





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**  
 izr. 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 Tomažević**

Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

Sodelavec pri MSG IZS:

**Jan Kristijan Juteršek**

Lektorica:

**Alenka Raič Blažič**

Lektorica angleških povzetkov:

**Darja Okorn**

Tajnica:

**Anka Holobar**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

Naklada:

**3000 izvodov**

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

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

Letno izide 12 števk. 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 vštete DDV.

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

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

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774  
 Ljubljana, maj 2007, letnik 56, str. 113-140

## 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.
- Poglavlja 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. 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

## Jubilej

stran **113**

**Franc Čačovič osemdesetletnik**

## Članki • Papers

stran **114**

mag. Leon Gosar, univ. dipl. inž. grad.,  
Gašper Rak, univ. dipl. inž. VKI,  
prof. dr. Franci Steinman, univ. dipl. inž. grad.,  
doc. dr. Primož Banovec, univ. dipl. inž. grad.

### **S TEHNOLOGIJO LIDAR ZAJETA TOPOGRAFIJA V HIDRAVLICNIH ANALIZAH VODOTOKOV**

USING LIDAR DATA IN OPEN CHANNEL HYDRAULIC ANALYSIS

stran **124**

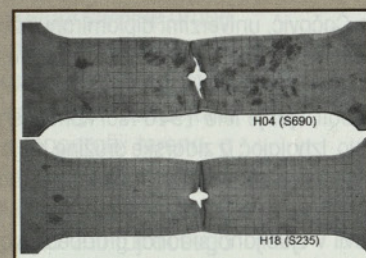
Primož Može, univ. dipl. inž. grad.,  
doc. dr. Jože Lopatič, univ. dipl. inž. grad.,  
prof. dr. Darko Beg, univ. dipl. inž. grad.

### **PROJEKTNA NOSILNOST OSLABLJENIH PREREZOV ELEMENTOV IZ JEKEL VISOKE TRDNOSTI**

DESIGN NET CROSS-SECTION RESISTANCE OF ELEMENTS MADE  
OF HIGH STRENGTH STEEL

stran **135**

Đorđe Obradović, univ. dipl. inž. grad.  
**REKONSTRUKCIJA OSNOVNE ŠOLE IVAN CANKAR V LJUTOMERU**  
RECONSTRUCTION OF IVAN CANKAR ELEMENTARY SCHOOL  
IN LJUTOMER



## Novi diplomanti gradbenišтва

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

## Vabilo

8. dan jeklenih konstrukcij

## Koledar prireditev

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

Slika na naslovnici: Preskus jeklenega spoja z enim vijakom v laboratoriju FGG, foto Primož Može

## FRANC ČAČOVIČ OSEMDESETLETNIK



Franc Čačovič, univerzitetni diplomirani inženir gradbeništva, te dni praznuje osemdeseti rojstni dan. Rojen je bil 28. maja 1927 v Murški Soboti, kjer je leta 1946 tudi končal srednjo šolo. Izhajajoč iz zidarske družine, se je že od mladih nog zanimal za gradbeništvo. Da bi se naučil več, se je po končani srednji šoli odpravil v Ljubljano študirat gradbeništvo in se vpisal na tedanjo Tehniško fakulteto. Ker se je moral preživljati sam, je kot obetaven študent že kmalu na začetku študija postal provizorni asistent na oddelku za tehnično mehaniko, po treh letih študija pa se je za polovični čas zaposlil na takrat novo ustanovljenemu Gradbenemu inštitutu, kasnejšemu Zavodu za raziskavo materiala in konstrukcij, kjer se je še pred diplomo leta 1952 tudi redno zaposlil. Študij na konstrukcijskem oddelku Tehniške fakultete je uspešno zaključil in diplomiral leta 1953.

Leta 1963 je, kot eden redkih slovenskih gradbenikov tisti čas, za deset mesecev odšel na specializacijo v ZDA. Strokovni izzivi, ki jih je pred gradbeniško stroko postavil potres v Skopju leta 1963, so ga vodili, da si je nova znanja pridobil predvsem na področjih dinamike in modelnih preiskav konstrukcij. Po

vrnitvi iz ZDA leta 1964 je postal vodja oddelka za masivne konstrukcije in modele in skupaj s kolegi, še posebej s takratnim direktorjem ZRMK prof. Turnškom, raziskoval predvsem obnašanje zidanih konstrukcij pri potresni obtežbi in razvijal metode za njihovo protipotresno utrditev. Takratna skupina je na tem področju orala ledino v svetovnem merilu. Članek, objavljen leta 1971, v katerem sta prof. Turnšek in inž. Čačovič objavila, kako računati strižno odpornost zidov, je eno temeljnih del, ki ga na tem področju še vedno citirajo vsi raziskovalci.

V sedemdesetih letih je inž. Čačovič za štiri leta zapustil ZRMK in deloval v Razvojnem centru GIPOSS-a, pozneje pa se je za nekaj let kot glavni direktor spet vrnil na Zavod. Močno razvita, včasih že groba in sebična tozdravska samostojnost na eni ter mehak značaj in poštenost glavnega direktorja, povezovalnega elementa, na drugi strani, pa ni rodila omembe vrednih uspehov, zato je naš slavljeneč leta 1980 odšel na Splošno združenje gradbeništva in IGM, kjer je vse do upokojitve opravljal funkcije tajnika komisije za gradbeno operativno, tajnika komisije za razvoj, komisije za vodno gospodarstvo, obenem pa tudi funkcijo namestnika sekretarja združenja. Inž. Čačovič se je ves čas z veliko zagnanostjo posvečal tudi stanovski organizaciji, tako Zvezi inženirjev in tehnikov Slovenije kot tudi Zvezi društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, ki ji je nekaj let tudi predsedoval. Za dolgoletno predano in uspešno delo ga je ZDGIT imenovala za svojega častnega člana. Ne nazadnje pa se ga gradbeniki, vsaj bralci in tisti, ki pišemo prispevke za Gradbeni vestnik, spominjamo tudi kot dolgoletnega člana uredniškega odbora in v letih 1988 do 1999 glavnega in odgovornega urednika Gradbenega vestnika. Inž. Čačoviču gre zasluga, da je Gradbeni vestnik uspešno preстал čase hude krize, ki jo je ob razpadu Jugoslavije in začetku tranzicije preživljalo slovensko gradbeništvo.

Ko sem jeseni leta 1967 kot začetnik z diplomom v žepu prišel na ZRMK, sem pristal v oddelku, ki ga je vodil inž. Čačovič. Imel sem veliko srečo, da sem imel že na začetku kariere učitelja, ki je znal vzbuditi zanimanje za raziskovalno delo in pokazati, kako strokovne odločitve niso odvisne le od praktičnih izkušenj, pač pa tudi od znanja, pridobljenega v laboratoriju. In če sem po dobljeni diplomi še menil, da je učenja konec, mi je kmalu postalo jasno, da se resno učenje šele začne. Inž. Čačovič je znal organizirati večerna predavanja, na katerih smo se tako on sam kot tudi vsi ostali trudili pojasniti kak problem (nihče se ni mogel izmuzniti tej dolžnosti) in jih spremeniti v družabni dogodek. Čeprav nismo bili preveč uspešni, smo se že v tistih letih skoraj vsi v oddelku vpisali na podiplomski študij na gradbeni fakulteti in skupaj hodili poslušat predavanja. Inž. Čačovič je vedno našel čas za razpravo ali dober nasvet in ni povzdignil glasu, četudi ga je kdo polomil.

Let, ko je bil moj šef inž. Čačovič, pravzaprav ni bilo prav veliko. Bilo pa je veliko zgodb, takih in drugačnih, in predvsem lepih spominov. Nekaterih dogodkov, kot na primer dejstva, da sem pri prvih dveh člankih za Gradbeni vestnik iz danes nerazumljivih vzrokov zamočlal Čačovičevo ime, me je pa še danes sram. Preden sem tista članka poslal reviji, ju je inž. Čačovič sicer prebral in mi svetoval, kako naj ju izboljšam, vendar niti približno ni omenil, da se spodobi, da je vsaj kot soavtor napisan tudi duševni oče oziroma tisti, ki je raziskave vodil in zanje odgovarjal. Nekateri drugi so bolj zabavne narave, kot ta, da inž. Čačovič kot šef ni trenil z očesom, ko mu je mladi podrejeni povedal, da bo poleti dva meseca zvečer hodil na Bled igrat klavir. No, potrudil sem se in nisem niti enkrat zaspal.

Inž. Čačovič, še na mnoga leta!

**Miha Tomažević**

# Z LIDAR TEHNOLOGIJO ZAJETA TOPOGRAFIJA V HIDRAVLIČNIH ANALIZAH VODOTOKOV USING LIDAR DATA IN OPEN CHANNEL HYDRAULIC ANALYSIS

mag. Leon Gosar, univ. dipl. inž. grad.

Gašper Rak univ. dipl. inž. VKI.

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

doc. dr. Primož Banovec univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem, Hajdrihova 28, Ljubljana

Strokovni članek

UDK 627.1 : 556.536.532

**Povzetek** | Za prostor ob vodotokih in še posebej za poplavna območja veljajo znatne omejitve rabe prostora za vse nepremičnine, ki bi bile lahko v dosegu poplavnih voda. Zato je za načrtovalce rabe prostora, lastnike nepremičnin pa tudi številne druge pomembna kar najbolj natančna določitev poplavnih linij v prostoru, po možnosti celo določitev obsega poplav na parcelno mejo natančno. Za natančnejše hidravlične izračune, s katerimi se določajo poplavne linije za visoke vode različne verjetnosti pojava (10, 20, 100-letne poplave) pa so ključni dobri vhodni podatki o topografiji terena, o geometriji zgradb, ki vplivajo na tok vode, in podatki o odtočnem režimu. Odtočni režim se spremlja z monitoringom vodostajev, izračunom pretokov, ugotavljanjem (sprememb) smeri tokov ipd.; geometrija objektov, ki prečkajo vodotoke ali pa so znotraj dosega visokih voda, pa se zbira v različnih evidencah in katastrih objektov. Za izboljšano natančnost pri opisu topografije obvodnega prostora je bila v Sloveniji prvič uporabljena tehnologija LIDAR (*Light Detection and Ranging*), ki omogoča zbiranje višinskih podatkov velike gostote.

Vse skupaj je omogočilo natančnejšo hidravlično analizo visokovodnih razmer v obvodnem prostoru, zasnovano kot celovito orodje, ki povezuje GIS orodja in hidravlične modele stalnega in nestalnega toka. Izračuni tako slonijo na digitalnem modelu terena (DMT) velike natančnosti, kot ga omogoča LIDAR. Obdelavo geometrije vodotoka in obvodnega prostora zelo olajša razširitev HEC-GeoRAS za programsko orodje ArcGIS, hkrati pa je omogočeno tudi, da se iz DMT in digitalnega ortofoto posnetka zajamejo še druge lastnosti poplavnih površin (npr. hrapavost zaradi vegetacije ipd.). Bistveno izboljšane informacije o topografiji omogočajo natančnejše hidravlične analize, pa tudi večjo ločljivost izrisa izračunanih poplavnih linij. Natančnejši prikazi, kako daleč lahko segajo vode različne verjetnosti na poplavna območja, so zelo uporabni pri načrtovanju rabe oz. coniranju prostora, pri umeščanju infrastrukture (HE, AC itd.) in drugih objektov v obvodni prostor. Predvsem pa se poveča kakovost opozorilnih načrtov o poplavni nevarnosti prostora, da se lahko, glede na poplavno občutljivost objektov oziroma dejavnosti, izdela zanje še ocena poplavne ogroženosti posameznih nepremičnin oziroma dejavnosti. LIDAR posnetki terena vzdolž vodotokov, ki so bili opravljeni za potrebe raziskovalnega projekta za Ministrstvo za obrambo, prinašajo pomembne informacije tudi številnim drugim strokam, občinam oziroma subjektom. Iz teh sredstev je financiran razvoj metodologij, ki bodo uporabne za različne uporabnike obvodnega prostora, od upravnih organov, občin, služb za zaščito in reševanje pa vse do zasebnega sektorja.

**Summary** | For water corridors and especially for floodplains strict limitations are imposed leading to the lower risks for land use and structures, which could be endangered by high waters. Therefore, the accurate definition of flood extent, if possible with precision to a particular parcel, is very important for the planner of land use, the owners of property estate, and many others. For exact hydraulic analysis, used for flood planes' delineation related to the discharges with different return periods (10, 20, 100-year flood), accurate data of topography, geometry data of building within the river corridor and also data on run-off regime are needed. The data of run-off regime are acquired with monitoring of water surface, calculations of discharge, finding changes of river stretches etc., while the geometry of buildings crossing the rivers or exposed to the dynamics of high waters are kept in record evidences and cadastral registers. For more accurate topography presentation of water corridors, for the first time in Slovenia LIDAR technology (Light Detection and Ranging) was used, enabling terrain data acquisition with high accuracy. The newest approach enables more accurate hydraulic analysis of higher and flooding discharges propagation, based on a complex tool, which integrates GIS tools and a hydraulic model of steady and unsteady flow. The calculations were imposed on the digital terrain model (DTM) with high accuracy, generated from LIDAR data. Using HEC-GeoRAS as an ArcGIS extension, a set of procedures, tools and utilities for preparation geometry data of river channel, floodplain description and definition of land use (related with roughness because of vegetation) on basis of DTM and orthophotography was available. These much more accurate space characteristics information enabled more effective hydraulic calculations and furthermore floodplain mapping as well. This main goal achieving, the detailed mapping of floodplain extent of event with different discharge return period is crucial for spatial planning or water corridor zoning, setting the boundary conditions for infrastructures (hydropower station, motorway etc.) and other buildings inside the flood plains. But first of all, the plans of flood hazard became more detailed, so the flood threats to buildings or human activities and flood risk to them respectively could be more precisely estimated. The LIDAR topography data, acquitted along several Slovenian rivers for the needs of research project supported by the Ministry of defence, bring important information also to other fields of science, for different needs of municipalities and other subjects. This project made the methodology based on LIDAR useful for different users and landowners of water corridors, from administration bodies, communities, protection, and rescue services, to the private sector as well.

## 1 • UVOD

Vodni in obvodni prostor za nekatere predstavlja pomembno naravno danost, za druge pa velik razvojni potencial. Celovito gospodarjenje z vodami zato zajema niz ukrepov in omejitev, s katerimi je mogoče dolgoročno na področju voda uravnotežiti danosti in razvojne cilje oziroma javne interese. Pri tem se upoštevajo tudi artikulirani gospodarski interesi, sprejeti v razvojnih (državnih, regionalnih, občinskih) programih in načrtih, ki pa že upoštevajo želje po ureditvi človeku prijaznega in varnega okolja, ohranjanja narave ter varovanja in smotrne rabe vodnih potencialov. Vode tako predstavljajo razvojni potencial kot tudi vir nevarnosti (visoke vode, plazovi idr.), dodatno problematiko pa prinaša

neprimerno ravnanje z vodami oziroma poseganje v obvodni prostor, ki ogroža tako vode kot človeka in njegovo lastnino.

Procesi, ki so povezani s poplavljanjem vodotokov, povzročajo največje ujme, katerih magnituda in pogostost naraščata. Da bi se izognili negativnim posledicam, v hidravličnem inženirstvu analiziramo obseg in magnitudo poplavnih dogodkov, ki imajo različno verjetnost pojava (10, 20, 100 ali večletne vode). Zanje se s poplavnimi linijami določa, kako daleč v prostor vplivajo posamezne poplavne vode, pa tudi kakšne obremenitve na nepremičnine povzročajo: sile impulza na objekte, erozijske strižne napetosti na zemljišča ipd. Za takšne objekte so na drugi strani

potrebne tudi raziskave in ukrepi, kako bi bilo mogoče objekte napraviti odpornejše proti poplavam – ali s preprečevanjem vdora vode v objekt ali z zmanjševanjem občutljivosti (škode), če se dopusti, da vode poplavijo objekt. O teh ukrepih je v naši gradbeni praksi še premalo razprave, zato bo to obravnavano v drugem prispevku. Tokrat je na sliki 1 podana le shema, ki podaja povezave med nevarnostjo, ranljivostjo, ogroženostjo in tveganjem. Za natančne presoje nevarnosti poplav in za izračune hidravličnega inženirstva, ki se ukvarja z analiziranjem in zmanjševanjem problemov ob poplavljanju vodotokov, so ključnega pomena vhodni podatki. Natančne in zanesljive podatke o odtočnem režimu, kot so količina, smer, hitrosti, vodostaji ipd., lahko zagotovi ustrezni monitoring in analiza podatkov iz daljšega časovnega obdobja. Pri pripravi podatkov o topografiji pa je ključ-

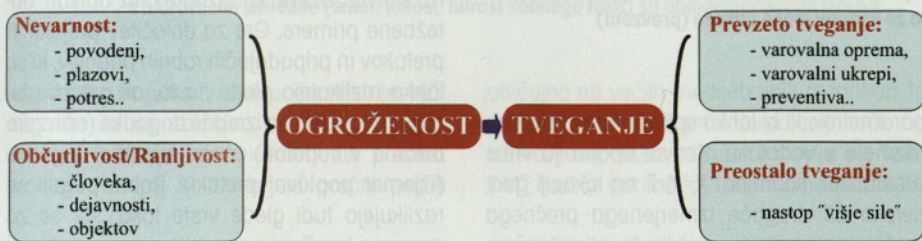
no orodje postala kombinacija tehnologij daljinskega zaznavanja in geografskih informacijskih sistemov (GIS). Evidentiranje (največjega) doslej zabeleženega obsega poplavljenih območij ne zadošča za izdelavo opozorilnih kart o poplavno nevarnih območjih, saj je treba upoštevati tudi dogodke, ki imajo statistično verjetnost, da se pojavijo, tudi če se doslej še niso zgodili. S takšnim pristopom se želi prepričati, da bi se v območja z večjo verjetnostjo poplavljanja umeščali objekti in dejavnosti, ki bi bili preveč ranljivi (tj. premalo odporni) ob poplavnih dogodkih. Ocena ogroženosti posameznika, objekta ali neke dejavnosti je tesno povezana tudi z globino in hitrostjo vode na poplavljenih

območjih. Poleg izračunanih hidravličnih parametrov je zato potreben tudi čim boljši zajem višin zemeljskega površja, da se lahko prikažejo območja z globinami vode, nevarnimi za neplavalce, območja povečanih hitrosti toka ali vdori vode na predele prostora, kjer sicer niso pričakovani.

Takšne dodatne informacije, povezane z ustrezno interpretacijo izračunov hidravličnega modela, omogoča natančni digitalni model terena (DMT), saj prikazuje tudi detajle konfiguracije terena. Natančnost določanja obsega poplavljanja vodotoka je močno odvisna od resolucije DMT še posebno na ravninskih območjih. Ker so procesi ob poplavah večdimenzijski, imajo GIS orodja vse po-

membnejšo vlogo. Prednost uporabe GIS na področju spremljanja in ukrepanja v primeru naravnih nesreč pa ni le v boljši predstavitvi dogajanja, temveč tudi v preventivnem in naknadnem analiziranju možnih scenarijev dogajanja in ocenitev (potencialne) škode, nastale zaradi poplav.

V nadaljevanju bo predstavljena uporaba podatkov topografije kot dela grafično podatkovne baze GIS za pripravo geometrijskega opisa rečnega korita in poplavnih območij, potrebnega za hidravlično analizo. Le-ta je opravljena z matematičnim modelom, katerega zahtevnost se prilagaja zahtevnosti problematike. Običajni enodimenzijski hidrodinamični modeli so učinkoviti le pri topografsko preprostih območjih, za natančne hidravlične simulacije poplavljanja po so potrebni visokoresolucijski modeli. V prispevku je prikazana uporaba topografskih podatkov, zajetih s tehnologijo LIDAR, za izdelavo digitalnega modela terena (DMT) vodnega prostora in obvodnih, potencialno poplavnih površin. Za pripravo geometrije za hidravlične modele in za kasnejši prikaz rezultatov v obliki kartiranja poplavnih območij, ki omogočajo še nadaljnje prostorske analize za potrebe hidravličnega inženirstva pa tudi za analize drugih uporabnikov prostorskih podatkov, je uporabljeno programsko orodje ESRI ArcGIS z razširitvijo HEC-GeoRAS.



