

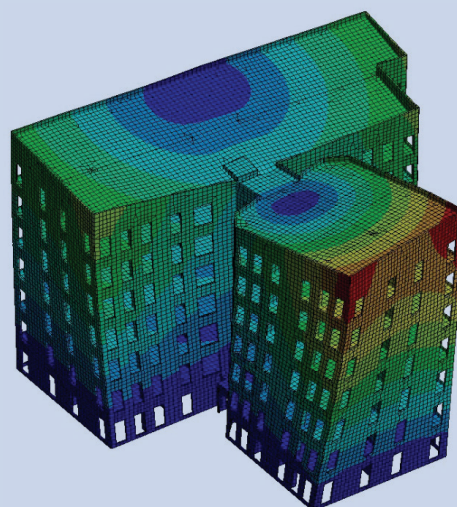
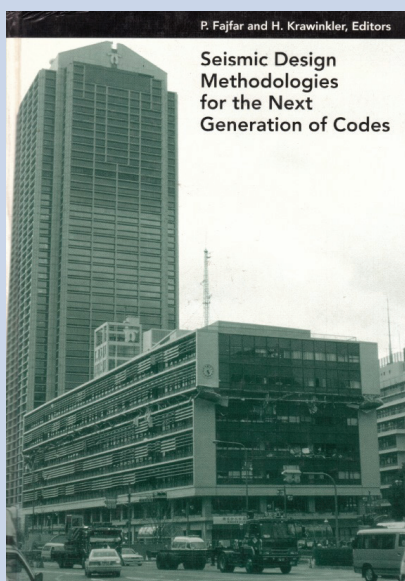
oktober, november 2021
letnik 70

Gradbeni vestnik

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE IN
MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKA ZBORNICE SLOVENIJE



50 LET
INŠTITUT ZA KONSTRUKCIJE,
POTRESNO INŽENIRSTVO
IN RAČUNALNIŠTVO



216

**50 LET
KONSTRUKCIJSKEGA
INŽENIRSTVA
NA IKPIR**

232

**50 LET
POTRESNEGA
INŽENIRSTVA
NA IKPIR**

249

**50 LET
GRADBENE
INFORMATIKE
NA IKPIR**

Gradbeni vestnik

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in
tehnikov Slovenije (ZDGITS),**
Karlovska cesta 3, 1000 Ljubljana,
telefon 01 52 40 200
v sodelovanju z **Matično sekcijo
gradbenih inženirjev Inženirske
zbornice Slovenije (MSG IZS),**
ob podpori **Javne agencije za
raziskovalno dejavnost RS, Fakultete
za gradbeništvo in geodézijo Univerze
v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo
Univerze v Mariboru in Zavoda za
gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **prof. dr. Matjaž Mikoš, predsednik**
izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski
Dušan Jukić
IZS MSG: **Jernej Mazij**
mag. Jernej Nučič
mag. Mojca Ravnar Turk
UL FGG: **doc. dr. Matija Gams**
UM FGPA: /
ZAG: **doc. dr. Aleš Žnidarič**

Uredniški odbor: **izr. prof. dr. Sebastjan
Bratina, glavni in odgovorni urednik**
doc. dr. Milan Kuhta

Lektor: **Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:
Romana Hudin

Tajnica: **Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova: **Agencija GIG**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:
Kočeviski tisk

**Naklada: 700 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije**

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

Letno izide 12 števil. Letna naročnina
za individualne naročnike znaša 23,16 EUR;
za študente in upokoence 9,27 EUR;
za družbe, ustanove in samostojne podjetnike
171,36 EUR za en izvod revije; za
naročnike iz tujine 80,00 EUR.
V ceni je všteti DDV.
Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:
SI56 0201 7001 5398 955

Slika na naslovnici:

**50 let inštituta za konstrukcije,
potresno inženirstvo in računalništvo,**
foto: arhiv IKPIR

**Glasilo Zveze društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije in
Matične sekcije gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije.**
UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774;
spletna izdaja ISSN 2536-4332.
Ljubljana, oktober-november 2021, letnik 70, str. 213-268

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledki med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: [priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave]. V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: sebastjan.bratina@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

VSEBINA CONTENTS

UVODNIK

prof. dr. Matej Fischinger, univ. dipl. inž. grad.
**50 LET INŠTITUTA ZA KONSTRUKCIJE,
POTRESNO INŽENIRSTVO IN
RAČUNALNIŠTVO (IKPIR)**

214



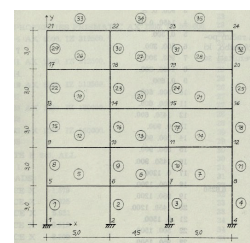
**50 LET
INŠTITUT ZA KONSTRUKCIJE,
POTRESNO INŽENIRSTVO
IN RAČUNALNIŠTVO**

ČLANKI PAPERS

prof. dr. Janez Duhovnik, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž. grad.

**50 LET KONSTRUKCIJSKEGA
INŽENIRSTVA NA IKPIR
50 YEARS OF STRUCTURAL
ENGINEERING AT IKPIR**

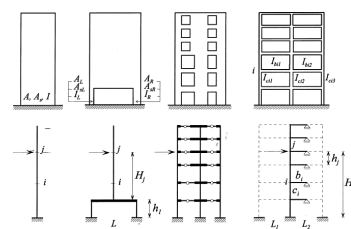
216



akademik prof. dr. Peter Fajfar, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Matej Fischinger, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Tatjana Isaković, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Matjaž Dolšek, univ. dipl. inž. grad.

**50 LET POTRESNEGA INŽENIRSTVA NA IKPIR
50 YEARS OF EARTHQUAKE
ENGINEERING AT IKPIR**

232



doc. dr. Janez Reflak, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Žiga Turk, univ. dipl. inž. grad.
**50 LET GRADBENE INFORMATIKE NA IKPIR
50 YEARS OF CONSTRUCTION
INFORMATICS AT IKPIR**

249



FOTOREPORTAŽA Z GRADBIŠČA

Jernej Amon, dipl. ing. grad.
doc. dr. Milan Kuhta, univ. dipl. ing. grad.
Hotel B&B, Maribor

264



267 NOVI DIPLOMANTI

KOLEDAR PRIREDITEV

prof. dr. Matej Fischinger, univ. dipl. inž. grad.
matej.fischinger@fgg.uni-lj.si



50 LET INŠTITUTA ZA KONSTRUKCIJE, POTRESNO INŽENIRSTVO IN RAČUNALNIŠTVO (IKPIR)

Uvodnik

V letu 2021 praznuje 50 let delovanja uspešen in poseben inštitut. Posebno je že njegovo ime, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, ki odseva, kot bo opisano v nadaljevanju, bistvo njegovega nastanka, delovanja in uspeha. V svetu najdemo na tisoče inštitutov za konstrukcije in mnoge inštitucije za potresno inženirstvo. Ime jubilaranta, ki v enovito celoto povezuje še računalništvo oziroma gradbeno-informacijsko tehnologijo v sodobnejšem angleškem prevodu imena, pa je edinstveno. Podroben opis razvoja teh treh disciplin v okviru Inštituta in ljudi, ki so ga oblikovali, boste zainteresirani bralci našli v treh pridruženih člankih - 50 let konstrukcijskega inženirstva na IKPIR, 50 let potresnega inženirstva na IKPIR in 50 let gradbene informatike na IKPIR.

Zgodba o ustanovitvi inštituta z navidezno nenavadnim imenom sega v leto 1971, ko ga je s tedanjim imenom Računski center FAGG ustanovila »skupina nekaj mladih mož, katerih inženirska in matematična izobrazba je dovolj velika, da bomo lahko vsaj sledili svetovnemu razvoju na tem polju (uporabe računalnika v gradbenem inženirstvu namreč)«, kot jih je imenoval spoštovani statik in profesor Svetko Lapajne. Pa ni šlo le za izobrazbo, temveč v prvi vrsti za vizionarstvo in mladostni zagon, s katerim je bilo že kmalu preseženo zgolj sledenje, ki je prerastlo v polnopravno vključitev in mestoma celo vodilno vlogo v svetovnem razvoju. Prvotno ime Računalniška enota pri FAGG, ki so jo mnogi videli samo kot podporno službo pri uvajanju računalniških znanj v katedre fakultete, ni odražalo pravega potenciala te skupine. Po mnenju uvodničarja je bil ta potencial v začetni fazi predvsem v razvoju potrebnih znanj, računskih metod in programske opreme za gradbene inženirje s strani gradbenih inženirjev ob pomoči specialistov za programiranje in matematiko. To je prineslo pomembno komparativno prednost v primerjavi z mnogimi drugimi inštitucijami za konstrukcije v svetu, ki so pogosto uporabljale druge razvito programsko opremo in v katerih je bil stik med razumevanjem konstrukcije in strukturo programa ter v njem uporabljenega modela šibkejši ali pa je bil, kljub velikemu razvojnemu potencialu, stik s prakso manjši. Tako razvita programska oprema je bila nadvse praktično uporabna in je hitro našla pot v projektiranje gradbenih konstrukcij. Ponovno lahko rečemo, da ni veliko inštitucij v svetu, če je sploh katera, ki se lahko pohvalijo,

da so bile skozi več desetletij praktično vse pomembnejše zgradbe v celi državi projektirane s pri njih razvito programsko opremo.

Pomembna značilnost za delovanje Inštituta v prvih desetletjih je bilo izjemno medsebojno spoštovanje med mladimi možmi in vodilnimi statiki tistega obdobja. Uvodničar se rad spominja, da je (v začetku še kot študent) s primernim strahospoštovanjem vstopal v pisarne inženirjev Adamiča in Sterlekarja, prof. Preloga in drugih avtoritet na področju projektiranja. Ti pa so spoštovanje vračali s tem, da so cenili prispevek mladih mož in jih usmerjali z nasveti glede modeliranja in inženirskega razumevanja konstrukterstva.

Uvodničar meni, da sta prav ti dve sodelovanji med razvijalci računskih metod in računalniških programov in projektanti ter specialisti za gradbene konstrukcije in informatiko kasneje vodili do izjemnih uspehov Inštituta na področju raziskav. Še posebej odmevne rezultate je imelo delo pod vodstvom Petra Fajfarja na področju v Sloveniji nove discipline potresnega inženirstva. Inštitut še zdaleč ni mogel tekmovali z velikimi svetovnimi inštitucijami po številu zaposlenih, razvojnih sredstvih in opre, in tudi ne po okolju, v katerem je deloval. Peter Fajfar, Janez Duhovnik, Janez Reflak, Ervin Prelog, Iztok Kovarčič, Zdene Breška in kasneje Frano Damjanič ter vrsta sodelavcev, ki so jim sledili, so znali povezati najsodobnejše trende v znanosti s kar se da inženirsko uporabnimi modeli, metodami in programi za konstrukcije. Žiga Turk in njegovi sodelavci so malo pozneje kot gradbeni inženirji lahko videli potencial vedno novih izzivov v informacijski tehnologiji v širši luči od svojih kolegov v svetu. Pozoren bralec bo v podrobnejših opisih dosežkov v pridruženih člankih razbral, kako so omenjene komparativne prednosti Inštitut pripeljale ob bok mnogo večjih in slavnih raziskovalnih inštitucij v najbolj razvitih delih sveta.

S hitrim in uspešnim prodorom na strokovnem in raziskovalnem področju je Računski center FAGG močno presegel okvire svojega imena. Konec leta 1979 se je preimenoval v Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, kar je bolje odražalo raziskovalni, pedagoški in strokovni značaj enote, vsebinsko pa uokvirilo tri med seboj prepletena področja

dela. V letih, ki so sledila, se je IKPIR razvil v najmočnejšo pedagoško in raziskovalno interno enoto na fakulteti.

Inštitut je imel še tretjo veliko prednost, ki jo je v znatni meri sooblikovalo dolgoletno uspešno vodenje predstojnika Janeza Reflaka. Ta je bila v izjemnem delovnem vzdušju in sodelovanju vseh članov skupine. To stanje duha bi lahko opisali s sintezo japonske pripadnosti inštituciji ter kreativnosti posameznikov v zahodnih kulturah. Značaji predstojnika in zaposlenih so zgradili strukturo dobrih odnosov, ki jo je odlikovala sinteza potrebne hierarhičnosti in individualne pobude, v kateri ni bilo prostora za ozke in sebične cilje. Po Reflakovi upokojitvi leta 2001 je do leta 2013 tako uspešno vodstvo nadaljeval Peter Fajfar, ki je vodil Inštitut tudi med letoma 1985 in 1989. Nato je predstojništvo prevzel pisec uvodnika in ga leta 2020 predal v skrbne roke sedanje predstojnice Tatjane Isaković.

V sedanjem času velikih sprememb pa ne obstanejo največji in niti ne najbolj uspešni, temveč najbolj prilagodljivi. Nekoliko romantična shema delovanja Inštituta v prvih desetletjih, ki se je uvodničar z nostalgijo rad spominja, je ob začetku tisočletja postala pretesna za nadaljnji razvoj. Jasno je bilo, da pri skokovitem razvoju raziskav in stroke ista oseba ne more kompetentno obvladovati vseh treh področij delovanja Inštituta. Postalo je tudi jasno, da univerzitetna inštitucija ni prvenstveno namenjena vzdrževanju programov v hitro spreminjajočih se programskih okoljih. Formalizacija teh novih odnosov se je zgodila v začetku leta 2001, ko sta se v okviru IKPIR oblikovali dve katedri, Katedra za konstrukcije in potresno inženirstvo (KKPI) ter Katedra za gradbeno informatiko (KGI). Katedri še naprej dobro sodelujeta na raziskovalnem in pedagoškem področju. Tipično področje sodelovanja in povezave obeh kateder je področje numeričnega modeliranja, ki v gradbeništvu in tehniki omogoča virtualne simulacije obnašanja materialov in konstrukcij, za to pa potrebuje močno računsko okolje in strukturirane informacije. Nosilec tega dela je Boštjan Brank, ki je sicer član KKPI, s svojimi sodelavci pa deluje v okviru raziskovalne skupine KGI. Posebej dobro je sodelovanje na pedagoškem področju v okviru Interdisciplinarnega seminarja računalniško podprtega projektiranja konstrukcij, kjer so bili vpeljeni številni sodobni pristopi v pedagoškem delu.

Nova organiziranost dela je sicer nujno načela značilno homogenost Inštituta, je pa po drugi strani prinesla izjemen in zelo uspešen razvoj relevantnih znanstvenih področij in pripeljala do še večje uveljavitve sodelavcev Inštituta v mednarodnem okolju. Največje, s tem povezane uspehe lahko bralec spozna v treh prej omenjenih pridruženih člankih. Morda površen pogled na te uspehe daje vtis, da so predvsem rezultat dela posameznih skupin. Vendar vse te skupine, kot je to lepo povedano v zaključku članka 50 let gradbene informatike na IKPIR, gradijo na trdnih temeljih, ki so jih postavili mladi možje ob ustanovitvi – na vizionarskem spoznanju in navdušenju nad novimi tehnologijami, usmerjenosti v reševanje problemov z inženirskim pristopom, znanstveni odličnosti in odprtosti v svet.

Za zaključek si v duhu olimpijskega leta dovolimo primerjati uspešnost delovanja sodelavcev Inštituta s športnimi uspehi države, ki je glede na svojo velikost in število prebivalcev dosegla rezultate v samem svetovnem vrhu. Iz vrst sodelavcev in študentov Inštituta so se oblikovali član več akademij znanosti v svetu, ki je tudi prvi Slovenec, ki je bil izvoljen za tujega člana Nacionalne inženirske akademije v ZDA, prejemniki državnih nagrad za znanstveno delo in nagrad Inženirske zbornice

Slovenije, uredniki vodilnih svetovnih znanstvenih revij, vodje in sodelavci številnih raziskovalnih projektov v Evropi in svetu, izjemno citirani avtorji, revidenti najzahtevnejših strokovnih projektov doma in v tujini, pri študentih priljubljeni in uspešni profesorji, prva redna profesorica na FGG, dekani FAGG in FGG, štirje ministri vlade RS, predsednik Inženirske zbornice Slovenije, direktor uprave DARS, vodilni projektanti in direktorji gradbenih podjetij. Nekdanji sodelavci in študentje so bili uspešni tudi v poklicih, ki so bolj oddaljeni od raziskav in gradbeništvu, kar kaže na širino duha, ki je od nekdaj prisotna na IKPIR. Upamo, da se bomo s temi sodelavci in našimi številnimi prijatelji ob koncu leta lahko srečali na tradicionalnem, vendar posebej svečanemu srečanju IKPIR in izmenjali mnenja o viziji nadaljnjega razvoja Inštituta. Vsi mladi možje kot tudi njim v letu 1974 pridruženi študent drugega letnika in pisec tega uvodnika smo v pokoju. Mlajši sodelavci, ki so že doslej soustvarjali razvoj IKPIR, pa bodo na opisanih trdnih temeljih začrtali nove smeri razvoja.

prof. dr. Janez Duhovnik, univ. dipl. inž. grad.
janez.duhovnik@gmail.com



prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž. grad.
bostjan.branc@fgg.uni-lj.si



Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR),
Jamova 2, 1000 Ljubljana

Pregledni znanstveni članek
UDK 624.07(497.4)(091)

50 LET KONSTRUKCIJSKEGA INŽENIRSTVA NA IKPIR 50 YEARS OF STRUCTURAL ENGINEERING AT IKPIR

Povzetek

Podajamo pregled aktivnosti, ki so bile v petdesetih letih obstoja Inštituta za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR) povezane s konstrukcijskim inženirstvom in numerično mehaniko. Opisane so pomembnejše raziskave ter tudi nekatere druge aktivnosti.

Ključne besede: konstrukcijsko inženirstvo, numerična mehanika, končni elementi, IKPIR

Summary

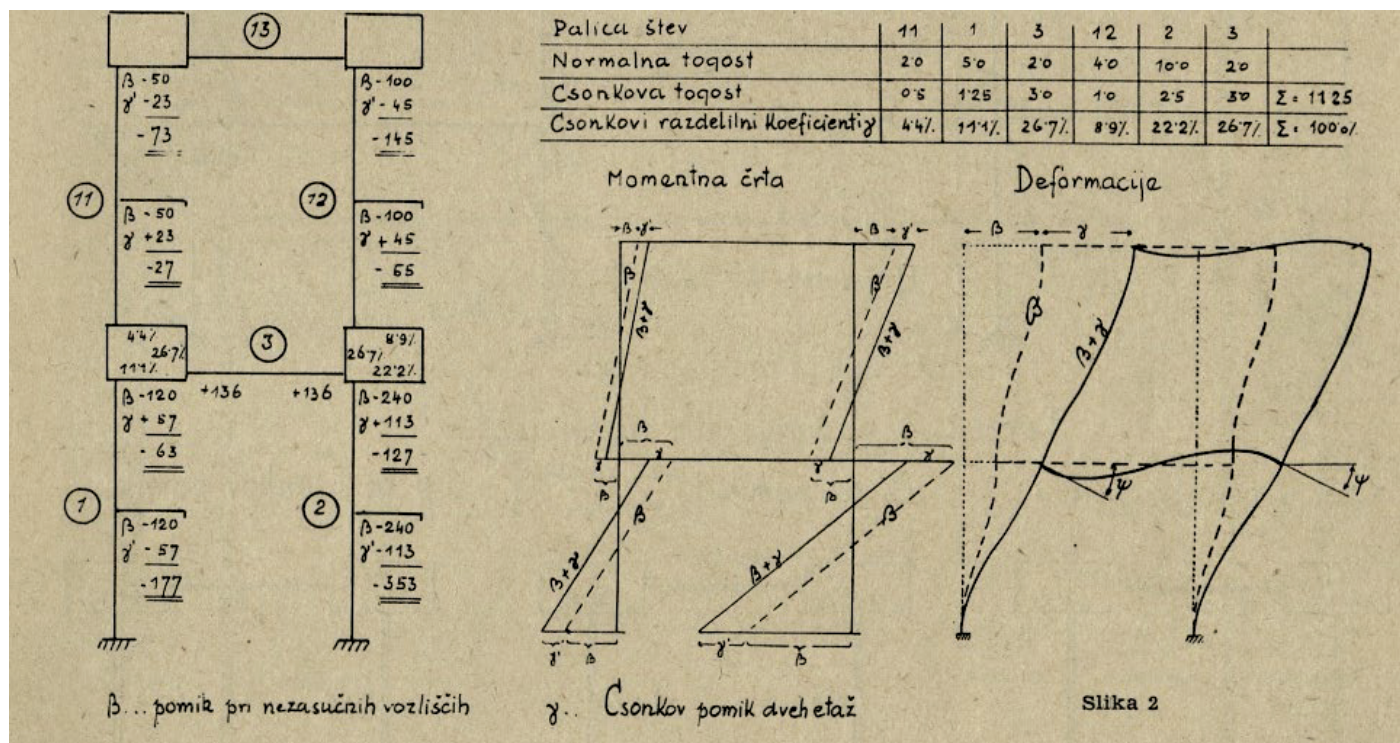
We present and overview of activities related to structural engineering and computational mechanics during the fifty years of existence of the Institute of Structural Engineering, Earthquake Engineering and Construction IT (IKPIR). The main research as well as other activities are briefly described.

Key words: structural engineering, numerical mechanics, finite elements, IKPIR

1 PROJEKTIRANJE GRADBENIH KONSTRUKCIJ V SLOVENIJI V LETIH 1960–1969

Razmere v gradbeništvu v Sloveniji v šestem desetletju prejšnjega stoletja so bile odsev razmer v družbi, ki jih je krojila gospodarska reforma, in kot njena posledica spremenljiva politika investiranja v gradnjo novih objektov vseh vrst. Kljub temu je gradbeništvo v tistem desetletju sorazmerno napredovalo

ša. Kot kažeta opisa mostov čez Dravo v Podvelki [Hvastja, 1963] in Mariboru [Pipan, 1963], so se obširnim računom izognili z uporabo enkrat statično nedoločene ali celo statično določene konstrukcije. Pri graditvi čedalje višjih stavb iz armiranega betona so bile pogosto uporabljene konstrukcije, sestavljene iz okvirjev in sten. Analizo takih konstrukcij po postopku »poskusi in popravi« je opisal takratni asistent pri prof. Lapajnetu prof. Blaž Vogeltnik [Vogeltnik, 1963]. V članku je kot primer opisana razdelitev vodoravne obtežbe med okvirje in stene pri stolpnih

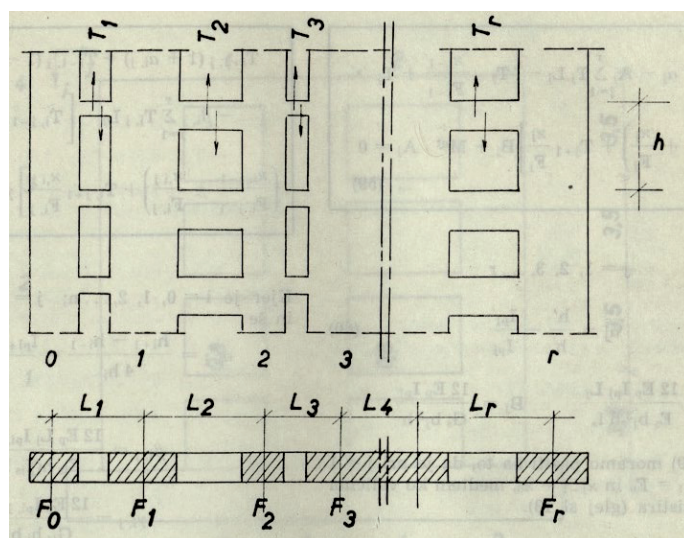


Slika 1. Račun pomičnih okvirjev po Csonkovi metodi [Lapajne, 1963].

in zgrajenih je bilo več pomembnih energetskih, prometnih, industrijskih, poslovnih in stanovanjskih objektov. Pri projektiranju gradbenih konstrukcij se je v tistem času zlasti spremenila analiza konstrukcij (račun notranjih in podpornih sil ter premikov), ki je doživela velik napredek. Ta je bil postopen in prehod na uporabo novih metod analize je trajal več let. Da bi vsaj delno ugotovili takratno stanje, smo pregledali članke o gradbenih konstrukcijah, ki so bili objavljeni v letih od 1960 do 1969 v Gradbenem vestniku [CV, 2021].

Okoli leta 1960 so za analizo ravninskih okvirnih konstrukcij pretežno uporabljali iteracijske metode po Crossu [Lapajne, 1949] in Kanyju. Prof. Svetko Lapajne je tudi leta 1963 pisal o dopolnjeni Crossovi metodi za analizo pomičnih ravninskih okvirjev, ki jo je predlagal Csonka [Lapajne, 1963], slika 1. Vse omenjene metode so temeljile na klasični metodi premikov, ki ne upošteva vpliva prečnih in osnih sil na premike. Metode so nazorne in omogočajo dober sprotni nadzor nad potekom računa. Pri konstrukcijah z več polji in etažami pa postane račun zamuden.

Navedeno velja za konstrukcije pri nepomični obtežbi. Analiza konstrukcij mostov je zaradi pomične prometne obtežbe, ki zahteva določitev vplivnic, nekoliko bolj zapletena in obsežnej-



Slika 2. Stene z odprtinami so pogosto uporabljene pri AB-stavbah [Prelog, 1966].

ci Metalka v Ljubljani. Istega problema se je lotil prof. Prelog, ki je pri reševanju uporabil diferenčno metodo [Prelog, 1965]. Avtor je za reševanje sistema linearnih enačb uporabil metodo eliminacije neznank. Iz članka [Vedlin, 1965], ki opisuje jekleno konstrukcijo športne hale Tivoli v Ljubljani, pa lahko zaključimo, da so tudi pri velikih jeklenih konstrukcijah uporabljali statično določene konstrukcije, ker so zahtevale manj obsežne račune. Prvič so računalniki v zvezi s projektiranjem konstrukcij obširneje omenjeni v članku, ki vsebuje zanimivo vizijo o predvideni uporabi na tem področju [Čačović, 1965]. Avtor našteva naloge, za katere predvideva, da jih bodo v prihodnje inženirjem pomagali opraviti računalniki. V skupni julijski in avgustovski številki Gradbenega vestnika leta 1966 je bilo objavljeno obvestilo Inštituta za matematiko, fiziko in mehaniko o večdnevem seminarju Uporaba elektronskih računalnikov v konstrukcijski mehaniki. Program seminarja, ki naj bi ga vodila prof. dr. inž. Ervin Prelog in dr. inž. Dragoš Jurišič, naj bi bil: (1) osnove računanja z matrikami, diferenčne metode za reševanje diferencialnih enačb in osnovne karakteristike računalnikov in programiranja, 6 ur; (2) a) reševanje nosilcev, okvirjev in skeletnih konstrukcij po redukciji metodi, 16 ur, b) reševanje sten in plošč poljubnih oblik in poljubnih robnih pogojev, 10 ur, c) računanje nihajnih dob pri sistemu z več masnimi točkami, 4 ure; (3) prikaz reševanja zgornjih problemov z računalnikom Z23 na praktičnih zgledih. Seminar naj bi bil v drugi polovici oktobra 1966. Ali je bil seminar opravljen ali ne, nismo mogli ugotoviti. V bibliografiji predvidenih vodij seminarja pa sta navedeni dve njuni deli iz tega leta ([COBISS, 1966a], [COBISS, 1966b]). Analizo sten z odprtiniami je po diferenčni metodi obravnaval prof. Prelog v [Prelog, 1966], slika 2. Tudi tokrat je avtor za reševanje sistema linearnih enačb uporabil metodo eliminacije neznank.

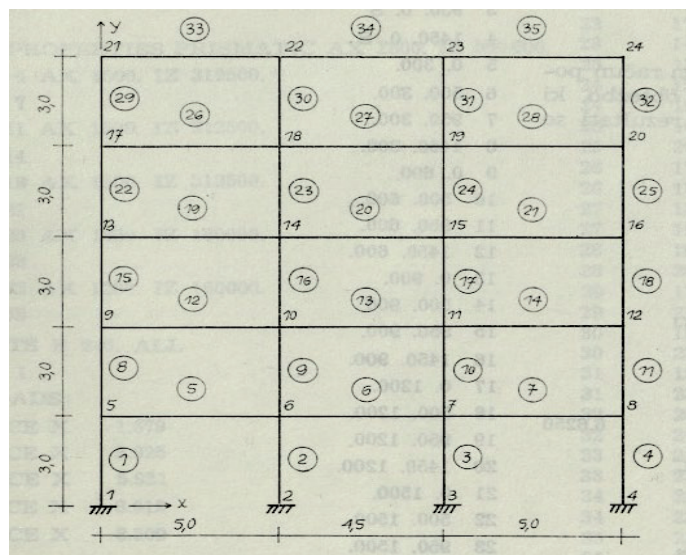
O plastostatični analizi okvirjev sta Carmen Jež-Gala in Franjo Šliber objavila članek [Jež-Gala, 1966]. Avtorja uporabe računalnika pri svojem delu ne omenjata. Crossovo in Kanyjevo metodo je za račun ravninskih okvirjev pri svojem doktorskem delu uporabil tudi Srečko Cerar, kar je opisal v [Cerar, 1967]. V svojem nastopnem predavanju ob izvolitvi v izrednega profesorja na FAGG, ki ga je objavil v [Pukl, 1967], je prof. Slavko Pukl sicer obravnaval širše področje analize konstrukcij, na koncu pa ugotovil, da nam bodo šele računalniki omogočili boljše spoznavanje obnašanja konstrukcij. O udeležbi na kongresu avstrijskega društva za beton ob Vrbskem jezeru na Koroškem je poročal prof. Svetko Lapajne v [Lapajne, 1968]. Zapisal je, da so bili mostovi na avtocesti Celovec-Beljak, ki se je takrat gradila, preračunani z računalniki. Račun po diferenčni metodi je pogosto uporabil tudi prof. Riko Rosman iz Zagreba, ki je v [Rosman, 1968] objavil članek o lomljenih stenastih nosilcih, oslavljenih s svetlobnimi pasovi. Zanimiva za primerjavo z drugimi področji gradbeništva sta članek [Avanzo, 1968], ki obravnava uporabo računalnika pri projektiranju cest, in [Bubnov, 1969], ki obravnava možnosti uporabe računalnikov na celotnem področju gradbeništva. Prof. Slavko Pukl je o uporabi računalnika v statiki pisal v [Pukl, 1969]. Članka [Fajfar, 1969] in [Reflak, 1969] sodelavcev prof. Marinčka omenjata uporabo računalnika pri raziskovanju elastoplastičnega obnašanja nosilcev. O metodi končnih elementov je članek napisal prof. Dragoš Jurišič [Jurišič, 1969].

Stanje gradbenega konstrukcijskega inženirstva v Sloveniji in drugih republikah Jugoslavije konec šestega desetletja prejšnjega stoletja je opisal prof. Svetko Lapajne v poročilu s kongresa jugoslovanskega društva gradbenih konstruktorjev

v Portorožu [Lapajne, 1969]: »Teorija konstrukcij raziskuje velikosti notranjih sil oziroma napetostno stanje v posameznih konstruktivnih elementih. Sodobni razvoj pač zahteva, da se njih velikosti in smeri ugotovijo čim točneje vnaprej, saj je le na ta način možno oblikovanje in dimenzioniranje, ki naj bo istočasno gospodarno in varno. Vrsta posameznih primerov je zahtevala poseben študij, rešljiv zaradi svoje matematične kompliciranosti le s pomočjo računskega stroja (elektronskega). Tako imenovano »pešačenje« ostane le še za enostavne, lahke, že davno rešene naloge in za približno kontrolo rezultatov računalnika. Elektronski računalnik si je z bleščečim vzponom utrl pot v teorijo konstrukcij – brez njega si danes ne moremo več predstavljati znanstvenega raziskovanja na tem področju. V večini primerov služi za osnovo reševanja nalog matrični račun, sodobni matematični postopek. Tako je tudi velik del referatov podajal definicijo matric za rešitev danih nalog. V Beogradu imajo že sistematsko uvedeno računanje z elektronskim računalnikom. Pri nas pa se lahko pohvalimo le z dejstvom, da imamo nekaj mladih mož, katerih inženirska in matematična izobrazba je dovolj velika, da bomo lahko vsaj sledili svetovnemu razvoju na tem polju.«

2 PRVI RAČUNALNIŠKI PROGRAMI ZA ANALIZO KONSTRUKCIJ V SLOVENIJI

Konec šestdesetih let prejšnjega stoletja je bila na konstrukcijski smeri gradbenega oddelka FAGG v Ljubljani med sodelavci peščica mladih gradbenih inženirjev z nekaj malega operativnih in projektantskih izkušenj. Ker smo iz projektov, s katerimi smo imeli v preteklosti opravka, poznali obsežnost statičnih računov, nas je možnost uporabe posebnih računalniških programov za analizo konstrukcij takoj pritegnila. Prvi računalnik v Sloveniji Zuse Z23 (računalnike te vrste je izumil nemški gradbeni inženir Konrad Zuse (1919–1995)), s katerim so nekateri med nami že imeli opravka, je uporabljal programe za reševanje sistemov linearnih enačb, kar je pomenilo, da je opravil le del analize konstrukcije. Le za račun koeficientov enačb in obtežnih členov ter notranjih in podpornih sil



Slika 3. Ročno narisani računski model okvirne konstrukcije za račun s programom STRESS [Duhovnik, 1969].

pa je bilo treba opraviti še kopico t. i. peš računov. Pri enem od projektov okvirne konstrukcije za skladišče žita s šestimi etažami in okvirji s tremi polji v eni in štirimi polji v drugi smeri [Žerovnik, 1967] je bilo v statičnem računu za račun obtežbe in karakteristik konstrukcije ročno popisanih 24 strani formata A4, za račun potresnih sil po približni metodi in koeficientov ravnotežnih enačb ter obtežnih členov po klasični metodi premikov 43 strani, za račun upogibnih momentov in njihov prikaz pa še 82. Pri tem se je treba zavedati, da je bila uporabljena metoda v določenih primerih zaradi neupoštevanja vpliva prečnih in osnih sil na premike precej netočna. Program STRESS [Fenves, 1963] za analizo linijskih konstrukcij na računalniku IBM 1130, ki je bil konec leta 1968 inštaliran na Inštitutu za matematiko, fiziko in mehaniko v Ljubljani, je večji del analize opravil sam. Uporabljal je metodo končnih elementov, katere teoretično podlago smo poznali iz tuje in najnovejše domače literature. Projektant je moral določiti računski model konstrukcije (slika 3). Ustrezno oštevilčenje vozlišč in elementov je omogočalo generiranje podatkov in zmanjšanje števila luknjanih papirnatih kartic za njihovo pripravo. Na podlagi podatkov o konstrukciji in obtežbi je program poleg notranjih in podpornih sil izračunal tudi premike konstrukcije in vse izpisal v tabelarni obliki. Za tisto obdobje je bilo to izvrstno.

Na začetku uporabe smo imeli nekaj težav s pripravo podatkov na luknjanih karticah. Nekaj časa smo potrebovali za ugotovitev, da smo za napačne rezultate vedno odgovorni sami. Ker so bili podatki in rezultati le izpisani, brez grafične predstavitve, se je bilo treba navaditi na tak način branja in preverjanja rezultatov.

S programom STRESS na računalniku IBM 1130 smo po začetnih poskusih najprej analizirali nekaj konstrukcij, pri katerih smo bili projektanti, nato pa smo to počeli tudi za številne druge projektante konstrukcij. Naše prve izkušnje smo objavili v [Duhovnik, 1969].

Na pobudo gradbenega podjetja Tehnika je bil leta 1970 organiziran seminar o reševanju linijskih konstrukcij z uporabo računalnikov, naslednje leto pa izdana publikacija [Prelog, 1971].

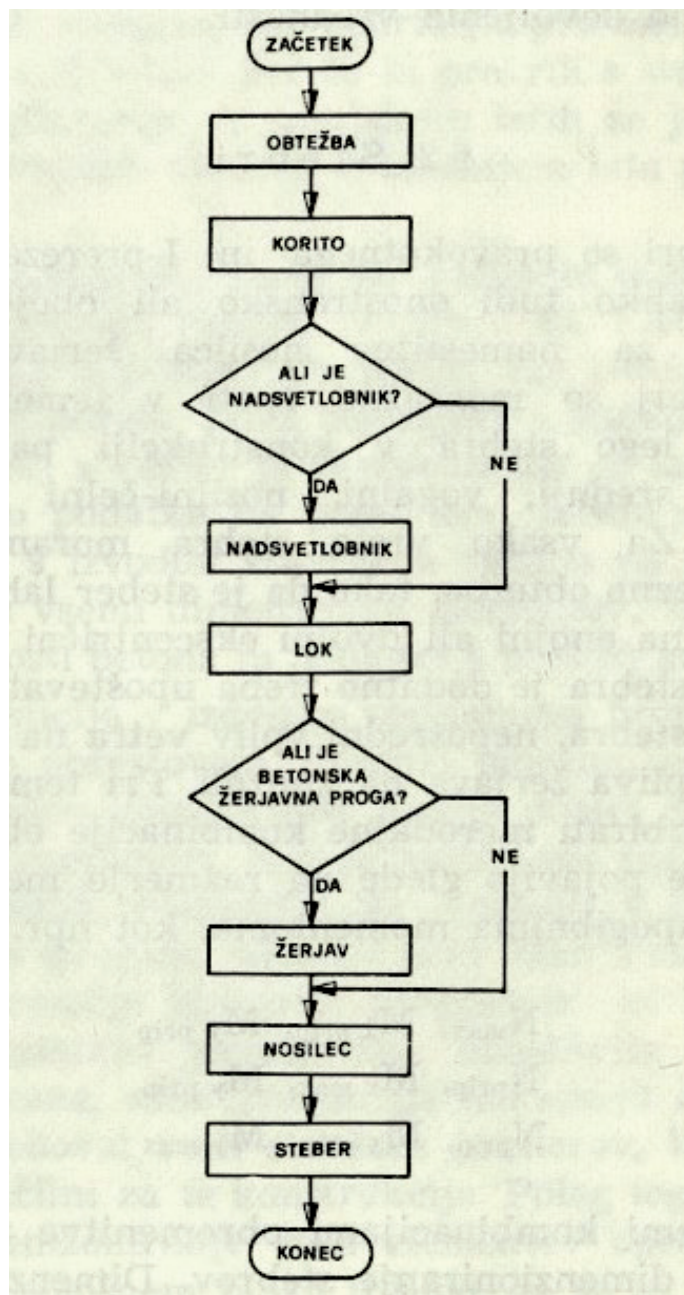
Zmogljivosti programa STRESS so bile omejene z velikostjo delovnega spomina računalnika IBM 1130. Od tega je bila odvisna največja velikost konstrukcije, ki jo je program lahko izračunal. Poleg velikosti konstrukcije je na porabo delovnega spomina vplival tudi tip konstrukcije. Zato smo velike konstrukcije, ki so presegale zmogljivosti programa STRESS, analizirali po metodi podkonstrukcij [Duhovnik, 1971].

Postopno smo začeli razvijati lastne splošne računalniške programe za račun konstrukcij, od katerih omenjamo le najbolj uporabljane. Prvi med njimi je bil program DAVEK za statično in dinamično analizo objektov visokogradnje pri vodoravni obtežbi, ki je kasneje prerasel v program EAVEK. Sledil je program RAVOK za statično analizo ravninskih okvirov [Planinc, 1975], ki ga je kasneje nadomestil splošnejši program OKVIR ([Marolt, 1981], [Marolt, 1989]) za račun prostorskih okvirnih konstrukcij. Za dimenzioniranje AB-prerezov je bil izdelan program DIMEN. Vzporedno z razvojem strojne in programske opreme so se programi sproti dopolnjevali in razvijali. Zadnje verzije programov so omogočale interaktivni vnos podatkov in grafično predstavitev rezultatov. Pri razvoju programa OKVIR so poleg Vida Marolta sodelovali še Matevž Dolenc, Andrej Kogovšek in Igor Potočan [Potočan, 1990].

Poleg programov za linijske konstrukcije smo razvijali tudi programe za račun plošč. Z metodo robnih elementov se je v svoji magistrski nalogi pod mentorstvom prof. Preloga ukvarjala Duška Tomšič [Tomšič, 1989]. Celovito projektiranje plošč pa je v svojem magistrskem delu pod mentorstvom doc. Janez Reflaka obdelal Vladimir Oštir [Oštir, 1994].

Za računalnikom IBM smo imeli na voljo precej zmogljivejše računalnike CDC in CYBER v Republiškem računalnem centru, zatem pa smo programe prenesli na osebne računalnike.

