

# 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, junij 2008, letnik 57, str. 145-172

Izdajatelj:

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

Izdajateljski svet:

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

Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

Sodelavec pri MSG IZS:

**Jan Kristjan Juteršek**

Lektor:

**Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:

**Darja Okorn**

Tajnica:

**Anka Holobar**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočeovski tisk**

Naklada:

**3000 izvodov**

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

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

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

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

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

- Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
- Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
- Besedilo prispevkov mora biti napisano v slovenščini.
- Besedilo mora biti izpisano z znaki velikosti 12 pik z dvojnimi presledkom med vrsticami.
- Prispevki morajo imeti naslov, imena in priimke avtorjev ter besedilo prispevka.
- Besedilo člankov mora obvezno imeti: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); oznako ali je članek strokoven ali znanstven; nazive, imena in priimke avtorjev ter njihove naslove; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ..., naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so dodatki označeni še z A, B, C, itn.
- Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni.
- Slike, preglednice in fotografije morajo biti omenjene v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino. Vse slike in fotografije v elektronski obliki (slike v običajnih vektorskih grafičnih formatih, fotografije v formatih .tif ali .jpg visoke ločljivosti) morajo biti v posebnih datotekah, običajne fotografije pa priložene.
- Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
- Kot decimalno ločilo je treba uporabiti vejico.
- Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki: (priimek prvega avtorja, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja morajo biti označena še z oznakami a, b, c, itn.
- V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela opisana z naslednjimi podatki: priimek, ime prvega avtorja (lahko okrajšano), priimki in imena drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
- 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.
- Prispevke je treba poslati glavnemu in odgovornemu uredniku prof. dr. Janezu Duhovniku na naslov: FGG, Jamova 2, 1000 LJUBLJANA oz. [janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si](mailto:janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si). V spremnem dopisu mora avtor članka napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren. Prispevke je treba poslati v enem izvodu na papirju in v elektronski obliki v formatu MS WORD in v 8. točki določenih grafičnih formatih.

Uredništvo

# Vsebina • Contents

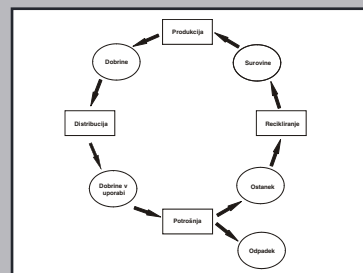
## Članki • Papers

stran **146**

dr. Roman Kunič, univ. dipl. ing. grad.  
prof. dr. Aleš Krainer, univ. dipl. ing. arh.

### **ENERGETSKA UČINKOVITOST, VAROVANJE OKOLJA IN CELOSTNO NAČRTOVANJE**

ENERGY EFFICIENCY, ENVIRONMENTAL PROTECTION AND DESIGN PROCESS

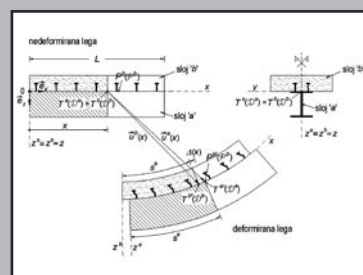


stran **153**

doc. dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.  
prof. dr. Miran Saje, univ. dipl. inž. grad.  
izr. prof. dr. Igor Planinc, univ. dipl. inž. grad.

### **VPLIV PODAJNOSTI STIKA NA OBNAŠANJE SOVPREŽNIH NOSILCEV IZ BETONA IN JEKLA**

THE EFFECT OF INCOMPLETE INTERACTION ON BEHAVIOUR OF STEEL – CONCRETE COMPOSITE BEAMS

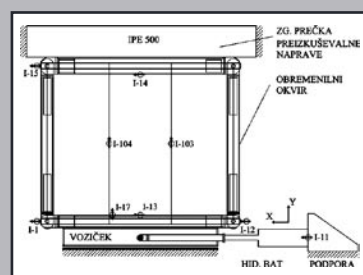


stran **163**

asist. Matej Rozman, univ. dipl. inž. grad.  
asist. dr. Peter Skuber, univ. dipl. inž. grad.  
Barbara Gorenc, univ. dipl. inž. grad.  
mag. Črtomir Remec, univ. dipl. inž. grad.  
prof. dr. Darko Beg, univ. dipl. inž. grad.

### **TESTI STRIŽNE NOSILNOSTI FASADNIH PANELOV TRIMO**

EXPERIMENTAL TESTS OF SHEAR STRENGTH OF CLADDING PANELS TRIMO



## Novi diplomanti

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

## Koledar prireditev

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

Slika na naslovnici: Preizkus spojev med paneli Trimo in lego v laboratoriju FGG, foto Matej Rozman



# ENERGETSKA UČINKOVITOST, VAROVANJE OKOLJA IN CELOSTNO NAČRTOVANJE

## ENERGY EFFICIENCY, ENVIRONMENTAL PROTECTION AND DESIGN PROCESS

**dr. Roman Kunič, univ. dipl. ing. grad.**

FRAGMAT TIM, d. d., Oddelek za raziskave in razvoj, Laško

**prof. dr. Aleš Krainer, univ. dipl. ing. arh.**

UNIVERZA V LJUBLJANI, Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente  
KSKE, Jamova 2, Ljubljana

**Znanstveni članek**

UDK: 504:697:699.86

**Povzetek** | Vpliv družbe na okolje je vse intenzivnejši, kar vzbuja povečanje ozaveščenosti in nakazuje potrebo po varčevanju z energijo in varovanju okolja. Ekonomija in svetovno gospodarstvo sta od začetka industrijske revolucije do sedaj slonela na relativno poceni energiji, surovinah in drugih virih. V 21. stoletju bo svetovna ekonomija odvisna od varčevanja z energijo, ekološkega načrtovanja, recikliranja, ponovne uporabe, ponovne izdelave in popravil. Gradbeništvo je v bruto nacionalnem dohodku udeleženo v praktično vseh državah z vsaj desetimi odstotki, hkrati pa predstavlja poraba materialov, surovin in energije ter količina odpadkov v celotni življenjski dobi objektov celo 40 % svetovnih količin. Nujno je, da so tehnološke, ekonomske in politične odločitve v industriji gradbenih materialov in gradbenih storitvah planirane, gradbena dejavnost vnaprej načrtovana, projektno vodena, objekti ekonomično zgrajeni in kasneje – v vseh stopnjah uporabe v smislu dobrega gospodarja – kakovostno vzdrževani. Večji poudarek moramo posvečati tudi varčevanju z neobnovljivimi viri energije, zmanjševanju porabe surovin in drugih resursov, varovanju okolja, planiranju recikliranja in skrbi ter upravljanju z odpadki, ki nastopajo kot rezultat zaključka življenjske dobe ali odstranitve.

**Summary** | Increasing intensive impacts of society on the environment encourage greater environmental awareness and indicate the requirements of energy savings and environmental protection. Since the beginning of the industrial revolution, global economy has been supported by relatively cheap energy, raw materials, and other resources. In the 21st century, global economy will be driven by energy savings, eco-design, remanufacturing, reuse, repair, and recycling. The building industry represents at least 10 % of the gross national income in practically all the countries and, at the same time, the raw material and energy use and the quantity of waste material in the entire life cycle of a building represents as much as 40 % of all global quantities. It is necessary that all technical, economical and political decisions in the construction industry and construction services should be planned in advance. The buildings should be economically constructed and later qualitatively maintained in all phases of their use. More emphasis should be given to energy savings, renewable energy sources, minimizing the use of raw materials and other resources, environmental protection, planning of recycling, and management of waste material.

## 1 • UVOD

Gradbeništvo, industrija gradbenih materialov in sistemov, skupaj z vgradnjo, operativno in vzdrževanjem predstavlja velik del gospodarske aktivnosti in pomemben delež privatne in družbene lastnine. Odločitve v industriji gradbenih materialov in storitvah gradbene operativne morajo biti planirane, gradbena dejavnost vnaprej načrtovana, projektno vodena, objekti ekonomično zgrajeni in kasneje – v vseh stopnjah uporabe v smislu dobrega gospodarja – kakovostno vzdrževani. Velik poudarek moramo posvečati tudi varčevanju z neobnovljivimi viri energije, zmanjševanju porabe surovin

in drugih virov, varovanju okolja, planiranju recikliranja in skrbi ter upravljanju z odpadki, ki nastopajo kot rezultat zaključka življenjske dobe zgradbe ali njenih delov ali odstranitve. Vsa ta dejavnost ima izreden vpliv na človekovo okolje, naravo, ekonomski razvoj in celotno gospodarstvo.

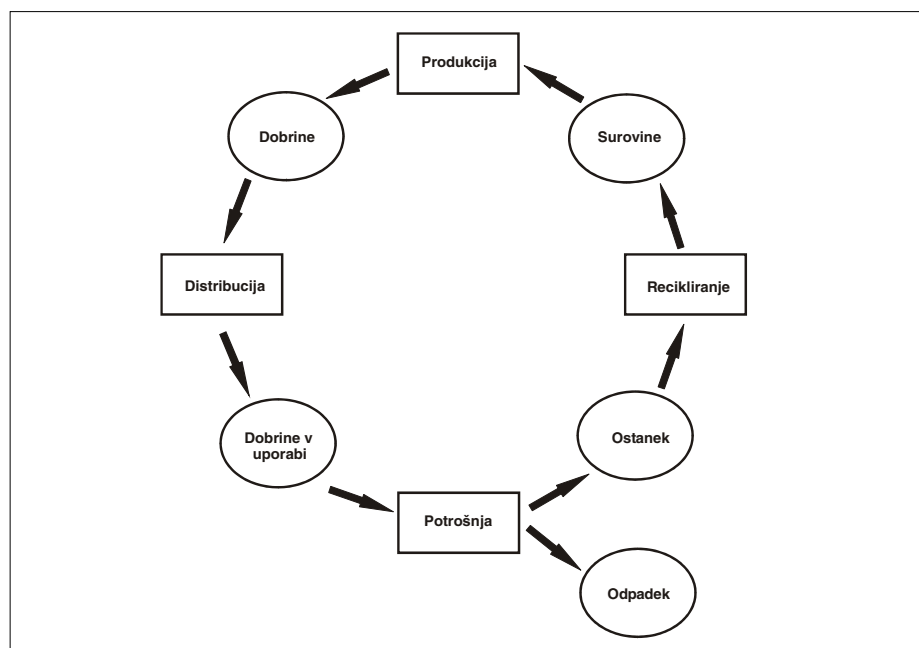
Zaradi vse večjih pritiskov človeka na okolje in vse večje človekove porabe neobnovljivih virov energije se povečuje zavedanje o trajnostnem pomenu varovanja okolja in poseganju vanj. Ob tem vse bolj narašča pomen pridobivanja informacij in odločanja v smislu trajnostnega gospodarjenja z okoljem in objekti

v okolju. Najrazvitejše države, ki tudi narekujejo svetovne okoljevarstvene trende, imajo v veljavi že natančno predpisane standarde, predpise in smernice, ki urejajo in ugotavljajo določevanje življenjskih dob, ekonomsko vrednotenje stroškov v življenjskem ciklusu, varovanje okolja ter varčevanje z energijo pri oblikovanju, projektiranju, gradnji, uporabi in odstranitvi vseh objektov visoke in nizke gradnje (SIST, EN in ISO standardi). Pridobivanje surovin, proizvodnja izdelkov, vgradnja ali montaža, uporaba, predvsem pa odstranitve in skrb za odpadke so v gradbeništvu okoljsko problematični. Posamezni materiali, ki lahko služijo istemu namenu in so za ta namen podobno učinkoviti, lahko na svoji življenjski poti različno vplivajo na obremenjevanje okolja.

## 2 • PROIZVODNO-POTROŠNIŠKI CIKLUS

V proizvodno-potrošniškem ciklusu do človekovega vmešavanja ni bilo odpadnih produktov. Ciklus oziroma celoten krog je bil popolnoma sklenjen. Komponenta, ki je za eno vrsto odpadek ali višek, je za drugo glavna substanca (Seliškar, 1981).

Življenjsko dobo (Service Life – SL) v proizvodno-potrošniškem ciklusu predstavljata samo dve stopnji, to sta »dobrine v uporabi« in »potrošnja«, medtem ko za vrednotenje življenjskega ciklusa, oceno ekoloških bilanc ali za oceno stroškov v življenjskem ciklusu upoštevamo in vrednotimo vse stopnje v proizvodno-potrošniškem ciklusu.



Slika 1 • Proizvodno-potrošniški ciklus (Assimow, 1962)

## 3 • CELOSTNO NAČRTOVANJE

Celostno načrtovanje pomeni načrtni pristop k optimizaciji proizvodno-potrošniškega ciklusa stavbe ob hkratnem vzajemnem upoštevanju ekologije, energije, varovanja okolja, arhitekture, gradbene tehnike in

ekonomije, medtem ko pojem inženiring pomeni kreativno apliciranje znanstvenih dognanj in tehnike na razvoj, proces ali izdelavo določenega izdelka ali storitve (Krainer, 1977).

Iwata brezkompromisno govori o čim večji kakovosti za čim nižjo ceno (Iwata, 2005) in za razliko od avtorjev (Köhl, 2004) ne upošteva trajnosti kot kriterija zahtev za proizvode. Največja težava sodobnih materialov v gradbeništvu ni vedno samo zanesljivost in trajnost, ampak vse pogostejše konkurenčna cena za ustrezno raven kakovosti, zanesljivosti in trajnosti. Da bi se izognili tem težavam,

bi morali imeti orodja za dovolj natančno določevanje pričakovanih življenjskih dob materialov, kompozitov, elementov sistema, celotnih naprav, kompleksnih proizvodov ali sistemov (Köhl, 2004).

Objekti ne morejo biti izvzeti iz okolja, v katerem so nameščeni, ampak nasprotno: vključeni so v prostor kot celoto: okoljsko, prostorsko, zgodovinsko in kulturno celoto. Visokogradni in nizkogradni objekti imajo kot umetno ustvarjeno okolje ogromen vpliv na naravno okolje, biotope in naravni ekološki sistem. Vsak gradbeni objekt je enkrat in neponovljiv. V kolikor so si medsebojno podobni po obliki in funkcionalnosti, so drugačni po prostorski umestitvi v okolje. Za razliko od širokopotrošnih dobrin so gradbeni posegi načrtovani za znatno daljše časovno obdobje, poleg tega so v večini primerov kompleksnejši in obsežnejši od mnogih še tako visokotehnoloških proizvodov (Itonaga, 2005).

Trajnostna stavba je tista, ki je oblikovana na tak način, da (Murakami, 2005):

- varčuje z energijo in drugimi resursi, reciklira materiale, znižuje emisije toksičnih snovi skozi celoten proizvodno-potrošniški cikel,
- je v harmoniji, sozvočju z lokalno klimo, tradicijo gradnje, kulturo in okolico,
- je sposobna trajno izboljševati kakovost bivanja in hkrati vzdrževati ekološko bilanco na lokalni in globalni ravni.

### 3.1 Življenjska doba materialov in sistemov v gradbeništvu

Poznamo funkcionalno in fizično trajnost. Funkcionalna dotrajanost je hitrejša od fizične (materialne) dotrajanosti in jo je glede na fizično dotrajanost tudi težje določiti. V preteklosti so objekti desetletja in desetletja (celo stoletja) uspešno opravljali svojo funkcijo, za katero so bili zgrajeni. V današnjem svetu pa nastopa problem hitre funkcionalne zastarelosti. Danes so praktično nove stavbe že zastarele in neuporabne za opravljanje funkcije, za katero so bile zgrajene. Še drastičnejši primeri so v industriji (Seliškar, 1981).

Karakteristike gradbenih materialov in sistemov so izredno pomembne in odločitve o pravilni izbiri temeljijo na primerjavi tipične življenjske dobe. Pri standardih gradbene izvedbe nas predvsem zanima celostno oblikovanje stavb. Parameter, ki je vse pomembnejši, je na primer letna poraba energije na enoto površine (enota: kWh/m<sup>2</sup> na leto), ki bi ga s pridom morali uporabljati (Iwamura, 2005):

- javni in privatni zagovorniki projekta,
- lastniki, prodajalci, kupci, najemniki in uporabniki stavb zaradi enostavnega določanja energetske učinkovitosti stavb in posledične pretvorbe v stroške vzdrževanja objekta, ker je na ta način omogočena primerjava med projekti in ovrednotenje bodočih stroškov,
- arhitekti, gradbeniki, energetiki in oblikovalci, ker standardi učinkovitosti omogočajo kreativno izbiro optimalne rešitve med aktivnimi in pasivnimi tehnologijami,
- izvajalci, ki vodijo gradnjo v skladu z načrti, stroko in z razpoložljivimi finančnimi sredstvi,
- člani lokalne komune, vključno z uporabniki in sosedi stavbe,
- vladni uslužbenci v funkciji usmerjanja urbanega načrtovanja, predpisov o graditvi objektov in koordinaciji z lokalnimi prebivalci.

Celostno oblikovanje ima največji vpliv na stopnji planiranja, to je na stopnji, ko je določen projekt tudi stroškovno najcenejši. Na zgodnji stopnji planiranja in procesa oblikovanja moramo evidentirati vse ključne parametre – za razliko od ustaljene prakse, ko se v procesu planiranja in izgradnje osredotočimo samo na stroške gradnje in organizacije gradnje, žal redkeje na stroške obratovanja, tekoče vzdrževanje, zamenjave in investicijsko vzdrževanje, praktično nikoli pa na celotno življenjsko dobo, bodisi na uporabno, projektirano ali napovedovano življenjsko dobo, kot tudi ne na stroške odstranitve, recikliranja in upravljanja z odpadki (Köhl et al. 2004).

Krigsvoll definira tudi splošne pogoje celostnega načrtovanja (Krigsvoll, 2005):

- arhitekturni (prostorska organizacija, estetika, funkcionalnost, fleksibilnost),
- tehnični (zakoni, predpisi in standardi, varnost, trajnost, učinkovitost, vzdrževanje),
- ekonomski (stroški investicije, obratovanja in vzdrževanja, stroški v življenjskem krogu stavbe).

Z energetskega in trajnostnega vidika je napačno načrtovanje življenjske dobe samo na osnovi relativno hitre funkcionalne zastarelosti objekta in vgrajevanje takšnih materialov in sistemov, ki opravljajo svojo nalogo do izteka funkcionalnosti objekta, ko objekt tudi porušimo, ne da bi selektivno upoštevali možne življenjske dobe različnih materialov in sistemov. Takšno početje pripelje do življenjskih dob objektov le nekaj desetletij in do izrazite energetske potratnosti, kar opisujejo tudi mnogi ameriški in japonski strokovnjaki. Poleg tega so tudi kasnejše, v kolikor želimo

podaljšati življenjsko dobo stavb, nameravane prenove ali adaptacije finančno in tehnološko zelo zahtevne.

Oblikovalec je odgovoren za upoštevanje celotnega ciklusa stavbe, od planiranja, gradnje, obratovanja, popravil, vzdrževanja, odstranjevanja in deponiranja. Pri tem mora maksimalizirati vrednost v celotnem življenjskem ciklusu in hkrati minimalizirati stroške in vpliv na okolje. Hasegawa opisuje sindrom »bolne hiše«, ki ima notranjo mikroklimo v prostoru takšno, da je bivanje zdravju škodljivo, kar je posledično tudi vzrok raznim boleznim, kot so alergije, težave z dihalni in podobno (Hasegawa, 2005). Nezdrave notranje prostore opisujejo avtorji ((Rodman, 1995) in (Bogaki, 2005), ki podajajo primere osnovnih šol na Japonskem z resnimi vplivi na fizično in čustveno počutje učencev, izpostavljenih slabemu notranjemu okolju.

### 3.2 Poraba energije in odnos do okolja

Z okoljem je človek že od nekdaj slabo ravnal, čeprav se je problemov onesnaženja zavedal zgodaj, saj so že grški filozofi, kot sta Platon in Aristotel, opozarjali na prekomerno krčenje gozdov. Erozijo zemlje je povzročala intenzivna sečnja lesa za izdelavo tovornih in bojnih ladij. Človekova stalna želja je bila, da bi se ustalil, si podredil naravo in si pridobil produkte, ki bi mu trajno služili pri zadovoljevanju njegovih potreb. Priča smo nenehnim naporom, delu in različnim raziskavam, ki imajo za svoj cilj preusmeriti naravne sile in naravna bogastva v človeško korist.

Zaskrbljenost o količini razpoložljivih virov je prisotna že od začetka industrijske revolucije, to je od takrat, ko je poraba energije in drugih virov eksplozivno narasla. Trenutna ocena je, da bodo praktično vsi viri pošli v približno petdesetih letih. Sedaj samo 20 % svetovnega prebivalstva porabi kar 80 % celotne količine neobnovljivih virov energije (Yashiro, 2005). Gradbeni sektor v svetovnem merilu zaznamuje pravilo štiridesetih odstotkov (Kernan, 2001):

1. svetovna gradbena industrija vsako leto porabi tri milijarde ton materialov, oziroma 40 % celotne svetovne porabe vseh materialov in surovin,
2. med gradnjo in med uporabo gradbeni objekti porabijo približno 40 % vse potrebe po energiji in naravnih virov na svetu,
3. po sklenjenem proizvodno-potrošniškem ciklusu predstavljajo gradbeni odpadki 40 % vseh povzročenih odpadkov na svetu.

Za gradnjo porabimo kar 25 % od celotne svetovne količine posekanega lesa in 17 % vseh potreb po vodnih virih. Samo gradbeništvo pa predstavlja več kot 10 % globalne ekonomske aktivnosti (Athena Institute, 2002).

Skozi celotno zgodovino človeštva in v vseh klimatskih conah na zemlji se je ugodna klima v notranjosti prostorov reševala izključno s pomočjo metod pasivne arhitekture, izjema je le uporaba kurišč za ogrevanje in priprave hrane. Šele po letu 1950 je množična distribucija in poraba energije prinesla druge »aktivne načine«, ki so vse bolj in bolj energetsko potratni (Kodama, 2005).