Slika 1 • Iz ugotovljene stopnje nevarnosti ter neodpornosti (občutljivosti) je mogoče določiti stopnjo ogroženosti. Kdor vstopa v ogroženo območje, prevzame nase tveganje – da določene stopnje ga lahko kompenzira z varovalnimi ukrepi, ob nastopu dogodkov iz preostalega tveganja so potrebni interventni ukrepi

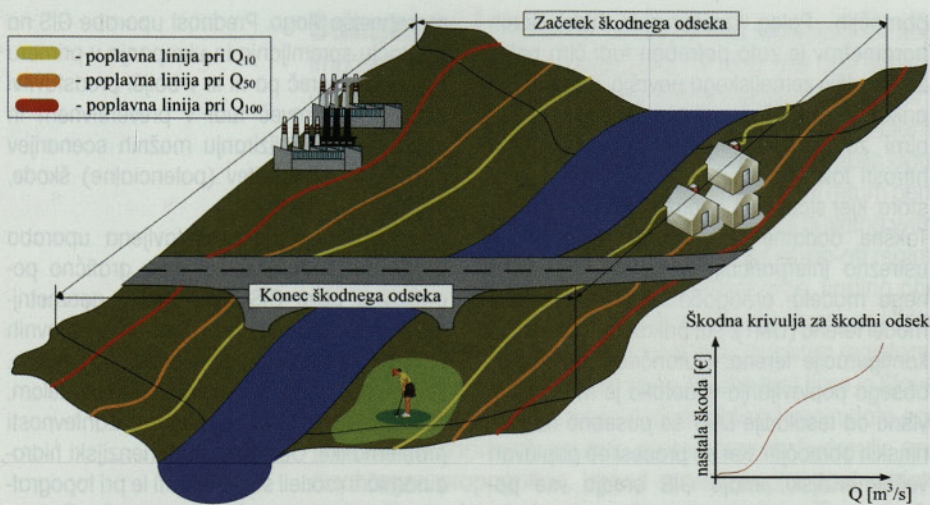
## 2 • HIDRAVLIČNO MODELIRANJE VODOTOKA IN OBVODNEGA PROSTORA

S hidravličnim modeliranjem ugotavljamo obnašanje vodotoka in velikost različnih obremenitev, ki jih povzročajo visokovodni in drugi dogodki. Glede na izmerjeno ali izračunano dinamiko procesov se določi potek in obseg poplavnih tokov, razmere v vodnih telesih ob sušah, pa tudi antropogeni vplivi na vodna telesa, kot so izpusti hladilne ali onesažene vode ipd. Za vsaj tri stanja, tj. za običajne, izredne in izjemne razmere se določajo obtežbe na naravno ali grajeno strugo ter na objekte na in ob vodotoku. Analiza dogodkov ob poplavljanju mora ugotoviti nivoje vodne gladine v rečnem koritu pri različnih pretokih, poplavne linije, do koder sega voda v primeru izlita iz struge, pa tudi globine ter smeri in hitrosti tokov v poplavljenem prostoru. Analiza teh parametrov je podlaga za kartiranje območij s stopnjevano poplavno nevarnostjo za človeka, objekte in dejavnosti (npr. prometa),

kar se pokaže s pomočjo coniranja poplavnih območij. Za določitev ogroženosti človeka, objektov ali dejavnosti pa je potrebno poznati ali analizirati še njihovo občutljivost oziroma ranljivost. Kompozitum nevarnosti in občutljivosti omogoča določitev stopnje ogroženosti, ki je podlaga za ukrepanje. Za obstoječe stanje je treba povečati (protipoplavno) odpornost, za bodoče posege pa se ocenjuje primernost posameznih objektov in dejavnosti glede na ugotovljeno stopnjo intenzivnosti pojava nevarnosti.

Opozorilne karte območij, ki pokažejo različno stopnjo poplavne nevarnosti, predstavljajo podlago za dovoljevanje posegov v območja znotraj poplavnih linij oziroma za ocenjevanje primernosti gradnje objektov oz. izvajanje dejavnosti. Za prostor znotraj poplavnih linij, določenih za dogodek z izbrano verjetnostjo pojava, je treba izdelati oceno prevzetega

tveganja. Tako so lahko npr. sprehajalne poti umeščene v prostor pogostejših poplav, pomembne javne zgradbe pa seveda ne. Na podlagi odločitve o prevzetem tveganju je treba primerno načrtovati in dimenzionirati objekte oziroma urediti potrebne varovalne ukrepe in opremo. Ker prevzemanje prevelikega tveganja ni zaželeno, se s predpisi ali s pravili stroke določijo sprejemljive meje. Takšne meje npr. postavljajo Vodnogospodarske osnove (ZVSS, 1978). Ko intenziteta pojava presega stopnjo, na katero so bili objekti oz. zaščitni ukrepi dimenzionirani, govorimo o nastopu t. i. »višje sile«. Tedaj se materializira preostalo poplavno tveganje in se prične izvajanje interventnih ukrepov, predvidenih v Načrtih ukrepanja ob poplavah. Na sliki 2 je prikazano, da se na odseku vodotoka v območja različnih poplavnih verjetnosti lahko umeščajo različne dejavnosti. Njihova občutljivost za poplave se lahko opiše s škodnimi krivuljami za posamezne objekte ali dejavnosti, ki prikažejo, kako narašča višina škode z velikostjo (poplavnega) pretoka.



Slika 2 • Na odseku vodotoka so vrisane poplavne linije za preteke z različno verjetnostjo. Glede na občutljivost za poplave se določa sprejemljiva raba prostora znotraj posameznih poplavnih linij. Za poplavne dogodke se tako že vnaprej lahko prikaže (prevzeta) pričakovana poplavna škoda

Pri prikazu uporabljene metodologije smo uporabili hidravlično programsko orodje HEC-RAS, ki je pri nas že v široki uporabi za račun enodimenzionalnega stalnega in nestalnega toka v odprtih vodotokih (US Army Corps of Engineers, 2003). Hidravlični model potrebuje opis geometrije rečnega korita, od izrisa florisne situacije vodotoka do definiranja točk posameznih prečnih profilov v lokalnih koordinatnih sistemih, opis geometrije objektov v in ob vodotoku, določitev koeficientov hrupavosti ostenja ter ostalih

parametrov, ki bi lahko vplivali na hidravlične razmere v vodotoku. Ker se uporablja vnos prostorskih koordinat X, Y, Z na lokaciji geodetsko ali drugače izmerjenega prečnega profila, je njegova geometrija dovolj natančna, bistveno manj pa je natančna interpolacija geometrije korita med posameznimi izmerjenimi prečnimi profili. Da bi izboljšali opis geometrije rečnega korita in poplavnih območij, se kot osnova za delo uporablja digitalni model terena v obliki nepravilne trikotniške mreže (TIN). DMT se lahko izdelata na

podlagi osnovnih topografskih podatkov, zbranih s pomočjo različnih tehnik daljnjskega zaznavanja, od klasičnih geodetskih meritev do sodobne tehnologije (npr. LIDAR), z digitalizacijo kart, sledenjem izohips in podobno. Pri različnih metodologijah je natančnost podatkov različna. Ko pa je DMT izdelan, se s pomočjo razširitve HEC-GeoRAS v programu ArcGIS pripravi datoteka z geometrijskimi podatki, potrebnimi za izračune s hidravličnim modelom HEC-RAS. Tako pripravljeno geometrijo se po potrebi lahko v programu HEC-RAS-u še dopolnjuje s hidravličnimi posebnostmi, kot so dimenzije objektov in ureditev.

Za hidravlično modeliranje je treba podati še hidravlične parametre, ki opisujejo lastnosti vodotoka ali ovir v vodnem toku (koeficienti razširitve/zožitve korita ipd.), in opisati obtežbene primere. Gre za določitev projektnih pretokov in pripadajočih robnih pogojev, ki se lahko razlikujejo glede na to, ali gre za običajne dogodke, za izredne dogodke (npr. zdrs brežine v vodotok) ali za izjemne dogodke (izjemni poplavni pretoki). Robni pogoji se razlikujejo tudi glede vrste toka, saj se za osnovne izračune uporablja primer stalnega toka, za zahtevnejše faze načrtovanja pa tudi izračuni nestalnega toka. Poleg dokazovanja o odpornosti projektiranih ureditev na hidravlične obremenitve je eden glavnih namenov hidravličnega dimenzioniranja tudi prikazati rezultate na razumljivejši način drugim strokam, ki se ukvarjajo z načrtovanjem rabe prostora.

### 3 • DIGITALNI MODEL TERENA

Digitalni model terena (DMT) je model terena, kateremu so dodane glavne topografske značilnosti terena, kot so to denimo padnice, kote, grape, grebeni itd. (Šumrada, 2005). Za potrebe hidravličnega modeliranja se je kot zelo uporabno pokazalo programsko orodje HEC-GeoRAS (Rak, 2006), ki uporablja mrežo neenakih trikotnikov (TIN). TIN ima nekaj izrazitih prednosti v primerjavi z rastrskim DMT. Obravnavano območje opiše z mrežo sklenjenih in neprikrivajočih se trikotnikov, ki se stikajo in se lahko razlikujejo po obliki in velikosti, zato lahko iz razpoložljivih točkovnih višinskih vrednosti tako mrežo ustvarimo precej hitreje kot z ustrezno mrežno interpolacijo. Takšna oblika je tudi bolj primerna za shranjevanje podatkov o črtah spremembe

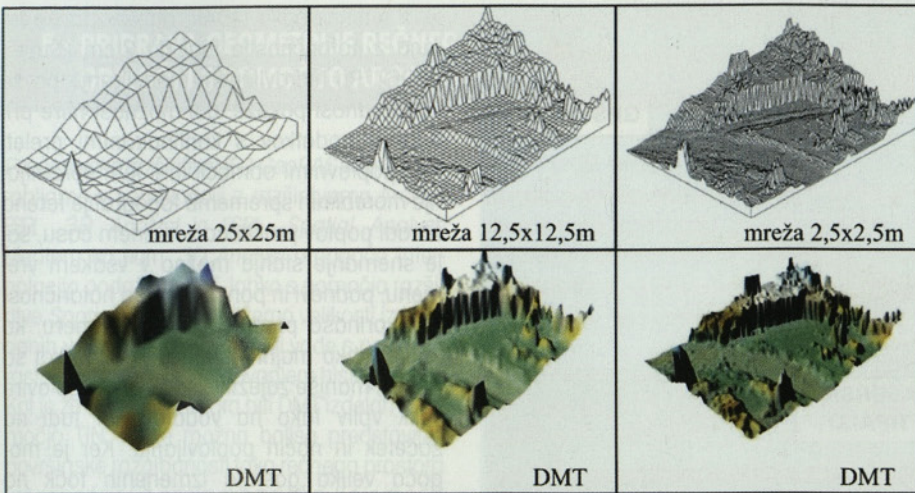
naklona (npr. brežine, nasipi, ipd.), o višinskih točkah, dobro opiše navpične strukture ipd. V TIN lahko tudi poljubno zgostimo točke, s katerimi se podrobneje opiše relief, kar je ena večjih prednosti modela TIN, kadar je treba ožje območje podrobno analizirati.

Večina DMT, izdelanih na podlagi podatkov zajetih z različnimi tehnologijami, je zadovoljivo natančnih za splošen prikaz terena. Vendar pa so izkušnje, dobljene pri združevanju hidravličnih in GIS modelov, pokazale potrebo po natančnejših digitalnih modelih terena, ki bi lahko zadovoljivo opisale geometrijo korita ali omogočile izdelavo zahtevnejše numerične mreže hidravličnih modelov. Izdelava DMT na podlagi digitaliziranih izohips klasičnih geodetskih kart (npr. GBK25,

GBK10 idr.) pokaže, da vsebujejo za natančen prikaz topografije premalo točk terena, saj je osnovna celica mreže prevelika. Kako gostota izmerjenih značilnih točk terena vpliva na natančnost DMT in posredno na hidravlično analizo, je razvidno iz slike 3. Pri DMT, ki je izdelan iz najmanjšega števila točk, se pojavljajo največja posplošenja topografije, z naraščanjem gostote točk na enoto površine je vidnih vse več detajlov terena.

Na sliki 3 je tudi videti, da ni prikazana dejanska topografija rečne struge, temveč sega opis brežin vodotoka verjetno le do vodne gladine v času snemanja terena. Iz takšnega DMT izhaja previsoko opisan potek rečne struge, kar v izračunih pokaže pojav poplavljanja že pri manjših pretokih. Ker se ne upošteva pravilni volumen korita, je izračunana manjša pretočna sposobnost struge in je nivo, pri katerem voda prestopi bregove, hitreje dosežen, kot se to zgodi v dejanskih





Slika 3 • Prikaz topografij terena z DMT, izdelanih na podlagi višin točk površja, izmerjenih z različno gostimi mrežami, pokaže stopnjo posplošenja informacij o topografiji (Alemseged, 2005). Za hidravlične izračune (smer, jakost, hitrost vodnega toka) so pomembni detajli terena

razmerah. Napako v opisu geometrije rečnega korita se običajno skuša odpraviti z vnosom točk na terenu izmerjenih prečnih profilov. Ker pa so izmerjeni prečni profili

običajno na večjih medsebojnih razdaljah, to privede do napak pri interpolaciji točk ob izdelavi TIN. Težava, ki se pojavlja pri vseh DMT, tudi če uporabljajo nepravilne trikotniške

mreže, je v prikazu/upodobitvi velikega števila naravnih pojavov (npr. skalna stena, soteska,...) oziroma grajenih objektov (npr. zidovi, mostovi...). Ti objekti imajo namreč lahko več vrednosti višin za več nivojskih točk, ki imajo iste koordinate x in y. Običajni DMT tega problema ne more popolnoma rešiti, četudi bi zajem ploskev z večjimi gradienti lahko izboljšali z večjo gostoto točk – takšen DMT je včasih poimenovan kot 2,5-dimenzionalen.

Z uporabo novejših tehnik gostejšega zajema višinskih točk, med katerimi prevladuje LIDAR, lahko v precejšnji meri rešimo probleme natančnosti in težave, ki se pojavljajo pri DMT, izdelanih na podlagi digitaliziranih kart. Če se zajame bistveno večje število značilnih točk terena, je mogoča tako upodobitev detajlov topografije kot tudi natančnejši prikaz (strmih) naklonov. Vse to pa ugodno vpliva tudi na natančnost geometrijskih podatkov, ki jih s pomočjo GIS orodja iz DMT pripravimo za uporabo v hidravličnem modelu in s tem na natančnejši opis širjenja poplavnih tokov v prostoru.

#### 4 • TEHNOLOGIJA LIDAR

Tako kot večina tehnik (GPS ipd.) je bila tudi tehnologija LIDAR – Light Detection and Ranging razvita najprej za vojaške potrebe. Tehnologija temelji na daljinskem zaznavanju površine s pomočjo laserskega tipala, ki je lahko pritrjeno na zračna plovila (letala, helikopterji) ali vesoljska plovila. Takšno tipalo spada med aktivne senzorje daljinskega zaznavanja, saj je sistem sam sebi vir energije in ni odvisen od zunanjih virov, kot so npr. optični sistemi. Uporabnost in razširjenost je botrovala razvoju številnih sistemov, ki so danes na voljo tudi za komercialno uporabo.

Zasnova sistema laserskega zaznavanja sestoji iz naprav na plovilu in naprav za obdelavo podatkov. Zaznavanje terena je shematsko prikazano na sliki 4. Lasersko tipalo, tj. laserski oddajnik, sprejemnik, detektor signala, ojačevalce in ostale elektronske komponente, je le del sistema na plovilu. Nepogrešljivi sestavni deli so tudi radarska antena, GPS (Global positioning system), IMU (inercialna merilna enota) ter video kamera ali fotografski aparat za dokumentiranje drugih lastnosti površine. Za

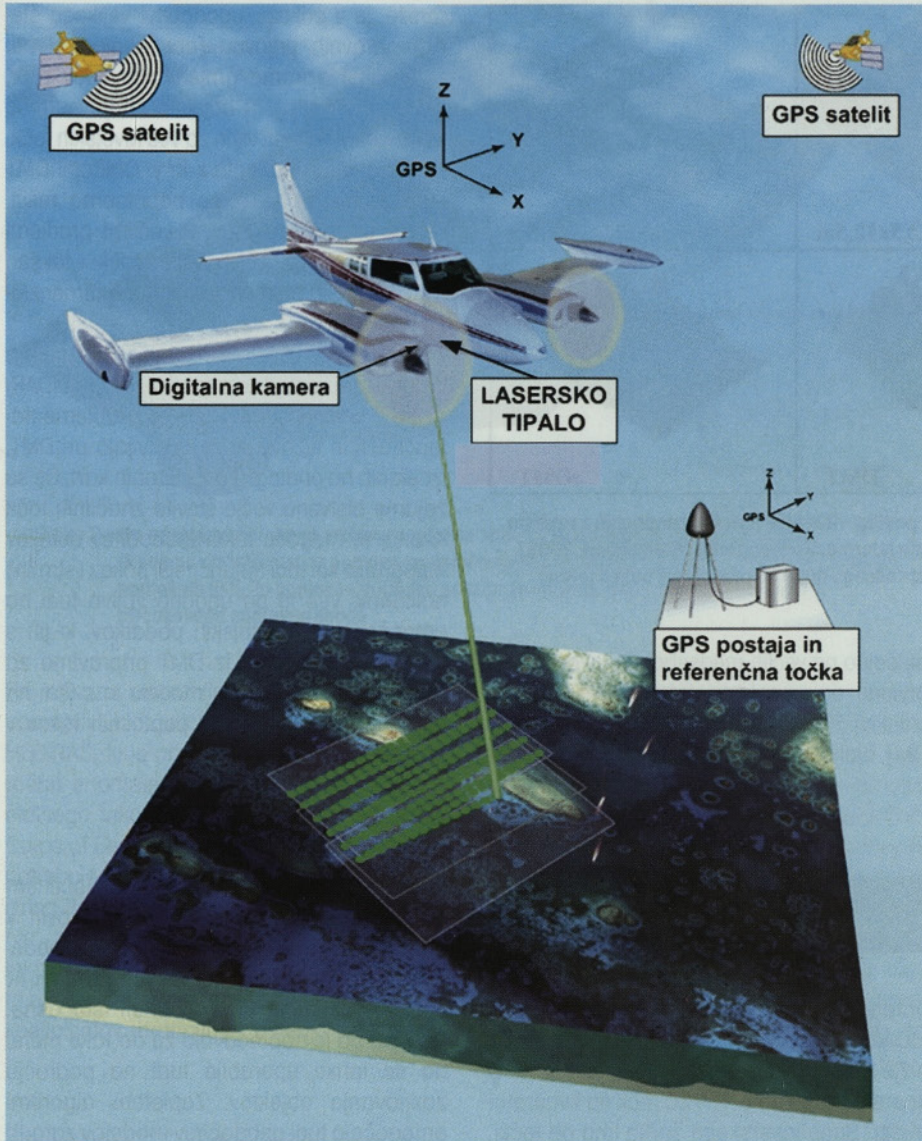
natančnejše meritve se navadno uporablja LIDAR, pritrjen na helikopter, kar omogoča nižje letenje, manjšo hitrost letenja in izmero koordinat z gostoto 10–20 točk na kvadratni meter. Snop laserskega žarka ima ob točki, ko zapusti lasersko napravo, premer okoli 7,5 milimetrov, ob stiku z oviro pa se pri višini leta med 1000 in 2000 metri le-ta že poveča na velikost okoli 50 centimetrov. Na z gozdovi poraščenih in urbaniziranih območjih tako žarek lahko zadene v več kot en objekt, kar posledično daje več odbitih signalov. Več odbojev pa se lahko tudi koristno uporablja v različnih vejah znanosti. Tako npr. na področju gozdarstva večkrat odbiti signali omogočajo ugotavljanje višine, gostote ter oblike vegetacije in določanje habitatnih tipov, seveda dodatno k odboju s terena.

Pri uporabi tehnologije LIDAR za zajem točk terena zemeljskega površja se želi eliminirati vse ostale točke, zato se upošteva le zadnji odboj, ki je navadno dejansko odboj od tal oziroma tlom najbližji. Pri snemanju se zabeležijo velike količine podatkov, zato se razvijajo številni algoritmi za ekstrakcijo

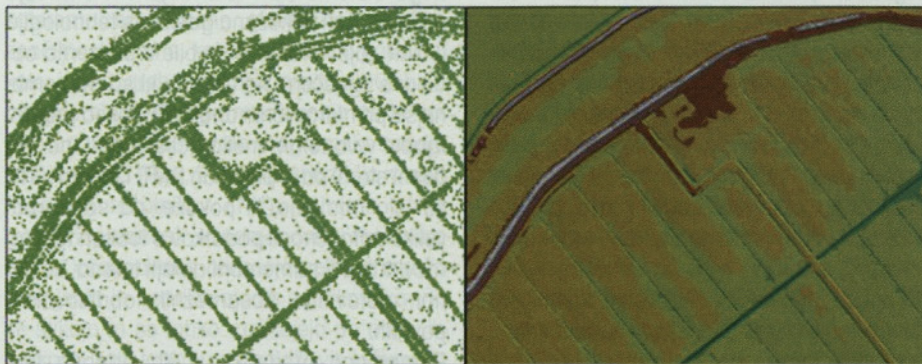
točk, ki so pomembne za delo na določenem področju. Takšni postopki so učinkoviti v približno 90 %, za pomoč pri nadaljnji obdelavi pa se uporabljajo ortofoto (vidni ali IR spekter) posnetki, ki so posneti istočasno. Tehnika pa je napredovala že do take mere, da se lahko uporablja tudi na področju zaznavanja objektov. Zapleteni algoritmi omogočajo tudi upodobitev modelov zgradb in njihovo rekonstrukcijo, kjer objekti končno podoba dobijo z nalepljenjem s fotografijami resničnih objektov.

Na sliki 5 je kot primer zaznavanja obvodnega sistema na melioracijskem območju na levi strani prikazana gostota s tehnologijo LIDAR zajetih točk, ki so bile s primerno obdelavo zgoščene na mestih, ki so pomembnejša pri hidravličnih analizah, kot so prelivni robovi v vodotok, melioracijski jarki ipd. Na desni strani pa je prikazan DMT, izdelan s TIN za isto območje, ki pokaže, da so, zaradi velike natančnosti podatkov o točkah terena, razvidni tudi pomembni detajli terena, kot so npr. neravnine posameznih obdelovalnih površin.

