT OF WASTE WOOD, julij, stran 165.

Vimpošek, B., Lerher, T., Potrč, I., Mikuljan, M., Kutnar, A., LESNI ODPADKI IN BIOMASA: PRAVNA UREDITEV V SLOVENIJI IN NEMČIJI; 2. DEL – ENERGETSKA PREDELAVA IN ODSTRANJEVANJE ODPADNEGA LESA, WOOD WASTE AND BIOMASS: LEGAL REGULATION IN SLOVENIA AND GERMANY; PART 2 – ENERGY RECOVERY AND WOOD WASTE DISPOSAL, avgust, stran 178.

Vodopivec, B., Theuerschuh, J., Šelih, J., Žarnić, R., OPREDELITEV VEČKRITERIJSKE OCENE STAVBNE DEDIŠČINE ZA DOLOČITEV PRIORITET OBNOVITVENIH POSEGOV; PRIMER GRADOV, DEFINITION OF MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF ARCHITECTURAL HERITAGE TO DETERMINE PRIORITIES OF RECONSTRUCTION INTERVENTION; THE CASE OF CASTLES, oktober, stran 229.

Zadnik, B., ŽLEDNA UJMA 2014 IN NJENE POSLEDICE NA SLOVENSKEM DALJNOVODNEM OMREŽJU, ICING 2014 AND ITS IMPACT ON THE SLOVENIAN OHL NETWORK, september, stran 194.

Zupan, E., Planinc, I., NELINEARNA DINAMIČNA ANALIZA LINIJSKIH KONSTRUKCIJ POD VPLIVOM PREMIKAJOČE SE MASE, NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF BEAM-LIKE STRUC-

TURES UNDER THE INFLUENCE OF A MOVING MASS, november, stran 257.

Žižmond, J., Dolšek, M., MODELIRANJE EFEKTIVNE ŠIRINE PASNICE GREDE ZA NELINEARNO ANALIZO ARMIRANOBETONSKE OKVIRNE STAVBE, MODELLING OF EFFECTIVE FLANGE WIDTH OF BEAM FOR NONLINEAR ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAME BUILDING, februar, stran 26.

Županek, T., UPORABA AVTENTIČNIH STROKOVNIH BESEDIL PRI TUJEM JEZIKU V OKVIRU INŽENIRSKEGA ŠTUDIJA, USE OF AUTHENTIC TECHNICAL TEXTS AT FOREIGN LANGUAGE TEACHING FOR ENGINEERING STUDY, februar, stran 40.

Odmevi

Brilly, M., O STROKOVNOSTI IN STROKOVNI RAZPRAVI, februar, stran 47.

Rismal, M., ODGOVOR NA PRISPEVEK O STROKOVNOSTI IN STROKOVNI RAZPRAVI PROF. DR. BRILLYJA V GRADBENEM VESTNIKU FEBRUARJA 2014, maj, stran 130.

Voščilo

Kryžanovski, A., VOŠČILO PREDSEDNIKA ZDGITS, december, stran 270.

In memoriam

Korelc, J., PROF. DR. DARKO BEG, UNIV. DIPL. INŽ. GRAD., 1954-2014, marec, stran 50.

Koren, P., Zupanc, D., PROF. VUKAŠIN AČANSKI, UNIV. DIPL. INŽ. GRAD., 1941-2014, oktober, stran 218.

Panjan, J., PROF. DR. BORIS KOMPARE, UNIV. DIPL. INŽ. GRAD., 1956-2014, december, stran 271.

Tomažević, M., FRANC ČAČOVIČ, UNIV. DIPL. INŽ. GRAD., 1927-2014, marec, stran 52.

Zajc, D., JANEZ NERED, UNIV. DIPL. INŽ. GRAD., 1930-2014, maj, stran 110.

Iz zgodovine

Zadnik, B., Jožef Mrak (1709-1786), julij, stran 154.

Novice iz DGIT

Preskar, J., Ekскурzija DGIT Novo mesto, julij, stran 176.

Preskar, J., Oglad gradbišč na železniški progi Pragersko-Hodoš, november, stran 267.

Novice iz IZS MSG

Zadnik, B., Jubilejna, 60. generalna skupščina ECCE, november, stran 266.

Obvestila ZDGITS

Spremenjen razpored seminarjev za strokovne izpite, januar, stran 22.

Seminar za strokovni izpit, maj, stran 131.

Obvestilo članom MSG, september, stran 209.

Pripravljalni seminarji in izpitni roki za strokovne izpite za gradbeno stroko v letu 2015, december, stran 298.

Pobuda

Pečenko, B., Pobuda za razmislek, februar, stran 46.

