GRADBENI VESTNIK

september 2016

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

Poštnina plačana pri pošti 1102 Ljubljana

Gradbeni vestnik • **GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKE ZBORNICE SLOVENIJE**

UDK-UDC 05 : 625; ISSN 0017-2774

Ljubljana, september 2016, letnik 65, str. 185-214

Izdajatelj:
Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS),** ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

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

Glavni in odgovorni urednik:
prof. dr. Janez Duhovnik

Lektor:
Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:
Romana Hudin

Tajnica:
Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:
Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:
Kočevski tisk

Naklada:
600 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

http://www.zveza-dgits.si.
Letno izide 12 številk. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojence 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 vštet DDV.

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

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnim presledkom 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: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

Vsebina • Contents

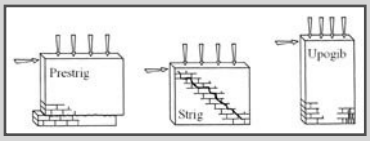
Članki • Papers

stran **186**

akad. prof. dr. Miha Tomaževič, univ. dipl. inž. grad.

NEKAJ PREMISLEKOV O LABORATORIJSKIH PREISKAVAH OBNAŠANJA ZIDOV IN ZIDANIH KONSTRUKCIJ PRI POTRESNI OBTEŽBI

SOME CONSIDERATIONS ON TESTING AND EXPERIMENTAL SIMULATION OF SEISMIC BEHAVIOR OF MASONRY WALLS AND BUILDINGS



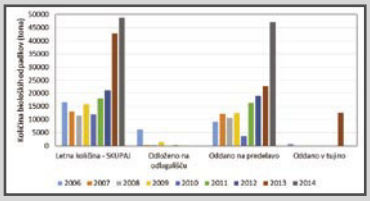
stran **205**

asist. dr. Sabina Kolbl, univ. dipl. inž. vki.

prof. dr. Blaž Stres, univ. dipl. mikrobiol.

UPORABA BIOLOŠKIH ODPADKOV ZA PRIDOBIVANJE BIOPLINA

USAGE OF ORGANIC FRACTION OF BIOLOGICAL WASTE FOR BIOGAS PRODUCTION



Novi diplomanti

stran **212**

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Krizi v gradbeništvu še ni videti konca; foto Janez Duhovnik

NEKAJ PREMISLEKOV O LABORATORIJSKIH PREISKAVAH OBNAŠANJA ZIDOV IN ZIDANIH KONSTRUKCIJ PRI POTRESNI OBTEŽBI

SOME CONSIDERATIONS ON TESTING AND EXPERIMENTAL SIMULATION OF SEISMIC BEHAVIOR OF MASONRY WALLS AND BUILDINGS

akad. prof. dr. Miha Tomaževič, univ. dipl. inž. grad.
miha.tomazevic@zag.si
Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana

Znanstveni članek
UDK: 624.012:624.042.7-028.77

Povzetek | Članek obravnava nekaj problemov preizkušanja in eksperimentalnih raziskav obnašanja zidov in zidanih stavb pri potresni obtežbi z vidika izkušenj, dobljenih na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Predstavljene so značilne metode preizkušanja zidov in analiziran je vpliv najpomembnejših parametrov, kot so robni pogoji, način nanašanja obtežbe in velikost preizkušancev, na rezultate meritev in porušni mehanizem. Na kratko so predstavljeni tudi pogoji, ki morajo biti zagotovljeni pri preiskavah modelov zidanih stavb na potresni mizi, in opisani značilni primeri eksperimentalnih raziskav.

Ključne besede: preiskave zidov, robni pogoji, mehanizmi porušitve, preiskave modelov stavb na potresni mizi

Summary | Some aspects of testing and experimental research of seismic behaviour of masonry walls and buildings, based on the experience obtained at Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, are discussed. Typical testing methods are presented and the influence of governing parameters, such as boundary conditions, loading protocols and scale effects, on failure mechanisms and test results, are analyzed. The conditions to be fulfilled when testing models of masonry buildings on shaking tables, are discussed. Finally, typical examples of experimental research to investigate various issues of seismic behaviour of masonry buildings are also briefly described.

Key words: testing of masonry walls, boundary conditions, failure mechanisms, testing of models of buildings on shaking tables

1 • NAMESTO UVODA: ZAKAJ PREIZKUŠANJE IN EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE?

Zidovje je kompozitni gradbeni material, sestavljajo ga iz različnih materialov izdelani zidaki različnih oblik, ki so med seboj povezani z različnimi vrstami malte ali lepil. Da bi izboljšali nosilnostne lastnosti, zidovju, ki sicer razmeroma dobro prenaša tlačne obremenitve, nateznih in strižnih pa ne, dodajamo druge materiale, kot so jeklena in polimerna armatura ter zalivni beton. Zidovje je torej tipičen predstavnik nehomogenega in neizotropnega materiala, ki ima zelo omejene elastične lastnosti. Zato je na podlagi poznavanja mehanskih lastnosti sestavnih materialov, zidakov in malte skoraj nemogoče zanesljivo predvideti, kako se bodo zidani konstrukcijski elementi ali celotne konstrukcije obnašali pri potresni obtežbi. Da bi ovrednotili vrednosti parametrov, ki opisujejo obnašanje konstrukcije med potresom, kot so na primer upadanje togosti in nosilnosti pri ponavljajoči se vodoravni obtežbi, pa tudi sposobnost konstrukcije, da se deformira in sipa energijo, je treba opraviti posebne preiskave. Ustrezne podatke lahko dobimo samo s preizkusnimi metodami, s katerimi ponazorimo dejanske

obtežbene pogoje, ki vladajo v konstrukciji in njenih elementih med potresom.

Čeprav standard za projektiranje zidanih konstrukcij Evrokod 6 (SIST EN 1996-1) priporoča, naj se osnovne mehanske lastnosti zidovja pri tlaku in strigu določijo s preiskavami na zidovih ali zidanih prizmah in ne na podlagi mehanskih lastnosti sestavnih materialov (SIST EN 1052-1, SIST EN 1052-3), se v praksi ustrezne vrednosti največkrat ocenijo kar z empiričnimi enačbami, izpeljanimi na podlagi odvisnosti med vrednostmi tlačne trdnosti zidakov in malte ter se določijo s standardiziranimi preiskavami za kontrolo kakovosti materialov. Čeprav odvisnost med obema parametroma urejamo s korekcijskimi koeficienti, odvisnimi od tipa zidakov in vrste malte, raziskave kažejo, da takšne enačbe dajejo ustrezne vrednosti le za vrsto zidovja, ki je služila za njihovo izpeljavo, medtem ko so za druge vrste zidovja tako ocenjene vrednosti lahko zelo nezanesljive. Vsekakor pa samo z vrednostmi, ki jih dobimo s temi enačbami, ne moremo oceniti potresne odpornosti konstrukcije, če vemo, da pojem potresna odpornost ne pomeni samo porušne sile, pač pa vključuje tudi sposobnost deformiranja in sipanja energije konstrukcijskega sistema pri delovanju potresne obtežbe.

Da bi dobili zanesljive kvantitativne podatke, moramo obnašanje konstrukcijskih elementov, sklopov oziroma celotnih konstrukcij raziskati s posebnimi preiskavami, s katerimi ponazorimo njihovo obnašanje v potresnih okoliščinah. Brez takšnih preiskav ne bi razumeli, kako se zidane konstrukcije odzivajo na potres, zakaj nastanejo poškodbe, in ne bi mogli pripraviti priporočil za potresno odporno zasnovo ter razviti računskih modelov za potresno odporno projektiranje. Eksperimentalne raziskave so tudi podlaga za določitev vrednosti tistih parametrov oziroma redukcijskih faktorjev v tehničnih predpisih, s katerimi implicitno upoštevamo neelastične lastnosti, ki konstrukcijam zagotovijo ustrezno obnašanje med potresom in omogočajo, da projektanti pri preverjanju potresne odpornosti namesto zahtevnih nelinearnih lahko uporabijo praktične metode teorije elastičnosti konstrukcij.

V primeru popotresne obnove poškodovanih zidanih stavb oziroma njihove preventivne protipotresne utrditve so laboratorijske ali terenske preiskave edino zanesljivo sredstvo za dokazovanje učinkovitosti različnih tehničnih rešitev za utrjevanje. O njihovi učinkovitosti se moramo prepričati, preden jih na široko uporabimo oziroma preden njihovo učinkovitost preveri pravi potres, ki ga z večjo ali manjšo verjetnostjo pričakujemo v prihodnosti.

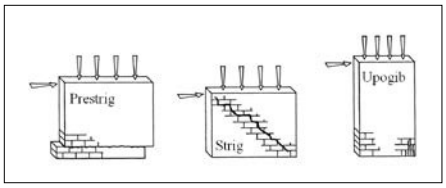
Kot podlago za računske algoritme, s katerimi ponazorimo obnašanje zidanih konstrukcij in zidov pri potresni obtežbi, uporabljamo bodisi metode fizikalnih mehanizmov bodisi končnih elementov (npr. (Lourenço, 1996), (Petry, 2015)). Čeprav z modeli dobimo dobre rezultate v specifičnih primerih, za reševanje katerih so bili razviti, zahtevni modeli večinoma niso primerni za praktično uporabo. V praktičnem postopku preverjanja potresne odpornosti se sile v prerezih, napetosti in deformacije določijo na podlagi povprečnih vrednosti bruto prereza zidov in drugih nosilnih elementov in povprečnih, efektivnih vrednosti obremenitev. Uporabljajo se enostavni modeli in enačbe teorije elastičnosti, prilagojene neelastičnim, nehomogenim in neizotropnim lastnostim zidovja kot konstrukcijskega materiala. Medtem ko trdnostne lastnosti, kot tlačno (f_c) in natezno (diagonalno tlačno) trdnost (f_t), predstavljajo vrednosti, ki jih dobimo neposredno z že standardiziranimi preiskavami, in parametre, ki določajo deformabilnostne lastnosti, kot sta modul elastičnosti (E) in strižni modul (G), efektivne vrednosti dejanskih parametrov, ki jih izmerimo v območju, kjer lahko predpostavljamo, da se zidovje še obnaša elastično. Takšne definicije so navadno subjektivne in še niso predpisane, zato moramo v vsakem primeru posebej opisati, kako smo vrednosti teh parametrov izvrednotili. Zavedati se moramo, da je v primeru zidanih konstrukcij zanesljivost rezultatov marsikatere računske metode odvisna od načina, kako so bili določeni vhodni podatki.

Namen tega prispevka ni predstaviti stanje stroke (state-of-the-art) na področju metod preizkušanja zidanih konstrukcijskih elementov in konstrukcij v pogojih potresne obtežbe. To obravnavajo številne kakovostne knjige in druga literatura (npr. (Carvalho 1998), (Harris, 1999)). Poročilo o potresnih preiskavah zidov na začetku sodobnega raziskovanja sta pripravila Mayes in Clough (Mayes, 1975), stanje 20 let kasneje je povzeto v (Calvi, 1996). Žal je pomemben delež raziskav spregledan v poročilu o strižnih preiskavah zidov, ki ga je pripravil Van Vliet (Vliet, 2004). O različnih metodah preizkušanja zidovja in zidanih konstrukcij razpravljajo raziskovalci v številnih razpravah, ki jih je preveč, da bi jih omenjali na tem mestu.

V tem prispevku tudi ne bo govora o laboratorijskih preiskavah za določanje osnovnih mehanskih lastnosti materialov. Na podlagi izkušenj, ki smo jih dobili na Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG), kjer so eksperimentalne raziskave obnašanja zidanih konstrukcij pri potresni obtežbi eno najpomembnejših raziskovalnih področjih vse od potresa leta 1963 v Skopju v Makedoniji, bomo predstavili nekaj premislekov, povezanih s preizkuševalnimi metodami obnašanja zidov in modelov zidanih stavb med potresom.

2 • SEIZMIČNE PREISKAVE ZIDOV

Da bi ugotovili, kateri parametri vplivajo na potresno odpornost in ocenili njihove vrednosti, je treba s preiskavami v laboratoriju ali na terenu ponazoriti poškodbe in porušne mehanizme, ki smo jih po potresih opazili na stavbah. Analize poškodb zidanih stavb, ki so jih prizadeli potresi, kažejo, da porušne mehanizme zidov na splošno lahko razdelimo v tri skupine: porušitev zaradi prestriga, pri kateri en del zidu zdrsne po drugem, klasično strižno porušitev, ki se izraža z diagonalno usmerjenimi razpokami, in upogibno porušitev, pri kateri se zaradi upogiba zdrobijo zidaki v tlačni coni najbolj obremenjenega dela prereza zidu, v natezni coni pa nastanejo močne vodoravne razpoke, ki zmanjšajo območje prenosa navpičnih tlačnih obremenitev (slika 1).



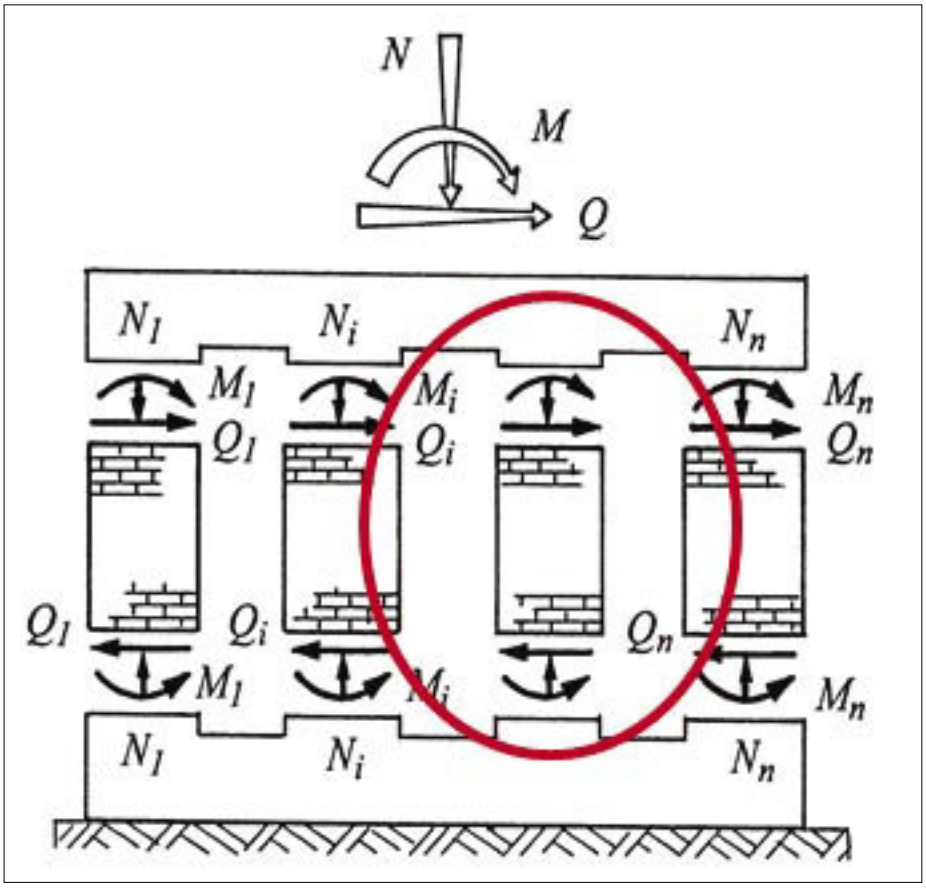
Slika 1 • **Značilni porušni mehanizmi zidov**

Če tak mehanizem ponazorimo s preiskavo in pri tem poznamo osnovne mehanske lastnosti materialov (zidovja), geometrijo zidu, vpetostne pogoje in obtežbo, ki je delovala na zid med preiskavo, lahko na podlagi rezultatov razvijemo enačbe, s katerimi opišemo poškodbe in mehanizme, obenem pa ocenimo vrednosti parametrov, ki nastopajo v teh enačbah. Lahko tudi ugotovimo, da porušni mehanizem pri danih obtežnih pogojih ni odvisen samo od geometrije zidu in vpetostnih

Slika 2 • **Značilni etažni mehanizem s strižno porušitvijo zidov. Nearmirana opečna zidana stavba po potresu v Črni gori leta 1979 (Fotografija: M. Tomaževič)**

pogojev v konstrukcijo, ampak tudi od osnovnih mehanskih lastnosti zidovja, predvsem od razmerja med tlačno in natezno trdnostjo.

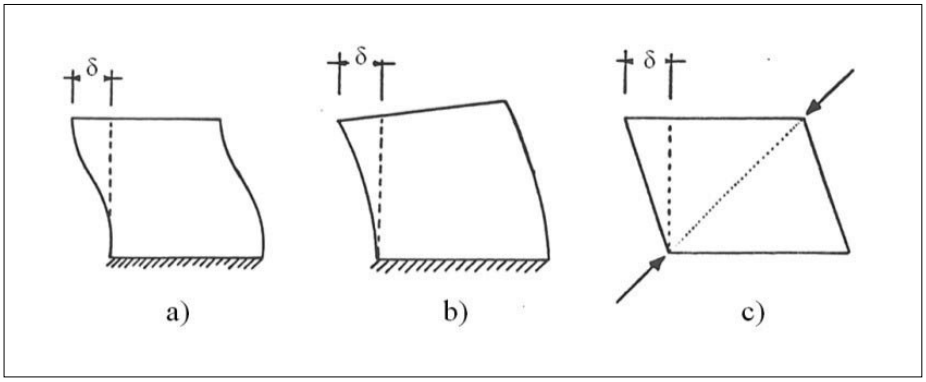
V laboratoriju smo omejeni z velikostjo preizkušancev in zmogljivostjo preizkuševalnih naprav. Navadno poskušamo preiskati zid (slop) v podobni velikosti in geometrijskih razmerjih (razmerje med višino in dolžino), kot jih imajo tipični zidovi v stavbi. Preizkušanec naj bi bil tudi preiskan pri enakih robnih pogojih in tlačnih obremenitvah kot v dejanskem konstrukcijskem sistemu stavbe. Šolski primer etažnega mehanizma obnašanja stavbe in strižne porušitve nearmiranega opečnega zidu, vpetega v togi in močni parapetni del (vodoravne elemente) konstrukcijskega sistema, ki je služil za vodilo pri snovanju preizkuševalne naprave, prikazuje slika 2, sile, ki med potresom delujejo na zid v takšnih robnih pogojih, pa slika 3.



Slika 3 • **Sile, ki med potresom delujejo na zid**

Osnovni namen seizmičnih preiskav zidov je bil izvrednotiti »natezno trdnost zidovja« (diagonalno strižno trdnost), mehansko lastnost, od katere je odvisna strižna odpornost nearmiranega zidovja. Pojem natezna trdnost pri zidovju namreč ne pomeni trdnosti zidovja pri čistem nategu, ampak vrednost glavne natezne napetosti pri strižni porušitvi zidu (pri doseženi strižni odpornosti) pri kombinaciji delovanja tlačne osne in prečne sile, če bi bilo zidovje elastični, izotropni in homogeni material (Turnšek, 1970). Na splošno velja, da se leta lahko določi na tri načine, ki jih shematično prikazuje slika 4: s strižno preiskavo, pri kateri vodoravna sila deluje na zgoraj in spodaj vpeti zid, s strižno preiskavo, pri kateri vodoravna sila deluje na zid kot navpično konzolo (angl. racking test) in z diagonalno tlačno preiskavo. V prvih dveh primerih se preiskava opravlja pri konstantni tlačni obremenitvi, smer delovanja vodoravne sile, ki deluje v višini zgornjega roba zidu, pa se bodisi ciklično spreminja in stopnjema povečuje bodisi sila deluje ves čas v isti smeri in se enakomerno povečuje.

Primerjava rezultatov preiskav na vse tri načine preiskanih vzorcev, sezidanih hkrati iz enake vrste zidakov in malte, je pokazala, da med izvrednotenimi vrednostmi natezne trdnosti ni statistično pomembnih razlik (Bernardini, 1980). Ker je natezna trdnost zidovja le eden od parametrov potresne odpornosti, ni vseeno, na kakšen način zid preiščemo. Medtem ko z diagonalno tlačno preiskavo dobimo le vrednosti natezne trdnosti zidovja, nam da preiskava zidu z monotono naraščajočo vodoravno silo nekaj več podatkov o deformabilnosti zidovja. Za pravo seizmično preiskavo zato imenujemo le preiskavo s ciklično delujočo vodoravno silo, s katero ne dobimo samo podatkov o natezni trdnosti zidovja, pač pa tudi podatke o upadanju togosti in nosilnosti pri ponavljajočih se obremenitvah v nelinearnem območju, še posebno pa tudi podatke o sposobnosti deformiranja in sipanja energije med potresom. Brez teh podatkov ne bi mogli modelirati histereznih pravil, ki jih potrebujemo za računsko modeliranje nelinearnega odziva zidanih konstrukcij na potres, niti oceniti vred-



Slika 4 • **Shematična predstavitev različnih tipov preiskav za določitev natezne trdnosti zidovja: a) strižna preiskava polnovpetega zidu, b) strižna preiskava zidu kot navpične konzole, c) diagonalna tlačna preiskava (po CIB, 1987)**

nosti nekaterih parametrov, s katerimi pri praktičnem preverjanju potresne odpornosti zidanih konstrukcij implicitno upoštevamo sposobnost deformiranja in sipanja energije.