Pomembna prednost, ki jih prinaša tehnologija LIDAR, je natančna digitalna narava podatkov, ki je manj podvržena horizontalnim napakam kot podatki točk, dobljenih s pomočjo izohips. S pomočjo podatkov, za-



Slika 4 • Zasnova delovanja sistema LIDAR (poslovenjeno, Nayegandhi, 2003)



Slika 5 • Prikaz točk posnetih s sistemom LIDAR (levo), ki so bile primerno procesirane, da bi pridobili čim več informacij o odtoknem režimu z melioracijskega sistema. Iz njih izdelan TIN (desno) in nato še DMT z veliko natančnostjo opišeta topografijo in s tem smeri odtokanja padavin (Rak, 2006)

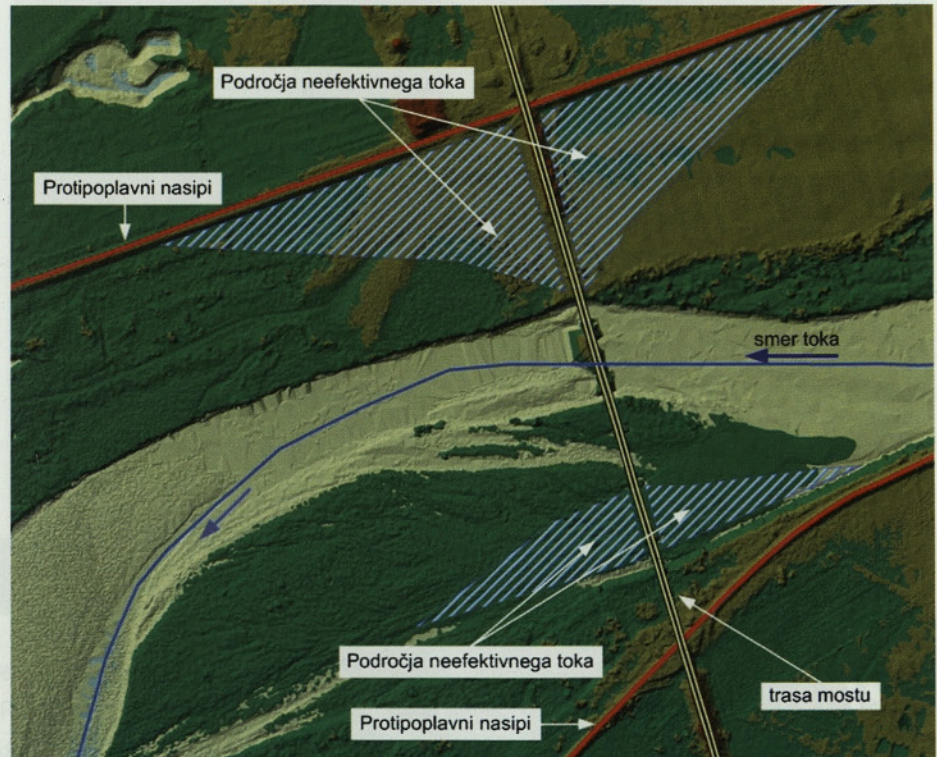
jetih s tehnologijo LIDAR, dobimo točke terena z natančnostjo tudi do 2 cm (Supej, 2006). Pri hidravličnem modeliranju pa se kot prednost pokaže tudi možnost hitre pridobitve podatkov s kontinuiranimi preleti nad poplavnimi območji in s tem spremljanje morebitnih sprememb topografije terena zaradi poplav praktično v realnem času, saj je snemanje stanja možno v vsakem vremenu, podnevi in ponoči. Visoka natančnost DMT prinaša prednosti tudi v primeru, ko imajo lahko majhni elementi terena, kot so nasipi, manjše zaježitve, jarki ali druge ovire velik vpliv tako na vodotok kot tudi na začetek in način poplavljanja. Ker je mogoča velika gostota izmerjenih točk na karakterističnih mestih, je mogoče natančneje opredeliti lokacije prelivanja vode iz glavnega korita, s tem pa tudi natančneje določati mejni pretok, ko reka prične poplavljanje.

Tehnologija LIDAR prinaša prednosti tudi v primerjavi s satelitskimi posnetki, saj dosega sistem veliko boljše odzivnost, boljše natančnost, večje število vzporednih produktov, delno ali popolno penetracijo skozi vegetacijo itd. (Supej, 2006). Seveda pa se pojavljajo tudi slabosti. Prva je velika količina zbranih podatkov, ki za obdelavo potrebuje zmogljivo računalniško opremo. Pri opisu topografije rečne struge pa je težavno snemanje globljih vodotokov in vodotokov z veliko vsebnostjo suspendiranih snovi. Osnovna različica laserskega tipala ima frekvenčno območje okoli infrardeče svetlobe, ki ne prodira globoko v vodno telo, saj se v vodi žarek razprši, zato ni odbitega signala in ne podatkov o podvodnem območju. Delno je težavo možno rešiti z uporabo dvojnega laserskega tipala, kjer eden oddaja infrardečo svetlobo, drugi pa modrozeleeno. Slednja lahko prodre do določene globine, če v vodi ni prevelike količine suspendiranih snovi. V primeru, ko je suspendiranih snovi preveč, prihaja do sipanja in odboja žarka že pred samim dnom, zato zaznavanje dna struge lahko vsebujejo precejšnje napake. Podobne težave se navadno pojavljajo tudi pri hitrejših vodotokih, posebno pri brzicah. V takšnih primerih je zato smotrnejše uporabljati večžarkovne ("multi-beam") naprave, namenjene posebej za snemanje batimetrije, posnete točke pa nato združevati s točkami terena, zajetimi s tehnologijo LIDAR. Osnovno vodilo pa je, da se zaradi slabe penetracije žarkov v vodo meritve opravljajo pri kar se da nizkih (sušnih) vodostajih.

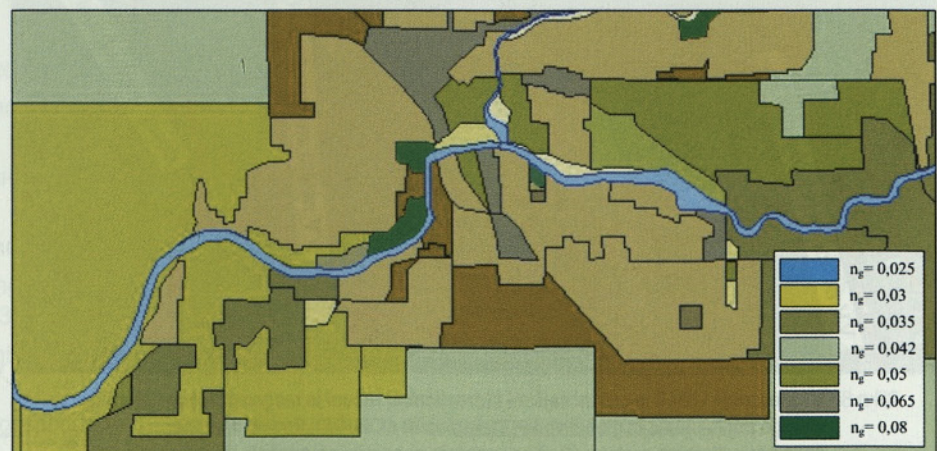
## 5 • PRIPRAVA GEOMETRIJE REČNEGA KORITA IN PRIKAZ POPLAVNIH OBMOČIJ S POMOČJO ARCGIS RAZŠIRITVE HEC-GEORAS

lokacije objektov, ki vplivajo na vodni tok, njihovo geometrijo pa definiramo že v ArcGIS-u (npr. hiše, gospodarska poslopja, ipd.) ali kasneje v HEC-RAS-u. Neposredno v hidravličnem modelu vnašamo predvsem objekte, za katere analiziramo njihovo hidravlično vlogo, kot so mostovi, prepusti, načrtovani nasipi ipd. Po oblikovanju vseh slojev oblikujemo datoteko s celotnimi geometrijskimi podatki, ki je primerna za hidravlični matematični model HEC-RAS.

prečni profil. Pri kreiranju teh slojev so v veliko pomoč aerofoto posnetki, če se le dovolj natančno prekrivajo z DMT, da je mogoče dovolj natančno določiti lokacije posameznih objektov, nasadov, gozdov ipd. Z njimi si lahko pomagamo tudi pri določanju natančnejše



Slika 6 • Na izdelano podlago – DMT se lahko dodajajo številni sloji, s pomočjo katerih se opišejo dodatne lastnosti objektov, vodnega toka ali vodnega in obvodnega prostora



Slika 7 • Za območja s značilnimi skupnimi lastnostmi, kot jih lahko poda podrobnejša geometrija rečnega koridorja, se lahko ovrednotijo tudi druge lastnosti poplavnih območij – prikazana so območja z značilno stopnjo poraščenosti, ki vplivajo na koeficient hidravličnega odpora vodnemu toku

Programsko razširitev HEC-GeoRAS vedno uporabljamo v kombinaciji z razširitvama ArcGIS ESR 3D Analyst in ESRI Spatial Analyst. Medtem ko nam 3D Analyst omogoča interpolacijo podatkov DMT, lahko s pomočjo razširitve Spatial Analyst prikazemo velikosti izračunanih vodnih globlin in hitrosti vode s pomočjo rastrske mreže ali z oblikovanjem histogramov. Kot je že omenjeno, mora biti DMT izdelan s pomočjo TIN, da je možna boljša predstavitev površinske razgibanosti tako rečnega prostora kot pripadajočih poplavnih površin. Ko je model terena v TIN pripravljen, se začne oblikovanje točkovnih, linijskih in poligonskih slojev za pripravo geometrijskih podatkov za hidravlični model (npr. HEC-RAS). Nekateri podatki so obvezni, nekateri izbirni. Med obvezne sloje, poleg samega DMT, sodijo središčnica vodotoka ter trase in profili prečnih prevezov. Ta dva sloja, ki ju oblikujemo najprej v 2D prostoru, kasneje pretvorimo v 3D obliko. Na podlagi DMT se v programu določi potrebne razdalje in višinske vrednosti posameznih točk. Uporabnik ima na voljo še številne druge sloje, s katerimi lahko izpopolni geometrijski model – tako se lahko izrišejo linije rečnih bregov, nasipov in mostov, poti verjetnih poplavnih tokov ipd. Možni pa so tudi poligonski sloji, ki opišejo območja neefektivnega toka ali zgradbe ob rečnem koritu, ki jih je zajel vodni tok in tako zmanjšujejo površino prečnega prereza, območja akumuliranja vode ipd., ki jih sicer voda poplavi, vendar v njih zastaja, se vrtniči, ni pa v njih pretoka vode v smeri vodotoka. Navadno se takšna območja pojavljajo ob mostovih, prepustih, meandrih ipd., kot je to prikazano na sliki 6. Poleg trase mostu, ki služi le kot pomoč pri natančnejši določitvi lokacije le-tega vzdolž vodotoka, njegova geometrija pa se določi v hidravličnem modelu, so izrisane tudi linije obrambnih nasipov (obstoječih ali projektiranih).

Program omogoča tudi povezavo s slojem, v katerem se opiše raba tal. Lastnosti tega sloja so v veliko pomoč pri definiranju Manningovih koeficientov hrapavosti  $n_g$ , predvsem pri upoštevanju vpliva vegetacije na poplavnih območjih. Obravnavano območje je mogoče razdeliti, kot je prikazano na sliki 7, na področja z enako ali podobno pokrovnostjo ali rabo tal, nato pa za vsakega od njih določiti koeficient hrapavosti. Program nato določi spreminjanje koeficienta  $n_g$  vzdolž celotnega prečnega profila, kar zagotavlja natančnejšo upoštevanje dejanskega stanja, kot če se privzame povprečna vrednost za celoten

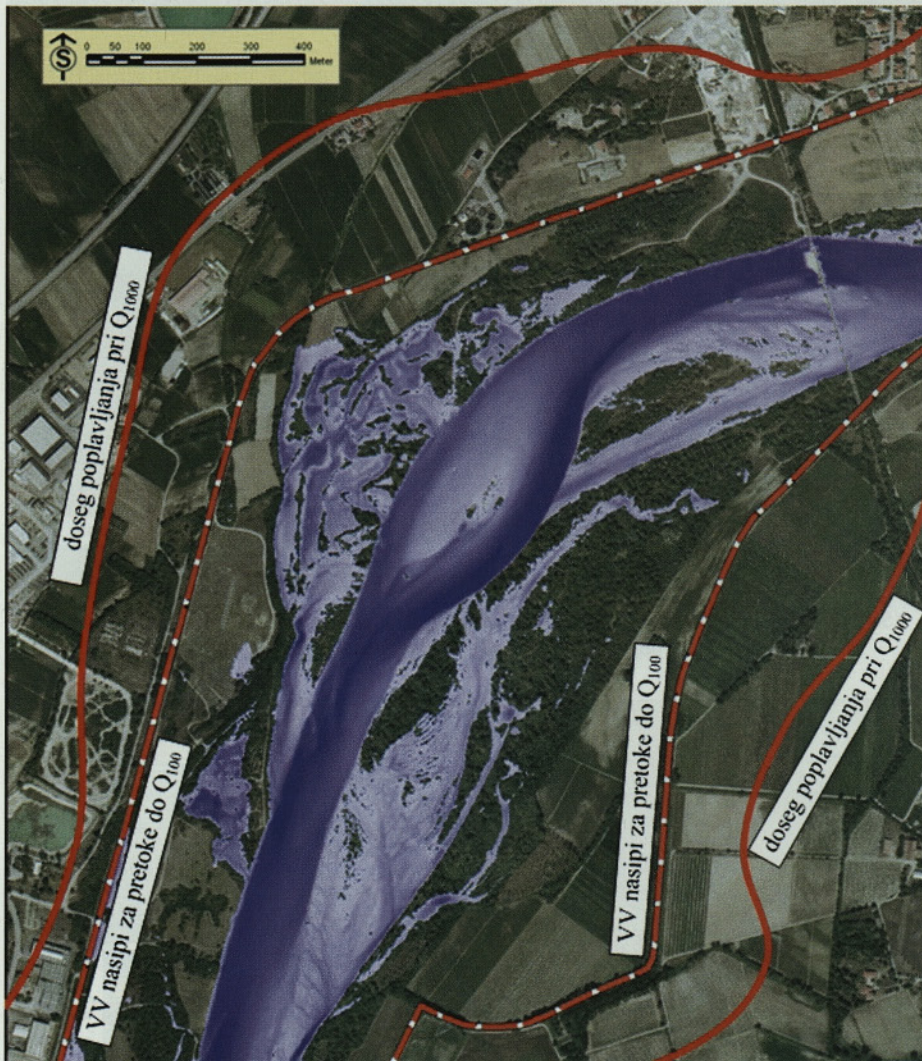
## 6 • PRIKAZ HIDRAVLIČNIH IZRAČUNOV S PROGRAMSKIM ORODJEM HEC-GEORAS

Po končani hidravlični simulaciji se izračunani potoke gladin s pomočjo HEC-GeoRAS prenese nazaj v GIS orodje. Presečnice vodne gladine s terenom so t. i. poplavne linije, s katerimi lahko izvedemo kartiranje obsega poplavljanja za obravnavane dogodke z različno verjetnostjo. Poleg prostorskega prikaza obsežnosti poplavljenih območij se lahko s postopki v okolju HEC-GeoRAS prikaže tudi porazdelitev globin vode po prostoru. Za prikaz poligonov vodne gladine jih je treba pretvoriti v obliko

TIN, kar se izvede z interpolacijo višin vodne gladine med prečnimi profili. Naklon ploskev poligonov med profili predstavlja padeč vodne gladine. Če je geometrija izdelana s pomočjo programskega orodja HEC-GeoRAS, so poligoni, ki predstavljajo vodno gladino, že umeščeni v prostor. Pri tem je treba poudariti, da poligonov, ki niso geopozicionirani, ni mogoče prenesti v prostor.

Rezultati takšne predstavitve stanja v prostoru so razvidni na sliki 8, kjer je različna globina

vode prikazana z različnimi odtenki modre barve. V rečnem koritu je voda tudi ob poplavljanju najgloblja, seveda ob pogoju, da se struga ob poplavih ne spreminja zaradi erozije ali odlaganja sedimentov. Na sliki 7 je razviden obseg poplavljanja pri pretoku  $Q_{25}$ , kot primer običajnega, s projektom predvidenega stanja. Viden je tudi potek VV nasipov, ki so bili dimenzionirani na (mejni) projektni pretok s 100-letno povratno dobo ( $Q_{100}$ ) in izračunana poplavna linija za izjemno dogodek, npr. za pojav pretoka  $Q_{1000}$ . Seveda pa so možne še številne druge analize, kot je npr. prikaz lokalne hitrosti vode, s katero se lahko opozori na nevarnost odnašanja ljudi, zemljine ipd., pa tudi druge učinkovite predstavitve rezultatov, tudi v trirazsežnem prostoru. Predstavljena je analiza vključevanja modernih metod zaznavanja in uporabe GIS orodja v postopke priprave geometrijske podlage za hidravlično modeliranje. Rezultati kažejo, da je natančnost hidravličnih izračunov pomembno odvisna od natančnosti digitalnega modela terena oz. dodatno od batimetrije vodotoka, saj lahko že majhne spremembe topografije vplivajo na odtočni režim vodotoka. Takšna metodologija dela prinaša pomembne dodatne informacije o poplavih razmerah v prostoru, kot so lokacije in jakos izlivanja iz struge, pa tudi smeri, hitrosti in globine vodnih tokov v poplavih območjih. Za območja, kjer so na voljo le digitalizirane karte večjih meril, te metode dela praktično ni mogoče uporabiti.



Slika 8 • S topografijo LIDAR in natančnejšimi hidravličnimi računi je mogoč natančnejši prikaz obsega poplavljanja in globin vode (Steinman et al, 2006). Razmere pri npr. petindvajsetletnem pretoku ( $Q_{25}$ ) na aerofoto posnetku omogočajo še druge informacije o ustrezni rabi prostora. Prikazana trasa protipoplavnih nasipov kaže, do kod sega območje prevzetega tveganja pri pojavu stoletnih voda ( $Q_{100}$ ). Na območju poplavljanja pri izjemno visokih pretokih (npr. tisočletne vode –  $Q_{1000}$ ) pa je treba upoštevati, da se sicer redko lahko materializira preostalo tveganje

## 7 • SKLEP

Učinkovito ukrepanje ob pojavu visokih voda in preventivno upoštevanje poplavne nevarnosti v prostoru je v veliki meri odvisno tudi od natančnosti določanja stopnje nevarnosti na posameznih lokacijah. Čim bolj natančne karte, ki prikazujejo območja, poplavljenega ob pretokih z različnimi povratnimi dobami, so potrebne tako organom za zaščito in reševanje pred nevarnostmi visokih voda kot vsem načrtovalcem rabe vodnega in obvodnega prostora. Ker pa na takšnih območjih veljajo tudi nekatere omejitve rabe, je tudi za vse lastnike nepremičnin pomembno poznavanje dejanskih razmer v prostoru. Večja natančnost hidravličnih izračunov je še bolj pomembna pri ravninskih območjih, kjer lahko že manjše zvišanje vodne gladine prikaže poplavljanje na večjih območjih. Za natančnejše izračune je potrebna natančnejša predstavitev terena, ki pa je bila v preteklosti le redko praktično izvedljiva. Lastnosti rečne struge in poplavnih območij, ki vplivajo na hidravlične lastnosti

vodotoka, se lahko učinkovito opišejo z uporabo orodij GIS. Pomemben napredek pri hidravličnih analizah pa je omogočilo zaznavanje topografije z dovolj veliko gostoto in natančnostjo, ki jo omogoča tehnologija LIDAR. Prednost tehnologije je poleg natančnosti tudi zmožnost zajema topografije obsežnejših območij v zelo kratkem času in hitrih postopkih za izdelavo DMT, kar bo lahko omogočilo tudi upoštevanje topografskih sprememb, ki so posledica delovanja voda ob poplavah (npr. erozija, splazitev terena itd.).

Na primeru analiziranja hidravličnih lastnosti vodotokov je prikazana hkratna uporaba orodja GIS, zajem podatkov geometrije rečne korita in poplavnih površin s tehnologijo LIDAR in izdelave natančnega DMT. Na podlagi naših izkušenj pri uporabi te metodologije v Italiji, v okviru Interreg projekta, je bil takšen pristop predlagan tudi za Slovenijo. V letošnji zimi se je tudi v Sloveniji že začelo na najbolj poplavno ogroženih območjih snemanje to-

pografije s tehnologijo LIDAR za potrebe hidravličnih analiz. Rezultati izračunov dajejo natančnejši potek poplavnih linij, pa tudi druge informacije, kot je npr. globina vode v poljubni točki poplavljenega območja.

Rezultati hidravličnega modeliranja omogočajo upoštevanje poplavne nevarnosti v procesih načrtovanja rabe prostora, ovrednotenje pozitivnih učinkov protipoplavnih ukrepov pa tudi izdelavo ocen obremenitev na objekte v poplavnih področjih. Ko bodo opravljene še analize občutljivosti zgradb različnih konstrukcij na hidrodinamične obremenitve, bo mogoče zanje izdelati še oceno ogroženosti. Za posamezen objekt bi tako dobili oceno pričakovane poplavne škode, oceno ogrožanja stabilnosti (spodjedanje, odpor vodnemu toku), oceno odpornosti (vdor vode v objekt, porušitev obodnih zidov) na obtežbo z vodo ali s plavinami. Takšne analize so potrebne tudi v primerih delovanja snežnih plazov (objekti na smučiščih), blatnih tokov in podobnih obremenitev objektov. Obremenitve se lahko določajo s hidravličnim modeliranjem, odpornost in stabilnost objektov v takšnih pogojih pa se določa z analizo konstrukcij.