Poleg razvoja lastnih programov smo vzporedno uvajali v uporabo številne tuje programe. Med njimi so bili najpopularnejši

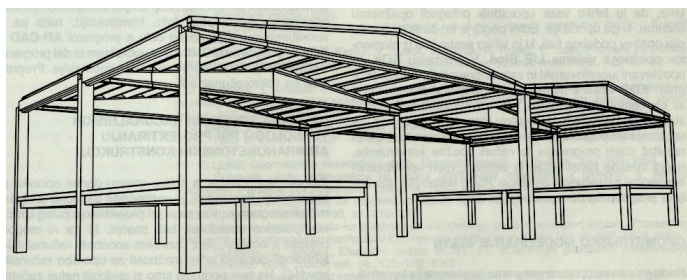


Slika 4. Diagram poteka programa za račun montažnih konstrukcij Sistema Gorica [Duhovnik, 1977].

programi iz skupine SAP (Structural Analysis Program) [Wilson, 1973], za katerega smo prejeli tudi zapise programov, ki smo jih lahko nadgrajevali in prilagajali svojim potrebam. Naše izkušnje in znanje smo z organizacijo seminarjev posredovali inženirjem v praksi.

3 PROGRAMI ZA PROJEKTIRANJE MONTAŽNIH AB-KONSTRUKCIJ

SGP Gorica je leta 1970 zgradil tovarno prefabriciranih montažnih elementov za gradnjo industrijskih dvoran pod imenom Sistem Gorica. Prvo leto je bilo izdelanih in montiranih 19.145 m² dvoran v občini Nova Gorica. Že naslednje leto pa so se pokazale vse prednosti montažne gradnje in v zelo kratkem času je bilo zgrajenih več kot 86.500 m² pokritih dvoran po vsej Jugoslaviji. Vsako leto se je število objektov večalo in s tem tudi najrazličnejše zahteve investitorjev. SGP Gorica je v ta namen naročila pri Računskem centru FAGG poseben program za statični izračun in dimenzioniranje konstrukcij teh dvoran [Duhovnik, 1977]. Izdelava programa je zahtevala nekajmesečno



Slika 5. Primer montažne konstrukcije, ki jo je bilo mogoče računati s programom MONCAD [Duhovnik, 1990a].

angažiranost strokovnjakov RC FAGG in SGP Gorica. Rezultat programa sta bila analiza in dimenzioniranje vseh elementov konstrukcije (slika 4). Program je močno skrajšal čas izdelave statičnega računa, istočasno pa so se zmanjšali za nekajkrat tudi stroški za statični izračun takšne dvorane poljubnih dimenzij s poljubno obtežbo, čeprav je bilo upoštevano mnogo več obtežnih primerov in variantnih izračunov pri elementih, kot je navada pri običajnih statičnih računih. Vzporedno z izdelavo programa so bili izdelani tudi tipski delavniški načrti vseh elementov. Vse to je proizvajalcu in njegovim sodelavcem omogočilo ponuditi investitorjem po celi Jugoslaviji skupaj s konstrukcijo tudi del tehnične dokumentacije, kar je bistveno skrajšalo čas gradnje. V letu 1972 se je proizvedlo in montiralo že 135.000 m² dvoran, v letu 1973 122.400 m², leta 1974 pa že 141.780 m². Tako je bila v tem letu dosežena skupna površina preko pol milijona m² pokritega prostora raznih dvoran. S programom je bilo v RC FAGG izračunanih 325 objektov. Povprečni čas izdelave statičnega elaborata (brez temeljev) je trajal 3 dni, v čemer je vračunan čas od takrat, ko so odposlali podatke, do povratka 9 izvodov statičnega računa na okoli 40 straneh.

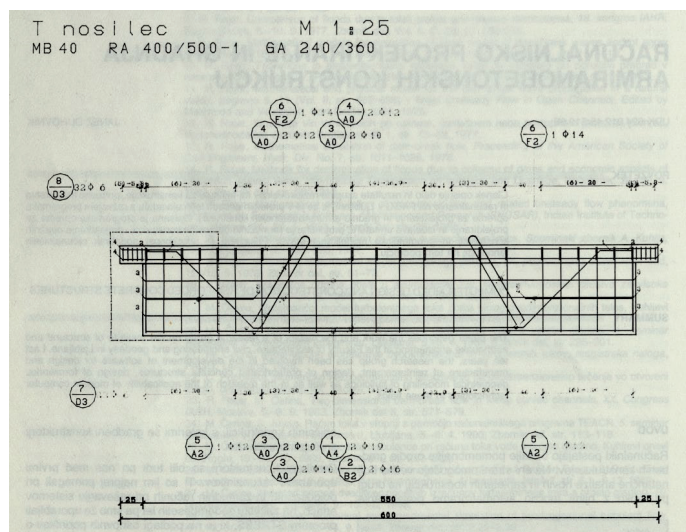
Izkušnje z razvojem omenjenega programa so nam omogočile razvoj splošnega programa za račun montažnih armiranobetonskih konstrukcij MONCAD [Duhovnik, 1990a]. Program je omogočal račun večetažnih konstrukcij z elementi najrazličnejših oblik (slika 5). Poleg analize in dimenzioniranja vseh montažnih elementov je opravil tudi analizo in dimenzionira-

nje čašastih temeljev stebrov. Interaktivni vnos podatkov, grafična predstavitev rezultatov in konstrukcije, ki jih je omogočal, so bili proti koncu njegovega razvoja že samoumevni. Program so uporabljali vsi pomembni proizvajalci montažnih elementov v Sloveniji: SGP INGRAD, SGP VEGRAD, SGP PRIMORJE, SGP PIONIR in drugi.

V skupini, ki je razvijala programe za račun montažnih konstrukcij, so bili takratni sodelavci IKPIR Matevž Dolenc, Janez Duhovnik, Peter Fajfar, Izток Kovačič, Vlado Ljubič, Vid Marolt, Janez Reflak in Žiga Turk; člana Katedre za masivne in lesene konstrukcije Franc Saje in Rajko Rogač; mladi raziskovalec Marko Verčnik in diplomanti Boštjan Brank, Tomaž Dimnik, Blaž Kuželički, Izток Likar, Igor Mozetič, Tomaž Pazlar, Bogomir Troha in Dejan Zupančič.

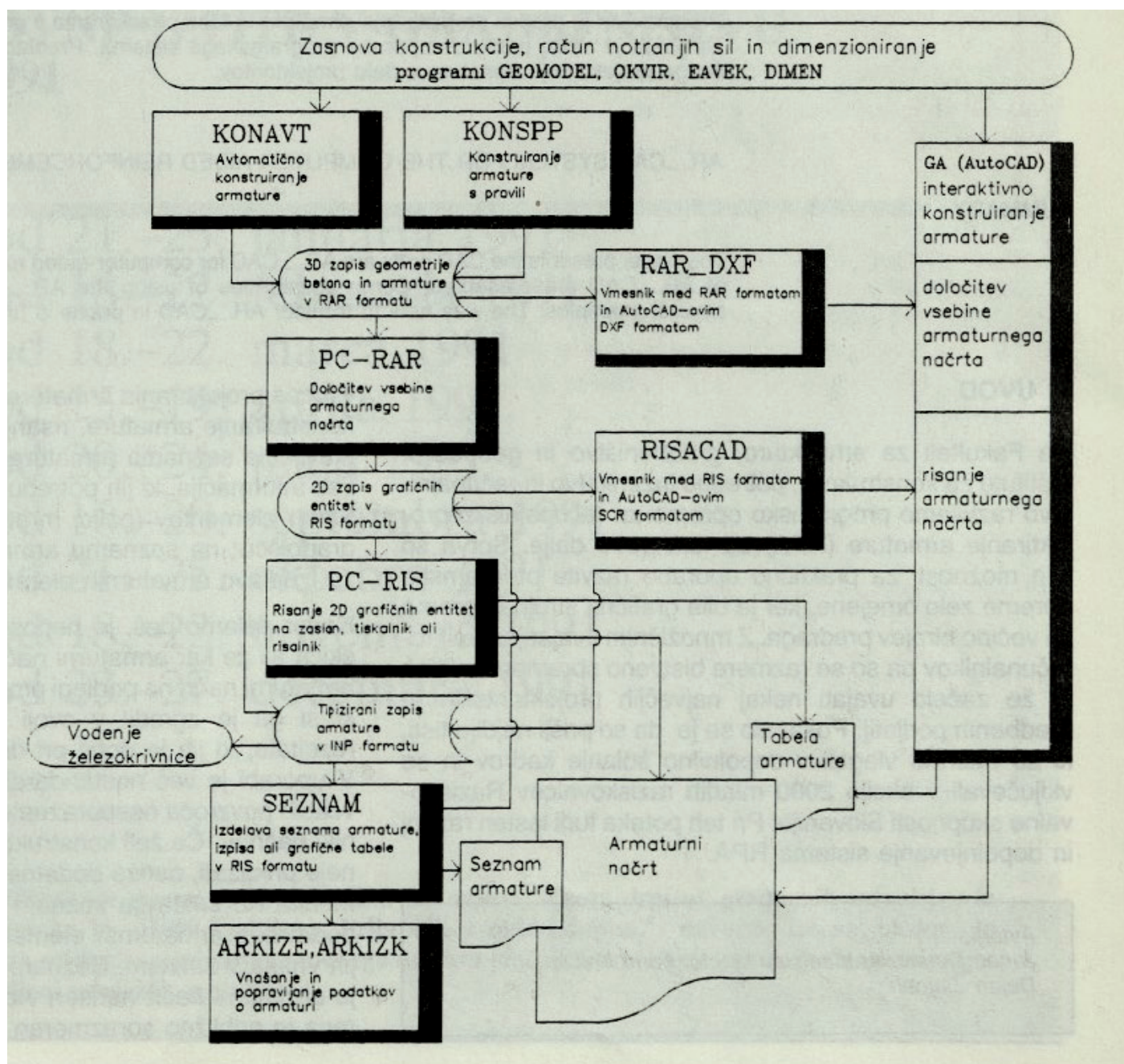
4 ŠIRJENJE UPORABE RAČUNALNIKOV NA DRUGA PODROČJA PROJEKTIRANJA KONSTRUKCIJ

Z razvojem računalniške grafike so se pojavile možnosti razvoja programov za naloge, ki so jih konstruktorji sicer opravljali »peš«. Med njimi so konstruiranje armature, risanje armaturnih načrtov, izdelava in montaža armature, ki so med časovno najboljše fazami pri projektiranju in gradnji armiranobetonskih konstrukcij. To je bil najpomembnejši razlog za nastanek predloga za raziskovalni projekt PIA (Projektiranje in izdelava armature), ki ga je konec leta 1979 IKPIR v sodelovanju z GIP Gradis predložil Raziskovalni skupnosti Slovenije. Ob dodatni denarni podpori večine najpomembnejših slovenskih gradbenih in projektantskih podjetij je bilo v letih 1980–85 opravljenih več raziskovalnih nalog. Na IKPIR, ki je prevzel raziskave v zvezi s projektiranjem armature, smo se ukvarjali



Slika 6. Armaturni načrt montažnega T-nosilca [Duhovnik, 1990a].

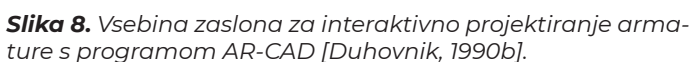
s splošnimi osnovami računalniškega projektiranja armature (1980) in z računalniškim konstruiranjem in risanjem armaturnih načrtov za elemente montažnih konstrukcij (1981) (slika 6), ravninskih okvirnih konstrukcij (1982), plošč (1983), sten (1984)



Slika 7. Diagram poteka programa AR-CAD [Duhovnik, 1990b].

in splošnih konstrukcij (1985). Uporaben rezultat raziskovalnega in razvojnega dela so bili računalniški programi za konstruiranje armature in risanje armaturnih načrtov za različne vrste konstrukcij [Duhovnik, 1990b] ter usposobljeni kadri za razvojno delo na tem področju. Programe smo razvijali na velikih računalnikih CYBER in DEC, pri čemer smo uporabljali doma razvita orodja. Praktična uporaba programov je bila mogoča le z našim neposrednim sodelovanjem pri projektiranju konstrukcij, ker je bila draga grafična oprema za projektivne biroje takrat nedosegljiva. Na ta način smo sodelovali pri nekaj projektih, po katerih so se konstrukcije tudi zgradile. S pojavom mikroračunalnikov in drugih sorazmerno cenjenih grafičnih

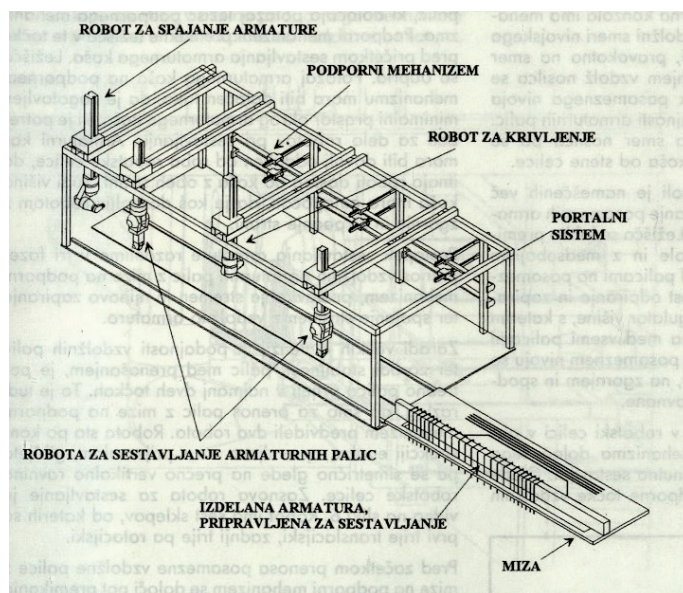
naprav pa so se razmere bistveno spremenile. Vso programsko opremo za projektiranje armature smo prenesli na mikroračunalnike in jo tam razvijali naprej. Rezultat tega dela je bil programski sistem AR-CAD (slika 7). Ta je omogočal avtomatično in interaktivno konstruiranje armature različnih vrst konstrukcij, risanje armaturnih načrtov in avtomatično sestavljanje seznamov armature. Interaktivni del programa AR-CAD je bil izdelan v okolju programa AUTOCAD (sliki 8 in 9). Sistem je bil delno ali v celoti instaliran v več projektivnih podjetjih. Podatki o armaturi so se lahko neposredno uporabili v programih za vodenje proizvodnje v železokrivnici, ki so bili izdelani v GIP Vegrad.

[illegible]

Ukvarjali smo se tudi z računalniškim projektiranjem opažnih konstrukcij. V sodelovanju z LIP Bled, proizvajalcem opažnih nosilcev in plošč, smo razvili programa ROK in KOP za računanje in konstruiranje opažev ([Samec, 1988], [Turk, 1988], slika 10).

Architectural drawing of the 'Kiln' (Kiln) building, showing a detailed floor plan and elevation. The drawing includes a grid system with dimensions (e.g., 180, 480, 720) and a scale bar. The building is a long, rectangular structure with a central courtyard area. The drawing is labeled 'Kiln' and 'Kiln'.

potekalo sestavljanje. Vhodni elementi so že izdelane armaturne palice, izhodni pa sestavljeni armaturni koši. Sestavljanje izvajajo roboti, opremljeni z orodji za krivljenje armature, za spajanje armature ter s prijemali. Poleg robotov so pot-



rební še razni mehanizmi, ki služijo za podpiranje in logistiko med sestavljanjem. Zaradi posebnih zahtev glede prilagodljivosti robotov, ki morajo z orodji doseči določene položaje na armaturnem košu, hkrati pa se morajo izogibati oviram, ni bilo mogoče uporabiti standardnih robotov, ampak smo zasnovali nove. Prikazana robotska celica je bila modelirana s programom za simulacijo robotov WORKSPACE 3 [Robot Simulation, 1995], ki je omogočal proučevanje, optimizacijo in dimenzioniranje njenih sestavnih delov. Proučili smo tudi vlogo in mesto robotske celice v celotnem procesu proizvodnje armature.

5 DIGITALIZACIJA PREDPISOV ZA GRADBENE KONSTRUKCIJE

Standardi so pomemben vir znanja in podatkov. Število standardov, ki jih mora gradbenik pri svojem delu upoštevati, je zelo veliko, nekateri med njimi pa so zelo obsežni. Še nedolgo nazaj so bili večinoma dostopni le na papirju. Njihova glavna značilnost je, da zajemajo veliko znanja, ki temelji na dolgotrajnih izkušnjah. To znanje je navadno zelo široko in nepregledno, zato sta iskanje in interpretacija potrebnih informacij težka in dolgotrajna. S tem se srečujejo vsi sodelujoči v procesu projektiranja, gradnje, vzdrževanja in odstranjevanja gradbenih objektov. Zato naj bi vsak sistematični postopek objave standardov pripomogel odpraviti omenjene težave. Na IKPIR smo se s problematiko elektronske predstavitve standardov ukvarjali od sedemdesetih let prejšnjega stoletja [Turk, 1995]. Deli standardov so bili najprej vgrajeni v računalniške programe za račun konstrukcij. Razviti so bili prototipi ekspertnih sistemov za uporabo posameznih standardov. Standardi so bili zapisani v obliki datoteke za pomoč pri uporabi določenega programa, ukvarjali pa smo se tudi s splošno kompjuterizacijo gradbenih standardov. Gregor Šuligoj je v diplomski nalogi [Šuligoj, 2004] opisal postopek zapisa v slovenščino prevedenega evrokoda EN 1991-1-3 o obtežbi snega v HTML- in XML-obliko. Izhajali smo iz končnega osnutka standarda in standardu dodali še komentarje nekaterih členov, ki smo jih privzeli iz spremljajočih dokumentov. V diplomski nalogi je Luka Stanič [Stanič, 2004] obravnaval spletno objavo EN 1990 o osnovah projektiranja s komentarji.

6 TEMPUS ICADERS

V letih 1994/95 smo koordinirali evropski projekt JEP-03008-94 ICADERS – Integrated CAD of earthquake resistant buildings and civil engineering structures (Integrirano računalniško projektiranje potresnoodpornih konstrukcij stavb in gradbenih inženirskih objektov). Njegov cilj je bil podpora poučevanju teorije in prakse računalniškega projektiranja. V projekt so bili vključeni univerze in podjetja iz Nemčije, Grčije, Italije, Slovenije in Velike Britanije: IEZ A.C., Bensheim; Ruhr-Universität Bochum; Universität Karlsruhe (Technische Hochschule); Siemens A.G. Nuclear Power Generation Division (KWU), Offenbach; Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering, Thessaloniki; Ismes S.p.A. Bergamo; Università degli studi della Calabria, Cosenza; Università degli studi Federico II di Napoli; Università degli studi di Pavia; CAD Studio, Ljubljana; ZRMK, Ljubljana; SCT, Ljubljana; Univerza v Ljubljani; Univerza v Mariboru; Queen's University of Belfast; Imperial College of Science, Medicine and Technology, London. V Ljubljani so bili organizirani trije seminarji, na katerih so predavali profesorji in strokovnjaki s tujih univerz in iz podjetij. Več mladih slovenskih inženirjev je bilo na nekajmesečnih izpopolnjevanjih na univerzah in podjetjih v tujini. Za nekatere med njimi je to bila spodbuda za uspešno poslovno ali znanstveno kariero. S sredstvi projekta je bila opremljena prva računalniška učilnica na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo (FGG) Univerze v Ljubljani (UL).

7 SODELOVANJE PRI PRIPRAVI IN UVAJANJU EC 0 IN EC 1 O VPLIVIH NA KONSTRUKCIJE

Aktivno smo sodelovali v delovni skupini Konstrukcije na SIST, ki je pripravljala nacionalne dodatke in predloge za sprejem novih standardov EUROCODE za konstrukcije. Že v času veljavnosti predstandardov smo v Gradbenem vestniku ([Duhovnik, 2000], [Duhovnik, 2004]) in na zborovanjih Slovenskega društva gradbenih konstruktorjev [Duhovnik, 1997] udeležencem predstavili vsebino in časovni potek sprejemanja standardov. Prevedli smo standarde EC 0 in večino EC 1 v slovenščino ter pripravili del priročnika, ki ga je izdala Inženirska zbornica Slovenije kot gradivo za seminarje, ki so bili prirejeni v Ljubljani in Mariboru [Duhovnik, 2009].

8 ZAČETKI NELINEARNE NUMERIČNE MEHANIKE NA IKPIR

Na IKPIR smo se začeli intenzivneje ukvarjati z (nelinearno) numerično mehaniko leta 1987, po prihodu prof. Frana Damjanica, ki je doktoriral na Univerzi v Swanseju (Wales, Velika Britanija). Ta univerza je bila v takrat zibelka razvoja numeričnih metod za analizo inženirskih problemov, saj je tam deloval tudi prof. Olgierd Zienkiewicz, eden od začetnikov metode končnih elementov. Konec osemdesetih let smo začeli študirati in uporabljati raziskovalne računalniške programe, ki jih je Frano Damjanič prinesel iz Swanseja. Programi so temeljili na metodi končnih elementov, kodirani so bili po pravilih, ki so jih uporabljali na Univerzi v Swanseju in njihovem softverskem podjetju Rockfield Software, pripadajoči teoretični modeli pa so bile večinoma opisani v knjigah, ki jih je izdajala založba Pineridge Press. Te programe smo spreminjali in nadgrajevali, da smo jih lahko uporabili za naloge, ki smo jih reševali, pisali pa smo tudi svoje. Uporabljali smo programski jezik FORTRAN, kasneje pa tudi C in C++ [Vihtelič, 1994].

Prva sodelavca Frana Damjanica sta bila mlada raziskovalca Jana Šelih (zdaj profesorica UL FGG) in Boštjan Brank, pridružili pa so se tudi takratni asistent Marjan Stanek (kasneje profesor na UL FGG), inženir matematike Andrej Vitek (zdaj vodja računskega centra na UL FGG), mladi raziskovalec Andrej Vihtelič ter nekateri študentje in raziskovalci s fakultet za strojništvo in elektrotehniko ljubljanske univerze pa tudi inženirji iz gradbene prakse.

Raziskovalne naloge so bile različne, večinoma s področja modeliranja in analize konstrukcij in materialov ter transporta toplote. Naj omenimo nekaj primerov. Jana Šelih se je ukvarjala s toplotnimi analizami inženirskih problemov ([Šelih, 1990], [Šelih, 1993]), Marjan Stanek z modeliranjem neelastičnega obnašanja betona in armiranega betona [Stanek, 1990], Boštjan Brank pa z velikimi deformacijami hiperelastičnih in elastoplastičnih tankostenskih konstrukcij [Brank, 1994]. Nadalje se je obravnavalo obnašanje kompozitnih polimernih konstrukcij pri velikih obremenitvah [Makarovič, 1996] ter simuliral pojav razpok v armiranobetonskih in prednapetih betonskih konstrukcijah [Damjanič, 1991]. Poleg gradbeno-konstruktorskih problemov smo analizirali tudi strojniške. Rajko Marinčič je na primer obravnaval problem tesnjenja glave motorja [Marinčič, 1991], in elektrotehniške [Benčič, 1993], že takrat pa smo se ukvarjali tudi z biomehaniko ([Herman, 1992], [Maček Lebar, 1996]), ki je zdaj pomembno področje numerične mehanike. Andrej Vitek je pripravil računalniški program za grafični prikaz rezultatov numeričnih analiz [Vitek, 1989].

Na ta način se je na IKPIR konec osemdesetih let prejšnjega stoletja vzpostavilo delovanje na področju numerične mehanike, ki še vedno poteka. Numerična mehanika predstavlja integracijo več disciplin, med njimi metode končnih elementov, teoretične in aplikativne mehanike, aplikativne matematike in numerične analize ter računalniških in informacijskih znanosti. Numerična mehanika je danes uveljavljena kot učinkovito orodje za simulacijo mnogih problemov v gradbeništvu pa tudi na ostalih inženirskih področjih ter v tehnologiji in naravoslovju. Vsi komercialni računalniški programi, ki se danes množično in vsakodnevno uporabljajo pri analizi in projektiranju konstrukcij, so produkt razvoja na področju numerične mehanike.

9 PROJEKT TEMPUS ACEM

Frano Damjanič je v letih 1991–1996 skupaj z Nenadom Bičaničem, ki je bil takrat profesor na Univerzi v Swanseju, organiziral projekt TEMPUS (Trans European Mobility Programme for University Studies) ACEM (Advanced Computational Engineering Mechanics), ki ga je financirala Evropska unija. V okviru projekta TEMPUS ACEM so v Ljubljano (na FGG) in v Maribor prihajali predavati priznani strokovnjaki s področja numerične mehanike, med njimi Mike Crisfield z Imperial Collegea v Londonu (Velika Britanija), Peter Wriggers s Tehniške univerze v Darmstadtu (Nemčija), D. Roger J. Owen, Richard D. Wood in Ken Morgan z Univerze v Swanseju (Velika Britanija), David V. Phillips z Univerze v Glasgowu (Velika Britanija), Bernhard Schrefler z Univerze v Padovi (Italija), Carlos A. Brebbia z Westex Institute of Technology (Velika Britanija) ter Ionassis St. Doltsinis z Univerze v Stuttgartu (Nemčija). Predavali so tudi direktorji in lastniki softverskih podjetij: Tom Crook z Rockfield Softwera (Velika Britanija), Vladimir Červenka s Červenka Consulting (Češka) in T. K. Hellen z Berkeley Nuclear Laboratories (Velika Britanija).

Projekt je omogočil nekaterim mlajšim slovenskim raziskovalcem odhod na ugledne evropske ustanove. Tako je na primer k skupini D. Rogerja J. Owna odšel Boštjan Brank, k Petru Wriggersu je odšel Jože Korelc (zdaj profesor na UL FGG), pri Miku Crisfieldu je bil Gordan Jelenič (zdaj prorektor Univerze na Reki), na Univerzi v Delftu (Nizozemska) pa je bila Barbara Škraba Flis (zdaj generalna sekretarka Inženirske zbornice Slovenije). Projekt TEMPUS ACEM je imel izredno pozitiven in dolgotrajen učinek na razvoj numerične mehanike v Sloveniji in na priključitev slovenskih raziskovalcev s tega področja k evropskim trendom.

10 DOKTORATI Z DELJENIM MENTORSTVOM

Po smrti Frana Damjaniča leta 1998 je raziskave na področju numerične mehanike na IKPIR nadaljeval Boštjan Brank s svojimi doktorskimi študenti. Med prvimi na Univerzi v Ljubljani je vpeljal doktorat z deljenim mentorstvom. Pri takšnem načinu izvajanja doktorskega študija je slovenski doktorand dobil somentorja na tuji ustanovi, delno je raziskoval tudi v tujini pri somentorju, po zagovoru doktorata pa sta mu naziv podelili tako Univerza v Ljubljani kot tuja ustanova. Uroš Bohinc, Jaka Dujc in Miha Jukić so opravljali doktorat z deljenim mentorstvom v povezavi z elitno francosko visoko šolo École Normale Supérieure de Cachan, Andjelka Stanić pa v

povezavi z najboljšo francosko tehnološko univerzo v Compiègne. V vseh primerih je bil na francoski strani somentor prof. Adnan Ibrahimbegović, priznani strokovnjak s področja numerične mehanike, doma iz Sarajeva, ki je doktoriral na Kalifornijski univerzi v Berkeleyju v ZDA pri profesorjih Edwardu L. Wilsonu in Robertu Taylorju. Omenimo naj, da je prof. Ibrahimbegović vrsto let generator novih idej na področju nelinearne numerične mehanike, med drugim je tudi avtor ploskovnih končnih elementov, ki jih uporablja program SAP 2000 [Wilson, 1973], s katerim na FGG učimo študente modeliranja s končnimi elementi. Uroš Bohinc je bil po doktoratu vodja laboratorija za konstrukcije na Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG), Jaka Dujc je odšel na Zürich University of Applied Sciences, kjer se je ukvarjal z numeričnimi simulacijami gorivnih celic, zdaj pa dela na UL FGG, Miha Jukić je danes na ZAG, Andjelka Stanić pa je docentka na Univerzi Twente na Nizozemskem.

Obstajale so tudi druge močne formalne in neformalne mednarodne povezave na področju numerične mehanike (med drugim z Univerzo v Padovi, s Politehniko v Torinu in s Tehniško univerzo v Braunschweigu). Te povezave se zrcalijo v mnogih publikacijah sodelavcev IKPIR, ki so nastale v soavtorstvu s tujimi raziskovalci.

Po smrti prof. Frana Damjaniča smo začeli postopoma uporabljati dva nova raziskovalna programa po metodi končnih elementov – FEAP prof. Roberta Taylorja [Taylor, 2014] ter hišni program AceGen/AceFEM prof. Jožeta Korelca z UL FGG [Korelc, 2016] – ki sta nam omogočala hitro testiranje novih teoretičnih in numeričnih modelov in idej. FEAP je napisan v FORTRAN-u in ima arhitekturo, ki omogoča enostaven vnos kode novega končnega elementa, ki jo pripravi uporabnik. AceGen in AceFEM pa delujeta v programu Mathematica. AceGen je sposoben avtomatično odvajati zahtevne izraze in algoritme, kar se izkaže za zelo uporabno pri izpeljavi matrik za kompleksne končne elemente in sklopljene probleme. AceFEM je raziskovalni program za nelinearno analizo, v katerega se vstavi koda, dobljena z AceGen. Poleg tega smo za nekatere naloge začeli uporabljati tudi komercialne računalniške programe, ki delujejo po metodi končnih elementov, kot so NISA [Nisa, 2021], ABAQUS [Abaqus, 2021] in ANSYS [Ansys, 2021].

11 ORGANIZACIJA KONFERENC S PODROČJA MEHANIKE KONSTRUKCIJ V SLOVENIJI

Sodelavci IKPIR, ki smo se ukvarjali z numerično mehaniko, smo se zavedali pomembnosti organiziranja mednarodnih konferenc v Sloveniji. Tudi zato smo doma pripravili dve mednarodni konferenci s področja konstrukcijskega inženirstva in numerične mehanike. Leta 2003 je bila na Bledu raziskovalna delavnica s področja konstrukcij, ki jo je sponzoriral NATO in na kateri so se nakazale smeri razvoja numeričnih metod za večfizikalne in večnivojske inženirske probleme [Ibrahimbegović, 2005]. Vabljeni govorniki so bili slavna imena s področja numerične mehanike in konstrukcij: Erwin Stein (Univerza v Hannoveru, Nemčija), Bernhard Schrefler (Univerza v Padovi, Italija), Peter Fajfar in Miran Saje z UL FGG, Ekkehard Ramm (Univerza v Stuttgartu, Nemčija), K. C. Park in Carlos A. Felippa (Univerza v Coloradu, ZDA), D. R. J. Owen (Univerza v Swanseju, Velika Britanija), Hermann Matthies, (Tehniška univerza v Braunschweigu, Nemčija), Herbert Mang (Tehno-

loška univerza na Dunaju, Avstrija) ter Adnan Ibrahimbegović in Pierre Ladevèze (École Normale Supérieure de Cachan, Francija).

Leta 2017 je bila v Ljubljani mednarodna konferenca o numeričnih metodah za konstrukcije in fluide [Ibrahimbegović, 2017]. Hkrati se je izvedel tudi doktorski seminar Current Research on Solids and Fluids, ki smo ga organizirali skupaj s Tehniško univerzo iz Braunschweiga (Nemčija) in Tehnološko univerzo iz Compiègna (Francija). Zadnji doktorski seminar smo pripravili leta 2020. Njegov naslov je bil Bayesian (finite element) model updating, prikazal pa je, kako se posodablja-jo numerični modeli z uporabo probabilističnih konceptov ob nekaj znanih eksperimentalnih podatkih.

To so bile priložnosti, da so se slovenski raziskovalci in doktorski študentje na domačih tleh lahko seznanili z trenutnimi raziskovalnimi trendi s področja numerične mehanike konstrukcij in materialov.

12 GEOMETRIJSKO IN MATERIALNO NELINEARNI PROBLEMI

O pomembnosti geometrijsko nelinearnih efektov pri vitkih in tankostenskih konstrukcijah se je v inženirski skupnosti vedelo že dolgo. Kljub temu so se robustni numerični modeli za geometrijsko nelinearne nosilce in lupine, ki niso dodatno poenostavljali osnovnih kinematičnih predpostavk, pojavili šele v 80. in 90. letih prejšnjega stoletja. Glavni preboj je naredil prof. Juan Carlos Simo (z Univerze v Stanfordu v ZDA) s svojimi sodelavci, ki je uspel na pravi in učinkovit način opisati velike zasuke, ki se pojavijo pri nelinearnih konstrukcijskih modelih. Na IKPIR smo se pridružili trendu izpeljevanja kinematično točnih formulacij in predstavili svoje ideje za modeliranje geometrijske nelinearnosti pri ukrivljenih tankostenskih konstrukcijah. Raziskave s tega področja, ki jih je naredil Boštjan Brank v svojem doktoratu ([Brank, 1994], [Brank, 1995]), se še zmeraj citirajo.

Modeliranje nelinearnega obnašanja gradbenih materialov je bilo na ljubljanski gradbeni fakulteti dolgo časa dokaj zapostavljeno, zato smo na IKPIR to želeli nekoliko spremeniti. Tako se je že Marjan Stanek v svojem doktoratu pod mentorstvom Frana Damjanića ukvarjal z neelastičnim modeliranjem betona in armiranega betona [Stanek, 1993], pri čemer je upošteval koncept razmazanih razpok in elasto-plastičnost. V osemdesetih letih prejšnjega stoletja je v numerični mehaniki vpeljal pojem konsistentnega elasto-plastičnega tangentnega modula, ki je zelo povečal robustnost numeričnih algoritmov za elasto-plastične materiale. S konsistentnim elasto-plastičnim tangentnim modulom so numerične simulacije obnašanja konstrukcij

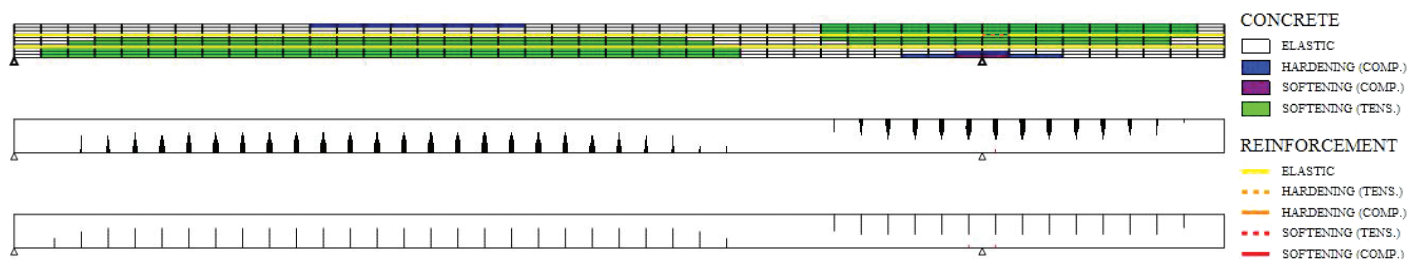
iz elasto-plastičnih materialov (kot so jeklo in ostali metali ter beton v tlaku) postale mnogo hitreje, zanesljivejše in enostavnejše. Tudi na IKPIR smo se ukvarjali s tem. V [Brank, 1997] in [Dujc, 2012] smo takšne algoritme predstavili za ukrivljene tankostenske metalne konstrukcije. Nadalje so se v devetdesetih letih uveljavili neelastični poškodbeni modeli, primerni za krhke materiale, kot je beton v nategu, ki opišejo poškodbe materiala s spreminjanjem elastičnega modula. Na IKPIR smo jih študirali in numerično implementirali nekoliko kasneje, ko smo se ukvarjali z razvojem numeričnih metod za nelinearno mehaniko loma.

Na ta način smo postopoma akumulirali solidno znanje o neelastičnih numeričnih metodah za gradbene materiale, ki je področje s precejšnjo praktično vrednostjo. To je bila tudi osnova za kasnejše numerično modeliranje odpovedi materiala, to je modeliranje nastanka in širjenja razpok. Zdaj lahko pomagamo tudi drugim raziskovalcem pri izpeljavi in implementaciji neelastičnih materialnih modelov: pred kratkim smo z Luko Porento, doktorskim študentom strojništva, izpeljali in računalniško implementirali materialni model za zlitine z oblikovnim spominom [Porenta, 2021].

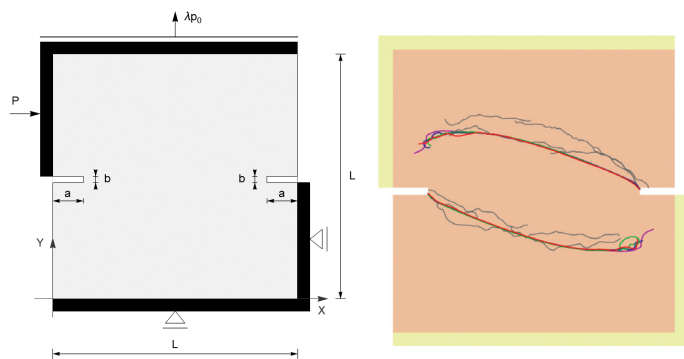
13 MODELIRANJE ODPOVEDI MATERIALA

Geometrijska in materialna nelinearnost nista dovolj za določitev mejne nosilnosti, mejne duktilnosti in pričakovanega mehanizma porušitve celotne konstrukcije, ki so včasih pomembni podatki pri projektiranju. V ta namen je treba opisati tudi nastanek in širjenje makroskopskih razpok. Lom materiala namreč povzroči zmanjšanje odpornosti ali celo odpoved konstrukcijskega elementa, vendar to še ne pomeni, da je s tem že avtomatično dosežena mejna nosilnost celotne konstrukcije, saj ta lahko še vedno funkcionira pod mejnim stanjem nosilnosti.

S problemom numeričnega modeliranja nastanka in širjenja razpok v krhkih in duktilnih materialih so se na IKPIR ukvarjali trije doktorandi, Jaka Dujc [Dujc, 2010a], Miha Jukić [Jukić, 2013] in Andjelka Stanić [Stanić, 2017a]. Jaka Dujc in Andjelka Stanić sta modelirala odpoved ploskovnih konstrukcijskih elementov, Miha Jukić pa odpoved armiranobetonskih nosilcev in okvirjev. Vsi so uporabljali koncept vstavljene močne nezveznosti v povezavi z nelinearno mehaniko loma, slika 12. Osnovna ideja, ki so jo raziskovali, se lahko predstavi na naslednji način. Za opis obnašanja materiala pod ekstremno obtežbo se najprej uporabi elasto-plastični ali elasto-poškodbeni materialni model. Ko je izpolnjen kriterij, ki nakazuje nastanek makrorazpoke, se v kinematiko končnega elementa vstavi diskretno razpoko (močno nezveznost). V razpoki se v skladu z modelom kohezivne cone vpelje neelastični kohezijski materialni zakon



Slika 12. Napoved odpovedi materiala v previsnem armiranobetonskem nosilcu [Jukić, 2014].



Slika 13. Numerična ponovitev eksperimentalne strižne porušitve betonskega bloka [Stanić, 2020] (barvne črte na desni sliki so numerične napovedi, črne pa eksperimentalne razpoke).

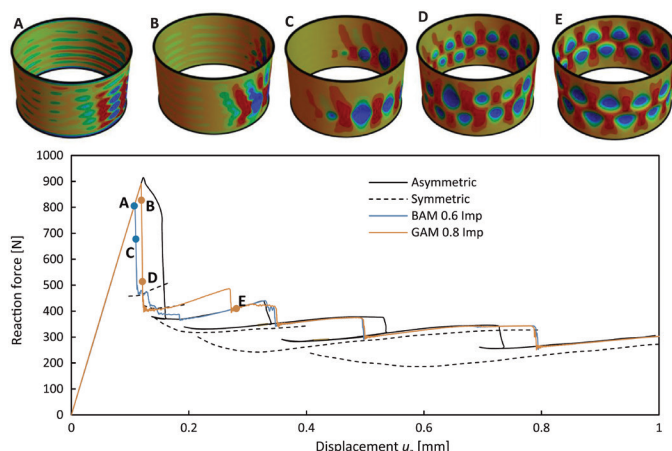
mehčanja, ki sipa lomno energijo ob odpiranju in širjenju razpoke. S tem se doseže neodvisnost numeričnih rezultatov od mreže končnih elementov. Enoličnost rešitve pa je zagotovljena z dodatno enačbo, preko katere komunicirata razpoka in ostali del končnega elementa.