Gozd, ki ni vzdrževan, ne nudi dodatne absorpcije ogljikovega dioksida (CO<sub>2</sub>), ker stara in odmrta drevesa za gnitje porabljajo kisik, ki ga mlada drevesa pridelujejo s fotosintezo. Tudi zato je dobrodošla uporaba lesa za gradbeništvo (Hasegawa, 2005). Podobno velja tudi za uporabo lesa za namene ogrevanja, kjer s sečnjo omogočimo rast mladih dreves, s tem dodatno absorpcijo ogljikovega dioksida in hkrati s tem zmanjšujemo porabo fosilnih goriv. Les ima kot najbolj ekološki gradbeni material posebno mesto, saj bi se kljub povečanju sečnje za potrebe gradnje ali tudi kurjave zmanjševala vsebnost CO<sub>2</sub> v ozračju ((Hasegawa, 2005) in (Arima, 2005)). Konstrukcijski sklopi iz lesa potrebujejo v fazi proizvodnje, montaže ali vgradnje znatno manj energije kot taisti sklopi iz armiranega betona ali jekla. Tako ima les najnižjo porabo energije in najmanjše emisije ogljikovega dioksida med vsemi gradbenimi materiali, poleg tega je tudi popolnoma obnovljiv vir. Marsikdo zmotno misli, da bi se s povečevanjem njegove uporabe krčili gozdovi in večale emisije ogljikovega dioksida. Poraba lesa vzpodbuja gozdarstvo in širjenje gozdov. S tem je povečan učinek ponora ogljikovega dioksida in posledično s tem se zmanjšuje količina ogljikovega dioksida v atmosferi. Ko les odsluži svojemu namenu, ga lahko brez težav uporabimo kot gorivo. Je obnovljiv vir, dragoceni pa so tudi gozdovi, ki delujejo kot ponor ogljikovega dioksida. Pravilno bi bilo, da na izbiro materialov ne bi smela vplivati zgolj cena, ampak je potrebna kritična presoja s celostnega vidika varovanja okolja in vrednotenja življenjskega ciklusa (Athena Institute, 2002). Koncept trajnostnega razvoja se v vedno večji meri uveljavlja v mednarodni skupnosti, v državah članicah Evropske unije, in sicer kot razvoj, ki omogoča preživetje tudi bodočim generacijam in poleg skrbi za preprečevanje in zmanjševanje onesnaževanja na viru, poudarja tudi manjšo in smotrnejšo rabo

naravnih virov ter ohranjanje biotske raznovrstnosti. Na okoljskem področju trajnostni razvoj pomeni organizacijo gospodarstva, infrastrukture, poselitve in načina življenja v okviru nosilne sposobnosti okolja in naravnih virov (NPVO, 2004).

Glavna usmeritev za doseganje ciljev *Nacionalnega programa varstva okolja* (NPVO, 2004) je v okviru financiranja že dokaj uveljavljeno temeljno načelo varstva okolja »načelo plačila za obremenjevanje okolja«, torej načelo »onesnaževalec plača«. Zato program opredeljuje ekonomske instrumente in okoljske dajatve kot osnovni vir sredstev, poleg tega pa določa nadaljnje usmeritve v sistemu financiranja varstva okolja.

Vse hujše uničevanje naravnega okolja postaja resna grožnja našemu obstoju in predstavlja jasen poziv vsem odgovornim politikom, podjetnikom kot tudi vsem drugim državljanom. Zato se v zadnjem času dejavnosti na področjih raziskav, zakonodaje in tudi v obliki raznih gibanj za varstvo okolja izredno hitro širijo. Vremenske spremembe, stopnjevanje vremenskih skrajnosti in onesnaževanje okolja so največje napake tržnega gospodarstva.

Problemi onesnaženja in varstva okolja so zelo kompleksni, zato potrebujejo sistematični pristop. Gradbena industrija na vseh stopnjah procesa uporablja tehnološke postopke, rabo proizvodov, rabo energije, rabo pomožnih materialov in odpadkov, ki so okoljsko problematični. Nujno je doseči zavestno

odločanje za tiste izdelke, ki v svoji življenjski dobi čim manj obremenjujejo okolje (Kodama, 2005). Zato je treba preučiti obremenitve okolja posameznih celovitih produktov ali uslug na celotni življenjski poti in ne samo na posamezni stopnji. Najpogostejša napaka je osredotočenje na proizvodnjo oziroma v gradbeništvo izključno na proces izgradnje. Vplivi na okolje in čas trajanja teh vplivov sta prikazana v preglednici 1.

Okolje je v zadnjih nekaj desetletjih postalo onesnaženo v tolikšni meri, da samoregulirni in obnovitveni procesi v naravi niso zadostni. Nujno je treba pristopiti k uravnoteženju in zapiranju proizvodno-potrošniškega ciklusa k smotrnemu načrtovanju energetskih in surovinskih virov. Zato v nekaterih državah razvitega sveta že prihaja do zavestnega ter odgovornega ravnanja na področju rabe naravnih virov z integracijo ukrepov materializacije oziroma preprečevanja nastajanja in recikliranja odpadkov, spodbujanja energetske in surovinske manj intenzivnih tehnologij, spodbujanja trajnostne proizvodnje, potrošnje in podobno (NPVO, 2004).

Evropska unija (Akcijski načrt EU, 2005) in z njo tudi Slovenija (Nacionalni akcijski načrt za energetsko učinkovitost 2008–2016, januar 2008) je začela uvajati raziskovalne programe in podpirati zakonodajo in regulativo za povečanje učinkovitosti gospodarskega in družbenega razvoja ob hkratnem zmanjševanju vpliva na okolje in zmanjševanju porabe neobnovljivih virov energije.

Vplivi na okolje se izražajo kot	Vpliv na okolje	Čas trajanja vpliva
globalno ogrevanje okolja	globalno	desetletja/stoletja
krčenje ozonske plasti	globalno	desetletje
tvorba fotokemičnega smoga	regionalno/lokalno	ure/dnevi
kisanje ozračja	kontinentalno/regionalno	ure (akutno), desetletje (kronično)
kancerogenost	lokalno	desetletja/stoletja
povečanje koncentracije CO <sub>2</sub>	globalno	leta/desetletja
škodljivi vplivi na človekovo zdravje	lokalno	leta/desetletja
strupenost za druga živa bitja	lokalno	leta/desetletja
strupenost za vodo	regionalno/lokalno	leta/desetletja
uničenje življenjskega okolja habitatov	regionalno/lokalno	leta/desetletja
poraba neobnovljivih virov	globalno	desetletja/stoletja
hrup	lokalno	minute
smrad	lokalno	ure

Vir: (Owens, 1997)

Preglednica 1 • Vplivi na okolje



Poraba energije ima vse večji vpliv na okolje – ne samo lokalno, temveč predvsem globalno na celotno zemeljsko okolje. Temu smo priča v zadnjem času; katastrofalne poplave, suše, orkani, toča in sneg v velikih količinah in pogosto izven zimske dobe. Gospodarska razvitost se povečuje ob hkratnem socialnem razvoju, vendar počasnejšem uveljavljanju skrbi za okolje. Tako je gospodarska rast delno dosežena tudi na škodo okolja. Priučiti se odgovornega odnosa do okolja in postati trajnostno naravnani potrošnik, ne pomeni odrekanje se stvarjem, ampak zgolj spremeniti potratne in nepremišljene razvade in navade (NPVO, 2004).

Želja je, da izboljšamo kakovost bivanja ob hkratnem zmanjšanju vpliva na okolje. Postajamo vse bolj prepričani, da je osnova kakovosti življenja (kot tudi življenje samo) odvisna od lokalnega in globalnega okolja. Naš uspeh in preživetje sta možna samo z minimalno obremenitvijo okolja, tolikšno, da so možni samoregulirni obnovitveni procesi narave. Stopnjo dovoljene obremenitve okolja smo zaradi slabih izkušenj iz preteklosti prisiljeni močno znižati. Boljše življenjske pogoje bomo dosegli le na en način: z doslednim zmanjševanjem obremenitve okolja (Iwamura, 2005).

Energija, ki je potrebna za ogrevanje, ohlajevanje, prezračevanje, klimatizacijo prostorov in ogrevanje sanitarne vode, predstavlja tudi do 60 % skupne porabe energije v celotnem življenjskem ciklusu stavbe (Ikaga, 2005). To dokazuje, kako zelo so potrebni toplotna zaščita, pravilno orientirane okenske od-

prtine in drugi ukrepi pasivne arhitekture z namenom varčevanja z energijo (Ikaga, 2005). Z izračuni smo ugotovili, da je ta odstotek ob neugodnih razmerah lahko tudi višji (Kunič, 2007).

Okoljske primernosti izdelka ni lahko opredeliti, saj je ocena odvisna od gledišča opazovalca in od današnje stopnje tehnično-tehnološke razvitosti. Pri tem gre skoraj izključno za vrednotenje relativne primernosti izdelka glede na druge sorodne izdelke, ne pa na absolutne primernosti (Lipušček, 2005).

Obremenjevanje okolja lahko preučujemo le na določeni stopnji celotne življenjske poti proizvoda. Preglednica 2 prikazuje vpliv onesnaženosti na globalno, lokalno ali regionalno in na notranje okolje (Yashiro, 2004). Pri tem se moramo zavedati, da analiziramo samo določen del celote. Meje preučevanja je treba določiti glede na željeno obsežnost raziskave, razpoložljivi čas in razpoložljiva sredstva. Obstaja realna nevarnost, da zaobjamemo analizo preveč obširno, kar povzroči dolgotrajne in nepregledne postopke, ki praviloma privedejo do spornih rezultatov. Po drugi strani pa preozko zastavljene analize določene stopnje življenjske dobe vodijo do modelov, v katerih so izpuščeni pomembnejši procesi in vplivi na okolje (Lipušček, 2005).

### 3.3 Okoljska etika in trajnostno varovanje okolja

Obstajajo tri glavna načela okoljske etike in trajnostnega varovanja okolja ((Yashiro, 2005) in (Murakami 2005)):

1. medgeneracijska etika (odgovornost sedanjih generacij za kakovost življenja bodočih generacij; poznamo rek, ki govori: surovine, fosilna goriva, drugo energijo in resurse smo prejeli kot darilo od bodočih generacij),

2. omejeni razpoložljivi zemeljski viri,

3. pravica do življenja v naravnem okolju.

Onesnaževanje že dolgo ni samo lokalno, ampak vsi vplivamo na globalno okolje. Torej, vzajemno smo vsi sosedji in s kvarjenjem okolja onesnažujemo ne samo svoje, ampak tudi sosedovo dvorišče in obratno – sosedji naše (Kodama, 2005).

Sedanje generacije porabljajo toliko energije, kot je niso še nobene druge generacije v zgodovini človeštva. Ta potrata pri porabi energije bo bodoče generacije postavila v položaj pomanjkanja energije in posledično onemogočanje zagotavljanja visokega življenjskega standarda (Yashiro, 2005).

### 3.4 Vsebovana energija (Embodied Energy – EE)

Vsebovana (nekateri jo poimenujejo tudi vključena ali vgrajena) energija predstavlja količino energije potrebne za proizvodnjo in dostavo proizvoda, materiala ali storitve do mesta uporabe. Vsebovano energijo izrazimo kvantitetno kot celotno vsoto direktno in indirektno potrebne energije za proizvodnjo določenega izdelka ali usluge.

V temeljnem pomenu je vsebovana energija računsko kvantitativna metoda, katere namen je določiti skupno potrebno energijo, od pridobivanja surovin, transportov, proizvodnje, obdelave, sestavljanja, namestitve, kot tudi vrednost kapitala in drugih stroškov, s ciljem, da bi proizvedli nek proizvod ali storitev, ter končno tudi razstavljanje, dekonstrukcijo in skrb za odpadke (Kernan, 2001).

Za energetska varčno in okoljevarstveno gradnjo je potreben tudi podatek o vključeni energiji vgrajenih materialov in ne, kakor mnogi napačno menijo, da je energetska bilanca stavbe odvisna samo od rabe energije v času življenjske dobe stavbe.

Za izračun vsebovane energije določenega produkta ali usluge se uporabljajo različne metode, izračuni in razmerja, ki pogosto vodijo do rezultatov, raztresenih v širokem območju in s tem do znatnih metodoloških napak. Žal še ne obstajajo mednarodni standardi, metode izračunov in nujne baze podatkov o vgrajenih energijah na vseh stopnjah življenjske dobe določenega proizvoda ali usluge. Prav zato pri izračunih pogosto pozabljamo na pomembne deleže vsebovane energije, kot

Globalno okolje	Lokalno ali regionalno okolje	Notranje okolje
• čezmerna poraba energije	• kontaminacija zemljine	• razširjanje toksičnih snovi
• globalno segrevanje	• kontaminacija vode	• penetriranje toksičnih snovi iz okolja (kemikalije, kmetijske kemikalije, škropiva, herbicidi ...)
• pomanjkanje surovin in energije	• radonska kontaminacija	
• uničevanje ozonske plasti	• onesnaževanje s hrupom	
	• ekološka škoda (krčenje gozdov ...)	
	• mikroklimatske spremembe ob objektih visokih in nizkih gradenj	
	• zakrivanje sonca – senčenje	
	• uničevanje oblike okolja in dosedanje oblike mest	
	• izguba zgodovinskega izročila starih mestnih jeder	

Vir: (Yashiro, 2005)

Preglednica 2 • Kazalci onesnaženosti in vpliva na okolje



so na primer nujna izgradnja infrastrukture za potrebe proizvoda ali storitve, izgradnja in vzdrževanje transportnih poti, oglaševanje, marketing in podobno. Nujno je oceniti in določiti napako v izračunu vgrajene energije in se z nastavitvijo napake približati k stabilnemu rezultatu vrednosti vsebovane energije. Podatki o vrednosti vsebovane energije (preglednica 3) in podatki iz literature (Athena Institute, 2002) ter upoštevanje, da so gradbene konstrukcije iz lesa lahke – ugotovimo, da ima les eno izmed najmanjših vsebovanih energij med nosilnimi materiali.

Čeprav so podatki v zgornji preglednici (preglednica 3) iz istih virov ((Kernan, 2001) in (Oka 2005)), na prvi pogled lahko opazimo nekaj navideznih nelogičnosti, na primer: vsebovana energija strešne lepenke je 0,5 MJ/kg, kar je 54-krat manj od vsebovane energije bitumenskega samolepilnega traku (27 MJ/kg), kot tudi razlika v vrednosti vsebovane energije za linolej (17 MJ/kg) v primerjavi z vsebovano energijo za polivinilklorid – PVC (98 MJ/kg). Razlago lahko poiščemo v tem, da je sestava bitumenske strešne lepenke surovi strešni karton, ki še ne vsebuje bitumenskih sestavin, za razliko od samolepilnega bitumenskega traku, sestavljenega iz bitumnov – produktov surove nafte. Drugo primerjavo lahko razložimo tako, da je linolej sestavljen iz naravnih organskih materialov, medtem ko je polivinilklorid umetno pridobljen material. V vsej razpoložljivi literaturi, vključno z rezultati

Material	Vsebovana energija – Embodied Energy (MJ/kg)
Strešna lepenka <sup>1</sup>	0,5
Beton <sup>1</sup>	0,8
Cement (portland) <sup>1</sup>	1,6
Opeka <sup>1</sup>	2,5
Les <sup>1</sup>	5,8
Tipična poslovna stavba <sup>1</sup>	8,0
Fe – železo (surovo) <sup>2</sup>	13,2
Jeklo (pločevina) <sup>2</sup>	16,2
Linolej – talna obloga <sup>1</sup>	17,0
Steklo <sup>1</sup>	19,0
Bitumenski trak SBS, samolepiln <sup>1</sup>	27,0
Kamena volna <sup>1</sup>	30,0
Obešen akustični strop, mavčno kartonsko polnilo <sup>1</sup>	45,0
Jeklo <sup>1</sup>	46,0
Cu – baker <sup>1</sup>	50,0
Poliolifinska parna zapora <sup>1</sup>	60,0
Pokrivna barva na vodni osnovi <sup>1</sup>	77,0
Polivinilklorid – PVC, UV stabiliziran <sup>1</sup>	98,0
Polistiren – EPS – stiropor <sup>1</sup>	130,0
Al – aluminij <sup>1</sup>	274,0

Viri: <sup>1</sup>(Kernan, 2001), <sup>2</sup>(Oka, 2005)

Preglednica 3 • Vrednosti vsebovane energije za nekatere gradbene materiale

znanstvenih dognanj, se vrednosti za vsebovano energijo zelo razlikujejo in ni možna

primerjava na absolutni ravni, ampak je omogočena le relativna primerjava.

## 4 • VREDNOTENJE ŽIVLJENJSKEGA CIKLUSA (LIFE CYCLE ASSESSMENT – LCA)

LCA je metoda, s katero ovrednotimo obremenitve okolja, povezane s posameznim izdelkom ali storitvijo, tako da ugotovimo vrsto in količino porabe energije in materialov, vrste in količine odpadkov in emisij, sproščenih v okolje, ter možne posledice za okolje. V oceno, ki zajema okoljske kazatelje,

je vključen celoten življenjski cikel izdelka, vključno z načrtovanjem, pridobivanjem surovin, pridobivanjem potrebnih energetskih virov, produkcijo in distribucijo energije, proizvodnjo izdelka ali storitve, potrebnih sestavnih delov in dodatkov, produkcijo končnih izdelkov in stranskih izdelkov, trans-

portom med posameznimi sistemi, transportom in distribucijo končnih izdelkov, pakiranjem, uporabo, vzdrževanjem, recikliranjem, končnim odlaganjem na deponijo in skrbjo za odpadke. Torej določenemu produktu ali uslugi vrednotimo vpliv na okolje skozi celotno življenjsko dobo (Lipušček, 2005). LCA ima pomen, ko vrednotenje opravljamo na celotnem sistemu ali konstrukcijskem sklopu in ne izključno na nivoju posameznega elementa, gradbenega materiala ali sestavnega dela.

## 5 • SKLEP

Gradbeništvo v vseh državah in tudi na globalnem svetovnem nivoju predstavlja najmanj deset odstotkov v bruto nacionalnem dohodku. S še večjim deležem, vsaj trikrat večjim, je gradbena dejavnost, uporaba stavb, vzdrževanje in

rušenje objektov zastopano pri porabi energije, porabi razpoložljivih surovin in pridelanih odpadkih. Znatni deleži omenjenih porab nastopajo po izgradnji objektov in jih načeloma v analizi oblikovanja in projektiranja ne zajemamo.

Posebej objekti visokega družbenega pomena, kamor nedvomno spadajo infrastrukturni objekti, avtocestno omrežje, pomembni javni objekti, bi morali biti z vidika življenjske dobe, varčevanja z energijo in okoljske primernosti natančno analizirani. Pravilnik o projektni in tehnični dokumentaciji (Ur. list RS, 66/2004, z dne 18. 6. 2004) predpisuje v 44. členu tudi »Projekt za obratovanje in vzdrževanje« kot se-

stavni del tehnične dokumentacije objektov. Vsebina projekta za obratovanje in vzdrževanje je predpisana, vendar nikjer ni omenjeno odstranjevanje ali upravljanje z odpadki po koncu življenjske dobe. Najverjetneje se meni, da je to predmet bodoče tehnične dokumentacije gradbenega dovoljenja za obnovo ali rušenje objekta.

Pomembna pomanjkljivost dosedanjih praks je, da v procesu vrednotenja stroškov v življenjskem ciklusu (LCCA) stavb, različne rešitve dimenzioniranja toplotnih izolacij, varčevanja z energijo, odločitve za odstranjevanje, recikliranje in deponiranje odpadkov ne vplivajo na stroške niti na NSV (neto sedanja vrednost) investicije. Tako niso regulirani, ampak zanemarjeni znatni

stroški, ki so vezani na samo življenjsko dobo in zaključek življenjske dobe stavb. Mnoge optimizacije in načini varčevanja se zanemarijo, stroške prelagajo na poznejši čas in s tem na bodoče generacije. Prav zato morajo nujno postati analize življenjske dobe objektov in vrednotenja ekonomske učinkovitosti objektov sestavni del oblikovanja in projektiranja objektov.

## 6 • LITERATURA

- Akcijski načrt EU, 20 % prihrankov do leta 2020: Evropska komisija razkriva akcijski načrt o energetski učinkovitosti, Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential, Evropski parlament, [www.europa.eu](http://www.europa.eu), [www.europarl.europa.eu](http://www.europarl.europa.eu), 2005.
- Arima, T., Bogaki, K., Hashegawa, H., Ikaga, T., Itonaga, K., Iwamura, K., Iwata, M., Kodama, Y., Murakami, S., Oka, T., Yashiro, T., Architecture for a Sustainable Future, All about the Holistic Approach in Japan, Edited by Architectural Institute of Japan (AIJ), Institute for Building Environment and Energy Conservation (IBEC), Tokyo, Japan, 2005.
- Asimow, M., Introduction to Design, University of California, Los Angeles, USA, 1962.
- Athena Institute, Integrating LCA Tools in Green Building Rating Systems, [www.athenasmi.ca](http://www.athenasmi.ca), Canada, 2002.
- Kernan, P. et al., Best Practice Guide, Material Choices for Sustainable Design, Greater Vancouver Regional District GVRD, Canada, 2001.
- Köhl, M., Carlsson, B., Jorgensen, G., Czanderna, A. W., 2004, Performance and Durability Assessment, Optical Materials for Solar Thermal Systems, Elsevier B.V., The Netherlands, 2004.
- Krainer, A., Vpliv trajnosti konstrukcijskih sklopov in gradbenih materialov na produkcijsko – potrošniški cikel zgradb, FAGG, VTOZD GG, Ljubljana, 55 str., 1977.
- Krigsvoll, G. et al., Vodnik za celostno načrtovanje in uporabo metod LCCA pri prenovi stavb, LCC – REFURB, Ljubljana, 2005.
- Kunič, R., Načrtovanje vrednotenja vpliva pospešenega staranja bitumenskih trakov na konstrukcijske sklope, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za stavbarstvo in konstrukcijske elemente, KSKE, Jamova 2, Ljubljana, 2007.
- Lipušček, I., Vrednotenje življenjskih ciklov lesnoindustrijskih izdelkov z vidika obremenjevanja okolja, doktorska disertacija, Ljubljana, 2005.
- Nacionalni akcijski načrt za energetsko učinkovitost za obdobje 2008–2016, Republika Slovenija, Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana, januar 2008.
- NPVO, Nacionalni program varstva okolja, Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Ljubljana, 2004.
- Owens, J. W., Life Cycle Assessment: Constraints on Moving from Inventory to Impact Assessment, Journal of Industrial Ecology, USA, 1997.
- Seliškar, N., Staranje objektov, 1. del, FAGG, Ljubljana, 1981.