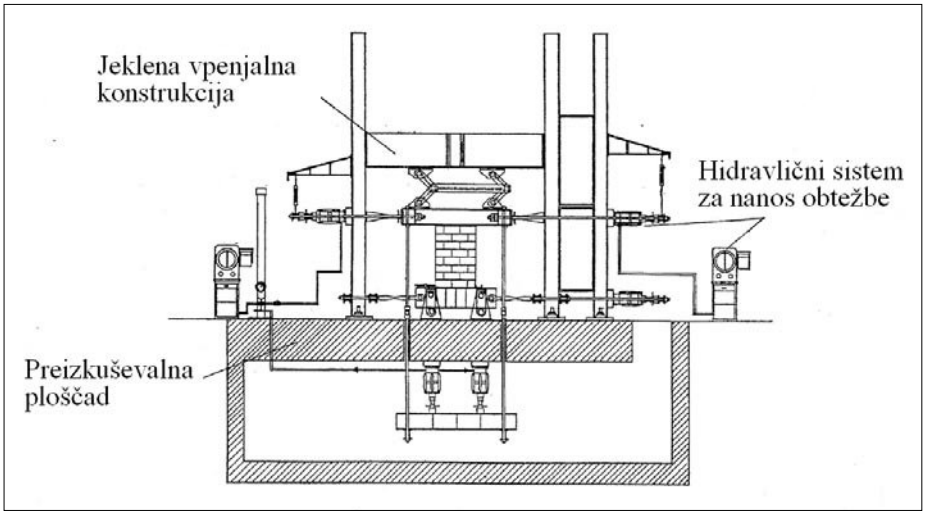
Če preiskujemo lastnosti novega zidovja, zidove preizkušance sezidamo in preiščemo v laboratoriju. Če pa preiskujemo lastnosti obstoječega zidovja, je takšno zidovje težko ponazoriti z zidanjem v laboratoriju, čeprav pred tem z obširnimi mehanskimi in kemijskimi analizami raziščemo lastnosti sestavnih materialov, opeke, kamna in malte. Zato vrednosti mehanskih parametrov zidovja, ki jih potrebujemo pri preverjanju potresne odpornosti obstoječih stavb, rajši določamo bodisi s preiskavami večjih vzorcev, ki jih izrežemo iz zidovja in preiščemo v laboratoriju, bodisi s preiskavami zidovja na kraju samem.

V laboratorijih se seizmične preiskave zidov opravljajo z različnimi preizkuševalnimi napravami, ki omogočajo, da je preizkušanec med preiskavo obremenjen z bolj ali manj konstantno navpično obtežbo, medtem ko se potresna obtežba, ki deluje v ravnini zidov, navadno ponazori z vsiljenimi pomiki cikličnega značaja. Pomiki se vsiljujejo v različnih oblikah časovnega poteka (obtežbenih protokolov) in z različnimi hitrostmi nanašanja, statično ali dinamično.

2.1 Robni pogoji

V stavbah se zaradi nastanka poškodb in posledičnih sprememb razmerij med togostmi navpičnih in vodoravnih elementov konstrukcije vpetostni pogoji posameznih zidov med potresom spreminjajo. V zidu, ki je del konstrukcijskega sistema, zaradi preprečenega vrtenja pri delovanju vodoravnih sil nastanejo dodatne tlačne napetosti. Ker s preiskavo izoliranega zidu težko ponazorimo dejanske razmere v konstrukciji, za pravilno vrednotenje rezultatov pa se moramo izogniti negotovostim, preiskave opravljamo pri kontroliranih in poenostavljenih robnih pogojih. Navadno med preiskavo zagotovimo, da navpična obtežba ostane konstantna. Zaradi lažjega dela in hitrejšega poteka preiskav preizkusne zidove sezidamo na armiranobetonskih podstavkih, na vrhu pa jih zaradi lažjega vnosa navpične in vodoravne obtežbe zaključimo z armiranobetonsko vezjo. Preiskava takšnega preizkušanca seveda le približno ponazori dejansko stanje elementa v konstrukciji.

Šolski primer etažnega mehanizma in strižne porušitve nearmiranega zidu, ki ga prikazuje slika 1, nakazuje predpostavko, da so zidovi na zgornjem in spodnjem robu polno vpeti v vodoravne elemente celotnega konstrukcijskega sistema stavbe. Na podlagi te predpostavke so zasnovane preizkuševalne naprave, ki omogočajo, da ostaneta zgornji in spodnji rob preizkušanca med preiskavo vzporedna. Mehanski del preizkuševalne naprave, ki zagotavlja vzporednost obeh naležnih robov zidu med preiskavo, je običajno izdelan v obliki paralelograma (pantografa), ki je postavljen bodisi neposredno na zgornji naležni rob zidu bodisi stoji ob strani. V drugem primeru vzporednost naležnih robov zagotavlja z zgornjim delom pantografa povezana toga prečka. Navpična obtežba deluje na zid neposredno preko spodnjega dela pantografa oziroma toge prečke, če je pantograf postavljen ob strani, medtem ko ciklično vodoravno obtežbo povzroča hidravlični bat, povezan z vodoravno premikajočim se delom pantografa. Shemo



Slika 5 • **Shema delovanja naprave za ciklične strižne preiskave zidov iz 60. let prejšnjega stoletja**

Slika 6 • **Preiskava zidu iz opečnih votlakov kot navpične konzole (Fotografija: Arhiv ZAG)**

delovanja ene izmed prvih tovrstnih naprav, ki je bila projektirana konec 60. let prejšnjega stoletja na takratnem Zavodu za raziskavo materiala in konstrukcij, prikazuje slika 5.

Drugi, tudi pogost način ciklične strižne preiskave zidu je preiskava zidu kot navpične konzole. V tem primeru je armiranobetonski podstavek, na katerem je sezidan zid, vpet v preizkuševalno ploščad, vodoravno, ciklično delujočo obtežbo pa povzroča hidravlični bat, ki je na eni strani pritrjen na zaključno vez zidu, na drugi pa vpet v preizkuševalni okvir. Navpična obremenitev se vnaša s hidravličnim batom, ki deluje na jekleni nosilec, položen na zaključno vez zidu. Da bi se med deformiranjem zidu med preiskavo nastalo trenje med zaključno vezjo in jeklenim nosilcem za vnos navpične obtežbe zmanjšalo na najmanjšo možno mero, se med vezjo in nosilec za raznos navpične sile vstavi valjčno ležišče (slika 6).

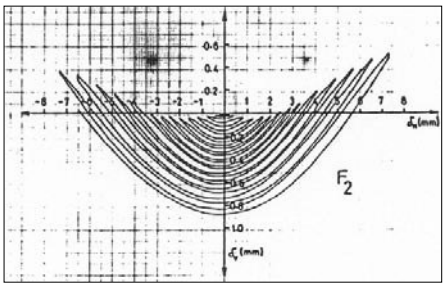
Izkazalo se je, da nobeden od obeh načinov preiskave ne zagotavlja, da bi se zid med ciklično strižno preiskavo v celoti obnašal tako, kot je bilo zamišljeno. Če se zid preizkuša z napravo, pri kateri naj bi polno vpetost na obeh naležnih robovih zagotovil pantograf, se izkaže, da zaradi tega, ker se med preiskavo navpična sila ne spreminja, naprava ne more preprečiti vrtenja (angl. rocking) preizkušancev iz navadnega, nearmiranega zidovja. Da se zid med preiskavo vrti, dokazuje izmerjeno dvigovanje oziroma spuščanje spodnjega elementa pantografa v odvisnosti od vsiljenih vodoravnih pomikov (slika 7). Pantograf pri tem sledi tudi stisnjenju zidu zaradi poškodb, ki nastanejo med preiskavo.

Vrtenje zidu je odvisno od vrste in kakovosti zidovja, od geometrijskih razmerij (razmerja višina/dolžina) in navpičnih obremenitev. Pri zidovih običajnih geometrijskih razmerij, tj. zidovih z razmerjem višina/dolžina = 1,5 in pri katerih se natezna trdnost zidovja giblje v območju 4–10 % tlačne trdnosti, je vrtenje postalo moteče, ko so se začeli preizkušati zidovi, sezidani s sodobnejšimi tehnologijami zidanja, ni pa bilo pomembno, ko so se preizkušali zidovi, sezidani z materiali z nizkimi trdnostnimi in deformabilnostnimi lastnostmi. Prav tako ni bilo pomembno v primeru preiskave dolgih zidov. Vrtenje se zmanjšuje tudi s povečanjem navpične obtežbe.

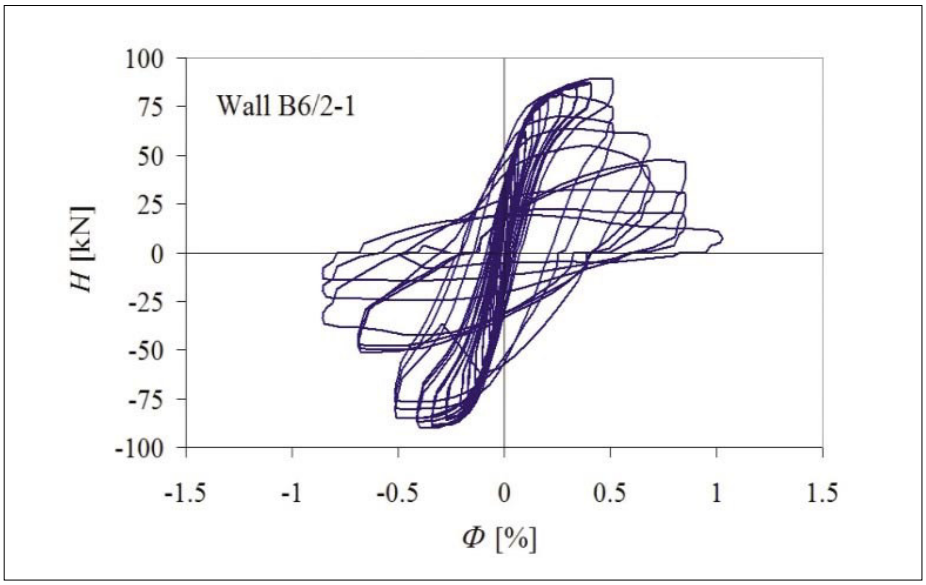
Tudi v primeru, ko zidove preiskujemo kot »navpične konzole«, lahko ugotovimo, da zidovi niso čiste konzole, saj sistem za nanos navpične obtežbe preprečuje zasuk njihovega zgornjega roba. Vpetost je odvisna od zasnove preiskave: če se navpična obtežba vnaša z enim samim, centralno nameščenim batom, je stopnja vpetosti manjša kot v primeru, ko se uporabljata dva. Z analizo porušnih mehanizmov zidov in meritev je bilo ugotovljeno, da se momentna infleksijska točka, ki naj bi bila pri čisti konzoli na vrhu, v resnici giblje v območju od 60 do 80 % višine zidu (Tomaževič, 2009).

Vrtenje zidu povzroči, da na natezni strani zidu nastanejo razpoke na stični površini med podstavkom in zidom, saj je trdnost zidovja pri čistem nategu zanemarljiva, medtem ko se na tlačeni strani začnejo drobiti zidaki, še preden se zid poruši zaradi nastanka diagonalnih razpok v osrednjem območju. Ti pojavi, ki so sicer značilni za upogibni porušni mehanizem, včasih vodijo do sklepa, da ta mehanizem obvladuje obnašanje zidu, kljub dejstvu, da se zid poruši zaradi striga in nastanka značilnih diagonalnih razpok (slika 8). Tak mehanizem je dobil celo posebno ime: mehanizem drob-

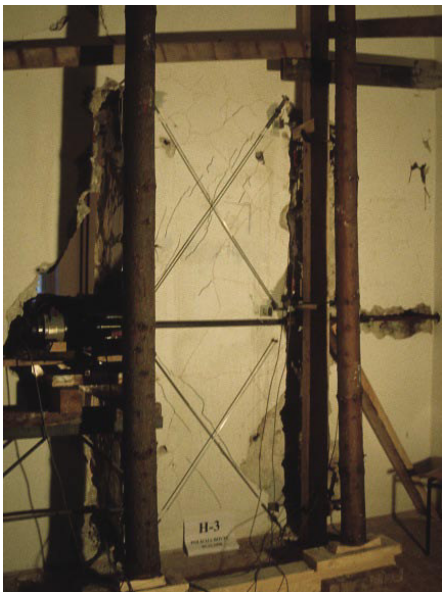
Slika 8 • **Čeprav se je zid strižno porušil, so se v začetnih fazah preiskave zaradi njegovega vrtenja začeli drobiti zidaki v tlačenih vogalih (Tomaževič, 2012). (Fotografija: Arhiv ZAG)**



Slika 7 • **Navpični pomiki naležnega dela pantografa v odvisnosti od vsiljenih vodoravnih pomikov, ki nakazujejo vrtenje nearmiranega zidu med preiskavo (Tomaževič, 1984)**



Slika 9 • **Tipična histerezna odvisnost med silo in zasukom, dobljena med preiskavo nearmiranega zidu. Zid se je porušil strižno, po doseženi maksimalni odpornosti pa ni več vrtenja zidu, ki se odraža z zankami v obliki črke S (Tomaževič, 2012)**



Slika 10 • **Značilna zasnova terenske preiskave kamnitega zidu. V zidu se vidijo diagonalno usmerjene razpoke (Tomaževič, 2000). (Fotografija: M. Tomaževič)**

Slika 11 • **Med terensko preiskavo opečnega zidu, preiskanega pri nizkih tlačnih napetostih, so nastale samo diagonalne razpoke. Slika prikazuje spodnjo polovico preiskanega zidu (Sheppard, 1985). (Fotografija: Arhiv ZAG)**

ljenja tlačenega vogala (angl. toe crushing mechanism).

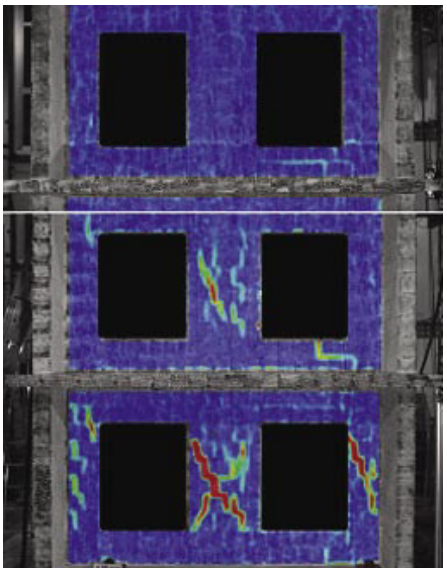
Pri vitkih zidovih, katerih geometrija že sama po sebi nakazuje veliko verjetnost porušitve zaradi upogibnega mehanizma, do nastanka strižnih, diagonalno usmerjenih razpok v osrednjem območju zidu niti ne pride. Po točki, ko doseže maksimalno vrednost, odpornost z naraščajočimi pomiki upada, pri tem pa se povečuje obseg v tlaku zdrobljenih zidakov. Zid se poruši zaradi upogiba, mehanizem pa od nekdaj imenujemo upogibni porušni mehanizem in ne mehanizem drobljenja tlačenega vogala.

Čisti upogibni mehanizem porušitve lahko ugotovimo tudi pri zidovih običajnega geometrijskega razmerja – tj. razmerja višina/dolžina = 1,5 –, ki so sezidani iz nekaterih lahkih materialov z majhno tlačno trdnostjo. Zidovje iz teh materialov, npr. zidakov iz aeriranega celičnega betona ali iz betona, ki ima namesto klasičnega kamenega agregata zrna iz ekspandirane gline, ima sicer nizko tlačno trdnost, njegova natezna trdnost (diagonalna natezna trdnost) v razmerju do tlačne trdnosti pa je razmeroma visoka. Pri teh zidovih drobljenje tlačenega vogala dejansko pomeni upogibni porušni mehanizem, saj diagonalne strižne razpoke v kasnejših fazah preiskave sploh ne nastanejo.

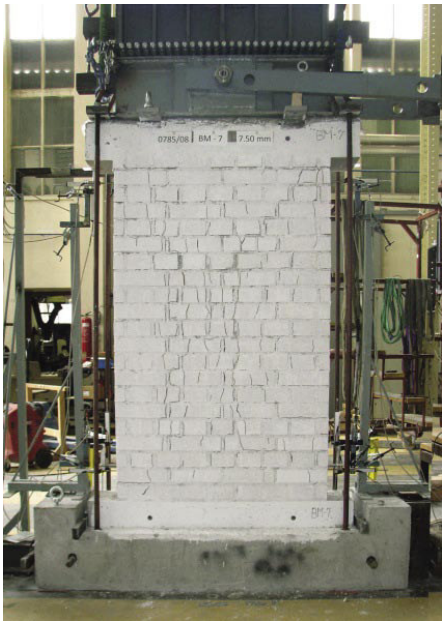
Pri takem načinu preizkušanja je težko ločiti fazo vrtenja zidu od faze strižnega obnašanja (glej značilne histerezne zanke odvisnosti med vsiljenimi pomiki in odpornostjo zidu, ki jih prikazuje slika 9). Ni pa daleč od resnice ugotovitev, da so v primeru očitne strižne porušitve zidu prej opisani pojavi zgolj posledica preizkusne metode in ne odražajo mehanizma obnašanja nearmiranih zidov v sklopu dejanske konstrukcije stavbe med potresom. To potrjujejo predvsem ugotovljene poškodbe po potresih, kjer v konstrukcijskih elementih nearmiranega zidovja prevladujejo strižne razpoke.

Razmišljanja potrjuje tudi obnašanje zidov med terenskimi preiskavami. Pri terenski preiskavi je zid, ki ga preiskujemo, sestavni del konstrukcijskega sistema stavbe, saj ga od

Slika 12 • **Med preiskavo trietažne strižne stene ni bilo opaziti znakov vrtenja osrednjega zidu. Slika kaže poškodbe, nastale pri etažnem zasuku v velikosti 0,25 % etažne višine, že po doseženi maksimalni odpornosti (Triller, 2016). (Fotografija: Arhiv ZAG)**



Slika 13 • **Tudi digitalno optične meritve deformacij ne kažejo znakov zasuka zidov (Triller, 2016). (Fotografija: Arhiv ZAG)**



Slika 14 • **Del navpične sile se v zid vnaša s prednapetimi zunanjimi vezmi, ki hkrati preprečujejo tudi njegovo vrtenje. Zid se poruši strižno brez vrtenja in sekundarnih poškodb. (Fotografija: Arhiv ZAG)**

njega ločita le navpična reza (včasih je rez samo na eni strani), s katerima dosežemo, da so dimenzije preizkušanca primerljive z dimenzijami vzorcev, ki jih preiskujemo v laboratoriju. Vpetostni pogoji so realni, realna je tudi navpična obtežba, ki jo ocenimo na podlagi predhodnega pregleda konstrukcije.

Vodoravno silo preko sistema jeklenih podpornih elementov in drogovja, ki je prilagojen dejanskim razmeram v stavbi, povzroča hidravlični bat, nameščen na sredini višine zidu. Da bi preprečili morebitne poškodbe drugih delov stavbe, mora biti bat oprt na ustrezno močan del zidovja zunaj območja preizkušanja, stropna konstrukcija v območju preizkušanca pa podprta z lesenim podporjem ali kako drugače. Primer preiskave kamnitega zidu prikazuje slika 10. Na tak način je bilo preiskano že večje število zidov, vendar v nobenem primeru ni bilo opaziti nastanka vodoravnih nateznih razpok oziroma znakov drobljenja materiala v tlaku. Na sliki 11 je prikazan detajl poškodb, nastalih med terensko preiskavo starega opečnega zidu v zgornjem nadstropju stavbe, ki je bil obremenjen z eno samo stropno konstrukcijo. Kot je videti, diagonalne strižne razpoke niti v tem primeru ne spremljajo pojavi, ki so značilni za upogibni porušni mehanizem. Lahko sklepamo, da med terensko preiskavo nosilni sistem konstrukcije stavbe preprečuje vrtenje preizkušanca.

Da so pojavi upogibnega obnašanja posledica zasnove preiskave in ne odražajo dejanskega stanja, kažejo tudi nedavne preiskave trinadstropne strižne stene iz nearmiranega zidovja, sezidane iz opečnih votlakov v malti za splošno uporabo (Triller, 2016). Tako potek razpok kot tudi deformacije zidovja, izmerjene z digitalno optično metodo, ne kažejo znakov vrtenja osrednjega slopa med preiskavo (sliki 12 in 13). Zato imajo po mnenju avtorja pričujočega prispevka novejše razprave o teh spremljajočih mehanizmih v zvezi z mejnimi stanji obnašanja nearmiranih zidov pri potresni obtežbi (npr. (Bosiljkov, 2003), (Petry, 2015)) za potresno odporno projektiranje zidanih konstrukcij bolj akademski kot praktični pomen.

Seveda je pri vrednotenju rezultatov laboratorijskih preiskav treba upoštevati tudi vrtenje zidu in sekundarne poškodbe, ki nastanejo pred končno strižno porušitvijo zidu. Te sicer ne vplivajo bistveno na ugotovljeno odpornost zidu, vendar pomembno vplivajo na izmerjene deformabilnostne parametre. Da bi njihov vpliv odpravili, med preiskavo ne merimo samo vodoravnih pomikov zidu in kota vrtenja, pač pa tudi odpiranje razpok na natezni in stisnjenje zidu na tlačeni strani naležne površine. Žal upoštevanje (filtriranje) vplivov vrtenja in drobljenja zidakov s klasičnimi merilnimi tehnikami ne daje zanesljivih rezultatov. V tem pogledu so bolj spodbudne sodobne digitalno optične metode meritev.