Čprav je bilo v svetovnem merilu vloženih veliko naporov v robustne, natančne in za uporabnika enostavne numerične algoritme za (nelinearno) modeliranje odpovedi materiala (predvsem zaradi njihove velike praktične vrednosti), takšni algoritmi še vedno niso dosegli zadostne zrelosti za vključitev v komercialne računalniške programe za analizo konstrukcij, kar kaže na težavnost problema. Komercialni programi za analizo konstrukcij imajo sicer vgrajene različne algoritme za modeliranje razpok, vendar ti temeljijo na konceptu razmazane razpoke in so precej nerobustni (kar se kaže v hitri izgubi konvergence) pa tudi slabo dokumentirani. To je bila naša izkušnja, ko smo uporabljali program ABAQUS [Abaqus, 2021] za modeliranje širjenja razpok v lesenih rebastih ploščah [Lavrenčič, 2018b], za modeliranje odpovedi sistema les-lepilo-steklo [Piculin, 2016], za modeliranje porušitve jeklenih okvirjev [Dujc, 2010c], [Piculin, 2015]) ter za modeliranje poškodovanosti armiranobetonskega bloka pri padcu na togo podlago [Lavrenčič, 2016].

Na IKPIR nadaljujemo raziskovanje in testiranje različnih modelov in idej za robustno, natančno in enostavno numerično modeliranje nastanka in širjenja razpok, npr. ([Stanić, 2020], [Dujc, 2020]), slika 13, saj smo prepričani, da je to področje pomembno za konstrukcijsko gradbeništvo.

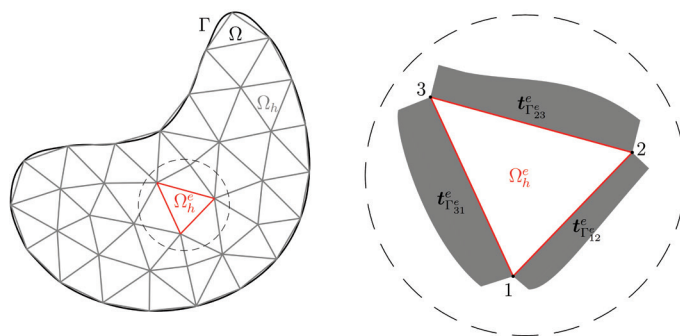
14 PLOSKOVNE KONSTRUKCIJE IN OPTIMIZACIJA KONSTRUKCIJ

Plošče in lupine so pogoste konstrukcije tako v gradbeništvu kot tudi na drugih inženirskih področjih. Zato so robustne numerične rešitve za tovrstne konstrukcije nepogrešljive pri analizi njihovega obnašanja in pri njihovem projektiranju. Lupinaste konstrukcije so lahko dimenzij od nekaj sto metrov (npr. hladilni stolpi) pa vse do nekaj nanometrov (npr. nanocevke), narejene pa so lahko iz različnih materialov. Na IKPIR imamo izkušnje z zahtevnejšim modeliranjem in analizo ploskovnih konstrukcij od leta 1988. Od takrat se ukvarjamo z modeliranjem različnih (nelinearnih) efektov



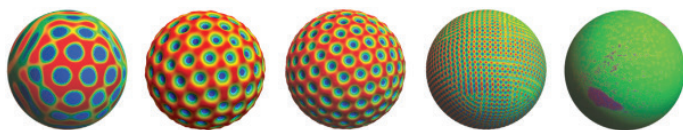
Slika 14. Simulacija uklona osno obremenjenega imperfektne cilindra [Lavrenčič, 2018a].

pri ploskovnih konstrukcijah, ki so povezani z geometrijsko nelinearnostjo, s stabilnostjo, obnašanjem v pouklonskem območju, dinamiko, plastičnostjo, poškodovanostjo materiala in tudi z nastankom in širjenjem razpok, npr. ([Brank, 2000], [Brank, 2002], [Dujc, 2010b], [Lavrenčič, 2018a]), slika 14. Ukvarjamo se tudi s specializiranimi modeli lupin, npr. takšnimi za kompozitno laminatne konstrukcije ali takšnimi, ki uporabljajo 3D napetostno stanje, kar omogoča enostavno uporabo zahtevnih nelinearnih in neelastičnih konstitutivnih modelov, npr. [Brank, 2005]. Pomembno delo na področju modeliranja ploskovnih konstrukcij je opravil Uroš Bohinc, ki je v svojem doktoratu pripravil konsistentne postopke za oceno modelske [Bohinc, 2009] in diskretizacijske napake [Bohinc, 2014], slika 15.



Slika 15. Ocena napake z metodo uravnoveženih ostankov [Bohinc, 2009].

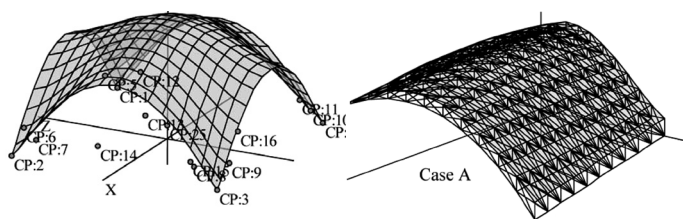
Bistvena lastnost tankostenskih ploskovnih konstrukcij je uklonska občutljivost. Uklonu se v gradbeništvu izogibamo za vsako ceno. Obstajajo pa tudi tehnologije, ki izkoriščajo uklon v pozitivne namene. Izkazalo se je, da so numerične simulacije, povezane s takšnimi tehnologijami, praviloma pretežka naloga za komercialne računalniške programe za nelinearno analizo konstrukcij. Zato smo z doktorandom Tomom Veldinom ter doc. Miho Brojanom s Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani pripravili teoretične in numerične modele za simulacijo površinskega gubanja togih open na mehki podlagi [Veldin,



Slika 16. Gubanje sferične opne na mehki notranjosti v odvisnosti od razmerja togosti opne in podlage [Veldin, 2020].

2020], slika 16. Takšne analize so mogoče le s specializiranimi algoritmi za sledenje ravnotežnih poti, katerih verzije smo razvili tudi na IKPIR ([Stanić, 2016a], [Stanić, 2017b]).

Čeprav se zdi nenavadno, je za nekatere gradbene konstrukcije optimalna oblika ključnega pomena za njihovo stabilnost. Pri tem gre predvsem za tankostenske ukrivljene konstrukcije pa tudi za prednapete membranske in kabelske konstrukcije. Znana inženirja Frei Otto (avtor mnogih zahtevnih kabelskih konstrukcij) ter Heinz Isler (avtor mnogih atraktivnih armiranobetonskih lupin) sta v 70. in 80. letih prejšnjega stoletja iskala optimalne oblike svojih konstrukcij s pomočjo domiselnih eksperimentov. Kasneje se je našlo načine za iskanje optimalnih oblik z numeričnimi algoritmi. Temu trendu smo se pridružili tudi na IKPIR in skupaj s prof. Markom Keglom s Fakultete za



Slika 17. Optimalni obliki armiranobetonske in jeklene palične strehe [Kegl, 2006].

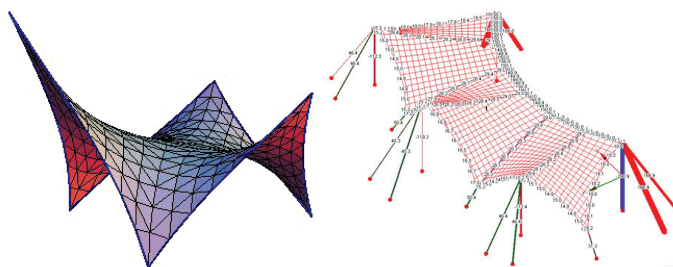
strojništvo Univerze v Mariboru pripravili algoritma za iskanjem optimalne oblike uklonsko neobčutljivih in uklonsko občutljivih ploskovnih konstrukcij [Kegl, 2006], slika 17. Ukvarjali smo se tudi z drugimi vidiki optimizacije konstrukcij. V [Stanić, 2016b] smo na primer pokazali, kako se optimizira rebraste križno lepljene lesene plošče ob upoštevanju standardov in priporočil proizvajalcev.

Med zanimivejšimi zaključnimi deli, ki smo jih na IKPIR mentorirali s področja ploskovnih konstrukcij, sta študija projektiranja silosov Simona Petroviča [Petrovič, 2009], danes docenta na Fakulteti za arhitekturo Univerze v Ljubljani, ter modeliranje elastoplastičnega uklona velikega jeklenega rezervoarja med potresom Tonija Klemenčiča [Klemenčič, 2016]. Omenimo naj še dela Gorazda Brgleza in Matije Majhna (zračno podprti konstrukciji nad nogometnim igriščem), Sama Pergarca (mrežna kabelska konstrukcija), Jureta Turka (armiranobetonska lupina), Tanjo Srednik in Primoža Zelenca (prednapeti membranski konstrukciji), Ditko Čakš (hladilni stolp v Šoštanju), Katarino Smrke, Domna Ivanška in Uroša Kokota (Trimovi Qbiss One in Qbiss Air fasadni sistemi), Mihelo Baumgartner (jekleni cilindrični rezervoar), Davida Korena (modeliranje stikov konstrukcijskih elementov), Danijela Lisičiča in Tilna Klemenca (poliestrski kompozitni laminati) ter Mojco Usnik in Uroša Ristića (kombiniranje eksperimentov in numerične analize).

15 KOMPOZITNO LAMINATNE KONSTRUKCIJE IN PREDNAPETE MEMBRANE

Kompozitni laminati se v gradbenem konstruktorstvu uporabljajo v glavnem za rezervoarje. Na drugih inženirskih področjih, kjer jih je seveda tudi treba ustrezno konstrukcijsko projektirati, pa se uporabljajo v raznovrstne namene. V 90. letih smo se z Matjažem Makarovičem z ZAG lotili modeliranja in analize kompozitno laminatnih poliestrskih cistern, ki jih je proizvajalo podjetje Regeneracija [Makarovič, 1996]. V sodelovanju z oddelkom za aeronavtiko torinske politehnike pa smo nekoliko kasneje razvili posebne končne elemente za analizo slojevitih kompozitnih lupin [Brank, 2000].

Druge, nekoliko nekonvencionalne gradbene konstrukcije, s katerimi smo se tudi ukvarjali, so prednapete membrane, slika 18. To temo je preštudiral v svojem diplomskem delu Damir Kovačević [Kovačević, 2012] in s tem odprl pot drugim kvalitetnim zaključnim delom s področij prednapetih membran, napihljivih membran in kabelskih konstrukcij. Prednapete membrane, ki tudi v Sloveniji postajajo popularne strešne konstrukcije, se projektirajo drugače kot konstrukcije iz standardnih gradbenih materialov. Najprej se predpostavi ustrezno ortotropno prednapetje v membranski tkanini, nato pa se poišče geometrija, ki ustreza prednapetju. To se imenuje iskanje oblike, rezultat pa je začetna oblika membranske konstrukcije. V naslednji fazi se z geometrijsko nelinearno analizo preveri, kako se spreminjajo sile v membrani zaradi obtežb vetra in snega. Če se pri izračunu pojavijo tlačne napetosti, ki so seveda nefizikalne, je potrebna nova iteracija z novim prednapetjem

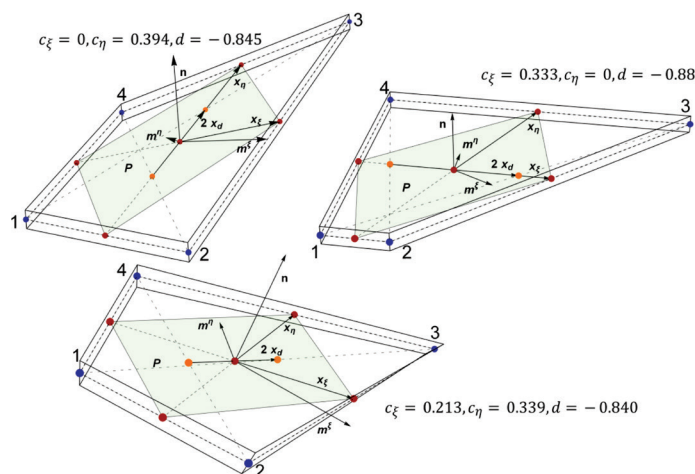


Slika 18. Iskanje oblike membrane (levo) [Jukić, 2013] in sile v membranski konstrukciji, podprti s kabli in jambori (desno) [Kovačević, 2012].

in novo začetno obliko. Zadnja faza projektiranja je določitev krojnih pol, ki se zvarijo med seboj, ko se tvori površina membrane.

16 TEHNOLOGIJE KONČNIH ELEMENTOV IN ČASOVNIH INTEGRACIJSKIH SHEM

Čeprav se zdi, da imamo že zdaj na razpolago robustne in zanesljive končne elemente za analizo konstrukcij, ki so na voljo tudi v komercialnih računalniških programih, je še vedno dovolj prostora za njihovo izboljšanje. Takšno početje imenujemo tehnologija končnih elementov, slika 19. S tem se je na IKPIR ukvarjal doktorand Marko Lavrenčič, ki je z uporabo različnih variacijskih principov razvil robustne in računsko hitre mešane ploskovne končne elemente [Lavrenčič, 2020], ki so precej hi-



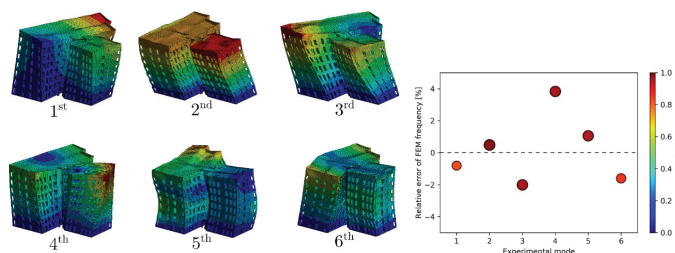
Slika 19. Tehnologija končnih elementov [Lavrenčič, 2020].

trejši in tudi natančnejši od tistih, ki se trenutno uporabljajo v komercialnih programih za nelinearno analizo konstrukcij. To se zdi pomembno, ker raziskave kažejo, da uporabniki komercialnih programov po metodi končnih elementov največ uporabljajo prav končne elemente za lupine (za področje gradbenih konstrukcij to najverjetneje ne velja, saj so linijski končni elementi še vedno prevladujoči).

Ukvarjali smo se tudi s časovnimi integracijskimi shemami za dinamiko konstrukcij. Klasične integracijske sheme je predstavil Newmark v petdesetih letih. Kasneje, v devetdesetih letih, so se začele razvijati sheme, ki ohranjajo osnovne fizikalne konstante gibanja, kot sta gibalna in vrtilna količina, pa tudi energija pri elastičnih konstrukcijah. Tudi na IKPIR smo se ukvarjali z razvojem takšnih integracijskih shem [Brank, 1998]. Razvijali pa smo tudi algoritme, ki numerično in kontrolirano sipajo energijo, in sicer tako, da se sipanje dogaja v območju visokih frekvenc, ki so popačene zaradi prostorske diskretizacije ([Brank, 2003], [Lavrenčič, 2021]).

17 POSODABLJANJE NUMERIČNIH MODELOV

V zadnjem času se na IKPIR ukvarjamo s posodabljanjem numeričnih modelov za konstrukcije. Ideja je, da se numerični model konstrukcije, ki je nastal z uporabo končnih elementov, parametrizira, nato pa se vrednosti parametrov posodobijo tako, da se numerični rezultati kar najbolj ujemajo z eksperimentalnimi. S posodabljanjem modelov visokih lesenih stavb se ukvarja doktorand Blaž Kurent [Kurent, 2021], slika 20, s posodabljanjem modelov mostnih konstrukcij (med njimi viadukta Ravbarkomanda) pa Nina Kumer. Največkrat se kot eksperimentalne rezultate uporabljajo meritve, dobljene z eksperimentalno ali operativno modalno analizo. Pri tem sodelujemo z Univerzo v Exeterju, francoskim Centre Scientifique et Technique du Bâtiment in Zavodom za gradbeništvo Slovenije. Pri apliciranju Bayesovega posodabljanja numeričnega modela, kjer se uporablja probabilistične koncepte, pa sodelujemo s prof. Noëmi Friedman s Computer Science and Automation Research Institute iz Budimpešte. Parametri modela postanejo naključne spremenljivke s porazdelitvami, z inverznim (Bayesovim) postopkom, ki vključuje numerične in eksperimentalne rezultate, pa se pride do posodobljenih porazdelitev parametrov. S probabilističnimi koncepti lahko



Slika 20. Osnovne nihajne oblike sedemnadstropne lesene stavbe in ujemanje numeričnih rešitev z eksperimenti po posodobitvi modela [Kurent 2021].

v modeliranje vključimo napako meritev, opravimo statistično analizo numeričnih rezultatov in dobimo vpogled v distribucijo napake po modelu.

Omenimo naj še delo Mitje Papinuttija, ki je pred kratkim doktoriral z zelo zanimivo temo modeliranja vpliva vetra na dinamičen odziv dolgih visečih (in plavajočih) mostov, ki se načrtujejo nad norveškimi fjordi (ob somentorstvu prof. Ola Øisetha z Norwegian University of Science and Technology iz Trondheima), ([Papinutti, 2020], [Papinutti, 2021]).

18 SKLEP

Področje konstrukcijskega inženirstva na IKPIR se je v petdesetih letih razvilo od prvih primerov uporabe tujih in lastnih računalniških programov za računanje linijskih konstrukcij do zahtevnih nelinearnih analiz številnih vrst konstrukcij, ki se izvajajo ali z lastno programsko opremo ali z na IKPIR izpopolnjeno opremo ali pa s komercialnimi računalniškimi programi. Poznavanje znanih tujih programov in razvoj lastne programske opreme sta omogočila postopen razvoj do današnjega, mednarodno priznanega delovanja raziskovalcev IKPIR. Z organizacijo več strokovnih in znanstvenih srečanj s področij uporabe računalnika v gradbeništvo in numerične mehanike je IKPIR imel pomembno vlogo pri širjenju znanja na področju konstrukcijskega inženirstva. Aktivno smo bili vključeni tudi v uvajanje evrokodov EC 0 in EC 1 o vplivih na konstrukcije.

19 LITERATURA

Abaqus, Dassault Systems Simulia Corp, 2021.

Ansys®, ANSYS, Inc., 2021.

Avanzo, L., Moderni načini projektiranja cest, Gradbeni vestnik, 6-7, 1968.

Benčić, Z., Bešič, A., Damjanić, F., Šelih, J., Estimation of transient thermal impedance for constant current of a power thyristor using temperature field calculation, IEEE Transactions on Electron Devices, 40, 1885-1887, 1993.

Bohinc, U., Ibrahimbegović, A., Brank, B., Model adaptivity for finite element analysis of thin or thick plates based on equilibrated boundary stress resultants, Engineering Computations, 26: 69-99, 2009.

Bohinc, U., Brank, B., Ibrahimbegović, A., Discretization error for the discrete Kirchhoff plate finite element approximation.

Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 269: 415-436, 2014.

Brank, B., Velike deformacije lupin pri nelinearnih materialnih modelih, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 1994.

Brank, B., Perić, D., Damjanić, B. F., On implementation of a non-linear four-node finite element for thin multilayered elastic shells, Computational Mechanics, 16: 341-359, 1995.

Brank, B., Perić, D., Damjanić, B. F., On large deformations of thin elasto-plastic shells: implementation of a finite rotation model for quadrilateral shell element, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 40: 689-726, 1997.

Brank, B., Briseghella, L., Tonello, N., Damjanić, B. F., On non-linear dynamics of shells: implementation of energy-momentum conserving integration algorithm for a finite rotation shell model, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 42: 409-442, 1998.

Brank, B., Carrera, E., Multilayered shell finite element with interlaminar continuous shear stresses: a refinement of the Reissner-Mindlin formulation, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 48: 843-874, 2000.

Brank, B., Ibrahimbegović, A., On the relations between different parametrizations of finite rotations for shells, Engineering Computations, 18: 950-973, 2001.

Brank, B., Korelc, J., Ibrahimbegović, A., Nonlinear shell problem formulation accounting for through-the-thickness stretching and its finite element implementation, Computers and Structures, 80: 699-717, 2002.

Brank, B., Korelc, J., Ibrahimbegović, A., Dynamics and time-stepping schemes for elastic shells undergoing finite rotations, Computers and Structures, 81: 1193-1210, 2003.

Brank, B., Nonlinear shell models with seven kinematic parameters, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 194: 2336-2362, 2005.

Bubnov, S., Pomen elektronskih računalnikov za gradbeništvo, Gradbeni vestnik, 2, 1969.

Cerar, S., Vpliv neposredne lastne teže stropne konstrukcije, krčenja in kvalitete betona na potek notranjih obtežb med gradnjo večetažne železobetonske okvirne konstrukcije, Gradbeni vestnik, 3, 1967.

COBISS, Bibliografija Dragoš Jurišič, https://bib.cobiss.net/bibliographies/si/webBiblio/bib201_20210729_114726_a33410659.html, 1966a.

COBISS, Bibliografija Ervin Prelog, https://bib.cobiss.net/bibliographies/si/webBiblio/bib201_20210729_114918_a1880419.html, 1966b.

Damjanić, F., Šelih, J., Stanek, M., Prediction of the cyclic response of structural reinforced concrete, Structural engineering review, 3, 233-239, 1991.

Dolinšek, B., Duhovnik, J., Robotizirano sestavljanje armature linijskih armiranobetonskih elementov, Gradbeni vestnik, 1-2-3, 1997.

Duhovnik, J., Fajfar, P., Račun konstrukcij z elektronskimi računalniki, Teoretične osnove in praktični primeri, Gradbeni vestnik, 11 in 12, 1969.

Duhovnik, J., Fajfar, P., Račun konstrukcij z metodo podkonstrukcij, Gradbeni vestnik, 3, 1971.

Duhovnik, J., Jelinčič, B., Kajfež, B., Marolt, V., Reflak, J., Rogač R., Saje, F., Program za izdelavo statičnega računa montažne dvoranske konstrukcije, Gradbeni vestnik, 7-8, 1977.

Duhovnik, J., Prvi slovenski predstandardi za vplive na konstrukcije, Zbornik 19. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 16. - 17. oktober 1997.

Duhovnik, J., Računalniško projektiranje in gradnja armiranobetonskih konstrukcij, Gradbeni vestnik, 9-10-11, 1990a.

Duhovnik, J., Ljubič, V., Knific, T., Žlajpah, D., AR-CAD programski sistem za projektiranje armature, Gradbeni vestnik, 12, 1990b.

Duhovnik, J., EC 1 - osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije = EC 1 - basis of design and actions on structures, Gradbeni vestnik, 4, 2000.

Duhovnik, J., Stanje evropskih standardov osnove projektiranja konstrukcij (EN 1990) in vplivi na konstrukcije (EN 1991), Gradbeni vestnik, 1, 2004.

Duhovnik, J., Evrokod 0: osnove projektiranja; Evrokod 1: vplivi na konstrukcije, v: BEG, Darko (ur.), POGAČNIK, Andrej (ur.), Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih, Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije, 2009.

Dujc, J., Finite element analysis of limit load and localized failure of structures, doctoral thesis, University of Ljubljana and École Normale Supérieure de Cahan, 2010a.

Dujc, J., Brank, B., Ibrahimbegović, Quadrilateral finite element with embedded strong discontinuity for failure analysis of solids, Computer Modeling in Engineering & Sciences, 69, 223-260, 2010b.

Dujc, J., Brank, B., Ibrahimbegović, Multi-scale computational model for failure analysis of metal frames that includes softening and local buckling, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 199, 1371-1385, 2010c.

Dujc, J., Brank, B., Stress resultant plasticity for shells revisited, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 247-248, 146-165, 2012.

Dujc, J., Brank, B., Modeling fracture in elasto-plastic solids by embedded-discontinuity stress-hybrid finite element formulation, Mechanics of Advanced Materials and Structures, DOI: 10.1080/15376494.2020.1786755, 2020.

Fajfar, P., Marinček, M., Račun deformacij enostavnih upogibnih nosilcev po elasto-plastični teoriji, Gradbeni vestnik, 4-5, 1969.

Fenves, S. J., STRESS, Structural Engineering System Solver: a computer programming system for structural engineering problems, Cambridge, School of Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil Engineering. Technical report, T63-2, 1963.

GV, Gradbeni vestnik, arhiv, <https://www.zveza-dgits.si/gradbeni-vestnik-arhiv/>, 2021.

Herman, S., Antolič, V., Iglič, A., Maček Lebar, A., Damjanič, F., Srakar, F., Bending moments and stress distribution in the proximal femur after total hip replacement, *Acta pharmaceutica*, 42, 337-340, 1992.

Hvastja, B., Mušič, J., Most čez Dravo v Podvelki - projekt in izvedba, *Gradbeni vestnik*, 2, 1963.

IMFM, Institut za matematiko, fiziko in mehaniko, Obvestilo o seminarju, *Gradbeni vestnik*, 6-7, 1966.

Jež-Gala, C., Šliber, F., Plastostatična analiza in dimenzioniranje jeklenih okvirov, *Gradbeni vestnik*, 8-9, 1966.

Ibrahimbegović, A., Brank, B., Engineering structures under extreme conditions: multi-physics and multi-scale computer models in non-linear analysis and optimal design, *NATO Sciences Series*, IOS Press, 2005.

Ibrahimbegović, A., Brank, B., Kožar, I., Multiscale computational methods for solids and fluids, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2017.

Jukić, M., Finite elements for modeling of localized failure in reinforced concrete, doctoral thesis, University of Ljubljana and École Normale Supérieure de Cahan, 2013.

Jukić, M., Brank, B., Ibrahimbegović, A., Failure analysis of reinforced concrete frames by beam finite element that combines damage, plasticity and embedded discontinuity, *Engineering Structures*, 75, 507-527, 2014.

Jurišić, D., Računanje inženirskih konstrukcij po metodi končnih elementov, *Gradbeni vestnik*, 6, 1969.

Kegl, M., Brank, B., Shape optimization of truss-stiffened shell structures with variable thickness, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, 2611-2634, 2006.

Klemenčič, T., Brank, B., Potresna analiza jeklenih cilindričnih rezervoarjev, *Gradbeni vestnik*, 65, 176-182, 2016.

Korelc, J., Wriggers, P., Automation of Finite Element Methods, Springer International Publishing, Switzerland, 2016.

Kovačević, D., Prednapete membranske konstrukcije, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2012.

Kurent, B., Brank, B., Ao, W. K., Model updating of seven-storey cross-laminated timber building designed on frequency-responsefunctions-based modal testing, *Structure and Infrastructure Engineering*, DOI: 10.1080/15732479.2021.1931893, 2021

Lapajne, S., Crossova metoda, 1949.

Lapajne, S., Csonkova metoda računanja skeletov s horizontalnimi obremenitvami, *Gradbeni vestnik*, 1, 1963.

Lapajne, S., Kongres jugoslovanskega društva gradbenih konstruktorjev v organizaciji ZGIT Slovenije, *Gradbeni vestnik*, 6, 1969.

Lavrenčič, M., Numerično modeliranje padca velikega armiranobetonskega zaboynika, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2016.

Lavrenčič, M., Brank, B., Simulation of shell buckling by implicit dynamics and numerically dissipative schemes, *Thin-Walled Structures*, 132, 682-699, 2018a.

Lavrenčič, M., Brank, B., Failure analysis of ribbed cross-laminated timber plates, *Coupled Systems Mechanics*, 7, 79-93, 2018b.

Lavrenčič, M., Brank, B., Hybrid-mixed shell quadrilateral that allows for large solution steps and is low-sensitive to mesh distortion, *Computational Mechanics*, 65, 177-192, 2020.

Lavrenčič, M., Brank, B., Energy-decaying and momentum-conserving schemes for transient simulations with mixed finite elements, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 375, 113625, 2021.

Maček Lebar, A., Damjanič, F., Antolič, V., Iglič, A., Srakar, F., Brajnik, D., Nepravilnosti v cementnem plašču: analiza z metodo končnih elementov, *Farmaceutski vestnik*, 47, 311-314, 1996.

Makarovič, M., Damjanič, B. F., Konstruiranje in optimizacija izdelkov iz poliesterskih laminatov, *Kovine, zlitine, tehnologije*, 30, 409-412, 1996.

Marinčič, R., Pavletič, R., Damjanič, F., Analiza tesnjenja glave motorja, *Strojniški vestnik*, 37, 70-75, 1991.

Marolt, V., Okvir: program za račun linijskih konstrukcij, Publikacija IKPIR, št. 18, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1981.

Marolt, V., Potočan, I., Okvir: verzija 4.0, Publikacija IKPIR, št. 1/90, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1989.

Nisa, Cranes Software International Limited, 2021.

Oštir, V., Prototip celovitega projektiranja armiranobetonskih plošč v stavbah, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 1994.

Papinutti, M., Četina, M., Brank, B., Petersen, Ø. W., Øiseth, O., Nonparametric modeling of self-excited forces based on relations between flutter derivatives, *Wind and Structures*, 31, 561-573, 2020.

Papinutti, M., Dynamic analysis of floating bridges, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2021.

Petrovič, S., Guggenberger, W., Brank, B., Jekleni silosi za sipke materiale. 1. del, Vplivi pri polnjenju in praznjenju, *Gradbeni vestnik*, 58, 70-78, 2009.

Piculin, S., Brank, B., Weak coupling of shell and beam computational models for failure analysis of steel frames, *Finite Elements in Analysis and Design*, 97, 20-42, 2015.

Piculin, S., Nicklisch, F., Brank, B., Numerical and experimental tests on adhesive bond behaviour in timber-glass walls, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 70, 204-217, 2016.

Pipan, B., Hvastja, B., Cimperšek, V., Mušič, J., Projekt in izvedba mostu čez Dravo v Mariboru, *Gradbeni vestnik*, 12, 1963.

Planinc, J., RAVOK, Navodila za uporabo programa, Publikacija RC FGG št. 10, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1975 (Ponatis 1981).

- Porenta, L., Lavrenčič, M., Dujc, J., Brojan, M., Tušek, J., Brank, B., Modeling large deformations of thin-walled SMA structures by shell finite elements, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 101, 105897, str. 1-29, 2021.
- Potočan, I., Računalniška grafika pri analizi konstrukcij, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1990.
- Prelog, E., Stenasto skeletne konstrukcije pri potresni obremenitvi, *Gradbeni vestnik*, 5 in 10, 1965.
- Prelog, E., Horizontalna obremenitev stenastih objektov z odprtinami, *Gradbeni vestnik*, 4 in 8-9, 1966.
- Prelog, E., Cvetaš, F., Fajfar, P., Reševanje linijskih konstrukcij z uporabo računalnikov, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Fakulteta za strojništvo, 1971.
- Pukl, S., Obnašanje gradbenih konstrukcij pod vplivom dejanskih obremenitev, *Gradbeni vestnik*, 8-9, 1967.
- Pukl, S., Uporaba elektronskih računalnikov v statiki, *Gradbeni vestnik*, 2, 1969.
- Reflak, J., Marinček, M., Uporaba elektronskega računalnika za računanje nosilnosti tlačnih palic, *Gradbeni vestnik*, 4-5, 1969.
- Robot Simulation Ltd, *WORKSPACE 3, Reference Manual and Guided Tour*, 1994/95.
- Rosman, R., Lomljeni stenasti nosilci, oslabljeni s svetlobnimi pasovi, *Gradbeni vestnik*, 8-9, 1968.
- Samec, V., Duhovnik, J., R O K-program za račun opaznih konstrukcij, 4. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu, zbornik, 1988.
- Stanek, M., Damjanić, F., Celcer V., Cracking prediction of a prestressed concrete septic containment, *Engineering Modelling*, 3, 29-34, 1990.
- Stanek, M., Numerična analiza betonskih konstrukcij od nastanka razpok do porušitve, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1993.
- Stanič, L., Spletna objava EN 1990 s komentarji, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2004.
- Stanič, A., Brank, B., Korelc, J., On path-following methods for structural failure problems, *Computational Mechanics*, 58, 281-306, 2016a.
- Stanič, A., Hudobivnik, B., Brank, B., Economic-design optimization of cross laminated timber plates with ribs, *Composite Structures*, 154, 527-537, 2016b.
- Stanič, A., Solution methods for failure analysis of massive structural elements, doctoral thesis, University of Ljubljana and Université de Technologie de Compiègne - Sorbonne Universités, 2017a.
- Stanič, A., Brank, B., A path-following method for elasto-plastic solids and structures based on control of plastic dissipation and plastic work, *Finite Elements in Analysis and Design*, 123, 1-8, 2017b.
- Stanič, A., Brank, B., Brancherie, D., Fracture of quasi-brittle solids by continuum and discrete-crack damage models and embedded discontinuity formulation, *Engineering Fracture Mechanics*, 227, 106924, 2020.
- Šelih, J., Uporaba numeričnih metod v toplotni analizi inženirskih problemov, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 1990.
- Šelih, J., Damjanić, F., Trenc, F., Pavletič, R., A novel cylinder cooling system of air-cooled engines, *Engineering Modelling*, 6, 1-4, 1993.
- Šuligoj, G., Duhovnik, J., Cerovšek, T., Elektronska objava standardov, *Gradbeni vestnik*, 5, 2004.
- Taylor, R. L., *FEAP - Finite Element Analysis Program*, University of California Berkeley, 2014.
- Tomšič, D., Reševanje dvodimenzionalnih elastostatičnih problemov z metodo robnih elementov, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1989.
- Turk, Ž., Duhovnik, J., KOP - program za konstruiranje opaznih konstrukcij, 4. seminar Računalnik v gradbenem inženirstvu, zbornik, 1988.
- Turk, Ž., Duhovnik, J., Slovenia and computer representation of design standards and building codes, *International journal of construction information technology*, 3(1), 1995.
- Vedlin, B., Jeklena konstrukcija športne hale Tivoli - prva velika konstrukcija s tornimi spoji pri nas, *Gradbeni vestnik*, 6-7, 1965.
- Veldin, T., Lavrenčič, M., Brank, B., Brojan, M., A comparison of computational models for wrinkling of pressurized shell-core systems, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 127, 103611, 2020.
- Vihtelić, A., Objektni pristop v metodi končnih elementov, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 1994.
- Vitek, A., FEDRAW - grafični poprocesor za MKE, Zbornik 11. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, 116-121, 1989.
- Vogelnik, B., Prispevek k problemu preračunavanja skeletov z vetrnimi stenami na horizontalno obremenitev, *Gradbeni vestnik*, 6-7, 1963.
- Wilson, E. L., Bathe, K. J., Peterson, H. H., *SAP - A structural analysis program for linear systems*, *Nuclear Engineering and Design*, 25, 257-274, 1973.
- Žerovnik, J., Rogač, R., Reflak, J., Duhovnik, J., Skladišče žita 1500 ton, Statični račun, Projektivni biro Velenje, 1967.
- Žlajpah, D., Ekspertni sistem za projektiranje armature, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, 1992.

akademik prof. dr. Peter Fajfar, univ. dipl. inž. grad.
peter.fajfar@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Matej Fischinger, univ. dipl. inž. grad.
matej.fischinger@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Tatjana Isaković, univ. dipl. inž. grad.
tatjana.isakovic@fgg.uni-lj.si



prof. dr. Matjaž Dolšek, univ. dipl. inž. grad.
matjaz.dolsek@fgg.uni-lj.si



Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR),
Jamova 2, 1000 Ljubljana

Pregledni znanstveni članek
UDK 624.042.7(497.4)(091)

50 LET POTRESNEGA INŽENIRSTVA NA IKPIR 50 YEARS OF EARTHQUAKE ENGINEERING AT IKPIR

Povzetek

V članku je podan zgoščen pregled dela, opravljenega na področju potresnega inženirstva v petdesetih letih obstoja Inštituta za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR) in njegovega predhodnika Računskega centra Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (RC FAGG). Poudarek je na rezultatih raziskav, zelo na kratko pa so omenjene tudi druge aktivnosti, ki obsegajo pedagoško ter razvojno in strokovno delo, vključno s sodelovanjem pri pripravi predpisov.

Ključne besede: potresno inženirstvo, gradbene konstrukcije, IKPIR

Summary

The article gives a concise overview of the work done in the field of earthquake engineering in fifty years of existence of IKPIR and its predecessor, the FAGG Computing Center. The emphasis is on the research results. Very briefly, also other activities are mentioned. They include teaching, development and consulting, including participation in the development of regulations.

Key words: earthquake engineering, structural engineering, IKPIR

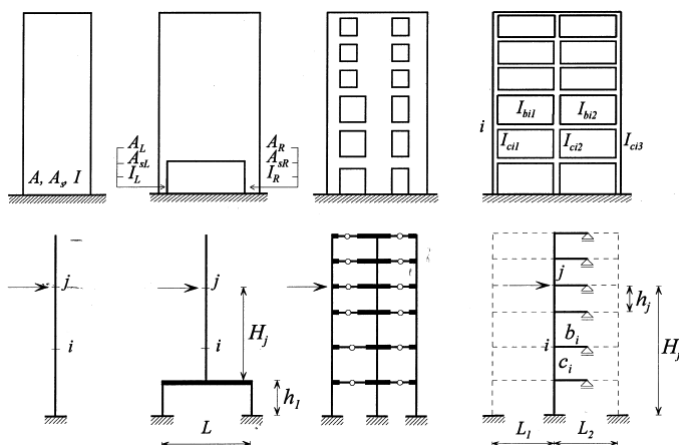
1 ZAČETKI

Leta 1971, ko je bil ustanovljen Računski center Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (RC FAGG), predhodnik kasnejšega IKPIR, smo se v Sloveniji že dobro zavedali potresnega tveganja. Slovenski inženirji, med njimi sta bila tudi kasnejša sodelavca RC FAGG in IKPIR, prof. Sergej Bubnov in prof. Ervin Prelog, so pripravili prvi sodoben slovenski predpis o projektiranju potresnoodpornih gradbenih objektov, ki je bil sprejet že leta 1963, dober mesec pred rušilnim potresom v Skopju. Bubnov je imel vodilno vlogo pri pripravi predpisa, Prelog pa je izdelal navodila za račun potresnih obremenitev v skladu s predpisom. V šestdesetih letih prejšnjega stoletja ni bilo na razpolago elektronskih računalnikov, zato je bilo v praksi mogoče analizirati samo skrajno poenostavljene modele konstrukcij pri potresnih obremenitvah. Skopski potres je vzbudil večje zanimanje za potresno inženirstvo. Na tedanjem ZRMK so pod vodstvom takratnega direktorja Viktorja Turnška pričeli raziskovati potresno odpornost zidanih stavb, medtem ko na FAGG raziskav s področja potresnega inženirstva ni bilo. Študenti gradbeništva v Sloveniji med svojim študijem niso slišali praktično ničesar o potresnem inženirstvu in dinamiki gradbenih konstrukcij.

2 ELASTIČNA ANALIZA – PROGRAM EAVEK

Prihod elektronskih računalnikov je ponudil izjemno priložnost za preboj na področju analize konstrukcij pri običajnih »statičnih računih«, še posebno pa pri analizi konstrukcij pri potresnih obremenitvah, ki temelji na dinamiki in je računsko bistveno bolj zahtevna kot običajna statična analiza. To priložnost smo izkoristili sodelavci RC FAGG, ki smo se že pred ustanovitvijo RC FAGG leta 1971 pričeli ukvarjati z uporabo računalnikov za analizo konstrukcij.

Tehnični vodja novega RC FAGG je postal prvi avtor tega članka, ki se je naučil uporabljati računalnik med svojim delom na Katedri za metalne konstrukcije FAGG pod vodstvom prof. Miloša Marinčka. V njegovem magistrskem delu, ki je bilo izdano tudi kot prva publikacija RC FAGG [Fajfar, 1972], so bile postavljene teoretične osnove metode, ki je zajemala statično in dinamično analizo stavb s spektri odziva. Uporabljen je bil psevdotridimenzionalni model, kjer je bila konstrukcija razdeljena na podkonstrukcije (okvirje, stene, jedra, slika 1), imenovane makroelementi. Izdelan je bil računalniški program DAVEK (Dinamična Analiza VEčetažnih Konstrukcij), ki je bil nato uspešno uporabljen pri potresnih analizah vrste pomembnih objektov v Sloveniji ter pri pedagoškem in raziskovalnem delu na FAGG. V disertaciji, ki je bila v skrajšani verziji izdana kot publikacija RC FAGG [Fajfar, 1974a] in povzeta v članku [Fajfar, 1974a], so bile teoretske osnove razširjene, tako da so zajemale tudi teorijo drugega reda, račun elastične stabilnosti in določanje časovnega odziva pri dinamični analizi. Vse dopolnitve so bile vključene v novem programu EAVEK (Elastična Analiza VEčetažnih Konstrukcij) [Fajfar, 1976]. Program je bil napisan v FORTRAN-u. Glavno delo pri programiranju brezformatnih podatkov je opravil Matej Fischinger, takrat še študent. Program se je izvajal na majhnih računalnikih tipa IBM 1130 s 64k pomnilnika in je omogočal analizo prostorskih modelov stavb do višine 30 etaž. V naslednjih dveh desetletjih je bilo narejenih več posodobitev in izboljšav programa. Zaradi trdnih teoretičnih osnov je bilo mogoče program enostavno prilagoditi vsem



Slika 1. Najpogostejši makroelementi z računskimi modeli.

spremembam potresnih predpisov. V osemdesetih letih se je s študijem makroelementov precej ukvarjal Boris Lutar v okviru svoje magistrske in doktorske naloge, v zgodnjih devetdesetih letih pa je veliko dela na novih različicah program EAVEK opravil Vojko Kilar v okviru dodiplomskega in magistrskega študija. Pri izdelavi različnih verzij programa so poleg Fajfarja, ki je programiral osnovno verzijo programa in vodil delo pri naslednjih verzijah, ter Fischingerja, Lutarja in Kilarja neposredno ali posredno sodelovali tudi drugi sodelavci IKPIR Mladen Bratović, Vid Marolt, Iztok Peruš, Smiljan Sočan, Iztok Kovačič, Andrej Vitek in Žiga Turk.