Ponudba IZS

Knjiga Ljubljanska inženirska zbornica 1919-44, april, stran 108.

Popravek

Popravek, april, stran 100.

Poročilo s strokovnega in znanstvenega srečanja

Širca, A., Simpozij ob 20. obletnici ustanovitve SLOCOLD, januar, stran 23.

Promocijski članek

Krause, U., Mednarodna konferenca o upravljanju padavinske vode 2014 v Budimpešti, oktober, stran 246.

Razpis

Nagrade IZS 2014, junij, stran 152.

Vabila

Projektni forum 2014, februar, stran 45.

Vabilo FGG, februar, stran 4 ovitka.

Skupščina ZDGITS, april, stran 100.

Informativni dan na FGG, maj, stran 4 ovitka.

25. Mišičev vodarski dan 2014, november, stran 265.

Vsebina letnika 63/2014

december, stran 299.

Navodila avtorjem za pripravo prispevkov

V vsaki številki, stran 2 ovitka.

Novi diplomanti

Okorn, E., januar, stran 3 ovitka; februar, stran 3 ovitka; marec, stran 3 ovitka; april, stran 3 ovitka; maj, stran 132; junij, stran 3 ovitka; julij, stran 3 ovitka; avgust, stran 3 ovitka; oktober, stran 247; november, stran 3 ovitka; december, stran 3 ovitka.

Koledar prireditev

Okorn, E., januar, stran 4 ovitka; marec, stran 4 ovitka; april, stran 4 ovitka; maj, stran 3 ovitka; junij, stran 4 ovitka; julij, stran 4 ovitka; avgust, stran 4 ovitka; september, stran 4 ovitka; oktober, stran 4 ovitka; november, stran 4 ovitka; december, stran 4 ovitka.

Naslovnice

Duhovnik, J., Ali je kaj trden most?, januar.

Duhovnik, J., KSEVT – Kulturno središče evropskih vesoljskih tehnologij v Vitanjah, maj.

Duhovnik, J., Gradnja mostu čez Poljansko Soro na Škofjeloški obvoznici pri Bodovljah, avgust.

Duhovnik, J., Montažna betonska konstrukcija objekta LTH Ulički na Trati pri Škofji Loki, november.

Foto arhiv IBE, Zaradi katastrofalnega žleda porušen steber daljnovoda 20kV Logatec-Cerknica v Logatcu, februar.

Golijan, J., Izvedba pripravljanih del za HE Brežice, junij.

Kacin, G., Brusove klavže na Belci, julij.

Kambič, M., Ribja brv čez Ljubljanico v Ljubljani, december.

Križaj, S., Gradnja cestnega nadvoza čez železniško progo v Zgornjem Logu pri Litiji, september.

Sinur, F., Preskus polnostenskega nosilca (L=11,16 m, H=1,5 m) v laboratoriju UL FGG, april.

Stevanič, Ž., Gradnja novih stavb Fakultete za računalništvo in Fakultete za kemijo Univerze v Ljubljani, marec.

Vodopivec, B., Prenova Lanthierijeve graščine v Vipavi leta 2012, oktober.

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

VISOKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Gašper Amon, Dimenzioniranje značilnih elementov nosilne konstrukcije več etažnega poslovnega objekta v Logatcu, mentor izr. prof. dr. Sebastjan Bratina

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Andrej Andrejaš, Ocena vpliva deformabilnosti tal na obnašanje armiranobetonske stavbe pri potresni obtežbi, mentor izr. prof. dr. Matjaž Dolšek, somentor doc. dr. Boštjan Pulko

Anja Mravlje, Analiza požara in produkti gorenja v objektu lesno-predelovalne industrije, mentor doc. dr. Mitja Košir, somentor doc. dr. Mateja Dovjak

Jernej Plahuta, Parametrična in povratna analiza gradnje predorov v anizotropnih kamninah s programom UDEC, mentor izr. prof. dr. Janko Logar, somentor asist. dr. Jure Klopčič

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM OPERATIVNO GRADBENIŠTVO

Danijel Benko, Preskušanje reoloških lastnosti svežega betona pri različnih razmerjih apnenčeve moke in kemijskega stabilizatorja, mentor izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, somentor Andraž Hočevar

Urban Cvajnar, Analiza poteka sanacije mosta čez Savo v Dolškem, mentor izr. prof. dr. Jana Šelih, somentor asist. dr. Matej Kušar

Peter Dagarin, Raba stranskih produktov izgorovanja premoga za zasipe kanalov in geosond, mentor doc. dr. Ana Petkovšek, somentor asist. dr. Matej Maček