### Standardi, pravilniki in zakoni s področja obravnavanih tem

- EN ISO 14040: 1997, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles And Framework, Ravnanje z okoljem – Ocenjevanje življenjskega cikla – Načela in okviri.
- EN ISO 14041: 1998, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Goal And Scope Definition And Inventory Analysis, Ravnanje z okoljem – Ocenjevanje življenjskega cikla – Opredelitev cilja in obsega ter popis vplivov na okolje.
- EN ISO 14042: 2000, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment, Ravnanje z okoljem – Ocenjevanje življenjskega cikla – Ovrednotenje vplivov na okolje.
- EN ISO 14043: 2000, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Interpretation, Ravnanje z okoljem – Ocenjevanje življenjskega cikla – Predstavitev rezultatov analize življenjskega cikla.
- ISO 15686 – 1: 2000, Building and Construction Assets, Service Life Planning, Part 1: General Principles.
- ISO 15686 – 2: 2001, Building and Construction Assets, Service Life Planning, Part 2: Service Life Prediction Procedures.
- ISO 15686 – 3: 2002, Building and Construction Assets, Service Life Planning, Part 3: Performance Audits and Reviews.
- ISO 15686 – 6: 2004, Building and Construction Assets, Service Life Planning, Part 6: Procedures for Considering Environmental Impacts.
- SIST ISO 14020: 2000, Okoljske označbe in deklaracije – Splošna načela.
- SIST ISO 14021: 2000, Okoljske označbe in deklaracije – Okoljsko samodeklariranje (Okoljsko označevanje II. vrste).
- SIST ISO 14024: 2000, Okoljske označbe in deklaracije – Okoljsko označevanje I. vrste – Načela in postopki.
- SIST ISO 14025: 2001, Okoljske označbe in deklaracije – Okoljsko označevanje III. vrste.
- SIST ISO 14031: 2000, Ravnanje z okoljem – Vrednotenje učinkov ravnanja z okoljem – Smernice.
- SIST ISO 14032: 2000, Ravnanje z okoljem – Primeri vrednotenja učinkov ravnanja z okoljem (EPE).
- Uradni list Republike Slovenije, 2003, št. 3/2003, z dne 10. jan. 2003, Pravilnik o ravnanju z odpadki, ki nastanejo pri gradbenih delih.
- Uradni list Republike Slovenije, 2003, št. 54/2003, Pravilnik o obliki tehničnih smernic za projektiranje, gradnjo in vzdrževanje objektov.
- Uradni list Republike Slovenije, 2004, št. 41/2004, Zakon o varstvu okolja (ZVO-1).
- Uradni list Republike Slovenije, 2004, št. 66/2004, z dne 18. 6. 2004, Pravilnik o projektni in tehnični dokumentaciji.
- Uradni list Republike Slovenije, 2005, št. 54/2005, z dne 3. 6. 2005, Pravilnik o spremembah in dopolnitvah pravilnika o projektni in tehnični dokumentaciji.

# VPLIV PODAJNOSTI STIKA NA OBNAŠANJE SOVPREŽNIH NOSILCEV IZ BETONA IN JEKLA

## THE EFFECT OF INCOMPLETE INTERACTION ON BEHAVIOUR OF STEEL – CONCRETE COMPOSITE BEAMS

**doc. dr. Bojan Čas, univ. dipl. inž. grad.**

bojan.cas@gi-zrmk.si

Gradbeni inštitut ZRMK, d. o. o., PE Maribor,

Jezdarska ulica 3, 2000 Maribor

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana

**prof. dr. Miran Saje, univ. dipl. inž. grad.**

msaje@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana

**izr. prof. dr. Igor Planinc, univ. dipl. inž. grad.**

iplaninc@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana

**Znanstveni članek**

UDK: 624.016:624.072

**Povzetek** | V članku sta predstavljena matematični model in numerična metoda za analizo sovprežnih nosilcev iz betona in jekla. Predstavljeni model omogoča upoštevanje zamikov med betonom in jeklom in nelinearno obnašanje materialov. Model je zasnovan na linearizirani Reissnerjevi teoriji ravninskih nosilcev, uporabljena numerična metoda pa na deformacijski metodi končnih elementov. Primerjave med numeričnimi in eksperimentalnimi rezultati so pokazale dobro natančnost in učinkovitost predstavljenega modela in numerične metode. V parametrični analizi je bilo ugotovljeno, da ima podajnost stika nezanemarljiv vpliv na obnašanje sovprežnih nosilcev iz betona in jekla. Podajnost stika ima posebej velik vpliv na duktilnost sovprežnih nosilcev in porazdelitev napetosti po prečnem prerezu.

**Summary** | In the paper, a mathematical model and a numerical procedure for a materially non-linear analysis of planar steel-concrete beams accounting for the interlayer slip are presented. The mathematical model is based on the linearized Reissner planar beam theory combined with the non-linear material models of concrete, steel, reinforcing bars and non-linear contact between the reinforced – concrete slab and the steel beam. The system of non-linear equations defining the behaviour of steel – concrete beam is solved by the strain - based finite element method. The detailed analysis and the comparison of the present numerical results with the experimental and numerical results from literature show that the present numerical procedure exhibits both high accuracy and computational efficiency. The paper ends with the extensive parametrical analyses showing that a slip in contact largely effects the ductility of the beam and the stress and strain state in the cross-section, and should therefore not be neglected in proper design of steel – concrete beams.

## 1 • UVOD

Sestavljene in slojevite konstrukcije, ki jih s skupnim imenom imenujemo kompozitne konstrukcije, se v gradbeništvu pogosto uporabljajo. Srečamo jih v mostogradnji in visokogradnji, pri montažni in polmontažni gradnji, pri sanacijah in ojačitvah konstrukcij. V gradbeništvu so pogoste sovprežne konstrukcije, sestavljene iz betonske plošče, podprte z jeklenimi nosilci. Plošča in nosilci so običajno povezani z jeklenimi mozniki, privarjenimi na zgornjo pasnico jeklenega nosilca. Znano je, da se večina gradbenih materialov različno odziva pri tlačnih in natezih obremenitvah. Zato je v konstrukcijah smiselno uporabiti materiale tako, da v tlačnih delih uporabljamo materiale z dobrimi tlačnimi lastnostmi, v natezih pa tiste z dobrimi nateznimi lastnostmi. Obnašanje kompozitnih konstrukcij pa je zelo odvisno tudi od povezave med obema materialoma.

Mehanski odziv sovprežnih konstrukcij na zunanjo obtežbo lahko določimo z eksperimenti ali z matematičnim modeliranjem. Z eksperimenti zelo zanesljivo ugotovimo odziv konstrukcij na zunanjo obtežbo, vendar so ti zaradi visokih stroškov omejeni na relativno preproste konstrukcije in majhno število vzorcev. Matematično modeliranje odziva je danes večinoma že zadovoljivo natančno, poleg tega pa je tudi cenejše, zato postaja prevladujoče tudi v analizi najzahtevnejših kompozitnih konstrukcij.

Sovprežne konstrukcije lahko modeliramo na več načinov. Lahko jih modeliramo s 3D-kon-

tinuumom. Taki modeli so najsplošnejši, a tudi teoretično in računalniško najzahtevnejši. Zato jih uporabljamo predvsem za modeliranje detajlov. Drugo skupino sestavljajo modeli, ki opisujejo kompozitne konstrukcije z linijskimi nosilci, ploščami in lupinami (Hjelmstad, 2005). Med njimi se najpogosteje uporabljajo modeli linijskih nosilcev. Ti modeli so osnovani na predpostavki, da je dolžina sovprežnega nosilca bistveno večja kot dimenzije prečnega prereza. Kot kažejo številni eksperimentalni in numerični podatki, so ti modeli razmeroma natančni, hkrati pa imajo prednost, ker so relativno preprosti. Primerni so tako za analizo togosti in nosilnosti kot tudi duktilnosti kompozitnih nosilcev (Čas, 2004). Poleg predpostavke, da lahko sovprežni nosilec opišemo z linijskim nosilcem, je treba vpeljati še vrsto drugih predpostavk. Izbira teh predpostavk ni enolična, zato obstajajo različni matematični modeli sovprežnih nosilcev. Razlikujejo se predvsem glede izbire modela stika med slojema sovprežnega nosilca. Tako poznamo: (i) modele, kjer sta sloja toga povezana med seboj v vzdolžni in prečni smeri, (ii) modele, kjer sta sloja pomična samo v vzdolžni smeri, ki so v literaturi tudi najpogostejši ((Ayoub, 2000 in 2001), (Čas, 2004 in 2007), (Dall'Asta, 2002), (Ranzi, 2003), (Salari, 1998) ter številni drugi), in (iii) modele, kjer sta sloja pomična v vzdolžni in prečni smeri ((Adekola, 1968) in (Robinson,

1988)). Ker so analitične rešitve omenjenih matematičnih modelov sovprežnih nosilcev iz betona in jekla možne le v izjemno enostavnih primerih, kot je na primer elastični sovprežni nosilec (Schnabl, 2006 in 2007), zasledimo v literaturi vrsto različnih numeričnih metod za določitev napetostnega in deformacijskega stanja sovprežnega nosilca. Ti so najpogosteje zasnovani na metodi končnih elementov ((Čas, 2007), (Gattesco, 1999), (Newmark, 1951) ter številni drugi).

V članku predstavljamo novo numerično metodo za analizo sovprežnih nosilcev iz betona in jekla. Pri izpeljavi metode predpostavimo, da je sovprežni nosilec sestavljen iz dveh linijskih nosilcev, ki lahko drsita drug po drugem, ne moreta pa se razmakniti oziroma vrisniti eden v drugega. Za nosilca dodatno predpostavimo: (i) pomiki, zasuki in deformacije so po velikosti majhne količine, (ii) velja Bernoullijeva predpostavka o ravnih prečnih prerezih, (iii) velikost in oblika prečnega prereza se med deformiranjem ne spreminjata, (iv) strižne deformacije so zanemarljive, (v) sovprežni nosilec se deformira samo v ravnini, (vi) beton, konstrukcijsko jeklo in mehka armatura ter vezna sredstva se obnašajo nelinearno in (vii) sovprežni nosilec je obtežen z dovolj kratkotrajno obtežbo, da lahko vplive lezjenja in krčenja betona zanemarimo. Postopek, s katerim rešimo enačbe nosilca, izpeljemo z Galerkinovo metodo končnih elementov. Uporabljamo originalne deformacijske končne elemente (Bratina, 2004). Pomembne prednosti teh novih končnih elementov so velika natančnost in neobčutljivost na vse vrste blokiranja in oscilacij napetosti.

## 2 • MATEMATIČNI MODEL SOVPREŽNEGA NOSILCA

Opazujemo sovprežni nosilec dolžine  $L$  s konstantnim prečnim presekom. Prečni presez sestavljata armiranobetonska plošča in jekleni nosilec (slika 1). Med seboj sta povezana z veznimi sredstvi, ki omogočajo zamike med njima, preprečujejo pa razmikanje oziroma vtiskovanje.

Deformiranje sovprežnega nosilca opazujemo v ravnini  $(x, z)$  geometrijskega prostora z desnosučnim kartezičnim koordinatnim sistemom  $(x, y, z)$  in pripadajočimi baznimi vektorji  $\bar{e}_x, \bar{e}_z$  in  $\bar{e}_y = \bar{e}_z \times \bar{e}_x$ . Za referenčno os sovprežnega nosilca izberemo koordinatno krivuljo  $x$ , ki leži na stiku med armiranobetonsko ploščo in jeklenim nosilcem ( $y = z = 0$ ).

Sovprežni nosilec je v referenčni osi obtežen z linijsko obtežbo  $\bar{p} = p_x \bar{e}_x + p_z \bar{e}_z$  in linijsko momentno obtežbo  $\bar{m} = m_y \bar{e}_y$ , na robovih pa s posplošenimi točkovnimi silami.

Referenčni osi armiranobetonske plošče in jeklenega nosilca se v nedeformirani legi ujemata z referenčno osjo sovprežnega nosilca. Pri deformiranju pa zdrsneta druga po drugi. Njuna krajevna vektorja sta določena z enačbama

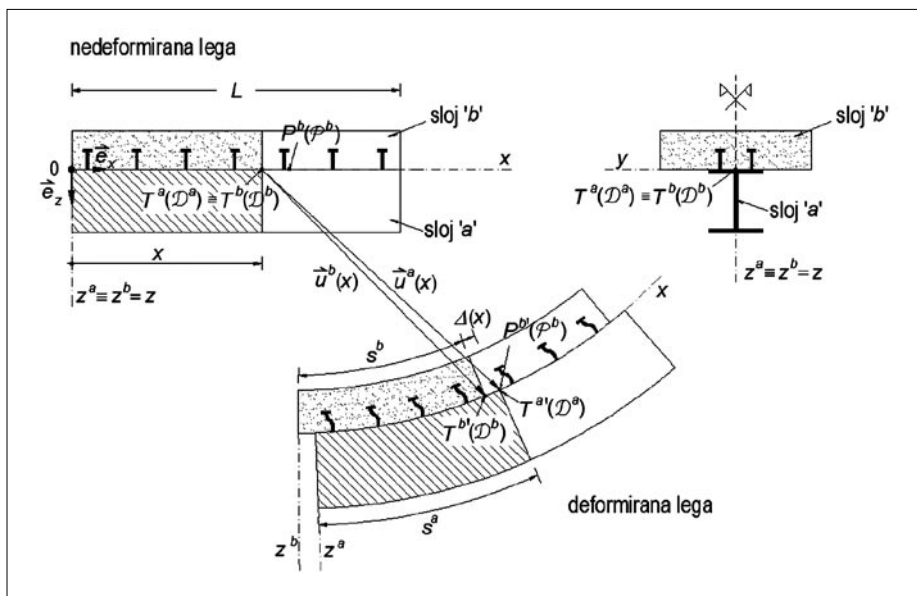
$$\begin{aligned} \bar{R}^a(x) &= x\bar{e}_x + \bar{u}^a(x) = \\ &= (x + u^a(x))\bar{e}_x + w^a(x)\bar{e}_z, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \bar{R}^b(x) &= x\bar{e}_x + \bar{u}^b(x) = \\ &= (x + u^b(x))\bar{e}_x + w^b(x)\bar{e}_z. \end{aligned} \quad (2)$$

V enačbah (1) in (2) in v nadaljevanju predstavlja zgornji indeks  $(\bullet)^a$  količine, ki pripadajo jeklenemu nosilcu, in  $(\bullet)^b$  količine, ki pripadajo armiranobetonski plošči. Tako  $u^a$  in  $w^a$  predstavljata komponenti vektorja pomika referenčne osi jeklenega nosilca v smeri baznih vektorjev  $\bar{e}_x$  in  $\bar{e}_z$ .

Napetostno in deformacijsko stanje sovprežnega nosilca določajo kinematične, ravnotežne in konstitucijske enačbe (s skupnim imenom posplošene ravnotežne enačbe) z ustreznimi robnimi pogoji za vsak sloj posebej ter ustrezne vezne enačbe (Čas, 2004). Ker so posplošene ravnotežne enačbe ravninskih





Slika 1 • Nedeformirana in deformirana lega sovprežnega nosilca iz betona in jekla

nosilcev dobro znane, jih tu ne izpeljujemo (Hjelmstad, 2005). Nasprotno pa so manj znane vezne enačbe, zato jih v nadaljevanju na kratko predstavimo.

Strižni zamik (v nadaljevanju zamik) poljubnega para delcev med slojema sovprežnega nosilca predstavlja razliko deformiranih dolžin referenčnih osi armiranobetonske plošče in jeklenega nosilca

$$\Delta(x) = \Delta(0) + s^a(x) - s^b(x) = \Delta(0) + \int_0^x (\varepsilon^a - \varepsilon^b) d\xi = u^a(x) - u^b(x), \quad (3)$$

kjer sta  $\varepsilon^a$  in  $\varepsilon^b$  specifična raztezka referenčnih osi jeklenega nosilca in armiranobetonske plošče,  $\Delta(0)$  pa zamik med slojema sovprežnega nosilca pri  $x = 0$  (slika 1).

Geometrijska zahteva, da se sloja samo strižno zamakne in ne tudi razmakne oziroma vrisne eden v drugega, določa kinematično vezno enačbo

$$\bar{R}^a(x) = \bar{R}^b(x^*), \quad (4)$$

kjer koordinata  $x^*$  določa tisti delec  $P^b$  armiranobetonske plošče, ki ima isto deformirano lego kot delec  $\Delta^a$  jeklenega nosilca (slika 1). Ker so zamiki med slojema majhni, lahko vezno enačbo (4) poenostavimo. Najprej krajnji vektor  $\bar{R}^b(x^*)$  lineariziramo okrog  $x^* = x$ . Tako dobi vezna enačba (4) v komponentni obliki preprosto obliko

$$x + u^a(x) = x^* + u^b(x), \quad (5)$$

$$w^a(x) = w^b(x). \quad (6)$$

Glede na predpostavko, da ostaneta preko vmesnega sloja z debelino nič v stiku delca  $D^a$  in  $D^b$ , lahko skladno s tretjim Newtonovim zakonom zapišemo tudi vezno enačbo

$$\bar{p}^a(x) + \bar{p}^b(x) = \bar{0}, \quad (7)$$

kjer je  $\bar{p}^a$  kontaktni napetostni vektor jeklenega nosilca s komponentama  $p^a$  in  $q^a$  v smereh baznih vektorjev  $\bar{e}^x$  in  $\bar{e}_z$  in podobno  $\bar{p}^b$  kontaktni napetostni vektor armiranobetonske plošče s komponentama  $p^b$  in  $q^b$ .

Zamik med slojema sovprežnega nosilca je seveda odvisen od mehanskih lastnosti veznih sredstev. Te določimo z meritvami in opišemo z nelinearnim materialnim modelom slika po enačbi

$$p^a = p = F(\Delta). \quad (8)$$

Glede na povedano je matematični model sovprežnega nosilca iz betona in jekla opisan z naslednjim sistemom diferencialnih in algebrskih enačb:

Kinematične enačbe:

$$u^{a'} - \varepsilon^a = 0, \quad (9)$$

$$u^{b'} - \varepsilon^b = 0, \quad (10)$$

$$w^{a'} + \varphi^a = 0 \rightarrow w' + \varphi = 0, \quad (11)$$

$$\varphi^{a'} - \kappa^a = 0 \rightarrow \varphi' - \kappa = 0, \quad (12)$$

Ravnotežne enačbe:

$$N^{a'} - p = 0, \quad (13)$$

$$N^{b'} + p + p_z = 0, \quad (14)$$

$$(Q^a + Q^b)' + p_z = 0 \rightarrow Q' + p_z = 0, \quad (15)$$

$$(M^a + M^b)' - (Q^a + Q^b) + m_y = 0 \rightarrow M' - Q + m_y = 0, \quad (16)$$

Konstitutivne enačbe:

$$N^a - N_c^a = 0, \quad (17)$$

$$N^b - N_c^b = 0, \quad (18)$$

$$(M^a + M^b) - (M_c^a + M_c^b) = 0 \rightarrow M - M_c = 0, \quad (19)$$

Vezne enačbe:

$$\Delta = u^a - u^b, \quad (20)$$

$$x + u^a = x^* + u^b, \quad (21)$$

$$p^a = p = F(\Delta) \quad (22)$$

s pripadajočimi robnimi pogoji. Sistem (9)–(22) sestavlja štirinajst enačb za štirinajst neznanjih funkcij:  $u^a, u^b, w, \varphi, \varepsilon^a, \varepsilon^b, \kappa, N^a, N^b, Q, M, \Delta, p$  in  $x^*$ . V teh enačbah predstavljata  $\varphi$  in  $\kappa$  zasuk in ukrivljenost referenčne osi sovprežnega nosilca,  $N^a$  in  $N^b$  sta osni sili jeklenega nosilca in armiranobetonske plošče,  $Q$  in  $M$  pa označujeta prečno silo in upogibni moment sovprežnega nosilca. Z  $N_c^a, N_c^b$  in  $M_c$  smo označili konstitutivne notranje sile in momente. Določene so z nelinearnimi zvezami glede na specifične spremembe dolžine poljubnega materialnega vlakna jeklenega nosilca, oziroma armiranobetonske plošče,  $D^a = \varepsilon^a + z^a \kappa$ . Te zveze je treba določiti z enosnimi preskusi na betonskih in jeklenih preskušancih.

Točne analitične rešitve sistema enačb (9)–(22) v splošnem ne moremo dobiti. Zato ga rešujemo numerično, in sicer s pomočjo Galerkinove deformacijske metode končnih elementov (Čas, 2004). Posebnost te nove metode je v tem, da se interpolirata osni deformaciji  $\varepsilon^a$  in  $\varepsilon^b$  ter upogibna deformacija  $\kappa$ , ne pa tudi pomiki. Pomembni prednosti deformacijske metode končnih elementov pa sta neobčutljivost končnih elementov na vse vrste blokiranja in velika natančnost (Čas, 2004).

### 3 • RAČUNSKI PRIMER: PROSTOLEŽEČI SOVPREŽNI NOSILEC

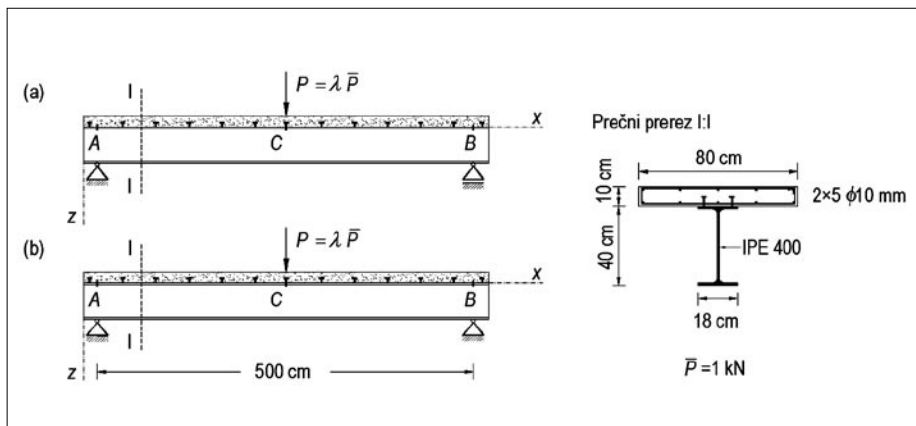
Prikazani matematični model in pripadajočo numerično metodo uporabimo za študij vpliva podajnosti stika na togost, duktilnost in nosilnost sovprežnih nosilcev. Obravnavamo prostoležeči sovprežni nosilec z dolžino  $L = 500$  cm, na katerem so bile opravljene obsežne laboratorijske preiskave (Abdel Aziz, 1986).

Prečni prerez nosilca sestavljata armiranobetonska plošča in jekleni I nosilec, povezana s standardnimi jeklenimi mozniki tipa Nelson s premerom 19 mm (slika 2). Ti so privarjeni v dveh vzporednih vrstah in enakomernih medsebojnih razdaljah na zgornjo pasnico jeklenega nosilca.