Vrtenje neamiranega zidu pri obeh vrstah preiskave preprečijo navpične natezne vezi ob robovih, ki prevzamejo natezne sile, nastale zaradi upogibnih vplivov vodoravne obtežbe. V primeru t. i. potisne preiskave (angl. racking test), ki jo za določanje diagonalne natezne trdnosti zidovja predpisuje ameriški standard (ASTM, 1998), se zid preišče kot navpična konzola, sezidana na betonskem podstavku, njegovo vrtenje pa preprečuje jeklena navpična vez na natezni strani. Vodoravna sila, ki v višini zaključne vezi deluje na preizkušanec, v tem primeru ne deluje ciklično, ampak enakomerno narašča le v eni smeri.

Ugotovitev, da med preiskavo vitkih zidov, armiranih z navpično armaturo ob robovih, ni bilo opaziti znakov vrtenja (sliki 28 in 29), smo izkoristili za izboljšanje ciklične strižne preiskave konzolnih zidov iz nearmiranega zidovja. Namesto armature, vgrajene v zid, uporabimo zunanje navpične vezi, ki ne vplivajo na odpornostne lastnosti zidu, pač pa le preprečijo njegovo vrtenje (slika 14).

Če vrtenje preprečujemo z zunanjimi navpičnimi vezmi, samo del navpične sile povzroča hidravlični bat, povezan s tlačnim akumulatorjem, del tlačne sile pa v zid vnašajo zunanje vezi, ki jih pred začetkom ciklične preiskave ustrezno prednapnemo. Da bi navpična sila med preiskavo ostala nespremenjena, v predhodno umerjenih palicah vezi, ki so hkrati dinamometri, merimo sile, tako da silo prednapetja po potrebi prilagodimo začetni ravni.

Slika 15 • **Ciklična strižna preiskava zidu, med katero se s sistemom hidravličnih batov uravnavajo robni pogoji. Zid se poruši strižno brez vrtenja in sekundarnih poškodb. (Fotografija: Arhiv ZAG)**

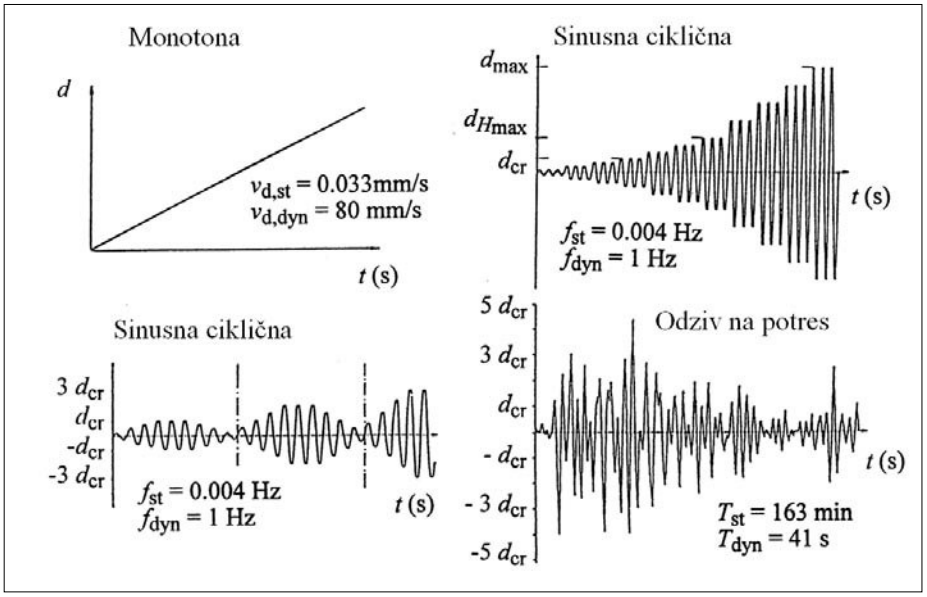
Nedavno smo tehniko preizkušanja na podlagi izsledkov zadnjih preiskav (Triller, 2016) prilagodili dejanskemu stanju v konstrukciji (slika 15). Predlagali smo, da se zid preiskuje kot polno vpet, podobno kot v preizkuševalni napravi s pantografom, vendar smo pantograf nadomestili s togim jeklenim nosilcem, ki mu sistem hidravličnih batov, s katerimi se v zid vnaša tudi navpična obtežba, ne dovoli vrtenja in pomikov navzgor (dvigovanja). Seveda se zaradi preprečenega vrtenja zidu med ciklično strižno preiskavo spreminja velikost tlačne sile, ki pa ne sme v fazah, ko v zidu nastanejo poškodbe in se zid stiska, pasti pod vrednost na začetku preiskave.

2.2 Časovni potek in oblika nanašanja vodoravne obtežbe

Da bi ponazorili ciklični značaj delovanja potresnih sil, ki se navadno vnašajo v obliki programiranih vsiljenih pomikov, se v različnih laboratorijih uporabljajo različne oblike časovnega poteka nanašanja obtežbe (t. i. obtežbeni protokoli). Že pred štirimi desetletji so raziskovalci ugotavljali, kako frekvenca oziroma hitrost nanašanj cikličnih vodoravnih obremenitev vpliva na ugotovljene trdnostne in deformabilnostne lastnosti nearmiranih zidov ((Williams, 1974), (Terčelj, 1977)). Raziskovalci so raziskali in komentirali tudi razlike, ki so jih opazili zaradi različnega časovnega poteka vsiljenih pomikov in vpliva navpične obtežbe (Shing, 1990), raziskovali pa so tudi razlike, nastale zaradi statičnega ali dinamičnega delovanja obtežbe (Paulson, 1990).

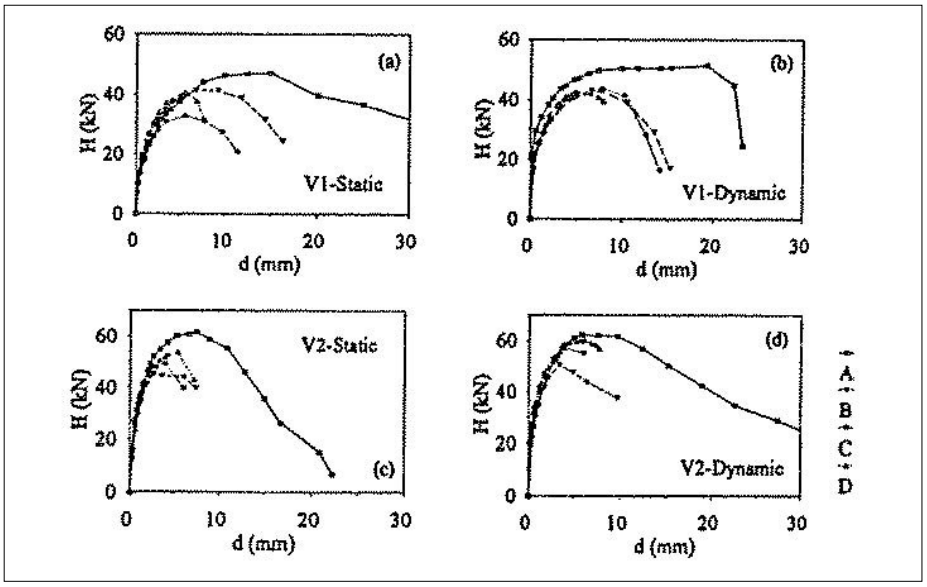
Analiza rezultatov preiskav 32 enakih armiranih zidov, ki smo jih opravili na Zavodu za gradbeništvo, je dodatno potrdila vplive oblike časovnega poteka in hitrosti nanašanja vodoravne obtežbe na rezultate preiskav (Tomaževič, 1996). Med seboj smo pri dveh razmeroma visokih ravneh delovanja navpične obremenitve (razmerje med tlačno napetostjo v zidu in tlačno trdnostjo zidovja je bilo 0,19 oziroma 0,38) primerjali vpliv štirih različnih vrst časovnega poteka delovanja vodoravnih potresnih sil oziroma vsiljenih pomikov (slika 16).

Primerjava rezultatov je pokazala, da vpliva časovnega poteka vodoravne obtežbe ne smemo zanemariti (slika 17). Z monotono preiskavo, tj. med preiskavo s silo, ki enakomerno narašča le v eni smeri, dobimo tako pri statičnem kot dinamičnem vnosu višje vrednosti odpornosti in večje pomike pri porušitvi kot med preiskavo s katerokoli obliko časovnega poteka sile, ki ciklično spreminja smer.



Slika 16 • **Tipične oblike časovnega poteka vsiljenih pomikov, ki se uporabljajo za ponazoritev delovanja potresne obtežbe (Tomaževič, 1996)**

Če med seboj primerjamo vpliv različnih oblik cikličnih časovnih potekov in hitrosti nanašanja vodoravne obtežbe, težko govorimo o očitnih razlikah. Še posebno so bile razlike majhne, če so bili zidovi preiskani pri nižji ravni navpične obremenitve, vodoravna obtežba pa je bila dinamična (slika 17b). Analiza rezultatov je pokazala, da lahko govorimo o trendih: z dinamično preiskavo dobimo višje vrednosti odpornosti kot s statično preiskavo, medtem ko pri izmerjenih deformacijah pri mejnih stanjih, s katerimi opisujemo stanje zidov (mejno stanje nastanka poškodb, maksimalna odpornost), ni bilo opaziti bistvenih razlik. Zato so dinamične togosti višje kot statične, je pa pri dinamičnih obremenitvah manjša sposobnost deformiranja in sipanja energije. Bistvenih razlik, ki bi bile lahko posledica različnih oblik cikličnega obremenjevanja, nismo ugotovili: za uporabnost rezultatov preiskav je pomembno le, da je obtežba cikličnega in ne monotonega značaja.



Slika 17 • **Primerjava krivulj odpornosti, dobljenih s preiskavo enakih zidov z različnimi časovnimi poteki vodoravne obtežbe (A: monotona, B: sinusna ciklična, C: sinusna ciklična, D: odziv na potres) (Tomaževič, 1996)**

V vseh primerih se izkaže, da je odločilni parameter raven navpičnih obremenitev. Pri višjih navpičnih obremenitvah (tlačnih napetostih v zidu, oziroma bolje, razmerju med tlačnimi napetostmi in tlačno trdnostjo zidovja), na sliki 17 označenih z V2, se tako pri dinamičnem kot pri statičnem poteku vseh vrst ciklične obtežbe poveča odpornost zidu, zmanjša pa deformabilnost. Zidovi so pri višji ravni tlačne obremenitve bolj togi kot pri nižji, vendar je na izmerjeno togost vplivala tudi hitrost nanašanja obtežbe. Velikost navpičnih obremenitev je vplivala tudi na porušni mehanizem, predvsem na potek napredovanja poškodb.

Ugotovitve so skladne z ugotovitvami prej omenjenih raziskav pa tudi z novejšimi raziskavami in s predlogi za uskladitev postopkov preizkušanja (Mergos, 2014). Ker z različnimi postopki preizkušanja lahko dobimo različne rezultate, je treba vedeti, da so tudi parametri, ki jih uporabljamo v izračunih potresne odpornosti, dobljeni na način, primerljiv z eksperimentalnimi raziskavami, na podlagi katerih so bili razviti računski postopki.

3 • PREISKAVE MODELOV NA ENOSTAVNIH POTRESNIH MIZAH

Preiskave posameznih elementov konstrukcije niso vedno dovolj, da bi razumeli, kako se stavbe obnašajo med potresi. Osnovna načela potresno odpornega projektiranja predpostavljajo, da se, vsaj pri običajnih konstrukcijah, potresna energija uničuje z njihovim nelinearnim obnašanjem, tj. z nastankom poškodb, ki se zgodijo, če stavbo prizadene projektni potres. Zato ni dovolj, da vemo, kako se stavbe obnašajo v elastičnem, linearnem območju. Poznati moramo tudi mehanizem obnašanja in nastajanja poškodb v neelastičnem, nelinearnem območju. Le tako lahko že v fazi projektiranja zagotovimo, da poškodbe ne bodo nastale na neprimernih mestih, pač pa tam, kjer ne škodijo stabilnosti konstrukcije, in poskrbimo, da njihov obseg ne bo prevelik, sipanje energije pa zadostno. Pri obstoječih konstrukcijah dobimo kvalitativne podatke o vrsti in mestih nastanka poškodb z analizo poškodb po potresih. Da bi informacije kvantificirali, moramo poškodbe, ki smo jih opazili po potresih, ponazoriti s preiskavo celotnih konstrukcijskih sistemov na potresnih mizah. Pri konstrukcijah, ki jih razvijamo na novo, s preiskavo celotnih sistemov ugotavljamo, kaj se bo z njimi dogajalo med potresom, računske modele in konstrukcijske detajle pa prilagodimo ugotovljenim mehanizmom obnašanja.

Razumevanje mehanizma obnašanja v nelinearnem območju ni potrebno samo za razvoj oziroma preverjanje računskih modelov za račun potresne odpornosti, temveč tudi za pripravo postopkov in razvoj opreme za preizkušanje posameznih konstrukcijskih elementov. Če so le-ti preiskani pri pogojih, ki imajo malo skupnega s pogoji, ki so jim elementi izpostavljeni med potresom v konstrukciji stavbe, rezultatov preiskav ne moremo koristno uporabiti pri potresno odpornem projektiranju.

Tehnološki razvoj je omogočil postavitev velikih potresnih miz, na katerih lahko raziskujemo obnašanje večnadstropnih stavb v naravni velikosti. Naprave so sposobne z veliko natančnostjo ponazoriti prostorsko gibanje zabeleženih dejanskih ali računsko generiranih umetnih potresov. Prostorski odziv preizkušane konstrukcije na prostorsko gibanje tal je najbliže odzivu med dejanskim potresom, saj tako gibanje tal povzroča simultane obremenitve elementov v vseh smereh in ne samo v smeri glavnih ravnin, kot je v navadi pri običajnem preizkušanju. Žal so tovrstne preiskave zelo drage: draga je oprema, visoki so stroški njenega vzdrževanja, visoki so pa tudi stroški eksperimentov. Ker si takšne raziskave lahko privoščijo le najbolj razvite potresno ogrožene dežele, se marsikje po svetu, tudi pri nas, še vedno preiskujejo konstrukcije v zmanjšanem merilu.

Modelne preiskave imajo svoje prednosti in pomanjkljivosti. Takšne preiskave so cenejše kot preiskave v naravnem merilu, saj so preizkuševalne naprave, potresne mize, enostavnejše in nemalokrat sestavljive in njihovi sestavni deli služijo večnamenski uporabi. Tudi gradnja modelov je cenejša, čeprav ponazoritev konstrukcije v pomanjšanem merilu ni vedno enostavna. Včasih zahteva zamuden predhodni razvoj modelnih materialov, katerih ustreznost in skladnost z zakoni modelne podobnosti je treba preveriti s posebnimi preiskavami. Vsega tega pri preiskavi prototipov ni. Tehnike fizičnega modeliranja konstrukcij lahko prilagodimo možnostim, vendar to zahteva večjo pazljivost pri interpretaciji rezultatov preiskave.

V splošnem lahko s preiskavami majhnih modelov zidanih stavb zanesljivo raziščemo globalno obnašanje in ugotovimo porušne mehanizme celotnega sistema, ne moremo pa raziskovati obnašanja posameznih elementov in konstrukcijskih detajlov. Ko zmanjšamo dimenzije konstrukcije, se spremenijo vplivi marsikaterega, za obnašanje konstrukcije odločilnega parametra. Vpliva merila na gradiente napetosti in deformacij, sprijemnost med malto in zidaki oziroma malto in armaturo in podobno, pri fizikalnem modeliranju ne smemo zanemariti. Teoretično ni problemov. Pri pripravi materialov in izdelavi modela pa včasih naletimo na nepremostljive težave. Zato je v večini primerov velikost modela odvisna prav od možnosti, da s še sprejemljivo napako modeliramo vpliv teh parametrov, za vsak primer sproti pa ustreznost tudi dokažemo s spremljajočimi študijami in preiskavami.

S potresnim vzbujanjem modelov zidanih stavb v eni sami smeri laže ugotavljamo osnovne mehanizme obnašanja konstrukcije. Vendar pri tem ne smemo pozabiti, da včasih simultano delovanje potresnih sil v drugih smereh (pravokotno na ravnino zidov, v navpični smeri) vpliva na ugotovljene mehanizme. Natančnost ponazoritve potresnega gibanja tal je tehnološki problem krmiljenja preiskave. Kot kažejo izkušnje, je bolj pomembno, da ima gibanje potresne mize spektralne karakteristike, podobne karakteristikam dejanskih potresov, kot da je časovni potek gibanja natančna replika izmerjenega časovnega poteka pospeškov potresa. Za analize odziva modela ni toliko pomembno ujemanje med programiranim in dejanskim gibanjem mize, saj se moramo zavedati, da se potresi s popolnoma enakimi dinamičnimi lastnostmi, trajanjem in časovnimi potekom pospeškov nikoli več ne bodo ponovili. Ko analiziramo obnašanje modela, za vhodne podatke za račun vedno upoštevamo izmerjeni časovni potek gibanja potresne mize, in ne numeričnih podatkov, s katerimi smo krmilili gibanje mize.

S preiskavo modelov stavb na potresni mizi poskušamo ponazoriti pojave, ki smo jih ugotovili na stavbah med potresom, pri tem pa merimo fizikalne veličine, s katerimi nastanek pojavov lahko ovrednotimo. Za uspeh preiskave je ključnega pomena podobnost med mehanizmom obnašanja dejanske stavbe med potresom in njenega modela med preiskavo na potresni mizi. Vrsta in potek nastajanja poškodb ter način porušitve morajo biti podobni. Če je tako in če poznamo robne

pogoje in sile, ki so med preiskavo delovale na model, lahko na podlagi podatkov, izmerjenih na modelu, dokaj zanesljivo napovemo tudi obnašanje prototipne konstrukcije med podobnim potresom.

3.1 Modelni materiali, modeli in modelna podobnost

Podrobnejše napotke o tehnikah modeliranja in pogojih modelne podobnosti najdemo v ustrezni literaturi (npr. (Carvalho, 1998), (Harris, 1999)). Osnovne odvisnosti med fizikalnimi veličinami, izmerjenimi na prototipu in modelu, faktorji merila, se določijo na podlagi dimenzionalne analize (Langhaar, 1951) in so odvisne predvsem od mehanskih lastnostih modelnih materialov in merila modeliranja.

Če na modelu izmerimo splošno fizikalno veličino q_M, med njo in pripadajočo veličino na prototipu, q_P, obstoji korelacija:

$$q_P = q_M S_q , \qquad (1)$$

kjer je S_q faktor merila za dano fizikalno veličino. Od tega, kako se bomo lotili izdelave modela, bodo odvisne tudi korelacije med fizikalnimi veličinami, izmerjenimi na modelu, in pripadajočimi veličinami na prototipu.

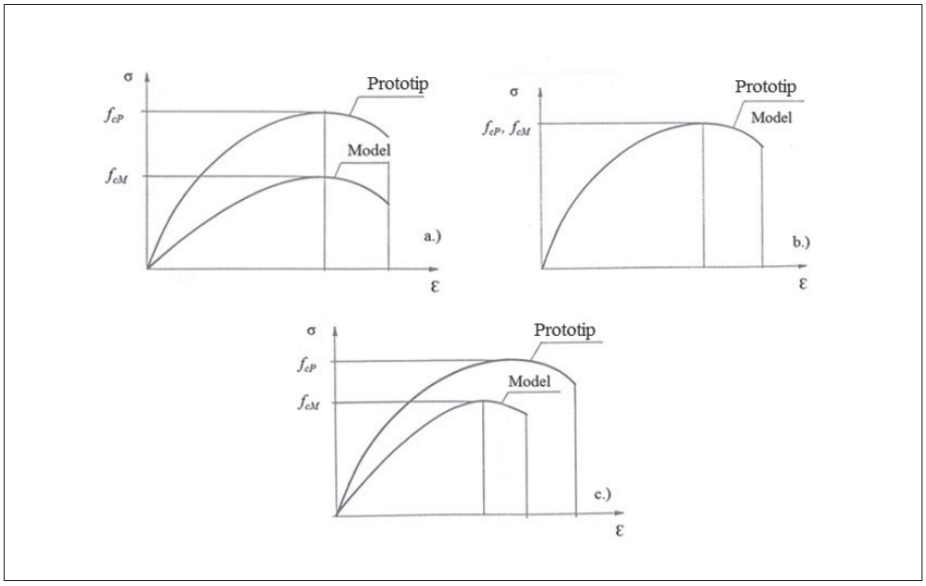
Če raziskujemo obnašanje konstrukcije v elastičnem območju in pri statičnih obtežbah, so odvisnosti med veličinami na modelu in prototipu enoznačne in enostavne. Odvisnosti postanejo kompleksnejše, če raziskujemo dinamično obnašanje, še posebno dinamično obnašanje v nelinearnem območju, in porušne mehanizme. Če želimo zanesljivo ponazoriti obnašanje, moramo skrbno izbrati modelne materiale in jim včasih prilagoditi tudi metode preizkušanja.