Medtem ko so v začetni fazi uporabe programa EAVEK analize za potrebe prakse opravljali sodelavci RC in kasneje IKPIR, sta enostaven način priprave podatkov in pregleden izpis rezultatov omogočila, da je postopoma vse večje število uporabnikov prešlo na samostojne obdelave preko terminalov, ki so bili priključeni na republiški računski center (RRC) v Ljubljani. Uporabniki so bili organizirani kot člani Kluba uporabnikov programske opreme (KUPO) IKPIR. Po pojavu osebnih računalnikov je bila pripravljena verzija programa za IBM PC in kompatibilne računalnike, ki so jo uporabljali skoraj vsi projektanti v Sloveniji in številni uporabniki drugod v nekdanji Jugoslaviji. V okviru sodelovanja IKPIR in univerze v Pekingu je bila leta 1987 izdelana verzija programa s spektrom po kitajskih predpisih in s priročnikom v angleščini.

Ključ do uspeha programa EAVEK je bil preprost in pregleden model konstrukcije, ki sledi intuitivnemu razmišljanju gradbenih inženirjev, zahteva razumevanje konstrukcijskega sistema in njegovih glavnih nosilnih elementov, je zelo enostaven za uporabo in zagotavlja pregledne rezultate, ki so dovolj natančni za veliko večino konstrukcij stavb. Čeprav postopek analize in program nista bila na ustrezen način predstavljena mednarodni strokovni skupnosti in nista doživela mednarodnega priznanja kot v primeru rezultatov raziskav na področju nelinearne analize, si drznemo trditi, da je program pomembno vplival na razumevanje potresnega odziva stavb in na kvaliteto potresnoodpornega projektiranja ter s tem na potresno odpornost stavb v Sloveniji.

V zadnjih letih 20. stoletja je hiter razvoj programske in strojne opreme v računalništvu povzročil, da raziskovalne skupine na univerzah niso več mogle slediti temu razvoju in posodabljati aplikativne programske opreme glede na zahteve upo-

rabnikov. To delo so prevzela podjetja, ki so se profesionalno ukvarjala z razvojem in distribucijo programov. Na IKPIR smo prenehali posodabljati program EAVEK in druge aplikativne programe za analizo konstrukcij, smo jih pa še vedno uporabljali, predvsem pri pedagoškem delu. Tako je npr. Daniel Celarec v okviru svoje diplomske naloge leta 2007 izdelal verzijo programa, ki izračuna ne le obremenitve makroelementov, pač pa tudi obremenitve njihovih posameznih elementov. Komercialni programi so počasi zamenjevali IKPIR-jeve programe, vključno z EAVEK-om, čeprav so teoretične osnove tega programa še danes v celoti veljavne, zamenjali so se samo spektri v predpisih. Nedavno so sodelavci IKPIR srednje in mlajše generacije spet oživili program EAVEK. V spletni verziji programa je jedro programa z vsemi teoretičnimi osnovami ostalo nedotaknjeno, izdelani pa so bili ustrezni programi za procesiranje [Klinc s sodelavci, 2016].

3 NELINEARNA ANALIZA

Pri močnih potresih dopuščamo, da se konstrukcije deformirajo v neelastično območje. Za analizo obnašanja v tem območju je v principu primerna samo nelinearna analiza, ki pa je bistveno zahtevnejša od linearne analize, zato so se v praksi uporabljali in se še vedno v veliki meri uporabljajo približni postopki, ki temeljijo na linearni analizi in uporabljajo faktorje redukcije sil (q -faktorji v standardu Evrokod 8 [SIST, 2006a]). Naš prispevek k q -faktorjem je bil predlog, da se faktor definira kot produkt faktorja, ki upošteva dodatno nosilnost, in faktorja, ki zajema vpliv sipanja energije [Fischinger in Fajfar, 1990]. Ta definicija se je uveljavila v standardih in predpisih, vključno s standardom Evrokod 8 [SIST, 2006a].

Z nelinearno analizo smo se v RC FAGG pričeli ukvarjati v poznih sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. Pri tem smo za končni cilj vedno imeli pred očmi praktično uporabnost postopkov.

Naše začetne raziskave so bile usmerjene predvsem v parametrične študije neelastičnega odziva konstrukcij z eno prostostno stopnjo in v matematično modeliranje armiranobetonskih konstrukcij. Prvič smo nelinearno analizo uporabili za simulacijo obnašanja stavbe, poškodovane med potresom v Črni gori leta 1979 [Fajfar s sodelavci, 1981]. Za nelinearno analizo konstrukcij smo največ uporabljali DRAIN-2D [Kanaan s sodelavci, 1973], razvit na univerzi v Berkeleyju, in IDARC [Park s sodelavci, 1987], razvit na univerzi v Buffalu. Oba programa smo prilagajali našim potrebam. Za račun neelastičnih spektrov smo razvijali lastno programsko opremo.

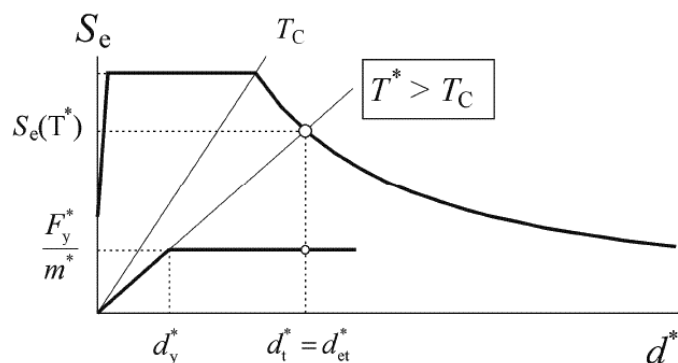
Prvi rezultati študija neelastičnih spektrov so bili predstavljeni na 7. evropski konferenci o potresnem inženirstvu [Fischinger in Fajfar, 1982]. V naslednjih dobrih desetih letih so bile izvedene obsežne parametrične študije sistemov z eno prostostno stopnjo. V teh študijah smo raziskovali vpliv značilnosti gibanja tal, začetne togosti, nosilnosti, duktilnosti, histereznega obnašanja in dušenja na deformacije sistemov z eno prostostno stopnjo in na njihovo sipanje energije. Predlagali smo ekvivalenten faktor duktilnosti, ki zajema vpliv kumulativnih poškodb [Fajfar, 1992]. Pomembno delo pri parametričnih študijah je opravil Tomaž Vidic v okviru svojega magistrskega in doktorskega študija ter kot podoktorski raziskovalec. Najpomembnejša, visoko citirana povezana članka sta bila objavljena leta 1994 v *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* [Vidic, Fajfar in Fischinger, 1994], [Fajfar in Vidic, 1994].

Malo poenostavljena verzija redukcijskih faktorjev, predlagana v prvem članku, je bila vključena v N2-metodo.

Spodbujeni z uspehom programa EAVEK smo psevdotridimenzionalni model razširili v nelinearno območje in tako razvili postopek za približno nelinearno analizo stavb. Rezultat dela, ki ga je pretežno opravil Vojko Kilar, je program NEAVEK (Nelinearna Analiza VEčetažnih Konstrukcij [Kilar in Fajfar, 1997]). Kasneje se je z NEAVEK-om ukvarjal Iztok Peruš. Program se je v glavnem uporabljal pri raziskovalnem delu v okviru IKPIR, ni pa prodril med projektante, saj predpisi niso zahtevali nelinearne analize.

Najodmevnejši rezultat raziskovalcev IKPIR je N2-metoda za nelinearno analizo konstrukcij, ki kombinira nelinearno statično (potisno) analizo sistema z več prostostnimi stopnjami in dinamično analizo (z uporabo spektrov odziva) ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo. Metoda, ki omogoča razmeroma enostavno uporabo nelinearne analize v praksi, je vključena v standard Evrokod 8 [SIST, 2006a] in uveljavljena v svetu. Prvi prispevek o N2-metodi je bil objavljen leta 1987 v prvi številki nove evropske revije *European Earthquake Engineering* [Fajfar in Fischinger, 1987], ki ni imela velikega kroga bralcev. Odmevnejši je bil prispevek na 9. svetovni konferenci o potresnem inženirstvu [Fajfar in Fischinger, 1989]. Nadaljnji razvoj je bil razmeroma počasen. »Zrelo« verzijo, ki je vključevala neelastične spektre, razvite leta 1994, smo objavili leta 1996 [Fajfar in Gašperšič, 1996]. Približno v tem obdobju je ameriški inženir Freeman s sodelavci predlagal predstavitev spektra odziva v formatu pospešek-pomik (AD) namesto običajne oblike pospešek-nihajni čas. Ta enostavna, vendar briljantna ideja, ki omogoča grafično ponazoritev postopka računa, je povzročila preboj pri praktični uporabi metod, ki temeljijo na potisni analizi. AD-format je bilo razmeroma enostavno vključiti v N2-metodo. Njena nova verzija je bila predstavljena v dveh izjemno odmevnih člankih ([Fajfar, 1999], [Fajfar, 2000]). Takoj zatem smo na povabilo pripravljavcev evropskega standarda Evrokod 8 (ali krajše EC8) izdelali osnutek teksta za vključitev N2-metode v EC8, ki je bil uradno uveljavljen leta 2004 (slika 2). Od prve objave preliminarne verzije N2-metode do njene vključitve v regulativo je torej preteklo kar 17 let!

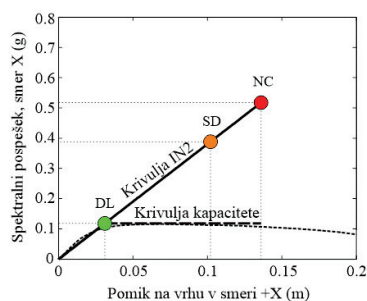
Kot vsaka približna metoda ima tudi N2 vrsto omejitev. V začetku tega tisočletja smo raziskovali, kako bi čim bolj zmanjšali



Slika 2. Določanje ciljnega pomika v N2-metodi za ekvivalentne sisteme z eno prostostno stopnjo s srednjimi in dolgi nihanjskimi časi. Slika je vključena v standard Evrokod 8-1 [SIST, 2006a].

obseg teh omejitev. Vse metode, ki temeljijo na potisni analizi in ekvivalentnem sistemu z eno prostostno stopnjo so načeloma uporabne predvsem za konstrukcije, ki nihajo pretežno v osnovni nihajni obliki. Neposredno ne morejo zajeti vpliva torzije in višjih nihajnih oblik po višini konstrukcije. Prvi vpliv sta proučevala Iztok Peruš in Damjan Marušič [Fajfar, Marušič in Peruš, 2005], drugega pa Maja Kreslin [Kreslin in Fajfar, 2011]. Pokazalo se je, da je oba vpliva mogoče upoštevati istočasno s kombinacijo rezultatov osnovne N2-metode in standardne modalne analize s spektri odziva [Kreslin in Fajfar, 2012]. Razširjena N2-metoda je vključena v drugo generacijo EC8 [SIST, 2021a]. Osnovna N2-metoda tudi ni neposredno uporabna za okvirje s polnili. Glavno delo pri razširitvi uporabnosti metode za ta tip konstrukcije je opravil Matjaž Dolšek [Dolšek in Fajfar, 2005].

V začetku tisočletja so na Univerzi v Stanfordu razvili tako imenovano Inkrementalno dinamično analizo (IDA), ki predstavlja napredno, vendar računsko zahtevno metodo za dinamično analizo konstrukcij. Za praktično uporabo je analizo mogoče bistveno poenostaviti, če namesto računa časovnega poteka odziva uporabimo potisno analizo. Postopek smo imenovali Inkrementalna N2 (IN2) metoda [Dolšek in Fajfar, 2004] (slika 3).



Slika 3. Krivulja kapacitete in krivulja IN2 za stavbo SPEAR, ki je bila psevdodinamično preizkušena v laboratoriju ELSA v Ispri.

Gostujoči doktorand je razvil poenostavljeno različico originalne IDA, ki vključuje algoritem za izbiro majhnega števila akcelrogramov za oceno mediane potresnega odziva objekta [Azarbakht in Dolšek, 2007]. Izdelana je bila tudi posplošitev metode IDA, ki je omogočila preučevanje vpliva negotovih parametrov nelinearnega modela objekta na potresno ranljivost objekta [Dolšek, 2009].

Zgodba o razvoju N2-metode in njenih razširitev je objavljena v knjigi [Fajfar, 2021], ki jo je izdalo Mednarodno združenje za potresno inženirstvo v okviru novega programa Read the masters.

4 VERJETNOSTNA ANALIZA IN ODLOČITVENI MODEL ZA PROJEKTIRANJE OBJEKTOV

Značilnosti gibanja tal zaradi potresov v življenjski dobi objekta ne znamo natančno napovedati. Negotov je tudi odziv konstrukcij ob danem gibanju tal. Zato bi bil za oceno potresne zmogljivosti objektov primeren verjetnostni pristop. Ker pa so

verjetnostne metode večinoma precej zahtevne, je običajno verjetnostna analiza omejena samo na določanje potresnega gibanja tal, to je določanje potresne nevarnosti, medtem ko se analiza konstrukcij v praksi običajno izvaja z determinističnimi metodami, pri čemer se slučajnost potresne obtežbe in negotovost v potresnem odzivu upoštevata z različnimi projektnimi dejavniki (npr. projektna potresna obtežba, metoda načrtovanja nosilnosti, materialni varnostni faktorji). Dolgoročno se bomo tudi v praksi težko popolnoma izognili količinski določitvi tveganja. V ta namen so potrebni zelo poenostavljeni postopki, ki so predstavljeni v obliki, ki jo poznajo inženirji in ki zahtevajo le malo dodatnega dela in usposobljenosti.

Z določanjem potresne nevarnosti za območje Slovenije smo se na IKPIR pričeli ukvarjati že v začetku osemdesetih let. Pri tem smo prevzemali metode iz najsodobnejše literature tistega časa [Breška in Fajfar, 1987]. Največ dela na tem področju je opravil Zdene Breška. Kasneje so bili v raziskave vključeni tudi sodelavci takratnega Seizmološkega zavoda RS (kasneje Uprava RS za geofiziko in Agencija RS za okolje), predvsem dr. Janez Lapajne. Te raziskave so nam omogočile, da smo na željo investitorjev in projektantov določili projektne potresne parametre za večino pomembnih objektov v Sloveniji, pri katerih so predpisi zahtevali natančnejši postopek določanja potresnih obremenitev.

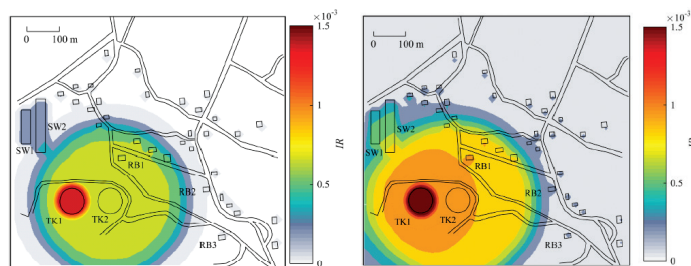
Raziskave na področju verjetnostnih metod, ki zajemajo tudi odziv konstrukcije, so se začele v začetku tega tisočletja v okviru disertacije Matjaža Dolška. V prvem članku o oceni tveganja [Dolšek in Fajfar, 2007] je bil predlagan sorazmerno preprost postopek za oceno potresnega tveganja, ki temelji na potisni analizi. Postopek smo imenovali »Pushover-based Risk Assessment method« ali krajše PRA-metoda. Za uporabo PRA-metode so potrebne privzete vrednosti za parameter raztrosa. Raziskave tega parametra je opravil Mirko Kosič v okviru svojega doktorskega študija in objavil več člankov, med njimi [Kosič, Dolšek in Fajfar, 2016]. Pred tem je Daniel Celarec opravil obsežne analize občutljivosti modelnih parametrov na globalne parametre potresnega odziva armiranobetonskih okvirjev in okvirjev s polnili (npr. [Celarec, Ricci in Dolšek, 2012]) ter analize potresnega tveganja z upoštevanjem vpliva staranja materiala [Celarec, Vamvatsikos in Dolšek, 2011]. Ugotovili smo, da neupoštevanje vpliva modelirnih negotovosti in vpliva staranja materiala na potresni odziv objekta vodi v precenjeno potresno zmogljivost objekta.

Kmalu smo ugotovili, da verjetnostna analiza ne omogoča le ocene tveganja, pač pa je lahko zelo koristna tudi pri projektiranju objektov na potresnih območjih. Raziskave smo zato usmerili v razvoj metod projektiranja na ciljno potresno tveganje. Doktorand Marko Brozovič je razvil metodo projektiranja 3R z uporabo nelinearne dinamične analize [Dolšek in Brozovič, 2016]. V tem primeru se potresni scenarij, za katerega se preverja potresni odziv objekta, določi iz ciljnega potresnega tveganja. Na osnovi izbrane skupine akcelrogramov se nato izvede nelinearna dinamična analiza in ugotovi število prekoraiter mejnega stanja. Če je to število prekoraiter manjše od dopustnega, projektant lahko sklene, da je verjetnost za prekoraiter mejnega stanja manjša od ciljne verjetnosti za izbrano dobo. Ne glede na to, da metoda 3R zahteva majhno število nelinearnih dinamičnih analiz, je računsko precej zahtevna, saj so pri projektiranju z nelinearnimi metodami potrebne iteracije. V takem primeru je smiselno, da se osnovna konstrukcija projektira z računsko manj zahtevnimi metodami, nato pa

se določi potresna zmogljivost objekta z bolj natančno nelinearno dinamično analizo. Zato je doktorandka Nuša Lazar Sinkovič za projektiranje na ciljno tveganje uporabila potisno analizo, izpopolnila pa je tudi integral potresnega tveganja, kjer je upoštevala fizikalno opredeljene integracijske meje. Za spodnjo integracijsko mejo je upoštevala potrese, ki povzročijo prekoračitev mejnega stanja pri najmanjši možni intenziteti gibanja tal. Ugotovila je, da obstajajo takšna gibanja tal, ki pri projektni intenziteti gibanja tal povzročijo prekoračitev mejnega stanja blizu porušitve, čeprav so objekti projektirani po sodobnih standardih za potresnoodporno projektiranje [Lazar Sinkovič in Dolšek, 2014], ter da imajo fizikalno opredeljene meje intenzitete gibanja tal vpliv na potresnoodporno projektiranje stavb. Nekoliko kasneje smo za projektiranje na ciljno potresno tveganje definirali stopnjo zanesljivosti postopkov projektiranja v povezavi z različnimi vrstami potresne analize [Lazar Sinkovič, Brozovič in Dolšek, 2016]. Ciljno potresno tveganje smo naposled vpeljali tudi v konvencionalno potresnoodporno projektiranje, ki temelji na linearnoelastični analizi, bodisi na metodi s horizontalnimi silami ali na modalni analizi s spektri odziva. Ta problem smo rešili tako, da smo konvencionalni princip redukcije potresnih sil razširili. V definicijo faktorja obnašanja q smo eksplicitno vključili še povratno dobo projektnega potresa, ciljno potresno tveganje ter slučajnost in negotovost potresne obtežbe in potresnega odziva objekta [Žižmond in Dolšek, 2019]. S tem smo razvili paleto metod potresnoodpornega projektiranja za izbrani objekt na ciljno potresno tveganje z vsemi različicami potresne analize.

Sledilo je spoznanje, da je zelo malo znanega o ciljnem potresnem tveganju. Da bi ta problem bolje razumeli, je bilo treba raziskave usmeriti k analizam potresnega tveganja grajenega okolja. Takšne analize so manj natančne od analize potresnega tveganja za posamezen objekt, vendar nudijo dodatne informacije, ki so koristne za načrtovanje grajenega okolja kot celote. V okviru teh raziskav je doktorand Anže Babič razvil krivulje potresne ranljivosti za različne razrede montažnih armiranobetonskih hal [Babič in Dolšek, 2016], ki se lahko uporabi za študije potresnega tveganja stavbnega fonda, sestavljenega iz montažnih armiranobetonskih hal. Pri tem so modeli temeljili na študijah, opisanih v razdelku Montažni objekti. Doktorand Aleš Jamšek se je problema analize tveganja stavbnega fonda lotil drugače. Razvil je poenostavljeni nelinearni model pretežno simetričnih armiranobetonskih okvirjev in okvirjev s polnili [Jamšek in Dolšek, 2020] ter pokazal, da so takšni modeli dovolj natančni za modeliranje potresnega odziva stavbnega fonda z uporabo potisne analize ali nelinearne dinamične analize. Ker je model računsko učinkovit, se lahko uporabi za analize stavbnega fonda.

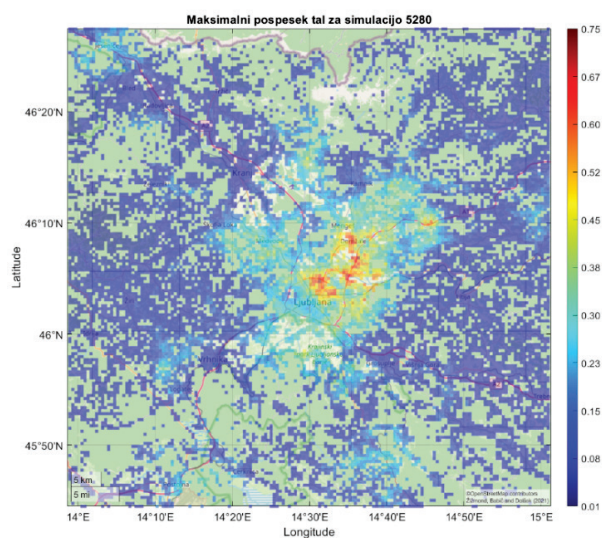
Korak naprej je naredila doktorandka Francesca Celano, ki je razvila metodo za analizo potresnega tveganja industrijsko urbanih območij, kjer je poleg neposrednih posledic potresov upoštevala še vpliv učinkov domin zaradi pojava požara, eksplozij in širjenja strupenih snovi v okolje (slika 4 [Celano in Dolšek, 2020]). Teoretične osnove razvite metode temeljijo na metodi Monte Carlo, ki pa jo je možno uporabiti tudi za namen projektiranja, in sicer tako, da se izračunajo ciljne krivulje potresne ranljivosti posameznih komponent obravnavanega sistema z upoštevanjem ciljnega potresnega tveganja celotnega industrijsko urbanega območja. Ciljna potresna ranljivost posamezne komponente se lahko nato uporabi za projektiranje komponent sistema na osnovi predhodno razvitih metod za projektiranje posameznih objektov. Na primer: Stefano

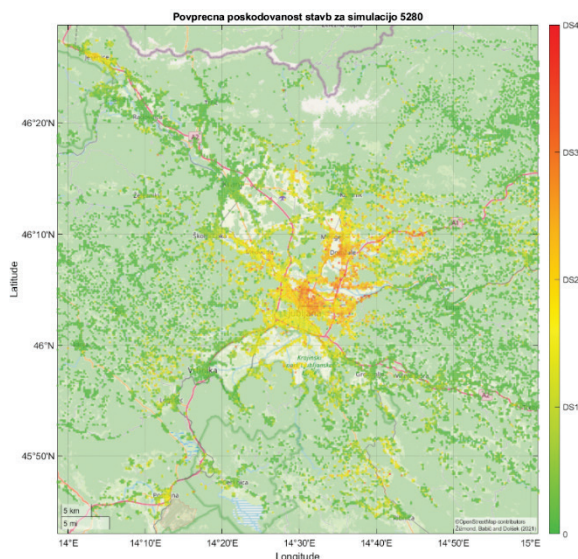


Slika 4. Zemljevid smrtnega tveganja izbranega industrijsko urbanega območja. Z barvno lestvico je prikazano individualno tveganje na leto brez upoštevanja učinkov domin (levo) in z (desno) upoštevanjem učinkov domin (povzeto po [Celano in Dolšek, 2020]).

Caprinozzi [Caprinozzi s sodelavci, 2020] je razvil relativno enostavno metodo za oceno tveganja za izlitje tekočine iz jeklenih rezervoarjev s plavajočimi strehami, za katere se je tudi v praksi večkrat izkazalo, da v primeru močnih potresov predstavljajo kritične komponente industrijsko urbanih območij.

Da bi določili najbolj primerno ciljno tveganje, je v odločitve treba vključiti vse deležnike, ki so izpostavljeni tveganju, in ne le strokovnjake s tega področja. Zato smo začeli opravljati raziskave, ki poleg inženirskih parametrov potresnega odziva objektov omogočajo oceno kazalnikov tveganja, ki so razumljivi širši skupnosti. Doktorand Jure Snoj je že 2014. razvil metodo za oceno škode zaradi potresov. V članku [Snoj in Dolšek, 2020] smo pokazali, da ima kvaliteta gradnje zidanih stavb precejšen vpliv na pričakovano škodo zaradi potresov. Anže Babič je v okviru doktorske disertacije analizo izgub zaradi potresov precej izpopolnil, razvil pa je tudi inovativen sistem za ocenjevanje tveganja [Babič in Dolšek, 2019], ki temelji na kumulativnem tveganju in upošteva kratkoročno in dolgoročno nedopustno tveganje. Prednost inovativnega ocenjevanja tveganja je tudi v tem, da se lahko uporabi za upravljanje tveganja, saj je predvideno, da se ocena v primeru dolgoročno nedopustnega tveganja sčasoma poslabšuje, če lastnik ni izvedel ukrepov za zmanjšanje tveganja. Model ocenjevanja smo kasneje harmonizirali z uveljavljeno sedemstopenjsko lestvico ocenjevanja, ki se uporablja za energetske izkaznice, in ga uporabili pri izvedbi seiz-





Slika 5. Prostorska porazdelitev maksimalnih pospeškov tal in pripadajoča poškodovanost stavbnega fonda za izbrano simulacijo gibanja tal potresa z magnitudo 6,2 in epicentrom 5 km severno od središča Ljubljane (povzeto po [Babič, Dolšek in Žižmond, 2021]).

mičnega stresnega testa stavbnega fonda v Republiki Sloveniji [Dolšek s sodelavci, 2020]. V okviru seizmičnega stresnega testa smo razširili informacije o posledicah potresa v Ljubljani iz leta 1895 na obstoječi stavbni fond v Sloveniji (slika 5).

5 ARMIRANOBETONSKE STENE

Konstrukcijski sistemi z armiranobetonskimi stenami se v svetu in še posebno pri nas veliko uporabljajo. Zaradi velike nosilnosti in togosti ter ustrezne duktilnosti so zelo primerni za gradnjo na potresnih območjih. Je pa odziv armiranobetonskih sten na potresno obtežbo specifičen in je bil v preteklosti razmeroma malo raziskan, kar se je odražalo v pomanjkljivih določilih v predpisih. Tako je bilo ves čas obstoja IKPIR projektiranje potresno odpornih sten pomembna tema raziskav in sodelovanja s prakso.

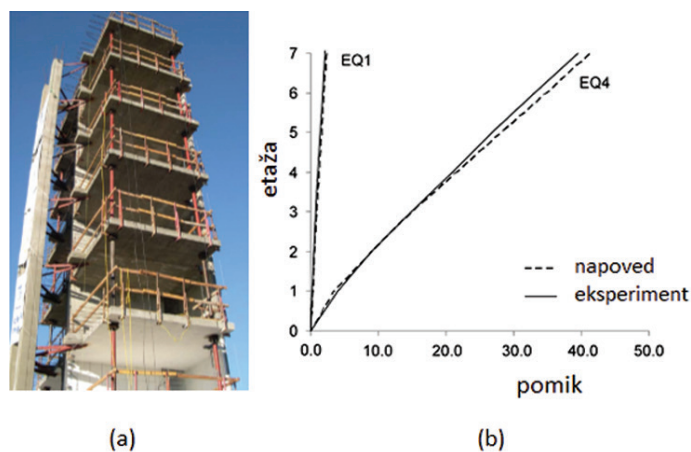
Program EAVEK, ki vključuje posebne makroelemente za konzolne stene in stene z odprtini, je že zelo zgodaj omogočil napreden in učinkovit račun večine višjih stanovanjskih in poslovnih objektov v Sloveniji. Ob pojavu špekulacij v medijih, da potresnoodporna gradnja stanovanjskih blokov zahteva enormne podražitve, so sistematične raziskave vpliva potresnoodporne gradnje na ceno objektov z nosilnimi stenami pokazale, da so podražitve praviloma majhne [Fischinger, Fajfar in Rogač, 1978]. Kasneje smo, tudi z uporabo nelinearne analize, sistematično analizirali faktorje, ki vplivajo na potresno odpornost in ceno potresnoodpornih armiranobetonskih sten [Fischinger in Kante, 2002]. Rezultati raziskav so bili uporabljeni pri razvoju jugoslovanskih predpisov in Evrokodov. Omenimo na primer določitev minimalnega razmerja med prerezmom sten in površino tlora, zahtevo po povečanju računskih strižnih sil za stene, zahtevo po uporabi Q-mrež v stojinah sten in konstrukcijska določila za armiranje vogalov sten. Organizirali smo seminarje za projektante in pripravili dokumente s komentarji ob sprejetju jugoslovanskega prepisa za potresno-

odporno gradnjo v letu 1981 [Bubnov s sodelavci, 1982] in v podporo sprejetja in uvajanja standardov Evrokod (na primer [Fajfar, Fischinger in Beg, 2009]). V pomoč projektantom smo izdelali programe za dimenzioniranje elementov s kompleksnimi prečnimi prerezi in mrežno armaturo.

V začetnem obdobju delovanja IKPIR so bile, podobno kot povsod po svetu, analize in raziskave omejene na elastično obnašanje sten. Se pa je težišče raziskav zelo zgodaj tudi v svetovnem merilu usmerilo v neelastičen odziv. Nelinearna analiza je bila prvič uporabljena pri analizah referenčne stenasto-okvirne stavbe, ki je bila preizkušena v Tsukubi v okviru japonsko-ameriškega projekta [Fajfar, Fischinger in Remec, 1985]. Rezultate teh raziskav smo uporabili v projektih analize učinkovitosti jugoslovanskih in ameriških predpisov za gradnjo na potresnih območjih.

V praksi smo nelinearno analizo sten prvič uporabili v okviru razvoja velikopanelnega sistema SCT, kjer je eksperimente naredila skupina pod vodstvom Mihe Tomaževiča na ZRMK, na IKPIR pa smo naredili nelinearno analizo s programom DRAN-2D [Kanaan s sodelavci, 1973], v katerega smo vgradili element s histereznimi pravili, ki so modelirala stik med paneli pri upogibnem odzivu [Fischinger s sodelavci, 1987].

Ta element je postal osnova za razvoj uspešne slovenske verzije modela z več vertikalnimi vzmetmi (MVLEM – Multiple Vertical Line Element Model) za nelinearno analizo armiranobetonskih sten [Fischinger, Vidic in Fajfar, 1992]. Uspešnost modela smo kasneje dokazali z dvema odličnima napovedma (»benchmark« študijami) potresnega odziva sten, ki so bile preizkušene na potresnih mizah. Za steno, ki je bila preizkušena v San Diegu, in za stenasto stavbo, ki je bila preizkušena na največji potresni mizi na svetu E-defence, smo se sodelavci IKPIR v elitni mednarodni konkurenci najbolj približali eksperimentalnim rezultatom (na primer [Fischinger, Kante in Isaković, 2009]). Značilen rezultat uspešne vnaprejšnje napovedi je ilustriran na sliki 6. V zadnjem obdobju je bil MVLEM-element dopolnjen tako, da med prvimi na svetu omogoča ana-



Slika 6. Konstrukcijski sklop z armiranobetonsko steno v 7-etažni stavbi v naravnem merilu, ki je bil preizkušen na potresni mizi Univerze v Kaliforniji v San Diegu: (a) fotografija sklopa, (b) slepo napovedani in eksperimentalno izmerjeni horizontalni pomiki so se zelo dobro ujemali pri elastičnem odzivu (test EQ1) in pri zadnjem, močno neelastičnem odzivu (test EQ4).

lizo osno-upogibne-strižne interakcije pri nelinearnem odzivu sten [Isaković in Fischinger, 2019].

Pomemben rezultat nelinearnih analiz sten je bila tudi izboljšana definicija faktorja povečanja strižnih sil v primerjavi z rezultati elastične analize, ki je bila uporabljena pri razvoju standardov Evrokod [Rejec, Isaković in Fischinger, 2012].

Velik izziv so bili eksperimenti potresnega odziva armiranobetonskih sten, ki smo jih opravili v velikem merilu na potresni mizi. Zaradi dokaj velike nosilnosti armiranobetonskih sten je za njihovo preizkušanje potrebna zelo zmogljiva in draga oprema, s katero razpolagajo le največji laboratoriji. Zato so takšni testi dokaj redki in jih je bilo možno narediti le v okviru uspešno pridobljenih evropskih projektov. Zasnovali smo preizkuse dveh povezanih petetažnih sten s prirobnicami, kjer smo primerjali učinek konstrukcijskih detajlov v skladu s tedaj veljavno prakso in v skladu z zahtevami tedaj novih standardov Evrokod 8 [SIST, 2006a]. Steni sta predstavljali velik model značilne stanovanjske stavbe z armiranobetonskimi stenami v Sloveniji. Eksperimenti so bili opravljani v laboratoriju LNEC na Portugalskem ([Fischinger, Isaković in Kante, 2006], slika 7). Preizkus smo podprli z nelinearnimi analizami. Poleg neposrednega vpliva na projektantsko prakso in predpise so ti rezultati kasneje v svetovnem merilu postali referenčni za preučevanje nelinearnega odziva povezanih sten na potresni vpliv. Zlasti so bili rezultati pomembni za raziskave nelinearnega strižnega obnašanja sten, nepričakovano velikega vpliva prenosa obremenitve preko prečk na slope ter upogibno-strižne interakcije v njih.



Slika 7. Test petetažnih sten s prirobnicami na potresni mizi v laboratoriju LNEC [Fischinger, Isaković in Kante, 2006].

V zadnjem času smo eksperimentalne in analitične raziskave usmerili na študij še neraziskanega področja prenosa obremenitev med stenami preko stropnih plošč. Povezanost sten z medetažnimi ploščami je bila v dosednji praksi in raziskavah podcenjena ali povsem zanemarjena. Sestavni del raziskav, pri katerih sta poleg Isakovičeve in Fischingerja sodelovala tudi Matija Gams in doktorand Antonio Janevski, je bil preizkus trietažnih sten, povezanih z medetažnimi ploščami v merilu 1 : 2 na potresni mizi IZIS v Skopju [Isaković s sodelavci, 2020].

Rezultati na področju nelinearnega modeliranja sten in prispevki k razvoju predpisov za njihovo uporabo so bili opaženi

ter priznani v evropskem in svetovnem merilu. Zato smo bili povabljeni, da vodimo evropsko sodelovanje pri projektu US NSF SAVI (Science Across Virtual Institutes) Wall Institute, ki združuje vodilne svetovne strokovnjake za analizo potresne odpornosti armiranobetonskih sten z namenom povezovanja svetovnega znanja na področju modeliranja neelastičnega potresnega odziva sten in izdelave baze podatkov o podpor- nih eksperimentih. Ključni rezultati na področju modeliranja so bili objavljeni v obsežnem in odmevnem članku [Koložvari s sodelavci, 2019]. Pripravljena je bila tudi posebna številka revije Bulletin of Earthquake Engineering s to tematiko [Fischinger s sodelavci, 2019].

6 OKVIRJI S POLNILI

Armiranobetonski okvirji z zidanimi polnili so pogost konstrukcijski sistem. Čeprav polnila lahko pomembno vplivajo na potresni odziv konstrukcije, se pri analizah običajno tretirajo kot nekonstrukcijski element. Na IKPIR smo raziskave okvirjev s polnili pričeli opravljati konec osemdesetih in v začetku devetdesetih let prejšnjega stoletja. Roko Žarnić, ki je dobil bogate izkušnje pri svojem delu na ZRMK, je prišel kot mladi raziskovalec na IKPIR in obravnaval okvirje s polnili v magistrski in doktorski nalogi. Janez Reflak je v svoji disertaciji obravnaval elastično analizo okvirjev s polnili z metodo podkonstrukcij [Reflak in Fajfar, 1991]. Kasneje se je z okvirji s polnili ukvarjal Matjaž Dolšek, ki je skupaj z mentorjem v mednarodnih revijah objavil šest zelo dobro citiranih člankov, povezanih s to tematiko (npr. [Dolšek in Fajfar, 2001] in [Dolšek in Fajfar, 2008]). V teh člankih je bilo med drugim obravnavano modeliranje polnil z nadomestnimi diagonalami, predlagani so bili neelastični spektri odziva za okvirje s polnili, N2-metoda je bila razširjena na ta konstrukcijski sistem in uporabljena za analizo, s katero smo raziskovali pozitivne in negativne učinke polnil na konstrukcijo.

Modeliranje polnil z diagonalami je praktično uporabno, vendar ima omejitve. Z dvema križnima diagonalama ni mogoče dobro simulirati vpliva polnila na steber, posledično pa ni možno simulirati strižne porušitve stebrov. Celarec je zato razvil iterativen postopek potisne analize, s katerim se s približnim postopkom oceni vpliv morebitne strižne porušitve stebrov na potisno krivuljo [Celarec in Dolšek, 2013]. Na primerih je pokazal, da je potresna zmogljivost okvirja s polnili lahko precej precenjena, če se ne modelira strižna porušitev stebrov.

7 MONTAŽNI OBJEKTI

Delo pri analizi montažnih objektov se je pričelo takoj po ustanovitvi RC FAGG. V začetku sedemdesetih let je bil izdelan računalniški program za izdelavo statičnega računa (vključno s potresnimi vplivi) montažnih dvoranskih konstrukcij, ki jih je gradilo podjetje SGP Gorica iz Nove Gorice. V naslednjih letih so bili razviti podobni programi še za montažne sisteme SGP Grosuplje, Ingrad in Vemont. Leta 1986 smo izdelali programski sistem MONCAD, namenjen projektiranju vseh obstoječih betonskih montažnih konstrukcij, sestavljenih iz krovnih elementov, nosilcev, stebrov in čašastih temeljev. MONCAD je bil v uporabi vse do okrog 2010. V letih 1986–87 smo v sodelovanju z gradbenim podjetjem SCT in z ZRMK razvili velikopanelni sistem, ki je primeren za gradnjo na potresnih območjih. Z njim je bilo v Ljubljani zgrajenih več kot 1000 stanovanj.



Slika 8. Testi fasadnih panelov v naravnem merilu, izvedeni na potresni mizi IZIS v Skopju.

Sistematične raziskave potresnega odziva montažnih armiranobetonskih objektov so na IKPIR potekale zadnjih dvajset let v okviru različnih evropskih projektov. Raziskave sta vodila Fischinger in Isaković, sodelovala sta doktoranda Miha Kramar in Blaž Zoubek. Večina rezultatov teh raziskav je bila pred kratkim vključena v standard ISO 20987 [ISO, 2019].

Primerjali smo potresni odziv montažnih in monolitnih hal ter potresno ranljivost tipičnih hal z močnimi stiki [Kramar, Isaković in Fischinger, 2010]. Na osnovi teh rezultatov so bila spremenjena zelo konservativna določila začetnih različic standarda Evrokod 8-1 [SIST, 2006a], ki so ogrozila obstoj industrije montažnih armiranobetonskih hal. Zelo konservativna določila so bila posledica slabega poznavanja potresnega odziva montažnih konstrukcij, predvsem različnih vrst stikov, ki odločilno vplivajo na potresni odziv. Med najbolj ključnimi so stiki med gredami in stebri, ki so najbolj pogosto povezani z mozniki. Naredili smo obsežne eksperimentalne in analitične študije teh stikov [Zoubek s sodelavci, 2014] in razvili postopek za njihovo projektiranje [Zoubek, Fischinger in Isaković, 2015], ki bo predvidoma vključen v novo verzijo standarda Evrokod 2-4 [CEN, 2019].