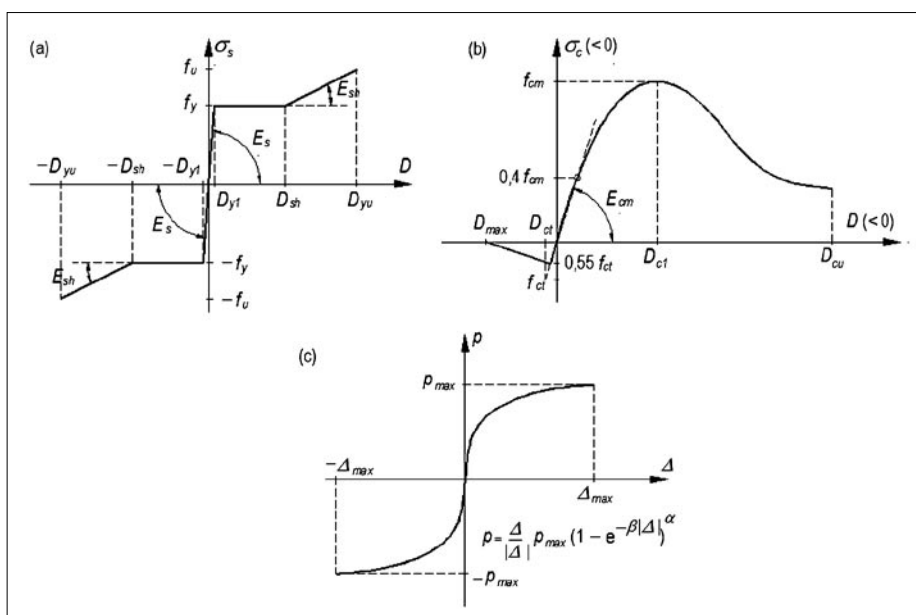
*Analiza natančnosti matematičnega modela.* Natančnost predstavljenega matematičnega modela in pripadajočega postopka za numerično analizo ugotavljamo s primerjavo med numeričnimi in eksperimentalnimi rezultati. Primerjali bomo: (i) obtežno-deformacijske krivulje in (ii) velikosti zamikov na stiku med armiranobetonsko ploščo in jeklenim nosilcem za izbrane nivoje zunanje obtežbe. Natančnost vsakega matematičnega modela je v veliki meri odvisna od natančnosti uporabljenega materialnega modela in materialnih parametrov. Ker analiziramo sovprežne nosilce iz betona in jekla s podajnim stikom, moramo z meritvami določiti tri materialne modele in njihove parametre: (i) model za konstrukcijsko jeklo in mehko armaturo, (ii) model za beton in (iii) model za moznichen stik med armiranobetonsko ploščo in jeklenim nosilcem. Za vse tri materialne modele smo izbrali nelinearne zveze, kot jih prikazujemo na sliki 3.

Za modeliranje konstrukcijskega jekla in mehke armature smo izbrali trilinearni materialni model. Model povezuje normalno napetost  $\sigma_s$  v vzdolžnem materialnem vlaknu prečnega prereza jeklenega nosilca oziroma mehke armature s specifično spremembo dolžine vlakna. Graf tega modela ter fizikalni pomen pripadajočih materialnih parametrov prikazujemo na sliki 3a. Z ustrezno izbiro materialnih parametrov lahko s tem modelom opišemo obnašanje jeklenega nosilca in mehke armature. Vrednosti teh parametrov, določenih na podlagi rezultatov meritev (Abdel Aziz, 1986), prikazujemo v preglednici 1.

Podobno določimo zvezo med normalno napetostjo  $\sigma_c$  v vzdolžnem vlaknu prečnega prereza betonskega dela plošče in pripadajočo



Slika 2 • Podatki o geometriji in o obtežbi prostoležečega sovprežnega nosilca



Slika 3 • Materialni modeli in fizikalni pomen pripadajočih materialnih parametrov: (a) za konstrukcijsko jeklo in mehko armaturo, (b) za beton in (c) za moznichen stik med armiranobetonsko ploščo in jeklenim nosilcem

$f_{y, pasnica}$	$f_{u, pasnica}$	$f_{y, stojina}$	$f_{u, stojina}$	$f_{y, palice}$	$f_{u, palice}$	$D_{sh}$
24,5*	36,1*	26,0*	37,2*	37,0*	37,5*	0,021

\* kN/cm<sup>2</sup>

Preglednica 1 • Vrednosti materialnih parametrov za model konstrukcijskega jekla in mehke armature ( $E_s = 21\ 000$  kN/cm<sup>2</sup>,  $E_{sh} = 0,008 E_s$ )

$f_{cm}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$D_{max}$	$D_{ct}$	$D_{c1}$	$D_{cu}$
3,5	0	0	-0,00225	-0,021

Preglednica 2 • Vrednosti materialnih parametrov za model betona

število Nelsonovih moznikov	$\alpha$	$\beta$ (cm <sup>-1</sup> )	$p_{max}$ (kN/cm)
18	0,8	7	4,68

Preglednica 3 • Vrednosti materialnih parametrov za model stika med slojema sovprežnega nosilca

vzdolžno deformacijo. V tlaku zvezo povzamemo skladno z literaturo (Desayi, 1964), v nategu pa po priporočilih domačih raziskovalcev (Bratina, 2004). Graf tega modela in fizikalni pomen materialnih parametrov prikazujemo na sliki 3b. Vrednosti materialnih parametrov smo določili na podlagi meritev za beton, uporabljen pri preskusu (Abdel Aziz, 1986); podani so v preglednici 2. Ker v poročilu (Abdel Aziz, 1986) niso navedene debeline zaščitnega sloja mehke armature, smo v analizi privzeli, da je težišče mehke armature za 1,5 cm oddaljeno od zunanjega roba prečnega prereza armiranobetonske plošče.

Kot smo že omenili, sta armiranobetonska plošča in jekleni nosilec povezana s standardnimi jeklenimi mozniki tipa Nelson. Tudi materialni model stika (v literaturi ga pogosto imenujejo tudi »shear flow-slip diagram«) za take povezave plošč in jeklenih nosilcev povzamemo po literaturi (Ollgaard, 1971). Z njim povežemo zamik  $\Delta$  in strižno komponento kontaktnega vektorja linijske obtežbe  $p$  (slika 3c). Na sliki 3c prikazujemo graf tega modela in fizikalni pomen materialnih parametrov. Izmerjene vrednosti prikazujemo v preglednici 3 (Abdel Aziz, 1986).

Pomembna prednost predstavljenega matematičnega modela za analizo sovprežnih nosilcev je v tem, da lahko z njim opišemo tudi nezvezne (diskretne) povezave med ploščo in nosilcem. Zato lahko poleg modela zveznih moznikov, kjer moznike zvezno »razmažemo« po celotnem stiku, modeliramo tudi diskretno razporejene moznike. Pri tem je zveza med zamikom in strižno komponento kontaktnega vektorja linijske obtežbe določena samo na delih stika, kjer so mozniki, in jo tako določa dejanska podajnost moznika. Na delu stika, kjer ni moznikov, pa predpostavimo, da sloja v tangentni smeri nista povezana. Diskretno razporeditev moznikov tako modeliramo z uporabo posebne mreže končnih elementov, kjer vsak moznik opišemo samo z enim, le 20 mm dolgim končnim elementom, območje sovprežnega nosilca med mozniki pa z enim ali več standardnimi končnimi elementi.

Matematične modele za analizo obnašanja konstrukcij pogosto določajo sistemi nelinearnih diferencialnih enačb z ustreznimi

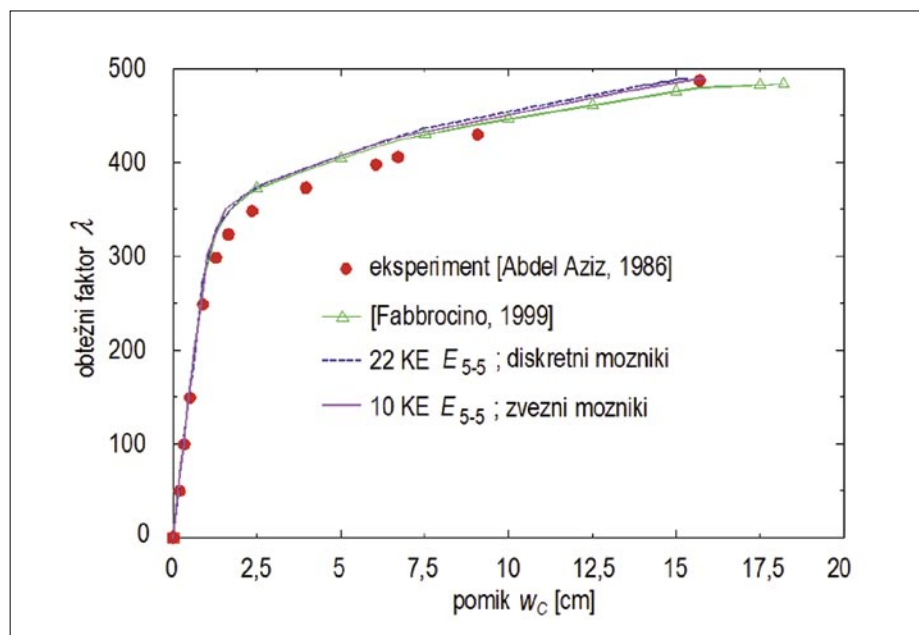
robnimi pogoji, za katere analitičnih rešitev ne poznamo. Zato jih rešujemo numerično, najpogosteje z metodo končnih elementov. Vendar pa je natančnost matematičnega modela odvisna tudi od natančnosti uporabljene numerične metode. Enako velja za v tem članku predstavljeni matematični model. Ker je bila detajlna analiza natančnosti numerične metode prikazana že drugje (Čas, 2004), tu povzamemo le izsledke (Čas, 2004): za modeliranje sovprežnega nosilca z zvezno razporejenimi mozniki zadošča mreža z desetimi končnimi elementi tipa  $E_{5,5}$ ; v primeru modela z diskretno razporejenimi mozniki pa je potrebna mreža z dvaindvajsetimi končnimi elementi tipa  $E_{5,5}$ . Pri tipu končnega elementa z oznako  $E_{ij}$  označujemo z indeksom »i« število interpolacijskih točk (stopnjo interpolacijskega polinoma), z indeksom »j« pa število integracijskih točk (Čas, 2004). Glede na dejansko število moznikov predstavlja v obravnavanem primeru dvaindvajset končnih elementov najmanjše možno število elementov za analizo sovprežnega nosilca z upoštevanjem modela diskretno razporejenih moznikov.

Najprej primerjamo rezultate numerične rešitve in eksperimentov. Na sliki 4 primerjamo

obtežno-deformacijske krivulje. Prikazani sta dve numerično dobljeni krivulji. Prvo smo določili z upoštevanjem diskretno razporejenih moznikov (22 KE  $E_{5,5}$ ), drugo pa zvezno razporejenimi mozniki (10 KE  $E_{5,5}$ ). Na sliki 4 prikazujemo tudi eksperimentalno dobljeno obtežno-deformacijsko krivuljo (Abdel Aziz, 1986) in krivuljo, dobljeno s t. i. metodo robnih elementov (Fabroccino, 1999).

Na sliki 4 vidimo, da sta numerično določeni obtežno-deformacijski krivulji praktično enaki in da se dobro ujemata z izmerjeno. To dokazuje ustrezno natančnost predstavljenega matematičnega modela za analizo togosti, duktilnosti in nosilnosti sovprežnih nosilcev iz betona in jekla. Ker pri modelu zveznih moznikov potrebujemo bistveno manj končnih elementov kot pri modelu diskretnih moznikov, je zvezni model moznikov primernejša izbira. V nadaljevanju ocenimo še učinkovitost naše numerične metode.

Kot vidimo na sliki 4, se obtežno-deformacijska krivulja tujih raziskovalcev (Fabroccino, 1999) dobro ujema s krivuljama, dobljenima s predlagano metodo. Opazno, a majhno odstopanje med krivuljami se pojavi šele pri mejni obtežbi. Ker je model s fino mrežo 2D robnih elementov (Fabroccino, 1999) glede števila podatkov in računalniškega časa bistveno zahtevnejši od v tem članku predstavljenega, oba postopka pa dajeta primerljiva odziva, lahko trdimo, da je predlagani računski postopek za analizo sovprežnih nosilcev tudi zelo učinkovit.



Slika 4 • Primerjava obtežno-deformacijskih krivulj za prostoležeči sovprežni nosilec

Natančnost prikazane metode dokazuje tudi primerjava mejnih obtežb in pripadajočih prečnih pomikov na sredini razpona, ki jo prikazujemo v preglednici 4. Primerjave z izmerjenimi vrednostmi kažejo, da je napaka mejne obtežbe pri modelu zvezno razporejenih moznikov samo 0,45 %, napaka pripadajočega prečnega pomika pa celo 0 %. Model diskretno razporejenih moznikov daje podobno majhne napake (za mejno obtežbo je napaka 0,40 %, za prečni pomik pa 1,90 %). Obravnavan model iz literature (Fabbrocino, 1999) vodi k nekoliko večjim napakam.

Na sliki 5 primerjamo numerične in izmerjene zamike med slojema. Vrednosti zamikov med slojema primerjamo za dva nivoja zunanje obtežbe: (i)  $P = 257$  kN ( $\lambda = 257$ ) in (ii)  $P = 344$  kN ( $\lambda = 344$ ).

Na sliki 5 vidimo zelo dobro ujemanje numerično določenih zamikov z izmerjenimi. Zanimivo je manjše nihanje zamikov pri diskretni razporeditvi moznikov, ki ga opazimo tudi pri izmerjenih zamikih. Praktično enake poteke zamikov so določili drugi raziskovalci (Fabbrocino, 1999). Zmožnost opisa tega lokalnega pojava in dobro globalno ujemanje rezultatov ponovno potrjuje to veliko natančnost predstavljenega postopka.

**Parametrične študije.** S parametričnimi študijami prikažemo vpliv izbranih parametrov na obnašanje sovprežnega nosilca iz betona in jekla. Detajlno analiziramo: (i) vpliv podaj-

	$P_{mej}$ (kN)	$P_{mej}$	$W_{C,mej}$ (cm)	$W_{C,mej}$
		$P_{eksp,mej}$		$W_{C,eksp,mej}$
Eksperiment (Abdel Aziz, 1986)	490	1,000	15,7	1,000
10 KE $E_{5.5}^*$	492,2	1,004	15,7	1,000
22 KE $E_{5.5}^{**}$	488,0	0,996	15,4	0,981
(Fabbrocino, 1999)	486,3	0,993	18,2	1,159

\* zvezna razporeditev moznikov

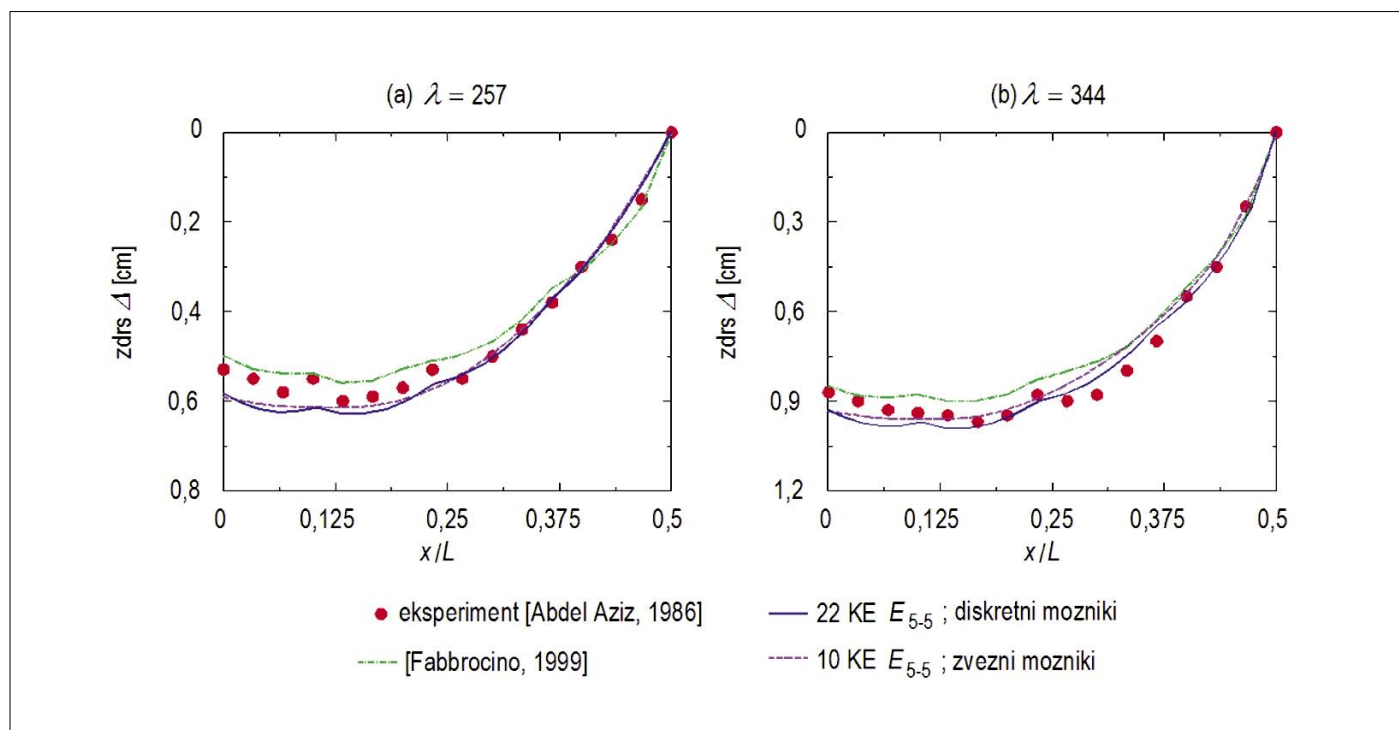
\*\* diskretna razporeditev moznikov

Preglednica 4 • Primerjava med mejnimi obtežbami  $P_{mej}$  in pripadajočimi prečnimi pomiki  $W_{C,mej}$  za prostoležeči sovprežni nosilec

nosti stika na togost, duktilnost in nosilnost nosilca, (ii) vpliv velikosti zunanje obtežbe na porazdelitev strižne obremenitve moznikov, (iii) vpliv podajnosti stika na razporeditev vzdolžnih deformacij in napetosti po prečnem prerezu na sredini razpona in (iv) vpliv načina podpiranja sovprežnega nosilca na velikost zamikov med slojema in njegovo togost, duktilnost in nosilnost. Pri vseh prikazanih študijah bomo v analizah smiselno uporabljali materialne in geometrijske parametre, kot smo jih predstavili v analizi natančnosti matematičnega modela.

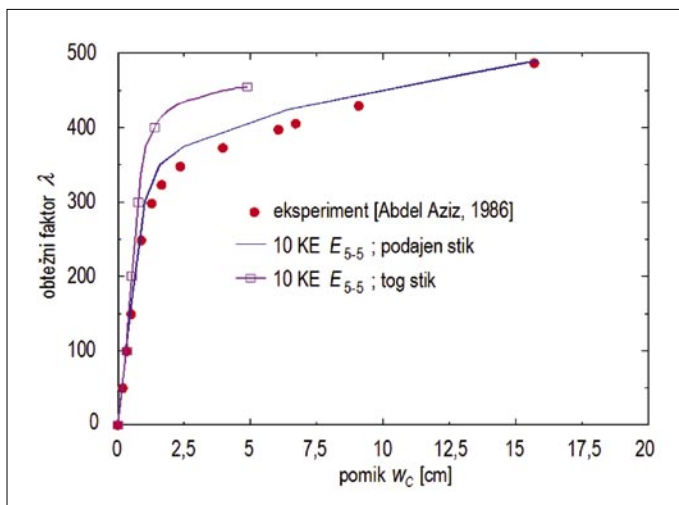
Vpliv podajnosti stika na togost, duktilnost in nosilnost prostoležečega sovprežnega nosilca iz betona in jekla prikazujemo na sliki

6 in v preglednici 5. Na sliki 6 primerjamo obtežno-deformacijski krivulji za sovprežna nosilca s podajnim in togim stikom med slojema. Podobno v preglednici 5 primerjamo mejno obtežbo in pripadajoči prečni pomik na sredini razpona sovprežnega nosilca. Na sliki 6 vidimo, da podajnost stika med slojema minimalno vpliva na začetno togost in nosilnost obravnavanega sovprežnega nosilca. Tako se računski mejna obtežba sovprežnega nosilca s togim stikom razlikuje glede na izmerjeno samo za 7,6 % (preglednica 5). Presenetljivo pa je, da je nosilnost sovprežnega nosilca s togim stikom manjša, kot je nosilnost sovprežnega nosilca s podajnim stikom. Največji vpliv ima podajnost



Slika 5 • Primerjava zamikov med slojema prostoležečega sovprežnega nosilca za dva nivoja zunanje obtežbe: (a)  $\lambda = 257$  in (b)  $\lambda = 344$





Slika 6 • Analiza vpliva podajnosti stika na togost, duktilnost in nosilnost prostoležečega sovprežnega nosilca

	$P_{mej}$ (kN)	$P_{mej}$	$W_{C,mej}$ (cm)	$W_{C,mej}$
		$P_{eksp,mej}$		$W_{C,eksp,mej}$
Eksperiment (Abdel Aziz, 1986)	490	1,000	15,7	1,000
10 KE $E_{5,5}$ *	492,2	1,004	15,7	1,000
10 KE $E_{5,5}$ **	452,8	0,924	4,6	0,293

\* podajna povezava med slojema

\*\* toga povezava med slojema

Preglednica 5 • Analiza vpliva podajnosti stika na velikost mejne obtežbe  $P_{mej}$  in pripadajočega prečnega pomika  $w_{C,mej}$  na sredini razpona prostoležečega sovprežnega nosilca

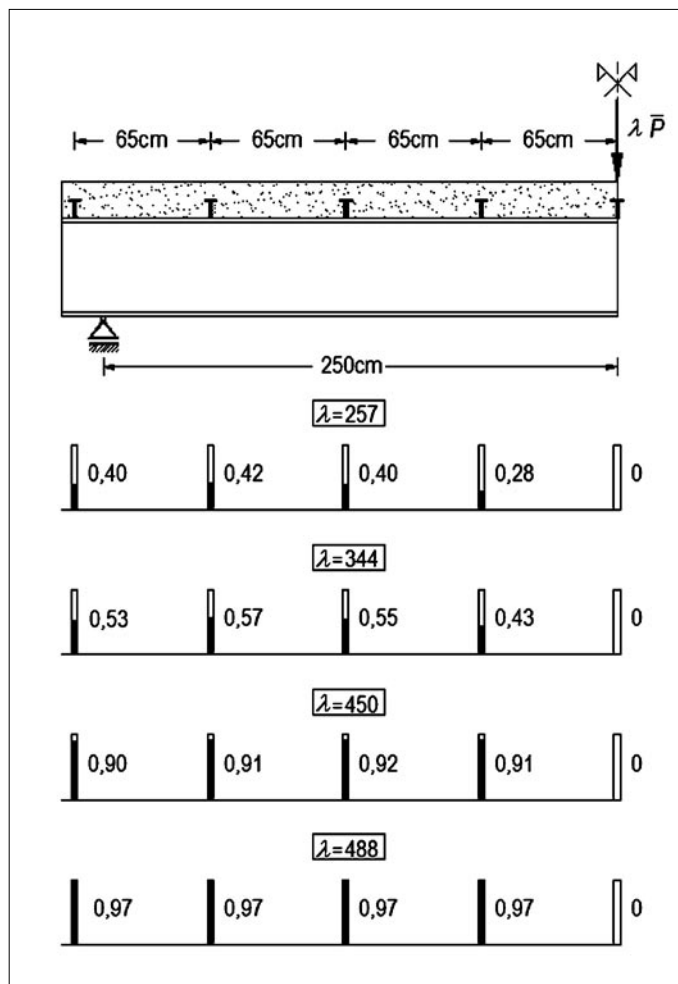
stika na duktilnost sovprežnega nosilca (slika 6). Tako je pri sovprežnem nosilcu s togim stikom prečni pomik na sredini razpona pri mejni obteži kar za 70 % manjši, kot je pri sovprežnem nosilcu s podajnim stikom (preglednica 5). To dokazuje, da ima podajnost povezave med slojema sovprežnega nosilca iz betona in jekla velik vpliv na njegovo obnašanje.