Glede na razmerja med mehanskimi lastnostmi modelnih in prototipnih materialov so za izdelavo modela na razpolago tri možnosti: če model izdelamo iz materialov, katerih trdnostne lastnosti (f) zmanjšamo v geometrijskem merilu (merilu dolžin, S_L), pri čemer preostale lastnosti, kot so deformacije (ε), specifična masa (γ) in materialno dušenje (υ), ostanejo enake kot pri prototipu, pravimo, da smo izdelali popolni model (slika 18a). Če za izdelavo modela uporabimo kar prototipne materiale, govorimo o enostavnem modelu (slika 18b). Izkušnje kažejo, da največkrat nekatere mehanske veličine modeliramo v ustreznem merilu, druge pa ne. Tak model imenujemo popačeni oziroma splošni model (slika 18c).

Teoretično dobljeni faktorji meril za najpomembnejše fizikalne veličine, ki določajo dinamično obnašanje konstrukcij, so navedeni v preglednici 1. V njej so poleg faktorjev, ki veljajo za popolne in enostavne modele, navedene tudi splošne enačbe, ki veljajo za pretvorbo fizikalnih veličin v primeru popačenih modelov.

Da bi dobili pri dinamičnih preiskavah v nelinearnem območju zahtevano podobnost, morata bi izpolnjena dva osnovna pogoja:

- porazdelitev mas in togosti po višini modela mora biti podobna kot pri prototipu, podobna porazdelitev zagotavlja podobno dinamično obnašanje;
- razmerje med delovnimi tlačnimi napetostmi v zidovih in tlačno trdnostjo zidovja mora biti pri modelu in prototipu enako, kar zagotavlja, da bodo tudi porušni mehanizmi podobni.



Slika 18 • **Odvisnosti napetosti/deformacije med materiali modelov in prototipov: a) popolni model, b) enostavni model, c) popačeni model**

Veličina	Popolni model	Enostavni model	Popačeni model
dolžina *(L)*	S_L	S_L	$S_L = L_P / L_M$
deformacija *(ε)*	*1*	*1*	$S_\varepsilon = \varepsilon_P / \varepsilon_M$
trdnost *(f)*	S_L	*1*	$S_f = f_P / f_M$
napetost *(σ)*	S_L	*1*	$S_\sigma = f_P / f_M$
Youngov modul *(E)*	S_L	*1*	$S_E = S_\sigma / S_\varepsilon$
specifična masa *(γ)*	*1*	*1*	$S_\gamma = \gamma_P / \gamma_M$
sila *(F)*	S_L^3	S_L^2	$S_F = S_L^2 S_f$
čas *(t)*	$\sqrt{S_L}$	S_L	$S_t = S_L \sqrt{S_\gamma S_\varepsilon / S_f}$
frekvenca *(ω)*	$1/\sqrt{S_L}$	$1/S_L$	$S_\omega = 1/S_L$
pomik *(d)*	S_L	S_L	$S_d = S_L S_\varepsilon$
hitrost *(v)*	$\sqrt{S_L}$	*1*	$S_v = S_\varepsilon \sqrt{S_f / S_\gamma}$
pospešek *(a)*	*1*	$1/S_L$	$S_a = S_f / S_L S_\gamma$

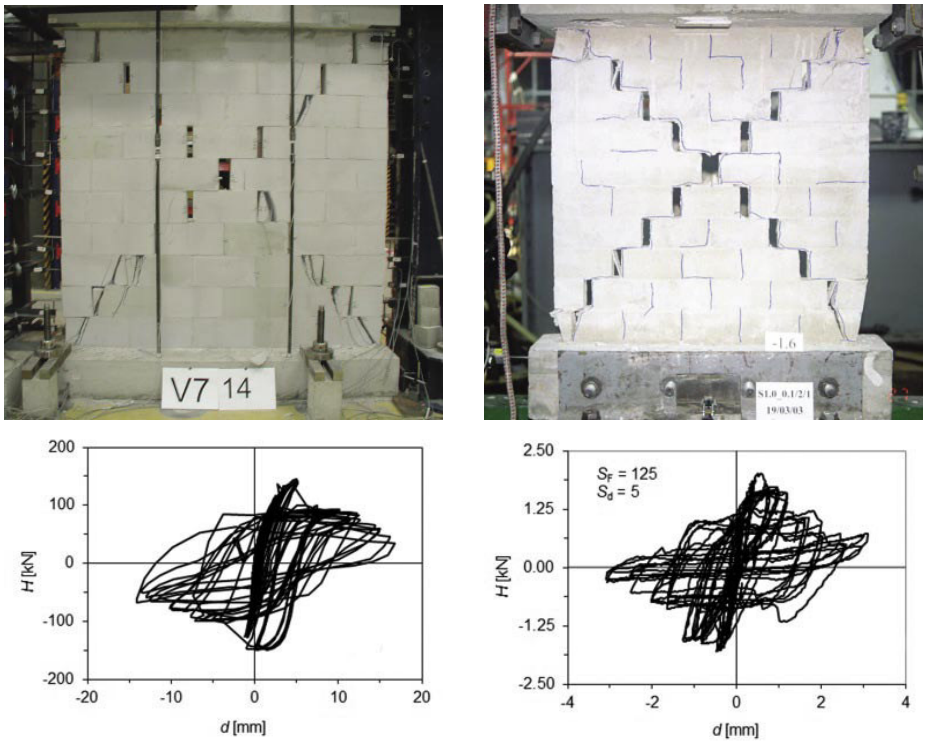
Preglednica 1 • **Tipični faktorji merila**

Če sta oba pogoja izpolnjena, bosta odziv na potres in porušni mehanizem prototipne konstrukcije podobna odzivu in porušnemu mehanizmu, ugotovljenemu s preiskavo modela na potresni mizi. Vrednosti fizikalnih veličin, ki bi jih v podobnih razmerah lahko pričakovali na prototipni konstrukciji, dobimo s pretvorbo na modelu izmerjenih vrednosti v skladu z zakoni modelne podobnosti. Medtem ko je doseganje podobnosti dinamičnega obnašanja za sklepanje o porušnem mehanizmu prototipa manj pomembno, je treba vedno poskrbeti, da zaradi nedoseganja podobnosti napetostnih razmer v konstrukciji modela in prototipa ne bi prišli do napačnih sklepov.

Modelne materiale običajno izdelamo po načelu postopnega približevanja ciljnim lastnostim. Pri zidanih konstrukcijah navadno velja, da – čeprav mehanske lastnosti zidakov in malte ustrezno modeliramo – ni nujno, da bodo avtomatično, z enakim faktorjem merila modelirane tudi lastnosti zidovja. Zato končno razmerje med modelnim in prototipnim zidovjem ocenimo na podlagi primerjave rezultatov tlačnih in cikličnih strižnih preiskav prototipnih in modelnih zidov, ki jih izvedemo pred preiskavo na potresni mizi. Ker nas zanima obnašanje pri potresni obtežbi, poleg trdnostnih lastnosti zidovja primerjamo tudi mehanizme napredovanja poškodb in porušitve kakor tudi zmožnost deformiranja in sipanja energije (slika 19).

Pri popolnem modelu se podobnost porazdelitve mas po višini in podobnost razmerja med tlačnimi napetostmi v zidovih in tlačno trdnostjo zidovja dosežeta avtomatično, s tem ko na strope modela pritrdimo maso, s katero modeliramo manjkajočo stalno in koristno obtežbo. V ta namen navadno uporabimo svinčene ali jeklene ingote, v nekaterih primerih tudi betonske bloke, ki jih z vijaki togo pritrdimo na strope (slika 20). Pri enostavnih modelih imamo težave, saj z masami, ki bi jih morali dodati za izpolnitev pogojev podobnosti dinamičnega obnašanja, ne izpolnimo pogojev podobnosti razmerja tlačna napetost–trdnost oziroma podobnosti porušnih mehanizmov. Ker ta pogoj odločujoče vpliva na porušni mehanizem ((Turnšek, 1970), (Mann, 1982)), ga izpolnimo s tem, da dodatne tlačne napetosti v zidove vnesemo tako, da ne porušimo podobnosti dinamičnega obnašanja.

Običajno to storimo s prednapetjem (slika 21). Da mehanizem, ki vnaša silo prednapetja, ne bi oviral nihanja, uporabimo jeklene žične vrvi, ki jih na spodnji strani pritrdimo v temelj modela, na zgornji strani pa silo prednapetja med preiskavo vzdržujejo konstantno mehke



Slika 19 • **Podobnost med stanjem poškodb pri mejnem stanju porušitve in podobnost histereznih odvisnosti sila–pomik pri prototipnem (levo) (Oetes, 2006) in modelnem zidu (desno) potrjujeta ustreznost izbire modelnih materialov za zidanje popolnega modela v merilu 1 : 5 (po (Tomaževič, 2010))**

Slika 20 • **Svinčeni ingoti, pritrjeni na strop popolnega modela opečne stavbe brez zidnih vezi. Porušitev je nastala zaradi razdvajanja nepovezanih zidov. (Fotografija: M. Tomaževič)**

Slika 21 • **Manjkajoče tlačne napetosti v enostavnem modelu armirane zidane stavbe je ustvarilo brezmasno prednapetje. Med preiskavo je prevladoval upogibni porušni mehanizem. (Fotografija: M. Tomaževič)**

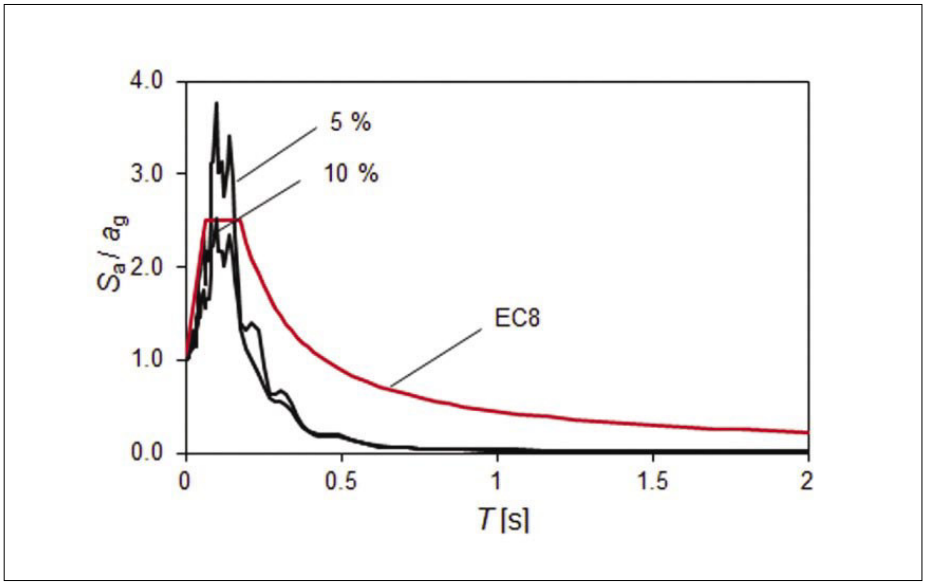
vzmeti, katerih stisnjenje ali raztezki med nihanjem modela le malo vplivajo na velikost sile v vrveh. Meritve med preiskavo in izračuni so pokazali, da je vpliv mehanizma za prednapetje na odziv modela razmeroma majhen. Vrvi praktično ne vplivajo na togost, ker pa so vodoravni pomiki zgornjega roba modela med preiskavo majhni (red velikosti do 5 % višine modela), so majhne tudi nastale vodoravne komponente sile prednapetja, dodatne prečne sile, ki med nihanjem delujejo na model. V večini primerov lahko vpliv vrvi za prednapetje na dinamične lastnosti modela zanemarimo (Tomaževič, 1992).

3.2 Potresna miza in modeliranje potresnega gibanja tal

Ideja, da se za raziskave obnašanja konstrukcij zidanih stavb pri potresih lahko uporablja tudi enostavna, enosmerna delujoča potresna miza, ki jo poganja večnamenski hidravlični bat, je bila podprta z naslednjimi premisleki ...

Čeprav je gibanje tal med potresom prostorsko in je prostorskega značaja tudi odziv konstrukcij na potres, navpične komponente potresnega gibanja tal na odziv pravilnih konstrukcij, med katere večinoma spadajo tudi zidane stavbe, nimajo odločilnega vpliva. Večino pomembnih podatkov dobimo s potresnim vzbujanjem v eni od glavnih smeri konstrukcije (tako pravilne konstrukcije še vedno tudi računamo). Če je treba, lahko konstrukcijo oziroma model zavrtimo in preiščemo z delovanjem potresa v poševni smeri.

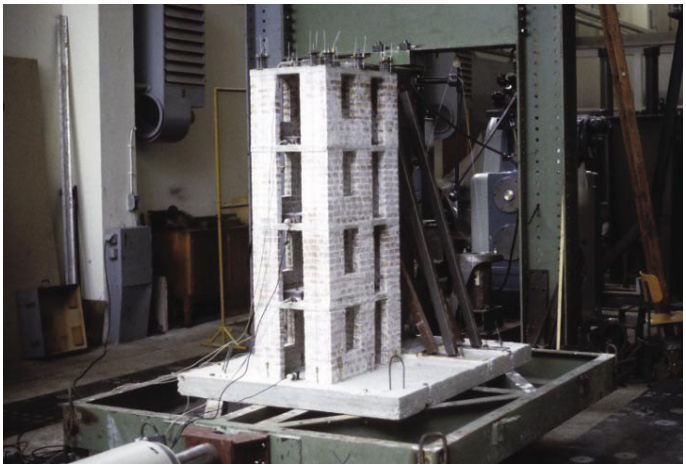
Potresno gibanje tal je stohastičen pojav, katerega značilnosti so odvisne od mehanizma nastanka potresa in lokalnih pogojev tal. Kot determinističen pojav se isti potres nikoli več ne bo ponovil. Zato se o tem, s kakšnim oziroma s katerim že zabeleženim potresom bomo preizkusili model, navadno odločimo na podlagi podobnosti med spektrom odziva pospeškov, ki ga za projektiranje konstrukcij predpisujejo predpisi, in spektrom odziva pospeškov, ki ga izračunamo na podlagi časovnega zapisa poteka pospeškov med dejanskim potresom (slika 22). Namesto zapisa časovnega poteka pospeškov tal se za pogon potresne mize večkrat uporabijo tudi na podlagi predpisanega spektra odziva računsko generirani akcelerogrami.



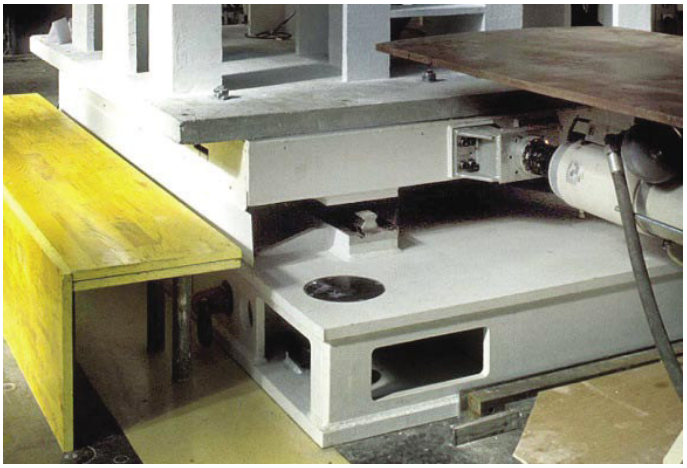
Slika 22 • **Spekter odziva N-S-komponente zapisa pospeškov tal v Petrovcu med potresom v Črni gori leta 1979 se razmeroma dobro ujema s projektnim spektrom odziva po Evrokodu 8, če trajanje potresa skrajšamo za polovico (po (Tomaževič, 2010))**

Ko je akcelerogram izbran, simulacija gibanja tal tehnično več ne povzroča težav. Za pogon potresne mize se uporablja časovni potek pomikov, ki ga dobimo z dvakratno integracijo časovnega poteka pospeškov.

Tradicija raziskav obnašanja zidanih stavb s preiskavami modelov na potresni mizi je na Zavodu stara že 50 let. Obenem z zasnovo in izdelavo naprave za ciklične strižne preiskave zidov so na Zavodu zasnovali in s pomočjo švicarskega dobavitelja opreme, podjetja Amsler, tudi sestavili eno prvih, če ne celo prvo takšno potresno mizo v Evropi (Turnšek, 1969). Potresno mizo, v vodoravni in navpični smeri vodeno ploščad, podprto z valjčnimi ležaji, je na začetku poganjal sistem dveh enosmerno delujočih hidravličnih batov, kasneje pa en sam dvosmerno delujoči pro-



Slika 23 • **Model štirietažne zidane stavbe iz nearmiranega zidovja je bil izdelan v merilu 1 : 7 iz v ta namen razvitih modelnih zidakov (Tomaževič, 1987). (Fotografija: M. Tomaževič)**

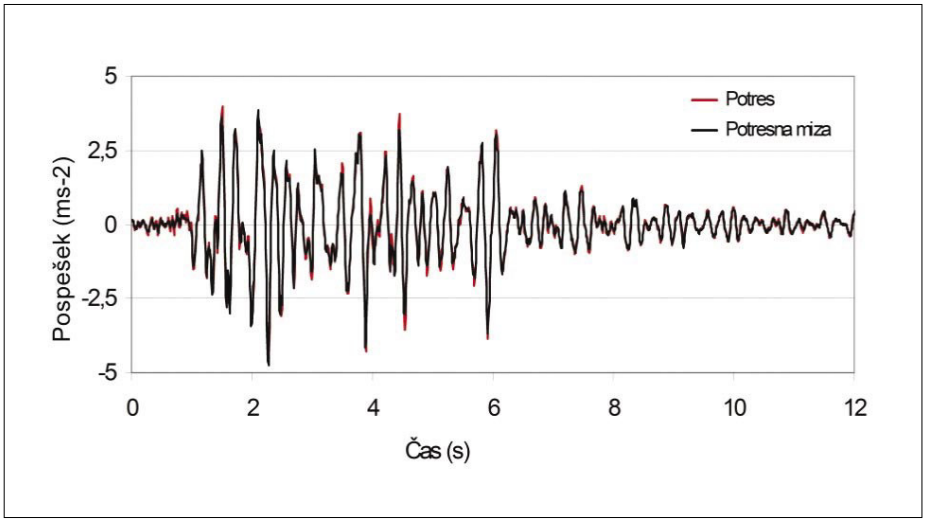


Slika 24 • **Detajl potresne mize na ZAG: fiksna in pomična jeklena ploščad s hidravličnim batom za pogon mize (Fotografija: Arhiv ZAG)**

gramski bat. Ploščad je bila zaradi manjše mase izdelana kot ležeča palična konstrukcija, na katero se je pritrdil temelj z modelom. Enega prvih modelov, preiskanih na tej potresni mizi, prikazuje slika 23. Model zidane stavbe v merilu 1 : 7 je bil izdelan iz posebej razvitih modelnih zidakov, ki so ustrezali pogojem popolne modelne podobnosti (Boštjančič, 1975). Ker se je izkazalo, da je merilo za resnejše raziskave premajhno, izdelava posebnih zidakov pa predraga, so bile preiskave tako majhnih modelov kasneje opuščene, saj je nova preizkuševalna oprema omogočala tudi preiskave večjih modelov.

Današnja potresna miza na Zavodu je še vedno skromna in enostavna (slika 24). Sestavljata jo toga jeklena temeljna škatlasta konstrukcija, ki se z vijaki pritrdi na laboratorijski preizkuševalni temelj, in ravno tako jeklena škatlasta, pomična ploščad dimenzij 2,0/3,2 m, ki med preiskavo drsi po škatlastem temelju in na katero se pritrdi temelj modela. Jeklena tračna vodila in teflonska ležišča zagotavljajo, da je gibanje ploščadi res enosmerno, brez bočnih pomikov ali zasukov, ter da je trenje med pomičnim in fiksnim delom naprave minimalno.

Hidravlični programski bat za pogon mize, katerega gibanje se krmili s pomiki, izračunanimi z dvojno integracijo časovnega poteka izbranega modelnega akcelerograma, se pritrdi na jekleno oporno steno. Za pogon potresne mize z modelom se uporabljata bata zmogljivosti 160 oziroma 200 kN z razponom pomikov ± 125 mm oziroma ± 250 mm, povezana s hidravlično črpalko zmogljivosti 245 l/min. pri tlaku 280 barov.



Slika 25 • **Primerjava med časovnim potekom pospeškov, uporabljenim za račun pomikov potresne mize, in izmerjenim časovnim potekom pospeškov mize med preiskavo (popolni model v merilu 1 : 4, gnana masa 3000 kg) (po (Tomaževič, 2010))**

Analiza delovanja potresne mize na ZAG je med kalibracijskim procesom pokazala, da se pospeški, med preiskavo izmerjeni na potresni mizi, zelo dobro ujemajo s pospeški potresa, ki služijo kot vhodni podatek za račun pomikov za krmiljenje gibanja mize (slika 25). Kalibracija potresne mize, izvedena z upoštevanjem zmogljivosti pogonskega bata, gibajoče se mase (mase modela in njegovega temelja ter mase pomične platforme) in izbranega merila modeliranja, je pokazala, da je pomična ploščad (miza) tudi dovolj toga, da prevzame upogibne obremenitve, ki med preiskavo nastanejo kot posledica interakcije med modelom in ploščadjo.