## 8 • LITERATURA

- Alemseged, T. H., Integrating Hydrodynamic Model and High Resolution DEM For Flood Modelling, Enshede, Netherlands, 2005.
- Nagwa, E. A., Refined Modelling For Flood Extent Predictions Using Laser Scanning, Enshede, Netherlands, 2003.
- Nayegandhi, A., Lidar Mapping of Vegetation at Assateague Island National Seashore, USGS, 2003.
- Rak, G., Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov, Diplomaska naloga, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2006.
- Steinman, F., Gosar, L., Povezava računa gladin v odprtih vodotokih in CAD sistema, Zbornik 18. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, str. 179–186, 1996.
- Steinman, F., Hidravlika, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljana, 1999.
- Steinman, F., Gosar, L., Banovec, P., Poročilo o poteku projekta SIMIS – Sistem integralnega monitoringa na porečju Soče, Interreg IIIB, UL, FGG, Ljubljana, 2006.
- Supej, B., Kovačič, B., Tehnologija LIDAR pri planiranju, projektiranju, vzdrževanju in upravljanju vodotokov, Zbornik 17. Mišičev vodarski dan 2006, Maribor, str. 183–188, 2007.
- Šumrada, R., Strukture podatkov in prostorske analize, UL, FGG, Ljubljana, 2005.
- US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Susquehanna River Flood Warning and Response system, Davis, CA, [www.nap.usace.army.mil/GIS/fwrs.htm](http://www.nap.usace.army.mil/GIS/fwrs.htm), 2003.
- US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC-RAS, River Analysis System User's Manual, Version 3.1.3, Davis, CA, [www.nap.usace.gov](http://www.nap.usace.gov), 2002.
- ZVSS – Zveza vodnih skupnosti Slovenije, Vodnogospodarske osnove Slovenije, dostopno na <http://vodomet.fgg.uni-lj.si/KMTe>, 1978.

# PROJEKTNA NOSILNOST OSLABLJENIH PREREZOV ELEMENTOV IZ JEKEL VISOKE TRDNOSTI

## DESIGN NET CROSS-SECTION RESISTANCE OF ELEMENTS MADE OF HIGH STRENGTH STEEL

**Primož Može, univ. dipl. inž. grad.**  
**doc. dr. Jože Lopatič, univ. dipl. inž. grad.**  
**prof. dr. Darko Beg, univ. dipl. inž. grad.**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,  
Jamova 2, 1000 Ljubljana  
e-naslov vseh: ime.priimek@fgg.uni-lj.si

**Znanstveni članek**

UDK 624.014.2 + 624.046

**Povzetek** | Članek obravnava nosilnost oslabljenih prerezov iz jekla visoke trdnosti. Trakovi z izvrtano luknjo (23 testov) in preklonni vijачeni spoji z enim ali dvema vijakoma (20 testov) so bili statično natezno obremenjeni do porušitve z namenom določitve najvišje nosilnosti in lokalne duktilnosti. S postopkom, podanim v Aneksu D, SIST EN 1990, so bili s statistično analizo določeni delni faktorji  $\gamma_M$  za različne modele odpornosti. Velik poudarek je dan zanesljivosti pravil za projektno nosilnost oslabljenih prerezov po evrokodih.

**Summary** | An extensive experimental research on net cross-section failures of plates with holes (23 tests) and bolted connections (20 tests) made of high strength steel S690 is presented. The aim was to determine local ductility and resistance. The verification of various strength functions and determination of appropriate partial factor  $\gamma_M$  was done by means of statistical analysis according to Annex D of EN 1990. The emphasis is given on the reliability of Eurocode provisions for design resistance of net cross-sections.

### 1 • UVOD

Porušitev po oslavljenem (neto) prerezu je ena izmed osnovnih porušitev elementov, ki so izpostavljeni nateznim napetostim. Koncentracija napetosti se v oslavljenem prerezu pojavi zaradi oslavitve (npr. luknje za vijak), ki spremeni tok napetosti in posledično material začne teči pri obtežbi, ki je manjša od fiste, ki povzroči tečenje polnega prereza. Dolžina elementa, izpostavljenega tečenju, je odvisna od velikosti oslavitve in od sposobnosti jekla, da se utrjuje. Če jeklo nima te sposobnosti, koncentracije napetosti povzročijo razpoke in krhko porušitev v

oslavljenem prerezu. Po drugi strani pa sposobnost utrjevanja povzroči tečenje materiala v okolici oslavitve in s tem otopitev napetostnih konic (prerazporeditev napetosti) in duktilno porušitev.

Zaradi sodobnih postopkov izdelave in nizke vsebnosti ogljika so jekla visoke trdnosti (v nadaljevanju JVT) dobro variva. Ugodno razmerje med ceno in nosilnostjo povečuje zanimanje za njihovo uporabo. Glede na običajno konstrukcijsko jeklo imajo JVT višjo trdnost in običajno tudi višjo žilavost, vendar manjšo duktilnost.

Projektiranje jeklenih konstrukcij je usmerjeno k duktilnemu odzivu celotne konstrukcije. Pri tem je pomemben prenos obtežbe med elementi, saj lahko pri prenosu nastanejo koncentracije napetosti. Prav tako je za globalno duktilnost pomemben izbor materiala. Znano je, da so JVT manj duktilna od običajnih jekel. Njihova uporaba v konstrukcijskih elementih je bila v preteklosti omejena pretežno na elastično globalno analizo. Standard Evrokod 3 za projektiranje jeklenih konstrukcij SIST EN 1993-1-1 (CEN, 2005a) dovoljuje uporabo jekel do S460, čeprav v konstrukcijski praksi uporabljajo jekla do trdnosti S1300. Za ta namen je kot dodatek k Evrokodu 3 v zadnjem trenutku nastal predlog standarda prEN 1993-1-12 (CEN, 2006), ki

obravnava jekla do S700. Prav tako so v tem standardu določeni nižji kriteriji glede duktilnosti kot v SIST EN 1993-1-1. Priporočene

vrednosti so  $f_u/f_y \geq 1,05$ , deformacija pri porušitvi  $\epsilon_{fr} \geq 10\%$  in  $\epsilon_u \geq 15 f_u/E$  ( $f_y$  – napetost tečenja,  $E$  – elastični modul). Tipično jeklo

S690 ima deformacijo pri natezni trdnosti  $\epsilon_u$  okoli 5 % (Može idr., 2007), deformacija pri porušitvi pa je večja kot 14 %.

## 2 • PROJEKTNÉ NOSILNOSTI EVROKODA 3

Standard SIST EN 1993-1-1 navaja, da se pri prečnih prerezih z luknjami za natezno nosilnost vzame manjša izmed naslednjih dveh vrednosti:

- projektne nosilnosti oslabljenega prereza v območju lukenj za vezna sredstva, ki preprečuje pretrganje oslabljenega prereza  $A_{net}$

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (1)$$

- oziroma projektne plastične nosilnosti polnega prereza, ki preprečuje prekomerno podaljševanje nateznega elementa zaradi tečenja polnega prereza  $A$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}. \quad (2)$$

Za JVT je bila v predlogu standarda prEN 1993-1-12 navedena dodatna zahteva, ki je določila spodnjo mejo nosilnosti oslabljenega prereza.

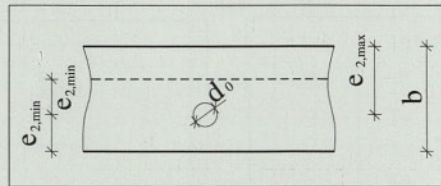
$$N_{t,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}}. \quad (3)$$

Nesimetrično priključen element v nategu se lahko v skladu z SIST EN 1993-1-8 obravnava

kot centrično obremenjen v sodelujočem oslabljenem prerezu. Projektna nosilnost takega elementa, priključenega z enim vijakom, je podana z enačbo:

$$N_{u,Rd} = \frac{2(e_2 - 0,5d_0) t f_u}{\gamma_{M2}}, \quad (4)$$

kjer je  $e_2$  minimalna robna razdalja,  $d_0$  premer luknje in  $t$  debelina pločevine, kot je prikazano na sliki 1. Zaradi pomanjkanja eksperimentalnih rezultatov uporaba enačbe ni dovoljena za JVT (prEN 1993-1-12).



Slika 1 • Sodelujoči del oslabljenega prereza, ki je uporabljen v modelu odpornosti 4

V prejšnjih enačbah koeficienti  $\gamma_{M0}$  predstavljajo delne faktorje odpornosti, ki se uporabljajo skupaj z različnimi karakterističnimi vrednostmi odpornosti. Določeni so s pomočjo statistične analize eksperimentalnih rezultatov, saj je metoda mejnih stanj, ki je

uporabljena v evrokodih, semiprobabilistična metoda. Da bi se izognili prevelikim številom faktorjev odpornosti, so v SIST EN 1993-1-1 definirani trije razredi  $\gamma_M$  faktorjev, kot sledi:

- $\gamma_{M0}$  nosilnost prečnih prerezov,
  - $\gamma_{M1}$  odpornost elementov na nestabilnost,
  - $\gamma_{M2}$  odpornost natezno obremenjenih neto prečnih prerezov na pretrg, vezna sredstva.
- Slovenski nacionalni dodatek k SIST EN 1993-1-1 za delne faktorje odpornosti privzema priporočene vrednosti, in sicer  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$  in  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

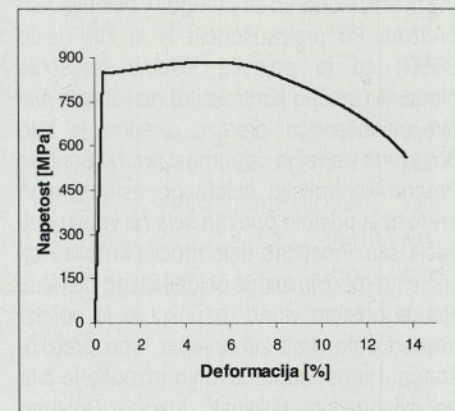
Za JVT je projektna nosilnost (3) vedno odločilna, saj je vedno večja od projektne nosilnosti (1). Ob predpostavki, da za JVT velja  $f_u/f_y \leq 1,10$ , je dokaz trditve enostaven. Sedaj se ob upoštevanju priporočene vrednosti delnega faktorja odpornosti  $\gamma_{M0} = 1,0$  in razmerja med natezno trdnostjo in napetostjo tečenja za JVT porodi vprašanje, ali je projektna nosilnost (3) v skladu s kriteriji zanesljivosti, kot je to določeno v standardu SIST EN 1990 (CEN, 2002a), ki določa osnove za projektiranje konstrukcij. Zanesljivost projektne nosilnosti (3) je bilo glavno vodilo za obsežno eksperimentalno študijo o porušitvi nateznih elementov iz JVT po oslabljenem prerezu. Delni faktorji odpornosti za nosilnost oslabljenih prerezov, uporabljeni v SIST EN 1993-1-1, so določeni v Snijder idr. 1988a in 1988b, kjer so med drugim zbrani in statistično analizirani testni rezultati nosilnosti oslabljenega prereza, vendar večinoma le za običajno jeklo.

## 3 • TESTNI PROGRAM

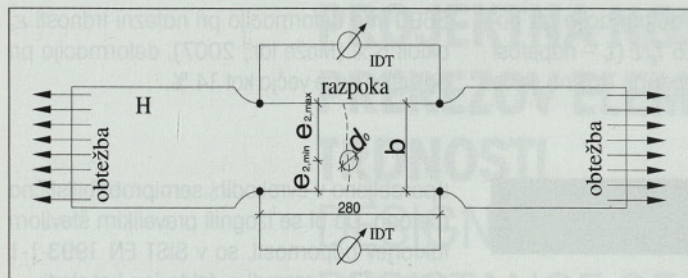
Za izdelavo preizkušancev smo uporabili jekleno ploščo z nominalno debelino  $t = 10$  mm in kvaliteto jekla S690 QL (z nominalno napetostjo tečenja  $f_{yn} = 690$  MPa in nominalno natezno trdnostjo  $f_{un} = 770$  MPa). Dejanske materialne karakteristike smo izmerili v standardnem nateznem testu, izvedenem po SIST EN 10002-1 (CEN, 2002b). Preizkušance smo pripravili po navodilih SIST EN ISO 377 (CEN, 1998). Dejanska napetost tečenja je bila  $f_{y,dej} = 847$  MPa in natezna trdnost  $f_{u,dej} = 885$  MPa ( $f_u/f_y = 1,05$ ). Povprečna

zožitev prereza po porušitvi  $Z = 58,4\%$  nakuže precejšnjo prečno kontrakcijo vzorcev na mestu porušitve in s tem duktilno porušitev. Deformacija pri porušitvi je bila 14,5 %. Delovni diagram enega izmed vzorcev je prikazan na sliki 2.

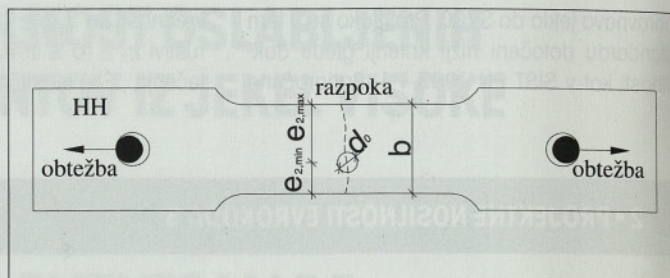
Uporabljene so bile štiri vrste preizkušancev. Preizkušanci H in HH so bili trakovi (pločevine) enakih geometrij z različno velikostjo in pozicijo luknje. Ti trakovi so bili izpostavljeni statični natezni obremenitvi vse do porušitve. Preizkušanci HH so bili členkasto vpeti, H pa togo vpeti



Slika 2 • Delovni diagram jekla S690 (standardni natezni preskus)



Slika 3 • Preizkušalec tipa H

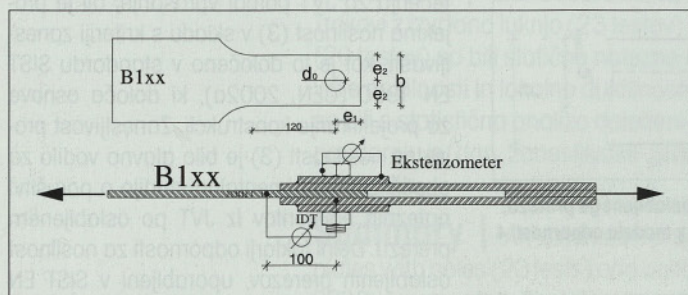


Slika 4 • Preizkušalec tipa HH

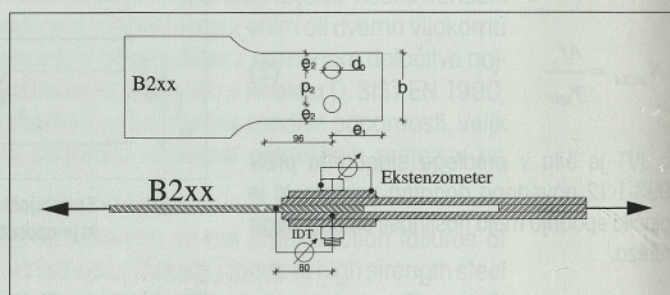
v preizkuševalno napravo. Geometrija vzorcev z merilnimi napravami je prikazana na slikah 3, 4. Vsi preizkušanci so se porušili v neto preseku. Tretja in četrta vrsta preizkušancev so bili prekopni spoji z enim (B1) in dvema (B2) vijakoma (sliki 5, 6). Vezna sredstva so bili vijaki M22 in M27 kvalitete 10.9 in 12.9 v standardnih luknjah. S primerno izbiro dimenzij smo izločili strižno porušitev pločevine in prestrig vijaka. Štirje izmed preizkušancev H so bili narejeni iz običajnega jekla S235 (z nominalno mejo tečenja  $f_{yn} = 235$  MPa). Dejan-

skih materialnih karakteristik za to jeklo nismo izmerili, zato so ti rezultati uporabni zgolj za primerjavo duktilnosti. Testi so bili izvedeni na hidravličnem stroju s kapaciteto obremenitve 1000 kN (slika na naslovnici) s predpisano hitrostjo obremenjevanja (1,5 mm/min). Pomike smo merili z dvema induktivnima merilcema pomikov (IDT), ki sta bila nameščena na obe strani preizkušancev. Pri preizkušancih tipa H je bil merjen pomik med 280 mm oddaljenima točkama, kot je prikazano na sliki 3. Pre-

izkušanci tipa B1 in B2 so bili preko vijakov priključeni na posebne vilice, ki so bile postavljene samo elastičnim deformacijam. Relativni pomik med vilicami in preizkušancem B1 oziroma B2 je bil merjen z IDT-ji. Posebej izdelan ekstenzometer je meril kontrolni pomik med vijakom in vilicami (sliki 5, 6). Vijaki so bili »ročno« priviti, tako da se je obtežba prenašala preko vijakov in ne preko trenja med pločevinami. Zaradi nesimetričnega obremenjevanja IDT-ji niso bili pritrjeni na preizkušance tipa HH.



Slika 5 • Preizkušalec tipa B1



Slika 6 • Preizkušalec tipa B2

#### 4 • REZULTATI TESTOV

Vsi preizkušanci so se pretrgali v oslABLJENEM prerezu. Pri preizkušancih H in HH (jeklo S690) se je pojavilo lokalno tanjšanje pločevin (prečna kontrakcija) na robovih luknje oslABLJENEGA prereza, preden je bila dosežena največja odpornost preizkušancev. Prečna kontrakcija celotnega oslABLJENEGA prereza je postala opazna šele po vnosu največje sile. Plastične deformacije so bile največje na robovih luknje oslABLJENEGA prereza, kjer je nastala vidna razpoka, ki je počasi napredovala proti zunanemu robu preizkušanca. Hitrost napredovanja razpoke je bila neodvisna od velikosti luknje. Opisana obtežna stanja za preizkušalec H10 so prikazana na sliki 7.

O duktilnosti same porušitve priča dejstvo, da se je debelina pločevine na mestu preloma v povprečju zmanjšala za 27 %. Prav tako se je zmanjšala celotna širina preizkušanca, in sicer povprečno za 40 %. Ne glede na dimenzijo luknje se pomik pri največji sili ni bistveno razlikoval (slika 8). Pomik pri porušitvi, to je, ko je nastala vidna razpoka, se je malenkostno povečal z večjo dimenzijo luknje. Z optično primerjavo preizkušancev H04 do H16 smo opazili, da poln (bruto) prerez ni bil izpostavljen plastičnim deformacijam in da se je večina plastičnih deformacij izvršila v bližini oslABLJENEGA prereza. Preizkušanci H17 do H20 so bili narejeni iz jekla S235. Takšno jeklo ima lahko razmerje natezne trdnosti in

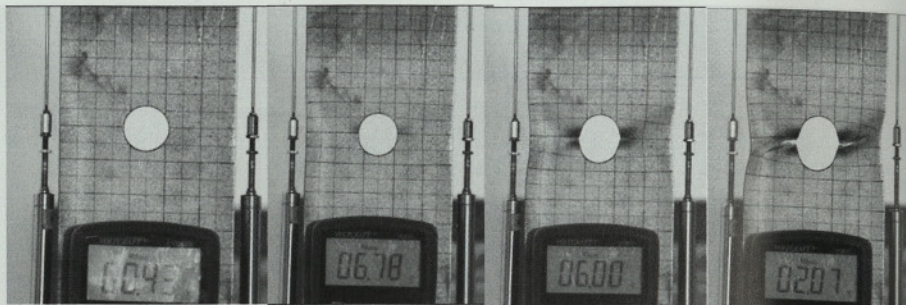
napetosti tečenja  $f_u/f_y$  tudi preko 1,5. Zaradi tako visokega razmerja  $f_u/f_y$  lahko napetost v oslABLJENEM prerezu naraste zelo preko napetosti tečenja  $f_y$ , hkrati pa utrjevanje povzroči tečenje polnega prereza nateznega elementa in s tem tudi velike plastične deformacije, če le luknja ni prevelika. V nasprotju s preizkušanci H04 do H16 (jeklo S690) se krivulje preizkušancev H18 do H20 razlikujejo po obliki in po velikosti pomika pri največji obremenitvi (slika 9). Preizkušanca H04 in H18 imata enako geometrijo, z razmerjem prerezov  $A_{net}/A = 0,9$ , in se razlikujeta samo v kvaliteti jekla. Pomik pri porušitvi za H04 je bil 6,6 mm in 19,4 mm pri H18 (slika 9). Za preizkušalec H18, in tudi v splošnem za običajna jekla, je zaradi visokih razmerij  $A_{net}/A$  in  $f_u/f_y$  kritična projektna odpornost polnega prereza (2). Zaradi udržitve materiala v oslABLJENEM prerezu se je plastičiral polni prerez celotnega elementa, kjer