Vpliv velikosti zunanje obtežbe sovprežnega nosilca na strižno obremenitev moznikov prikazujemo na sliki 7.

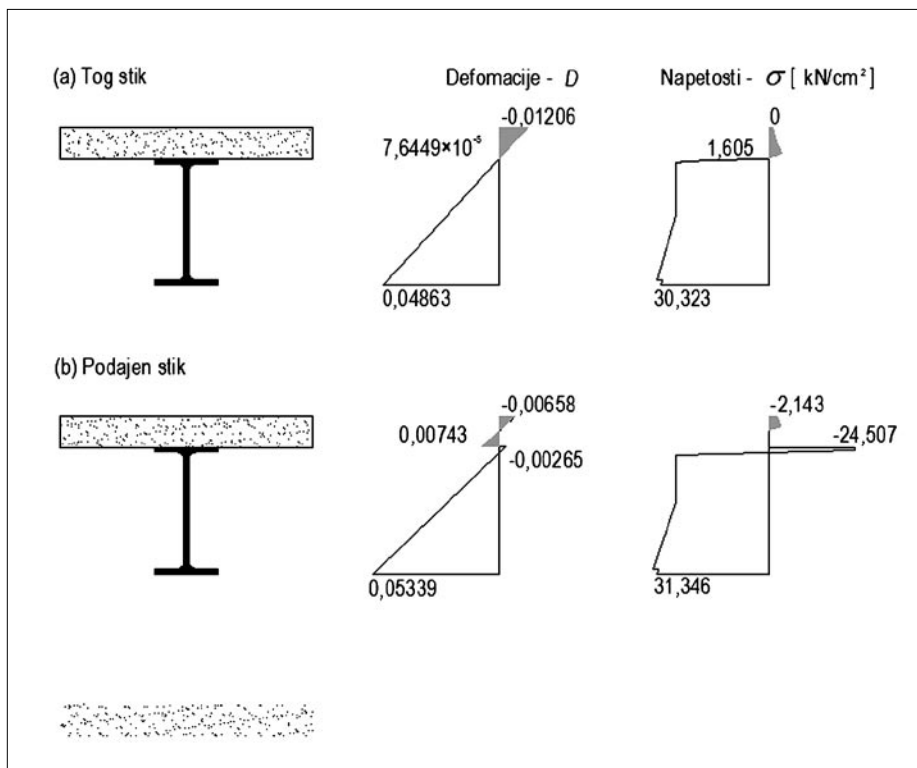
Relativno strižno obremenitev moznikov glede na njihovo strižno nosilnost ( $Q_{mej} = 130$  kN) prikazujemo za štiri nivoje zunanje obtežbe: (i)  $P = 257$  kN ( $\lambda = 257$ ), (ii)  $P = 344$  kN ( $\lambda = 344$ ), (iii)  $P = 450$  kN ( $\lambda = 450$ ) in (iv)  $P_{mej} = 488$  kN ( $\lambda_{mej} = 488$ ). Na sliki 7 vidimo, da strižne obremenitve moznikov za sili  $P = 257$  kN in  $P = 344$  kN naraščajo od sredine nosilca proti podporam, razen krajnjega moznika, ki je obremenjen nekoliko manj.

Glede na velikosti zamikov med slojema so take obremenitve moznikov tudi pričakovane. Bistveno drugačne pa so strižne obremenitve moznikov za višje nivoje obtežbe. Kot vidimo na sliki 7, so za silo  $P = 450$  kN in za mejno silo  $P_{mej} = 488$  kN vsi mozniki obremenjeni skoraj z enako strižno silo. Pri  $P_{mej}$  je ta že kar 97 % njihove mejne strižne nosilnosti. Izjema je le moznik na sredini razpona sovprežnega nosilca, ki zaradi simetrije nosilca in obtežbe ostaja neobremenjen.

Na sliki 8 prikazujemo vpliv podajnosti stika na razporeditev vzdolžnih deformacij in napetosti po prečnem prerezu na sredini sovprežnega nosilca, ko je obtežen s silo  $P = 452,8$  kN. Deformacije in napetosti po prečnem prerezu primerjamo za togo in podajno povezavo med slojema sovprežnega nosilca. Na sliki 8 vidimo, da ima podajnost stika velik vpliv na razporeditev deformacij in napetosti po prečnem prerezu. Če sta sloja togo povezana, se vzdolžne deformacije linearno

Slika 7 • Relativna strižna obremenitev moznikov ( $Q/Q_{mej}$ ) za različne nivoje zunanje obtežbe

spreminjajo po celotnem prečnem prerezu. Ker je pri obravnavanem nosilcu nevtralna os praktično na stiku med slojema, je jekleni nosilec obremenjen samo z nateznimi napetostmi, armiranobetonska plošča pa samo s tlačnimi napetostmi. Popolnoma drugačno je spreminjanje deformacij in napetosti po prečnem prerezu pri sovprežnem nosilcu s podajnim stikom. V tem primeru opazimo značilno žagasto razporeditev deformacij po prečnem prerezu in posledično sta jekleni nosilec in armiranobetonska plošča obremenjena z nateznimi in tlačnimi napetostmi. Na koncu analiziramo še vpliv načina podpiranja sovprežnega nosilca na velikosti zamikov med slojema ter na njegovo togost, duktilnost in nosilnost. Analiziramo dva načina podpiranja sovprežnega nosilca. Za oba načina podpiranja je sovprežni nosilec na levem in desnem robu prečno podprt, spreminjamo le način podpiranja v vodoravni smeri, in sicer: (i) na levem robu je preprečen

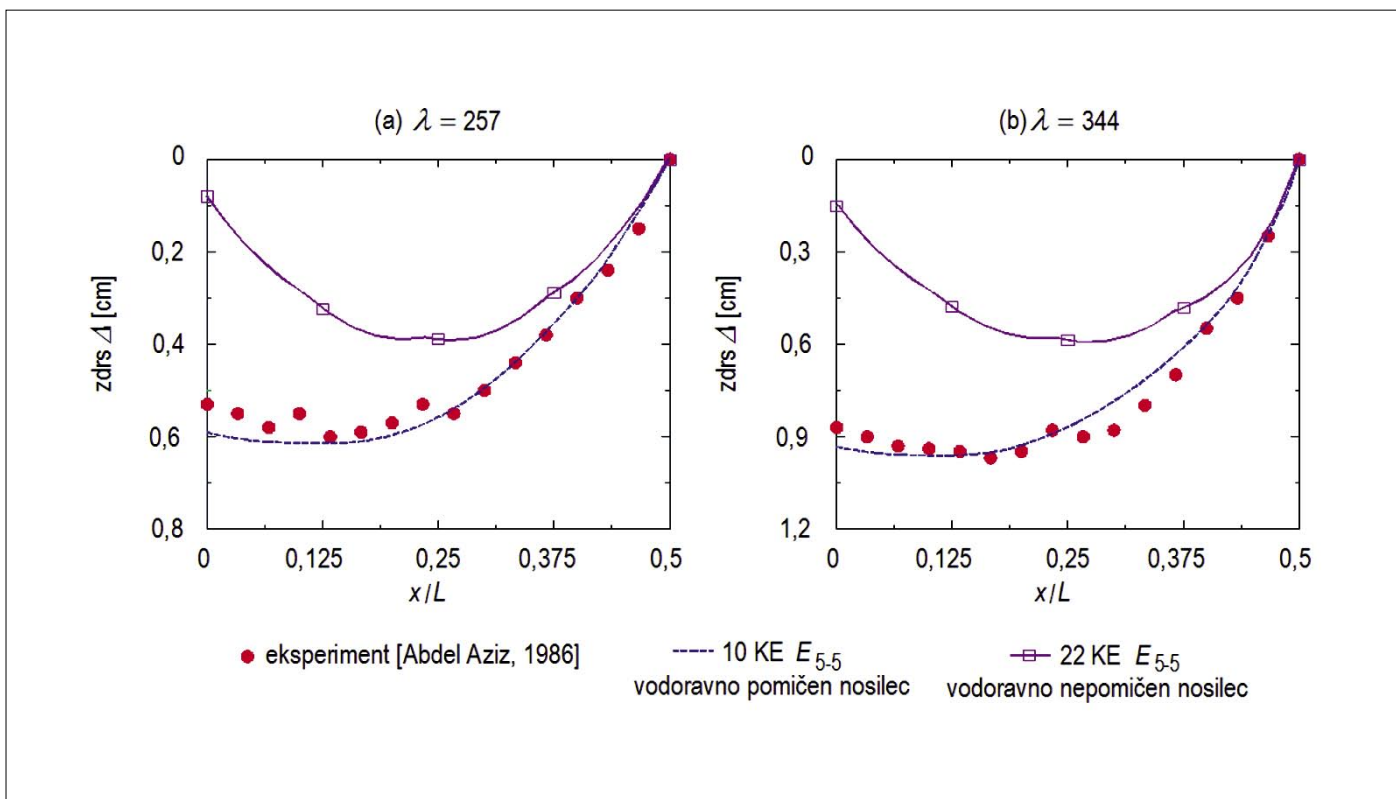


vodoravni pomik jeklenega nosilca, na desnem robu pa ne (slika 2a), in (ii) jeklenemu nosilcu sta preprečena pomika v vodoravni smeri na obeh robovih (slika 2b). Opozorimo pa, da pri obeh načinih podpiranja armiranobetonska plošča na robovih v vodoravni smeri ni podprta. Vpliv načina podpiranja na velikosti zamikov med slojema analiziramo za sili: (i)  $P = 257$  kN ( $\lambda = 257$ ) in (i)  $P = 344$  kN ( $\lambda = 344$ ).

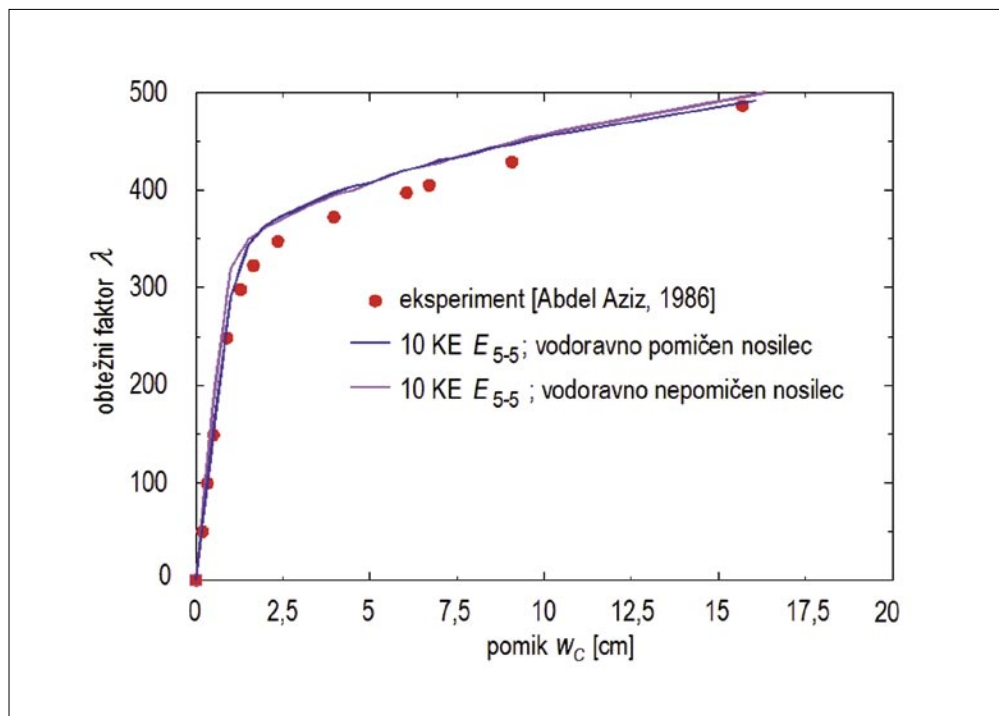
Na sliki 9 vidimo, da ima način podpiranja bistven vpliv na velikosti zamikov med slojema sovprežnega nosilca. Pričakovano so zamiki med slojema manjši za sovprežni nosilec, vodoravno podprt na obeh robovih. Vpliv je manjši na sredini razpona in največji v okolici podpor (slika 9).

Na koncu prikazujemo še vpliv načina podpiranja na obtežno-deformacijske krivulje (slika 10). Kot lahko vidimo na sliki 10, se krivulji za obe vrsti podpiranja praktično ujemata, kar pomeni, da način podpiranja obravnavanega sovprežnega nosilca ne vpliva na njegovo togost, duktilnost in nosilnost.

Slika 8 • Spreminjanje vzdolžnih deformacij in napetosti po prečnem prerezu na sredini sovprežnega nosilca pri sili  $P = 452,8$  kN



Slika 9 • Vpliv načina podpiranja sovprežnega nosilca na velikosti zamikov med jeklenim nosilcem in armiranobetonsko ploščo za sili: (a)  $\lambda = 257$  in (b)  $\lambda = 344$



Slika 10 • Analiza vpliva načina podpiranja sovprežnega nosilca iz betona in jekla na njegovo togost, duktilnost in nosilnost

#### 4 • SKLEP

V članku smo predstavili relativno preprost matematični model in pripadajočo numerično metodo za nelinearno analizo sovprežnih nosilcev iz betona in jekla. Pri izpeljavi matematičnega modela smo upoštevali, da se armiranobetonska plošča in jekleni nosilec med deformiranjem lahko na stiku zamakne, ne moreta pa se razmakniti oziroma vtisniti eden v drugega.

S primerjavo rezultatov numeričnega modela in eksperimentov za obtežno-deformacijske krivulje in zamike med slojema smo ugotovili:

- da je predstavljeni matematični model zelo natančen in da je pripadajoči numerični postopek zelo učinkovit. Zato je predstavljeni matematični model primeren za analizo sovprežnih nosilcev iz betona in jekla;
- da je model zvezno razporejenih moznikov enako natančen, kot je model diskretno razporejenih moznikov. Ker je zvezni model ugodnejši glede priprave podatkov in računskega časa, je primernejši za analizo sovprežnih nosilcev iz betona in jekla.

V nadaljevanju smo analizirali vpliv značilnih parametrov na obnašanje prostoležečega sovprežnega nosilca in ugotovili:

- da ima podajnost stika med slojema relativno majhen vpliv na togost in nosilnost nosilca. Pokazalo se je, da je nosilnost prostoležečega sovprežnega nosilca s togim stikom okrog 7 % manjša, kot je nosilnost enakega prostoležečega sovprežnega nosilca, vendar s podajnim stikom;
- da ima podajnost stika med slojema zelo velik vpliv na duktilnost prostoležečega sovprežnega nosilca. Tako je lahko prečni pomik na sredini razpona sovprežnega nosilca s podajnim stikom kar za 70 % večji, kot je prečni pomik sovprežnega nosilca s togim stikom med slojema. To pa pomeni, da lahko z ustreznim načrtovanjem podajnosti stika med slojema bistveno povečamo duktilnost nosilca, nekoliko pa tudi nosilnost;
- da velikost zunanje obtežbe zelo vpliva na porazdelitev strižnih obremenitev moznikov. Pri nizkih nivojih zunanje obtežbe narašča strižna obremenitev moznikov od sredine razpona proti podporam, razen krajnega moznika, katerega obremenitev se nekoliko zmanjša. Bistveno drugačne

pa so strižne obremenitve moznikov pri mejni obtežbi sovprežnega nosilca. V tem primeru so vsi mozniki, razen srednjega, obremenjeni praktično z enako strižno silo. Ta pa je skoraj enaka mejni strižni nosilnosti moznikov;

- da ima podajnost stika med slojema velik vpliv na razporeditev vzdolžnih deformacij in napetosti po prečnem prerezu sovprežnega nosilca. Medtem ko je pri obravnavanem sovprežnem nosilcu s togim stikom armiranobetonska plošča po vsej višini obremenjena s tlačnimi napetostmi, jekleni nosilec pa samo z nateznimi, se pojavi pri sovprežnem nosilcu s podajnim stikom žagasta razporeditev deformacij po prečnem prerezu. Posledično sta armiranobetonska plošča in jekleni nosilec obremenjena z nateznimi in s tlačnimi napetostmi;
- da ima način podpiranja jeklenega nosilca sovprežnih nosilcev velik vpliv na zamike med slojema in relativno majhen vpliv na togost, duktilnost in nosilnost sovprežnega nosilca. Če jekleni nosilec obojestransko podpremo v vodoravni smeri, lahko zamike med slojema sovprežnega nosilca bistveno zmanjšamo, medtem ko največji povos nosilca ostaja praktično nespremenjen.

## 5 • LITERATURA

- Abdel Aziz, K., Modélisation et étude expérimentale de poutres mixtes acier-béton a connexion partielle ou espace, Doktorska disertacija, Institut National des Sciences Appliquées des Rennes, 1986.
- Adekola, A. O., Partial interaction between elastically connected elements of a composite beam, *Int. J. Solids Struct.*, 4, 1125–1135, 1968.
- Aribert, J. M., Abdel Aziz, K., Calcul des poutres mixtes jusqu'à l'état ultime avec un effet de soulèvement a l'interface acier-béton, *Constr. Métallique*, 4, 3–41, 1985.
- Ayoub, A., Filippou, F. C., Mixed formulation of nonlinear steel-concrete composite beam element, *ASCE J. Struct. Eng.*, 126(3), 371–381, 2000.
- Ayoub, A., A two-field mixed variational principle for partially connected composite beams, *Fin. El. Anal. Design*, 37, 929–959, 2001.
- Bratina, S., Saje, M., Planinc, I., On materially and geometrically non-linear analysis of reinforced-concrete planar frames, *Int. J. Solids Struct.*, 41, 7181–7207, 2003.
- Čas, B., Nelinearna analiza kompozitnih nosilcev z upoštevanjem zdrsa med sloji, Doktorska disertacija, FGG, Univerza v Ljubljani, 2004.
- Čas, B., Saje, M., Planinc, I., Non-linear finite element analysis of composite planar frames with interlayer slip, *Comput. Struct.*, 82, 1901–1912, 2004.
- Čas, B., Bratina, S., Saje, M., Planinc, I., Non-linear analysis of composite steel-concrete beams with incomplete interaction, *Steel Compos. Struct.*, 4(6), 489–507, 2004.
- Čas, B., Saje, M., Planinc, I., Buckling of layered wood columns. *Adv. Eng. Software*, 38(8-9), 586–597, 1992.
- Dall'Asta, A., Zona, A., Non-linear analysis of composite beams by displacement approach, *Comput. Struct.*, 80, 2217–2228, 2002.
- Desayi, P., Krishnan, S., Equation for the stress-strain curve of concrete, *J. Am. Concrete Institute*, 61, 345–350, 1964.
- Eurocode 2, Design of Concrete Structures, Part 1: General rules and rules for buildings, prEN 1992-1: 2001 (1st draft), 1999.
- Fabbrocino, G., Manfredi, G., Cosenza, E., Non-linear analysis of composite beams under positive bending, *Comput. Struct.*, 70, 77–89, 1999.
- Fabbrocino, G., Manfredi, G., Cosenza, E., Analysis of continuous composite beams including partial interaction and bond, *ASCE J. Struct. Eng.*, 126(11), 1288–1294, 2000.
- Gattesco, N., Analytical modelling of nonlinear behaviour of composite beams with deformable connection, *J. Constr. Steel Research*, 52, 195–218, 1999.
- Gattesco, N., Giuriani, E., Experimental study on stud shear connectors subjected to cyclic loading, *J. Constr. Steel Research*, 38(1), 1–21, 1996.
- Hjelmstad, K. D., *Fundamentals of Structural Mechanics*, 2nd ed., Springer, New York, 2005.
- Science+Business Media Inc., 2005
- Newmark, N. M., Siess, C. P., Viest, I. M., Test and analysis of composite beams with incomplete interaction, *Proc. Soc. Exp. Stress Anal.*, 9, 75–92, 1951.
- Ollgard, J. G., Slutter, R. G., Fisher, J. W., Shear strength of stud connectors in lightweight and normal weight concrete, *AISC Eng. Journal*, 8, 55–64, 1971.
- Ranzi, G., Bradford, M. A., Uy, B., A general method of analysis of composite beams with partial interaction, *Steel Comp. Struct.*, 3(3), 169–184, 2003.
- Robinson, H., Naraine, K. S., Slip and uplift effects in composite beams, *Proceedings of ASCE Engineering Foundation Conference on Composite Construction*, 1988.
- Salari, R., Spacone, E., Shing, P. B., Frangopol, D. M., Nonlinear analysis of composite beams with deformable shear connectors, *ASCE J. Struct. Eng.*, 124(10), 1148–1158, 1998.
- Schnabl, S., Planinc, I., Saje, M., Čas, B., Turk, G., An analytical model of layered continuous beams with partial interaction, *Struct. Eng. Mech.*, 22(3), 263–278, 2006.
- Schnabl, S., Saje, M., Turk, G., Planinc, I., Analytical solution of two-layer beam taking into account interlayer slip and shear deformation, *ASCE J. Struct. Eng.*, 133(6), 886–894, 2007.
- The MathWorks, Inc., MATLAB, Natick, <http://www.mathworks.com>, 1999.



# TESTI STRIŽNE NOSILNOSTI FASADNIH PANELOV TRIMO

## EXPERIMENTAL TESTS OF SHEAR STRENGTH OF CLADDING PANELS TRIMO

**asist. Matej Rozman, univ. dipl. inž. grad.**

mrozman@ikpir.fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, Ljubljana

Trimo, d. d., Prijateljjeva cesta 12, Trebnje

**asist. dr. Peter Skuber, univ. dipl. inž. grad.**

pskuber@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, Ljubljana

**Barbara Gorenc, univ. dipl. inž. grad.**

barbara.gorenc@trimo.si

Trimo, d. d., Prijateljjeva cesta 12, Trebnje

**mag. Črtomir Remec, univ. dipl. inž. grad.**

c.remec@cbs-institut.si

CBS Institut, Prijateljjeva cesta 12, Trebnje

**prof. dr. Darko Beg, univ. dipl. inž. grad.**

dbeg@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, Ljubljana

**Znanstveni članek**

UDK: 620.176:624.07

**Povzetek** | V članku so predstavljeni testi strižnega obnašanja Trimo panelov FTV 120 pri monotono naraščajoči obtežbi in pri ciklični obtežbi. Poglavitni namen testiranja je bil preveriti sposobnost prenašanja horizontalnih obremenitev fasadne konstrukcije pri obstoječem načinu pritrjevanja. Prav tako pa je bil namen preizkusiti tudi nekatere izboljšane načine pritrjevanja, ki bi ob nadaljnjem razvoju panelov in raziskavah na tem področju omogočili uporabo tudi v praksi. Izvedenih je bilo devet testov sistema treh panelov skupne širine 3,0 m in višine 2,6 m, privijačenih na jekleno podkonstrukcijo, ki so se med seboj razlikovali po načinu pritrjevanja panelov na jekleno podkonstrukcijo in po obremenilnem protokolu. Ob tem so bili narejeni tudi natezni testi jeklene pločevine, ki je bila izrezana iz preizkušenih panelov, in testi treh različic spoja med jekleno konstrukcijo in pločevino panela. Preiskave so pokazale, da je strižna nosilnost v veliki meri odvisna od načina pritrjevanja panelov. Iz rezultatov testov je razvidno, da lahko z ustreznim načinom pritrjevanja panelov zagotovimo zadostno strižno nosilnost konstrukcije za prevzem horizontalnih obremenitev.