4 • NAMESTO SKLEPA: ZAKAJ EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE? NEKAJ PRAKTIČNIH REZULTATOV

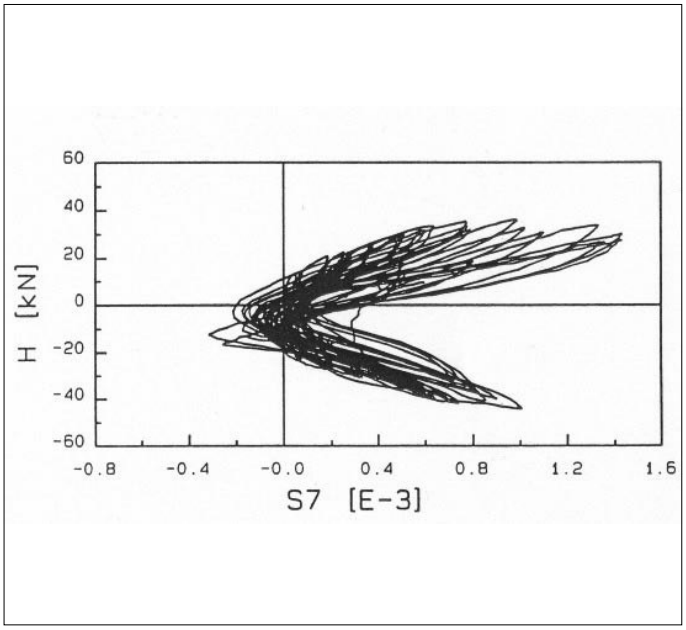
4.1 Zidovje, armirano z armaturo v zidakih

Zidovje je kompozitni konstrukcijski material, ki dobro prenaša tlačne obremenitve, ne pa nateznih in strižnih sil, ki med potresom nastanejo v konstrukcijskih elementih. Pri strižni porušitvi se zidovi obnašajo krhko, z ustreznim armiranjem pa naj bi se za potresno odpornost sodobnih zidanih stavb neugodno strižno obnašanje zidov spremenilo v upogibno, kar bi zidovom in konstrukciji omogočilo večjo duktilnost oziroma večjo sposobnost deformiranja in sipanja energije. Ideja se odraža tudi v standardih za projektiranje, v Evrokodu 8, ki med vsemi sistemi zidanja priporočajo največje vrednosti faktorja obnašanja q (faktorja redukcije elastičnih sil) prav za armirane zidane konstrukcije.

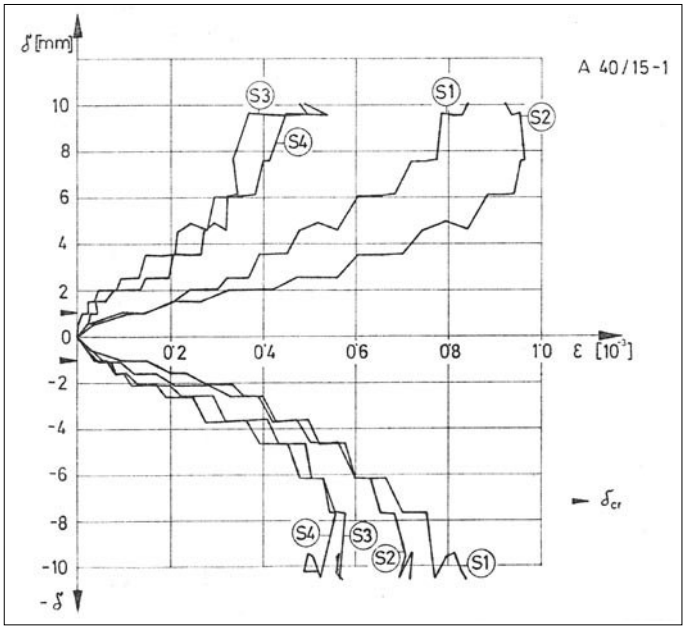
Sistemov armiranja je po svetu več, pri nas pa armiranega zidovja v praksi tako rekoč ne poznamo, čeprav so bili nekateri sistemi izboljšanja potresne odpornosti zidovja z armiranjem predlagani že v 70. letih in so že jugoslovanski potresni predpisi iz leta 1981 (Pravilnik, 1981) z manjšimi omejitvami kot pri drugih sistemih zidanja dajali prednost armiranemu zidovju. Če že, poznamo armirano zidovje iz votlakov z vodoravno armaturo v naležnih regah, morda v vodoravnih utorih v naležnih ploskvah, in navpično armaturo, ki je vložena v posebej za to izdelane luknje v votlakih in zalita z betonom oziroma betonsko zalivno maso. Čeprav so razlike med posameznimi sistemi armiranja velike in so temu primerne tudi razlike v obnašanju pri potresnih silah, predpisi, tudi Evrokod 6, v svojih določilih med njimi ne delajo razlik. Za račun odpornosti in dimenzioniranje zidov brez kritičnega premisleka predpisujejo za vse sisteme armiranja enake enačbe, ki so bile izpeljane na podlagi analogije z armiranim betonom. Da bi preverili veljavnost predpisanih enačb za primer zidovja z armaturo v zidakih (angl. reinforced hollow unit masonry), smo pred leti v laboratoriju preiskali večje število zidov, armiranih z različnimi količinami navpične robne armature in različnimi količinami v naležne rege vložene vodoravne armature.

Na tem mestu se ne bomo spuščali v podrobnosti, pač pa ponovili le najpomembnejše ugotovitve, ki smo jih dobili tako z analizo izmerjenih podatkov o delovanju armature kot tudi s primerjavo porušnih mehanizmov in primerjavo izmerjene odpornosti z računom po predpisanih računskih modelih.

Tako smo pri kratkih zidovih, ki se strižno porušijo, ugotovili, da se z armiranjem z navpično armaturo ob robovih in vodoravno armaturo v naležnih regah odpornost ne poveča v meri, ki jo vodoravni armaturi pripisujejo enačbe v predpisih. Analiza deformacij armature in primerjava nastalih sil z izmerjeno krivuljo odpornosti zidov je pokazala,

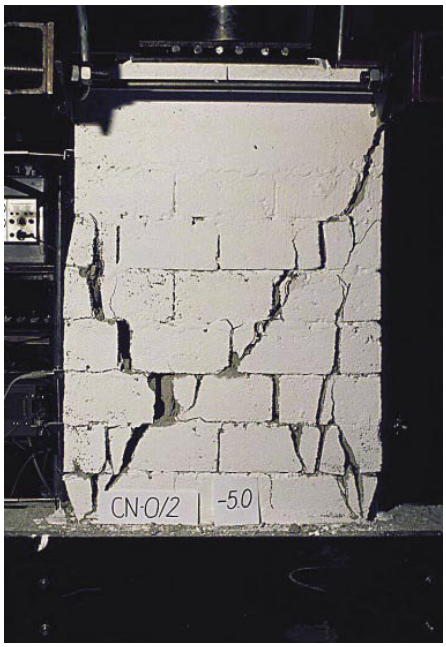


Slika 26 • **Odvisnosti vodoravna sila/deformacije v vodoravni armaturi, ki kažejo, da vodoravna armatura deluje v nategu (Tomaževič, 1985)**



Slika 27 • **Odvisnosti vodoravni pomik zidu/deformacije v vodoravni armaturi, ki kažejo, da se po deformaciji zidu na meji razpok deformacije armature ne povečujejo (Tomaževič, 1985)**

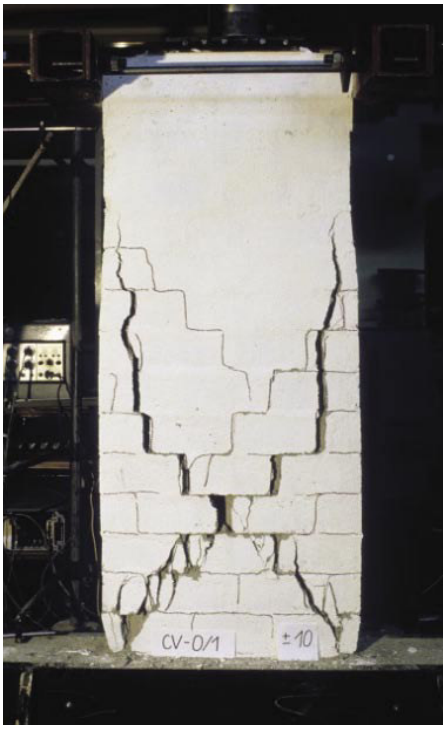
da armatura sicer ves čas deluje v nategu, kot se pričakuje (slika 26), vendar pri tem samo preprečuje razpadanje s poševnimi razpokami med seboj ločenih delov zidu. Čeprav se (specifične) deformacije armature po nastanku razpok ne povečujejo bistveno (slika 27), vodoravna armatura prevzema čedalje večji delež vodoravne sile, ki deluje na zid. Strižna odpornost vodoravno armiranega zidu je sicer večja kot odpornost referenčnega nearmiranega zidu, vendar stopnja povečanja zaradi zgodnje porušitve sprijemnosti in neučinkovitega sidranja ne doseže tiste, ki jo predvidevajo enačbe v predpisih. Armatura spremeni porušni mehanizem (sliki 28 in 29) in kljub strižni porušitvi poveča duktilnost zidu. Vendar je za to dovolj že količina armature (minimalni odstotek armiranja), ki po nosilnosti ne presega pričakovane strižne odpornosti osnovnega zidu. Armiranje z navpično armaturo in premočna vodoravna armatura sta odveč. Raziskave so pokazale, da morajo za učinkovito delovanje armature imeti ustrezne lastnosti (robustnost) tudi zidaki, osnovni pogoj za njeno aktiviranje pa je ustrezna sprijemnostjo med malto in armaturo in učinkovito sidranje vodoravne armature na konceh. Pri enačbah v predpisih, s katerimi računamo strižno odpornost na tak način armiranega zidovja, je treba biti previden, oziroma prispevek vodoravne armature, ki je v predpisu upoštevan s celotno natezno nosilnostjo, zmanjšati z ustreznim redukcijskem faktorjem. Navpična armatura pri strižni porušitvi zidu prispeva k odpornosti z mozničnim učinkom.



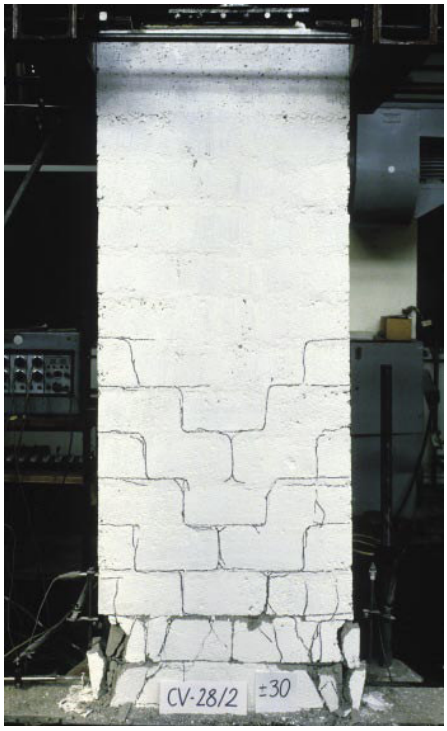
Slika 28 • **Strižna porušitev nizkega zidu, armiranega z navpično armaturo ob robovih (Fotografija: M. Tomaževič)**

Slika 29 • **Duktilna strižna porušitev nizkega zidu, armiranega z navpično armaturo po robovih in vodoravno armaturo v naležnih regah (Fotografija: M. Tomaževič)**

Analiza odvisnosti vodoravna sila–pomik pri visokih zidovih, ki so bili dimenzionirani na upogib, kaže, da se tak zid obnaša po predvidevanjih samo v primeru, ko je obenem z navpično robno, upogibno armaturo armiran tudi z vodoravno armaturo v naležnih regah, ki je zmožna povečati strižno odpornost zidovja v tolikšni meri, da se upogibna armatura aktivira. Če vodoravne armature ni, se zid poruši strižno, kot da ni armiran z navpično armaturo (slika 30).



Slika 30 • **Zid, armiran samo z robno navpično armaturo, se je porušil strižno. (Fotografija: M. Tomaževič)**

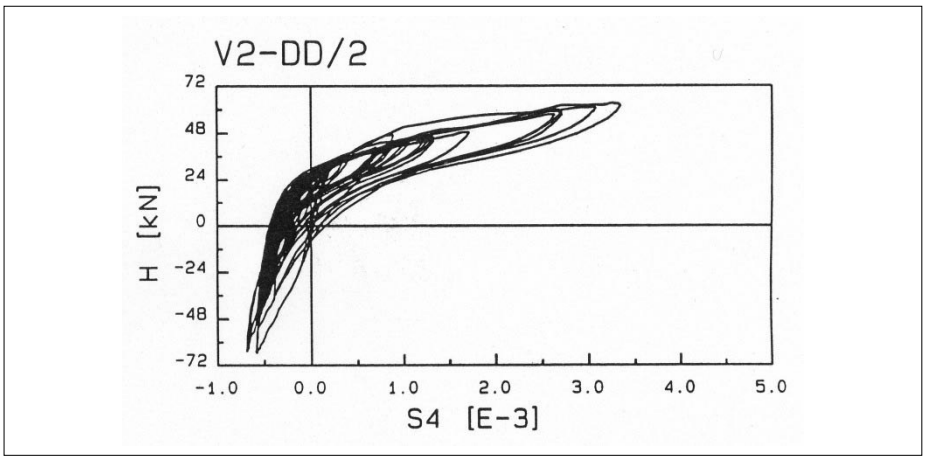


Slika 31 • **Zid, armiran z robno navpično in vodoravno armaturo v naležnih regah, se je porušil upogibno. (Fotografija: M. Tomaževič)**

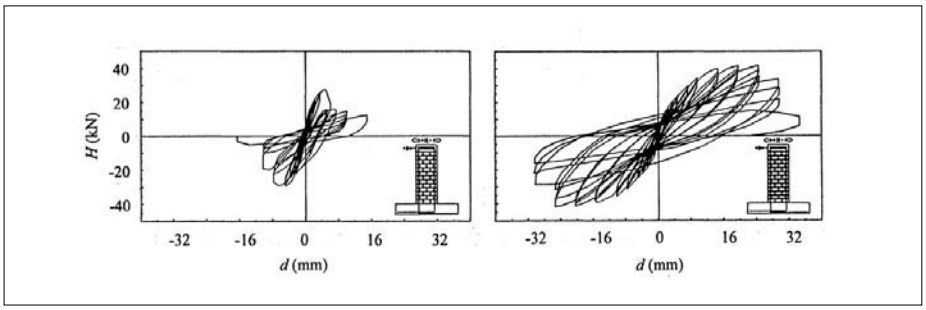
Meritve deformacij navpične armature so pokazale, da v primeru, ko je zid armiran tudi z vodoravno armaturo v naležnih regah, armatura deluje tako kot v armiranobetonskem stebru, izpostavljenem podobnim obremenitvam (slika 32), tako da lahko brez posebnih zadržkov uporabljamo enačbe za račun odpornosti, ki jih predlagajo predpisi. V kolikšni meri ustrezna vodoravna armatura v naležnih regah izboljša obnašanje zidu, ki se poruši upogibno, prikazuje slika 33. Slika ne potrebuje komentarja.

4.2 Robustnost votlakov

Ne samo pri nearmiranem zidovju, kjer lokalna krhka porušitev in drobljenje votlakov pomenita tudi krhko, neduktilno porušitev zidu, ampak tudi pri armiranem zidovju je pomembno, da so zidaki sposobni prevzeti obremenitve, ki so posledica armiranja in drugačne porazdelitve notranjih sil v zidu, kot v primeru, ko zid ni armiran. Če so zidaki šibki (slika 34), se kljub morebitni dobri sprijemnosti med armaturo in malto in ustreznim sidranjem armature le-ta med potresom ne more aktivirati. Zid se poruši, kot da sploh ni armiran.



Slika 32 • **Odvisnosti vodoravna sila/deformacije v navpični robni armaturi zidu**



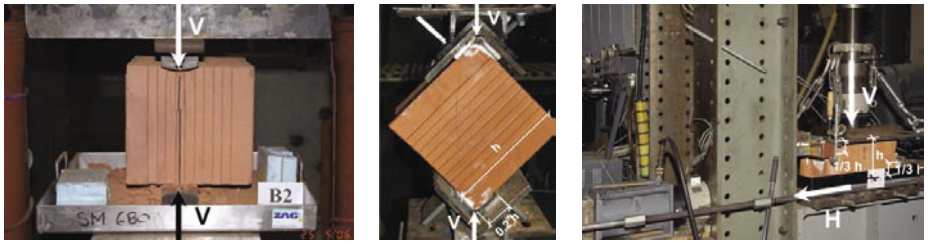
Slika 33 • **Histerezne odvisnosti sila–pomik, ki kažejo vlogo vodoravne armature v naležnih regah pri upogibni porušitvi zidu. Levo: zid brez vodoravne armature (slika 30), desno: zid z armaturo v naležnih regah (slika 31) (Tomaževič, 1988)**

Slika 34 • **Krhka porušitev celotne vrste betonskih votlakov že na začetku preiskave zidu z močno upogibno armaturo in armaturo v žlebovih naležnih reg (Fotografija: M. Tomaževič)**

Da se lokalni krhki votlaki ne bi porušili, Evrokod 8 zahteva, da »morajo biti zidaki dovolj robustni, da se prepreči lokalna krhka porušitev«, medtem ko prepušča nacionalnemu dodatku, da »lahko izbere tip zidakov po SIST EN 1996-1:2006, tabela 3.1, ki ustrezajo« zahtevi, da so dovolj robustni.

Brez trdne podlage in fizikalnih kriterijev je izbira, kot jo predlaga standard, lahko zelo vprašljiva. Da bi pripravili argumentirani predlog za nacionalni dodatek, smo pred nedavnim opravili obširno raziskavo, v okviru katere smo na šestih tipih opečnih votlakov, ki jih različni proizvajalci ponujajo na trgu, z različnimi preiskavami zidakov poskušali ugotoviti, s katerim trdnostnim parametrom bi lahko najbolje opisali robustnost. Namen raziskave je bil ugotoviti, kako oziroma s kakšno vrsto enostavne preiskave bi vrednost parametra lahko določili in seveda tudi predlagali minimalno vrednost, ki bi jo morali doseči votlaki, namenjeni zidanju na potresnih območjih. Da bi raziskali, kako se izbrani zidaki obnašajo v zidovju, smo iz vsakega tipa votlakov sezidali tudi zidove običajnih dimenzij in jih pri dveh ravneh navpične obtežbe preiskali s ciklično vodoravno obtežbo (Tomaževič, 2012). Pri tem je treba povedati, da zaradi tega, ker imajo vsi proizvajalci opečnih izdelkov podobne cilje (energetsko učinkovitost ob zadostni nosilnosti za prevzem navpične obtežbe), ki jih dosegajo na podoben način in s podobnimi tehnologijami, pri čemer se bolj ali manj držijo predpisanih geometrijskih omejitev, med preizkušenimi zidaki pri votlavosti in debelini sten ni bilo bistvenih razlik.

Na posameznih zidakih smo poleg tlačne trdnosti pravokotno in vzporedno z naležnimi regami, ki smo ju preiskali po standardu, merili tudi razcepno in diagonalno natezno trdnost, s posebej zasnovano napravo pa tudi prestrižno trdnost vzporedno z naležno površino (slika 35).



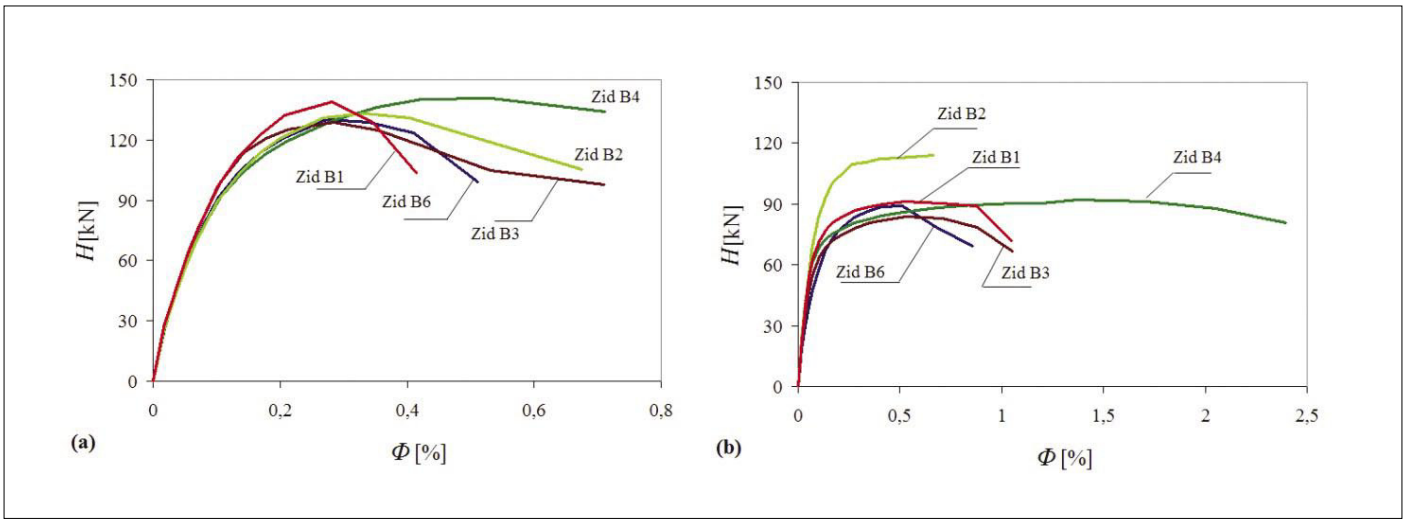
a.) b.) c.)