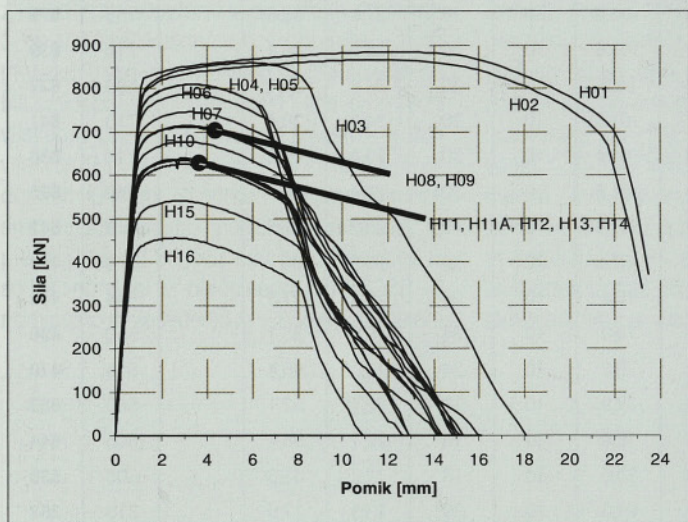
Preizkušane	Ekscentričnost	Nominalne dimenzije (mm, mm <sup>2</sup> )							Dejanske dimenzije (mm, mm <sup>2</sup> )							P <sub>max</sub> (kN)
		b	f	d <sub>0</sub>	e <sub>2,min</sub> -d <sub>0</sub> /2	e <sub>2,max</sub> -d <sub>0</sub> /2	p <sub>z</sub> -d <sub>0</sub>	A <sub>net</sub>	b	f	d <sub>0</sub>	e <sub>2,min</sub> -d <sub>0</sub> /2	e <sub>2,max</sub> -d <sub>0</sub> /2	p <sub>z</sub> -d <sub>0</sub>	A <sub>net</sub>	
H01	Ne	100	10	0	50	50		1000	101,3	10	0				1013	868
H02	Ne	100	10	0	50	50		1000	101,5	10	0	50,0	50,0		1015	886
H03	Ne	100	10	5	47,5	47,5		950	101,9	10	5	47,7	48,8		969	861
H04	Ne	100	10	10	45	45		900	100,9	10	10	45,0	45,4		909	811
H05	Ne	100	10	10	45	45		900	101,3	10	10	45,4	45,8		913	811
H06	Ne	100	10	13	43,5	43,5		870	101,7	10	13	44,3	44,4		887	789
H07	Ne	100	10	18	41	41		820	101,3	10	18	41,7	42,0		833	747
H08	Ne	100	10	22	39	39		780	101,7	10	22	39,6	39,7		797	716
H09	Ne	100	10	22	39	39		780	102,4	10	22	39,6	40,9		804	713
H10	Ne	100	10	26	37	37		740	101,6	10	26	37,0	38,6		756	679
H11	Ne	100	10	30	35	35		700	101,6	10	30	35,1	36,4		716	639
H11A	Ne	100	10	30	35	35		700	99,9	10	30	34,8	35,1		699	627
H12	Ne	100	10	30	35	35		700	101,3	10	30	34,5	36,4		713	641
H13	Da	100	10	30	28	42		700	101,4	10	30	29,4	42,0		714	636
H14	Da	100	10	30	21	49		700	101,6	10	30	22,4	49,1		716	635
H15	Ne	100	10	40	30	30		600	101,8	10	40	29,2	32,5		618	542
H16	Ne	100	10	50	25	25		500	101,6	10	50	25,5	26,1		516	456
HH01	Da	80	10	24	28	28		560	78,4	10	24	26,4	27,3		544	499
HH02	Da	80	10	24	22	34		560	79,0	10	24	19,9	35,1		550	490
HH03	Da	80	10	24	16	40		560	78,5	10	24	14,1	40,4		545	470
HH04	Da	80	10	18	31	31		620	77,9	10	18	22,7	32,1		599	553
HH05	Da	80	10	18	25	37		620	78,5	10	18	22,1	38,4		605	544
HH06	Da	80	10	18	19	43		620	78,5	10	18	17,2	43,3		605	536
B101	Ne	60	10	30	15	15		300	61,0	10	30	13,5	17,5		310	262
B104	Ne	60	10	30	15	15		420	71,7	10	30	20,8	20,9		417	360
B105	Ne	72	10	30	21	21		420	72,0	10	30	19,8	22,2		420	355
B106	Ne	80	10	30	25	25		500	81,0	10	30	24,8	26,2		510	445
B107	Ne	80	10	30	25	25		500	80,5	10	30	24,5	26,0		505	370
B108	Da	80	10	30	20	30		500	81,1	10	30	20,1	31,0		511	440
B113	Ne	90	10	30	30	30		600	90,3	10	30	28,9	31,4		603	516
B114	Ne	90	10	30	30	30		600	90,0	10	30	28,7	31,1		600	510
B115	Da	90	10	30	35	25		600	90,3	10	30	24,0	36,3		603	435
B122	Ne	120	10	30	45	45		900	118,8	10	30	43,6	45,2		888	788
B123	Ne	80	10	24	28	28		560	78,8	10	24	26,6	28,1		548	483
B124	Da	80	10	24	22	34		560	79,1	10,20	24	22,5	32,5		562	400
B125	Da	80	10	24	16	40		560	79,1	10,15	24	16,4	38,7		559	322
B201	Ne	96	10	24	12	12	24	480	97,2	10	24	11,1	13,3	24,8	492	458
B203	Ne	115	10	24	17	17	33	670	115,9	10	24	16,7	18,4	32,8	679	644
B204	Ne	123	10	24	17	17	33	750	124,1	10	24	16,9	18,5	32,6	761	639
B205	Ne	129	10	24	17	17	41	810	129,8	10	24	17,0	18,4	40,7	818	690
B207	Ne	137	10	24	24	24	41	890	137,0	10	24	23,5	24,6	40,9	890	790
B212	Ne	144	10	24	24	24	48	960	144,4	10	24	23,3	24,9	48,2	964	851
B213	Ne	121	10	24	20	20	33	730	121,0	10	24	19,8	19,9	33,3	730	678
H17*	Ne	100	10	0	50	50		1000	101,3	10	0				1013	492
H18*	Ne	100	10	10	45	45		900	101,1	10	10	45,3	45,8		911	461
H19*	Ne	100	10	22	39	39		780	101,2	10	22	39,4	39,8		792	402
H20*	Ne	100	10	50	25	25		500	100,8	10	50	24,9	25,9		508	191

Preglednica 1 • Geometrija in nosilnosti preizkušancev (\* jeklo S235, preizkušanci niso vključeni v statistično analizo)

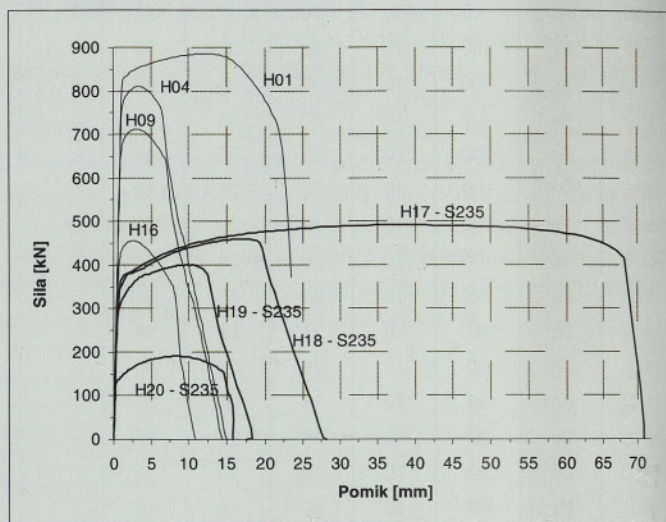
so se pojavile velike plastične deformacije, ki so povzročile velik pomik pri porušitvi. Zaradi omejitve le-teh je projektna nosilnost nateznega elementa omejena z enačbo (2). Nizko razmerje  $f_{td}/f_y$ , pa preizkušancu H04 ni dovolilo tečenja polnega prereza, zato so se plastične deformacije, ki so povzročile večji del pomika, izvršile le v oslavljenem prerezu. Slika 12 prikazuje oba preizkušanca po porušitvi. Preizkušanci H in HH so predstavljali element z oslavitvijo v nategu, kjer je napetostni tok ovirala luknja, medtem ko so bili preiz-



Slika 7 • Preizkušavec H10 med testom (elastično območje 4,3 kN, največja odpornost 678 kN, trenutek pred prvo razpoko 600 kN, prelom 207 kN)



Slika 8 • Diagram sila-pomik za H01 do H16 (jeklo S690) – vidna razpoka nastopi pri strmem padcu krivulje

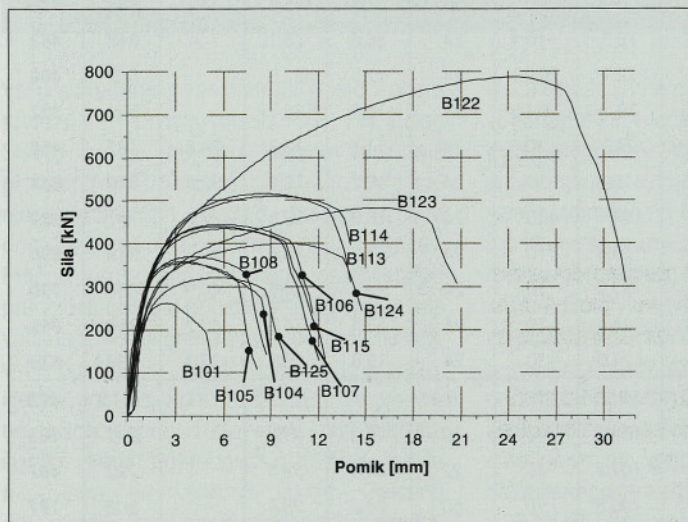


Slika 9 • Diagram sila-pomik za preizkušance H – primerjava med S690 in S235

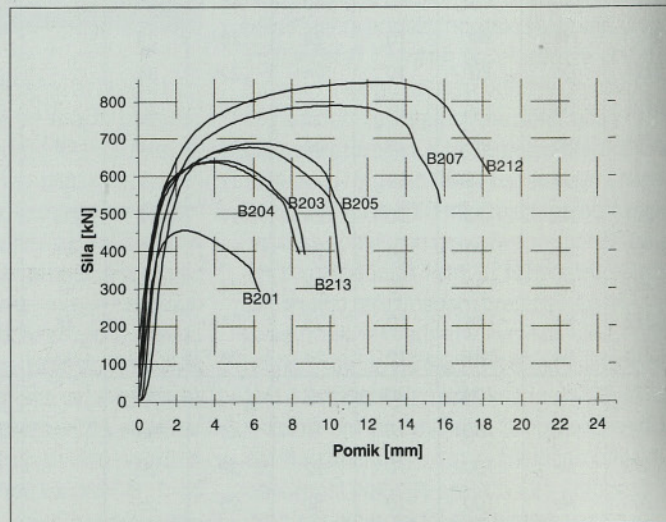
kušanci B1 in B2 vijачeni spoji, pri katerih se je obtežba prenesla na sosednji pločevini preko vijaka. Robna razdalja v smeri obtežbe  $e_1$  je bila zadosti velika, da so se preizkušanci B1 in B2 porušili v oslavljenem prerezu

in ne npr. v strigu. Plastične deformacije so bile omejene na oslavljen prerez in njegovo okolico. Oblika krivulj sila-pomik za B1 in B2 je podobna krivuljam H. Razlika je najbolj očitna v začetni togosti. Pri B1 in B2 pride do

koncentracije napetosti pri bočnem pritisku vijaka na pločevino. Tečenje jekla na mestu koncentracije napetosti povzroči manjši naklon krivulje (sliki 10 in 11) v začetnem delu obtežne poti. Čeprav se JVT zaradi nizkega



Slika 10 • Diagram sila-pomik za preizkušance B1



Slika 11 • Diagram sila-pomik za preizkušance B2

razmerja  $f_u/f_y$  pripisuje nizko duktilnost, se je izkazalo, da ima veliko lokalno duktilnost. Pri preizkušancu B122 (slika 13) se je zaradi nastanka plastičnih deformacij pri bočnem pritisku vijaka na pločevino debelina pločevine povečala z 10 mm na 20 mm. Nastanek velikih pomikov pri B122 je posledica ova-

lizacije luknje. O lokalni duktilnosti spojev iz JVT so poročali že drugi avtorji (Može idr, 2007).

Preizkušanci z ekscentrično luknjo so se porušili na dva načina. Pri preizkušancih H je razpoka nastala istočasno na obeh robovih luknje v oslabljenem prerezu ne glede na

položaj luknje, pri HH in B1 pa je razpoka nastala na strani z manjšo robno razdaljo. Ekscentričnost luknje je na nosilnost bistveno vplivala samo pri preizkušancih B1, medtem ko pri H in HH nosilnost ni bila bistveno zmanjšana. Odpornost in geometrija vseh preizkušancev je podana v preglednici 1.

## 5 • STATISTIČNO OVREDNOTENJE REZULTATOV

Namen statistične analize je bila določitev ustreznosti različnih modelov odpornosti in delnega faktorja  $\gamma_M$ , ki je definiran kot količnik med karakteristično in projektno vrednostjo. V Aneksu D standarda SIST EN 1990 je postopek za izračun karakteristične oziroma projektno vrednosti podrobno opisan. Pri tem so upoštevane naslednje predpostavke (Gulvnessian idr, 2002):

- model odpornosti je funkcija neodvisnih spremenljivk  $X$
- na voljo je zadostno število testov,
- izmerjene so vse pomembne geometrijske in materialne lastnosti,
- spremenljivke modela odpornosti so med seboj (statistično) neodvisne,
- vse statistične spremenljivke zavzemajo normalno ali log-normalno porazdelitev.

Karakteristična vrednost je vrednost s predpisano verjetnostjo (5 % kvantila), da ne bo dosežena v hipotetično neomejeni vrsti preskusov. Za projektno vrednost pa velja, da je verjetnost pojava nižje vrednosti malo manjša kot 0,01 %.

V prvem koraku analize je potrebno definirati teoretični model odpornosti, ki ustreza eksperimentalnim rezultatom  $r_e$ . Funkcija teoretičnih odpornosti  $r_t$  je ovrednotena z izmerjenimi vrednostmi geometrijskih in materialnih lastnosti.

V analizi smo obravnavali tri modele odpornosti. Prvi model je osnovan na predpostavki, da se celoten oslabljen prerez polno plastificira do natezne trdnosti  $f_u$ . Ker je model definiran s porušitvijo, je projektna vrednost povezana z delnim faktorjem  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

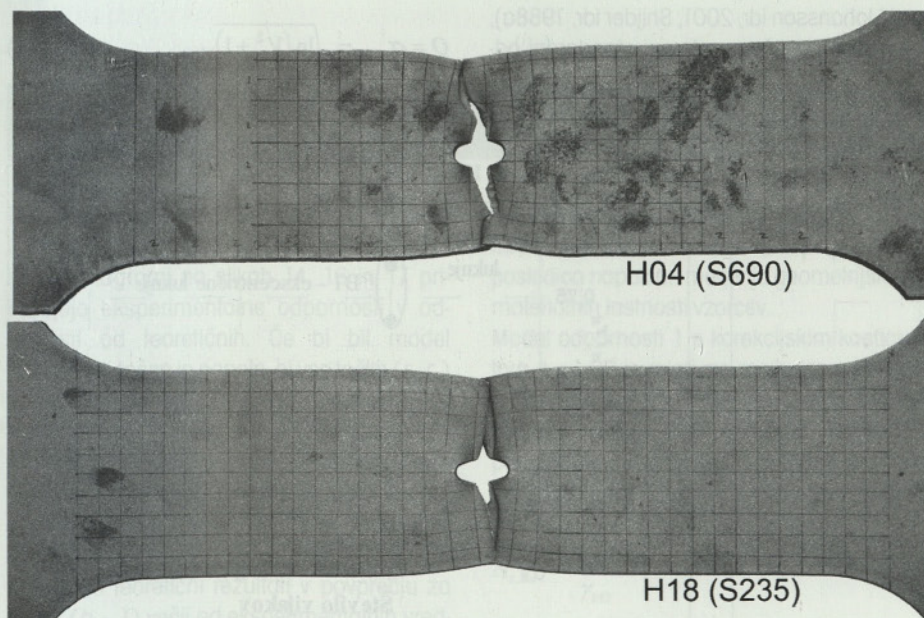
$$\text{Model odpornosti 1: } r_{t,1} = A_{net} f_u \quad (5)$$

Model odpornosti 1, pomnožen s koeficientom 0,9, je uporabljen v SIST EN 1993-1-1. Predlagan je bil za mehka jekla (Snijder idr, 1988a) in je bil izbran tako, da projektna funkcija zadovoljuje varnostne kriterije z izbranim delnim faktorjem  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

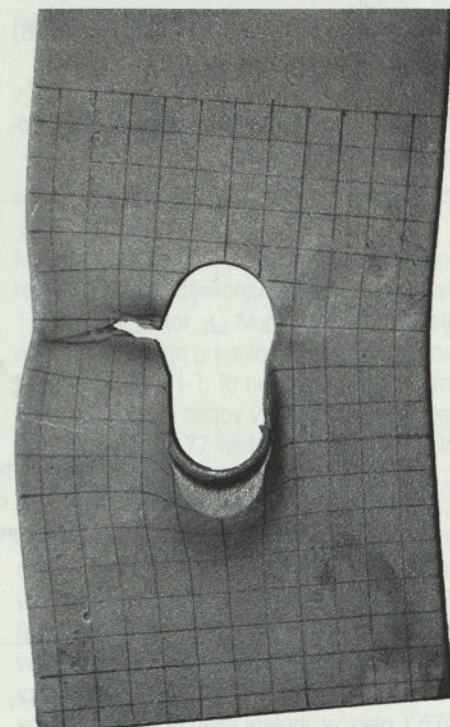
Drugi model odpornosti predvideva, da je oslabljen prerez obremenjen samo do napetosti tečenja  $f_y$ . Za duktilne materiale (kot je npr. mehko jeklo), ki imajo sposobnost utrjevanja, je to konservativna predpostavka. Tak pristop je bil uporabljen v osnutku prEN 1993-1-12.

$$\text{Model odpornosti 2: } r_{t,2} = A_{net} f_y \quad (6)$$

Nesimetrična natezna obremenitev ali ekscentričnost luknje povzroči nižjo nosilnost. Tretji model odpornosti predvideva, da se takšni elementi obravnavajo kot centrično obremenjeni elementi na sodelujočem pre-



Slika 12 • Prelom preizkušancev enake geometrije z različnim materialom



Slika 13 • Porušitev v oslabljenem prerezu preizkušanca B122

rezu (slika 1). Projektna nosilnost nesimetrično obremenjenega elementa, priključnega z enim vijakom v standardu SIST EN 1993-1-8, izhaja iz naslednje funkcije.

$$\text{Model odpornosti 3: } r_{i,3} = (2e_{2,\min} - d_0) t \cdot f_u \quad (7)$$

Modela odpornosti 1 in 2 sta med seboj linearno odvisna, saj so bili vsi preizkušanci izdelani iz ene jeklene plošče. Diagram na sliki 14 prikazuje eksperimentalne odpornosti  $r_{ei}$  v odvisnosti od teoretičnih odpornosti  $r_{ti}$  za model odpornosti 1. Raztros točk je majhen. Izjemo predstavljajo rezultati ekscentričnih preizkušancev B1 s prenosom obtežbe preko vijaka. Da bi izločili vpliv ekscentrične obremenitve, smo rezultate razdelili v več skupin:

- skupina 0: vsi rezultati
- skupina 1: samo rezultati s centrično postavljenjo luknjo
- skupina 2: vsi rezultati, razen B1 z ekscentrično postavljenjo luknjo (vključno s preizkušanci tipa H in HH z ekscentrično postavljenjo luknjo)
- skupina 3: vsi rezultati z ekscentrično postavljenjo luknjo
- skupina 4: samo B1 rezultati z ekscentrično postavljenjo luknjo

Srednja vrednost korekcijskega faktorja  $b$  se določi po metodi najmanjših kvadratov.

$$b = \frac{\sum_i r_{ei} r_{ti}}{\sum_i r_{ti}^2} \quad (8)$$

Napaka  $\delta_i$  za vsako eksperimentalno vrednost se določi po enačbi:

$$\delta_i = \frac{r_{ei}}{br_{ti}} \quad (9)$$

Sledi izračun srednje vrednosti teoretične odpornosti  $r_{m}$ , ki se jo izračuna s srednjimi vrednostmi osnovnih spremenljivk  $X_m$ :

$$r_m = br_r(X_m)\delta = bg_{rr}(X_m)\delta \quad (10)$$

Za izračun prereza so za srednje vrednosti geometrijskih spremenljivk privzete kar nominalne vrednosti. Srednje vrednosti materialnih lastnosti so pridobljene iz standardnega nateznega testa.