**Summary** | The paper deals with experimental tests on shear strength of cladding panels. The main objective of testing was to check the ability of cladding panels to transfer horizontal forces. The objective was also to test some improved systems of fastening, which would make possible the use of such panels in practice as well. Nine tests of the system with three panels of joint width 3.0 m and height of 2.6 m were carried out. Cladding panels were attached to a steel frame. The systems differed according to the way of fastening the panels on the steel frame and according to load protocol. The tensile tests of thin steel sheeting, which was cut out from tested cladding panels, and the tests on three types of steel structure – sheeting joints were also performed. The tests showed that shear capacity depends to a large extent upon the system of fastening panels. The results of tests show that with a suitable way of attaching panels sufficient shear capacity of the structure can be assured.

## 1 • UVOD

Jeklene stavbe z okvirnim konstrukcijskim sistemom so precej podajne konstrukcije. Pri zagotavljanju potresne odpornosti so deformacije praviloma merodajen kriterij, ki v večini primerov zahteva povečanje dimenzij jeklenih elementov. Pri tem se tako imenovani »nekonstrukcijski elementi«, med katerimi so zelo pomembni fasadni paneli, praviloma ne upoštevajo pri projektiranju potresne odpornosti. Paneli v večini primerov vplivajo ugodno na potresni odziv, saj povečajo togost in nosilnost celotne konstrukcije. Deformacije so manjše in s tem tudi poškodbe nekonstrukcijskih elementov in inštalacij, ki predstavljajo največji del grotne škode pri posledicah potresa. Na drugi strani pa je lahko vpliv panelov na nosilno konstrukcijo tudi neugoden, tj. pri njihovi neprimerni tlorsni in/ali višinski razporeditvi.

Tu se odpre vprašanje, ali je mogoče pri industrijskih halah in podobnih objektih z upoštevanjem togosti fasadnih panelov prihraniti nekaj na teži primarne nosilne jeklene konstrukcije oziroma z upoštevanjem strešnih panelov nadomestiti klasično zavetrovanje ostrešja. To vprašanje je dokaj zahtevno, saj kljub nemajhnemu številu numeričnih študij in eksperimentov, ki so bili izvedeni v preteklosti,

ta problematika še ni dovolj raziskana in prav tako še ni dobila mesta v standardih. To je razumljivo, saj je to področje izredno obsežno in raznoliko. V prvi vrsti se po svetu uporablja ogromno število različnih vrst panelov za polnila (fasade, predelne stene, strehe ...) iz različnih materialov in s tem posledično tudi različni tipi pritrdilnih sredstev. Na drugi strani pa so tudi filozofije o vlogi panela različne: nekje poskušajo vpliv panelov (polnil) izkoristiti kot neke vrste zavetrovanje (Evropa), drugje pa spet težijo k temu, da bi vpliv polnil na primarno konstrukcijo povsem izničili (Japonska). Na območjih z močnejšimi potresi (Japonska in ZDA) je aktualna uporaba posebej oblikovanih panelov iz pločevin iz jekla z nizko mejo tečenja ali aluminijevih zlitin debeline 3 do 5 mm z ustreznimi prečnimi in vzdolžnimi ojačitvami kot disipatorjev energije, ki poleg tega, da povečajo strižno togost konstrukcije, disipirajo ogromno energije in na ta način razbremenijo primarno nosilno konstrukcijo.

Glavni namen izvedenih testov je raziskati globalno strižno obnašanje sendvič panelov, ki jih proizvaja podjetje Trimo, d. d., Trebnje, pri monotonu naraščajoči in pri ciklični obtežbi. Raziskanih je bilo več

različnih načinov pritrjevanja panelov na jekleno podkonstrukcijo in določene so bile osnovne mehanske lastnosti, kot je strižna nosilnost in togost preizkušancev. V praksi se za tipične objekte najpogosteje uporablja 2 do 3 vijake na meter spoja med panelom in jekleno podkonstrukcijo. Poleg takega načina pritrditve smo preizkušali še štiri nove možne načine pritrjevanja panelov. Tako smo preučevali vpliv povečevanja števila vijakov v spoju med panelom in jekleno podkonstrukcijo in vpliv šivanega spoja med posameznimi paneli, ki pa se je do sedaj v praksi le redko uporabljal. Šivani spoj je sestavljen iz aluminijastega traku in vijakov. Možni sta dve izvedbi: enostransko, in sicer z aluminijastim trakom samo na eni strani panela, in dvostransko, kjer je aluminijasti trak na obeh straneh panelov. V eksperimentih sta bili zajeti obe izvedbi šivanega spoja in raziskan je bil tudi vpliv števila vijakov v šivanem spoju.

Glede na to, da je nosilnost spoja med jekleno konstrukcijo in pločevino panela na bočni pritisk merodajna za obnašanje celotnega sistema, smo testirali tudi dva izboljšana spoja, ki imata večjo nosilnost na bočni pritisk. Posledično bi tudi cel sistem panelov imel večjo strižno nosilnost oziroma bi lahko za neko želeno strižno nosilnost uporabili manj vijakov, kar bi prispevalo k večji ekonomičnosti pritrjevanja.

## 2 • TESTI MATERIALNIH KARAKTERISTIK

Za določitev osnovnih mehanskih karakteristik jeklene pločevine so bili izvedeni standardni natezni preizkusi epruvel, izdelanih iz pločevin preizkušanih panelov. Prav tako pa so bili izvedeni tudi testi na strižnem spoju med jekleno konstrukcijo in pločevino panela. Poleg osnovnega spoja smo testirali tudi dve njegovi modificirani različici, ki imata nekoliko večjo nosilnost. Rezultati opravljenih testov omogočijo celovito analitično in numerično študijo strižnega obnašanja panelov in s tem napoved obnašanja poljubnega sistema fasadnih panelov pri horizontalni obtežbi.

### 2.1 Natezni preizkusi

Za pridobitev podatkov o meji tečenja ( $f_y$ ) in natezni trdnosti ( $f_u$ ) jeklene pločevine fasadnih panelov FTV 120 smo izvedli štiri teste na preizkušancih, izdelanih iz

pločevine intaktnega panela. Preizkušena pločevina je debeline 0,6 mm (debelina jekla 0,55 mm, ostalo plast cinka in barve). Kvaliteta jeklene pločevine je S250GD (SIST EN 10326:2004), njene nazivne karakteristike so:  $f_y = 25,0 \text{ kN/cm}^2$ ,  $f_u = 33,0 \text{ kN/cm}^2$  in  $\epsilon_u = 19,0 \%$ . Dejanske mehanske karakteristike pločevine panelov smo določili z

nateznimi preizkusi po standardu SIST EN 10002-1:2002 (dodatek B). Skupaj smo izvedli štiri teste, dva preizkušanca smo izrezali iz pločevine prečno (T-1 in T-2), dva pa vzdolžno (L-1 in L-2).

Rezultati nateznih preizkusov pločevine so prikazani v preglednici 1. Dejanske materialne karakteristike so občutno višje od nominalnih. Jeklena pločevina preizkušanih fasadnih panelov ima približno 80 % večjo mejo tečenja ( $f_y$ ), kot je nominalna, kar se je posledično odrazilo pri večji strižni odpornosti fasadnih panelov.

Preizkušanec	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_u$ (%)
T-1	43,1	45,5	22,6
T-2	42,7	45,5	22,8
L-1	41,8	45,4	23,3
L-2	42,0	45,3	24,4

Preglednica 1 • Materialne karakteristike jeklene pločevine fasadnih panelov

Preizkušavec	$f_f$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_u$ (%)
S250-1	38,0	39,0	35,0
S250-2	38,4	39,4	35,0
S250-3	37,9	39,5	35,7
S250-4	37,9	39,6	42,9
S280-1	37,5	43,5	33,9
S280-2	37,4	43,5	35,1
S320-1	41,6	43,7	31,3
S320-2	41,4	43,8	30,1

Preglednica 2 • Materialne karakteristike jeklenih trakov

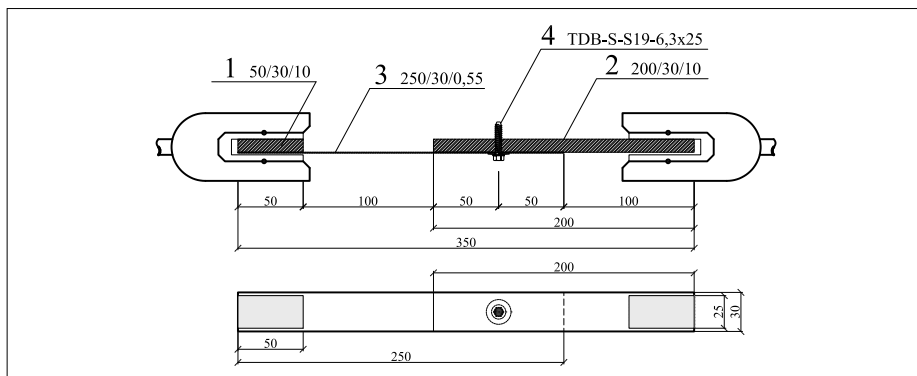
Poleg omenjenih štirih testov smo opravili še 8 testov na jeklenih trakovih dimenzij  $l/d/t = 250/30/0,55$  mm, ki so kvalitete S250GD, S280GD oziroma S320GD. Poglaviti namen teh testov je bil dobiti materialne karakteristike jeklenih trakov, ki so se pozneje uporabili za preizkus nosilnosti na bočni pritisk spojev med jekleno konstrukcijo in pločevino panela. Testi so kljub nestandardiziranemu postopku zagotovili verodostojne rezultate o materialnih karakteristikah pločevin.

Rezultati nateznih preizkusov jeklenih trakov so prikazani v preglednici 2. Dejanske materialne karakteristike so občutno višje od nominalnih. Poglaviti ugotovitev testov je, da čeprav smo testirali jeklene trakove treh različnih nazivnih kvalitete (S250GD, S280GD in S320GD), so njihove materialne karakteristike skoraj enake. Meja tečenja ( $f_f$ ) pri jeklenih trakovih iz jeklene pločevine S250GD je okoli 38,0 kN/cm<sup>2</sup>, pri jeklu S280GD je meja tečenja celo nekoliko nižja (1–2 %), pri jeklu S320GD pa je meja tečenja za približno 10 %

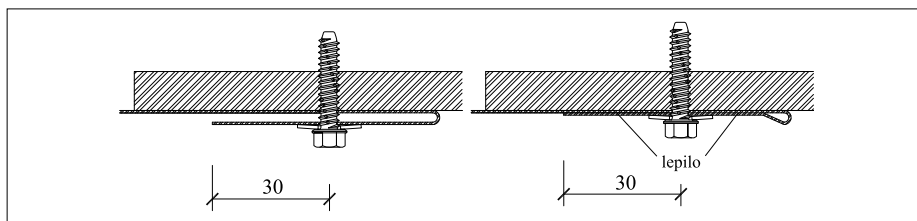
višja (preglednica 2). Porušne deformacije ( $\epsilon_u$ ) pa so ravno obratno sorazmerne nazivni kvaliteti jeklene pločevine (jeklo S320GD je najmanj duktilno).

## 2.2 Preizkus spoja med jekleno konstrukcijo in pločevino panela

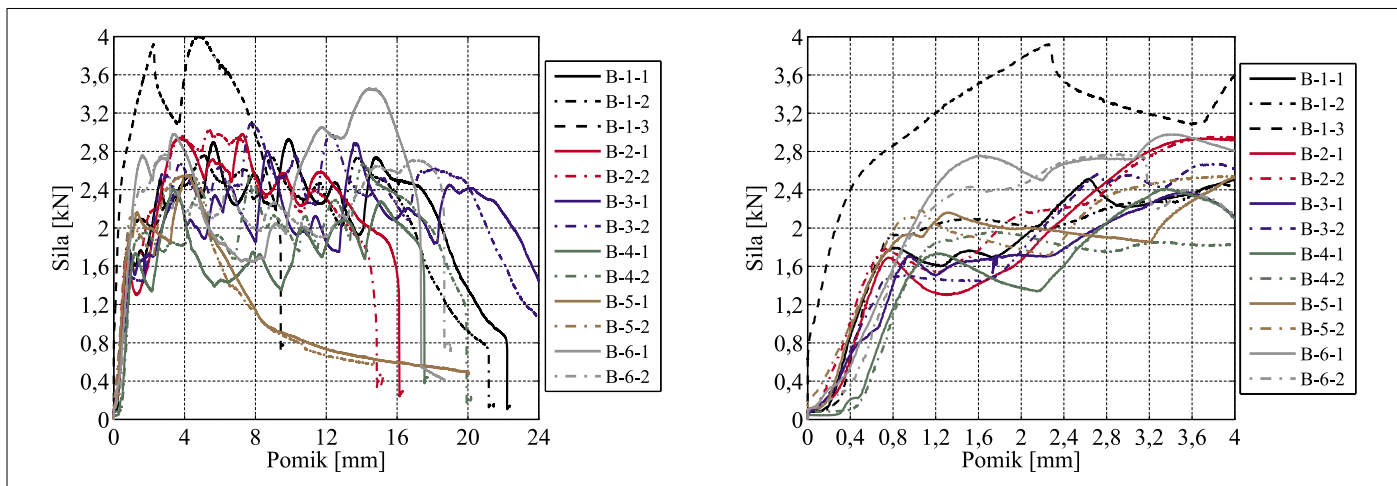
Pri tem preizkusu smo določili nosilnost pločevine (0,55 mm) oziroma vijaka na bočni pritisk. Preizkus smo izvedli na preizkuševalni napravi AMSLER 100. Trakovi jeklene pločevine dimenzij 250/30/0,55 mm so bili izrezani iz kolutov pločevine kvalitete S250GD, S280GD in S320GD. Posamezen trak jeklene pločevine



Slika 1 • Skica preizkusa stika dveh pločevin (vijak TDB-S)



Slika 2 • Detajl 2 (levo) in detajl 3 (desno)



Slika 3 • Primerjava rezultatov testov na bočni pritisk

(Odmik vijaka od prostega roba pločevine: B-1: 50 mm, B-2: 20 mm, B-3: 30 mm, B-4: 40 mm, B-5: 50 mm. Pri seriji B-1 do B-4 je bil uporabljen vijak s podložko, pri seriji B-5 pa vijak brez podložke)

Št. testa	Pločevina št. 1	Pločevina št. 2	Pločevina št. 3	Odmik vijaka od prostega roba pl. št. 3
B-1-1	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55	50
B-1-2	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55	50
B-1-3	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55	50 <sup>P</sup>
B-2-1	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55	20
B-2-2	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55	20
B-3-1	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55	30
B-3-2	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55	30
B-4-1	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55	40
B-4-2	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55	40
B-5-1	50/30/5	200/30/10	250/30/0,55*	50
B-5-2	50/30/5	200/30/10	250/30/0,55*	50
B-6-1	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55 <sup>†</sup>	20
B-6-2	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55 <sup>†</sup>	20
B-7-1	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55 <sup>‡</sup>	20
B-7-1	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55 <sup>‡</sup>	20
B-9-1	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55 (S280) <sup>‡</sup>	20
B-9-2	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55 (S280) <sup>‡</sup>	20
B-11-1	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55 (S320) <sup>‡</sup>	20 <sup>P</sup>
B-11-2	50/30/10	200/30/10	250/30/0,55 (S320) <sup>‡</sup>	20

<sup>P</sup> privit vijak (brez zračnosti), \* brez podložke, <sup>†</sup> detajl 2, <sup>‡</sup> detajl 3.

Preglednica 3 • Program testiranja spoja med jekleno konstrukcijo in pločevino panela

je bil spojen z jekleno pločevino debeline 10 mm in kvalitete S235 z vijakom proizvajalca SFS intec tipa TDB-S-S19-6,3x25 (slika 1).

Pri pritrditvi fasadnih panelov strižna ravnina poteka skozi navoj vijaka. Iz tega razloga smo pri testih spoja uporabili vijak z navojem po

celem stebalu. Pri testiranju smo preizkusili tudi dve izboljšavi v smislu odebelitve pločevine na mestu spoja (sliki 2 in 5), in sicer:

- detajl 2 – na mestu spoja prepognjena pločevina,
- detajl 3 – na mestu spoja prepognjena in zlepljena pločevina.

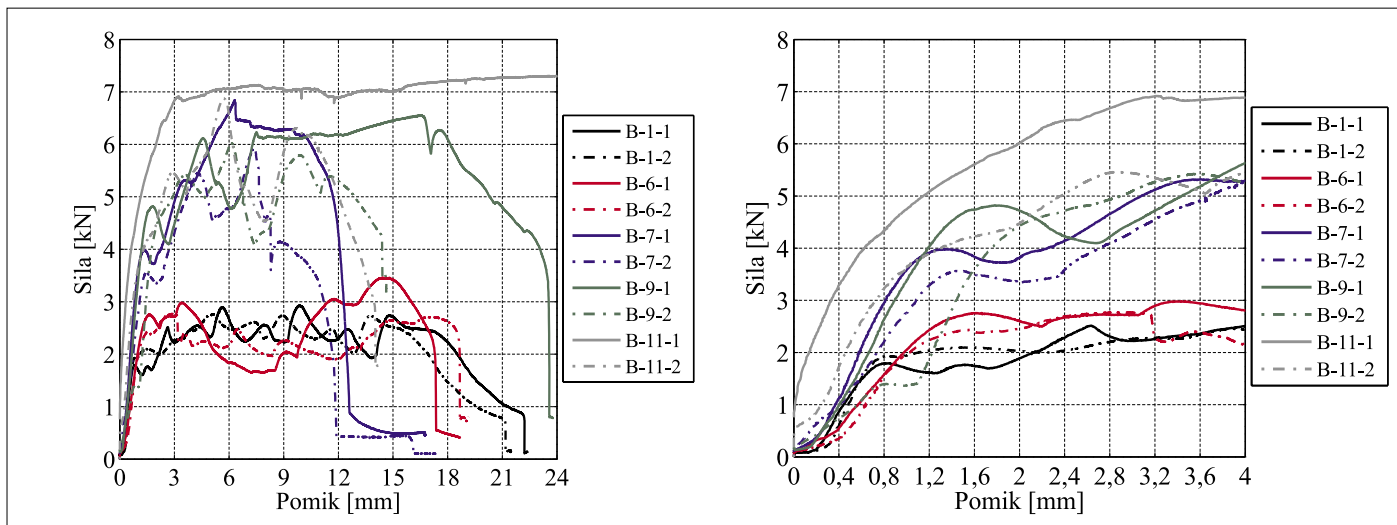
Namen obeh izboljšav je najti nove možne načine pritrditve panelov, ki bi na eni strani imeli višjo nosilnost, na drugi strani pa bili tudi ekonomični.

Izvedenih je bilo je 19 testov (preglednica 3). Pri testih smo preverili, kakšen vpliv ima:

- različen odmik vijaka od prostega roba pločevine vijaka (20, 30, 40 in 50 mm),
- različno privitje vijaka (privit do konca, 1–2 mm zračnosti med pločevino in podložko vijaka),
- različna kvaliteta jekla pločevin (S250GD, S280GD in S320GD),
- posebno oblikovanje pločevine (detajla 2 in 3).

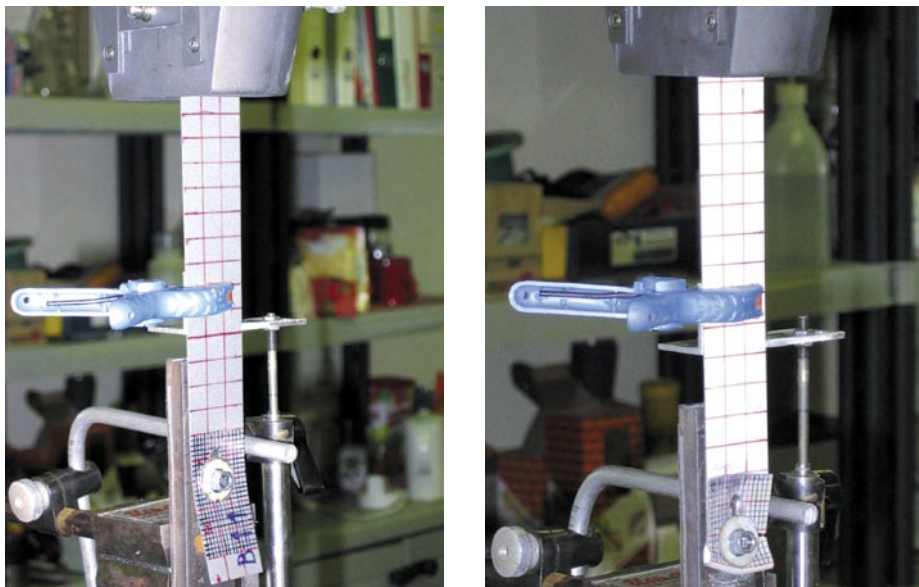
Na sliki 3 je razvidno, da je pri enojni pločevini nosilnost približno enaka pri različnih odmikih od prostega roba. Opazimo, da dvojna pločevina brez lepjenja (B-6, detajl 2) prinese le okrog 20 % večjo nosilnost, medtem ko ima prednapet vijak velik vpliv na nosilnost (B-1-3).

Slika 4 predstavlja vpliv dvojne pločevine, ki je spojena z lepilom (detajl 3). Razvidno je, da se nosilnost več kot podvoji. Predstavljen je tudi vpliv prednapetja vijaka (B-11-1), ki je zelo ugoden, saj ne pride do trganja pločevine v začetni fazi obremenjevanja in s tem do padanja togosti stika.