Slika 35 • **Preiskave trdnostnih lastnosti votlakov za določitev ustrezne robustnosti: a) razcepna trdnost, b) diagonalna natezna trdnost, c) prestrižna trdnost (po (Tomaževič, 2012) (Fotografije: Arhiv ZAG)**

Preiskave posameznih zidakov so pokazale, da razmerje med tlačno trdnostjo, vzporedno z naležnimi regami, in tlačno trdnostjo, pravokotno nanje, kaže trend spreminjanja razmerja z zmanjšanjem prostornine lukenj. Vse druge vrednosti so bile preveč podobne, razlike v votlavosti pa premajhne, da bi lahko sklepali, kako nanje vpliva votlavost.

Ciklične strižne preiskave zidov pa so pokazale, da za določitev »ustrezne robustnosti« v danih pogojih niso toliko pomembni zidaki – ti so v primerjavi z votlaki, ki so se uporabljali pred desetletji, sicer vsi po vrsti krhki – kot pa raven tlačne obremenitve v zidovih. Na sliki 36 so prikazane ovojnice odpornosti zidov, sezidanih iz preiskanih tipov votlakov, preiskanih pri dveh ravneh navpičnih obremenitev: pri tlačnih napetostih v velikosti 30 % in 15 % tlačne trdnosti zidovja. Na sliki se ponovno lepo vidi vpliv tlačnih obremenitev na obnašanje zidov pri ciklični strižni obtežbi: čeprav višje tlačne napetosti precej povečajo odpornost, je bilo v raziskanih razmerah zmanjšanje deformabilnosti in sipanja energije tolikšno, da istih votlakov pri visokih tlačnih obremenitvah ne moremo več priporočiti za gradnjo stavb na potresnih območjih, čeprav bi jih lahko glede na tlačno trdnost na območjih, kjer potresov ni pričakovati, precej bolje izkoristili.

Eksperimentalne raziskave so pokazale, da zidaki, ki se obnašajo monolitno pri nizkih obremenitvah, postanejo krhki pri kombinaciji visokih tlačnih in strižnih, potresnih obremenitev. Raziskave kažejo, da bi bilo po predlogu Evrokoda 8 težko izbrati robusten votlak. Kot lahko sklepamo na podlagi rezultatov opravljenih raziskav, bo pogoj za ustrezno robustnost izpolnjen, če v zidovih, sezidanih iz votlakov skupine 2 po preglednici 3.1 v Evrokodu 6, razmerje med dejanskimi tlačnimi napetostmi v zidu in tlačno trdnostjo zidovja ne bo preseglo 15 %, morda 20 % tlačne trdnosti zidovja. Priporočeno razmerje je dovolj visoko, da ne bo omejevalo uporabe sodobnih votlakov za gradnjo nekaj etažnih stavb, vsaj tistih ne, ki jih po določilih Evrokoda 8 lahko uvrstimo med enostavne zidane stavbe.



Slika 36 • **Odvisnosti vodoravna sila–zasuk zidov, dobljene s preiskavo zidov pri 30 % (a) in pri 15 % (b) tlačne trdnosti zidovja (Tomaževič, 2012)**

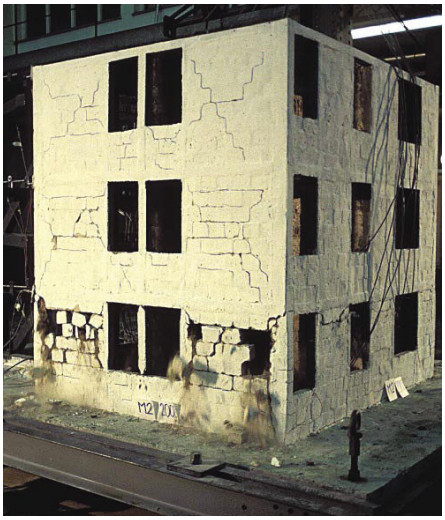
4.4 Faktor obnašanja konstrukcije za zidane stavbe

Pri pravilno zasnovanih konstrukcijah, kakršne so praviloma tudi zidane stavbe, račun potresne odpornosti lahko poenostavimo tako, da konstrukcijo analiziramo v vsaki od pravokotnih smeri posebej in pri tem upoštevamo le vodoravno komponento delovanja potresa. Nelinearno dinamično analizo nadomestimo z ekvivalentno elastično statično analizo, pri čemer računske potresne sile določimo na podlagi predpisanega spektra odziva in konstrukcijo idealiziramo kot ekvivalentni sistem z eno prostostno stopnjo. Da bi izračunali projektne potresne sile, ordinate elastičnega spektra zmanjšamo s faktorjem, s katerim implicitno upoštevamo zmožnost konstrukcije, da se deformira in sipa energijo. Ta faktor na splošno imenujemo faktor redukcije sil oziroma faktor obnašanja konstrukcije *q*, kot ga imenuje Evrokod 8. Po klasični definiciji, ki jo navaja Evrokod 8, je faktor obnašanja »približek k razmerju med potresnimi silami, ki bi delovale na konstrukcijo s 5 % viskoznega dušenja, če bi se obnašala povsem elastično, in najmanjšimi potresnimi silami, ki jih lahko uporabimo pri projektiranju – ob uporabi običajnega elastičnega modela –, pa vendar še zagotovimo zadovoljivo obnašanje konstrukcije«. Ker je eksperimentalnih podatkov, na podlagi katerih so bile v Evrokodu 8 priporočene vrednosti faktorja obnašanja *q* za zidane konstrukcije, razmeroma malo, smo poleg opravljenih analiz obnašanja večjega števila stavb, ki so jih poškodovali potresi oziroma so prestale močne potrese, analizirali tudi obnašanje modelov nearmiranih, povezanih in armiranih stavb, ki smo jih v zadnjih letih preiskali na potresni mizi ZAG. Enega izmed modelov s povezanim zidovjem prikazuje slika 37.

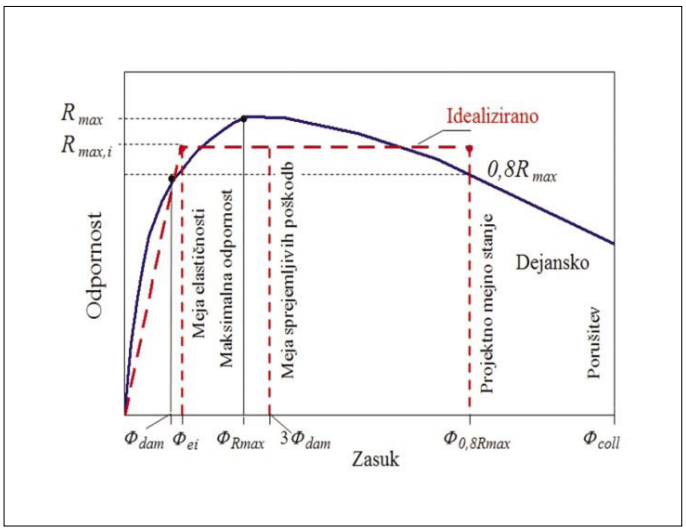
Evrokod 8 priporoča, da se za različne sisteme zidanja vrednosti faktorja obnašanja *q* gibljejo v območjih $q = 1{,}5–2{,}5$ za neamirano zidovje, $q = 2{,}0–3{,}0$ za povezano in $q = 2{,}5–3{,}0$ za armirano zidovje. Čeprav so že bili na razpolago nekateri eksperimentalni podatki, na podlagi katerih bi lahko izbrali večje vrednosti, so bile v slovenskem nacionalnem dodatku za obvezne sprejete vrednosti na spodnji meji posameznih območij, to je q = 1,5 za nearmirano, q = 2,0 za povezano in q = 2,5 za armirano zidovje.

Definicijo faktorja obnašanja po Evrokodu 8 lahko izrazimo z razmerjem $q = S_e/S_{u,d}$, kjer je S_e potresna sila, ki bi med projektnim potresom nastala v popolnoma elastični konstrukciji, $S_{u,d}$ pa projektna (računska) potresna sila. Če upoštevamo načelo ohranitve energije in izenačimo površino pod idealno elastično in idealizirano bilinearno odvisnostjo med silami in pomiki (slika 38), lahko faktor obnašanja izrazimo tudi s faktorjem duktilnosti konstrukcije, $\mu_u = d_u/d_e$, kjer je d_e pomik konstrukcije na idealizirani meji elastičnosti, d_u pa mejni pomik, kot $q = (2\ \mu_u - 1)^{1/2}$. Če osnovna definicija izraža faktor obnašanja z razmerjem sil, pa druga definicija izraža faktor *q* z globalno duktilnostjo konstrukcije.

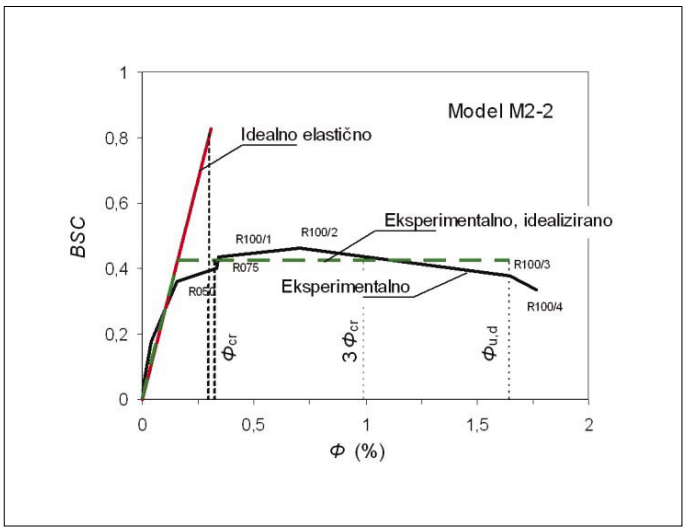
Pri oceni vrednosti faktorja obnašanja *q* na podlagi eksperimentalno ugotovljenih odvisnosti med potresnimi silami in deformacijami modelov (krivulj odpornosti) smo upoštevali tudi zahtevo, da poškodbe v nelinearnem območju ne bi presegale meje, do katere se še lahko popravijo. Analize korelacije med deformacijami (etažnim pomikom oziroma zasukom) in poškodbami so pokazale (Tomaževič, 2007), da lahko za oceno velikosti projektnih parametrov za zidane konstrukcije, s katerimi implicitno zajamemo njihovo sposobnost deformiranja in sipanja energije, upoštevamo le deformacije do velikosti 3-kratnika deformacije na meji nastanka razpok ($\Phi_d = 3\ \Phi_{cr} = 0{,}6–1{,}2$ %) in ne do meje, ko odpornost že pade na 80 % maksimalne, kot priporoča Evrokod 8 (slika 38). Pri zidanih konstrukcijah so poškodbe pri tako velikih deformacijah že nesprejemljivo velike. Tipično metodo vrednotenja vrednosti faktorja obnašanja prikazuje slika 39.



Slika 37 • **Model s povezanim zidovjem v zadnji fazi preiskave na potresni mizi (Tomaževič, 1997) (Fotografija: M. Tomaževič)**



Slika 38 • **Idealizacija krivulje odpornosti in definicija mejnih stanj (Tomaževič, 2007)**



Slika 39 • **Slika 39. Ocena vrednosti faktorja q na podlagi izmerjene krivulje odpornosti modela (Tomaževič, 2010)**

Analiza obnašanja modelov zidanih stavb, sezidanih v različnih sistemih (navadno, povezano in armirano zidovje), je pokazala, da so razpoložljive sposobnosti deformiranja in sipanja energije regularnih zidanih konstrukcij mnogo večje, kot jih upoštevajo vrednosti faktorja obnašanja, ki jih za projektiranje zidanih stavb priporoča slovenski nacionalni dodatek. Po vseh analizah so vrednosti, zahtevane v slovenskem nacionalnem dodatku, konservativne ((Tomaževič, 1994), (Tomaževič, 1997), (Tomaževič, 2010), (Tomaževič, 2013)). Na podlagi omenjenih raziskav smo že priporočili, da bi brez resnejših posledic lahko pri preverjanju potresne odpornosti zidanih konstrukcij, ki izpolnjujejo zahteve evrokodov, uporabljali vrednosti na zgornji meji v Evrokodu 8 predlaganega območja, podobno kot priporočajo italijanski kolegi (Magenes, 2006).

5 • POJASNILO

Članek je nastal na podlagi vabljenega predavanja z naslovom »Some considerations on testing and experimental simulation of seismic behavior of masonry walls and buildings«, ki ga je avtor pripravil za 16. mednarodno konferenco o zidarstvu (16th International Brick/Block Masonry Conference) konec letošnjega junija v Padovi. Prispevek povzema nekatere izkušnje in rezultate raziskav, ki jih je avtor s sodelavci opravil na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Podrobnosti o raziskavah, omenjenih v prispevku, bo bralec, ki ga zanimajo, našel v navedeni literaturi. Večina je bila objavljena tudi v prispevkih v Gradbenem vestniku, ki pa v seznamu niso navedeni.

6 • LITERATURA

ASTM, ASTM E72: Test Method for Conducting Strength Tests on Panels for Building Construction, American Society for Testing and Materials, 1998.

Bernardini, A., Modena, C., Turnšek, V., Vescovi, U., A comparison of three laboratory test methods used to determine the shear resistance of masonry walls, Proceedings of the 7th world conference on earthquake engineering, Istanbul, Vol.7: 181–184, 1980.

Bosiljkov, V., Page, A., Žarnić, R., Performance based studies of in-plane unreinforced masonry walls, Masonry international 16(2): 39–50, 2003.

Boštjančič, J., Materiali za modeliranje zidanih zgradb, Poročilo ZRMK, Ljubljana, 1975.

Calvi, G. M., Kingsley, G. R., Magenes, G., Testing masonry structures for seismic assessment, Earthquake spectra 12(1): 145–162, 1996.

Carvalho, E. C., Seismic testing of structures, Proceedings of the 11th European conference on earthquake engineering, Paris, France: 53–64, Rotterdam, Balkema, 1998.

CIB, Publication 94: International recommendations for design and erection of unreinforced and reinforced masonry structures, Rotterdam, International Council for Building, 1987.

Harris, G. H., Sabnis, G. M., Structural modeling and experimental techniques, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1999.

Langhaar, H. L., Dimensional analysis and theory of models, New York, John Wiley in Sons, 1951.

Lourenço, P., Computational strategies for masonry structures, Delft University Press, Delft, 1996.

Magenes, G., Masonry building design in seismic areas: recent experiences and prospects from a European point of view, Proceedings of the first European conference on earthquake engineering and seismology, CD-ROM, Geneva, Keynote Address K9: paper 4009, 2006.

Mann, W., Müller, H., Failure of shear-stressed masonry – an enlarged theory, tests and application to shear walls, Proceedings of the British Ceramic Society, No.30, Shelton House, Stoke-on-Trent: 223–235, 1982.

Mayes, R. L., Clough, R. W., State-of-the-art in seismic shear strength of masonry – an evaluation and review, Earthquake engineering research center, University of California, Berkley, 1975.

Mergos, P. E., Beyer, K., Loading protocols for European regions of low to moderate seismicity, Bulletin of earthquake engineering 12: 2507–2530, 2014.

Oetes, A., Loering, S., On the behavior of masonry buildings subjected to seismic loads, Bautechnik, 83 (2): 125–138, 2006.

Paulson, T. J., Abrams, D. P., Correlation between static and dynamic response of model masonry structures, Earthquake spectra 6(3): 573–591, 1990.

Petry, S., Beyer, K., Limit states of modern unreinforced clay brick masonry walls subjected to in-plane loading, Bulletin of earthquake engineering 13: 1073–1095, 2015.

Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na potresnih območjih, Uradni list SFRJ, št. 31/1981.

Sheppard, P., Tomaževič, M., Možnosti revitalizacije stanovanjski zidanih zgradb z aspekta potresne varnosti, Ljubljana, ZRMK, 1985.

Shing, P. B., Manivannan, T., Carter, E., Evaluation of reinforced masonry shear wall components by pseudodynamic testing, Proceedings of the 4th US national conference on earthquake engineering, Palm Springs, EERI: 829–838, 1990.

SIST EN 1998-1:2005. Evrokod 8. Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, 2005.

SIST EN 1996-1:2006. Evrokod 6. Projektiranje zidanih konstrukcij, 1. del: Splošno – pravila za armirano in nearmirano zidovje, 2006.

SIST EN 1052-1:1999. Metode preskušanja za zidovje, 1. del: Ugotavljanje tlačne trdnosti, 1999.

SIST EN 1052-3:2002. Metode preskušanja za zidovje, 3. del: Ugotavljanje začetne strižne trdnosti, 2002.

Terčelj, S., Sheppard, P., Turnšek, V., The influence of frequency on the shear strength and ductility of masonry walls in dynamic loading tests Proceedings of the 6th world conference on Earthquake Engineering, New Delhi, Vol. 3: 2992–2999, 1977.

Tomaževič, M., Žarnić, R., Shaking table study of a four storeyed masonry building model, Proceedings of the 8th world conference on earthquake engineering, San Francisco, Vol. 6: 847–854, 1984.

Tomaževič, M., Žarnić, R., The effect of horizontal reinforcement on the strength and ductility of masonry walls at shear failure, Proceedings of the 7th international brick masonry conference, Melbourne, Vol. 2: 1291–1302, 1985.

Tomaževič, M., Dynamic modelling of masonry buildings: storey mechanism model as a simple alternative, Earthquake engineering and structural dynamics 15 (6): 731–750, 1987.

Tomaževič, M., Lutman, M., Design of reinforced masonry walls for seismic actions, Proceedings of the 8th international brick/block masonry conference, Dublin, Vol. 2: 800–810, 1988.

Tomaževič, M., Velechovsky, T., Some aspects of testing small scale masonry building models on simple earthquake simulators, Earthquake engineering and structural dynamics 21 (11): 945–963, 1992.

Tomaževič, M., Weiss, P., Seismic behavior of plain- and reinforced-masonry buildings, Journal of structural engineering, ASCE, 120 (2): 323–338, 1994.

Tomaževič, M., Lutman, M., Petković, L., Seismic behavior of masonry walls: experimental simulation, Journal of structural engineering, ASCE, 122 (9): 1040–1047, 1996.

Tomaževič, M., Klemenc, I., Verification of seismic resistance of confined masonry buildings, Earthquake engineering and structural dynamics, 26 (10): 1073–1088, 1997.

Tomaževič, M., Klemenc, I., Lutman, M., In situ tests for the assessment of seismic resistance of old stone masonry houses, Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering, New Zealand, CD ROM, paper 1975, 2000.

Tomaževič, M., Damage as a measure for earthquake resistant design of masonry structures: experience of Slovenia, Canadian journal of civil engineering, 34: 1403–1412, 2007.

Tomaževič, M., Gams, M., Shear resistance of unreinforced masonry walls, Ingegneria sismica 26 (3): 5–18, 2009.

Tomaževič, M., Weiss, P., Displacement capacity of masonry buildings as a basis for the assessment of behavior factor: an experimental study, Bulletin of earthquake engineering 8 (6): 1267–1294, 2010.

Tomaževič, M., Weiss, P., Robustness as a criterion for use of hollow clay units in seismic zones: an attempt to propose a measure, Materials and structures 45 (4): 541–559, 2012.

Tomaževič, M., Gams, M., Shaking table study and modelling of confined AAC masonry buildings. Bulletin of earthquake engineering 10: 863–893, 2013.

Triller, P., Tomaževič, M., Gams, M.,. Seismic behaviour of multistorey plain masonry shear walls with openings: an experimental study, Brick and block masonry: Trends, innovations and challenges, Proceedings of the 16th international brick and block masonry conference, Padova: 1949–1954, 2016.

Turnšek, V., Seismic testing equipment, ECEE/AIES joint symposium on earthquake engineering topic, Madrid, 11 p, 1969.

Turnšek, V., Čačovič, F., Some experimental results on the strength of brick masonry walls, Proceedings of the 2nd international brick masonry conference, Stoke-on-Trent: 149–156, 1970.

Van Vliet, M.R.A., TNO report 2004-CI-RO171: Shear tests on masonry panels, Literature survey and proposal for experiments, Delft: TNO, 2004.

Williams, D., Scrivener, J. C., Response of reinforced masonry shear walls to static and dynamic cyclic loading, Proceedings of the 5th world conference on earthquake engineering, Rome: 1491–1494, 1974.

UPORABA BIOLOŠKIH ODPADKOV ZA PRIDOBIVANJE BIOPLINA

USAGE OF ORGANIC FRACTION OF BIOLOGICAL WASTE FOR BIOGAS PRODUCTION

asist. dr. Sabina Kolbl, univ. dipl. inž. vki.
sabina.kolbl@fgg.uni-lj.si
UL-FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana
prof. dr. Blaž Stres, univ. dipl. mikrobiol.
blaz.stres@bf.uni-lj.si
UL-BF, Groblje 3, 1230 Domžale

Znanstveni članek
UDK: 628.336.6: 628.4.042

Povzetek | V članku obravnavamo možnost izrabe biološko razgradljivih odpadkov za pridobivanje bioplina z anaerobno presnovo. Na podlagi eksperimentalno izmerjenih biometanskih potencialov bioloških odpadkov v mezofilnem temperaturnem območju, dinamike nastajanja metana, fizikalno-kemijskih parametrov za optimalno delovanje procesa in statističnih podatkov o količini zbranih bioloških odpadkov v Sloveniji smo izračunali potencialno proizvodnjo metana za območje Slovenije.