Na osnovi napake za eksperimentalno vrednost  $\delta_i$  se najprej določi njen logaritem, nato se oceni srednja vrednost  $\bar{\Delta}$ , sledi ocena  $s_{\Delta}$  cenilke standardne deviacije za  $n$  vzorcev in končno še ocena koeficienta variacije  $V_{\delta}$  za raztros:

$$\Delta_i = \ln(\delta_i) \quad (11)$$

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (12)$$

$$s_{\Delta}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 \quad (13)$$

$$V_{\delta} = \sqrt{\exp(s_{\Delta}^2) - 1} \quad (14)$$

Vpliv negotovosti materialnih karakteristik in toleranc pri izdelavi elementov se zajame s koeficienti variacij  $V_{X_i}$ , ki so povzeti iz literature (Johansson idr, 2001; Snijder idr, 1988a), s katerimi povečamo skupni standardni od-

klon. V analizi smo uporabili naslednje koeficiente:

$$V_{d_0} = 0,005 \quad \text{koeficient variacije za premer luknje} \quad (15)$$

$$V_{f_y} = V_f = 0,07 \quad \text{koeficient variacije za napetost tečenja} \quad (16)$$

$$V_{f_u} = V_f = 0,07 \quad \text{koeficient variacije za natezno trdnost} \quad (17)$$

$$V_t = 0,05 \quad \text{koeficient variacije za debelino pločevine} \quad (18)$$

$$V_b = 0,005 \quad \text{koeficient variacije za širino elementa} \quad (19)$$

Za majhne vrednosti  $V_{\delta}^2$  in  $V_{X_i}^2$  se lahko uporabi poenostavljen postopek za določitev koeficienta variacije  $V_r$ :

$$V_r^2 = V_{\delta}^2 + V_{X_i}^2 \quad (20)$$

kjer je

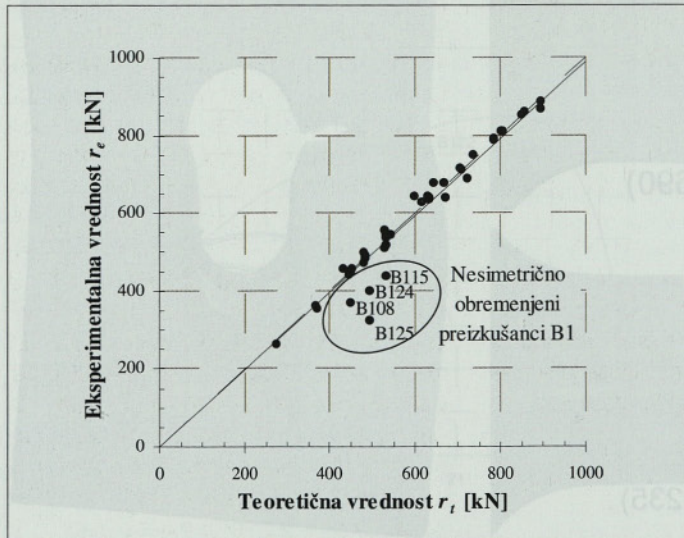
$$V_{X_i}^2 = \sum_{i=1}^j V_{X_i}^2 \quad (j - \text{število različnih koeficientov variacij}) \quad (21)$$

Pri izračunu karakteristične in projektne vrednosti potrebujemo še naslednje koeficiente:

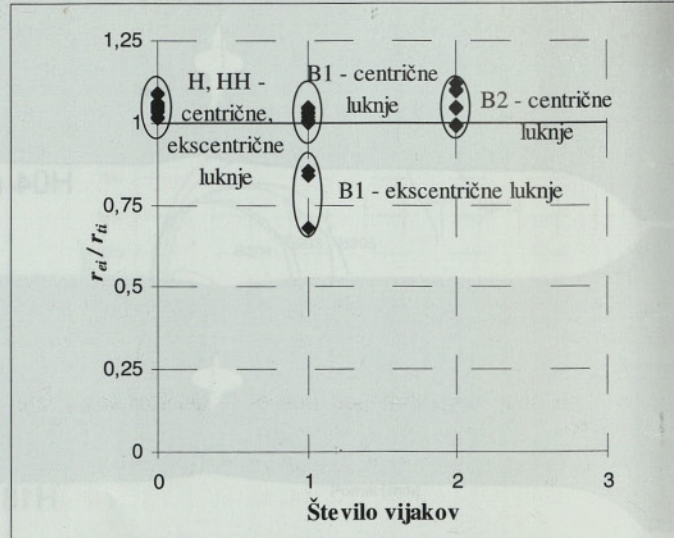
$$Q_{rr} = \sigma_{\ln(r_r)} = \sqrt{\ln(V_r^2 + 1)} \quad (22)$$

$$Q_{\delta} = \sigma_{\ln(\delta)} = \sqrt{\ln(V_{\delta}^2 + 1)} \quad (23)$$

$$Q = \sigma_{\ln(r)} = \sqrt{\ln(V_r^2 + 1)} \quad (24)$$



Slika 14 • Diagram  $r_e$ - $r_t$  za model odpornosti 1, skupina podatkov 0



Slika 15 • Občutljivostni diagram za št. vijakov - model odpornosti 2, skupina podatkov 0

$$\alpha_{r_i} = \frac{Q_{r_i}}{Q}, \quad (25)$$

$$\alpha_{\delta} = \frac{Q_{\delta}}{Q}. \quad (26)$$

Karakteristično vrednost za omejeno število preskusov izračunamo po naslednji enačbi:

$$r_k = b g_{r_i}(\underline{X}_m) \exp(-k_{\infty} \alpha_{r_i} Q_{r_i} - k_n \alpha_{\delta} Q_{\delta} - 0,5 Q^2) = b g_{r_i}(\underline{X}_m) \cdot R_k. \quad (27)$$

Podobno za omejeno število preskusov izračunamo še projektno vrednost:

$$r_d = b g_{r_i}(\underline{X}_m) \exp(-k_{d,\infty} \alpha_{r_i} Q_{r_i} - k_{d,n} \alpha_{\delta} Q_{\delta} - 0,5 Q^2) = b g_{r_i}(\underline{X}_m) \cdot R_d. \quad (28)$$

V enačbah (27) in (28) faktorje kvantile  $k_n$ ,  $k_{d,n}$ ,  $k_{\infty}$  in  $k_{d,\infty}$  odčitamo iz ustreznih preglednic v SIST EN 1990. Faktorji, ki smo jih uporabili pri statistični analizi, so navedeni v preglednici 2.

Delni faktor odpornosti  $\gamma_M$ , ki poleg materialne negotovosti upošteva tudi negotovost geometrije in modela odpornosti, se izračuna v dveh korakih direktno iz karakteristične, projektno in nominalne odpornosti.

Začetna ocena za faktor odpornosti  $\gamma_M$  je definirana kot razmerje med karakteristično in projektno vrednostjo:

$$\gamma_M = \frac{r_k}{r_d} = \frac{\exp(-k_{\infty} \alpha_{r_i} Q_{r_i} - k_n \alpha_{\delta} Q_{\delta} - 0,5 Q^2)}{\exp(-k_{d,\infty} \alpha_{r_i} Q_{r_i} - k_{d,n} \alpha_{\delta} Q_{\delta} - 0,5 Q^2)} = \frac{R_k}{R_d}. \quad (29)$$

Funkcija projektno odpornosti vsebuje osnovne spremenljivke, definirane kot nominalne vrednosti  $\underline{X}_n$ . Za nominalne vrednosti materialnih lastnosti lahko privzamemo karakteristične vrednosti, ki jih določimo iz dejanskih oziroma izmerjenih materialnih lastnosti. Ta korak je mogoč le z uporabo predhodnega znanja in z upoštevanjem zgornje meje (konservativna predpostavka) koeficienta variacij  $V_f$ , ki ga poznamo iz velikega števila predhodnih testov. Razlika med nominalnimi in dejanskimi materialnimi lastnostmi izbranega jekla je lahko zelo velika in posledično bi bila lahko izbira delnega faktorja nepravilna. Jeklo, uporabljeno v testih, je bilo deklarirano kot S690 z nominalnimi mehanskimi lastnostmi  $f_{yn} = 690$  MPa,  $f_{uN} = 770$  MPa, ki se uporabijo pri kontroli nosilnosti, izmerjene vrednosti pa so bile precej višje od nominalnih:  $f_{y,dej} = 847$  MPa,  $f_{u,dej} = 885$  MPa. Potemtakem lahko karakteristično vrednost za materialno lastnost določimo po naslednji enačbi:

$$r_k = \exp(-2,0 V_f - 0,5 V_f^2) r_{em}, \quad (30)$$

kjer je  $V_f$  največji koeficient variacije določen na podlagi predhodnih testov in  $r_{em}$  srednja vrednost vsaj treh testov. Postopek je omejen z enačbo, v kateri je  $r_{ee}$  največja izmerjena vrednost:

$$|r_{ee} - r_{em}| \leq 0,1 r_{em}, \quad (31)$$

Koeficienta variacije za  $V_f$  (16) in (17) sta vzeta iz literature. V Snijder idr. 1988a podajajo koeficient za  $f_u$  neodvisno od kvalitete jekla. Čeprav so naredili nekaj testov tudi iz JVT, sklepamo, da je bil koeficient določen za mehka jekla. V naši študiji smo uporabili enako vrednost koeficienta. Sedaj izračunamo karakteristične vrednosti napetost tečenja in natezne trdnosti uporabljenega jekla po enačbi (30):

$$f_{yk} = \exp(-2 \cdot 0,07 - 0,5 \cdot 0,07^2) f_{y,act} = 0,867 \cdot 847 = 735 \text{ N/mm}^2, \quad (32)$$

$$f_{uk} = 0,867 \cdot 885 = 767 \text{ N/mm}^2. \quad (33)$$

Nominalno odpornost torej dobimo, če v modelu odpornosti upoštevamo nominalne spremenljivke.

$$r_n = g_{r_i}(\underline{X}_n). \quad (34)$$

Faktor  $k_c$  definiramo kot kvocient nominalne in karakteristične vrednosti.

$$k_c = \frac{r_n}{r_k}. \quad (35)$$

Sedaj zapišemo končno vrednost delnega faktorja odpornosti:

$$\gamma_M^* = k_c \gamma_M = \frac{r_n}{r_k} \frac{r_k}{r_d} = \frac{r_n}{r_d}. \quad (36)$$

saj je zahtevani delni faktor odpornosti  $\gamma_M^* = 1,154$  manjši od  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

Model odpornosti 1, pomnožen s koeficientom 0,9 (v nadaljevanju model odpornosti 1'), in delni faktor  $\gamma_{M2}$  tvorita projektno nosilnost oslabljenega prereza (1), ki je definirana v SIST EN 1993-1-1. Ta nosilnost je bila določena na podlagi testov v Snijder 1988a, kjer je bilo izvedeno 77 testov za jeklo S235 in 6 testov za ostala jekla (3 testi iz A43 in 3 testi iz St460). Korekcijski koeficient  $b = 1,242$  in predvsem ocena koeficienta variacije za raztros  $V_{\delta} = 0,139$  sta bila za jeklo S235 velika v primerjavi z našimi rezultati v preglednici 2. Razlog za velik raztros rezultatov je verjetno veliko število virov z zelo različno natančnostjo meritev. Za jeklo kvalitet A43 in St460 so bili izračunani delni faktorji  $\gamma_M^*$  celo 1,570 in 1,554, čeprav je bila ocena koeficienta variacije  $V_{\delta}$  zelo majhna ( $V_{\delta} = 0,030$  in

## 6 • KOMENTAR REZULTATOV

Rezultati statistične analize so za vse modele in skupine podatkov predstavljeni v preglednici 2. Diagrami na slikah 14, 16 in 17 prikazujejo eksperimentalne odpornosti v odvisnosti od teoretičnih. Če bi bil model odpornosti točen in popoln, bi vse točke ( $r_{th}$ ,  $r_{ex}$ ) ležale na simetrali prvega kvadranta. V splošnem so te točke raztresene zaradi nepravilnega modela odpornosti, raztrosa materialnih lastnosti in merskih napak. Poenostavljeno rečeno velja, da če je korekcijski koeficient  $b > 1$  in  $V_{\delta}$  majhen (npr.  $V_{\delta} < 0,05$ ), potem so teoretični rezultati v povprečju za faktor  $(b - 1)$  večji od eksperimentalnih vrednosti. Ob povečanem  $V_{\delta}$  in enakem  $b$  se poveča tudi vrednost delnega faktorja  $\gamma_M$ . Torej je

določitev delnega faktorja  $\gamma_M$  občutljiva za raztros točk oziroma na velik  $V_{\delta}$ , ki pa je lahko le posledica napak pri merjenju geometrijskih ali materialnih lastnosti vzorcev.

Model odpornosti 1 s korekcijskim koeficientom  $b = 1,00$  in relativno majhnim raztrosom točk najbolje opisuje mejno nosilnost oslabljenega prereza. Ker je model definiran s porušitvijo, se projektni nosilnosti predpiše delni faktor  $\gamma_{M2}$ . Torej, projektna nosilnost

$$N_{r,Rd} = \frac{A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (37)$$

za skupino podatkov 1 izpolnjuje zahteve zanesljivosti po standardu SIST EN 1990,

Model odpornosti	Skupina podatkov	Št. testov	$k_n$	$k_d$	$b$	$V_\delta$	$V_r$	$\gamma_M$	$\gamma_M^*$
1 enačba (5)	0	43	1,73	3,44	0,987	0,087	0,123	1,210	1,317
	1	32	1,73	3,44	1,000	0,030	0,091	1,140	<b>1,154</b>
	2	38	1,73	3,44	1,001	0,028	0,091	1,138	1,151
1*	0	43	1,73	3,44	1,097	0,087	0,123	1,210	1,185
	1	32	1,73	3,44	1,111	0,030	0,091	1,140	<b>1,039</b>
	2	38	1,73	3,44	1,112	0,028	0,091	1,138	1,036
3 enačba (6)	0	43	1,73	3,44	1,031	0,087	0,123	1,210	1,261
	1	32	1,73	3,44	1,045	0,030	0,091	1,140	<b>1,104</b>
	2	38	1,73	3,44	1,045	0,028	0,091	1,138	1,101
4 enačba (7)	3	11	1,73	3,44	1,250	0,239	0,254	1,523	1,680
	4	5	2,33	7,85	1,027	0,037	0,094	1,213	<b>1,213</b>
	4°	5	1,73	3,44	1,027	0,037	0,094	1,146	1,136

\* faktorji kvantile so določeni ob predpostavki, kot da je bilo narejeno veliko število testov

Preglednica 2 • Rezultati statistične analize

$V_\delta = 0,060$ ). Majhno število testov pogojuje večja faktorja kvantile  $k_n$  in  $k_d$  in posledično večji delni faktor  $\gamma_M^*$ . Na sliki 18 so prikazane eksperimentalne vrednosti v odvisnosti od projektnih za model odpornosti 1\* in skupino rezultatov 2. Iz preglednice 2 je očitno, da je vrednost zahtevanega delnega faktorja  $\gamma_M^* = 1,039$  krepko pod  $\gamma_{M2} = 1,25$ . Iz navedenega sledi, da je projektna nosilnost (1) za JVT zelo konservativna.

Definicija modela odpornosti 2 je po svoji filozofiji konservativna. Projektna odpornost, osnovana na neprimernem delnem faktorju, je lahko premalo zanesljiva. Zahtevani delni faktor za model odpornosti 2 je  $\gamma_M^* = 1,104$ . Potemtakem sledi, da projektna nosilnost oslavljenega prereza (3) z delnim faktorjem  $\gamma_{M0} = 1,00$ , kot je bila definirana v osnutku predloga standarda prEN 1993-1-12, ni v skladu s kriterijem zanesljivosti po SIST EN

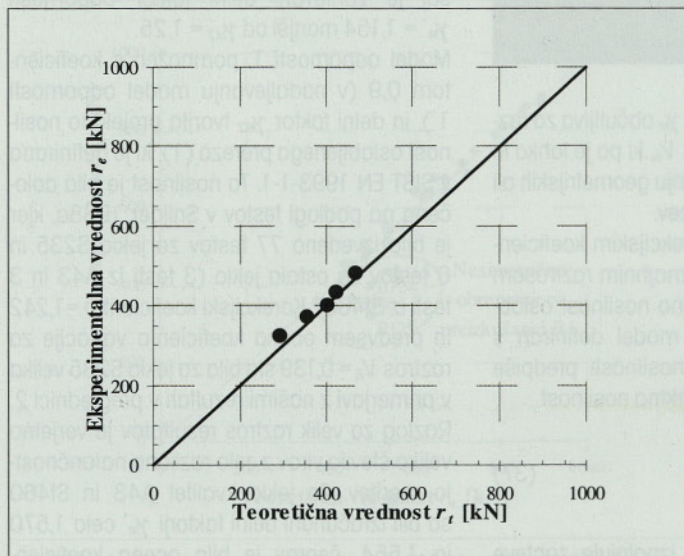
1990. Na podlagi teh rezultatov je bil člen, ki določa spodnjo mejo projektno nosilnosti oslavljenega prereza JVT, v zadnjem osnutku predloga standarda prEN 1993-1-12 umaknjen. Nov člen predvideva, da je projektna nosilnost oslavljenega prereza za JVT enaka kot za običajna jekla (model odpornosti 1\*). Ekscentričnost luknje se je izkazala za pomembno pri preizkušancih B1, medtem ko pri preizkušancih H in HH ni imela vpliva na nosilnost. V prid trditvi govorijo rezultati na sliki 14, kjer samo preizkušanci B1 z ekscentrično luknjo odstopajo od ostalih rezultatov. Podobno lahko sklepamo iz občutljivostnega diagrama na sliki 15. Na sliki 16 je predstavljen diagram eksperimentalnih vrednosti v odvisnosti od modela odpornosti 3 za skupino podatkov 4. Kljub samo štirim testom je projektna odpornost (4) sprejemljiva, saj je zahtevani delni faktor  $\gamma_M^* = 1,213$  manjši od  $\gamma_{M2}$ .

Majhen raztros točk za to skupino  $V_\delta = 0,037$  in nizek korekcijski faktor  $b = 1,027$  še dodatno potrjujeta primernost modela odpornosti. Zanimiv primer se pokaže na sliki 17, kjer so prikazani vsi rezultati z ekscentrično luknjo (skupina podatkov 3). Zaradi velikega raztrosa točk je zahtevani delni faktor zelo velik  $\gamma_M^* = 1,680$ . Dokazali smo, da ekscentričnost luknje ne vpliva na nosilnost preizkušancev H in HH, zato je potrebno te preizkušance izločiti iz skupine podatkov pri obravnavanju modela 3, ki je za te rezultate nepravilen in netočen, pa čeprav je vedno konservativen. Projektno nosilnost oslavljenega prereza elementa v nategu z ekscentrično oslavitvijo se seveda lahko za preizkušance H in HH preveri tudi po enačbi (4). V tem primeru bo rezultat konservativen.

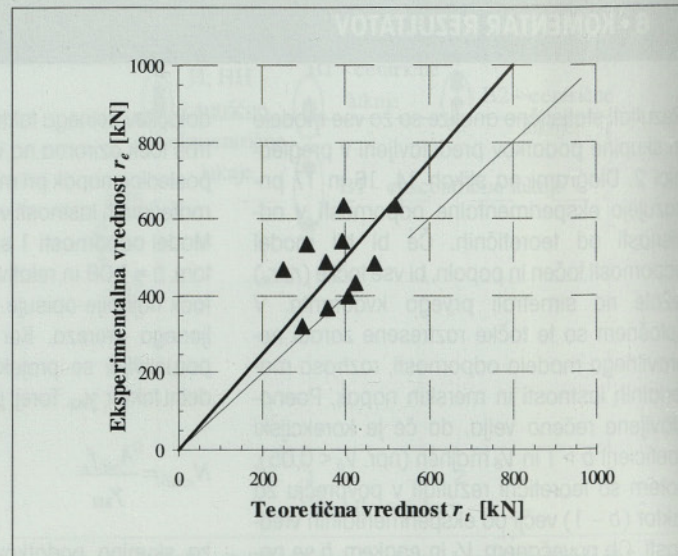
Projektno nosilnost (3) lahko obravnavamo tudi na nekoliko drugačen, bolj inženirski način. Standard SIST EN 10025-6 (CEN, 2005c) pravi, da jeklo ovrednotimo kot S690, če med drugim izpolnjuje pogoja, da sta napetost tečenja in natezna trdnost večji od nominalnih ( $f_{yn} = 690$  MPa,  $f_{un} = 770$  MPa). Za S690 in jekla višjih trdnosti je vrednost razmerja  $f_u/f_y$  pogosto enako 1,05. To je bilo dokazano v neodvisnih študijah po celotnem svetu (Može idr 2007). Ob upoštevanju te predpostavke je napetost tečenja jekla, ki je ovrednoten kot S690, vsaj:

$$f_{yn}^* = \frac{f_{un}}{1,05} = \frac{770 \text{ MPa}}{1,05} = 733 \text{ MPa} \quad (38)$$

Ker je minimalna zagotovljena napetost tečenja  $f_{yn}^* = 733$  MPa večja od minimalne



Slika 16 • Diagram  $r_e-r_t$  za model odpornosti 3, skupina podatkov 4

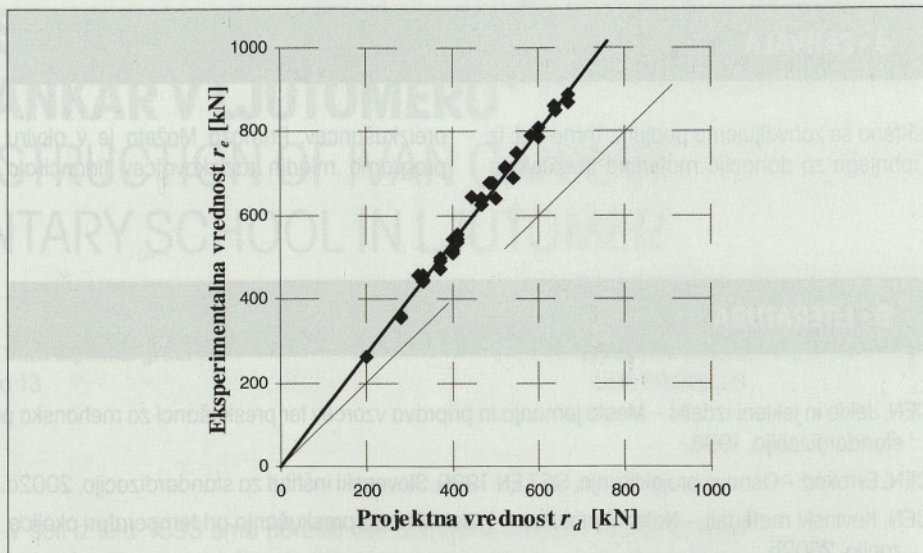


Slika 17 • Diagram  $r_e-r_t$  za model odpornosti 3, skupina podatkov 3

definirane napetosti tečenja  $f_y = 690$  MPa, je v projektni nosilnosti (3) skrita »dodatna varnost«, ki je enaka:

$$\gamma_{dod} = \frac{f_{yn}^*}{f_{yn}} = \frac{733}{690} = 1,06. \quad (39)$$

Kljub temu je »dodatna varnost«  $\gamma_{dod} = 1,06$  manjša od delnega faktorja izračunanega v statistični analizi  $\gamma_M = 1,104$ .