Slika 4 • Primerjava rezultatov testov na bočni pritisk (B-1: vijak s podložko; B-6: vijak s podložko, prepognjena pločevina; B-7, B-9 in B-11: vijak s podložko, prepognjena in zlepljena pločevina)





Slika 5 • Plasifikacija preizkušanca B-1-1 (levo) in B-9-1 (desno)

Na sliki 5 sta predstavljeni plastifikaciji preizkušancev B-1-1 in B-9-1. Pri vseh primerih je prišlo do plastifikacije pločevine na mestu vijaka. Značilno je tudi, da je porušitev spoja duktilna in ne pride do padanja nosilnosti, temveč je nosilnost v plastičnem območju deformiranja približno konstantna do porušitve. Do porušitve je pri preizkušancih – zaradi razmeroma ozke pločevine (30 mm) – prišlo po neto presekih. Tako lahko zaključimo, da so realni spoji panela z jekleno konstrukcijo kvečjemu duktilnejši kot spoji, ki so bili testirani. Pri testih z enojno pločevino na mestu spoja je prišlo do porušitve pri pomikih med 18 in 21 mm, pri testih z dvojno pločevino pa pri pomikih med 12 in 15 mm.

### 3 • TESTI FASADNIH PANELOV

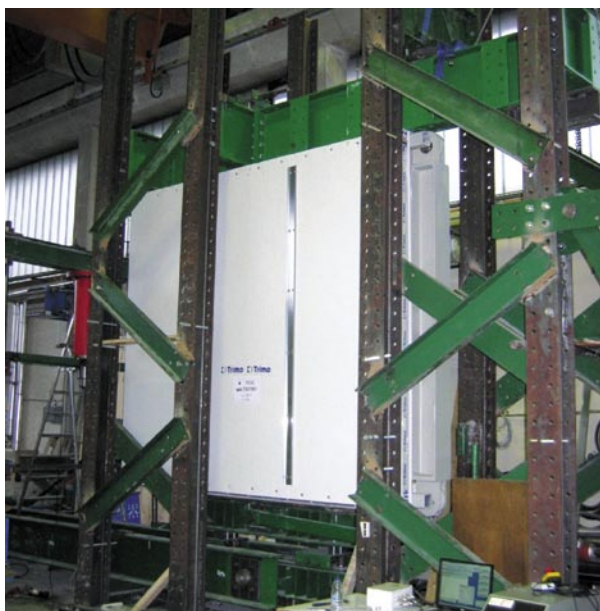
#### 3.1 Opis testov

##### 3.1.1 Uvod

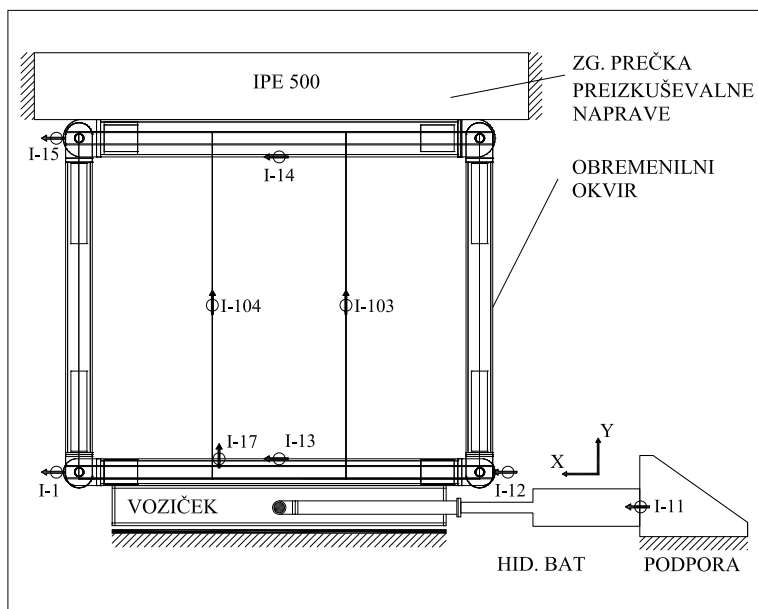
V članku so predstavljeni testi fasadnih panelov, ki so bili izvedeni med 5. in 11. julijem 2007 v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani (FGG, UL). Eksperi-

mentalno je bilo raziskano strižno obnašanje preizkušancev, velikih 3,0 x 2,6 m. Vsak preizkušanec je bil sestavljen iz treh standardnih panelov FTV 120 (Trimco, d. d., Trebnje), širine 1,0 m dolžine 2,6 m. Skupno je bilo opravljenih devet testov, pri katerih smo preizkusili pet različnih načinov pritrdjevanja.

Paneli so bili postavljeni v preizkuševalno napravo navpično in pritrjeni na jekleno podkonstrukcijo in obremenilni okvir. Na obremenilni okvir medosne širine 3,0 m in višine 2,5 m je bila pritrjena jeklena podkonstrukcija, narejena iz spodnje in iz zgornje lege. Na sliki 6 je prikazan preizkušanec III-1, ki je primer pritrdjevanja s šivanim spojem in s štirimi vijaki med posameznim panelom in jekleno podkonstrukcijo, pripravljen na test.



Slika 6 • Preizkušanec s šivanim spojem in s štirimi vijaki med posameznim panelom in lego



Slika 7 • Postavitev merilcev pomikov

### 3.1.2 Opis preizkuševalne naprave in meritev

Preizkuševalno napravo (sliki 6 in 7) predstavlja prostorski okvir, na katerega smo pritrtili preizkušanece preko obremenilnega okvira. Zgornja prečka obremenilnega okvira (HEA 280) je privijačena v nepomično prečko (IPE500) preizkuševalne naprave, spodnja prečka (HEA 200) pa je privijačena na voziček preizkuševalne naprave. Tako celoten obremenilni okvir visi na zgornji prečki preizkuševalne naprave. Voziček je dvignjen od tal in ima tako sproščen pomik. Voziček je preko posebne jeklene ročice priključen na hidravlični bat. Hidravlični bat proizvajalca INSTRON je model A1706Y – 1001 z zmogljivostjo 266 kN statične obtežbe,  $\pm 250$  kN dinamične obtežbe in z največjim pomikom  $\pm 200$  mm.

Pomiki so bili merjeni z induktivnimi merilci (induktivci), ki so bili postavljeni na devetih različnih mestih. Njihova razporeditev je prikazana na sliki 7. Rezultate smo zajemali in obdelali s pomočjo sistema DEWETRON. Rezultati so bili odčitani 100-krat na sekundo.

Vnos obtežbe v preizkušanece predstavljajo vsiljeni pomiki bata. Da bi upoštevali podajnost obremenilne naprave in s tem določene izgube pomikov zaradi prenosa obtežbe iz bata v preizkušanece, smo pomike vodili preko dveh induktivcev. Zato so bili vodeni pomiki definirani kot razlika pomikov na spodnjem, prostem in na zgornjem, nepomičnem delu obremenilnega okvira. Induktivni merilec I-1 je tako meril pomik spodnje prečke obremenilnega okvira, medtem ko je I-15 meril pomik zgornje prečke obremenilnega okvira in s tem posredno pomik preizkuševalne naprave (slika 8b).

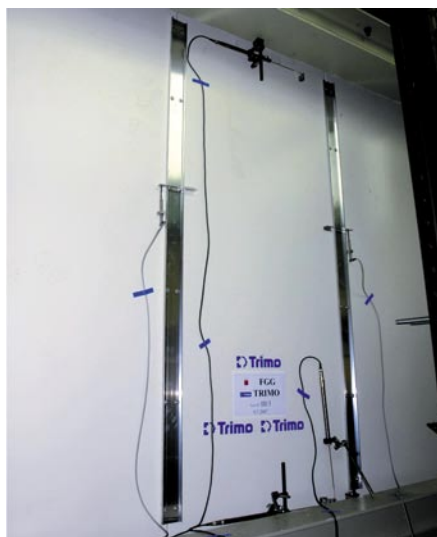
### 3.1.3 Opis preizkušancev

#### 3.1.3.1 Obremenilni okvir

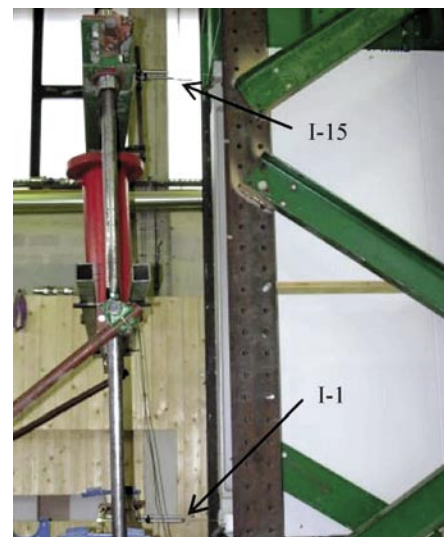
Obremenilni okvir (slika 9) je pri eksperimentalnih opraviljal funkcijo prenosa zunanje obtežbe v preizkušanece. Fasadni paneli so bili nanj pritrjeni preko spodnje in zgornje lege (škatlast profil RQ 100 x 100 x 8). Lega je bila pritrjena na okvir preko dveh jeklenih pločevin debeline 20 mm. Vozlišča testnega okvira so členkasta in zato okvir nima nobene nosilnosti v svoji ravnini. Čepi členkastega spoja (slika 10) so premera 68 mm in iz jekla kvalitete S355. Dimenzije in profili obremenilnega okvira so prikazane na sliki 9. Okvir je izdelan iz jekla S235.

#### 3.1.3.2 Trimo paneli FTV 120

Fasadni paneli so debeline 12 cm in so sestavljeni iz dveh tankih jeklenih pločevin (0,6 mm)

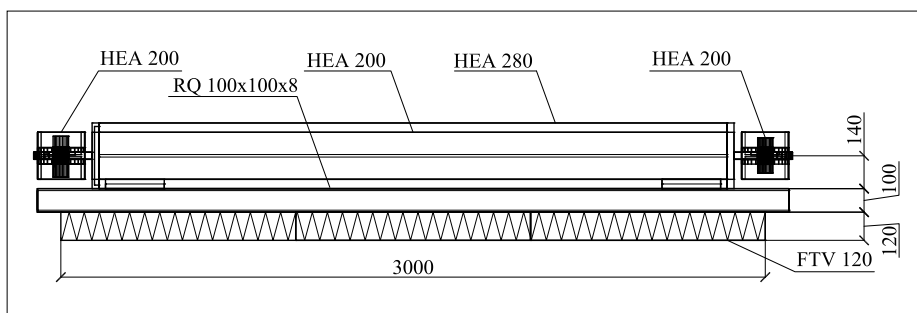


a)

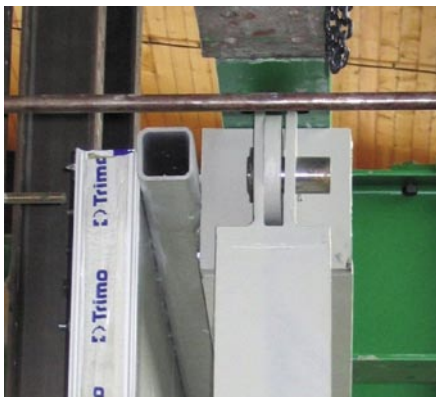


b)

Slika 8 • Meritev zdrsov med posameznimi paneli a) in pomikov na zgornji in spodnji strani obremenilnega okvira b)



Slika 9 • Skica obremenilnega okvira in preizkušancev



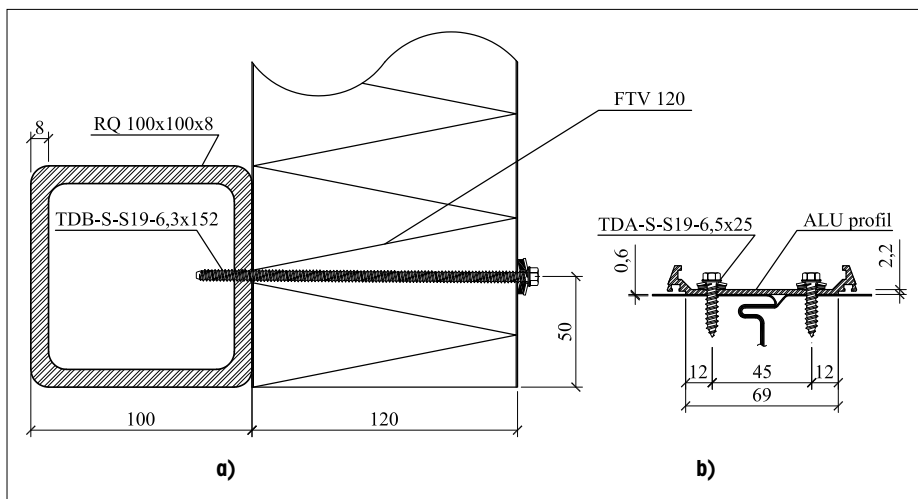
Slika 10 • Detajl členkastega vozlišča ter pritrditve lege in panela

in polnila. Materialne karakteristike robne pločevine panelov so predstavljene v Poglavju 2.1.1. Polnilo panelov FTV 120 predstavljajo lamele kamene volne gostote  $100 \text{ kg/m}^3$  in debeline 4 do 5 cm, ki so zlepljene med seboj. Fasadni paneli so privijačeni na lego

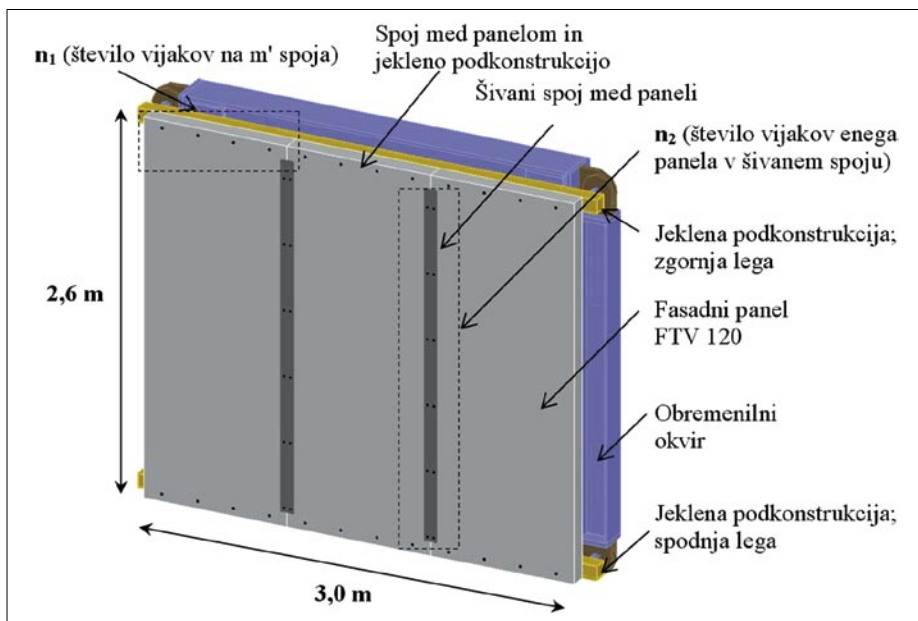
z vijaki tipa TDB-S-S19-6,3x152 nemškega proizvajalca SFS intec. Uporabljeni vijaki so izdelani iz nerjavnega jekla 1.4301 (oznaka EN: X5CrNi1810). Detajl spoja med vijakom in lego je prikazan na sliki 11a. Določeni fasadni paneli so bili med seboj spojeni s šivanim spojem. Detajl šivanega spoja je prikazan na sliki 11b. Za šivani spoj so bili uporabljeni vijaki tipa TDA-S-S19-6,5x25 in ALU-profil dolžine 2300 mm.

### 3.1.4 Program testiranja

Izvedeno je bilo devet testov, ki smo jih razvrstili v pet serij (preglednica 4), ki so se med seboj razlikovale po različnem številu vijakov med paneli in jekleno lego podkonstrukcije ( $n_1$ ) in vrsti šivanega spoja ( $n_2$ , slika 12). Za vsako serijo posebej so bili najprej izvedeni testi z monotono naraščajočo obtežbo, sledili so ciklični testi. Na podlagi testov z monotono naraščajočo obtežbo smo določili obremenilni protokol za ciklične teste. Prva dva



Slika 11 • Spoj fasadnega panela na lego (a) in šivani spoj med paneli (b)



Slika 12 • Preizkušavec, privijačen na jekleno podkonstrukcijo in na obremenilni okvir

Oznaka testa	$n_1$	Šivani spoj		Vrsta obremenitve
		vrsta	$n_2$	
I/1	2	brez	/	monotona
II/1	4	brez	/	monotona
III/1	4	dvostranski	6	monotona
III/2	4	dvostranski	6	ciklična
III/3	4	dvostranski	6	ciklična
IV/1	8	dvostranski	11	monotona
IV/2	8	dvostranski	11	ciklična
V/1	4	enostranski	6	monotona
V/2	4	enostranski	6	ciklična

Preglednica 4 • Program testiranja

preizkušanca sta brez šivanega spoja. Ostali preizkušanci so s šivanim spojem. Eni s šestimi in drugi z enajstimi vijaki v enostransko ali v dvostransko šivanem spoju.

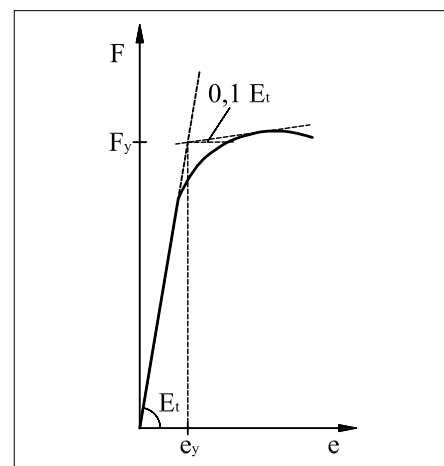
### 3.1.4.1 Testi z monotono naraščajočo obtežbo

Pri monotonom testu smo z enakomerno hitrostjo  $v_{ob} = 0,2$  mm/s povečevali razliko horizontalnega pomika na spodnjem in zgornjem robu obremenilnega okvira (I-1 "–" I-15) do maksimalne vrednosti, ki je znašala 180 mm (slika 7). Za to vrednost smo se odločili na podlagi literature o podobnih testih (De Mateis, 1999, 2000a in 2000b). Omejeni smo bili tudi z maksimalnim hodom hidravličnega bata, ki znaša 200 mm. Posamezen test je trajal približno 15 do 20 minut.

### 3.1.4.2 Testi s ciklično obtežbo

Iz rezultatov monotoni testov smo, upoštevajoč priporočila ECCS (ECCS, 1986), določili elastično nosilnost  $F_y$  in pomik na meji plastičnosti  $e_y$  (slika 13). Pri določitvi smo za elastični modul v plastičnem območju ( $E_p$ ) upoštevali 10 % tangenta elastičnega modula ( $E_t$ ).

Tudi pri določitvi obremenilnega protokola smo upoštevali priporočila ECCS. Vsiljeni pomiki so bili trikotne (linearen potek) oblike. Tako smo opravili po en cikel pri amplitudi  $0,5 e_y$ ,  $0,75 e_y$  in  $1 e_y$  (skupaj 3 cikle v elastičnem območju). Nato smo v plastičnem območju opravili po dva cikla pri enaki amplitudi, ki smo jo povečevali po  $1 e_y$  (od 2 do  $8 e_y$ ). Hitrost obremenjevanja je bila 1 mm/s za cikle z amplitudo do  $4 e_y$  oziroma 2 mm/s za cikle z večjo amplitudo. Posamezen test je trajal od 50 do 60 minut. V preglednici 5 je prikazan obremenilni protokol za teste s ciklično obtežbo.


 Slika 13 • Določitev  $F_y$  in  $e_y$  iz rezultata monotonega testa



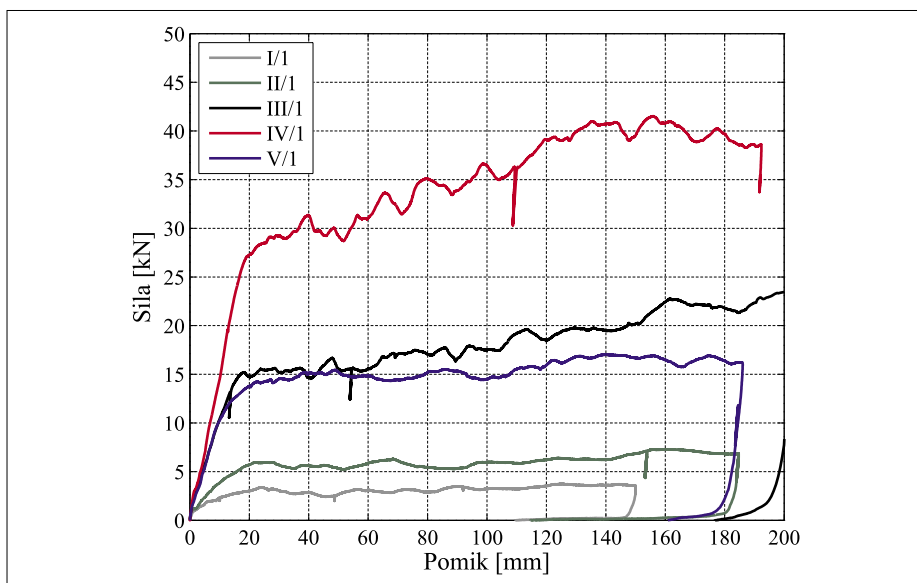
Številka cikla	Amplituda (mm)	Hitrost (mm/s)
1	$\pm 0,5 e_y$	1
2	$\pm 0,75 e_y$	1
3	$\pm e_y$	1
4 in 5	$\pm 2 e_y$	1
6 in 7	$\pm 3 e_y$	1
8 in 9	$\pm 4 e_y$	1
10 in 11	$\pm 5 e_y$	2
12 in 13	$\pm 6 e_y$	2
14 in 15	$\pm 7 e_y$	2
16 in 17	$\pm 8 e_y$	2

Preglednica 5 • Obremenilni protokol

Test	$e_y$ (mm)	$F_y$ (kN)	$F_{max}$ (kN)
I/1	21,3	3,1	3,75
II/1	17,2	5,7	7,29
III/1	13,2	15,4	23,72*
III/2	14,6	15,3	+19,59, -22,07
III/3	13,8	16,2	+19,39, -16,94
IV/1	12,5	28,5	41,51
IV/2	14,1	30,4	+37,84, -35,06
V/1	12,3	14,2	17,03
V/2	12,2	13,4	+15,16, -14,71

\* dosežen največji možni pomik preizkuševalne opreme

Preglednica 6 • Rezultati testov



Slika 14 • Krivulje sila – pomik okvira za vse monotone teste (I/1, II/1, III/1, IV/1 in V/1)