Ključne besede: anaerobna presnova, biološki odpadki, metanski potencial

Summary | The paper deals with the possibility of utilizing organic fraction of biological wastes (OFMSW) for the production of biogas by anaerobic digestion. Based on the experimentally measured methane potentials of OFMSW in the mesophilic temperature range, the dynamics of the formation of methane, the physicochemical parameters for optimal process performance and statistical data on the amounts of collected OFMSW in Slovenia, we calculated the potential production of methane for Slovenia.

Key words: anaerobic digestion, biological waste, methane potential

1 • UVOD

Biološki komunalni odpadki so definirani kot organska frakcija odpadkov iz gospodinjstva, kot so kuhinjski odpadki, sadni in vrtni odpadki, in se zbirajo ločeno od drugih odpadkov. Danes je znano, da povezovanje in združevanje aerobnega (kompostiranje) in anaerobnega (anaerobna presnova) procesa zmanjšujeta negativen vpliv na okolje. Da bi lahko biološke odpadke uspešno vpeljali v proces anaerobne presnove, morajo biti ti kakovostni, narejena pa mora biti tudi strategija njihovega zbiranja. Različne strategije zbiranja vplivajo na lastnosti zbranih bioloških odpadkov. V sistemu zbiranja bioloških odpadkov poznamo (Cecchi, 2011):

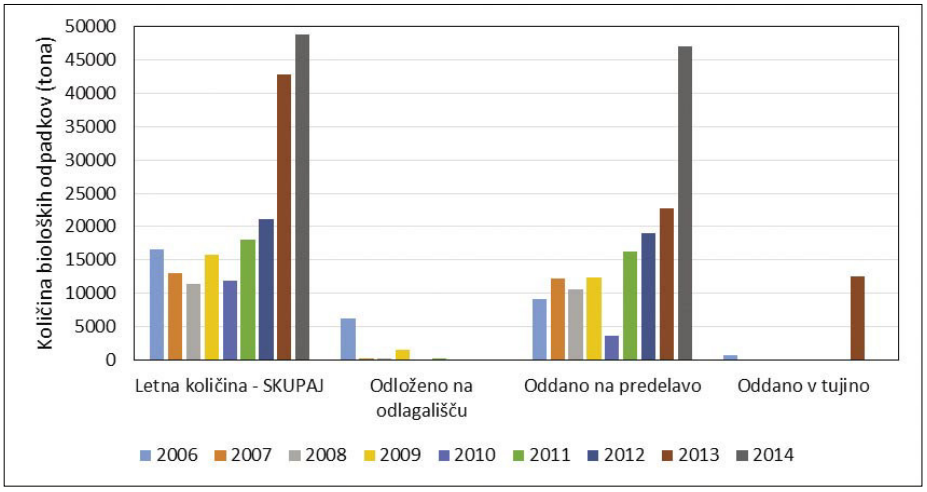
- mehansko ločene biološke odpadke (angl. Mechanicaly separated organic fraction of municipal solid wastes (MS-OFMSW)),
- ločeno zbrane biološke odpadke (angl. Separately collected organic fraction of municipal solid wastes (SC-OFMSW)) in
- biološke odpadke, ki jih ločimo na viru (angl. Source sorted organic fraction of municipal solid wastes (SC-OFMSW)).

Raziskave in izkušnje različnih avtorjev kažejo, da so odpadki, ki se zbirajo ločeno ali jih ločimo na viru, dobre kakovosti in imajo visok biometanski potencial, medtem ko je za mehansko ločevanje odpadkov potrebne veliko energije, biometanski potenciali pa so nizki (Cecchi, 2011). Kljub ločenemu zbiranju bioloških odpadkov ti lahko vsebujejo različne primesi, kar je lahko povezano tudi s socialno-ekonomskimi dejavniki. Take odpadke je pred anaerobno presnovo treba mehansko obdelati (Colazo, 2015).

Biometanski potencial (BMP) predstavlja eksperimentalno določeno vrednost maksimalne količine metana, ki bo nastala na gram organske obremenitve določene biomase s substratom. BMP določamo s testom BMP, kjer za določeno znano količino odpadkov v šaržnem sistemu pri anaerobnih razmerah izmerimo količino nastalega metana ali bioplina (in njegovo sestavo) (Lesteur, 2010). BMP-test se uporablja za določevanje anaerobne biorazgradljivosti in končnega biometanskega potenciala iz odpadnih snovi ali biomase

ter določevanje hitrosti razgradnje v procesu anaerobne presnove. Anaerobna presnova je biokemijski proces, pri katerem anaerobne bakterije ob odsotnosti kisika v več fazah (hidroliza, acetogeneza, acidogeneza) razgradijo organsko snovi, metanogene arheje pa iz produktov prejšnjih faz v četrti fazi (metanogeneza) proizvedejo metan (Kolbl, 2014). Tako se v fazi hidrolize netopni biopolimeri pretvorijo v topne organske spojine. Te se v acidogenezi pretvorijo v hlapne maščobne kisline (HMK). V tretji fazi se HMK pretvori v acetat in H_2, v metanogenezi pa iz acetata ali iz H_2 nastane metan (De Mes, 2003).

Tehnologijo anaerobne presnove bioloških odpadkov lahko ločimo na suhi (vsebnost suhe snovi > 30 %), polsuhi (vsebnost suhe snovi med 15 in 20 %) in mokri proces (vsebnost suhe snovi < 10 %). Procesi se med seboj razlikujejo tudi po organski obremenitvi, hidravličnem zadrževalnem času in temperaturi. V industriji se uporabljajo predvsem polsuhi in mokri procesi, v zadnjem obdobju pa se uveljavlja suhi proces anaerobne presnove. Glede na temperaturo ločimo mezofilne in termofilne procese. Pri mezofilnih se temperatura giblje med 35 °C in 40 °C, pri termofilnih pa med 45 °C in 60 °C ((Kolbl, 2016), (De Mes, 2003)). Na količino metana, ki bo nastala iz bioloških odpadkov, vplivajo različni parametri.



Slika 1 • **Količina zbranih bioloških odpadkov in oddanih v predelavo za obdobje 2006–2014**

Osnovni gradniki organskih snovi so ogljikovi hidrati, lipidi in beljakovine, katerih sestava se v bioloških odpadkih razlikuje. Na količino metana vplivajo tudi pH, alkaliteta, vsebnost vlage, vsebnost organskih snovi, temperatura, razmerje med C/N, zadrževalni čas, velikost delcev, inhibitorne in toksične snovi, mešanje v reaktorju, kovine v sledovih, kakovost cepiva itd. (Leung, 2016).

V Sloveniji in EU količina bioloških odpadkov, ki se jih kompostira ali uporabi za pridobivanje metana, narašča. Po statističnih podatkih (SURS, 2016) je v Sloveniji od leta 2012 količina bioloških odpadkov začela naraščati, tako je bilo leta 2014 zbranih 48.869 ton bioloških odpadkov (slika 1).

Zaradi naraščanja in čim bolj učinkovite izrabe bioloških odpadkov je cilj raziskave določiti biometanski potencial bioloških odpadkov, ga primerjati z obstoječimi podatki iz različne literature in oceniti potencialno proizvodnjo metana iz bioloških odpadkov za območje Slovenije.

2 • MATERIALI IN METODE

Pri pregledu literature smo dostopali do prosto dostopne metanske baze (http://methane.fe.uni-lj.si/; Murovec et al., 2015), iz katere smo uporabili 99 meritev metanskih potencialov organskih odpadkov različnih avtorjev.

2.1 Biometanski potencial

Za anaerobno presnovo različnih substratov in določevanje biometanskega potenciala smo uporabili napravo Automatic Methane Potential Test System (AMPTS II). AMPTS II (slika 2) je analizna naprava laboratorijske velikosti, ki omogoča meritve ultranizkih hitrosti tvorbe metana, proizvedenih med anaerobno presnovo biološko razgradljivih substratov. Tako lahko lažje določimo optimalni retenzijski čas in uporabno mešanico substratov za anaerobno presnovo ter ocenimo potrebo po dodatkih. AMPTS II je sestavljen iz dveh večjih enot. Prva enota vključuje 15 anaerobnih reaktorjev volumna 5000 ml. Vsak reaktor je opremljen s plinotesnim gumijastim pokrovom in mehanskim mešalom, ki je vodeno preko mreže in računalnika. Reaktorji so potopljeni v termoregulirano vodno kopel, kjer lahko vzdržujemo mezofilno ali termofilno temperaturno območje. Druga enota zajema 45 manjših steklenic volumna 100 ml, ki vsebujejo 3 M NaOH za absorpcijo CO_2 in napravo za merjenje volumna plina. Merjenje plina poteka po načelu izpodrivanja tekočine in vzgona (Bioprocess Control, 2014).

Slika 2 • **Sistem za določevanje metanskega potenciala**

Slika 3 • **Ločeno zbrani biološki odpadki v biološko razgradljivih vrečkah**

Za določevanje BMP smo uporabili naslednje komunalne odpadke: biološke odpadke iz restavracij in gospodinjstev, ki smo jih označili z A, B, C, D, E, G in so bili zbrani ločeno (slika 3). Lastnosti vhodnih substratov so podane v preglednici 1. Biološki odpadki so vsebovali različne vrste hrane, od jajčnih lupin, olupkov krompirja, pomaranč, mandarin in jabolk do kavnih usedlin, solate, kvašenega testa, smokijev, lupine orehov, čajnih vrečk in druge hrane (slika 3). Zbrani so bili v biološko razgradljivih vrečkah, v katerih pa ni bilo izcedne vode, ki se po navadi pojavi pri daljšem zadrževalnem času odpadkov v bioloških zabojnikih. Vse substrate smo mehansko obdelali z mešalnikom Philips, da je njihova velikost delcev bila takšna, kot je na realni bioplinski elektrarni (d < 25 mm), pred doziranjem v anaerobne reaktorje.

Za preskus z AMPST II smo za cepivo uporabili biomaso iz bioplinske elektrarne Šijanec. Uporabili smo tudi izhodiščne vzorce, pri čemer nismo dodajali substrata (kontrola) in glukoze. V vse reaktorje smo dodali 3000 ml cepiva in jim različno dozirali zmlete biološke odpadke (preglednica 2). Pred zagonom smo vse reaktorje 3 minute prepihovali z dušikom, da smo zagotovili anaerobne razmere. Temperaturo reaktorjev smo vzdrževali pri 38 °C. Za določevanje parametrov, kot so suha snov, organska snov in dušik, smo vzorce odpadkov iz restavracij mehansko obdelali, da je bila velikost delcev manjša od 15 mm (slika 4).

2.2 Kemijske analize

Suho snov in organsko snov smo določili po navodilih APHA (APHA,2005). Celotni dušik in amonijev dušik smo določili z napravo Skalar SAN++ po navodilih proizvajalca. Za merjenje vrednosti pH smo uporabili multimeter Hach Lange HQ40D. Hlapne organske kisline (HOK) in pufrsko kapaciteto (CAO) smo določili z napravo Biogas Titration Manager TIM 840 (Hach Lange).

2.3 Koeficient hidrolize

Hidroliza je omejujoči korak v procesu anaerobne presnove in je merilo, kako hitro se v procesu anaerobne presnove razgradijo suspendirani delci. Iz rezultatov BMP-preskusov lahko definiramo konstanto hidrolize prvega

Vzorec		Predhodna obdelava	Velikost delcev	SS (%)	OS (% SS)	OS (% SM)	$N_{celotni}$ (mg l^{-1})
Biološki odpadki	A	mehanska*	< 15 mm	30.90 ± 1.39	78.99 ± 3.71	24.38 ± 0.35	974 ± 13
	B	mehanska*	< 15 mm	28.64 ± 2.41	95.38 ± 0.03	27.33 ± 2.39	1203 ± 72
	C	mehanska*	< 15 mm	38.18 ± 2.87	76.18 ± 3.38	29.13 ± 3.08	2076 ± 12
	D	mehanska*	< 15 mm	44.11 ± 0.53	67.72 ± 1.10	29.87 ± 0.15	2306 ± 12
	E	mehanska*	< 15 mm	28.60 ± 1.20	71.14 ± 1.08	20.35 ± 1015	2029 ± 32
	G	mehanska*	< 15 mm	57.54 ± 2.30	71.07 ± 1.57	53.38 ± 3.05	4810 ± 100
cepivo		brez	<15 mm	5,59 ± 0,2	71,07 ± 0,72	4,04 ± 0,3	3906 ± 42

* prostostoječi mešalnik Philips

Preglednica 1 • **Fizikalno-kemijski parametri bioloških odpadkov A, B, C, D, E in G**

Reaktor	Število reaktorjev	Organska obremenitev (g OS/l)	Doziranje (g)	Doziranje vode (ml)	Cepivo (ml)
A	2	10	105,9	316,3	3000
B	2		125,5	303,2	3000
C	2		139,8	369,3	3000
D	2		113,3	321,1	3000
E	2		130,0	301,4	3000
G	2		145,6	321,1	3000
kontrola – cepivo	2	0	0	0	3000
glukoza	1	10	31	100	3000

Preglednica 2 • **Sestava anaerobnih reaktorjev za preskus z AMPTS II**

reda, ki jo napišemo kot (Angelidaki et al., 2009):

$$ln((B_\infty - B)/B) = -k_H t, \quad (1)$$

kjer so:
B_∞ – končna tvorba metana (ml),
B – metan, proizveden ob določenem času t (ml),
k_H – konstanta hidrolize prvega reda, ki je definirana kot naklon linearne krivulje (d^{-1}),
t – čas (d).

Razgradnjo organske snovi poda delež organske snovi, ki jo mikroorganizmi razgradijo pri procesu anaerobne presnove. Določimo jo z naslednjo enačbo (Bioprocess Control, 2014):

$$razgradnja\ OS\ (\%) = \frac{OS_{začetek} - OS_{konec}}{OS_{začetek}} \cdot 100 \quad (2)$$

Pri tem sta:
$OS_{začetek}$ – količina organske snovi (cepivo in dodani substrat) v anaerobnem reaktorju na začetku preskusa (g),
OS_{konec} – količina organske snovi v anaerobnem reaktorju na koncu preskusa (g).

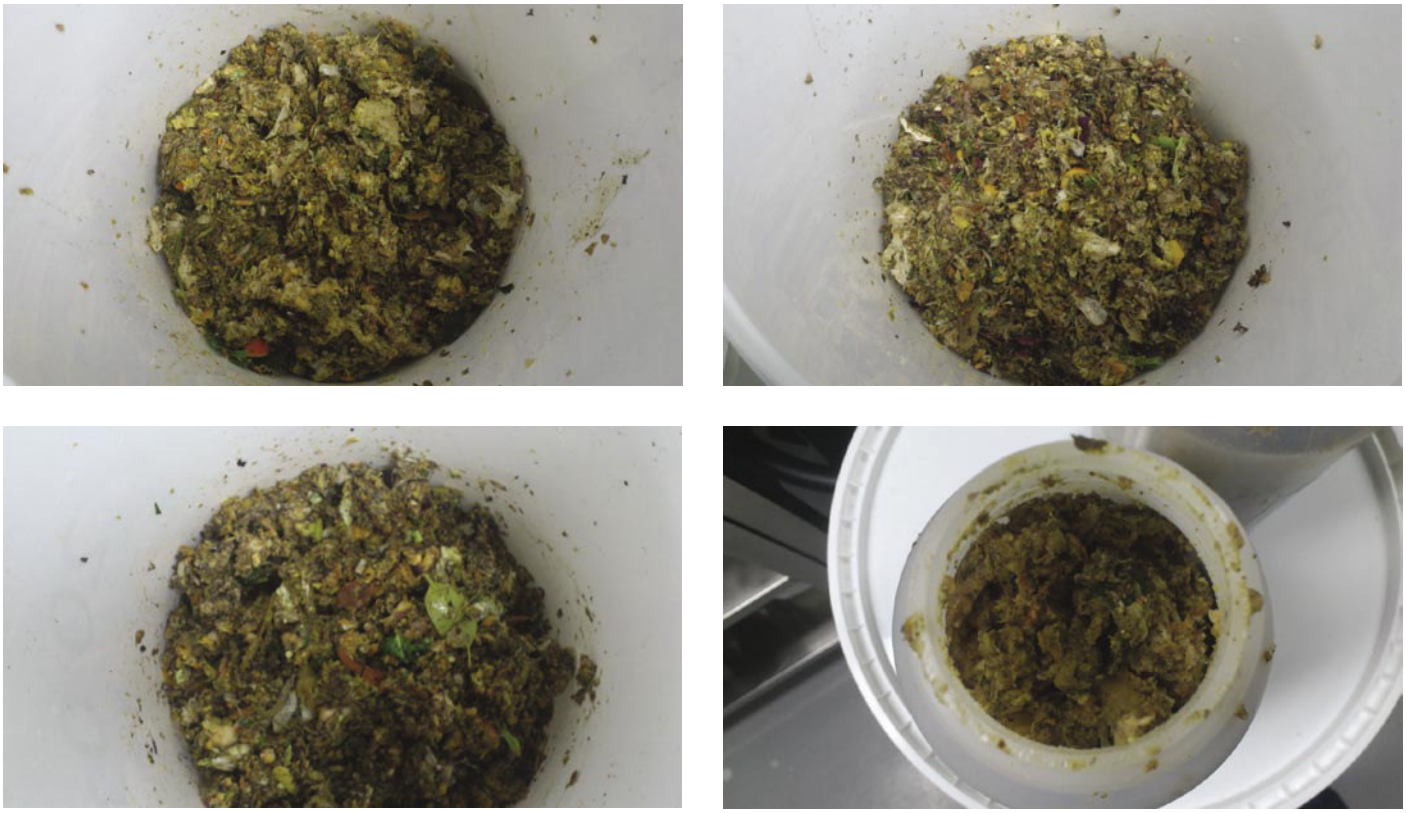
3 • REZULTATI IN DISKUSIJA

Koncentracija hlapnih organskih kislin v cepivu pred zagonom preskusa je bila 4136 ± 213 mg/l, celotnega anorganskega ogljika 11234 ± 58 mg/l, njuno razmerje HOK/CAO = 0,368 ± 0,018, celotnega amonijevega dušika 829 ± 40 mg/l in pH = 7,5. Vsi ti parametri so se gibali znotraj območja, pri katerem so pogoji za tvorbo metana optimalni (Kolbl, 2014).

V odpadkih A, kjer je biometanski potencial (BMP) z 201 ± 10,5 ml CH4/g OS bil najmanjši, so bili kavne usedline, jajčne lupine, veliko papirja itd. Takšni substrati so težje razgradljivi in posledično je BMP pri njih manjši. Največjo tvorbo biometana smo izmerili pri bioloških odpadkih D (473 ± 150 ml CH4/g OS) in E (493 ± 184 ml CH4/g OS) (slika 5). Višji BMP lahko pripišemo večji količini kuhinjskih olj, ki so jih vsebovali biološki odpadki. V bioloških odpadkih A, B, C in G je večina metana nastala v prvih treh do štirih dneh, medtem ko je pri odpadkih D in E strmo naraščala prvih sedem do osem dni, nato pa je tvorba metana začela počasi upadati. Največ metana glede na dodano količino substrata smo dobili v reaktorju A, in sicer 76,1 ml CH4/kg substrata (preglednica 3), najmanj pa v reaktorju C.

Izmerjene metanske potenciale smo primerjali z metanskimi potenciali organskih bioloških odpadkov iz prosto dostopne metanske baze (slika). Povprečne vrednosti se med izmerjenimi potenciali in potenciali iz preskusov niso bistveno razlikovale. Mediana iz preskusa je znašala 329,5 ml CH4/g OS, za podatke iz literature pa je bila nekoliko večja, 361,6 ml CH4/g OS. Kljub tem podobnostim lahko nastanejo večje razlike, tako je npr. razlika med najvišjim in najnižjim potencialom iz literature 599 ml CH4/g OS. Zato so za načrtovanje pridobivanja metana iz bioloških odpadkov potrebni tehten premislek, predhodna preskušanja in ocena kakovosti odpadkov, saj različne sestavine proizvedejo različno količino metana.