Sodelovali smo pri načrtovanju in analizi več psevdodinamičnih testov armiranobetonskih montažnih hal v naravnem merilu v največjem evropskem laboratoriju JRC v Ispri, Italija. Najprej so bili eksperimenti namenjeni raziskavam potresnega odziva glavnega nosilnega sistema montažnih hal, nadaljnji eksperimenti pa so bili namenjeni proučevanju potresnega odziva različnih vrst stikov, študiju vpliva različnih tipov strešnih elementov na povezanost navpičnih nosilnih elementov in študiju potresnega odziva fasadnih panelov, vključno z razvojem novih vrst stikov.

Pri študiju potresnega odziva fasadnih panelov in njihovih stikov z nosilno konstrukcijo montažnih hal s psevdodinamičnimi testi ni bilo možno preizkusiti določenih dinamičnih vplivov, kot so npr. udarci med fasadnimi paneli in nosilno konstrukcijo. Zato smo teste, opravljene v laboratoriju JRC, dopolnili z lastnimi testi na potresni mizi [Isaković, Zoubek in Fischinger, 2018]. Zasnovali smo vrsto testov montažnih hal v naravnem merilu z različnimi tipi fasadnih panelov, ki se danes uporabljajo v srednji Evropi. Testi so bili izvedeni na eni izmed

največjih potresnih miz v Evropi, v laboratoriju IZIS v Skopju (slika 8). Poleg celotnih hal smo eksperimentalno preizkusili tudi vrsto različnih posameznih stikov. Najprej smo preučevali možnične stike med stebri in gredami. Ti testi so bili izvedeni na ZAG. Ciklične teste tipičnih stikov fasadnih panelov z glavno nosilno konstrukcijo smo testirali najprej v laboratoriju na UL FGG. Te teste smo dopolnili z dinamičnimi testi posameznih stikov, ki so bili opravljeni na ZAG. Na podlagi teh eksperimentov in komplementarnih analitičnih raziskav smo razvili postopke za projektiranje stikov fasadnih panelov [Zoubek, Fischinger in Isaković, 2016].

Razvili smo tudi inovativni sistem za potresno utrditev fasadnih panelov s pomočjo sintetičnih potresnih pridrževalcev. V ta namen smo naredili več obsežnih serij preizkusov v laboratoriju na UL FGG, s katerimi smo ugotovili najbolj učinkovite materiale in načine pritrdjevanja pridrževalcev na panele in nosilno konstrukcijo hale.

Analize armiranobetonskih hal je nadaljeval doktorand Giovanni Menichini (opravljal je dvojni doktorat na UL in Univerzi v Firencah), ki je naredil sistematične študije odziva navpičnih fasadnih panelov pri istočasnem potresnem vzbujanju v dveh smereh, v ravnini panelov in pravokotno na to ravnino [Menichini in Isaković, 2018]. Definiral je ustrezne numerične modele za navpične panele, ki se lahko prosto zibajo (angl. »rocking panels«) in razvil postopek za oceno potresnih zahtev pravokotno na ravnino navpičnih panelov.

Nadaljevali smo tudi s študijami stikov vodoravnih fasadnih panelov v armiranobetonskih montažnih halah, s čimer smo dopolnili eksperimentalne in analitične študije potresnega odziva posameznih stikov [Starešinič s sodelavci, 2020]. Gabrijele Starešinič je v okviru svoje doktorske naloge študirala vpliv stikov na potresni odziv glavnega konstrukcijskega sistema montažnih hal.

8 ETAŽNI SPEKTRI

Nekonstrukcijskim elementom je tipično namenjen zelo velik del stroškov pri graditvi gradbenih objektov pa tudi pri popravilih po morebitnih potresih. Žal se jim pri projektiranju posveča premalo pozornosti. Za projektiranje elementov, ki so občutljivi za pospeške, se uporabljajo etažni spektri pospeškov. Ti spektri imajo za nekonstrukcijske elemente (opremo) enak pomen kot spektri gibanja tal za primarno konstrukcijo. Raziskave etažnih spektrov na IKPIR je spodbudilo naše sodelovanje z Jedrsko elektrarno Krško (NEK). Pri analizah smo postali pozorni na izredno visoke pospeške opreme, ki lahko dosežejo vrednosti večkratnika težnostnega pospeška. Začetno delo na področju etažnih spektrov je bilo opravljeno v okviru diplomske naloge Tomaža Vidica leta 1986. Delo je nadaljeval doktorand Dejan Novak v začetku devetdesetih let prejšnjega stoletja [Fajfar in Novak, 1995]. Žal je delo zastalo. Z raziskavami na področju etažnih spektrov smo nadaljevali šele leta 2010, ko se nam je pridružil doktorand Vladimir Vukobratović. Začel je na točki, kjer je Novak končal. Dejstvo, da je bila naša glavna ideja direktne metode za določanje etažnih spektrov neelastičnih primarnih konstrukcij še vedno primerna po petnajstih letih, dokazuje, da po svetu v tistem obdobju na tem področju ni bilo veliko narejenega. Metoda, razvita v okviru Vukobratovičeve disertacije, omogoča direkten račun etažnih spektrov za elastične in neelastične konstrukcije. Rezultate raziskav smo objavili v treh člankih v mednarodnih revijah in v članku

v Gradbenem vestniku. Malo poenostavljena verzija metode [Vukobratović in Fajfar, 2017] je bila sprejeta kot osnova za račun etažnih spektrov v novi generaciji EC8 [CEN, 2021a].

9 MOSTOVI

Začetki strokovnega in raziskovalnega dela na IKPIR na področju potresne analize in projektiranja mostov sovpadajo z začetkom gradnje avtocestnega križa v Sloveniji v devetdesetih letih prejšnjega stoletja. V tistem času pri nas ni obstajal uporaben predpis za potresnoodporno gradnjo premostitvenih objektov. Fischinger in Fajfar sta leta 1990 pri potresni analizi viadukta Reber, prvega pomembnega objekta, ki je bil zgrajen v okviru avtocestnega križa, upoštevala sodobne principe za projektiranje mostov na potresnih področjih. Glede na to, da je sledilo projektiranje velikega števila pomembnih premostitvenih objektov, smo pripravili priročnik [Fajfar, Fischinger in Isaković, 1995] z navodili za projektiranje mostov na potresnih področjih, ki ga je DARS uradno priporočil za projektiranje premostitvenih objektov v okviru avtocestnega križa. Navodila so temeljila na predstandardu Evrokod 8-2 [SIST, 2006b]. Priročnik je bil na voljo tudi v elektronski – hipertekstni obliki, kar je bila za tiste čase precejšnja novost. Predstavljal je prvi priročnik za standarde Evrokod 8 v Evropi in omogočil prvo uradno uporabo standardov Evrokod v Evropi.

Sledile so raziskave na področju nelinearnega odziva mostov. V začetni študiji sta Gašpersič in Fajfar ugotovila, da je N2-metoda uporabna za analizo pravičnih konstrukcij mostov, pogosto pa odpove pri nepravilnih konstrukcijah. Rezultati so bili objavljeni v dveh člankih na mednarodnih konferencah v letih 1997 in 1998.

Vse nadaljnje raziskave na področju potresnega odziva mostov, opisane v nadaljevanju, sta opravila Isaković in Fischinger z doktorandi.

Glede na ugotovitve, da je odziv mostov kvalitativno drugačen od stavb in da na ta odziv zelo pogosto pomembno vplivajo višje nihajne oblike, je bila ustrezno prilagojena uporaba N2-metode ([Isaković in Fischinger, 2006], [Isaković, 2014]),

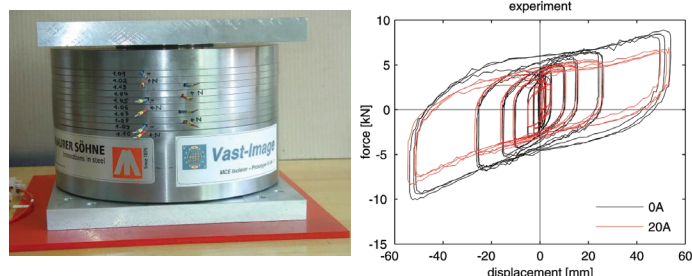


Slika 9. Test potresnega odziva viadukta na treh potresnih mizah na UNR, ki smo ga analizirali na IKPIR.

Raziskana je bila tudi primernost drugih nelinearnih metod za potresno analizo mostov. Velik del rezultatov teh raziskav je bil najprej vključen v knjigo [Kappos s sodelavci, 2012], potem pa v novi standard Evrokod 8-2 [CEN, 2021b], katerega priprava je v zaključni fazi. Preden je bil uradno sprejet trenutno veljaven standard Evrokod 8-2 [SIST, 2006b], je doktorand Jaka Zevnik študiral potresno ranljivost različnih konfiguracij viaduktov, projektiranih po tem standardu.

Na področju raziskav potresnega odziva mostov smo zelo uspešno sodelovali z Univerzo Nevada v Renoju, ZDA (UNR), ki razpolaga z enim izmed najbolj opremljenih laboratorijev za raziskave potresnega odziva mostov na svetu. Vključeni smo bili v projekt uporabe inovativnih konstrukcijskih detajlov v mostnih stebrih. Sodelovali smo pri analizah mostov, ki so bili preizkušeni v velikem merilu simultano na treh potresnih mizah ([Isaković in Fischinger, 2011], slika 9). Isaković je s kolegi na UNR sodelovala tudi pri razvoju postopkov za projektiranje potresnih pridrževalcev v mostovih [Saiidi s sodelavci, 2001] in pri projektu potresne utrditve pomembnega viadukta v centru Las Vegasa, ZDA.

Ukvarjali smo se tudi s potresno izolacijo mostov. Sodelovali smo pri razvoju nove inteligentne naprave za potresno izolacijo, ki sama uravnava svojo togost glede na intenziteto potresa ([Ahmadi s sodelavci, 2005], [Isaković, Zevnik in Fischinger, 2011], slika 10). Naprava je bila razvita v okviru evropskega



Slika 10. Inteligentna naprava za potresno izolacijo, razvita v okviru evropskega projekta VAST-IMAGE.

projekta VAST-IMAGE, v katerem so sodelovali najbolj priznane raziskovalne institucije in renomirani proizvajalci v Evropi. Vključeni smo bili v projekt prvega potresno izoliranega modernega objekta v Sloveniji – viadukta Ločica. Pripravili smo navodila za projektiranje potresno izoliranih konstrukcij [Fischinger in Isaković, 2001]. Fischinger je bil ustanovni član ASSISI (Anti-Seismic Systems International Society), svetovnega združenja za potresno izolacijo.

Doma smo sodelovali pri vrsti preizkusov mostnih stebrov. Fischinger in Isaković sta sodelovala z Lojzeto Bevcem na ZAG pri preizkusih potresnega odziva viadukta Ravbarkomanda v pomanjšanem merilu ([Isaković, Bevc in Fischinger, 2008], slika 11). Na osnovi teh preizkusov je bil določen način utrditve teh stebrov. Skupaj s kolegi na ZAG sta Isaković in doktorand Zlatko Vidrih testirala različne možnosti utrditve mostnih stebrov s karbonskimi vlakni, predvsem različne načine pritrditve na stebre. To delo sta nadaljevala doktorand Andrej Anžlin z ZAG in Isaković, ki sta testirala in analizirala vpliv različnih konstrukcijskih pomanjkljivosti na potresni odziv mostnih stebrov in eksperimentalno preizkusila zmogljivosti inovativnega po-



Slika 11. Ciklični testi škatlastih stebrov viadukta Ravbarkomanda v pomanjšanem merilu so narejeni v sodelovanju z ZAG.

stopka za utrditev mostnih stebrov s karbonskimi vlakni [Anžlin in Isaković, 2016].

Število integralnih mostov v zadnjem času strmo narašča, o njihovem zapletenem potresnem odzivu pa vemo zelo malo. Bili smo vključeni v evropski projekt SERENA, kjer so bile eksperimentalno raziskane osnovne značilnosti potresnega odziva integralnih mostov [Fiorentino s sodelavci, 2021].

Na osnovi odmevnih rezultatov sta bila Fischinger in Isaković povabljeni k sodelovanju v delovni skupini Evropskega združenja za potresno inženirstvo, Projektiranje in utrditev mostov na potresnih območjih, ki se ukvarja z razvojem metod in orodij za projektiranje mostov na potresnih območjih.

10 CENILKA POGOJNEGA POVPREČJA (CAE METODA)

Prof. Igor Grabec s Fakultete za strojništvo UL je razvil metodologijo, ki simulira delovanje umetnih nevronske mreže, imenovano »cenilka pogojnega povprečja« (Conditional Average Estimator – CAE). Metoda predstavlja večdimenzionalno neparametrično regresijo, ki omogoča ocene neznanih količin kot funkcije znanih podatkov. Na IKPIR smo CAE-metodo uporabljali za empirične raziskave kapacitete armiranobetonskih elementov, potresne nevarnosti in vpliva tal na potresno gibanje. Pri vseh raziskavah je imel najpomembnejšo vlogo Iztok Peruš, ki je v sodelovanju z raziskovalci izven IKPIR uspešno uporabil CAE-metodo tudi na različnih drugih področjih. Raziskave potresne kapacitete so bile del disertacije Karmen Poljanšek. Rezultati raziskav, kjer je bila uporabljena CAE-metoda, so bili objavljeni v šestih člankih v mednarodnih revijah, med njimi [Peruš, Poljanšek in Fajfar, 2006].

11 EKSPERIMENTALNO DELO

Eksperimentalno delo smo na IKPIR začeli razmeroma pozno. Univerza je bila dolgo povsem ločena od raziskovalnih institutov, ki so imeli laboratorije. FAGG je svoj laboratorij zgradil šele leta 1984, predvsem po zaslugi Janeza Duhov-

nika, ki je vodil gradnjo laboratorija in predlagal, da se za togo ploščad laboratorija uporabi zaklonišče. Tudi po pridobitvi razmeroma skromnega laboratorija so bile možnosti za eksperimentalno delo na področju potresnega inženirstva, ki večinoma zahteva posebno opremo in velika materialna sredstva, zelo skromne. Zaradi tega smo pri svojem delu v največji možni meri uporabljali rezultate eksperimentov, ki so jih opravljali naši kolegi po svetu. Možnost sodelovanja pri eksperimentih v velikih evropskih laboratorijih (in s tem dostop do vseh eksperimentalnih podatkov) se je široko odprla z vključitvijo v evropske raziskovalne projekte. Ponujeno priložnost sta izkoristila Fischinger in Isaković z doktorandi. Posamezni eksperimenti so opisani v razdelkih o stenah in montažnih konstrukcijah.

Dolšek in doktorand Jure Snoj sta se ukvarjala tudi z meritvami ambientnih in vsiljenih vibracij objektov. Že leta 2013 smo rezultate meritev nihajnih časov uporabili za kalibracijo nelinearnega modela zidane stavbe [Snoj, Österreicher in Dolšek, 2013]. Zaradi hitrega razvoja digitalizacije so meritve ambientnih in vsiljenih vibracij v zadnjih letih postale trend v potresnem inženirstvu.

12 DRUGI RAZISKOVALNI REZULTATI

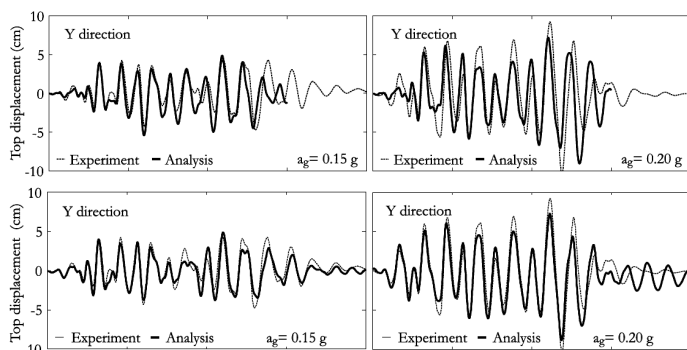
Raziskovalno delo na področju potresnega inženirstva na IKPIR je bilo poleg opisanega v predhodnih poglavjih usmerjeno še v vrsto drugih problemov. Nekateri od njih so omenjeni v nadaljevanju.

Pri analizi stavb običajno predpostavimo, da so medetažne konstrukcije toge v svoji ravnini. Ta predpostavka je lahko v nekaterih primerih, npr. pri dolgi in ozki tlorisi, vprašljiva. Vpliv podajnosti stropov v njihovi ravnini na odziv konstrukcij stavb pri vodoravni obtežbi je raziskoval Janez Duhovnik v svoji doktorski disertaciji konec sedemdesetih in v prvi polovici osemdesetih let [Duhovnik, 1982].

V osemdesetih in v začetku devetdesetih let se je Hinko Šolinc ukvarjal z raziskavami seizmičnih problemov v zvezi s tekočinami. Raziskave so med drugim obsegale dinamično linearno analizo rezervoarjev z metodo končnih elementov ob upoštevanju hidrodinamičnih tlakov [Šolinc, 1987] in vpliv tekočine na potresni odziv pregrad, kjer je bila uporabljena metoda robnih elementov.

Leta 2013 smo v sodelovanju s prof. Markom Poličem s Filozofske fakultete UL opravili spletno anketo, s katero smo skušali pridobiti podatke o zaznavanju potresne ogroženosti Slovenije in o sprejemljivem tveganju ter o pripravljenosti za ukrepanje. Rezultate ankete smo objavili v dveh člankih v Gradbenem vestniku, prvi med njima je [Fajfar, Polič in Klinc, 2014].

V okviru evropskega projekta SPEAR je bilo v laboratoriju ELSA JRC v Ispri opravljenih več psevdodinamičnih preiskav trietažne AB-stavbe, zgrajene v merilu 1 : 1 (slika 3). Rezultati testov dajejo dragocene podatke za študij numeričnega modeliranja konstrukcij. SPEAR-stavbo smo pogosto uporabljali v naših analizah. Pri njih so med drugim sodelovali doktoranda Damjan Marušič in Matej Rozman ter gostujoči raziskovalec Aurel Stratan. Objavili smo več člankov, med njimi ([Fajfar s sodelavci, 2006] in [Rozman in Fajfar, 2009]). Na sliki 12 so za primer prikazane primerjave računskih in eksperimentalnih pomikov na vrhu stavbe.



Slika 12. Primerjava računskih in eksperimentalnih pomikov na vrhu SPEAR-stavbe za dve jakosti potresa. Zgornji rezultati so bili izračunani pred testom, spodnji z izboljšanim modelom po testu (po [Fajfar s sodelavci, 2006]).

Doktorand Klemen Sinkovič je primerjal metode različnih zahtevnosti za ocenjevanje potresne odpornosti AB-stavb, od najenostavnejšega postopka, ki zahteva samo osnovne podatke o stavbi, do najbolj zahtevne metode, ki uporablja nelinearno dinamično analizo [Sinkovič, Peruš in Fajfar, 2016].

13 SODELOVANJE PRI PRIPRAVI PREDPISOV

V nekdanji Jugoslaviji je pripravo predpisov o potresnoodporni gradnji vodil Zvezni zavod za standardizacijo, glavni vpliv na delo pri pripravi v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja je imel IZIS (Inštitut za potresno inženirstvo in inženirsko seizmologijo) v Skopju. V delovni skupini je sodeloval tudi Fajfar. Pri pripravi novega predpisa so bila številna nesoglasja in zapleti, dokler ni bil predpis po potresu leta 1979 v Črni gori sprejet leta 1981. Predpis je uvedel nekaj pomembnih novosti, imel pa je tudi številne pomanjkljivosti. Na IKPIR smo v sodelovanju z ZRMK in Seizmološkim zavodom SRS pripravili obširno publikacijo IKPIR na 250 straneh [Bubnov s sodelavci, 1982], v kateri smo kritično analizirali posamezna določila predpisa in podali tudi predloge za spremembe in izboljšave. Publikacija je predstavljala tudi nekakšen komentar predpisov in je vsebovala praktične napotke za projektante. Predpis je z nekaj spremembami in dopolnitvami veljal vse do leta 2008 (zadnja leta vzporedno z EC8), ko so postali obvezni Evrokodi.

Po osamosvojitvi Slovenije je Urad RS za standardizacijo in meroslovje (USM, zdaj Slovenski inštitut za standardizacijo – SIST) imenoval tehnični komite Konstrukcije (TC KON), ki se je odločil, da kot osnovo za slovenske standarde na področju konstrukcij prevzame evropske standarde Evrokod. Področje potresne odpornosti konstrukcij obravnava standard EN-1998, imenovan Evrokod 8 ali krajše EC8. Za pripravo in sprejem vseh delov EC8 je pristojna posebna delovna skupina Evropskega komiteja za standardizacijo (CEN/TC 250/SC 8), v kateri je od leta 1994 kot predstavnik Slovenije sodeloval Fajfar, leta 2019 pa ga je zamenjala Isaković, ki je tudi predsednica slovenskega tehničnega komiteja za konstrukcije SIST/TC. V Sloveniji je delovna skupina WG8 (v okviru TC KON) pripravila vse potrebno za sprejem posameznih delov EC8, čim so bili ti sprejeti v evropskem merilu. Že leta 1995 je Slovenija, daleč pred vsemi drugimi državami, uradno sprejela več predstandardov. Posebno pomemben je bil del, ki obravnava mostove, saj v času intenziv-

ne gradnje avtocest v Sloveniji sploh nismo imeli predpisov za gradnjo potresno odpornih premostitvenih objektov. DARS je s financiranjem posebne raziskovalne naloge omogočil, da smo lahko v relativno kratkem času pripravili pogoje za uvedbo tega predstandarda [SIST, 1995], predstandard prevedli, ga preverili s testnimi primeri, izdelali priročnik [Fajfar, Fischinger in Isaković, 1995] in pripravili seminar za projektante. Čeprav uporaba predstandarda v Sloveniji ni bila obvezna, je investitor (DARS) pri projektiranju objektov avtocest zahteval njegovo uporabo.

Prvi deli standarda EC8 so bili v Evropi uradno sprejeti leta 2004, že naslednje leto pa tudi v Sloveniji, ki je postala prva država, kjer so Evrokodi leta 2008 postali obvezni. V vmesnem času, ko sta veljala tako stari predpis kot nov standard, so se projektanti lahko spoznali z novim standardom in se ga naučili uporabljati. IKPIR je v sodelovanju s Slovenskim društvom za potresno inženirstvo že decembra 2001 organiziral seminar Novosti v potresnem inženirstvu, ki je bil zaradi velikega zanimanja ponovljen aprila 2002. Kasneje je Inženirska zbornica Slovenije v sodelovanju z UL FGG pripravila številne seminarje za projektante in izdala priročnik za projektiranje po Evrokodih, kjer najboljše poglavje pripada EC8 [Fajfar, Fischinger in Beg, 2009]. Študenti gradbeništva na FGG so se spoznavali z EC8 in ostalimi Evrokodi pri rednih predavanjih.

Leta 2013 se je pričela pripravljati nova generacija Evrokodov. Postopek je zahteven in zamuden in bo predvidoma končan šele sredi tega desetletja. Operativno delo opravljajo projektne skupine. V dveh izmed projektnih skupin za pripravo revidiranega EC8 sta sodelovala tudi Dolšek in Isaković.

V EC8 so vključeni tudi rezultati raziskav, opravljenih na IKPIR. Sestavni del obstoječega EC8 je osnovna N2-metoda. V revidirani EC8 so vključeni razširjena N2-metoda, poenostavljena verzija postopka za račun etažnih spektrov, račun projektnih prečnih sil v armiranobetonskih stenah in specifične zahteve za račun mostov z N2-metodo. Vključena sta tudi dva dodatka. Prvi definira način računa ciljnega pomika z nelinearno dinamično analizo sistema z eno prostostno stopnjo in s tem povezanega pospeška, ki povzroči izbrana mejna stanja. Na ta način se lahko uporabi metoda N2 za splošno obliko potisne krivulje. Drugi dodatek podaja poenostavljen model za verifikacijo projektiranja na osnovi zanesljivosti. Postopek za projektiranje mozičnih stikov med stebri in gredami v montažnih armiranobetonskih halah bo predvidoma vključen v novi standard EC2.

14 PEDAGOŠKO DELO

Sodelavci IKPIR smo na FAGG (kasneje FGG) uvedli in izvajali vse predmete s področja dinamike gradbenih konstrukcij in potresnega inženirstva na vseh stopnjah študija ter pripravili ustrezno študijsko gradivo. Bili smo mentorji pri številnih diplomskih, magistrskih in doktorskih delih. Med njimi je bilo kar 37 doktorskih disertacij s področja potresnega inženirstva. Več diplomantov je dobilo univerzitetne Prešernove nagrade. Usposabljali smo številne domače in tuje mlade raziskovalce. Organizirali in izvajali smo vrsto seminarjev za projektante, ki so bili namenjeni predvsem usposabljanju za uporabo računalniških programov in predpisov za potresnoodporno projektiranje. Vse to pedagoško delo je omogočilo, da so bili projektanti v Sloveniji pripravljeni na delo z novimi predpisi in da so projektantske in raziskovalne organizacije dobile kadre za vrhunskim znanjem na področju potresnega inženirstva.

15 RAZVOJNO IN STROKOVNO DELO

Končni cilj vseh raziskav na področju potresnega inženirstva na IKPIR je bila njihova uporabnost za reševanje problemov v praksi. Na začetku našega delovanja smo pomagali projektantom izvajati potresne analize konstrukcij z našimi in tujimi programi. Kasneje, ko so se projektanti usposobili za samostojno uporabo programov, smo sodelovali z njimi kot konzultanti in revidenti pri bolj zahtevnih projektih.

Aktivno smo vključeni v analize, povezane s potresno varnostjo jedrskih objektov v Sloveniji (obstoječa in planirana jedrska elektrarna Krško ter projektirano odlagališče jedrskih odpadkov). Med drugim smo vodili mednarodna konzorcija, ki sta pripravila študiji potresne nevarnosti na lokaciji NEK v letih 1991–94 in 2000–02. Po katastrofalnem potresu na Japonskem leta 2011 so bili opravljeni »stresni testi« vseh evropskih nuklearnih elektrarn. Vodili smo pregled dela stresnega testa za NEK, ki se je nanašal na potresno in poplavno varnost. Leta 2015 smo pripravili analizo potresne ranljivosti za objekt BB1 v NEK in jo v letu 2020 revidirali zaradi nekaterih prebojev skozi konstrukcijske elemente. V času nadgradnje varnosti v NEK, ki je sledila po potresu na Japonskem, smo vodili pregled projektne dokumentacije za pomožni objekt BB2 in za suho skladišče obrabljene goriva. Poleg tega smo pregledovali projektno dokumentacijo za skladišče nizko in srednje radioaktivnih odpadkov in vodili neodvisno analizo potresnega odziva silosa NSRAO. Od leta 2019 vodimo projekt pregleda analize potresne nevarnosti in neodvisnega preračuna analize potresne nevarnosti za JEK2 ter potresno analizo potencialnih novih nukleark. Pri projektu sodelujemo z ARSO, prof. Abrahamsonom iz Univerze Kalifornija, Berkeley, in razvojnem oddelkom Électricité de France. V okviru projekta smo razvili inovativen neergodični model gibanja tal za območje Krške kotline.

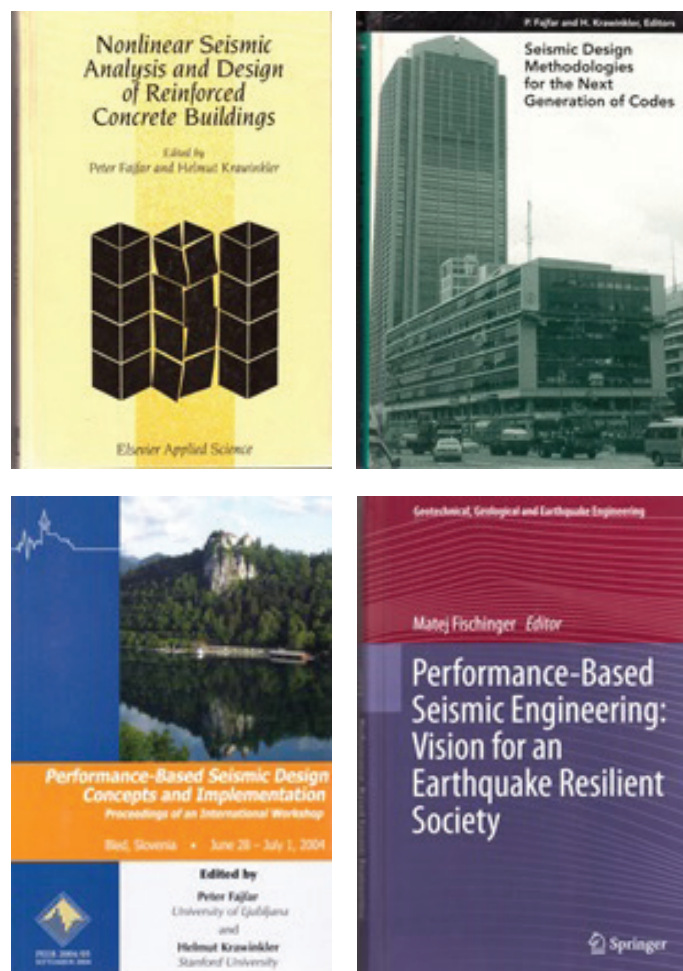
Izdelali smo program za statični račun montažnih ločnih konstrukcij GORICA, s katerim smo v letih 1971–80 izdelali projekte konstrukcije za več kot sto objektov, ki jih je gradil SGP Gorica po celi Jugoslaviji. Program je prerasel v programski sistem MONCAD za račun montažnih hal različnih proizvajalcev. Leta 1976 smo izdelali projekte konstrukcije 12–22 etažnih stanovanjskih objektov v naselju Kneževac v Beogradu. V osemdesetih letih smo med drugim izvedli statično in dinamično analizo za cestni ločni most v Solkanu in revizijo gradbenih projektov Nacionalne in vseučiliščne knjižnice v Zagrebu. V sodelovanju z gradbenim podjetjem SCT in z ZRMK smo razvili veliko-panelni sistem SCT. Kasneje smo sodelovali pri revizijah projektov strojnice in hladilnega stolpa TE Šoštanj, pri projektu potresne utrditve viadukta Ravbarkomanda, projektu viadukta Reber, projektu prvega modernega potresno izoliranega objekta v Sloveniji – viadukta Ločica, pri projektu nesojenega objekta 70 m visokega novega Kolizeja v Ljubljani in reviziji projekta stolpnice Šiška-Residence ter potresni utrditvi viadukta v centru Las Vegasa, ZDA. Sodelovali smo v natečajni komisiji za izbiro najboljše rešitve za največji viadukt v Sloveniji, Črni Kal. Določili smo projektne potresne parametre za številne pomembne objekte v Sloveniji.

Leta 2020 smo naredili seizmični stresni test stavbnega fonda v Republiki Sloveniji. Razvili smo aplikacijo IKPIR za analize potresnega tveganja, s katero smo prvič v Sloveniji ocenili tveganja stavbnega fonda z uporabo fizikalno opredeljenih metod potresnega tveganja [Dolšek s sodelavci, 2020].

Potem ko sta se po celem svetu razvoj in vzdrževanje programske opreme preselila z univerz na specializirana podjetja, smo se povezali z ameriškim podjetjem Computers & Structures Inc. (CSI), ki izhaja iz Univerze v Berkeleyju. Ta povezava je omogočila, da IKPIR od leta 2003 posreduje računalniške programe podjetja CSI, med njimi posebno SAP 2000 [CSI, 2021a] in ETABS [CSI, 2021b], projektantskim organizacijam in skrbi za pomoč uporabnikom.

16 MEDNARODNO SODELOVANJE

Nujen pogoj za uspešno raziskovalno delo je tesno sodelovanje s kolegi in institucijami po svetu, ki se ukvarjajo s podobnimi raziskavami. Na IKPIR smo na področju potresnega inženirstva uspeli vzpostaviti odlične stike z večino vodilnih centrov za potresno inženirstvo. Posebno uspešna je bila naša povezava z Univerzo v Stanfordu in s kalifornijsko univerzo v Berkeleyju, ki je med drugim rezultirala v štirih izjemno odmevnih delavnicah, organiziranih na Bledu v letih 1992, 1997, 2004 in 2011. Delavnic so se udeležili najuglednejši svetovni strokovnjaki s področja potresnega inženirstva. Na delavnicah z zelo omejenim številom povabljenih udeležencev je bil velik del časa namenjen diskusiji. Pisni prispevki, priporočila in zaključki ter



Slika 13. Štiri blejske delavnice so dokumentirane v monografijah.

resolucije so bili zbrani v monografijah, izdanih pri uveljavljanju mednarodnih založbah (slika 13). Brez lažne skromnosti lahko ugotovimo, da so blejske delavnice, posebno druga, zaznavno vplivale na smer razvoja potresnega inženirstva v svetu. Delavnice so predstavljale vrh našega uradnega sodelovanja z ameriškimi institucijami, ki se je začelo v okviru skupnega ameriško-jugoslovanskega fonda za znanstveno in tehnološko sodelovanje. Leta 1983 se je pričel izvajati naš prvi raziskovalni projekt »Ovrednotenje potresnih predpisov v ZDA in Jugoslaviji« z NSB (Nacionalni biro za standarde) v Washingtonu DC. Sledilo je več raziskovalnih projektov s kalifornijsko univerzo v Berkeleyju in z Univerzo v Stanfordu, ki so omogočili vsakoletne obiske naših sodelavcev na vrhunskih ameriških univerzah in izjemno plodno sodelovanje z ameriškimi raziskovalci. Zelo uspešno je bilo tudi dolgoletno sodelovanje z Univerzo Nevada v Renoju (UNR), s katero smo sodelovali pri raziskavah potresnega odziva mostov. Sodelovanje je potekalo v okviru več bilateralnih projektov.

Zadnje uspešno sodelovanje s kalifornijsko univerzo v Berkeleyju smo pripravili v zadnjih dveh letih. Anže Babič, Matjaž Dolšek in Norman Abrahamson so na osnovi zapisov državne mreže potresnih opazovalnic (ARSO) razvili nov neergodični model potresnega gibanja tal za območje Krškega. Pri razvoju neergodičnega modela gibanja tal so bile uporabljene metode strojnega učenja, teorija Gaussovih procesov v kombinaciji z vzorčenjem po metodi Monte Carlo markovskih verig. Neodvisen mednarodni strokovni panel je nedavno podal pozitivno oceno za vključitev neergodičnega modela gibanja tal v verjetnostno analizo potresne nevarnosti za potrebe potresno-odpornega projektiranja nove jedrske elektrarne, kar je prva tovrstna aplikacija modela gibanja tal v svetovnem merilu.

Naše sodelovanje z evropskimi partnerji se je začelo leta 1990 s skupnim projektom z Univerzo v Darmstadtu, večji zagon pa je dobilo takoj ko je bilo slovenskim partnerjem mogoče konkurirati za evropska sredstva. Od leta 1993 naprej je bila raziskovalna skupina na področju potresnega inženirstva na IKPIR stalno vključena v evropske raziskovalne projekte. Začeli smo s COST- in TEMPUS-projekti, nadaljevali leta 1997 z dvema projektoma v okviru INCO-COPERNICUS-programa (EUROQUAKE in RECOS), od leta 2000 naprej pa smo stalno vključeni v evropske okvirne programe. V petem okvirnem programu (OP) EU smo sodelovali pri projektih SAFERR, SPEAR, VAST-IMAGE, PRECAST in ECOLEADER. V šestem OP smo bili vključeni v projekta LESSLOSS in PROHITECH, v sedmem OP pa v projekta SAFECAST, SAFECLADDING, SERIES in STREST. V zadnjem okvirnem programu HORIZON smo sodelovali oz. sodelujemo pri projektih XP-RESILIENCE, SERA, NEWREBAR, METIS in pri projektu BORIS (DG-ECHO). Vsi ti projekti so omogočili dobro sodelovanje s praktično vsemi centri za potresno inženirstvo v Evropi in dodatno financiranje naših raziskav. K nam so na usposabljanje prišli številni mladi raziskovalci iz tujine, največ iz Italije. Nekateri so na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo tudi doktorirali. Ob 100-letnici Univerze v Ljubljani leta 2019 smo organizirali mednarodno poletno šolo »Methods of risk analysis and resilience estimation«, ki se je je udeležilo 50 študentov, podoktorskih raziskovalcev in učiteljev iz petih držav.

Za naše delo je bilo zelo pomembno tudi uradno in neuradno sodelovanje z japonskimi raziskovalci. Prve povezave smo vzpostavili leta 1982 med obiskom Fajfarja na več japonskih institucijah. Skupni raziskovalni projekt s tokijsko univerzo je rezultiral v dveh delavnicah v Ljubljani v letih 2000 in 2001.

Trenutno sodelujemo z inštitutom E-Defense, ki razpolaga z največjo potresno mizo na svetu. Povabljeni smo bili k analizi dveh desetetažnih stolpnih, ki sta bili v tem centru preizkušeni v naravnem merilu. V ta projekt so vključene tudi druge univerze, s katerimi že leta uspešno sodelujemo, med njimi Univerza v Tokiu, kalifornijska univerza v Berkeleyju, kalifornijska univerza v Los Angelesu in Univerza v Neaplju.

Duhovnik in Fajfar sta bila člana jugoslovanske delegacije, ki je leta 1981 obiskala kitajske institucije in si med drugim ogledala tudi posledice katastrofalnega potresa v Tangshanu leta 1976, kolikor je bilo nekaj let po potresu še vidnega. V letih 1989–1991 smo izvajali skupni raziskovalni projekt z univerzo Tsinghua v Pekingu. S prof. Mingwujem Yuanom s pekinške univerze smo plodno sodelovali pri izmenjavi programske opreme za račun konstrukcij (programa SAP in EAVEK). Dve kitajski raziskovalki sta se usposabljali na IKPIR.

17 OBISKI PRIZADETIH OBMOČIJ PO POTRESIH

Močan potres v urbanem okolju je najpomembnejši vir informacij za vse, ki delamo v potresnem inženirstvu. Raziskave posledic potresa so najboljša šola za inženirje. Čeprav obiskov prizadetih območij ni enostavno organizirati, smo obiskali več krajev, ki so jih prizadeli močni potresi. Leta 1976 smo si ogledali posledice potresa v Furlaniji in na ozemlju Slovenije. Močno smo bili angažirani leta 1979 v Črni gori. Naloga naše ekipe je bil nadzor dela lokalnih ekip, ki so pregledovale škodo. Po treh tednih terenskega dela smo analizirali tudi več stavb in pripravili slovensko in angleško različico poročila o potresu in njegovih posledicah [Fajfar s sodelavci, 1981]. Kasneje smo imeli priložnost kmalu po potresih videti posledice potresov v Ciudadu de Mexico (1985), Northridgu (1994), Kobeju (1995), Izmitu (1999), L'Aquili (2009), Čilu (2010) in Emilii Romagni (2012), iz česar smo se tudi učili. Obisk območja, ki ga je prizadel potres Tohoku (2011) se je zgodil z enoletno zamudo, vendar je bilo še vedno mogoče opaziti nekaj škode zaradi tega katastrofalnega dogodka. Ogledali smo si tudi katastrofalne posledice potresov v osrednji Italiji (2016), ki so praktično porušili mesta Amatrice in Norcia. Februarja 2021 smo obiskali območje Petrinje, kjer se je poškodovalo precej energetske saniranih stavb. Veliko stavb kulturne dediščine je popolnoma uničenih in jih ne bo mogoče ohraniti.

Na podlagi bogatega slikovnega gradiva smo v devetdesetih letih pripravili informacijski sistem o vzrokih poškodb med potresi EASY [Fischinger, Cerovšek in Turk, 1998]. Izdelan je bil z za tiste čase izjemno naprednimi informacijskimi orodji. Tako se je še enkrat potrdila sinergija področij potresnega inženirstva in gradbene informatike, ki je tako značilna in posebna za delovanje sodelavcev IKPIR.

18 ZAKLJUČEK

V članku zelo na kratko povzemamo glavne dosežke raziskovalcev IKPIR na področju potresnega inženirstva v petdesetletnem obdobju 1971–2021. Nekoliko podrobnejši opis rezultatov, doseženih v obdobju do leta 1990, je prikazan v [Fajfar in Fischinger, 1990]. Celotna bibliografija sodelavcev IKPIR je dostopna v COBISS-u. Verjamemo, da je naše delo pomembno prispevalo h »kulturi« potresnega inženirstva

doma in k večji potresni odpornosti naših gradbenih objektov. Ob tem so rezultati odmevali tudi v svetu in uvrstili raziskovalno skupino na IKPIR ob bok vodilnih skupin na področju potresnega inženirstva. O tem pričajo visoko odmevni članki IKPIR-jevih raziskovalcev, njihovi prispevki k evropskim standardom, številna domača in tuja priznanja ter članstva v akademijah znanosti. Ključ uspešnega raziskovalnega dela so številni predani visoko motivirani študenti in sodelavci ter konstantna finančna podpora domačih in tujih raziskovalnih agencij. Agencija RS za raziskovano delo in njene predhodnice so s financiranjem posameznih projektov, programske skupine Potresno inženirstvo (od leta 1999 dalje) in mladih raziskovalcev pomembno prispevale k nemotenemu poteku raziskav ves čas delovanja IKPIR.