Slika 18 • Diagram  $r_e$ - $r_d$  za model odpornosti 1', skupina podatkov 2

## 7 • SKLEP

Jekla visoke trdnosti zaradi nizkega razmerja napetosti tečenja in natezne trdnosti veljajo kot manj duktilna. Zato naj bi bila primerna samo za elastično analizo. Problem je v tem, da se neelastično obnašanje skriva v kar nekaj nominalno elastičnih kontrolah, ki zahtevajo zadostno lokalno duktilnost materiala. V tem članku obravnavamo projektno nosilnost oslabljenega prereza, kot je definirana v EN 1993-1-12. Narejena je bila eksperimentalna preiskava nateznih trakov z luknjo in vijachenih spojev z namenom ugotovitve lokalne duktilnosti in nosilnosti oslabljenih prerezov. Uporabili smo jeklo S690 z razmerjem  $f_u/f_y = 1,05$ . Ugotovili smo, da nizko razmerje  $f_u/f_y$  samo po sebi ne vpliva znatno na zmanjšanje lokalne duktilnosti. Vse porušitve oslabljenih prerezov so bile duktilne in primerljive z običajnim jeklom. Vseeno pa nizko razmerje  $f_u/f_y$  ne sproži tečenja polnega (bruto) prereza, zato kontrola oslabljenega (neto) prereza pridobi tehtnost.

Veljavnost projektnih formula za elemente v nategu smo preverili s statistično analizo eksperimentalnih rezultatov po dodatku D standarda SIST EN 1990. Dobili smo naslednje rezultate:

- Projektna nosilnost oslabljenega prereza za jekla visoke trdnosti

$$N_{t,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

je z  $\gamma_{M2} = 1,25$  varna. Še več, ugotovili smo, da je za prereze iz jekel visoke trdnosti zelo konservativna. Zahtevani delni faktor znaša le 1,04 (glej preglednico 2, skupina podatkov 1). Projektna nosilnost je varna tudi brez faktorja 0,9.

- Dodatno pravilo za spodnjo mejo projektno nosilnosti oslabljenega prereza za jekla visoke trdnosti, ki je bilo definirano v osnutku predloga standarda prEN 1993-1-12,

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}}$$

z  $\gamma_{M0} = 1,00$  ni bilo zadosti varno in je bilo na osnovi naših rezultatov umaknjeno. Projektna nosilnost oslabljenega prereza iz jekla visoke trdnosti je v končni različici enaka kot za običajna jekla.

- Ugotovili smo tudi, da je natezna projektna nosilnost nesimetričnega oslabljenega

prereza z enim vijakom varna tudi za jekla visoke trdnosti:

$$N_{u,Rd} = \frac{2(e_2 - 0,5d_0) f_u}{\gamma_{M2}}$$

Zato je omejitev v prEN 1993-1-12, ki ne dovoljuje uporabe te kontrole, nepotrebna.

V naši statistični analizi sta dve točki, ki bi se jima dalo oporekati. Prva točka se nanaša na koeficiente variacije za trdnosti materiala, druga pa na dejstvo, da so bili preizkušanci izdelani samo iz ene jeklene plošče. Zaradi pomanjkanja natančnejših podatkov smo za koeficiente variacij uporabili enake vrednosti, kot so bile uporabljene za določitev projektnih vrednosti za bočni pritisk in nosilnost oslabljenega prereza v ENV 1993-1-1 (Snijder idr, 1988a), kjer so bili v analizo vključeni tudi rezultati za jeklo S460 in S690. Če bi bili preizkušanci izdelani iz različnih jeklenih plošč, bi izmerili različne materialne karakteristike. Če bi bila duktilnost teh plošč podobna, bi to vplivalo na nosilnost, ne pa tudi na natančnost modela odpornosti. Predhodne raziskave z jeklom visoke trdnosti pa so pokazale (Može idr, 2007), da sta glavna parametra duktilnosti, razmerje  $f_u/f_y$  in deformacija pri porušitvi za različne proizvajalce jeklenih valjanih plošč kvalitete S690, zelo podobna.

## 8 • ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujemo podjetju Trimo d.d. iz Trebnjega za donacijo materiala in izdelavo

preizkušancev. Primoža Možeta je v okviru programa mladih raziskovalcev financiralo

Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo.

## 9 • LITERATURA

- CEN, Jeklo in jekleni izdelki – Mesto jemanja in priprava vzorcev ter preskušanci za mehansko preskušanje, SIST EN ISO 377, Slovenski inštitut za standardizacijo, 1998.
- CEN, Evrokod – Osnove projektiranja, SIST EN 1990, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2002a.
- CEN, Kovinski materiali – Natezni preskus – 1. del: Metoda preskušanja pri temperaturi okolice, SIST EN 10002-1, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2002b.
- CEN, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe, SIST EN 1993-1-1, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005a.
- CEN, Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-8. del: Projektiranje spojev, SIST EN 1993-1-8, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005b.
- CEN, Vroče valjani izdelki iz konstrukcijskih jekel – 6. del: Tehnični dobavni pogoji za ploščate izdelke iz konstrukcijskih jekel z veliko plastično trdnostjo v kaljenem in popušenem stanju, SIST EN 10025-6, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2005c.
- CEN, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.12 Additional rules for extension of EN 1993 up to steel grades S 700, prEN 1993-1-12, European Committee for Standardization, 2006.
- Gulvanessian, H., Calgario, J.A., Holicky, M. Desiners' Guide to EN 1990 Eurocode: Basis of structural design, Thomas Telford, London, 2002.
- Johansson, B., Maquoi, R., Sedlacek, G., New design rules for plated structures in Eurocode 3, Journal of Constructional Steel Research, 57(3), 279-311, 2001.
- Može, P., Beg, D., Lopatič, J., Net cross-section design resistance and local ductility of elements made of high strength steel, Journal of Constructional Steel Research (2007), doi:10.1016/j.jcsr.2007.01.009, 2007.
- Snijder, H.H., Ungermann, D., Stark, J.W.B., Sedlacek, G., Bijlaard, F.S.K., Hemmert-Halswick, A., Evaluation of test results on bolted connections in order to obtain strength functions and suitable model factors – Part A: Results, Background Documentation to Eurocode 3, Document 6.01, TNO-report, 1988a.
- Snijder, H.H., Ungermann, D., Stark, J.W.B., Sedlacek, G., Bijlaard, F.S.K., Hemmert-Halswick, A., Evaluation of test results on bolted connections in order to obtain strength functions and suitable model factors – Part B: Evaluations, Background Documentation to Eurocode 3, Document 6.02, TNO-report, 1988b.



# REKONSTRUKCIJA OSNOVNE ŠOLE IVAN CANKAR V LJUTOMERU\*

## RECONSTRUCTION OF IVAN CANKAR ELEMENTARY SCHOOL IN LJUTOMER

Đorđe Obradović, univ. dipl. inž. grad.

Trg Dušana Kvedra 13  
2000 Maribor

Strokovni članek

UDK 69.059.25

**Povzetek** | V šoli iz leta 1893 smo porušili vse dotrajane vmesne stene, stropne konstrukcije in streho ter jih zamenjali s sodobno in potresno varno gradbeno konstrukcijo. Ohranili smo le zunanje fasadne stene in osrednje stopnišče. Dobili smo novo, ustrezno razporeditev šolskih prostorov ter dodatne prostore na podstrežju in kleti. Z obnovljenimi fasadami, novo streho enake oblike in pokrito z enako kritino – zareznikom, smo šoli vrnili prvotni videz iz 19. stoletja.

**Summary** | In the Elementary School, built in the year 1893, we pulled down all damaged internal walls, ceilings and roof, and replaced them by modern earthquake resistant elements. Only the external walls and façades and the main stairway were preserved. Apart from the new spaces of modern conception, classrooms and cabinets, we also gained new spaces in the cellar and the attic. Thanks to the new roof, with the original shape and equal tiles, and the original design of the painted façade, the school regained its original 19th century look.

### 1 • UVOD

Zaradi dotrajanosti medetažnih (stropnih) konstrukcij ter konstrukcije ostrejša je bila nujna rekonstrukcija in adaptacija osnovne šole Ivan Cankar v Ljutomeru. Šolske oblasti so zaradi nevarnosti za otroke zaprle šolo, zgrajeno leta 1893. Ideja projektanta in zahteva Zavoda za zaščito naravne in kulturne dediščine je bila obdržati prvotni zunanji videz ter ustvariti popolnoma novo notranjost po modernem konceptu, ki bo ustrezala sedanjemu šolskemu sistemu.

Rekonstrukcija je bila načrtovana v skladu s Poročilom o pregledu stanja konstruktivnih elementov in statični analizi objekta »Osnovna

šola Ivan Cankar« v Ljutomeru z dne 11. 5. 2001, ki ga je izdelal Inštitut za raziskavo materialov in aplikacijo IRMA d.o.o. Ljubljana, enota Maribor.

Tesno smo sodelovali tudi z Zavodom za zaščito naravne in kulturne dediščine Republike Slovenije. Njihova želja je bila ohraniti čim več originalnih elementov in materiala. Končno smo se dogovorili, da popolnoma ohranimo zunanji videz, notranjost pa obdelamo na sodoben način. Na fasadi smo zamenjali le vrata in okna, ki so bila dotrajana.

Hkrati je bila to ugodna možnost, da pridobimo dodatne prostore za ureditev šolske

knjižnice. Namesto odstranjenih dotrajanih sanitarnih prostorov smo na južni strani zgradbe dodali novi del v velikosti 10,0 x 5,0 m, višine 7,0 m z ravno streho.

Nosilec projekta je bil KOMUNAPROJEKT, d.d. Maribor. Vodja projekta in arhitektonskega načrta je bila Sonja Kolaković, univ. dipl. inž. arh., projektant gradbenih konstrukcij pa avtor tega članka, HIŠKO, d.o.o. Maribor. Gradbena dela je izvedlo podjetje GRADIS, d.o.o. s Ptuja. Projektiranje je potekalo od marca 2002 do marca 2003, gradnja pa od avgusta 2002 do septembra 2003.

\* Članek je bil objavljen v Zborniku 2006 (Jarkolekto 2006) Svetovne zveze gradbenikov esperantistov (TAKE)

## 2 • STANJE OBJEKTA PRED REKONSTRUKCIJO

Objekt je bil zgrajen v času Avstro-Ogrske med 1892–1893. Trietažna stavba sestoji iz delne kleti, pritličja, prvega nadstropja ter neizkoriščenega podstrešja (slika 1 in 2).

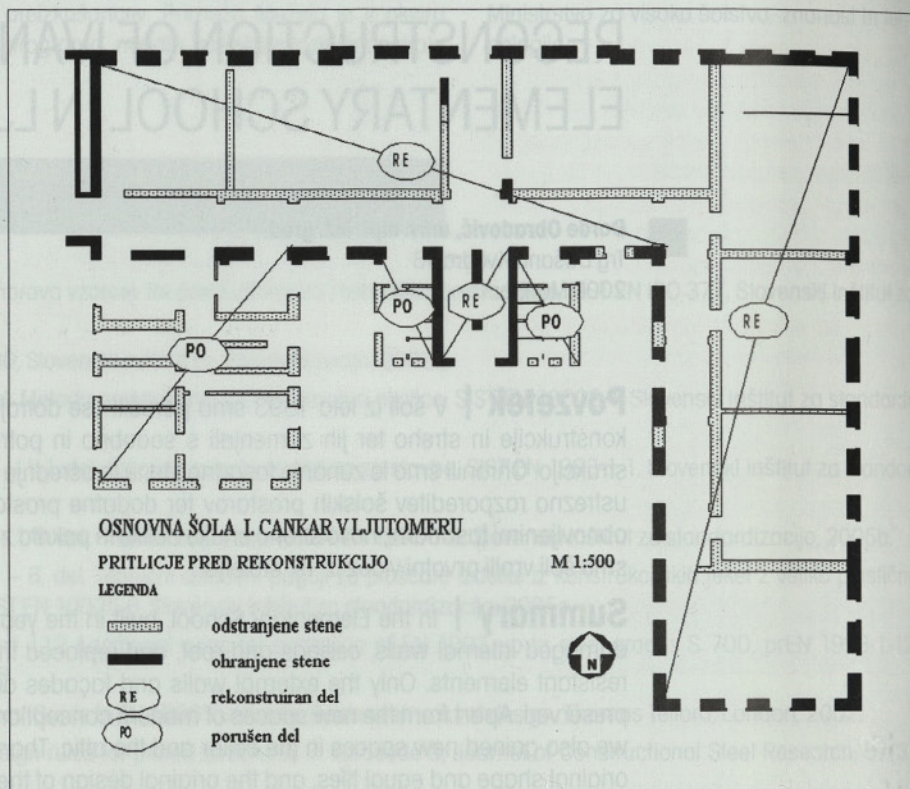
Tloris šole ima obliko črke L. Daljši, zahodni del, je velik 46,0 x 11,5 m, drugi pa 25,0 x 11,5 m. Objekt je bil klasična stavba zidana iz opeke. Nosilne stene so bile debele 64, 48 ter 32 cm (od kleti k podstrešju). V obeh delih je bila vzdolžna opečna stena, ki je delila učilnice od hodnika. Prečne opečne stene so delile posamezne učilnice in kabinete.

Temelji so bili iz zloženega kamna, široki od 80 do 95 cm. Medetažna, stropna konstrukcija nad kletjo je opečni obok, nad pritličjem in nadstropjem pa je bil lesen strop. Po prejšnji obnovi šole, v tidesetih letih prejšnjega stoletja, je bil del pritličja na severni strani izkoriščen za telovadnico. Ta je bila visoka pol-drugo etažo in je obsegala polovico višine kletne etaže ter pritličje.

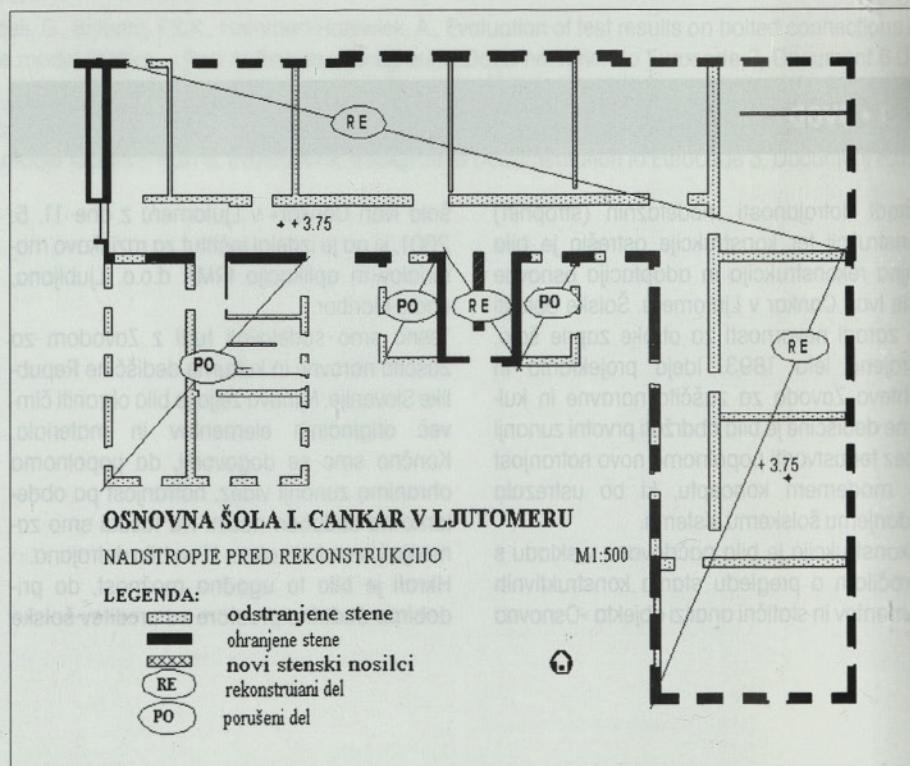
Strešna konstrukcija je trapezno vešalo s kapnimi in vmesnimi legami, ki je izvedeno pod vsakim petim špirovcem. Nagib osnovne strehe je 36°. Pokrita je bila z zelo staro opečno kritino, zareznikom. Kritina je bila dokaj dotrajana, kar je imelo za posledico zamakanje podstrešja. S starostjo 110 let so leseni tramovi krepko preseglji svojo življenjsko dobo, ki navadno znaša 50 let.

Strop nad prvim nadstropjem je bil iz lesenih stropnikov 23–26/33 cm, na razmaku 85–95 cm. Na stropnikih so bile deske, plast peska in opečni tlak. Na spodnjem lesenem opažu je bila trstika in omet debeline 2 cm. Prostor med spodnjim in zgornjim opažem je bil prazen. Ker so bili stropniki na podporah strohneli, niso bili več varni.

Zunanje kletne stene debele 64 cm so bile iz polne opeke avstrijskega formata. Razen nekoliko vlažnih mest, na katerih je bilo nujno popravilo, so bile v dokaj dobrem stanju. Notranje stene so bile iz polne opeke debeline 48 ter 32 cm. Bile so v zelo slabem stanju, posebej v kleti. Zaradi vlage so bile notranje stene že delno razpadle.



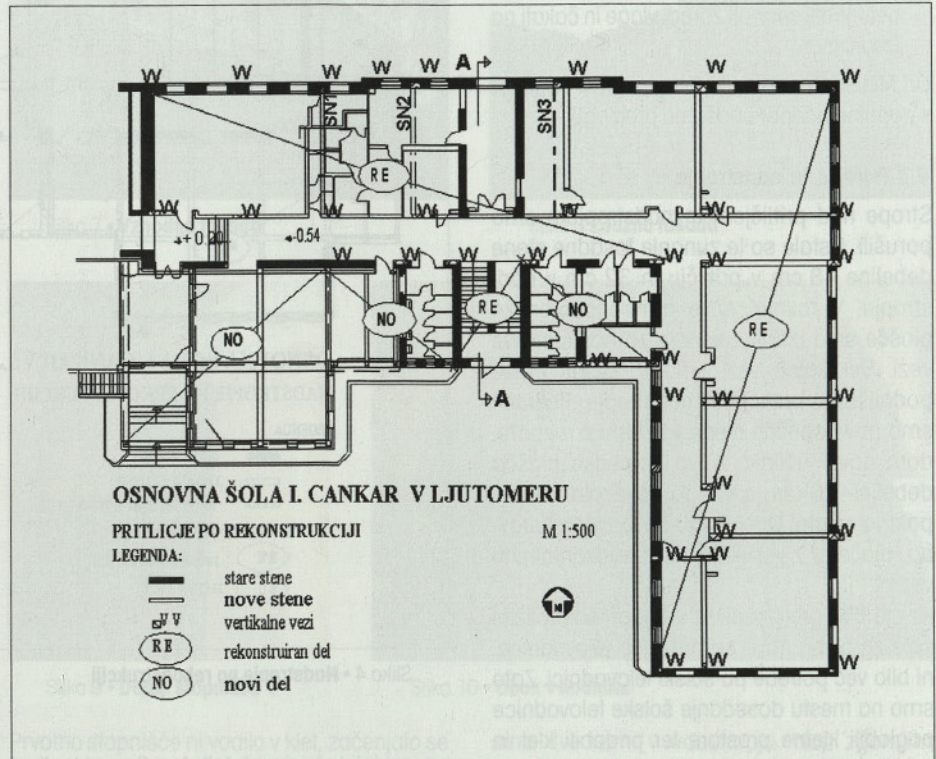
Slika 1 • Prilježje pred rekonstrukcijo



Slika 2 • Nadstropje pred rekonstrukcijo

### 3 • NOVOZGRAJENI DEL – KNJIŽNICA

Na južni strani, na prostoru starih sanitarij, je bil zgrajen novi trietažni prizidek za knjižnico in garderobe v velikosti 10,0 x 5,0 m, višine 7,00 m (slike 3, 4, in 5). Obstoječa dva prazna medprostora v velikosti 4,0 x 6,0 m na obeh straneh osrednjega stopnišča smo zaprli z novimi opečnimi stenami. Tako smo z izravnavo fasade pridobili nove prostore in dve terasi na ravnem delu strehe.



Slika 3 • Pritličje po rekonstrukciji

### 4 • REKONSTRUKCIJA STAREGA OBJEKTA

Spremembe v notranjosti šolske stavbe so razvidne iz slik 3–5 (florisi, prečni prerezi). Zunanji videz šole je prikazan na slikah 6–8 (fasade).

#### 4.1 Temelji

Na južni strani stavbe so bili temelji le še 20 cm pod koto terena. Med gradnjo sosednje telovadnice (10 let pred rekonstrukcijo) so na dvorišču šole znižali nivo tal za okoli 60 cm, ne ozirajoč se na temelje šole. Zaradi tega pa tudi zato, ker so temelji iz zloženega, nepovezanega kamna, smo izdelali dodatne armirane temelje pod obstoječimi, zunanjimi. Ti so enake širine kot obstoječi temelji, visoki so pa 60 cm ali več, po potrebi. Izdelani so iz betona MB 30 (C25/30) z armaturo iz RA 400/500-2. Izvedeni so v kampadah po 1,0 m. V te dodatne betonske temelje smo sidrali vertikalne vezi in tako povezali in ojačili zunanje stene.