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM OKOLJSKO GRADBENIŠTVO

Klemen Kestnar, Vpliv gozda na odtoke z dveh eksperimentalnih porečij na Pohorju, mentor doc. dr. Mojca Šraj, somentor dr. Urša Vilhar

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Katja Drogenik, Donat Mg – od nekoč do danes, mentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc

Gašper Jagodič, Analiza lesene skeletne enodružinske hiše, mentor doc. dr. Erika Kozem Šilih, somentor asist. Mateja Zlatinek

MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Nadja Ferlan, Vpliv značilnosti stanovanj na njihovo vrednost, mentor izr. prof. dr. Igor Pšunder

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO – EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

INTERDISCIPLINARNI UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA – SMER GRADBENIŠTVO – Bolonjski študijski program 2. stopnje

Matej Levstek, Uporaba razbremenilnika v vodovodnem sistemu za pridobivanje električne energije, mentorja doc. dr. Branka Trček in red. prof. dr. Duško Uršič, somentor viš. pred. mag. Bernardka Jurič

Rubriko ureja • Eva Okorn, gradb.zveza@siol.net

Vsem diplomantom čestitamo!

Skladno z dogovorom med ZDGITS in UL FGG ter ZDGITS in UM FG vsi diplomanti gradbenega oddelka Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani ter diplomanti Fakultete za gradbeništvo Univerze v Mariboru prejemajo **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, Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana; telefon: (01) 52 40 200; faks: (01) 52 40 199; e-mail: gradb.zveza@siol.net**.

ZDGITS in Uredništvo Gradbenega vestnika

KOLEDAR PRIREDITEV

10.-21.1.2015

ICGCE 2015 – 2nd International Conference on Geological and Civil Engineering

Dubaj, Združeni arabski emirati
www.icgce.org

19.-24.1.2015

BAU 2015

München, Nemčija
www.bau-muenchen.com

3.-5.3.2015

ECOBUILD – Sustainable design – Construction – Energy

London, Anglija
www.ecobuild.co.uk

25.-27.3.2015

MEFORM 2015

Freiberg, Nemčija
www.imf.tu-freiberg.de/imfwp/?page_id=3654

26.-29.3.2015

Pomladni sejem gradbeništva, energetike, komunale in obrti

Gornja Radgona, Slovenija
www.pomurski-sejem.si

12.-17.4.2015

7th World Water Forum

Daegu-Gyeongbuk, Republika Koreja
<http://worldwaterforum7.org/en>

14.-17.4.2015

24. International Mining Congress and Exhibition of Turkey IMCET2015

Antalya, Turčija
<http://imcet.org.tr/defaulten.asp>

22.-23.4.2015

12. Slovenski kongres o cestah in prometu

Portorož, Slovenija
www.drc.si

5.-7.5.2015

20th International Conference on Urban Planning and Regional Development in the Information Society

Gent, Belgija
www.corp.at/

10.-13.5.2015

ICSDEC 2015 – International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction

Chicago, ZDA
www.icsdec.com/index.html

13.-15.5.2015

IABSE Conference Nara 2015

Nara, Japonska
www.iabse.org/Nara2015

17.-21.5.2015

ICONE23 – 23rd International Conference on Nuclear Engineering

Makuhari, Chiba, Japonska
www.icone23.org/about.html

20.-23.5.2015

ICOCEE – Cappadocia – International Conference on Civil and Environmental Engineering

Nevsehir, Turčija
www.icocee.org

22.-28.5.2015

WTC 2015 – Svetovni kongres o tunelih in podzemni gradnji

Dubrovnik, Hrvaška
http://wtc15.com/marketing_tools

25.-29.5.2015

XVth IWRA World Water Congress

Edinburgh, Škotska
www.worldwatercongress.com

3.-7.6.2015

5th International Congress on Construction History

Chicago, ZDA
www.5icch.org

22.6.-2.7.2015

XXVth IUGG General Assembly

Praga, Češka
www.iugg.org/programmes/grants2015.php

9.-11.7.2015

International Scientific Conference Road Research and Administration, "CAR 2015"

Bukurešta, Romunija
http://car.utcb.ro/page_id=17&lang=en

15.-17.9.2015

NDT-CE – International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 2015

Berlin, Nemčija
www.ndt-ce2015.net/home

2.-4.11.2015

6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering

Christchurch, Nova Zelandija
www.6icege.com

7.-9.12.2015

Building Simulation Conference 2015

Hyderabad, Indija
www.bs2015.in/

Rubriko ureja • **Eva Okorn**, ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: gradb.zveza@siol.net