19 LITERATURA

Ahmadi, H., Fuller, K., Fischinger, M., Isaković, T., A Smart elastomeric isolator, 9th World seminar on seismic isolation, energy dissipation and active vibration control of structures, Kobe, Japan, Kobe: Association for Vibration Technologies, 565-586, 2005.

Anžlin, A., Fischinger, M., Isaković, T., Cyclic response of I-shaped bridge columns with substandard transverse reinforcement, Engineering structures, 99, 642-652, 2015.

Anžlin, A., Isaković, T. Active confinement of rectangular RC column using prestressed CFRP sheets, 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, The University of Tokyo, 789-796, 2016.

Azarakht, A., Dolšek, M., Prediction of the median IDA curve by employing a limited number of ground motion records, Earthquake engineering & structural dynamics, 36(15), 2401-2421, doi: 10.1002/eqe.740, 2007.

Babič, A., Dolšek, M., Seismic fragility functions of industrial precast building classes. Engineering structures, 118, 357-370, doi:10.1016/j.engstruct.2016.03.069, 2016.

Babič, A., Dolšek, M., A five-grade grading system for the evaluation and communication of short-term and long-term risk posed by natural hazards, Structural safety, 78, 48-62, doi: 10.1016/j.strusafe.2018.12.006, 2019.

Babič, A., Dolšek, M., Žižmond, J., Simulating historical earthquakes in existing cities for fostering design of resilient and sustainable communities: The Ljubljana case, Sustainability, 13, 7624, doi.org/10.3390/su13147624, 2021.

Breška, Z., Fajfar, P., O določanju projektnih potresnih parametrov, Gradbeni vestnik, 36(11-12), 249-253, 1987.

Bubnov, S., Fajfar, P., Fischinger, M., Ribarič, V., Tomažević, M., Graditev objektov visokogradnje na seizmičnih območjih: ocena pravilnika, Publikacija IKPIR št. 25. FAGG, 1982.

Caprinuzzi, S., Paolacci, F., Dolšek, M. Seismic risk assessment of liquid overtopping in a steel storage tank equipped with a single deck floating roof, Journal of loss prevention in the process industries, 67, 104269, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104269, 2020.

Celano, F., Dolšek, M., Fatality risk estimation for industrialized urban areas considering multi-hazard domino effects triggered

by earthquakes, Reliability engineering and system safety, 206, doi.org/10.1016/j.res.2020.107287, 2020.

Celarec, D., Dolšek, M., Practice-oriented probabilistic seismic performance assessment of infilled frames with consideration of shear failure of columns, Earthquake engineering & structural dynamics, 42(9), 1339-1360, doi: 10.1002/eqe.2275, 2013.

Celarec, D., Ricci, P., Dolšek, M., The sensitivity of seismic response parameters to the uncertain modelling variables of masonry-infilled reinforced concrete frames, Engineering structures, 35, 165-177, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.11.007, 2012.

Celarec, D., Vamvatsikos, D., Dolšek, M., Simplified estimation of seismic risk for reinforced concrete buildings with consideration of corrosion over time, Bulletin of earthquake engineering, 9(4), 1137-1155, doi: 10.1007/s10518-010-9241-3, 2011.

CEN, EN 1992-4:2018, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 4: Design of fastenings for use in concrete, CEN, 2019.

CEN, prEN 1998-1-2:2021, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-2: Rules for new buildings, version 06-05-2021, CEN, 2021a.

CEN, prEN 1998-2:2021, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges, version 06-05-2021, CEN, 2021b.

CSI, SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Walnut Creek, California, <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>, datum vpogleda 6.9.2021, 2021a.

CSI, ETABS, Building analysis and design, Computers and Structures Inc., Walnut Creek, California, <https://www.csiamerica.com/products/etabs>, datum vpogleda 6.9.2021, 2021b.

Dolšek, M., Incremental dynamic analysis with consideration of modeling uncertainties. Earthquake engineering & structural dynamics, 38(6), 805-825, doi: 10.1002/eqe.869, 2009.

Dolšek, M., Brozovič, M., Seismic response analysis using characteristic ground motion records for risk-based decision-making (3R method), Earthquake engineering & structural dynamics, 45(3), 401-420, doi: 10.1002/eqe.2664, 2016.

Dolšek, M., Fajfar, P., Soft storey effects in uniformly infilled reinforced concrete frames, Journal of earthquake engineering, 5(1), 1-12, 2001.

Dolšek, M., Fajfar P., IN2—a simple alternative for IDA, 13th world conference on earthquake engineering, Vancouver, Canada, Paper 3353, 2004.

Dolšek, M., Fajfar P., Simplified non-linear seismic analysis of infilled reinforced concrete frames. Earthquake engineering & structural dynamics, 34(1), 49-66, 2005.

Dolšek, M., Fajfar P., Simplified probabilistic seismic performance assessment of plan-asymmetric buildings. Earthquake engineering & structural dynamics, 36(13), 2021-2041, doi: 10.1002/eqe.697, 2007.

Dolšek, M., Fajfar, P., The effects of masonry infills on the seismic response of a four-storey reinforced concrete frame - a

deterministic assessment, Engineering structures, 30(7), 1991-2001, 2008.

Dolšek, M., Žižmond, J., Babič, A., Lazar, S. N., Jamšek, A., Gams, M., Isaković, T., Seizmični stresni test stavbnega fonda Republike Slovenije (2020-2050), Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Naročnik: Ministrstvo za okolje in prostor RS, 2020.

Duhovnik, J., The influence of flexibility of floor slabs on the loading of vertical elements of high rise buildings, 7th European conference on earthquake engineering, Atene, 1982.

Fajfar, P., Analiza horizontalno obteženih nesimetričnih večnadstropnih konstrukcij, Publikacija RC FAGG št. 1, FAGG, 1972.

Fajfar, P., Statika, dinamika in stabilnost večetažnih objektov, Publikacija RC FAGG št.3, FAGG, 1974a.

Fajfar, P., Numerična analiza večetažnih objektov, Gradbeni vestnik, 23(8/9), 212-220, 1974b.

Fajfar, P., EAVEK: program za elastično analizo večetažnih konstrukcij, Publikacija RC FAGG št.13, FAGG, 1.izdaja 1976, 2. dopolnjena izdaja 1981, 3. izdaja 1987, izdaja v angleščini 1987.

Fajfar, P., Equivalent ductility factors, taking into account low-cycle fatigue, Earthquake engineering & structural dynamics, 21(10), 837-848, 1992.

Fajfar, P., Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra, Earthquake engineering & structural dynamics, 28(9), 979-993, 1999.

Fajfar, P., A nonlinear analysis method for performance-based seismic design, Earthquake spectra, 2000, 16(3), 573-592, 2000.

Fajfar, P., The story of the N2 method, International Association for Earthquake Engineering, 2021.

Fajfar, P., Dolšek, M., Marušić, D., Stratan, A., Pre-and post-test mathematical modelling of a plan-asymmetric reinforced concrete frame building, Earthquake engineering & structural dynamics, 35(11), 1359-1379, 2006.

Fajfar, P., Duhovnik, J., Reflak, J., Fischinger, M., Breška, Z., Obnašanje gradbenih objektov med potresi v Črni Gori 1979, Publikacija IKPIR št. 19, FAGG, 1981.

Fajfar, P., Fischinger, M., Non-linear seismic analysis of RC buildings: implications of a case study, European earthquake engineering, 1(1), 31-43, 1987.

Fajfar, P., Fischinger, M., N2-a method for non-linear seismic analysis of regular buildings, 9th world conference on earthquake engineering, 1988, Tokyo-Kyoto, Japan, 111-116, 1989.

Fajfar, P., Fischinger, M., Potresnovarno projektiranje objektov visoke gradnje: raziskovalno in razvojno delo v IKPIRu, Gradbeni vestnik, 39(9/11), 210-216, 1990.

Fajfar, P., Fischinger, M., Beg, D., Evrokod 8: projektiranje potresno odpornih konstrukcij. V: Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih, Ljubljana: Inženirska zbornica Slovenije, 8.1-8.241, 2009.

Fajfar, P., Fischinger, M., Isaković, T., EUROCODE 8/2: projektiranje konstrukcij v potresnih območjih – mostovi, Priročnik za uporabo predstandarda ENV 1998-2, IKPIR FGG, 1995.

Fajfar, P., Fischinger, M., Remec, Č., Evaluation of aseismic provisions in the U.S.A. and Yugoslavia, Publikacija IKPIR 28 A, FAGG, 1985.

Fajfar, P., Gašperšič, P., The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings, Earthquake engineering & structural dynamics, 25(1), 31-46, 1996.

Fajfar, P., Marušić, D., Peruš, I., Torsional effects in the pushover-based seismic analysis of buildings, Journal of earthquake engineering, 9(6), 831-854, 2005.

Fajfar, P., Novak, D., Floor response spectra for inelastic structures, 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 13), Porto Alegre, Brazil, paper no. K044/1:259-264, 1995.

Fajfar, P., Polič, M., Klinc, R., Zaznavanje potresne ogroženosti pri strokovnjakih in nestrokovnjakih, Gradbeni vestnik, 63, 111-118, 2014.

Fajfar, P., Vidic, T., Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy, Earthquake engineering & structural dynamics, 23(5), 523-537, 1994.

Fiorentino, G., Cengiz, C., De Luca, F., Mylonakis, G., Karamitros, D., Dietz, M., Dihoru, L., Lavorato, D., Briseghella, B., Isaković, T., Vrettos, C., Topa Gomes, A., Sextos, A., Nuti, C., Integral abutment bridges : investigation of seismic soil structure interaction effects by shaking table testing, Earthquake engineering & structural dynamics, 50(6), 1517-1538, 2021.

Fischinger, M., Cerovšek, T., Turk, Ž., Earthquake engineering slides on the Internet and CD-ROM, 11th European conference on earthquake engineering, Pariz. Rotterdam; Brookfield: A. A. Balkema, 1998.

Fischinger, M., Fajfar, P., Inelastic spectra of some earthquake recorded in Yugoslavia. 7th European conference on earthquake engineering, Atene, Vol. 3, 53-60, 1982.

Fischinger M., Fajfar P., On the response modification factors for reinforced concrete buildings, 4th U.S. National conference on earthquake engineering, Palm Springs, Vol. 2, 249-258, EERI, California, 1990.

Fischinger, M., Fajfar, P., Rogač, R., Stroški potresnovarne gradnje stenastih stavb, Gradbeni vestnik, 27(11/12), 240-247, 1978.

Fischinger, M., Isaković, T., Potresna izolacija pri novogradnjah in sanacijah AC mostov : razvojno-raziskovalna naloga: končno poročilo. IKPIR FGG, 2001.

Fischinger, M., Isaković, T., Kante, P., Shaking table response of a thin H-shaped coupled wall, V: Managing risk in earthquake country: 100th anniversary earthquake conference: Centennial meeting, Disaster resistant California conference: Proceedings CD-ROM. San Francisco: Earthquake Engineering Research Institute, 2006.

Fischinger, M., Isaković, T., Kolozvari, K., Wallace, J. W., Nonlinear modelling of reinforced concrete structural walls: guest editorial, Bulletin of earthquake engineering, 17(12), 6359-6368, doi: 10.1007/s10518-019-00715-z, 2019.

Fischinger, M., Kante, P., Isaković, T., NEES RC wall building - blind prediction based on a macro model, 1st international

conference on computational technologies in concrete structures (CTCS 09), Jeju, Korea, Volume of keynote papers and abstracts, 1065-1076, 2009.

Fischinger, M., Kante, P., Parametrična študija seizmičnega odziva AB sten, projektiranih po EC8, Gradbeni vestnik, 51, 246-253, 2002.

Fischinger, M., Tomažević, M., Capuder, F., Fajfar, P., Lutman, M., Szilagy, J., Študija potresne varnosti velikopanelnega sistema SCT, Gradbeni vestnik, 36(11/12), 241-248, 1987.

Fischinger, M., Vidic, T., Fajfar, P., Nonlinear seismic analysis of structural walls using the multiple-vertical-line-element model, v: Fajfar, P. (ur.), Krawinkler, H. (ur.). Nonlinear seismic analysis and design of reinforced concrete buildings. London: Elsevier Applied Science, 191-202, 1992.

Isaković, T., Assessment of existing structures using inelastic static analysis. V: Beer, M. (ur.). Encyclopedia of earthquake engineering, Berlin: Springer, 2014.

Isaković, T., Bevc, L., Fischinger, M., Modeling the cyclic flexural and shear response of the r.c. hollow box columns of an existing viaduct, Journal of earthquake engineering, 2008, 12(7), 1120-1138, 2008.

Isaković, T., Fischinger, M., Higher modes in simplified inelastic seismic analysis of single column bent viaducts, Earthquake engineering & structural dynamics, 35(1), 95-114, 2006.

Isaković, T., Fischinger, M., Applicability of pushover methods to the seismic analyses of an rc bridge, experimentally tested on tree shake tables, Journal of earthquake engineering, 15(2), 303-320, 2011.

Isaković, T., Fischinger, M., Assessment of a force-displacement based multiple-vertical-line element to simulate the non-linear axial-shear-flexure interaction behaviour of reinforced concrete walls, Bulletin of earthquake engineering, 17(2), 6369-6389, doi: 10.1007/s10518-019-00680-7, 2019.

Isaković, T., Gams, M., Janevski, A., Fischinger, M., et al., Large scale shake table test of slab-to-piers interaction in RC coupled walls, 17th World conference on earthquake engineering, Sendai, Japan, http://www.17wcee.jp/program.php#_proceedings, 2020.

Isaković, T., Janevski, A., Gams, M., Fischinger, M., Eksperimentalne raziskave interakcije med armiranobetonskimi ploščami in stenami na potresni mizi, Gradbeni vestnik, 69, 254-264, 2020.

Isaković, T., Zevnik, J., Fischinger, M., Floor response spectra in isolated structures subjected to earthquakes weaker than the design earthquake, Part 2, Isolation with magnetically controlled elastomeric bearings, Structural control & health monitoring, 18(5), 2011.

Isaković, T., Zoubek, B., Fischinger, M., Full-scale shake table tests of cladding panels. 16th European conference on earthquake engineering, Thessaloniki, Greece, 2018.

ISO, Simplified design for mechanical connections between precast concrete structural elements in buildings, ISO 20987, 2019.

Jamšek, A., Dolšek, M., Seismic analysis of older and contemporary reinforced concrete frames with the improved fish-bone model, Engineering structures, 212, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110514, 2020.

Kanaan, A. E., Powell, G. H., DRAIN-2D, a general purpose computer program for dynamic analysis of planar structures, Report UCB/EERC 73-6, Earthquake engineering research center, University of California, Berkeley, CA, 1973.

Kappos, A. J., Saiidi, M. S., Aydinoglu, M. N., Isaković, T. (avtorji in uredniki), Seismic design and assessment of bridges: inelastic methods of analysis and case studies, Geotechnical, geological and earthquake engineering, Vol. 21, Dordrecht, Springer, 2012.

Kilar, V., Fajfar, P., Simple push-over analysis of asymmetric buildings, Earthquake engineering & structural dynamics, 26(2), 233-249, 1997.

Klinc, R., Peruš, I., Dolenc, M., Fajfar, P., Spletna verzija programa EAVEK, Gradbeni vestnik, 65(1), 10-17, 2016.

Kolozvari, K., Arteta, C. A., Fischinger, M., Gavridou, S., Hube, M. A., Isaković, T., Lowes, L., Orakcal, K., Vásquez, J. A., Wallace, J. W., et al., Comparative study of State-of-the-Art macroscopic models for planar reinforced concrete walls, ACI structural journal, 115(6), 1637-1657, doi: 10.14359/51710835, 2018.

Kosič, M., Dolšek, M., Fajfar, P., Dispersions for the pushover-based risk assessment of reinforced concrete frames and cantilever walls, Earthquake engineering & structural dynamics, 45(13), 2163-2183, 2016.

Kramar, M., Isaković, T., Fischinger, M., Seismic collapse risk of precast industrial buildings with strong connections, Earthquake engineering & structural dynamics, 39(8), 847-868, 2010.

Kreslin, M., Fajfar, P., The extended N2 method taking into account higher mode effects in elevation, Earthquake engineering & structural dynamics, 40(14), 1571-1589, 2011.

Kreslin, M., Fajfar, P., The extended N2 method considering higher mode effects in both plan and elevation, Bulletin of earthquake engineering, 10(2), 695-715, 2012.

Lazar Sinković, N., Brozović, M., Dolšek, M., Risk-based seismic design for collapse safety, Earthquake engineering & structural dynamics, 45(9), 1451-1471, doi: 10.1002/eqe.2717, 2016.

Lazar Sinković, N., Dolšek, M., Incorporating intensity bounds for assessing the seismic safety of structures: Does it matter?, Earthquake engineering & structural dynamics, 43(5), 717-738, doi: 10.1002/eqe.2368, 2014.

Menichini, G., Isaković, T., Modeling the seismic response of vertical concrete cladding panels. V: Structural concrete today - theory, applications, materials, techniques: AICAP days 2018 CTE congress, Milano/Lecco, 2018.

Park, Y.J., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., IDARC - Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear wall structures, Report NCEER-87-0008, SUNNY, Buffalo, 1987.

Peruš, I., Poljanšek, K., Fajfar, P., Flexural deformation capacity of rectangular RC columns determined by the CAE method,

Earthquake engineering & structural dynamics, 35(12), 1453-1470, 2006.

Reflak, J., Fajfar, P., Elastic analysis of infilled frames using substructures, 6th Canadian conference on earthquake engineering, Toronto, University of Toronto Press, 285-292, 1991.

Rejec, K., Isaković, T., Fischinger, M., Seismic shear force magnification in RC cantilever structural walls, designed according to Eurocode 8, Bulletin of earthquake engineering, 10(2), 567-586. doi: 10.1007/s10518-011-9294-y, 2012.

Rozman, M., Fajfar, P., Seismic response of a RC frame building designed according to old and modern practices, Bulletin of earthquake engineering, 7(3), 779-799, 2009.

Saiidi, M., Randall, M., Maragakis, E., Isaković, T., Seismic restrainer design methods for simply supported bridges, Journal of bridge engineering, 6(5), 307-315, 2001.

Sinkovič, K., Peruš, I., Fajfar, P., Assessment of the seismic performance of low-rise RC structures by procedures with different levels of complexity, Bulletin of earthquake engineering, 14(1), 213-239, 2016.

SIST, SIST EN 1998-1:2006, Evrokod 8: Projektiranje potresno-odpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2006a.

SIST, SIST EN 1998-2:2006, Evrokod 8 - Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih - 2. del: Mostovi, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2006b.

SIST, SIST ENV 1998-2:1995, Evrokod 8 - Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih - 2. del: Mostovi, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 1995.

Snoj, J., Dolšek, M., Pushover-based seismic risk assessment and loss estimation of masonry buildings, Earthquake engineering & structural dynamics, 49(6), 567-588, doi: 10.1002/eqe.3254, 2020.

Snoj, J., Österreicher, M., Dolšek, M., The importance of ambient and forced vibration measurements for the result of seismic performance assessment of buildings obtained by using a simplified non-linear procedure: case study of an old masonry building, Bulletin of earthquake engineering, 11(6), 2015-2132, doi: 10.1007/s10518-013-9494-8, 2013.

Starešinič, G., Zoubek, B., Gams, M., Isaković, T., Fischinger, M., Modelling in-plane dynamic response of a fastening system for horizontal concrete facade panels in RC precast buildings, Engineering structures, 224, 111210, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111210, 2020.

Šolinc, H., Vpliv hidrodinamičnih tlakov na potresni odziv valjastega rezervoarja, Gradbeni vestnik, 36(11-12), 275-278, 1987.

Vidic, T., Fajfar, P., Fischinger, M., Consistent inelastic design spectra: strength and displacement, Earthquake engineering & structural dynamics, 23(5), 507-521, 1994.

Vukobratović, V., Fajfar, P., Code-oriented floor acceleration spectra for building structures, Bulletin of earthquake engineering, 15(7), 3013-3026, doi: 10.1007/s10518-016-0076-4, 2017.

Zoubek, B., Fahjan, Y., Fischinger, M., Isaković, T., Nonlinear finite element modelling of centric dowel connections in precast buildings, Computers and concrete, 14(4), 463-477, 2014.

Zoubek, B., Fischinger, M., Isaković, T., Estimation of the cyclic capacity of beam-to-column dowel connections in precast industrial buildings, Bulletin of earthquake engineering, 7(7), 2145-2168, 2015.

Zoubek, B., Fischinger, M., Isaković, T., Cyclic response of hammer-head strap cladding-to-structure connections used in RC precast building, Engineering structures, 119, 135-148, 2016.

Žižmond, J., Dolšek, M., Formulation of risk-targeted seismic action for the force-based seismic design of structures, Earthquake engineering & structural dynamics, 48(12), 1406-1428, doi: 10.1002/eqe.3206, 2019.

doc. dr. Janez Reflak, univ. dipl. inž. grad.
janez.reflak@gmail.com



prof. dr. Žiga Turk, univ. dipl. inž. grad.
ziga.turk@fgg.uni-lj.si



Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR),
Jamova 2, 1000 Ljubljana

Pregledni znanstveni članek
UDK 69:004.41(497.4)(091)

50 LET GRADBENE INFORMATIKE NA IKPIR

50 YEARS OF CONSTRUCTION INFORMATICS AT IKPIR

Povzetek

Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR) je tesno povezan z uvajanjem računalništva v slovensko gradbeništvo. Njegovo jedro tvorijo posamezniki, ki so konec šestdesetih in v začetku sedemdesetih let razumeli potencial računalnikov v gradbeništvo in ki so skozi desetletja razvoja medse pritegnili vedno nove in nove generacije, ki so v digitalni tehnologiji videle pomemben vzvod za napredek. IKPIR ima korenine v Računskem centru takratne Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, ki je bil ustanovljen leta 1971 in v katerem se je zbralo jedro ekipe IKPIR – Janez Reflak, Peter Fajfar in Janez Duhovnik. Do leta 1981 je center kot podporna enota fakultete za računalniške zadeve postal pretesen za svoje bogato raziskovalno, strokovno in pedagoško strokovno delo in se je preimenoval v Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo. Potem ko se svetovni razvoj v devetdesetih pokazal, da je gradbena informatika samostojno raziskovalno in pedagoško področje znotraj gradbeništva, sta se znotraj IKPIR oblikovali dve katedri: Katedra za konstrukcije in potresno inženirstvo ter Katedra za gradbeno informatiko. Jedro slednje so tvorili Iztok Kovačič, Vid Marolt, Žiga Turk, Matevž Dolenc, Tomo Cerovšek, Vlado Stankovski, Robert Klinc in Andreja Istenič Starčič, ki so tudi jedro raziskovalne skupine eGradbeništvo. Ti organizacijski mejniki tudi vsebinsko členijo delo na področju gradbene informatike. V prvem obdobju, ki se začne še s paketnimi obdelavami, je bil računalnik orodje, ki je omogočalo hitrejšo analizo konstrukcij in podporo reševanju drugih vrst problemov – predvsem analitičnih. V začetku osemdesetih s pojavom interaktivne opreme, osebnih računalnikov se analizi pridruži sinteza, torej konstruiranje, risanje in modeliranje. Računalnik postane orodje, s katerim inženir projektira in dokumentira načrte. S pojavom omrežij, predvsem interneta, dobi digitalna tehnologija tudi vlogo medija, prek katerega ljudje in računalniški programi sodelujejo in izmenjujejo informacije, gradbena informatika pa postane samostojna disciplina s svojimi predmetniki, študiji, konferencami in znanstvenimi revijami. Sodelavci IKPIR so bili v vseh obdobjih v stiku s svetovnim vrhom in so ga tudi sooblikovali.

Ključne besede: gradbena informatika, računalništvo, zgodovina, informacijsko modeliranje

Summary

Institute of Structural Engineering, Earthquake Engineering and Construction IT (IKPIR) is closely connected to the introduction of computing in Slovenian construction. Its core is made up of individuals who recognised the potential of computers in construction in the late 1960s and early 1970s and who, through decades of development, attracted many generations who saw digital technology as an important lever for progress. IKPIR has its roots in the Computing Center of the then Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, founded in 1971, where the core of the IKPIR team - Janez Reflak, Peter Fajfar and Janez Duhovnik - came together. By 1981, the center, as a Support Unit of the Faculty for Computing, had become too narrow for its rich research, professional and educational work, and was renamed the Institute of Structural Engineering, Earthquake Engineering, and Construction IT. After the global development in the 1990s showed that construction informatics was an independent research and educational field within construction, two chairs were established within IKPIR: the Chair of Structural and Earthquake Engineering and the Chair of Construction Informatics. The core of the latter consisted of Iztok Kovačič, Vid Marolt, Žiga Turk, Matevž Dolenc, Tomo Cerovšek, Vlado Stankovski, Robert Klinc and Andreja Istenič Starčič, who are also the core of the eGradbeništvo research group. These organizational milestones also divide the work in the field of construction informatics in Ljubljana. In the first period, which began with batch processing, the computer was a tool that enabled faster analysis of structures and support in solving other types of problems - especially analytical ones. In the early 1980s with the advent of interactive equipment and personal computers, synthesis was added to analysis, i.e. construction, drawing and modeling. The computer becomes a tool with which the engineer designs and documents designs. With the advent of networks, especially the Internet, digital technology also takes on the role of a medium through which people and computer programs collaborate and exchange information, and construction informatics becomes an independent discipline with its own curricula, studies, conferences and scientific journals. Members of IKPIR have been in contact with the global state of the art and have also co-created it.

Key words: construction informatics, computer science, history, information modeling

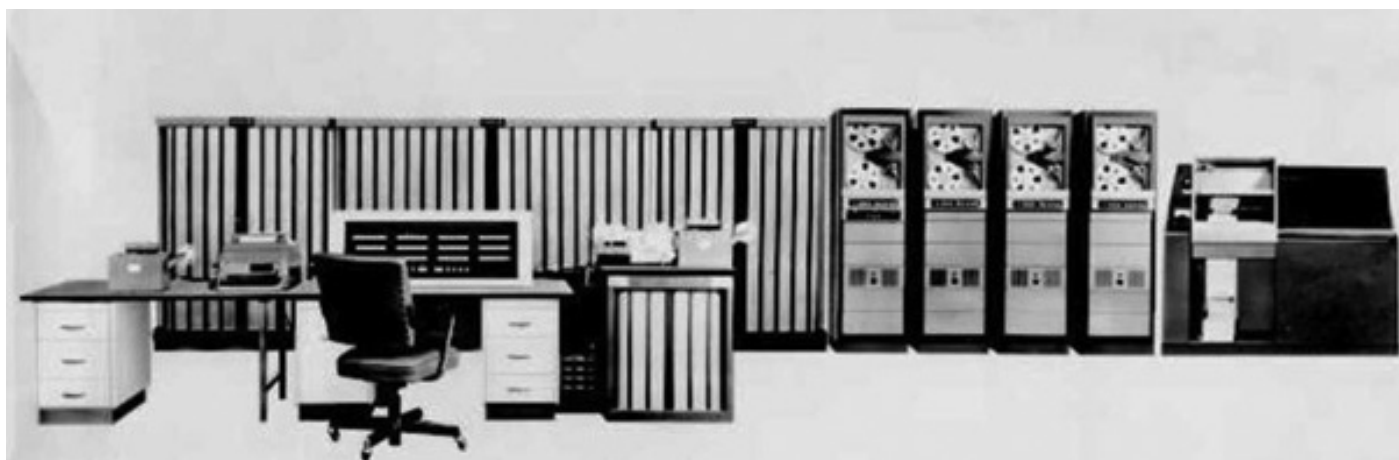
1 ZAČETKI

Univerza v Ljubljani je prvi računalnik dobila leta 1963. To je bil ZUSE Z23, ki je bil inštaliran na Inštitutu za matematiko, fiziko in mehaniko (IMFM). Deloval je v taktu 140 kHz, tehtal okrog ene tone in rabil 4000 W moči. Zmogel je ca. 50 operacij s plavajočo vejico na sekundo [Zuse, n.d.]. V letih 1965–68 je IMFM dobil računalnik IBM 1130, na katerem je tekel tudi program za račun konstrukcij STRESS [Fenves, 1965]. Po naročilu gradbenega konstruktorja Dušana Raiča je s tem programom takrat asistent Janez Reflak računalniško konstrukcije hotelov v Portorožu, ki so jih načrtovali pod vodstvom arhitekta Eda Mihovca.

V letih 1968–70 je v okviru Republiškega računskega centra v Stegnah deloval nov, močnejši računalnik CDC 3300. Enako kot IBM 1130 je deloval z luknjanimi karticami, imel pa je že magnetne trakove za shranjevanje podatkov in rezultatov.

zne terminalne opreme, o ekipiranju enote in o sistematiziranju mesta učitelja za predmet Programiranje. Za predstojnika enote je bil predlagan asistent Janez Reflak, za predavatelja predmeta Programiranje pa Peter Fajfar. Fakultetni svet FAGG je 27. 10. 1971 za potrebe pedagoškega, znanstvenoraziskovalnega in strokovnega dela ustanovil Računski center Fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (RC FAGG) in za vodjo imenoval Janeza Reflaka.

V prvem obdobju svojega delovanja se je RC FAGG ukvarjal predvsem z uvajanjem uporabe računalnikov v pedagoški proces, v raziskovalno delo in v gradbeniško prakso. Skupaj z gospodarskimi organizacijami je RC FAGG leta 1974 obstoječi pasivni terminal zamenjal z aktivnim terminalom CDC-1700, ki je imel tudi magnetno enoto. Ta se je uporabljala predvsem za risanje na risalniku DP-3-M1 in kasneje na velikem risalniku VERSATEC formata DIN A0, ki je bil v tistem času največji risalnik v civilni uporabi v Jugoslaviji.



Slika 1. Zuse Z23 [Zuse, n.d.].

Leta 1969 je Slovenija dobila za tiste čase sodoben in zelo zmogljiv računalnik CYBER 6600, ki so ga leta 1972 zamenjali za Cyber 72, ki je bil nameščen na Jadranski ulici v novi stavbi Republiškega računskega centra. CYBER 72 je omogočal tudi mrežo pasivnih terminalov, na katero se je iz nove stavbe na Jamovi 2 s svojim priključila tudi takratna Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (FAGG). FAGG je takrat imela pasivni batch terminal CDC-200 USER, 2 luknjača kartic IBM-029 in eno verificirko. Leta 1969 torej FAGG v svoje prostore dobi prvo resno računalniško opremo in takoj identificira priložnosti nove tehnologije [Duhovnik, 1969].

2 RAČUNSKI CENTER FAGG

Razprave o potrebi po ustanovitvi računskega centra FAGG segajo v začetek leta 1971. Pedagoško-znanstveni svet FAGG je na seji 15. 4. 1971 soglasno sprejel sklep, da se osnuje računalniška enota pri FAGG. Fakultetni svet FAGG je imenoval Komisijo za računalništvo v naslednji sestavi: dekan Saša Sedlar, Ivan Čuček, Bogdan Kilar, Tine Kurent, Mirko Pregl, Janez Reflak, Hinko Šolinc in Blaž Vogelink. Za predsednika je bil soglasno izvoljen asistent Janez Reflak. Na Komisiji je takoj stekla razprava o ustanovitvi Računalniške enote FAGG, o nabavi ustre-

Istočasno je RC FAGG pridobil najosnovnejše kadre, ki so bili potrebni za tekoče operativno in strokovno delo pri računalniški obdelavi. 15. 12. 1971 je mesto tehničnega vodje Računskega centra FAGG zasedel Peter Fajfar. RC FAGG je zaposlil strokovnega sodelavca za programsko opremo Zdeneta Breško, asistenta za predmet Programiranje Iztoka Kovačiča, operaterko za delo na terminalu Natašo Mayer in operaterko na luknjačih Lidijo Božič-Košak.

V zimskih počitnicah 1971/72 je RC FAGG že organiziral osnovni tečaj iz programiranja in računalništva za pedagoško osebje, ki ga je obiskovalo 26 profesorjev in asistentov. Enak tečaj je bil organiziran v februarju tudi za absolvente Oddelka za arhitekturo.

V tem obdobju se je začela tudi uporaba računalnikov pri strokovnem delu. Posamezni mlajši člani fakultete, predvsem iz Konstrukcijskega odseka, ki so že prej pri svojem delu individualno uporabljali računalnik Republiškega računskega centra, so svoje delo povezali v okviru RC FAGG. Ti sodelavci RC FAGG so sodelovali pri več projektih s področja statike in potresne analize zahtevnejših mostov in stavb. Dolgoročno sodelovanje z RC FAGG so vzpostavili mnogi projektantski biroji v Sloveniji, med njimi SGP Gorica, PNZ Ljubljana, IBT Trbovlje, Slovenija projekt, IBE, Konstruktor



Slika 2. Risalnik Versatec.

Maribor, Stavbar Maribor, Ingrad Celje, Vegrad Velenje in Cestni sklad.

Iz sredstev, ki so jih sodelavci RC FAGG zaslužili s svojim strokovnim delom, so se začeli udeleževati raznih seminarjev, izobraževanj in kongresov doma in v tujini. V študijskem letu 1972/73 bil Peter Fajfar s štipendijo DAAD na študijskem izpopolnjevanju na Univerzi v Bochumu, kjer je pripravljal svojo doktorsko disertacijo. Julija 1973 se je udeležil V. svetovnega kongresa o potresnem inženirstvu v Rimu. Septembra 1973 se je Zdene Breška udeležil 7. mednarodnega simpozija računalništva v Davosu, oktobra 1973 pa sta se Peter Fajfar in Janez Reflak udeležila sedemdnevnega seminarja IFIP na Bledu. Aprila 1974 je RC FAGG že organiziral štiridnevni seminar o uporabi računalnikov za račun konstrukcij v Ljubljani, kjer so bili predavatelji sodelavci RC FAGG. Novembra 1974 je 11 sodelavcev RC FAGG obiskalo svetovno razstavo gradbeništva in računalništva v Londonu. Tako se je začelo odpiranje RC FAGG v svet.

Sodelavci RC FAGG so se angažirali na aplikaciji obstoječih programskih paketov za pedagoški in raziskovalni proces ter za uporabo v praksi. Za račun konstrukcij so v začetni fazi uporabljali ameriški program STRESS. Preprogramirali ali na novo so napisali več kot 100 krajših programov in podprogramov s področja matričnega računa, linearne algebre, diferencialnih enačb, numerične integracije, specialnih funkcij ter programe za risanje na tiskalnik in risalnik.

V letu 1972 je RC FAGG izdal svojo prvo publikacijo avtorja Petra Fajfarja »Analiza horizontalno obteženih nesimetričnih večetažnih konstrukcij« z vsemi teoretičnimi osnovami in praktičnimi primeri za avtomatični račun konstrukcij pri potresni obtežbi. V letih 1972–79 je bilo izdanih več kot 15 publikacij.

Uporaba računalnika v pedagoškem procesu se je iz leta v leto povečevala za več kot 50%.

V letu 1974 je RC FAGG organiziral 2 tečaja za programski jezik FORTRAN za študente oddelka za arhitekturo, tečaj za osnove FORTRANA za celotno pedagoško osebje FAGG ter seminar o uporabi elektronskih računalnikov za račun konstrukcij z udeležbo 85 gradbenih konstruktorjev iz cele Slovenije.

Poleg seminarjev in tečajev doma je RC FAGG s svojimi sodelavci sodeloval z referati ali predavanji še na seminarjih v okviru Republiškega računskega centra Slovenije in drugih organizacij. V teh letih je RC FAGG s svojimi sodelavci dosegel v zelo kratkem času zelo dober stik z gradbeno projektivo in operativno po celi Sloveniji. Praktično ni bilo pomembnejšega novega objekta, za katerega ne bi bil statični račun narejen s sodelovanjem sodelavcev iz RC FAGG. RC FAGG je ves čas sledil razvoju na računalniškem področju. Predvsem Iztok Kovačič in Zdene Breška sta bila vedno na tekočem z novitetami.

V letih 1973 in 1975 sta bili zaključeni tudi prvi dve obsežni »računalniški« raziskovalni nalogi, ki ju je sofinanciral Sklad Borisa Kidriča: »Uvajanje novih obstoječih programov za elektronske računalnike s področja teorije konstrukcij« in »Problemsko orientiran računalniški jezik za račun konstrukcij« [Reflak, 1975]. V slednji sta bila razvita programa RAVOK in STRESSPLOT. Sploh prva raziskovalna naloga tedanjega računskega centra pa je bila »Analiza horizontalno obteženih nesimetričnih večnadstropnih konstrukcij«, ki je bila zaključena maja 1972.

Prvi domači aplikativni programi so bili izdelani najprej za IBM 1130, kasneje so bili dodelani in prirejeni za računalnik CYBER. Za račun konstrukcij so se uporabljali [Fajfar, 1977] STRESSPLOT za grafični prikaz rezultatov programa STRESS, RAVOK in BRANA za račun ravninskih okvirov in bran (kasneje OKVIR), DAVEK za statično in dinamično analizo večetažnih konstrukcij (kasneje EAVEK), HOST za račun sten z več vrstami odprtin, PALID za račun velikih prostorskih paličnih sistemov in STRIP za račun trakastih temeljev. Uporabljali so se tudi tuji programi, ki so omogočali račun po metodi končnih elementov: EASE za statično analizo splošno oblikovanih konstrukcij, FEAPS, dobljen iz ETH Zürich, za račun plošč in rebrastih plošč in FLASH za statični račun splošnih konstrukcij. Zunanji sodelavec Borut Dobovišek je izdelal program SHELLS za račun lupinastih konstrukcij. Razvit je bil obsežen specialni program MOL Gorica, ki je omogočal celoten statični račun in variantno dimenzioniranje (vključno s temelji) industrijskih montažnih hal MOL-Gorica [Duhovnik, 1977]. V naslednjih letih je bilo s tem programom za področje celotne Jugoslavije izračunanih ca. 300 različnih hal tega tipa. Za analize vodovodnega in kanalizacijskega omrežja so bili izdelani programi CROSS 1 in CROSS 3 za izračun velikih mestnih vodovodnih omrežij, CROSSPLOT T- program za izračun mestnega vodovodnega omrežja z grafičnim izhodom na risalnik ter KANALI in KANALR za izračun mestne kanalizacijske mreže.

Sodelavci RC FAGG so z izdanimi publikacijami in s predelanimi aplikativnimi programi, ki so jih uspešno preko seminarjev uvedli v vsakodnevno prakso in zanje napisali tudi uporabniške priročnike, ustvarili pogoje, da so začeli vse te programe uporabljati tudi študentje pri svojih diplomah II. in III. stopnje ter pri vajah predmetov Statika gradbenih konstrukcij, Računanje konstrukcij, Dinamika gradbenih konstrukcij, Masivne konstrukcije, Jeklene konstrukcije, Lesene konstrukcije, Statika ploskovnih konstrukcij idr.



Slika 3. Računski center FAGG ca. 1981. Spredaj je računalnik CDC 1700 s tiskalnikom (pri oknu) in diskovnim pogonom (skrajno desno), zadaj v kotu risalnik Versatec A0 s pripadajočim tračnim pogonom.

Sodelavci RC FAGG so s sofinanciranjem Republiške raziskovalne skupnosti v teh letih opravili raziskovalne naloge: Problemsko orientiran računalniški jezik za račun konstrukcij, I. in II. del (1975), Uvajanje programa za statično in dinamično analizo konstrukcij SAP IV, I. in II. del (1977), Ekonomizacija računanja ravninskih konstrukcij z MKE (1978), Račun večetažnih konstrukcij pri seizmični obtežbi, II. del (1978).

O svojem delu so sodelavci RC FAGG začeli poročati in sodelovati na jugoslovanskih in evropskih kongresih v Ohridu, Budvi, Istanbulu, Sarajevu, Cavtatu, Bledu, Toulusu, Dubrovniku. Duhovnik, Fajfar in Reflak so se udeležili VI. svetovnega kongresa o potresnem inženirstvu v New Delhiju leta 1977.

Za gospodarsko zbornico je RC FAGG izdelal Program srednjeročnega razvoja gradbeništva in industrije gradbenega materiala za obdobje 1976–80, in sicer za področje elektronske obdelave podatkov.

V sedemdesetih letih so sodelavci RC FAGG organizirali več seminarjev, ki se jih je udeleževalo med 70 in 100 udeležencev iz Slovenije in Jugoslavije. Izstopa seminar, ki so ga organizirali skupaj z Univerzo Berkeley (ZDA), z naslovom »Statična in dinamična analiza konstrukcij z metodo končnih elementov – SAP IV«, ki mu je sledilo dolgoletno sodelovanje s to univerzo.