Slika 15 • Zdrs med paneli

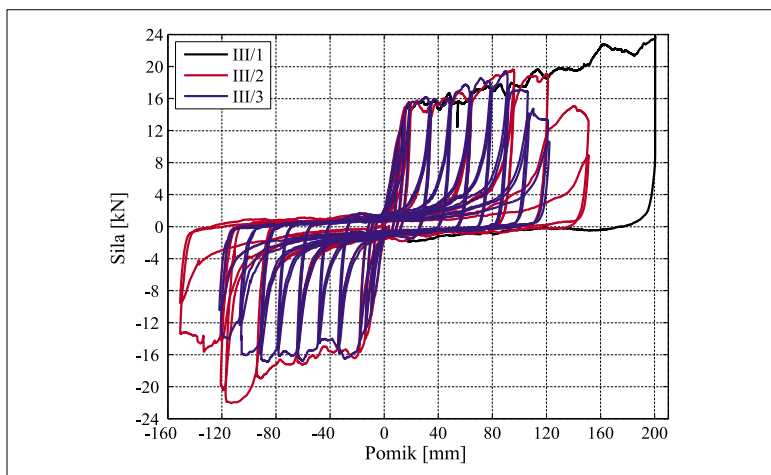
### 3.2 Rezultati testov

Glavni rezultat testov je krivulja *sila – pomik* obremenilnega okvira. Slika 14 prikazuje primerjavo krivulj *sila – pomik* med vsemi petimi izvedeni testi z monotono naraščajočo obtežbo. Vidimo, da ima preizkušane z osnovno konfiguracijo pritrditve (I/1; 2 vijaka/m<sup>2</sup>) izredno majhno nosilnost (3,5 kN). Pri podvojitvi števila vijakov (II/2) se nosilnost prav tako poveča približno za 2-krat. Pri rezultatih testov III/1 in V/1, kjer ima prvi obojestransko, drugi pa enostransko šivan stik, vidimo pomembnost tega spoja (slika 15). Prav tako opazimo, da strižna nosilnost preizkušanca z enostransko šivanim spojem ni bistveno manjša od preizkušanca z dvostransko šivanim spojem. Pri testu IV/1 smo imeli panele, pritrjene z 8 vijaki na meter, in dvo-

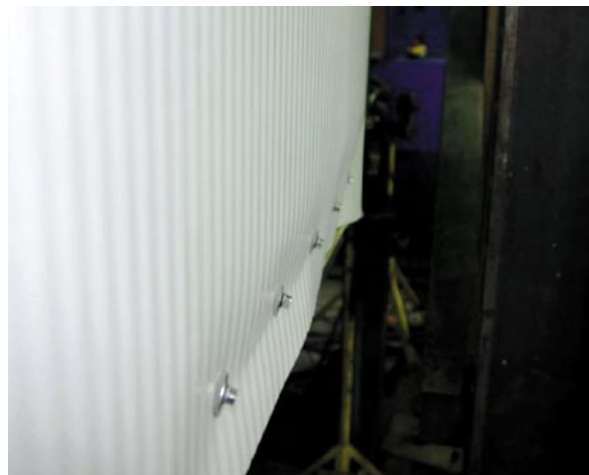
stransko šivan stik. Strižna nosilnost je v tem primeru približno dvakrat večja v primerjavi s testoma III/1 in V/1. V preglednici 6 so predstavljeni: pomik in sila na meji elastičnosti ter maksimalna sila. Iz diagramov *sila – pomik* je razvidno, da sistemu ne pada nosilnost, temveč počasi celo raste. Seveda pa ta dodatna nosilnost pri velikih deformacijah pri realnih konstrukcijah ne pride v poštev. Slika 16 prikazuje rezultate vseh treh testov tretje serije. Opazimo, da nosilnost dveh cikličnih testov (III/2 in III/3) ni nič manjša od nosilnosti testa z monotono naraščajočo obtežbo (III/1). Pri cikličnih testih je prišlo do pretrga robnih vijakov pri približno 100 mm (približno 10. do 12. cikel), kar je razvidno iz diagrama, saj začne nosilnost po tem pomiku padati. Kljub pretrgu nekaterih robnih

vijakov ni prišlo do padca fasadnih panelov iz obremenilnega okvira v nobenem primeru. Omeniti je treba, da smo pri testih, kjer smo imeli obojestransko šivan spoj (III. in IV. serija), preprečili zdrs med paneli. Tako se je med tremi fasadnimi paneli formiral učinek togega telesa. Pri spojih panelov z jeklenim okvirom je prišlo do lokalnega izbočenja (slika 17). Sliki 18 in 19 prikazujeta rezultate za četrto in peto serijo testov. Tudi tu je nosilnost sistema pri monotonom in cikličnem obremenjevanju približno enaka. Prav tako se tudi tu pojavi pretrg prvega vijaka pri cikličnem testu pri približno 100 mm horizontalnega pomika strižnega panela. Omeniti moramo najmočnejšo različico pritrditve (četrta serija), pri kateri je dosežena največja strižna nosilnost 41,5 kN.

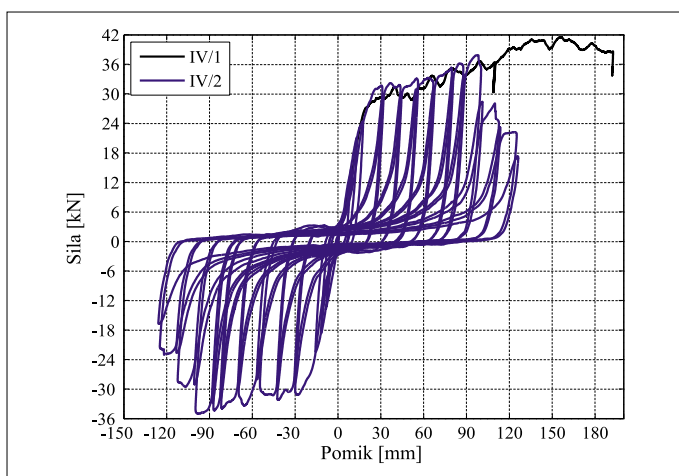




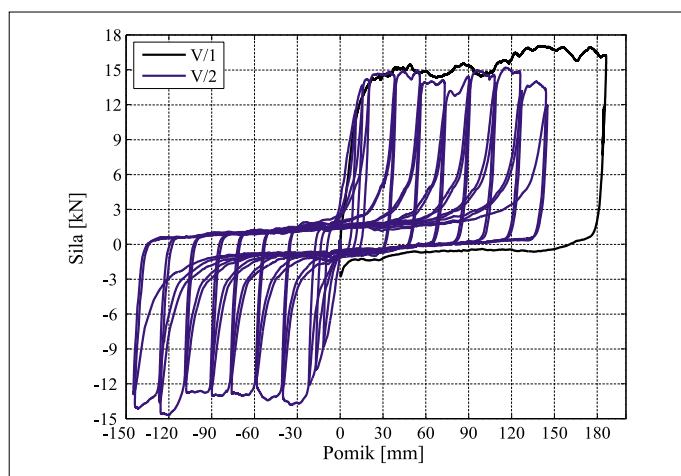
Slika 16 • Krivulje sila – pomik okvira za tretjo serijo testov (III/1, III/2 in III/3)



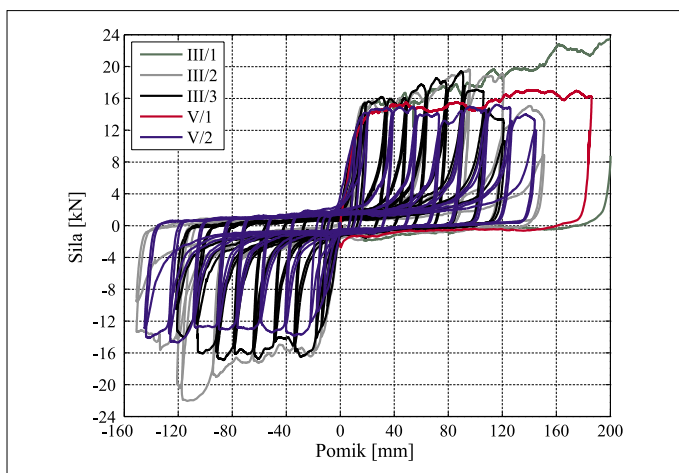
Slika 17 • Izbočenje pločevine na zunanji strani panela pri testih III. in IV. serije (obojestransko šivan spoj)



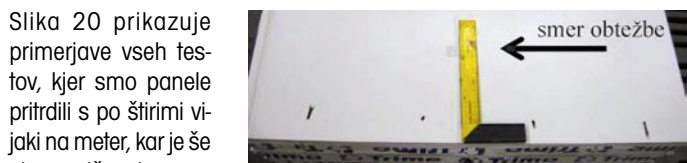
Slika 18 • Krivulje sila – pomik okvira za četrto serijo testov (IV/1 in IV/2)



Slika 19 • Krivulje sila – pomik okvira za peto serijo testov (V/1 in V/2)



Slika 20 • Krivulje sila – pomik okvira za tretjo in peto serijo testov  
Primerjava eno- in dvostranskega šivanega spoja



Slika 21 • Deformiranje spodnjega roba pločevine sistema panelov pri testu II-1

Slika 20 prikazuje primerjave vseh testov, kjer smo panele pritrdili s po štirimi vijaki na meter, kar je še ekonomično in sprejemljivo za prakso. Enostransko šivani spoj (serija V) ima za približno 10 % manjšo strižno nosilnost od dvostranskega šivanega spoja. Razlika je tudi v tem, da ima nekoliko manjšo utrditev, kar je posledica deformiranja enostransko šivanega spoja in minimalnega zdrsa med paneli. Pri dvostransko šivanem spoju (serija III) ni pri nobenem testu prišlo do deformiranja šivanega spoja in s tem zdrsa med paneli. Sliki 21 in 22 prikazujeta deformiranje spodnjega roba pločevine sistema panelov brez šivanega spoja oziroma s šivanim spojem. Posamezni paneli se v prvem primeru obnašajo samostojno, kar ima za posledico, da so deformacije vseh treh panelov enake. Na drugi strani se v primeru šivanega spoja sistem treh panelov obnaša kot togo telo, kar potrjuje slika deformacij spodnjega roba pločevin panelov. Cel sistem se premakne v levo in se zavrti v smeri urinega kazalca.



Slika 22 • Deformiranje spodnjega roba pločevine treh panelov pri testu III-1

## 4 • SKLEP

V mesecu juliju 2007 smo v laboratoriju FGG izvedli devet testov za določitev strižne nosilnosti fasadnih panelov pri različnem načinu pritrjevanja na konstrukcijo. Cilj teh preliminarnih testov je bil preveriti njihove strižne lastnosti pri načinu pritrjevanja, ki jih podjetje Trimo uporablja tudi v praksi. Preverili smo tudi izboljšane načine pritrjevanja, ki bi strižnemu panelu omogočili zadostno strižno odpornost za prevzem horizontalne obtežbe.

Prva ugotovitev testov je prav gotovo, da je bilo uspešno opravljenih vseh 9 testov in da bodo rezultati omogočili boljše poznavanje problema ter razvoj optimalnega načina pritrjevanja. Testi jasno kažejo, da je strižna nosilnost celotnega sistema odvisna od izvedbe pritrjevanja panelov. V vseh primerih je prišlo do enakega porušnega mehanizma; lokalne porušitve spoja jeklena konstrukcija – notranja pločevina panela. Za omenjen spoj je zaradi majhne debeline jeklene pločevine (0,55 mm) vedno merodajna nosilnost na bočni pritisk omenjene pločevine. Pomembnejše ugotovitve testov omenjenega spoja so:

- bočna nosilnost enojne pločevine je med 2,2 in 3,0 kN,
- bočno nosilnost je možno s prednapetjem vijaka povečati do 50 %, poveča se tudi začetna togost stika,
- bočna nosilnost dvojne pločevine (detajl 3) je nekaj več kot dvakrat večja od enojne pločevine.

Prav tako so preiskave fasadnih panelov pokazale na pomembnost povezave med posameznimi fasadnimi paneli s šivanim spojem, ki uspešno prepreči medsebojni zdrs in tako zagotavlja, da se celoten sistem obnaša kot togo telo. Preizkušanci s šivanim spojem imajo 2,5- do 3-krat večjo strižno nosilnost in togost. S testi smo tudi dokazali, da ima tudi enostransko šivan spoj zadovoljive strižne lastnosti v primerjavi z dvostransko šivanim. To je izredno pomembno, saj je enostransko šivani spoj za prakso veliko sprejemljivejši.

Glavne ugotovitve testov fasadnih panelov lahko strnemo v pet točk:

1. Porušni mehanizem je pri vseh načinih pritrjevanja enak, to je pretrgana pločevina na mestu vijakov. Do porušitve pride zaradi prekoračenih bočnih pritiskov v pločevini. Posledica omenjene porušitve je, da celoten sistem fasadnih panelov disipira razmeroma malo energije (»pinching« učinek).
2. Pri cikličnih testih je prišlo tudi do pretrganja (robnih) vijakov. To se je zgodilo med desetimi in dvanajstim ciklom, to je pri pomiku okrog 100 mm. Tako je pri nizkocikličnem utrujanju sistema fasadnih panelov nosilnost začela padati pri rotaciji okoli 0,04, kar pomeni, da je sistem zelo duktilen. Pri monotoni testih so vsi preizkušeni sistemi fasadnih panelov prestali tudi dvakrat večje

pomike (do 200 mm) brez porušitve vijakov, nosilnost pa je vseskozi naraščala. Tako lahko zaključimo, da že trenutni način pritrjevanja panelov preprečuje padec panelov iz konstrukcije tudi pri velikih horizontalnih pomikih.

3. V praksi najpogostejši način pritrjevanja (dva vijaka na posamezni panel) ne zagotavlja zadostne strižne nosilnosti za namen sodelovanja fasadnih panelov z nosilno konstrukcijo pri dinamičnih obremenitvah.
4. Z uporabo enostranskega ali dvostranskega šivanega spoja in s štirimi vijaki na panel na obeh konceh je strižna nosilnost panelov takšna, da omogoča prevzem horizontalnih obremenitev pri dinamičnih obremenitvah. Za prevzem vetra v elastičnem območju pa bi morali sistemu fasadnih panelov nekoliko povečati začetno togost.
5. Z drugačnim načinom pritrjevanja panelov na konstrukcijo, kjer bi namesto vijaka uporabili druga vezna sredstva ali bi samo lokalno odebelili pločevino (npr. detajl 3) na mestu stika, bi lahko strižno nosilnost in togost panelov še ustrezno povečali.

Z opravljenimi preiskavami in analizo eksperimentalnih rezultatov smo jasno dokazali, da možnost upoštevanja vpliva sodelovanja fasadnih in strešnih panelov z jekleno konstrukcijo obstaja. Predstavljeni rezultati predstavljajo dober temelj za numerično modeliranje problema strižne nosilnosti fasadnih in strešnih panelov. Prav tako pa nudijo nekatere ideje o izboljšavi detajlov pritrjevanja.

## 5 • ZAHVALA

Predstavljeno delo je sofinanciralo podjetje Trimo, d. d., Trebnje, ki je izdelalo obremenilni

okvir in zagotovilo ves potreben material za teste. Prvi avtor je mladi raziskovalec iz go-

spodarstva in je financiran s strani Ministrstva za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo RS.

## 6 • LITERATURA

- ECCS, European Recommendations for the Application on Metal Sheeting acting as a Diaphragm, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels, 1995.
- ECCS, Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels, 1986.
- De Mateis, G., Landolfo, R., Mechanical fasteners for cladding sandwich panels: Interpretative models for shear behaviour, Thin-Walled Structures, Vol. 35, 61–79, 1999.
- De Mateis, G., Landolfo, R., Diaphragm action of sandwich panels in pin-jointed steel structures: A seismic study, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3, 251–275, 2000a.
- De Mateis, G., Landolfo, R., Modeling of lightweight sandwich shear diaphragms for dynamic analyses, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 53, 33–61, 2000b.
- SIST EN 10002-1:2002. Kovinski materiali – Natezni preskus – 1. del: Metoda preskušanja pri temperaturi okolice.
- SIST EN 10326:2004. Kontinuirano vroče prevlečeni trakovi in pločevine konstrukcijskih jekel – Tehnični dobavni pogoji.
- www.sfsintec.biz/de
- www.trimo.si

# NOVI DIPLOMANTI

## UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Vedran Bekrić**, Primerjalna analiza eksperimentalnih metod za določanje vlažnosti estrihov različnih sestav, mentor doc. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Mitja Centa**, Modeliranje transporta hranil v Tržaškem zalivu s programom PCFLOW3D, mentor doc. dr. Dušan Žagar, somentorja izr. prof. dr. Boris Kompare in dr. Peterlin Monika

### DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Primož Može**, Duktilnost in nosilnost vijajčnih spojev v konstrukcijah, narejenih iz jekel visoke trdnosti, mentor prof. dr. Darko Beg

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVO IN KOMUNALNO INŽENIRSTVO

**Petra Buček**, Analiza vodnega in pribrežnega zemljišča Malega grabna, mentor prof. dr. Mitja Brilly, somentor prof. dr. Matjaž Mikoš

**Domen Lajevc**, Analiza vplivov onesnaženih voda s soljo iz cestišč na vodno okolje in čiščenje na komunalnih čistilnih napravah, mentor izr. prof. dr. Jože Panjan, somentor dr. Darko Drev

**Janez Zakrajšek**, Predlog druge določitve vodnih teles površinskih voda v Sloveniji, mentor prof. dr. Mitja Brilly, somentor asist. dr. Aleš Bizjak

**Gašper Malovrh**, Idejne rešitve odvodnje in čiščenja odpadnih voda za naselje Muljava z okolico, mentor izr. prof. dr. Jože Panjan, somentor asist. dr. Mario Krzyk

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Peter Čizmazija**, Novi razgledni stolp višine 30 m v Dobrovniku, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor doc. dr. Simon Šilih  
**Dušanka Danko**, Geotehnično opazovanje globokega vkopa Dragučova, mentor izr. prof. dr. Stanislav Škrabl, somentor Ksenija Štern, univ. dipl. inž. grad.

**Anton Iršič**, Gradbena pogodba med glavnim izvajalcem in podizvajalcem, mentor pred. Metka Zajc Pogorelnik, univ. dipl. inž. grad., somentor Tadeja Fendre, univ. dipl. prav.

**Matej Jagodič**, Tehnologija izdelave in vgradne litega asfalta, mentor pred. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

**Robert Krajnc**, Tehnološki elaborat za gradnjo ekonomske šole v Murski Soboti, mentor doc. dr. Andrej Štrukelj, somentor Nataša Šuman, univ. dipl. gosp. inž.

**Tomaž Matko**, Samostojna parkirna ploščad pred osnovno šolo v Poreču, mentor izr. prof. dr. Tomaž Tollazzi, somentor mag. Marko Renčelj

**Peter Mlaker**, Merjenje toka v rekah z ADMP, mentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc, somentor dr. Janja Kramer

**Igor Rihtar**, Primerjava tehnologij montažne in opečne gradnje stanovanjskih hiš, mentor doc. dr. Andrej Štrukelj

**Jovanka Trivič**, Tehnologija vgrajevanja asfalta s predstavitvijo uporabljene mehanizacije in njenim izkoristkom na AC odseku Maribor – Lenart I. etapa, mentor doc. dr. Andrej Štrukelj

**Robert Viher**, Umestitev in dostop do bencinskih servisov, mentor izr. prof. dr. Tomaž Tollazzi

**Tomislav Žlavs**, Tehnologija gradnje dvigalnega jaška na objektu poslovni center EMO ETT, mentor pred. Samo Lubej, univ. dipl. inž. grad.

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Andrej Bojnec**, Vpliv variacije mase konstrukcije na potresno analizo, mentor izr. prof. dr. Matjaž Skrinar

**Alan Mautinger**, Zadrževanje zmesne vode v maltah iz recikliranega agregata, mentor doc. dr. Lucija Hanzlič, somentorja viš. pred. mag. Bernardka Jurič in prof. dr. Luiz Antonio Pereira de Oliveira

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

**Vsem diplomantom čestitamo!**

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

**ZDGITS in Uredništvo Gradbenega vestnika**

# KOLEDAR PRIREDITEV

**30.6.-4.7.2008**

**10th International Symposium on Landslides and Engineered Slopes**

Xi'an, Kitajska  
[www.landslide.iwhr.com](http://www.landslide.iwhr.com)

**8.-10.7.2008**

**7th International Congress Concrete: Construction's Sustainable Option**

Dundee, Škotska  
[www.ctucongress.co.uk](http://www.ctucongress.co.uk)

**15.-18.7.2008**

**9th International Conference on Mathematics of Program Construction (MPC'08)**

CIRM, Marseille (Luminy), Francija  
[mpc08.lri.fr](http://mpc08.lri.fr)

**17.-21.8.2008**

**9th International Conference on Concrete Pavements**

San Francisco, California, ZDA  
[www.concretepavements.org/9thiccp](http://www.concretepavements.org/9thiccp)

**27.-30.7.2008**

**6th National Seismic Conference on Bridges and Highways (6NSC)**

Charleston, Južna Karolina, ZDA [www.scdot.org/events/6NSC/default.shtml](http://www.scdot.org/events/6NSC/default.shtml)

**3.-5.9.2008**

**EUROSTEEL 2008**

Gradec, Avstrija  
[www.eurosteel2008@tugraz.at](http://www.eurosteel2008@tugraz.at)

**4.9.2008**

**RECLAIM WATER**

**Mednarodna zaključna konferenca EU projekta**

Maribor, Slovenija  
[iei@iei.si](mailto:iei@iei.si)

**5.9.2008**

**TECHNEAU Konferenca**

**Mednarodna konferenca – oskrba s pitno vodo**

Maribor, Slovenija  
[iei@iei.si](mailto:iei@iei.si)

**9.9.2008**

**15. jubilejni slovenski kolokvij o betonih:**

**Izkušnje pri gradnji in sanaciji zahtevnih betonskih objektov**

Ljubljana, Cankarjev dom, dvorana E3-4, Slovenija  
[www.irna.si](http://www.irna.si)

**9.-11.9.2008**

**1th International Conference on Transportation Construction Management**

Orlando, Florida, ZDA  
[www.2008tcmconference.volpe.dot.gov](http://www.2008tcmconference.volpe.dot.gov)

**17.-19.9.2008**

**7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete (BEFIB 2008)**

Chennai (Madras), Indija  
[www.befib2008.iitm.ac.in](http://www.befib2008.iitm.ac.in)

**9.-10.10.2008**

**Deutscher Stahlbautag 2008**

Mainz, Congress Centrum, Nemčija  
[vowe@deutscherstahlbau.de](mailto:vowe@deutscherstahlbau.de)

**9.-10.10.2008**

**SDGK 2008**

**30. zborovanje gradbenih konstrukterjev**

Bled, Slovenija  
[www.sdgk.si](http://www.sdgk.si)

**20.-22.10.2008**

**SURF 2008**

**6th symposium on pavement surfaces characteristics**

Portorož, Slovenija  
[www.surf2008.si](http://www.surf2008.si)

**22.-24.10.2008**

**9. slovenski kongres o cestah in prometu**

Portorož, Slovenija  
[www.drc.si](http://www.drc.si)  
[drc@drc.si](mailto:drc@drc.si)

**24.-26.11.2008**

**2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICRRR 2008)**

Cape Town, Južna Afrika  
[www.civil.uct.ac.za/icrrr](http://www.civil.uct.ac.za/icrrr)

**20.-22.5.2009**

**5th International Conference on Construction in the 21st Century**

CITC-V, Carigrad, Turčija  
[www.fiu.edu/~citic](http://www.fiu.edu/~citic)

**5.-9.10.2009**

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

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

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