#### 4.2 Klet

Podkleten je bil le zahodni, daljši del. Porušili smo skoraj vse prečne in srednje stene, ki so bile zaradi vlage v razpadajočem stanju. Zamenjali smo srednjo steno. Najprej smo ob njej izdelali novi temelj za novo srednjo steno, nekoliko premaknjeno k hodniku. Temelj je iz MB 30 (C25/30) z armaturo iz RA 400/500-2. Nova srednja stena debeline 20 cm je pozidana do obokov, ki smo jih na hodnikih ohranili. Odpravljene so bile poškodbe na zunanjih stenah debeline 64 cm. Izdelani so bili novi temelji prečnih sten in na njih zidane prečne stene. Pred tem smo v višini nove betonske plošče izdelali kanale 20 x 20 cm za horizontalne vezi. V vogalih in stičiščih smo izdelali vertikalne kanale 20 x 20(29) cm. Vezi smo zabetonirali z betonom MB30 (C25/30), armiranim z rebkastim jeklom RA 400/500-2. Horizontalne vezi smo armirali s 4 Ø 12,

stremena Ø 8/20, vertikalne pa s 4 Ø 16, stremena Ø 8/15(7,5). Vertikalne vezi so sidrane v armiranobetonske temelje. Nad delom kleti smo zabetonirali armiranobetonsko ploščo debeline 20 cm iz MB30 (25/30) z mrežno armaturo iz MAG 500/560. Tako smo dobili povezano celoto iz sten ter kontinuirne betonske stropne plošče, ojačeno z vertikalnimi in horizontalnimi vezmi.

S projektantko arhitekture sva predlagala, da srednjo steno v kleti porušimo in jo premaknjeno pozidamo na novem temelju. Medtem je predstavnik Zavoda za zaščito naravne in kulturne dediščine RS vztrajala pri ohranitvi te srednje stene, kljub njenemu zelo slabemu stanju. Zato sem od Ministrstva za šolstvo Republike Slovenije prosil soglasje za naš načrt. V pismu s priloženimi skicami sem branil naš predlog z naslednjimi argumenti:

- bolj učinkovito delo v širšem notranjem prostoru,
- boljši izkoristek hodnika,
- bolj učinkovita kontinuirana stropna plošča, ki prispeva k odpornosti proti potresu,

- d) lažje izvedljivi temelj zunaj obstoječe stene,
- e) bolj ekonomična nova stena, debela 20 cm, namesto stare, ki bi jo morali podbetonirati, sanirati zaradi vlage in čakati na izsušitev.

Od Ministrstva za šolstvo smo dobili odgovor s popolno podporo našemu predlogu.

### 4.3 Pritličje in nadstropje

Strope nad pritličjem in nadstropjem smo porušili. Ostale so le zunanje fasadne stene debeline 48 cm v pritličju in 32 cm v nadstropju. V ravnini nove armiranobetonse plošče smo izdolbli kanale za horizontalne vezi. Vertikalne vezi smo iz kletne etaže podaljšali v pritličje in nadstropje. Pozidali smo nove opečne stene v skladu z razporedom novih učilnic. Nova betonska plošča debeline 20 cm je vse to povezala v kompaktno celoto. Dobili smo novo zidano stavbo, ojačeno z vertikalnimi in horizontalnimi vezmi.

Ker je bila pred kratkim v neposredni bližini šole zgrajena nova samostojna telovadnica, ni bilo več potrebe po šolski telovadnici. Zato smo na mestu dosedanje šolske telovadnice poglobili kletne prostore ter pridobili klet in pritličje normalne višine. S tem smo pridobili dodatne prostore za glasbene dejavnosti. Stena med hodnikom in učilnicami je bila porušena in je bila sezidana nova, nekoliko premaknjena. Zaradi nove razporeditve prečnih sten, ki se ne ujemajo s stenami v pritličju, so v nadstropju izdelani trije betonski stenski nosilci, ki prenašajo obtežbo strehe in prvega nadstropja na betonske stebre v zunanji in srednji steni.

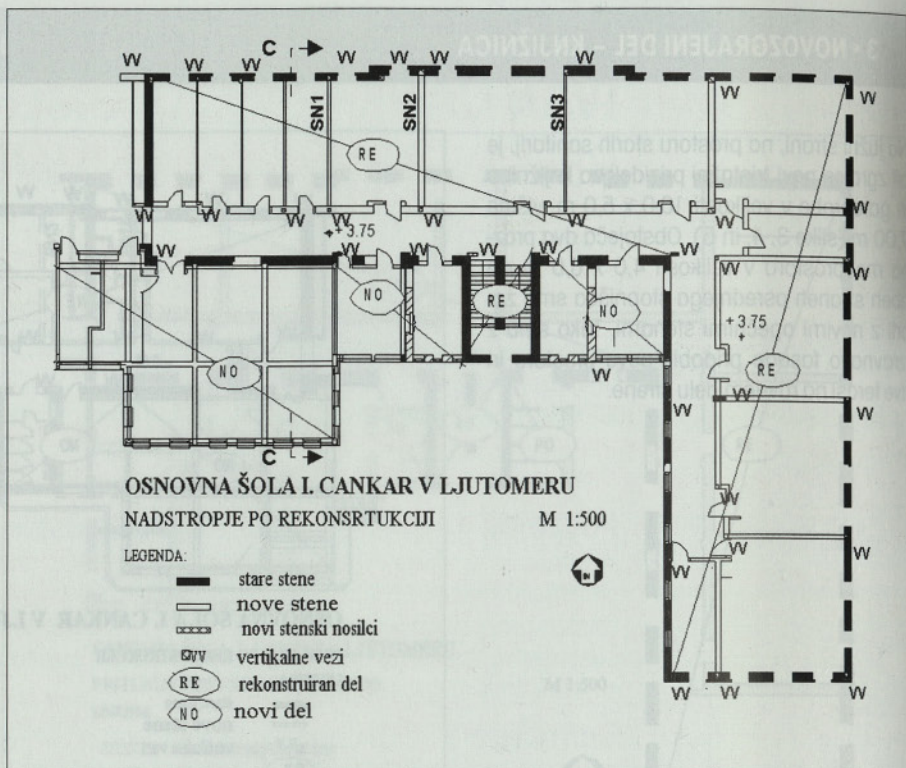
Detaljni opis rušenja srednje in prečnih sten je bil podan v Projektu rušenja, ki je bil sestavni del tega projekta.

### 4.4 Podstrešje

Stene iz nadstropja so bile skupaj z vertikalnimi vezmi podaljšane v podstrešje. Nad njimi, v srednjem delu podstrešja, je bila zgrajena armiranobetonška plošča debeline 20 cm. Tako smo dobili dodatne uporabne prostore za telovadbo najmlajših učencev v prvi triadi. Prav tako je v podstrešju umeščena plinska kotlovnica. Nova inštalacija za ogrevanje je bila razpeljana po celotni šoli.

### 4.5 Streha

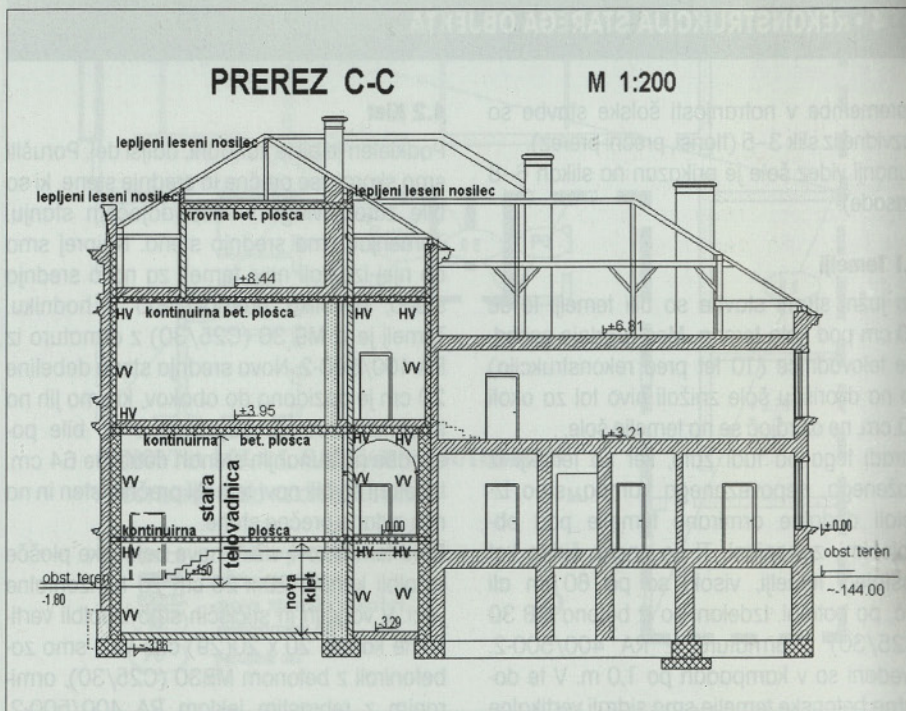
Zaradi dotrajanosti je bila popolnoma odstranjena stara konstrukcija ostrešja in izdelana nova. Nova streha, enakega naklo-



Slika 4 • Nadstropje po rekonstrukciji

na, sestoji iz horizontalnih leg (leseni lepljeni nosilci), slonečih na sohah ter špirovcev. Pokrita je z enako opečno kritino kot doslej, z zareznikom.

Celotna konstrukcija sloni na fasadnih, srednjih ter prečnih stenah. Z lepljenimi nosilci z relativno velikimi razponi (6,0–10,0 m) je bila možna racionalna postavitve predelnih sten



Slika 5 • Prez C-C, po rekonstrukciji



Slika 6 • Severna fasada



Slika 7 • Vzhodna fasada



Slika 8 • Južna fasada

ter boljša uporaba podstrešja. S kapnimi legami, ki so sidrane v horizontalne vezi s sidrnimi vijaki  $\varnothing 12/2,0$  m, je streha pritrjena na armiranobetonsko stropno ploščo debeline 20 cm.

#### 4.6 Stopnišče

Posebno pozornost smo posvetili osrednjemu stopnišču, arhitekturno najbolj zanimivemu delu stavbe (slika 9). Z njim je povezana ravnateljeva pisarna ter del hodnika, ki ju povezuje.

Ta del hodnika je imel tudi v pritličju opečne oboke ter je s stopniščem predstavljal arhitektonsko celoto. Zato je bilo odločeno, da ga ohranimo v prvotni podobi (slika 10). Oboke smo podprli z odri ter jih zaščitili med izdelavo betonske plošče nad njimi.



Slika 9 • Detajl stopnišča



Slika 10 • Obok v hodniku

Prvotno stopnišče ni vodilo v klet, začinjalo se je v pritličju. Zaradi razširjene kleti smo stopnišču dodali še kletno etažo. Stopnišče smo morali podaljšati tudi v podstrešje. Dodali

smo dve rami v nadstropju. Nad zgornjim nadstropjem smo izdelali betonski obok enake oblike, kot so spodnji opečni oboki. Dodatni venci so izdelani po šabloni.

## 5 • HORIZONTALNE SILE

### 5.1 Veter

Objekt je v I. vetrni coni po jugoslovanskih predpisih. Stene so visoke 6,0 m, s streho okoli 12,0 m nad terenom. Upoštevajoč višino in stopnjo izpostavljenosti vetru so izbrane obtežbe:  $w = 0,45 \text{ kN/m}^2$ , do višine 10 m. Ker je objekt relativno nizek, obtežba vetra ni odločilna.

### 5.2. Potres

Stavba šole je bila računana po Pravilniku o tehničnih normativih za graditev objektov

visoke gradnje na seizmičnih območjih. Šola je v VII. potresni coni.

Rekonstruirana šola je sestavljena iz novega dela (knjižnica) in obnovljenega dela (učilnice in kabineti).

Novi del je projektiran kot betonski okvir. Dilatiran je od starega dela in računat kot poseben objekt. Sestoji iz armiranobetonskih okvirjev, betonske plošče debeline 20 cm, ter opečnih sten, ki zapirajo ali dele ta prostor. Okvirji so bili računani na vertikalno in potresno obtežbo  $K_0 = 1,5$  (objekt I kategorije), in  $K_s = 0,025$  (VII. stopnja MCS).

Stari del je bil rekonstruiran in je zidani objekt z vertikalnimi vezmi. Odstotek sten v razmerju z bruto površino objekta v obeh smereh je  $p_x = 6,55\%$  in  $p_y = 12,50\%$ . Vertikalne in horizontalne vezi skupaj z armiranobetonsko ploščo debeline 20 cm učinkovito povezujejo stare zunanje in nove notranje opečne stene v celoto, varno pred potresom.

Opečne stene so računane na vertikalne obtežbe. Najbolj obremenjene stene so kontrolirane na horizontalne sile, niso pa računane na upogibne momente, ker gre za nizek objekt. Odnos višine in širine objekta znaša  $12,0/11,50 = 1,09 < 1,50$  ter ni nujna kontrola sten na upogib.

## 6 • SKLEP

Projektiran ter izveden postopek rekonstrukcije je omogočil učinkovito in hitro rekonstrukcijo šolske stavbe. Nove prečne in srednja stena s

kontinuirno armiranobetonsko stropno ploščo skupaj z zunanjimi tvorijo nov sistem – zidan objekt iz opečnih sten, ojačen z vertikalnimi in

horizontalnimi vezmi. Taka konstrukcija zagotavlja varnost med potresom in povečuje trajnost objekta. Ohranjena fasada in nova streha z opečno kritino zareznik dajeta stavbi prvotni videz iz devetnajstega stoletja. Celotna rekonstrukcija je bila glede na zahtevnost izvedena v sorazmerno kratkem času.

# NOVI DIPLOMANTI

## UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Matevž Furlan**, Retrorefleksivnost horizontalne signalizacije in talnih označb, mentor doc. dr. Alojzij Juvanc, somentor asist. mag. Robert Rijavec

**Žiga Koželj**, Metode zbiranja podatkov za potrebe napovedovanja prometne obremenitve, mentor doc. dr. Marijan Žura

**Elvir Muhić**, Projekt sanacije usada ter plazu Osilnica z variantnimi analizami, mentor doc. dr. Janko Logar, somentor doc. dr. Vojko Jovičič

**Matija Žiberna**, Optimizacija krožnega križišča na Primskovem, mentor doc. dr. Tomaž Maher

**Primož Bračič**, Voda na vozišču in prometna varnost, mentor doc. dr. Alojzij Juvanc

**Klemen Juvan**, Merjenje geometrije tira z mehansko in lasersko merilno drezino, mentor prof. dr. Bogdan Zgonc, somentor mag. Blagomir Černe

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Miha Jukić**, Algoritem za optimalno projektiranje armature v stenah, ploščah in lupinah, mentor izr. prof. dr. Boštjan Brank

**Anžej Kne**, Odločanje v vzdrževanju cestnih objektov: primer skupine nadvozov nad avtocesto, mentor doc. dr. Jana Šelih, somentor Ksenija Marc, univ. dipl. inž. grad.

**Nina Komidar**, Bilanca rabe površin kot sestavina urbanističnega načrta (na primerih v Občini Ajdovščina), mentor prof. dr. Andrej Pogačnik

**Jasna Kovšca**, Dopolnitev modela PCFLOW3D za simulacijo tokov in širjenja polutantov, mentor izr. prof. dr. Matjaž Četina, somentor doc. dr. Dušan Žagar

**Matjaž Horvat**, Idejna študija sanacije čistilne naprave za pitno vodo Mrzlek, mentor izr. prof. dr. Boris Kompare, somentor Bogoslav Brezigar, univ. dipl. inž. grad.

**Gašper Rankel**, Sodobna izvennivojska križanja mestnih cest, mentor doc. dr. Tomaž Maher

## UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO

### VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Srebranko Grbić**, Idejna zasnova vodooskrbe severnega dela Šaleške doline in mesta Velenje iz vodnega vira Mazej, mentor izr. prof. dr. Eugen Peteršin, somentor Matjaž Nekrep Perc, univ. dipl. inž. grad.

**Peter Klement**, Varjenje, zvari in zvarni spoji v jeklenih konstrukcijah, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor dr. Simon Šilih

**Alenka Prnaver**, Monitoring in geomehanska ocena vplivov precejanja vode na stabilnost dovodnega kanala HE Zlatoličje, mentor izr. prof. dr. Stanislav Škrabl

**Grega Uratnik**, Idejni projekt montažnega objekta z jedrom, mentor izr. prof. dr. Miroslav Premrov, somentor doc. dr. Peter Dobrila

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

**Iztok Goleš**, Pogoji in kriteriji pri rekonstrukciji nivojskih križišč, mentor izr. prof. dr. Tomaž Tollazzi, somentor mag. Marko Renčelj

**Dejan Grbić**, Analiza lesene stanovanjske hiše z masivnim skladovnim konstrukcijskim sistemom, mentor izr. prof. dr. Miroslav Premrov, somentor doc. dr. Peter Dobrila

**Matjaž Tajnik**, Primerjalna analiza sovprežnega nosilca iz betona in lesa z in brez karbonskega traku, mentor doc. dr. Peter Dobrila, somentor izr. prof. dr. Miroslav Premrov

### UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA

**Bojana Ahmetaj**, Ekonomika jeklenih konstrukcij, mentorja red. prof. dr. Stojan Kravanja in red. prof. dr. Boris Snaj

**Dejan Sarjaš**, Primerjava tržno zasnovanega ocenjevanja vrednosti in množičnega vrednotenja nepremičnin, mentorja doc. dr. Igor Pšunder in red. prof. dr. Franc Koletnik

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



# 8. DAN JEKLENIH KONSTRUKCIJ

12. junij 2007

GZS, Dvorana A, Dimičeva 13, Ljubljana

## Program:

- 9.30 Registracija udeležencev
- 10.00 Uvodni pozdrav  
mag. Samo Hribar Milič, GZS
- 10.15 Uvodni nagovor  
Miloš Ebner, MBA, OJK
- 10.30 Predavanje: **Trženje jeklenih konstrukcij - izzivi sedanosti in prihodnosti**  
Bertrand Lemoine, ECCS
- 11.15 Predavanje: **Evrokodi - izzivi in priložnosti**  
prof. dr. Darko Beg, FGG
- 12.00 Odmor
- 12.15 Predstavitve slovenskega predloga za evropsko nagrado za jekleno konstrukcijo
- 12.45 Okrogla miza: **Konkurenčnost jeklenih konstrukcij**
- 14.00 Družabno srečanje

Informacije in prijave: ZKI jeklene konstrukcije, ga. Milena Vidmar (milena.vidmar@gzs.si), T: 01 589 83 08.



# KOLEDAR PRIREDITEV

junij 2007

**Sodobni kanalizacijski sistemi**

IZS, Ljubljana, Slovenija  
[www.izs.si](http://www.izs.si)

junij 2007

**>>Cvetka digitalnih katastrskih načrtov<<**

IZS, Ljubljana, Slovenija  
[www.izs.si](http://www.izs.si)

11.- 13.6.2007

**International Conference: Sustainable Construction Materials and Technologies**

Coventry, Anglija  
[www.uwm.edu/dept/cbu/coventry.html](http://www.uwm.edu/dept/cbu/coventry.html)

18.- 20.6.2007

**6th ITS in Europe Congress and Exhibition**

Aalborg, Danska  
[www.ertico.com](http://www.ertico.com)

26.- 29.6.2007

**24th W78 Conference & 5th ITCEDU Workshop & 14th EG-ICE Workshop**

Maribor, Slovenija  
[www.w78.uni-mb.si](http://www.w78.uni-mb.si)

18.- 21.9.2007

**The Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing**

St Julians, Malta  
[www.civil-comp.com/conf](http://www.civil-comp.com/conf) or contact

19.- 21.9.2007

**IABSE Symposium International Association for Bridge and Structural Engineering**

Weimar, Nemčija  
[www.iabse2007.de](http://www.iabse2007.de)

24.- 27.9.2007

**14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Geotechnical Engineering in Urban Environments**

Madrid, Španija  
[www.ecsmge2007.org](http://www.ecsmge2007.org)

26.- 28.9.2007

**12th International Congress: Polymer in Concrete (ICOIC'07)**

Chuncheon, Južna Koreja  
<http://icpic.kongwon.ac.kr>

6.- 10.10.2007

**75th IBTTA Annual Meeting and Exposition**

Dunaj, Avstrija  
[www.ibtta.org](http://www.ibtta.org)

5.- 6.11.2007

**RIMC 07**

**3. Mednarodni znanstveni in strokovni kongres upravljanja železniške infrastrukture**

Rogaška Slatina, Slovenija  
[www.fg.uni-mb.si/RIMC2007/vabilo.html](http://www.fg.uni-mb.si/RIMC2007/vabilo.html)

10.- 13.12.2007

**7th International Symposium on Cable Dynamics**

Dunaj, Avstrija  
[www.aimontefiore.org/cable/](http://www.aimontefiore.org/cable/)

21.- 25.4.2008

**TRA 2008**

**2nd Transport Research Arena (TRA)**

Ljubljana, Slovenija  
[www.traconference.com](http://www.traconference.com)

4.- 6.6.2008

**IABSE Conference**

**ICT for Bridges, Buildings and Construction Practice**

Helsinki, Finska  
[www.iabse.org](http://www.iabse.org)

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)

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)

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)