Jedro raziskovalcev in strokovnih sodelavcev so v teh letih tvorili: Zdene Breška, Janez Duhovnik, Peter Fajfar, Iztok Kovačič, Boris Lutar, Hinko Šolinc, Vid Marolt, Ervin Prelog, Janez Reflak, Matej Fischinger, Smiljan Sočan, Janoš Szilagyí in Marta Marek. 1976 je RC FAGG zaposlil tudi tehnično sodelavko Alenko Bezljaj-Kreft. Vsa tajniško-organizacijska dela in prevajanje pa je za RC FAGG opravljala Darja Okorn, prof. angl.

V drugi polovici sedemdesetih so bile glavne usmeritve RC FAGG: (1) Račun večetažnih konstrukcij pri seizmični obtežbi, (2) Izdelava računalniških programov za področje teorije konstrukcij, dimenzioniranja in konstruiranja, (3) Razvijanje računalniške grafike. Razvoj slednje je pospešil Andrej Vitek.

Sredi sedemdesetih se je v RC FAGG začelo razmišljati o interaktivnem delu in začeli so uporabljati prve namizne terminale KOPA. Takrat, še bolj pa v osemdesetih so se začeli pojavljati tudi prvi računalniki, zgrajeni okrog mikroprocesorjev, ki so računsko moč sčasoma iz oddaljenih računalnikov prenesli na inženirjevo mizo.

3 INŠTITUT TUDI ZA RAČUNALNIŠTVO

Računski center FAGG je s svojo izjemno bogato in razvejano pedagoško, raziskovalno in strokovno dejavnostjo zelo hitro prerasel organizacijsko obliko, ki je bila namenjena splošni podpori uvajanja računalništva na fakulteti. Organizacijska oblika računskega centra je v desetih letih hitrega razvoja postala pretesna.

Jeseni, 8. 11. 1979, se je RC FAGG preimenoval v Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR), kar je bolje odražalo raziskovalni, pedagoški in strokovni značaj enote in sodelavcev, vsebinsko pa uokvirilo tri med seboj prepletena področja dela. V letih, ki so sledila, se je IKPIR razvil v najmočnejšo pedagoško in raziskovalno interno enoto na fakulteti tako po številu sodelavcev kot po številu opravljenih domačih in mednarodnih raziskovalnih projektov ter po številu objavljenih del.

Predstojnik inštituta IKPIR, od ustanovitve do leta 2001, do svoje upokojitve (razen v obdobju 1985-1989, ko je bil direktor Inštituta za metalne konstrukcije), je bil Janez Reflak.

Dejavnost na področju konstrukcij je obsegala raziskave metod projektiranja konstrukcij, razvoj računalniških programov in njihovo uvajanje v prakso ter projekte, ki vključujejo nelinearne analize konstrukcij in industrijskih procesov. Sodelavci inštituta IKPIR so na začetku delovanja preučevali sodobne metode analize konstrukcij, vključno z metodo končnih elementov. To je omogočalo uvajanje metode končnih elementov v študijski program, razvoj lastnih računalniških programov in uvajanje le-teh ter tujih računalniških programov za analizo konstrukcij v prakso.

Sredi osemdesetih se je programiranje preselilo na osebne računalnike tipa IBM PC. Tipičen računalnik iz tistega časa je imel 640 kB RAM-a, 20 MB trdega diska in barvno VGA-grafiko ločljivosti 640 x 480 slikovnih elementov.

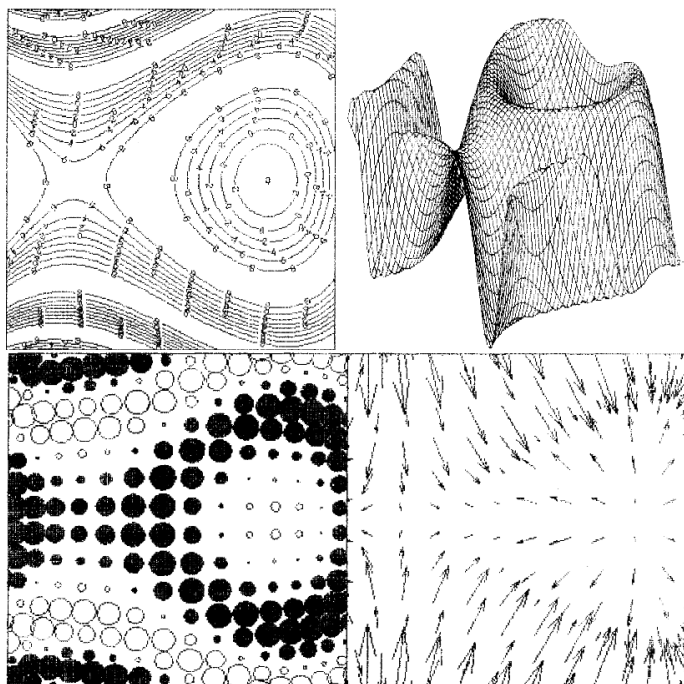
Razviti so bili splošni programi za račun linijskih konstrukcij, plošč in konstrukcij stavb ter posebni programi za račun montažnih betonskih konstrukcij [Reflak, 1980]. Programsko opremo so uporabljali številni projektanti gradbenih konstrukcij v Sloveniji pa tudi drugod po nekdanji Jugoslaviji in z njo je izračunana večina pomembnejših stavb v Sloveniji. Najbolj znani programi so bili OKVIR, EAVEK, DIAS in MONCAD [Duhovnik, 1989a].

Konec sedemdesetih so se pojavila prva dela s področja računalniške grafike ([Pangeršič, 1979], [Ljubič, 1980]). V začetku osemdesetih let je razvoj računalniške grafike omogočil uporabo računalnikov tudi pri tistih delih procesa projektiranja, ki so bili dotlej izvedljivi le s klasičnimi metodami. Pod vodstvom Janeza Duhovnika in sodelavcev Vlada Ljubiča, Dejana Žlajpaha, Toneta Knifca in Blaža Dolinška so bili v inštitutu IKPIR raziskani postopki računalniškega projektiranja armature [Duhovnik, 1990] in razviti programi, katerih rezultat so bili armaturni načrti [Dolinšek, 1997]. Raziskovali so tudi možnosti za robotizirano sestavljanje armature [Dolinšek, 1998]. Rezultati teh programov so bili neposredno uporabni tudi za planiranje in vodenje proizvodnje v železokrivnicah. Večini obstoječih programov so bili dodani posodobljeni grafični pred- in po-procesorji.

V drugi polovici osemdesetih let so začeli raziskave ekspertnih sistemov [Duhovnik, 1989b], med drugim na področju tehniških predpisov [Turk, 1995a]. Za nadaljevanje raziskav postopkov za projektiranje armature so se raziskovale možnosti za robotizirano sestavljanje armature. Procesi sestavljanja so se proučevali z uporabo programov za simulacijo robotiziranih procesov, ki omogočajo oceno izvedljivosti in gospodarnosti robotskih sistemov.

V Sloveniji je bilo raziskovanje povezano v projektu republiške raziskovalne skupnosti z naslovom Računalnik v gradbenem inženirstvu in potresno inženirstvo, v katerem so poleg že omenjenih sodelovali tudi Duška Tomšič, Igor Potočan, Vanja Samec, Marko Verčnik in Jure Rihar. Na začetku 90. let so se sodelavci IKPIR prvič vključili v programe Evropske unije iz shem Tempus [Duhovnik, 1993] in sheme ESPRIT, ki je predhodnica evropskih okvirnih programov.

Konec osemdesetih let je Franjo Damjanič s sodelavci začel raziskovati na področju nelinearne numerične analize kon-



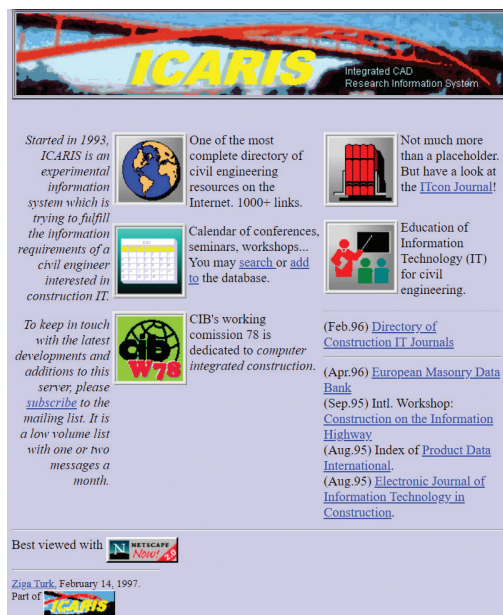
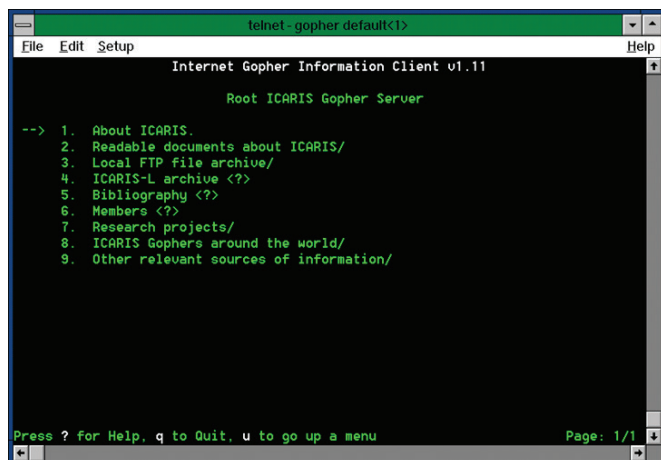
Slika 4. Izris s knjižnico P-Paket. Slika je iz priročnika za P-paket, prikazuje štiri načine predstavitve prostorske ploskve. Izris je narejen na matričnem tiskalniku na hišnem računalniku Atari.

strukcij in industrijskih procesov. Izvajale so se temeljne raziskave nelinearnih numeričnih postopkov, razvijali so se računalniški programi ter sodelovalo se je pri reševanju zahtevnih praktičnih inženirskih nalog. Razviti so bili različni nelinearni numerični modeli ter programska oprema za nelinearno analizo konstrukcij, za analizo interakcije tekočina-konstrukcija ter za nelinearno nestacionarno analizo prehoda toplote in termomehanskih problemov.

Intenzivna raba računalnika in avtorstvo programske opreme sta spodbudila razvoj na splošnejših področjih inženirske informatike. Andrej Vitek, Iztok Kovačič in sodelavci so se ukvarjali z računalniško grafiko ([Kovačič, 1977], [Kovačič, 1980]) in razvili lastne knjižnice za računalniško risanje, imenovano P-paket [Vitek, 1987].



Slika 5. Zbornik konference iz leta 1966, tiskana letnika revije ITcon, 1996 in 1997, ter zbornik konference iz leta 2002.



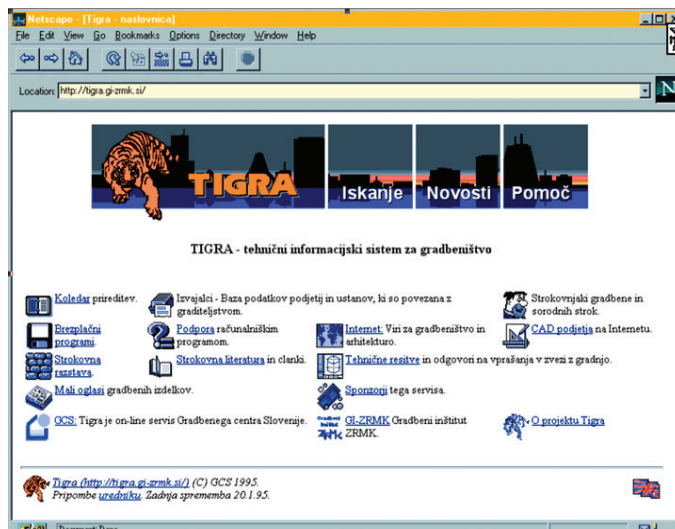
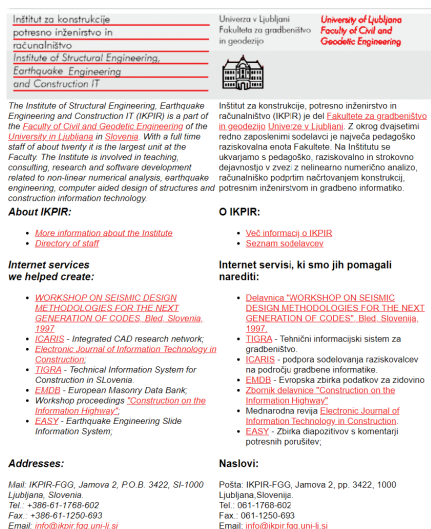
Slika 6. Levo storitve na internetu pred spletom leta 1993, desno ista storitev na spletu leta 1997.

Jeziku FORTRAN, v katerem so sodelavci IKPIR izdelovali programsko opremo, se je v začetku devetdesetih pridružil najprej C [Turk, 1987], potem pa še C++ [Turk, 1991] in objektni pristop na splošno [Kovačič, 1992]. Izток Kovačič je začel uvajati jezike C in C++, objektivne zbirke podatkov in prijazne uporabniške vmesnike tudi v pedagoški proces. Vse večji programi so terjali tudi sistematičen, inženirski pristop pri njihovem razvoju, ki ga je v strokovno delo in pedagoški proces uvažal Izток Kovačič [Kovačič, 1988].

V začetku 90. let so se pojavila prva računalniška omrežja, ki so spodbudila razmišljanja o povezovanju različnih programov in ljudi ter s celovitim obvladovanjem informacij, ki nastajajo in so potrebne skozi celotno življenjsko dobo gradbenega objekta. Pod mentorstvom Janeza Du-

hovnika so se konec osemdesetih začele raziskave na področju informacijskega modeliranja [Turk, 1989] in se pridružile trendu svetovnih raziskav računalniško integrirane graditve [Turk, 1992].

V jedro raziskav na področju računalništva v gradbeništvu je takrat začel vstopati pristop najprej geometrijskega [Kovačič, 1995], potem pa informacijskega modeliranja. Sprva se je govorilo o modeliranju procesov in produktov, kasneje pa o informacijskem modeliranju zgradb in gradenj, s čimer se je jasno povedalo, da ne gre za makete arhitekturnega modeliranja ali za enačbe modeliranja v gradbeni mehaniki, tudi ne za geometrijsko modeliranje, ampak za to, kako celovito upravljati informacije v gradbeništvu.



Slika 7. Levo: domača stran IKPIR, kot je bila videti leta 1998. Storitve za slovensko gradbeništvo iz leta 1995.

Prva sistematična raziskava računalniško integrirane graditve na IKPIR je bila v letih 1993–95 v okviru temeljnega raziskovalnega projekta Računalniško integrirano projektiranje in gradnja armiranobetonskih konstrukcij. Sodelavci IKPIR so se vključili v delovno skupino W78 mednarodne organizacije za raziskave v gradbeništvu CIB in bili med soustanovitelji evropske zveze za produktno in procesno modeliranje EAPPM. Obe mednarodni skupini sta povezali raziskovalce na tem področju predvsem na letnih kongresih in delavnicah. Dve je organiziral tudi IKPIR – leta 1996 na Bledu z naslovom »Gradbeništvo na informacijski avtocesti« [Turk, 1996] in evropsko konferenco »eDelo in ePoslovanje v gradbeništvu« leta 2002 v Portorožu [Turk, 2002a].

20. 11. 1993 so sodelavci IKPIR kot eden izmed prvih univerzitetnih gradbenih oddelkov (in kot druga ustanova v Sloveniji, za Inštitutom Jožef Stefan) vzpostavili spletno stran in začeli objavljati na internetu. To je bilo mogoče tudi po zaslugi delovne postaje HP 9000/710, ki jo je IKPIR kupil iz sredstev projekta TEMPUS. Poganjal jo je operacijski sistem vrste UNIX, ki je bil pripravljen za priklop na internet.

Na internetu so sodelavci IKPIR oblikovali nekaj dobro obiskanih in citiranih servisov, ki so bili namenjeni predvsem mednarodni skupnosti raziskovalcev in učiteljev. V letih 1994 in 1995 so v sodelovanju z ZRMK in Gradbenim centrom Slovenije pripravili jedro slovenskega tehničnega informacijskega sistema za gradbeništvo – TIGRA [Turk, 1995b].

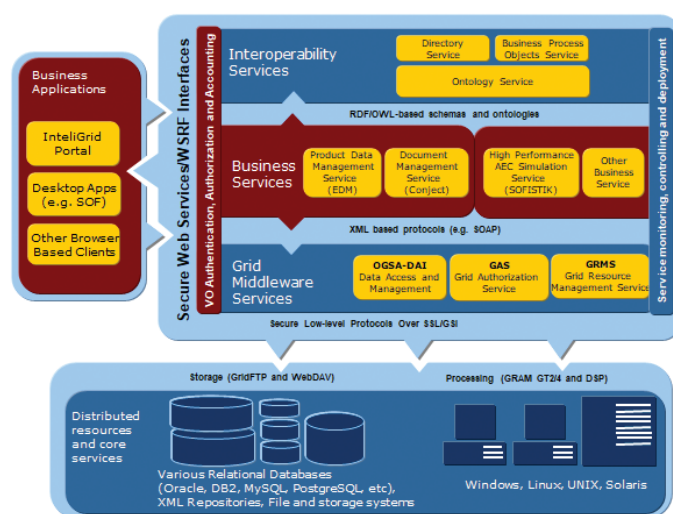
Leta 1996 so Charles Eastman, Bo-Christer Bjork, Dana Vanier in Žiga Turk ustanovili prvo znanstveno revijo s področja gradbene informatike v odprtem dostopu – Electronic Journal of Information Technology in Construction (www.itcon.org), ki na IKPIR izhaja še danes, v uredništvu pa sodelujeta Žiga Turk in Robert Klinc.

4 KATEDRA ZA GRADBENO INFORMATIKO IKPIR

V devetdesetih letih se je torej dotakratnim raziskovalnim in strokovnim izzivom, ki so bili povezani z računanjem konstrukcij in njihovim načrtovanjem, pridružila širša skrb za obvladovanje informacij v gradbeništvu ter za podporo sodelovanja med deležniki in izmenjavo informacij. 18. 4. 2001 sta se v okviru IKPIR oblikovali dve katedri, Katedra za konstrukcije in potresno inženirstvo (KKPI) ter Katedra za gradbeno informatiko (KGI). Katedri še naprej tesno sodelujeta na raziskovalnem in pedagoškem področju. Jedro katedre so v letih 2001–2021 predstavljali Iztok Kovačič, Vid Marolt, Matevž Dolenc, Žiga Turk, Tomo Cerovšek, Robert Klinc in Andreja Istenič Istarčič.

4.1 Evropski projekti

Ob razmeroma skromni zastopanosti informatike v pedagoškem procesu, ki je bila omejena na predmete v prvem letniku, so se sodelavci KGI-IKPIR usmerili v raziskovalno delo pri evropskih projektih. Že v devetdesetih so sodelovali v projektu iz 4. okvirnega programa ToCEE (Towards Concurrent Engineering Environment 1996–1999), ki je razvijal okolje za celovito inženirsko okolje za projektiranje. Sodelovali so v evropskih projektih CONNET (Construction Information Service Network), v katerih so razvijali omrežje gradbeniških storitev na internetu,



Slika 8. Arhitektura Inteligrid.

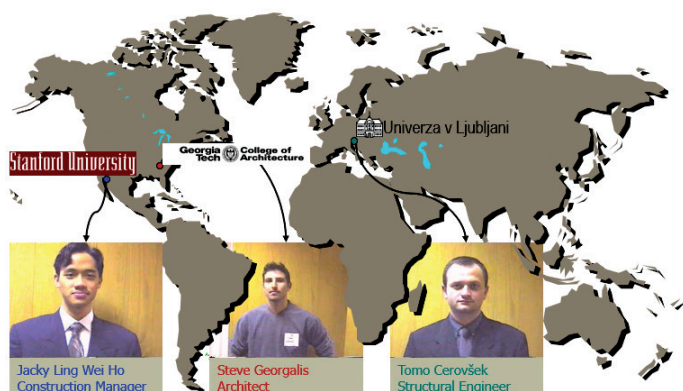
in v njegovem nadaljevanju I-SEEC, ki je postavil omrežje gradbenih servisov v evropskih državah. KGI-IKPIR je sodeloval tudi v EU-projektih CONDOR in SCENIC.

Še večjo vlogo je KGI imela v raziskovalnih projektih na temo informacijske družbe (IST) iz 5. okvirnega programa. Kot polnopravni partner je sodelovala v projektu ISTforCE – Intelligent Services and Tools for Concurrent Engineering 2000–2002, ICCI – Innovation co-ordination, transfer and deployment through networked Co-operation in the Construction Industry (2001–2003) in prodAEC – European Network for the Promotion of the Standards and eBusiness in the AEC sector (2001–2003) [Pazlar, 2003]. Pri obeh projektih sta delala tudi mlada raziskovalca Etel Petrinja in Tomaž Pazlar. Za pomoč pri administrativnem delu v zvezi s projekti in s strokovnimi prispevki je sodelovala Mateja Šmid.

S projektom SciX – Open Scientific Information Exchange so sodelavci IKPIR v okvirnih programih prvič nastopili kot koordinatorji. Projekt je bil vezan na znanstveno objavljane v odprtem dostopu. Inštitut je sodeloval tudi v številnih projektih, ki so namenjeni pospeševanju stikov med vzhodno in zahodno Evropo TEMPUS, npr. Open and Distance Learning in Technical Education.

IKPIR je koordiniral tudi velik projekt iz 6. okvirnega programa Inteligrid [Dolenc, 2007]. V njem smo razvili tehnologije grid, ki inženirjem omogočajo interoperabilno platformo za sodelovanje. Inoviral je na interdisciplinarnem področju med semantično interoperabilnostjo, virtualnimi organizacijami in tehnologijami grid. V niz projektov na tem področju sodijo še I3CON – Industrialised, Integrated, Intelligent Construction, ISES – Intelligent Services for Energy-Efficient Design and Life Cycle Simulation in Digiplace – Digital Platform for Construction in Europe. V slednjem sooblikujemo načrte za prihodnji tehnološki razvoj gradbene informatike, ki vidi priložnost za boljše povezovanje v konceptu digitalnih platform.

DataMiningGrid – Data Mining Tools and Services for Grid Computing Environments je bil prvi iz niza projektov, ki jih je na KGI IKPIR vodil Vlado Stankovski, ki so se ukvarjali z naprednimi IKT infrastrukturami za sodelovanje, zahtevno procesiranje in



Slika 9. Levo prva slovenska udeležba na študiju PBL leta 1999. Desno sodelovanje v večji ekipi leta 2006.

mreženje. V ta niz sodijo še projekti Mosaic, SWITCH, ENTICE, Decenter in Ontochain, ki so čedalje bolj segali na področje čiste informatike. Vlado Stankovski je leta 2020 uspešno nadaljeval kariero na Fakulteti za računalništvo in informatiko.

Interdisciplinarni značaj ima tudi delo na področju internetne znanosti, kjer smo študirali prepletanje med tehnologijo in njenim vplivom na družbo v projektu Paradiso. Sledila mu je mreža odličnosti iz 7. okvirnega programa EINS, katere glavni namen je krepitev znanstvenih in tehnoloških dosežkov s področja internetnih omrežij. Vlekli smo vzporednice med tehnološkimi (gradbeništvu) in družboslovnimi (prostorsko načrtovanje, logistika) elementi ter tako poskušali vplivati na kvaliteto življenja. V okviru EU-projekta RRI-ICT Forum smo razvili okvir za vzpostavitev principov odgovornega raziskovanja in ga dopolnili za potrebe gradbenega inženirstva in gradbene informatike [Turk, 2016a].

4.2 Pedagoško delo

Do bolonjske reforme so Iztok Kovačič, Vid Marolt, Žiga Turk, Matevž Dolenc in Tomo Cerovšek posredovali osnovna znanja računalništva in inženirske komunikacije pri predmetih, kot so Računalništvo, Programiranje, Avtomatska obdelava podatkov, Inženirska dokumentacija in komunikacija ter Opisna geometrija. Ti predmeti so bili pretežno v prvih letnikih študija gradbeništvu, geodezije in vodarstva. Študente so seznanjali z zadnjimi dosežki, od objektnega programiranja do spletnih jezikov, internetnih tehnologij, dela na daljavo, računalniškega risanja in modeliranja ipd.

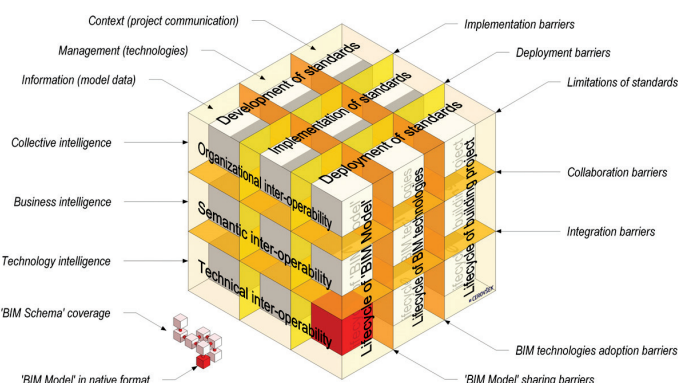
Bolonjska reforma je prinesla temeljito prenovljene predmetnike, v katerih stopajo v ospredje računalniško integrirana graditev, napredna inženirska komunikacija, informacijsko modeliranje produktov in procesov, programsko inženirstvo, zahtevno 3D in 4D-modeliranje, vizualizacija in podobno. Vse te vsebine so zastopane pri predmetih, ki jih sodelavci KGI-IPKIR predavajo na različnih študijskih programih na FGG: Digitalno načrtovanje, Inženirska komunikacija, Informacijska in komunikacijska tehnologija za projektno delo, Informacijsko modeliranje stavb, Digitalno načrtovanje in programiranje, In-



formacijsko modeliranje zgradb, Obdelava podatkov, Programiranje, Projektno in izkustveno učenje, Računalniško integrirana graditev, Računalništvo, Informacijske in komunikacijske tehnologije v grajenem okolju, Računalništvo in informatika. Kot asistenta sta se učiteljem pridružila Vlado Stankovski in Robert Klinc.

Do bolonjske prenovle je bila pedagoška zastopnost informatike v študijskem procesu razmeroma skromna, so pa sodelavci katedre pedagoško mednarodno sodelovali. Prof. Turk je predaval predmete ali njihove dele na KTH v Stockholmu, na ITU v Istanbulu in na Sveučilištu v Zagrebu. Sodelavci IKPIR Cerovšek, Dolenc in Turk so od leta 2004/05 sodelovali pri mednarodnem študiju Socrates/Erasmus »European Master course in Construction IT«, ki so ga skupaj izvajale Univerza v Ljubljani, Univerza v Mariboru, University College Cork, Univerza v Dresdnu ter Univerza v Portu. Dr. Dolenc in dr. Cerovšek sta v okviru omenjenega študija predavala na Dublin Institute of Technology. Dr. Dolenc je v obdobju od 2006–2011 v okviru High Performance Computations for Engineering predaval na Univerzi v Pecs, Madžarska.

Od študijskega leta 1998/99 IKPIR-KGI sodeluje z Univerzo Stanford pri svetovno vodilnem programu projektno zasno-



Slika 10. BIM Cube [Cerovšek, 2011].

vanega učenja Project Based Learning (PBL). Leta 1999 se je programa kot prvi študent iz FGG udeležil Tomo Cerovšek, ki je kasneje prevzel mentorsko vlogo v tem programu. Vsako leto se ga udeleži vsaj en študent iz Slovenije, tudi vsi mladi raziskovalci, ki so delovali na KGI-IPKIR. Idejo takega študija sta katedri IKPIR vpeljali v pedagoški proces na FGG v povezana predmeta Informacijske in komunikacijske tehnologije za projektno delo ter Interdisciplinarni seminar računalniško podprtega projektiranja konstrukcij.

Od študijskega leta 2019/2020 IKPIR-KGI sodeluje pri Erasmus študiju BIM A+ European Master in Building Information Modelling. Študij je sooblikoval dr. Cerovšek v sodelovanju z Univerzo v Minhu, Portugalska, in Politehniko iz Milana. Program obsega dva semestra študija, povezanega z BIM-vsebinami, in ga izvajajo tri univerze skupaj. Program BIM+ presega pričakovanja, saj se za okrog 40 mest na leto prijavi več kot 900 študentov s celega sveta.

4.3 Prenos znanja

Na internetu je Inštitut oblikoval precej servisov, ki so bili mednarodno pomembni in odmevni. Tako je sodeloval pri izdajanju mednarodne znanstvene revije ITcon (www.itcon.org), katalog inženirske programske opreme (software.forAEC.com), zbirka člankov CUMINCAD. Na Inštitutu je bilo izdelanih tudi več spletnih strani in spletnih storitev za različne naročnike (Inženirska zbornica Slovenije, Varuh človekovih pravic, Fakulteta za arhitekturo, Fakulteta za farmacijo, ZAG idr.)

Druge oblike pedagoškega dela članov KGI vključujejo prenos znanja v prakso prek delavnic, seminarjev in kongresov v Sloveniji, v devetdesetih prek tradicionalnih posvetovanj Gradbene

informatike in serije seminarjev Računalnik v gradbenem inženirstvu. V zadnjih letih KGI-IPKIR sodeluje v združenju siBIM.

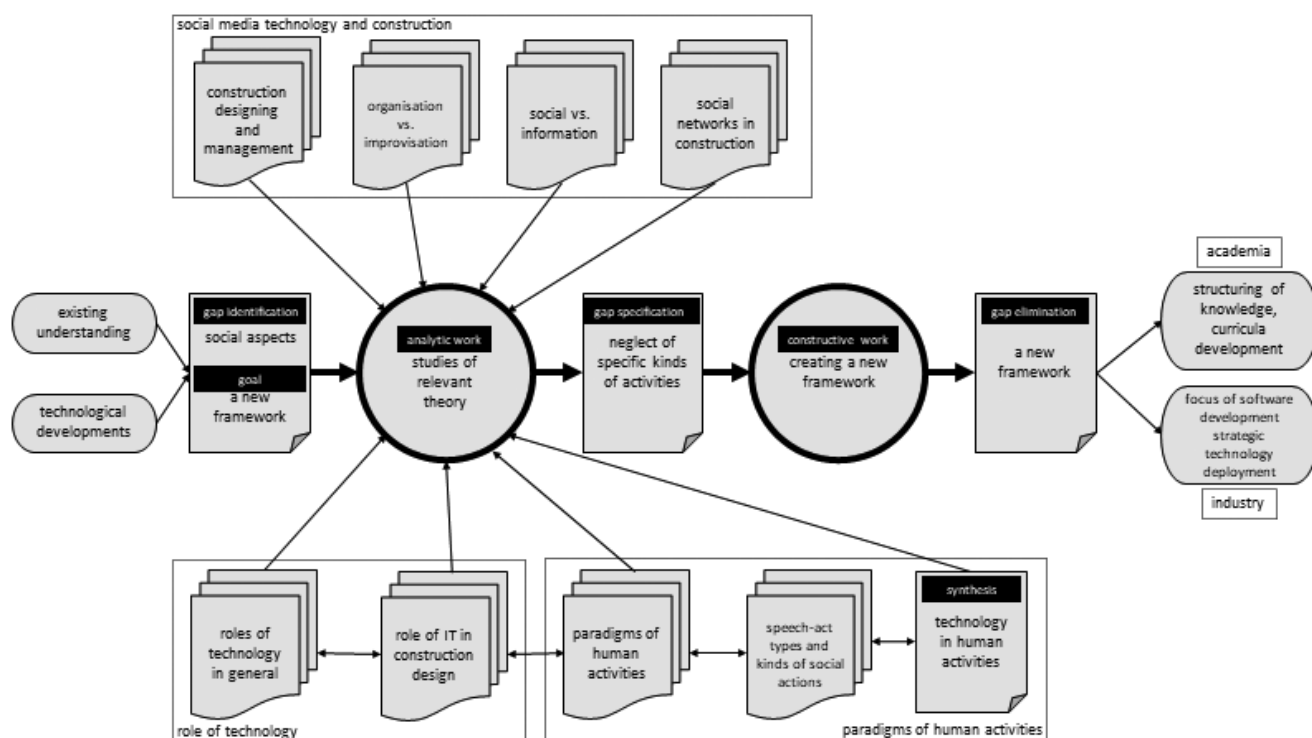
Sodelavci KGI projektno sodelujejo z vodilnimi podjetji doma in v Evropi. Inženirski zbornici Slovenije so pomagali vzpostaviti spletni informacijski sistem za člane in uporabnike. S slovensko in evropsko tehnološko platformo za gradbeništvo so pristopili k razvoju gradbenih klasifikacijskih sistemov. Na Evropski federaciji gradbene industrije FIEC dr. Turk od leta 2018 vodi skupino za gradbeništvo 4.0.

Nekatere oblike prenosa znanja so posebej inovativne. BIMpogovori je podkast, v katerem dr. Dolenc in dr. Klinc s pogovori z različnimi gosti iz znanstvenoraziskovalnih organizacij in gradbene prakse predstavlja izkušnje, osvetljujejo ozadja in odkrivata novosti s področja informacijskega modeliranja zgradb in informacijsko-komunikacijskih tehnologij v gradbeništvu. V petih letih delovanja podkasta je bilo objavljenih že več kot 130 oddaj.

5 E-GRADBENIŠTVO

V slovenskem raziskovalnem prostoru KGI-IPKIR predstavlja jedro programske skupine eGradbeništvo, ki od leta 2004 dalje raziskuje na širšem področju gradbene informatike. Razvila se je iz skupine Konstrukcije in gradbena informatika, ki je na istem področju delovala pred tem.

Glavni cilj gradbene informatike je informacijska podpora pri zagotavljanju informacij skozi celotno življenjsko dobo gradbenega objekta, izraba komunikacijskih tehnologij za boljše povezovanje in doseganje celovitosti gradnje ter izkoriščanje procesnih zmogljivosti računalnikov pri analizi in sintezi infor-



Slika 11. Potek raziskav na področju socialnih omrežij (iz [Turk, 2020]).

macij. Gradbena informatika se je tudi v svetu uveljavila kot samostojno področje izobraževanja, raziskovanja in razvoja znotraj gradbeništva. K definiciji področja je dala prispevek tudi skupina [Turk, 2006].

KGI-IKPIR je mednarodno uveljavljena. Redno sodeluje v mednarodnih projektih, sodelavci objavljajo v prestižnih mednarodnih revijah in o rezultatih sproti poročajo na mednarodnih konferencah. Sodelavci KGI-IKPIR sodelujejo kot uredniki revij (dr. Turk Automation in Construction in druge) in z vabljenimi predavanji. Vzdržujejo in sourejšajo eno najpomembnejših prostodopnih znanstvenih revij s področja gradbene informatike – Journal of Information Technology in Construction. Vodi jo nekaj spletnih storitev za znanstveno skupnost.

Delo v zadnjih letih teče na področjih (1) informacijskega modeliranja, (2) numeričnega modeliranja, (3) procesnih infrastrukture, (4) komunikacij ter (5) problemov, vezanih na prenos znanja; vse s ciljem znanstvenega, izobraževalnega in industrijsko-praktičnega prispevka k digitalizaciji gradbeništva. Vse to skupaj vodi k prehodu gradbeništva v smer gradbeništva 4.0, o katerem smo prispevali nekaj uvodnih premislekov [Klinc, 2019a].

Kadrovsko, finančno in vsebinsko je program izkoriščal sinergije, ki jih omogoča širša raziskovalna aktivnost članov skupine tudi v raziskovalnih projektih EU, projektih ARRS ter sodelovanju v mednarodnih organizacijah in strokovnih omrežjih.

5.1 Informacijsko modeliranje

Informacijsko modeliranje gradenj ustvarja digitalni model (Building Information Model – BIM) prihodnjih grajenih ali obstoječih objektov, ki zadovoljuje vse informacijske potrebe udeležencev skozi njegovo celotno življenjsko dobo. Informacijsko modeliranje ima v skupini dolgo tradicijo [Turk, 1989] in predstavlja rdečo nit zadnjih treh desetletij. Ukvarjali smo se z različnimi vidiki interoperabilnosti in analizirali razkorak med pričakovanji in prakso [Pazlar, 2008].

Dr. Cerovšek je razvil odmevno ogrodje BIM Cube, ki se osredotoča na celoten življenjski cikel projekta, interoperabilnost in standardizacijo, ki vodi do bolj kakovostnih, celovitih gradbenih projektov ob manj tveganjih. To delo vključuje integrirane delotoke za parametrično predstavitev celotnih stavb, in ne samo posameznih elementov za dinamično generiranje [Cerovšek, 2011]. Pri tem so poleg arhitekturnih, konstrukcijskih in drugih sistemov stavb pomembne tudi interakcije v povezavi z iterativnimi izdelavami matematičnih modelov za parametrične statične, dinamične, trajnostne [Todorović, 2011] in poglobljene napredne energetske analize [Stegnar, 2019].

Pri raziskavah s področja BIM smo posvetili posebno pozornost integraciji procesov z odprtim pristopom k izmenjavi in upravljanju modelnih informacij ter informacijskim tokovom v sočasnih sodelovalnih okoljih BIM ([Katranuschkov, 2001], [Cerovšek, 2006]). Študirali smo integracije digitalnih predstavitev v povezavi s procesi in podatki iz fizičnih okolij, kar je osnova za razvoj rešitev, ki temeljijo na tehnologijah interneta stvari (angl. Internet of Things – IoT) in velike količine podatkov (angl. Big Data). Razvili in objavili smo integracijo tehnologije razširjene resničnosti (angl. Augmented Reality – AR) in BIM [Meža, 2014].

Eden od problemov, ki so ga raziskovalci zaznali v BIM-okoljih, je tudi vprašanje zaupanja v informacije. Skupina podjetij ali posameznikov, ki sodeluje pri graditvi digitalnega modela, v primeru sporov in nesoglasij ter v kontekstu upravljanja avtorskih pravic potrebuje zanesljivo informacijo o tem, kaj, kdaj, kdo in v kakšnem kontekstu je nastala informacija [Petrinja, 2007]. Naša zrejša rešitev je bila, da bi tehnologija veriženja blokov lahko bila rešitev za ta problem. Rezultat raziskave je bil več scenarijev za uporabo te tehnologije v BIM-okolju, objave pa med prvimi, če ne celo prve na tem področju [Turk, 2017].

Od začetka so nas zanimale teoretične osnove informacijskega modeliranja [Turk, 2001]. Ker BIM postaja vse bolj prevladujoče področje raziskav v gradbeništvu, smo definirali deset ključnih vprašanj v zvezi z razvojem BIM in nanje odgovorili. Zaključujemo z ugotovitvijo, da BIM ni več samo tehnologija za modeliranje, ampak vse bolj tehnologija za celovito upravljanje gradbenih informacij, in da je torej M iz BIM treba razumeti tudi in predvsem kot management [Turk, 2016b]. BIM vidijo kot rešitev za problem računalniško integrirane graditve. Ugotavljamo pa, da ne BIM ne računalniško integrirana graditev nista cilj, ampak sredstvo za boljšo delitev dela in več specializacije, kar pomeni, da se proces drobljenja na eni in integracije na drugi strani ne bo nikoli ustavil [Turk, 2020a].

5.2 Numerično modeliranje

Numerično modeliranje v gradbeništvu in tehniki omogoča virtualne simulacije obnašanja materialov, konstrukcijskih elementov in konstrukcij različnih velikosti – vse od nano- pa do megamerila. Nosilec tega dela v skupini je prof. Brank, ki je sicer član druge od dveh kateder IKPIR. Numerične analize zahtevajo močno računsko okolje, osnovane morajo biti na strukturiranih informacijah, in v tem je bistvo povezave z IKPIR-KGI.

5.3 Procesne infrastrukture

Vzpostavili, razvili in nadgradili smo lastno računsko infrastrukturo, ki smo jo izrabljali za reševanje inženirskih računskih problemov. Lastna računska infrastruktura nam omogoča izvajanje zahtevnih študij, ki zahtevajo visokozmogljivo (angl. High-performance computing – HPC) in/ali visokopropustno (angl. High-throughput computing – HTC) računsko okolje, kar smo s pridom izkoristili pri metodi končnih elementov [Dolenc, 2004], z njegovo uporabo v izobraževalne namene, za raziskovalno delo ter tudi za vključenost v strokovne in raziskovalne projekte [Dolenc, 2007]. To nam je uspelo z integracijo programske opreme s področja potresnega inženirstva, energetske učinkovitosti stavb ter tudi dinamične analize tekočnin. Pri tem smo najbolj intenzivno sodelovali s programsko skupino Potresno inženirstvo (P2-0185), za katero smo razvili tudi več spletnih servisov, ki uporabljajo našo računsko infrastrukturo [Klinc, 2019b].

Nadaljevali smo tudi z raziskavami možnosti uporabe porazdeljene ter tudi oblačne računske infrastrukture za inženirske računske storitve s ciljem trajnostne izrabe implicitnega znanja. Ugotovili smo, da lahko sodobni pristopi, kot so računalništvo v oblaku, porazdeljena računska okolja ter programska oprema kot storitev, omogočijo ponovno uporabo preverjenih in zanesljivih programskih rešitev, ki so bila v določenem ob-

dobju opuščena predvsem iz tehničnih, nikakor pa ne strokovnih razlogov. Tako smo npr. pripravili spletno različico programa EAVEK [Klinc, 2016].

Na tem področju so bile velike sinergije z EU-projekti, ki jih je na IKPIR KGI vodil dr. Stankovski.

5.4 Komunikacije in sodelovanje

Gradbena informatika se je po odkritju koncepta BIM skoraj izključno ukvarjala z obliko in vsebino informacij ter z izmenjavo teh informacij med programi, veliko manj pa z izmenjavo informacij med ljudmi oz. širše s sodelovanjem. IKPIR-KGI je delal tudi na tem področju. Usmerili smo se na področje inženirskih komunikacij ter s proučevanjem in razvojem tehnologij družabnih omrežij in tehnološkega populizma na področju gradbeništva in urbanizma odpirali nova vprašanja, obenem pa postavili konceptualni okvir za odprta sodelovalna inženirska okolja prihodnosti [Klinc, 2009].

Pristop smo verificirali na področju gradbeništva in urbanizma. Preučevali smo uporabnost orodij spleta 2.0 na tem področju in razvili konceptualni okvir tehnologij za odprta, družabno ustvarjalna okolja [Bizjak, 2017].

Raziskovali smo tudi alternative konceptualnemu modeliranju graditve, ki jo v osnovi razumemo kot proces socialne interakcije. Taka rešitev predstavlja originalno alternativo prevladujočemu informacijskoprocenemu pogledu na graditev. Postavili smo alternativni koncept modeliranja graditve, ki za razliko od prevladujočega informacijskoprocenega pogleda v središče procesa gradnje postavlja socialno interakcijo. Ugotovili smo, da integracija zgolj na nivoju izdelkov in procesov omogoča le majhen del vseh aktivnosti, potrebnih za učinkovito delo inženirjev in arhitektov, saj inženirji in arhitekti poleg ustvarjanja informacijskega modela gradnje največ časa posvetijo komunikaciji. Pri tem igrajo pomembno vlogo tehnologije spleta 2.0, ki smo jih raziskovali od samega začetka [Dolenc, 2009].

Postavili smo povsem nov teoretični okvir za razumevanje vloge informacijske in komunikacijske tehnologije v gradbeništvu, ki identificira tretji povezovalni element sicer vse bolj razdrobljenih procesov – socialno omrežje. Druga dva elementa sta fizični izdelek in njegov digitalni dvojček [Turk, 2020b].

5.5 Soustvarjanje in prenos znanja

Raziskovalci na področju gradbene informatike opažamo velik razkorak med tehničnimi možnostmi in dejanskim tehnološkim stanjem in znanjem v industriji, kar smo merili in pojasnjevali v slovenskem ([Pazlar, 2004], [Klinc, 2010]) in evropskem okviru [Turk, 2021]. Zato posebno pozornost namenjamo raziskavam o ovirah pri prenosu znanja.

Posvečamo se (a) vprašanju prenove učnih in študijskih programov, ki jih zahtevajo nove tehnologije [Turk, 2019], (b) študiju znanstvenega komuniciranja, (c) proučevanju in implementaciji metode prenosa in kokreacije znanja v/z industrijo [Istenič, 2012] ter (d) principom odgovornega raziskovanja in inoviranja [Turk, 2016]. Na tem področju interdisciplinarno sodelujemo z dr. Andrejo Istenič Starčič, ki se ukvarja s pedagoško, in vodjo knjižnice FGG dr. Tejo Koler Povh.

Na področju znanstvenega komuniciranja se naslanjamo na dolgo tradicijo skupine na tem področju, saj smo prvo znanstveno revijo v odprtem dostopu postavili v devetdesetih letih [Bjork, 2008], kasneje pa na tem področju koordinirali EU-projekt SciX [Martens, 2003a]. Postavili smo več spletnih bibliografskih servisov za mednarodne znanstvene skupine ([Martens, 2003b], [Cerovšek, 2020]).

Raziskovali smo vpliv odprtega dostopa na citiranost del raziskovalcev [Koler-Povh, 2014], povezavo med objavami in citiranostjo [Cerovšek, 2014] ter vpliv organiziranega pouka o uporabi virov, o odprtem dostopu, o iskanju virov in citiranju na vzorce citiranja doktorskih študentov. Ugotovili in kvantificirali smo pozitiven vpliv informacijske pismenosti [Koler-Povh, 2018].

Na področju metod prenosa znanja smo proučevali metode tehnološko podprtega učenja. Opravili smo raziskavo na celotni populaciji študentov univerze v Ljubljani o uporabi IKT pri učenju. Ugotovitve kažejo na zaostajanje pedagoških pristopov pri uporabi tehnoloških rešitev, ki so se uveljavile uspešno na drugih področjih. Proučevanje je bilo usmerjeno v vključevanje tehnologij, ki omogočajo uspešen razvoj kompetenc v sodelovanju univerze z industrijo [Istenič-Starčič, 2017]. Raziskovali smo na področju informatizacije delovnih procesov in omrežij, vključevali študente med praktičnim usposabljanjem ter jih spremljali pri njihovih karierah po diplomah. S City University New York smo opravili raziskavo na področju spletnih omrežij pri razvoju kariernih kompetenc študentov UL FGG ([Istenič, 2017], [Istenič-Starčič, 2017]).

6 SKLEP

Uporaba digitalne tehnologije v gradbeništvu je ves čas pod vplivom eksponentnega napredka digitalnih tehnologij in razvoja, ki se dogaja na področju računalniške znanosti. Za razliko od drugih področij gradbeništva, kjer je mogoče identificirati dolge nize raziskovalnega dela in kjer se iz leta v leto, iz generacije v generacijo najdejo boljši približki opisovanja ali napovedovanja naravnega pojava, so te raziskovalne niti na področju gradbene informatike precej krajše. Vsakih nekaj let se namreč pojavi novost, zaradi katere v veliki meri vsi začenejo skoraj od začetka.

To je v vseh letih omogočalo, da so bile znotraj IKPIR razvite povsem praktične rešitve, npr. računalniški programi, ki so bili tržno zanimivi in so jih uporabljali v industriji. Če pa je bilo akademsko okolje sposobno, da se najprej pojavi npr. s trženjem programov za račun po metodi končnih elementov, infrastrukturo grid ali različnimi spletnimi storitvami, se je skozi petdesetletno obdobje tudi izkazalo, da akademsko okolje dolgo ne more tekmovati s podjetniškimi pristopom. Ko postane nova tehnologija bolj dostopna, zahteva resnejšo komercializacijo in večje podjetniško organizirane skupine, ki jim raziskovalna skupina v akademskem okolju ne more in ne sme konkurirati. Mehanizem prenosa znanja tako postanejo predvsem ljudje. Skozi IKPIR so šle tako generacije študentov, diplomantov, magistrantov, mladih raziskovalcev in podiplomskih študentov, ki so danes karierno in poslovno uspešni, slovensko gradbeništvo pa po informacijski razvitosti nič ne zaostaja za razvitejšimi državami. Mnogi pa so uspeli tudi v tujini.

Tudi za gradbeno informatiko velja, da naslednje generacije sedijo na ramenih prejšnjih, na temeljih – navdušenje nad tehnologijo, usmerjenost v reševanje problemov, znanstvena

odličnost, odprtost v svet – ki so jih postavili Janez Reflak, Peter Fajfar, Janez Duhovnik, Iztok Kovačič, Vid Marolt, Andrej Vitek in drugi, zdaj delajo nove generacije.

7 ZAHVALA

Za pomoč pri pripravi prispevka se zahvaljujema nekdanjim in sedanjim sodelavcem, še zlasti pa Janezu Duhovniku, Andreju Vitku in Robertu Klincu.

8 LITERATURA

Bizjak, I., Klinc, R., Turk, Ž., A framework for open and participatory designing of built environments, *Computers, Environment and Urban Systems*, 66, 65-82, 2017.

Bjork, B-C., Turk, Ž., Effective Web Dissemination of Construction IT Research Publications, *Journal of professional issues in engineering education and practice*, 134(2), 165-172, 2008.

Bjork, B-C., Turk, Ž., The Electronic journal of information technology in construction (ITcon): an open access journal using an unpaid, volunteer-based organization, *Information research*, 11(3), 2006.

Cerovšek, T., Katranuschkov, P., Active process reuse model for collaboration, *Electronic journal of information technology in construction: ITcon*, 11, 467-488, 2006.

Cerovšek, T., A review and outlook for a 'Building Information Model' (BIM) : a multi-standpoint framework for technological development, *Advanced engineering informatics: the science of supporting knowledge-intensive activities*, 25, 224-244, 2011.

Cerovšek, T., Mikoš, M., A comparative study of cross-domain research output and citations: research impact cubes and binary citation frequencies, *Journal of informetrics: an international journal*, 8(1), 147-161, 2014.

Cerovšek, T., Martens, B., The evolution of CAADRIA conferences - a bibliometric approach. V: RE: Anthropocene design in the age of humans - virtual conference, Bangkok: Association for computer-aided architectural design research in Asia, 325-334, 2020.

Dolenc, M., Developing extendible component-oriented finite element software, *Advances in engineering software*, 35, 703-714, 2004.

Dolenc, M., Katranuschkov, P., Gehre, A., Kurowski, K., Turk, Ž., The IntelGrid platform for virtual organisations interoperability, *Journal of information technology in construction: ITcon*, 12, 459-477, 2007.

Dolenc, M., A Vision of a Computing Environment for the Web 2.0 Era. V: TOPPING, Barry H. V. (ur.). *Parallel, Distributed and Grid Computing for Engineering: this volume includes the invited lectures presented at The First International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing for Engineering held at the Pollack Mihaly Faculty of Engineering, University of Pecs, Hungary, 6-8 April 2009, (Computational Science, Engineering and Technology Series - CSETS, 21). Stirlingshire: Saxe-Corburg Publications*, 103-116, 2009.

Dolinšek, B., Duhovnik, J., Robotizirano sestavljanje armature linijskih armiranobetonskih elementov, *Gradbeni vestnik*, 46(1/2/3), 14-25, 1997.

Dolinšek, B., Duhovnik, J., Robotic assembly of rebar cages for beams and columns, *Automation in construction*, 8(2), 195-207, 1998.

Duhovnik, J., Fajfar, P., Račun konstrukcij z elektronskimi računalniki, *Gradbeni vestnik*, 18(10/11), 233-236, 1969.

Duhovnik, J., Jelinčič B., Kajfež, B., Marolt, V., Reflak, J., Rogač R., Saje F., Program za izdelavo statičnega računa montažne dvoranske konstrukcije, *Gradbeni vestnik* 26(7-8), 172-179, 1977.

Duhovnik, J., Stanje in razvojne težnje pri uporabi računalnika v konstrukcijskem gradbenem inženirstvu, *Gradbeni vestnik*, 38(7/8), 196-200, 1989a.

Duhovnik, J., Ekspertni sistemi v gradbeništvu, *Gradbeni vestnik*, 38(9/10), 256-261, 1989b.

Duhovnik, J., Ljubič, V., Knific, T., Žlajpah, D., AR-CAD programski sistem za projektiranje armature, *Gradbeni vestnik*, 39(12), 303-309, 1990.

Duhovnik, J., Icaders: integrated CAD of earthquake resistant buildings and civil engineering structures : lecture notes of the 1st short course and specialist seminar Tempus JEP 3008, Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, IKPIR, University of Ljubljana, Slovenia, 23rd-26th February 1993, 258 str., 1993.

Fajfar, P., Fischinger, M., Reflak, J., Uporaba računalnika pri analizi konstrukcij v visokogradnji, *Gradbeni vestnik* 26(7-8), 146-158, 1977.

Fenves, S., Logcher, R.D., Mauch, S.P. (1965) *STRESS: A Reference Manual*. MIT Press, 1965.

Istenič, A., Competence management system design in international multicultural environment: registration, transfer, recognition and transparency, *British journal of educational technology*, 43(4), 108-112, 2012.

Istenič, A., Vloga spletnih družbenih omrežij pri razvoju kariernih kompetenc študentov gradbeništvu in geodezije, *Gradbeni vestnik*, 66(6), 149-155, 2017.

Istenič-Starčič, A., Barrow, M., Zajc, M., Lebeničnik, M., Students' attitudes on social network sites and their actual use for career management competences and professional identity development, *International journal: emerging technologies in learning*, 12(5), 65-81, 2017.

Katranuschkov, P., Scherer, R.J., Turk, Ž., Intelligent services and tools for concurrent engineering? : an approach towards the next generation of collaboration platforms, *Electronic journal of information technology in construction : ITcon*, 6, 111-128, 2001.

Klinc, R., Turk, Ž., Dolenc, M., Engineering collaboration 2.0: requirements and expectations, *Journal of information technology in construction : ITcon*, 14, 473-488, 2009.

Klinc, R., Turk, Ž., Dolenc, M., Raziskava o rabi informacijsko - komunikacijskih tehnologij v slovenski gradbeni industriji, *Gradbeni vestnik*, 59(11), 269-276, 2010.

Klinc, R., Peruš, I., Dolenc, M., Fajfar, P., Spletna verzija programa EAVEK, Gradbeni vestnik, 65(1), 10-17, 2016.

Klinc, R., Turk, Ž., Construction 4.0 - digital transformation of one of the oldest industries, Economic and business review, 21(3), 393-410, 2019a.

Klinc, R., Šebenik, Ž., Dolšek, M., Brozovoč, M., Dolenc, M., A web-based system for the selection of characteristic ground motions, Advances in engineering software, 135, 1-16, 2019b.

Koler-Povh, T., Južnič, P., Turk, G., Impact of open access on citation of scholarly publications in the field of civil engineering, Scientometrics, 98(2), 1033-1045, 2014.

Koler-Povh, T., Turk, Ž., Vloga visokošolskega knjižničarja pri informacijski pismenosti doktorandov tehnike - primer gradbeništva, Knjižnica: revija za področje bibliotekarstva in informacijske znanosti, 62(1/2), 135-150, 2018.

Kovačič, I., Primer računalniške grafike pri računanju konstrukcij, Gradbeni vestnik, 26(7/8), 180-182, 1977.

Kovačič, I., Vitek, A., Stanje in razvoj računalniške grafike v Inštitutu za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo FAGG, Zbornik radova prikazanih na svetovanju o hardveru i softveru u strukturalnoj analizi i računarskom projektovanju održanom 10. i 11. decembra 1980. godine u Beogradu, Beograd, 142-149, 1980.

Kovačič, I., Softversko inženirstvo, Računalnik v gradbenem inženirstvu: zbornik 4. seminarja, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, VTOZD GC, IKPIR, Ljubljana, april 1988, 12-21, 1988.

Kovačič, I., Objektni pristop pri reševanju nalog po metodi končnih elementov, Računalnik v gradbenem inženirstvu: zbornik 6. seminarja, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo, IKPIR, Ljubljana, april 1992, 39-45, 1992.

Kovačič, I., Geometrijsko modeliranje konstrukcije v programu MONCAD-WIN, Uporaba računalnika v gradbeništvu: zbornik posvetovanja na 8. gradbenem sejmu v Gornji Radgoni, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, IKPIR, Ljubljana, april 1995, 76-86, 1995.

Ljubič, V., Risanje armaturnih načrtov z računalniki, diplomska naloga, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Ljubljana, 1980.

Martens, B., Turk, Ž., Digital CAADRIA-proceedings: retrospective analysis of content, Automation in construction, 12(5), 515-519, 2003a.

Martens, B., Turk, Ž., Bjork, B-C., Cooper, G., Re-engineering the scientific knowledge management process: the SciX project, Automation in construction, 12(6), 677-687, 2003b.

Meža, S., Turk, Ž., Dolenc, M., Component based engineering of a mobile BIM-based augmented reality system, Automation in construction, 42(X), 1-12, 2014.

Pangeršič, M., Računalniško risanje armaturnega prostoležečega nosilca, diplomska naloga, Fakulteta za arhitekturo, grad-

beništvo in geodezijo, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Ljubljana, 1979.

Pazlar, T., Dolenc, M., Duhovnik, J., prodAEC - evropski projekt izmenjave podatkov o proizvodih in projektih za e-delo ter e-poslovanje v arhitekturi, inženirstvu ter gradbeništvu, Gradbeni vestnik, 52(8), 193-202, 2003.

Pazlar, T., Dolenc, M., Duhovnik, J., Rezultati raziskave prodAEC o rabi informacijskih in komunikacijskih tehnologij v arhitekturi, inženirstvu in gradbeništvu v Sloveniji, Gradbeni vestnik, 53(9), 223-229, 2004.

Pazlar, T., Turk, Ž., Interoperability in practice: geometric data exchange using the IFC standard, Journal of information technology in construction : ITcon, 13, 362-380, 2008.

Petrinja, Etel, Stankovski, V., Turk, Ž., A provenance data management system for improving the product modelling process, Automation in construction, 16(4), 485-497, 2007.

Reflak, J., Problemsko orientiran računalniški jezik za račun konstrukcij: 1. in 2. del, Ljubljana: RSS, 1975.

Reflak, J., Duhovnik, J., Fajfar, P., Kovačič, I., MAROLT, Vid, et al., Program za avtomatični račun montažnih armiranobetonskih konstrukcij, Zbornik radova prikazanih na svetovanju o hardveru i softveru u strukturalnoj analizi i računarskom projektovanju održanom 10. i 11. decembra 1980. godine u Beogradu, Beograd, 228-236, 1980.

Stegnar, G., Cerovšek, T., Information needs for progressive BIM methodology supporting the holistic energy renovation of office buildings, Energy, 173, 317-331, 2019.

Todorović, M., Turk, Ž., Upoštevanje trajnostnih kriterijev pri projektiranju z orodjem BIM, Gradbeni vestnik, 60(10), 279-284, 2011.

Turk, Ž., Programski jezik C, Zveza organizacij za tehnično kulturo, Ljubljana, 1987.

Turk, Ž., Razredi za modeliranje objektov v gradbeništvu: magistrska naloga, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1989.

Turk, Ž., Uvod v objektno orientirano programiranje in jezik C++, Državna založba Slovenije, Ljubljana, 1991.

Turk, Ž., Okolje za računalniško integrirano projektiranje gradbenih konstrukcij: doktorska disertacija, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani, 1992.

Turk, Ž., Duhovnik, J., Slovenia and computer representation of design standards and building codes, International journal of construction information technology, 3(1), 55-71, 1995a.

Turk, Ž., Garzarolli, H., Rajter, M., TIGRA - tehnični informacijski sistem za gradbeništvo, Uporaba računalnika v gradbeništvu: zbornik posvetovanja na 8. gradbenem sejmu v Gornji Radgoni, april 1995, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, IKPIR, Ljubljana, 1-8, 1995b.

Turk, Ž., Construction on the information highway: proceedings of CIB workshop - W78 »Working Commission on Information Technology in Construction« and TG10 »Task Group on Com-

puter Representation of Design Standards and Building Codes», Bled, Slovenija, 10.-12. junij 1996, Faculty of Civil Engineering and Geodesy, Ljubljana, 562 str., 1996.

Turk, Ž., Phenomenological foundations of conceptual product modelling in architecture, engineering and construction, *Artificial intelligence in engineering: the journal of advanced engineering in informatics*, 15, 83-92, 2001.

Turk, Ž., Scherer, R.J., Fourth European Conference on Product and Process Modelling in the Building and Related Industries, eWork and eBusiness in architecture, engineering and construction: proceedings of the fourth European conference on product and process modelling in the building and related industries, Portorož, Slovenija, 9.-11. september 2002, 716 str., 2002.

Turk, Ž., Construction informatics: definition and ontology, *Advanced engineering informatics: the science of supporting knowledge-intensive activities*, 20(2), 187-199, 2006.

Turk, Ž., Responsible research and innovation in construction, *Procedia engineering*, 164, 461-466, 2016a.

Turk, Ž., Ten questions concerning building information modelling, *Building and environment*, 107, 274-284, 2016b.

Turk, Ž., Klinc, R., Potentials of blockchain technology for construction management, *Procedia engineering*, 196, 638-645, 2017.

Turk, Ž., Istenič, A., Toward deep impacts of BIM on education, *Frontiers of Engineering Management*, X(X), 1-11, 2019.

Turk, Ž., Interoperability in construction - mission impossible?, *Developments in the built environment*, 4/100018, 1-9, 2020a.

Turk, Ž., Klinc, R., A social-product-process framework for construction, *Building research and information*, 48(7), 747-762, 2020b.

Turk, Ž., Structured analysis of ICT adoption in the European construction industry, *The International journal of construction management*, 5, 1-8, 2021.

Vitek, A., Kovačič, I., Grafični paket P: uporabniški priročnik: Verzija 3.2, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezija, VTozd GG, Publikacija IKPIR 29, Ljubljana, 190 str., 1987.

ZUSE, H., Z23, URL http://www.horst-zuse.homepage.t-online.de/Konrad_Zuse_index_english_html/rechner_z23.html (accessed 4.18.21), n.d.

FOTOREPORTAŽA HOTEL B&B, MARIBOR



Slika 1. Obstoječa garaža in nadgradnja, avgust 2021.

Lokacija: Maribor, center

Investitor: Nereus d.o.o.

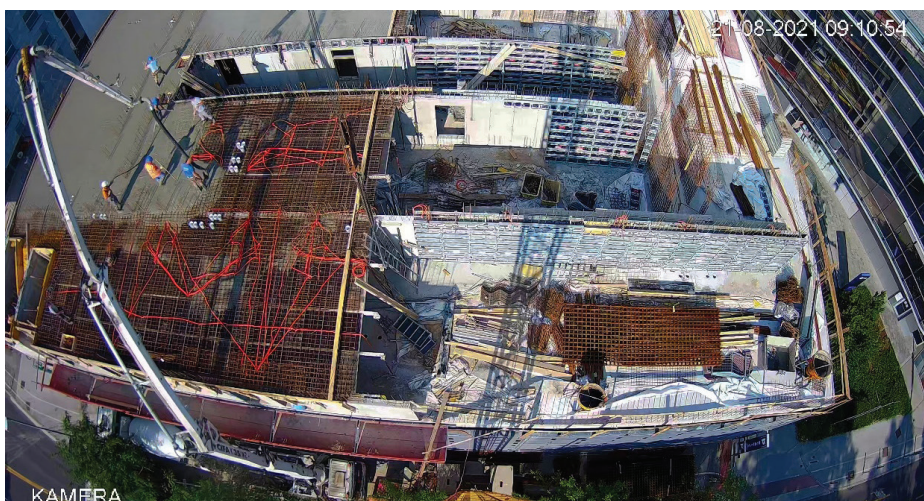
Projektant arhitekture: Doming d.o.o.

Projektant gradbenih konstrukcij: Tectum, projektiranje gradbenih konstrukcij d.o.o.

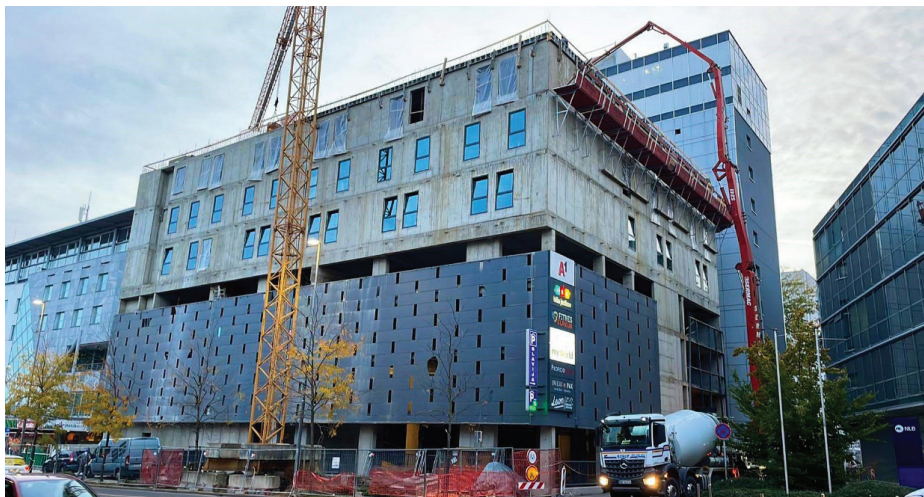
Izvajalec: SCS, gradbena skupina d.o.o.



Slika 2. Plošča druge etaže nadgradnje, september 2021.



Slika 3. Posnetek gradbiščne kamere, atrij v zgornjem delu fotografije, avgust 2021.



Slika 4. Obstoječa garaža in hotelska nadgradnja, oktober 2021.

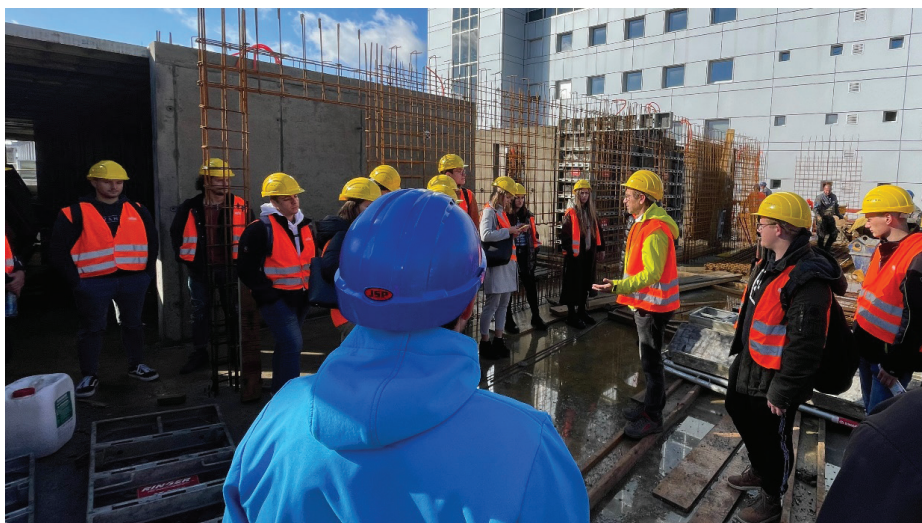
V Mariboru, natančneje v centru mesta se je marca 2021 pričela gradnja hotela B&B kot nadgradnja obstoječe garažne hiše Slavija. Nadgradnja bo v treh nadstropjih, v katerih bo skupno 102 hotelskih sob. V obstoječi garaži bo v pritličju recepcija in kuhinja, ostali dve nadstropji ostaneta garažni.

Obstoječa nosilna konstrukcija garažne hiše je skeletne izvedbe z armiranobetonskimi nosilnimi slopi. Nosilna konstrukcija hotelske nadgradnje bo izvedena z armiranobetonskimi ploščami debeline 20 cm in stenami debeline 20 cm. Predvidena je ravna streha, v izvedbi toplotno izolirane armiranobetonske plošče. Med hotelskimi sobami bodo predelne stene iz mavčno kartonskih plošč. Posebnost hotela bo atrij po celotni višina hotelskega dela.

Predvideno bo porabljeno pribl. 1.500 m³ betona, 180.000 t armature. Tlorisne dimenzije objekta so 30,1 m x 37,3 m. Predviden rok končanja del je marec 2022.



Slika 5. Najprej spoznavanje dokumentacije – armaturnih risb, oktober 2021.



Slika 6. Nato še predavanje »v živo«, oktober 2021.

Fotografije: arhiv SGS, gradbena skupina d.o.o., Jernej Amon, Almira Čatović.

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Adis Kožar, Vpliv priprave vzorca zemljine na rezultate Proctorjevega testa, mentor prof. dr. Janko Logar, somentorica asist. dr. Jasna Smolar;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=130584>

Nejc Vrhovec, Analiza vpliva različnih ravni zunanje hrupa na ravni hrupa v stavbah pri različnih sestavah stavbnega ovoja, mentorica doc. dr. Mateja Dovjak, somentor Mirko Čudina;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131142>

Lucija Klinc, Zasnova enodružinske hiše po načelih univerzalnega načrtovanja za vsa življenjska obdobja, mentorica doc. dr. Mateja Dovjak, somentorica pred. mag. Alenka Plemelj Mohorič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131127>

Jaka Krnc, Lastnosti betonov z žlindrinim cementom, mentorica prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131129>

Marko Modic, Analiza cen oskrbe s pitno vodo v občini Vrhnika in sosednjih občinah, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131241>

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Gašper Šenk, Prometno tehnična in prometno varnostna analiza odsekov R2-430/1079 in 1080 skozi Vodice, mentor doc. dr. Tomaž Maher, somentor asist. Luka Trček;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131148>

Martin Maglica, Požarna analiza armiranobetonske stavbe, mentorica doc. dr. Jerneja Češarek Kolšek;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=130583>

Jan Kus, Projektiranje armiranobetonske plošče v stanovanjski hiši, mentor prof. dr. Boštjan Brank;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=130858>

Ema Kogovšek, Nosilnost tal - primerjava rezultatov analitične enačbe in numeričnih analiz, mentor prof. dr. Janko Logar;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=130579>

Nik Požun, Kapacitetna in prometno varnostna analiza AC priključka Kranj vzhod na G2-104/1136 v km 1,110, mentor doc. dr. Tomaž Maher, somentor viš. pred. dr. Rok Marsetič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=130857>

Elia Riccobon, Izdelava pripomočkov za praktično dimenzioniranje armiranobetonskih prečnih prereзов v skladu z EC2, mentor doc. dr. Jože Lopatič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131147>

Nastasja Šater, Gradnja novih kopnih površin v Koprskem zalivu s postopkom hidravličnega transporta v luči novih EN standardov za zemeljska dela, mentor prof. dr. Janko Logar, somentorica asist. dr. Jasna Smolar;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131685>

Luka Kondić, Vpliv črne jeklarske žlindre na lastnosti masivnih betonov, mentorica prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131149>

Mejra Mešič, Prometno tehnična in prometno varnostna analiza območja ob OŠ Mozirje, mentor doc. dr. Tomaž Maher, somentor asist. Luka Trček;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131146>

Janez-Jani Kosec, Rekonstrukcija večkrakega križišča v Selu pri Vodicih, mentor doc. dr. Peter Lipar, somentor viš. pred. dr. Robert Rijavec;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131405>

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Luka Prezelj, Vrednotenje premeščanja sedimentov na podlagi podatkov o zapolnjenosti hudourniških pregrad, mentor doc. dr. Nejc Bezak, somentor viš. pred. dr. Jošt Sodnik;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=130417>

Jakob Blatnik, Predlog vodne izkaznice za stavbe, mentorica izr. prof. dr. Nataša Atanasova, somentor asist. Matej Radinja;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131517>

Marko Žarov, Analiza možne energetske izrabe vodotokov z malimi hidroelektrarnami, mentor izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski, somentor izr. prof. dr. Andrej Gubina;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131519>

Tilen Pinter, Spremenljivost rečnih profilov vodomernih postaj porečja Savinje, mentorica izr. prof. dr. Mojca Šraj, somentorica asist. dr. Mira Kobold;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131133>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO (smeri Gradbene konstrukcije, Geotehnika-hidrotehnika, Nizke gradnje)

Petra Tihole, Projektiranje klasičnih in krožnih križišč ter odcepov s pristopom BIM, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek, somentor doc. dr. Peter Lipar;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131686>

Urška Šraj, Vzpostavitev standardizacije gradbenih virov kot temelj e-poslovanja v sklopu Industrije 4.0, mentor doc. dr. Aleksander Srđić, somentor Ivan Rus;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=130581>

Andraž Starc, Reinženiring poslovnih procesov z uporabo orodij BIM in aplikacijskih vmesnikov, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek, somentor doc. dr. Franc Sinur;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131468>

Marko Guštin, Prometno-tehnični vidik izvedljivosti cestnih povezav Šared-Markovec in Šared-Padna v občini Izola, mentor doc. dr. Peter Lipar, somentor viš. pred. dr. Robert Rijavec;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131243>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO (smer Informacijsko modeliranje zgradb - BIM A+)

Gregory Onyibe, BIM knjižnice in delovni postopek optimizacije načrtovanja opažev betonskih konstrukcij, mentor doc. dr. Aleksander Srđić, somentor doc. dr. Tomo Cerovšek;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131603>

Youssef Almezeraani, Vključevanje ocene življenjskega cikla stavb v načrtovalski proces s pomočjo integracije BIM, mentor doc. dr. Mitja Košir, somentor asist. David Božiček;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131470>

Mahya Nazari, Minimalni podatki za 4D simulacijo infrastrukturnih projektov in njihovega odtisa CO₂, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek, somentor izr. prof. Marko Andrejašič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131518>

Ekaterina Moskvina, Vpliv uporabe zmogljivostnega načrtovanja v povezavi z BIM metodologijo na postopek načrtovanja stavb, mentor doc. dr. Mitja Košir;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131605>

José Luis Rodríguez Hernández, Generativno projektiranje za izboljšanje izvedljivosti s pristopom BIM in vitko proizvodnjo, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek, somentorja Andrej Lavrič in Veljko Janjič;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131610>

Sajede Naghavi Senjani, Delotok BIM za pred-izvedbeno presojo izvedljivosti z uporabo aktivnosti 4D, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131469>

Taiane Barichello Bohrer, Zagotavljanje kakovosti modelov BIM pri vodenju projektov, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek, somentorica Ana Sofia Almeida;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131602>

Angela Cristina de Hugo Silva, Uporaba razširjene resničnosti v različnih delotokih BIM projektiranja, mentor doc. dr. Matevž Dolenc;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131607>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM STAVBARSTVO

Simona Špehar, Prenos toplote in vodne pare skozi steno iz slame in ilovnatih ometov, mentor prof. dr. Zvonko Jagličič, somentorja asist. dr. David Antolinc in dr. Larisa Brojan;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=130580>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Luka Drole, Idejna zasnova renaturalizacije odseka reke Ljubljance, mentor doc. dr. Nejc Bezak, somentor doc. dr. Gregor Čok;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131520>

Matej Mešl, Vpliv sonaravnih ukrepov za zmanjšanje erozijske nevarnosti na poplavnih območjih, mentor prof. dr. Franc Steinman, somentorica asist. dr. Mateja Škerjanec;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=131521>

Gregor Ivnik Dujovič, Zasnova sanacije posledic hudourniške poplave Tržiške Bistrice na odseku Slap-Jelendol, mentor doc. dr. Simon Rusjan, somentor viš. pred. dr. Jošt Sodnik;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=130939>

II. STOPNJA – ERASMUS MUNDUS MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM FLOOD RISK MANAGEMENT

Mark Bryan Alivio, Ocena poplavne škode zaradi naraščanja gladine morja, mentor doc. dr. Simon Rusjan, somentor izr. prof. dr. Andrej Kryžanowski;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=129673>

Steven Brazda, Poplave zaradi taljenja snega in sočasnega delovanja več dejavnikov v Severni Ameriki in Evropi, mentorica izr. prof. dr. Mojca Šraj, somentor doc. dr. Nejc Bezak;
<https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=129671>

NOVI DIPLOMANTI GRADBENIŠTVA

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Matic Bračič, 4D in 5D BIM modeliranje objekta viadukt Pesnica, mentor doc. dr. Zoran Pučko, somentor Tomaž Kavnik;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80062>

Nejc Časar, Predlog sanacije stanovanjskega objekta na Hrvatskem trgu 1 v Ljubljani, mentor prof. dr. Andrej Štrukelj;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80469&lang=slv>

Zala Esih, Tehnološki elaborat za objekt Rekonstrukcija regionalne ceste Dole - Ponikva I. faza, mentor prof. dr. Andrej Štrukelj, somentor izr. prof. dr. Marko Renčelj;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80025&lang=slv>

Kaja Pevec, Primerjava mehanskih lastnosti in vrednostna analiza bitumenskih hidroizolacij za trajnostno učinkovitost hidroizolacije ravnih streh, mentor izr. prof. dr. Samo Lubej, somentorica izr. prof. dr. Nataša Šuman;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80173>

Gal Rednak, Ponudbeni predračun za gradnjo montažnih večstanovanjskih stavb v Medlogu, mentorica izr. prof. dr. Nataša Šuman, somentorica asist. Mateja Držečnik;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80075>

Martina Ribič, 3D modeliranje nadvoza Cirknica na osnovi projektne dokumentacije, 3D laserskega skeniranja in fotogrametrije, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentorja doc. dr. Zoran Pučko in Tomaž Goričan;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80215>

Jan Škrablin, Organizacija gradbišča in tehnološki procesi gradnje bencinskega servisa v Celju, mentor prof. dr. Uroš Klanšek;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80002>

David Tomaž, Modeliranje in armiranje prekladnih elementov mostnih konstrukcij s programom Tekla Structures, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor Tomaž Goričan;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80538>

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Sabina Rožac, Analiza ustreznosti osvetljenosti izbranih prehodov za pešce v Krškem, mentor izr. prof. dr. Marko Renčelj;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80237>

David Virag, Ocena potresne odpornosti zidanega objekta, mentor doc. dr. Mojmir Uranjek, somentor izr. prof. dr. Matjaž Skrinar;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80058>

Ognjen Vuković, zaključek študija brez zaključnega dela

Gregor Diaci, zaključek študija brez zaključnega dela

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Tim Balant, Vpliv lastnosti tal na dimenzije voziščnih konstrukcij, mentor prof. dr. Bojan Žlender, somentor doc. dr. Primož Jelušič;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=79481>

Laura Brigita Parežnik, Sodobna načela načrtovanja večnivojskih vozlišč in priključkov, mentor izr. prof. dr. Marko Renčelj;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80617>

Jure Zupančič, Optimizacija jeklenega portalnega okvirja razpona 20 m in višine 7 m, mentor doc. dr. Tomaž Žula, somentorja prof. dr. Stojan Kravanja in doc. dr. Primož Jelušič;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80567&lang=slv>

Alex Želj, Sistematično načrtovanje talnega taktilnega vodilnega sistema za slepe in slabovidne v mestu Lenart v Slovenskih goricah, mentor prof. dr. Tomaž Tolazzi;
<https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=80278>

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

4.11.2021

Strokovni posvet Društva za ceste severovzhodne Slovenije "Slovensko gradbeništvo pred izzivi izgradnje velikih prometnih infrastrukturnih projektov"

Maribor, Slovenija
www.dcm-svs.si

21.-23.11.2021

ICCEFA'21 2nd International Conference on Civil Engineering Fundamentals and Applications

Spletna konferenca
<https://iccefa.com>

1.-4.12.2021

11th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar

Valletta, Malta
www.iwagpr2021.eu

23.-25.2.2022

DFI-PFSF Piling & Ground Improvement Conference 2022

Sydney, Avstralija
<https://dfi.org/pfsf2021>

27.-29.3.2022

ICOCE 2022 – 6th International Conference on Civil Engineering

Hibridna konferenca
Singapur
www.icoce.org

15.-18.4.2022

ICCEMS 2022 — 7th International Conference on Civil Engineering and Materials Science

Hibridna konferenca
Čiba, Japonska
www.iccem.org

1.-5.5.2022

ICSMGE 2022 - 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering

Hibridna konferenca
Sydney, Avstralija
www.icsmge2022.org

23.-25.5.2022

CIVILMEET2022 – International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering

München, Nemčija
<https://albedomeetings.com/civilmeet>

16.-18.6.2022

GSCAEE2022 – 2nd Global Summit on Civil, Architectural and Environmental Engineering

Kopenhagen, Danska
www.thescientistt.com/civil-structural-environmental-engineering/2022

20.-24.6.2022

ICOSSAR 2021-2022, 13th International Conference on Structural Safety & Reliability

Šanghaj, Kitajska
www.icossar2021.org

27.-29.6.2022

IS-Cambridge 2022 — 10th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground

Cambridge,
Združeno kraljestvo Velike Britanije in Severne Irske
www.is-cambridge2020.eng.cam.ac.uk

22.-24.8.2022

GMINFRA 2022 — Global Meet on Infrastructure and Construction

Pariz, Francija
<https://primemeetings.org/2022/infrastructure-construction>

12.-15.9.2022

EUROCK 2022 — Rock and Fracture Mechanics in Rock Engineering and Mining

Helsinki, Finska
www.ril.fi/en/events/eurock-2022.html

17.-21.9.2023

12 ICG - 12th International Conference on Geosynthetics

Rim, Italija
www.12icg-roma.org

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