Vsi biološki odpadki so najvišji koeficient hidrolize dosegli prvi dan, biološki odpadki G so maksimalni kH dosegli v drugem dnevu (slika 7). Najvišji koeficient hidrolize so imeli biološki odpadki G, pri katerih je bila prvi in drugi dan dnevna tvorba metana glede na organsko obremenitev najvišja. Tako je prvi dan dosegla vrednost 120 ml CH4/g OS dan in 139 ml CH4/g OS dan, kar je okrog 75 % celotnega metana bioloških odpadkov G. Pri bioloških odpadkih C je v prvih dveh dneh nastalo 72 % vsega metana glede na dozirano organsko snov. To lahko pripišemo hitro razgradljivim sestavinam v bioloških odpadkih, ki so jih mikroorganizmi lahko hitreje uporabili za hrano in pretvorbo v metan. Najmanjši koeficient hidrolize smo zaznali pri bioloških odpadkih D. V tem primeru je v prvih dveh dneh nastalo okrog 33 % vsega metana



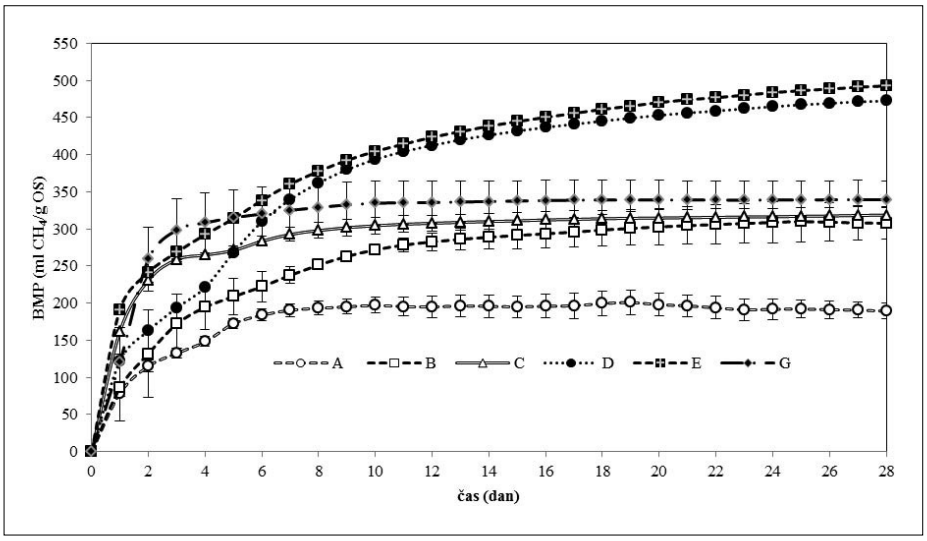
Slika 4 • **Mehansko obdelani biološki odpadki v posodah s premerom 30 cm**

glede na dozirano organsko snov. Koeficient hidrolize je kazalnik, pri katerih substratih bo hidroliza hitreje potekla in posledično v kolikšnem času se bo BMP približal maksimalnemu BMP-ju. Na hitrost hidrolize vpliva tudi delež lignina v substratu in prisotnost maščob. V našem primeru smo imeli različne vrste bioloških odpadkov, ki so vsebovali različne deleže lignina, celuloze in hemiceluloze ter različne deleže maščob v obliki olj in maščob, zato so različni tudi koeficienti hidrolize in izmerjeni BMP-ji.

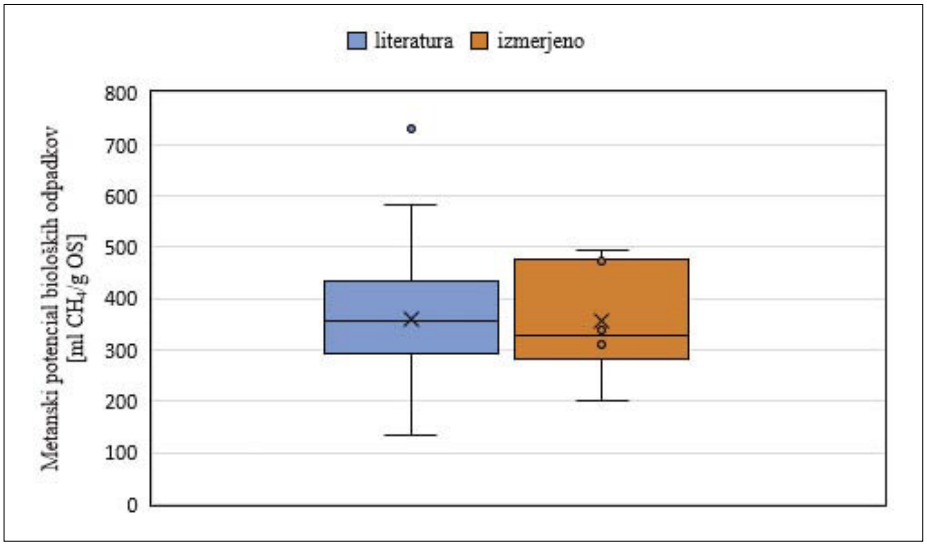
Na koncu preskusa smo izmerili tudi različne fizikalno-kemijske parametre (preglednica 3). Deleži suhe snovi, organske snovi in pH po koncu preskusa se med različnimi biološkimi odpadki niso bistveno razlikovali. To velja tudi za koncentracije hlapnih maščobnih kislin, ki so bile v reaktorjih s substrati v nekoliko višjih koncentracijah kot pri kontrolnem reaktorju, kjer je bilo samo cepivo.

Koncentracije amonijevega dušika so bile zunaj inhibitornega območja, koncentracije celotnega dušika pa med 4100 in 4500 mg/l. Največjo razgradnjo organske snovi so imeli odpadki G, najmanjšo pa odpadki C in izhodiščni vzorec. Razmerje med hlapnimi organskimi kislinami (HOK) in pufrsko kapa citeto (CAO) se je v vseh primerih gibalo v optimalnem območju za proizvodnjo metana.

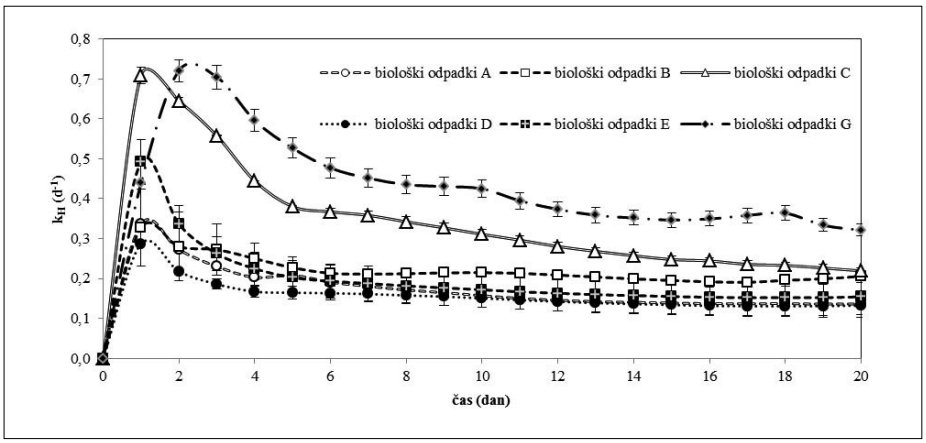
Glede na povprečno vrednost metanskega potenciala iz količine dodanega substrata smo izračunali tudi potencial proizvodnje metana v Sloveniji. Tako bi iz 48.869 ton bioloških odpadkov, ki jih letno zberemo v Sloveniji, lahko pridobili približno 3,022.500 m3 metana. Za ekonomsko upravičenost posamezne bioplinske elektrarne je treba upoštevati več različnih dejavnikov, od stroškov transporta, stroškov delovne sile, oddaljenosti virov substrata od naprave, stroškov gradnje in vzdrževanja, predobdelave substratov, optimalno vodenega procesa tvorjenja metana in končno ravnanja z anaerobno stabiliziranim ostankom.



Slika 5 • **Biometanski potencial bioloških odpadkov A, B, C, D, E in G s standardno deviacijo**



Slika 6 • **Primerjava izmerjenih metanskih potencialov iz literature (Murovec, 2015) in izmerjenih vrednosti v preskusu**



Slika 7 • **Koeficient hidrolize bioloških odpadkov**

Vzorec	Odpadki iz restavracij						Izhodiščni vzorec
	A	B	C	D	E	G	
BMP (ml CH4 g^{-1} OS^{-1})	201 ± 10.5	310 ± 21.4	319 ± 11.5	473 ± 150	493 ± 184	340 ± 25.5	–
BMP (l CH4 kg^{-1} $odpadkov^{-1}$)	76,1 ± 9,9	67,4 ± 11,3	44,3 ± 1,7	52,3 ± 4,4	73 ± 16	58 ± 2	–
SS (%)	5,34 ± 0,03	5,49 ± 0,07	5,67 ± 0,1	5,61 ± 0,13	5,60 ±0,07	5,53 ± 0,09	5,53 ± 0,05
OS (% SS)	75,05 ± 0,37	67,76 ± 0,35	74,81 ± 0,40	74,55 ± 0,19	62,62 ± 0,39	76,16 ± ,044	68,38 ± 0,24
OS (% SM)	4,01	3,72	4,24	4,18	3,51	4,21	3,78
pH	7,45 ± 0,01	7,44 ± 0,01	7,44 ± 0,01	7,44 ± 0,01	7,45 ± 0,01	7,45 ± 0,01	7,44 ± 0,00
HOK (mg/l)	2934 ± 25	2861 ± 7	2991 ± 23	3014 ± 24	2870 ± 6	2869 ± 54	3203 ± 57
CAO (mg/l)	9867 ± 54	9628 ± 74	9985 ± 59	9973 ± 342	9650 ± 45	10046 ± 149	9652 ± 113
HOK/CAO	0,297 ± 0,001	0,297 ± 0,002	0,300 ± 0,001	0,304 ± 0,009	0,298 ± 0,002	0,286 ± 0,007	0,333 ± 0,010
Ntotal (mg/l)	4331 ± 20	4325 ± 10	4448 ± 1	4437 ±59	4381 ± 18	4112 ±68	4126 ± 65
NH_4^+-N (mg/l)	1020 ± 28	1171 ± 1	1010 ±29	930 ± 48	1065 ± 18	852 ± 48	1040 ± 40
Razgradnja OS (%)	10,6	16,2	8,5	9,5	10,6	17,7	6,9

Preglednica 3 • **Izmerjeni različni parametri v anaerobnih reaktorjih po končanem preskusu s podano standardno deviacijo**

4 • SKLEP

Biološki odpadki predstavljajo dobro alternativo energetskim rastlinam za pridobivanje bioplina v procesu anaerobne presnove. Anaerobna presnova, kjer za substrat uporabljamo biološke komunalne odpadke, je zelo zahteven proces. Biološki odpadki iz različnih virov se med seboj razlikujejo. Na količino metana, ki se bo proizvedla, tako vplivajo vrsta odpadkov, vsebnost soli, vsebnost maščob, vsebnost vlaken, organska obremenitev anaerobnih reaktorjev, velikost delcev, temperatura procesa in drugi vplivi. Največjo težavo povzroča nehomogenost odpadkov, zaradi česar lahko pride do preobremenjenosti in kopičenja maščobnih kislin, kar upočasni proces tvorjenja metana. Zato je potrebno dnevno spremljanje delovanja reaktorjev, da čim bolj zmanjšamo nihanja v proizvodnji metana, čeprav se jim zaradi narave bioloških odpadkov ne moremo izogniti. Namesto mezofilnega temperaturnega območja lahko preidemo na termofilno območje, kjer razgradnja poteka hitreje, velikost anaerobnih reaktorjev se zmanjša, prav tako pa se zaradi višje temperature zmanjša število patogenih mikroorganizmov. Vendar pa je zaradi občutljivosti mikroorganizmov za spremembe v temperaturi proces težje voditi. Biološki odpadki lahko vsebujejo tudi primesi, kot so les, plastika, kovina in steklo, zato je nujno, da se taki odpadki že zbirajo ločeno. Prav tako je pred doziranjem v anaerobne reaktorje potrebna groba mehanska predobdelava, kjer se velikost delcev zmanjša, saj se v biološke odpadke odlagajo organsko razgradljivi materiali, ki so lahko tudi večjih dimenzij.

5 • LITERATURA

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., van Lier, J. B., Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays, Water Science and Technology, 59(5), 927–934. 2009.

APHA, American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st ed., Washington, USA, 2005.

Bioprocess Control, AMPTS II Automatic Methane Potential Test System, Operation and Maintenance Manual, 2014.

Cecchi, F., Bolzonella, D., Pavan, P., Macé, S., Mata-Alvarez, J., 6.36, Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste for Methane Production, Research and Industrial Application. in: Comprehensive Biotechnology (Second Edition), (Ed.) M.-Y. Editor-in-Chief: Murray, Academic Press. Burlington, pp. 463–472, 2011.

Colazo, A. B., Sánchez, A., Font, X., Colón, J., Environmental impact of rejected materials generated in organic fraction of municipal solid waste anaerobic digestion plants: Comparison of wet and dry process layout, Waste Management, 43, 84–97, 2015.

De Mes, T. Z. D., Stams, A. J. M., Reith, J. H., and Zeeman, G., Methane Production by Anaerobic Digestion of Wastewater and Solid Wastes, v Reith, J. H., Wijffels, R. H., and Barten, H. (Eds.), Bio-methane and bio-hydrogen,. 58–102, Petten: Dutch Biological Hydrogen Foundation, 2003.

Kolbl, S., Paloczi, A., Panjan, J., Stres, B., Addressing case specific biogas plant tasks: Industry oriented methane yields derived from 5 L Automatic Methane Potential Test Systems in batch or semi-continuous tests using realistic inocula, substrate particle sizes and organic loading, Bioresource Technology, 153, 180–188, 2014.

Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J.M., Junqua, G., Steyer, J.P., Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review, Process Biochemistry, 45(4): 431–440, 2010.

Leung, D.Y.C., Wang, J., An overview on biogas generation from anaerobic digestion of food waste, International Journal of Green Energy, 13(2), 119–131, 2016.

Murovec, B., Kolbl, S., Stres, B.; Methane Yield Database: Online infrastructure and bioresource for methane yield data and related metadata, Bioresource Technology, 189(0), 217–223, 2015.

SURS, Statistični urad Republike Slovenije, http://pxweb.stat.si/pxweb/Dialog/varval.asp?ma=1822303S&ti=&path=../Database/Okolje/18_energetika/05_18223_obnovljivi_viri_odpadki/&lang=2, povzeto 31. 8. 2016.

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

VISOKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Andrej Krapež, Analiza izgradnje zdravstvene postaje Dutovlje, mentorica prof. dr. Jana Šelih, somentor asist. dr. Matej Kušar

Drago Kitner, Primerjava projektantske ocene stroškov gradnje z dejanskimi – študija primera, mentorica prof. dr. Jana Šelih

Tadej Tisovec, Postopek izbire tehnologije izgradnje mostu čez Dobličico v Črnomlju, mentorica prof. dr. Jana Šelih, somentor prof. dr. Roko Žarnić

Gregor Mihelič, Stroškovni vidiki priključevanja na javni kanalizacijski sistem, mentor doc. dr. Primož Banovec

Ivan Maloča, Uporabnost družin za modeliranje betonskih konstrukcij v programu Revit, mentor prof. dr. Žiga Turk

Aleksandar Tomić, Pregled dokumentacije in dovoljenj med gradnjo stanovanjske hiše, mentorica prof. dr. Jana Šelih, somentor asist. dr. Matej Kušar

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Igor Tavčar, Ocena načrtovanja in izgradnje kolesarske infrastrukture v Republiki Sloveniji in Italiji, mentor doc. dr. Peter Lipar, somentor asist. dr. Niko Čertanc

Marko Dvornik, Izboljšanje učinkovitosti obveščanja uporabnikov o stanju kakovosti pitne vode z uporabo storitve potisnega obveščanja na mobilnih napravah, mentor prof. dr. Žiga Turk

Boris Hočevar, Analiza zaznavanj dejavnikov, ki vplivajo na vrednost stanovanjskih nepremičnin s poudarkom na hrupu, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

Vasja Pavlovič, Sistem BIM za zagotavljanje kakovosti Šprinkler sistemov, mentor doc. dr. Tomo Cerovšek, somentor doc. dr. Tomaž Hozjan

Aljaž Pasarič, Jekleni železniški mostovi v Sloveniji, mentor prof. dr. Bogdan Zgonc, somentorica asist. dr. Darja Šemrov

Miha Čebulj, Določanje svetlega profila železniške proge in medtirne razdalje, mentor prof. dr. Bogdan Zgonc, somentorica asist. dr. Darja Šemrov

Franci Petrič, Ocena potresne odpornosti poslovne stavbe, mentor prof. dr. Matjaž Dolšek

Klemen Pokrivač, Uporaba poliesterskih netkanih tekstilij za toplotno izolacijo in zadrževanje kondenza, mentor izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov, somentorja asist. dr. David Antolinc in asist. Luka Pajek

Rok Strižič, Eksperimentalna analiza obnašanja segmenta stekleno-aluminijastega fasadnega sistema, izpostavljenega ravninski strižni ciklični obtežbi, mentor izr. prof. dr. Vlatko Bosiljkov, somentor asist. dr. David Antolinc

Miha Zupanc, Potresna analiza 22-etažne armiranobetonske stavbe, mentor prof. dr. Matjaž Dolšek, somentor asist. dr. Jure Snoj

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ VODARSTVA IN KOMUNALNEGA INŽENIRSTVA

Aleš Strupeh, Obdelava blata na čistilni napravi Sevnica in možnost njegove uporabe, mentor doc. dr. Darko Drev

Ingrid Grozina, Analiza razpoložljivosti in uporaba vode na porečju Mirne, mentor prof. dr. Franc Steinman, somentor viš. pred. mag. Gašper Rak

Nikola Bakarič, Hidravlična analiza vodovodnega sistema Naklo, mentor prof. dr. Franc Steinman, somentor asist. dr. Daniel Kozelj

Andrej Umek, Uporaba poenostavljenih metod za račun valov vsled porušitev pregrad, mentor prof. dr. Matjaž Četina

Sašo Haberman, Raziskava možnih tehnoloških procesov čiščenja izcednih vod iz deponij, mentor doc. dr. Darko Drev

Jakob Šimon, Analiza premeščanja plavin reke Tolminke, mentor prof. dr. Matjaž Mikoš, somentor viš. pred. mag. Rok Fazarinc

Matic Škrbinc, Idejne rešitve odvajanja odpadlih voda za naselja Stanežiče, Dvor, Medno, mentor doc. dr. Darko Drev, somentor doc. dr. Mario Krzyk

Katja Babnik Jeglič, Male hidroelektrarne v precepu med vplivi na okolje in razvojno možnostjo obnovljivih virov energije, mentor prof. dr. Matjaž Mikoš, somentorica doc. dr. Nataša Smolar -Žvanut

Viktor Matjašič, Idejne rešitve odvajanja in čiščenja odpadnih voda v vaseh Božakovo, Želebej in Rakovec, mentor doc. dr. Darko Drev, somentor doc. dr. Mario Krzyk

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Nejc Švent, Nosilni elementi iz aluminija, mentor doc. dr. Primož Može

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Teja Kržišnik, Anaerobna presnova biološko razgradljivih substratov, mentorica prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, somentorica asist. dr. Sabina Kolbl

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO

Jan Pergar, Koncept kolesarskih povezav gorenjske statistične regije, mentor izr. prof. dr. Marijan Žura, somentorica doc. dr. Alma Zavodnik Lamovšek

Nejc Fabijan, Spletna aplikacija za oceno potresne ranljivosti zidanih stavb, mentor prof. dr. Matjaž Dolšek, somentorja asist. Žiga Šebenik in doc. dr. Matevž Dolenc

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Boris Grubar, Hidravlična analiza vodovodnega sistema Kostanjevice na Krki, mentor prof. dr. Franc Steinman, somentor asist. dr. Daniel Kozelj

Mateja Juvan, Raziskava optimizacije delovanja Centralne čistilne naprave Zagorje ob Savi, mentor doc. dr. Darko Drev, somentorica asist. dr. Sabina Kolbl

MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Andreja Strupi Pavlin, Preureditve nesemaforiziranih križišč v krožna križišča, mentor doc. dr. Peter Lipar

Mojca Hren, Gospodarjenje z nepremičnim premoženjem države na primeru kompleksa Ministrstva za notranje zadeve, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

Sandi Horvat, Vpliv težkih motornih vozil na okolje, mentor doc. dr. Tomaž Maher

Alenka Grabnar Marjetič, Analiza stroškovnih modelov množičnega vrednotenja nepremičnin v Sloveniji, mentorica izr. prof. dr. Maruška Šubic-Kovač

Nejc Pogačnik, Izgradnja visokovodnega prognostičnega in opozorilnega sistema in zagotavljanje njegove zanesljivosti in operativnosti, mentor prof. dr. Franc Steinman, somentorica doc. dr. Mojca Šraj

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

VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Senad Dervišević, Požarna varnost jeklenih stavb, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja

Dejan Geč, Kanalizacijski sistem in čistilna naprava v občini Sveti Tomaž, mentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc, somentorica asist. Blanka Grajfoner

Nejc Goričan, Armirano betonski elementi nove stavbe Medicinske fakultete Univerze v Mariboru, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentor Domen Gradišnik, univ. dipl. inž. grad.

Nataša Jevšnikar, Priprava in izvedba investicije v komunalno opremljenost naselja SE-3, mentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc, somentorica asist. Blanka Grajfoner

Davor Kazija, Principi in vidiki večstanovanjske pasivne gradnje, mentorica doc. dr. Kaja Pogačar

Andreja Klemenčič, Male čistilne naprave na območju Rogaške Slatine, mentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc, somentorica asist. Blanka Grajfoner

Tjaša Leben, Gradnja z ilovico in naravnimi materiali, mentor doc. dr. Andrej Ivanič

Borut Meke, Analiza betona z dodanimi vlakni iz recikliranih PET plastenk, mentor doc. dr. Andrej Ivanič, somentor dr. Gregor Trtnik, univ. dipl. inž. grad.

Alen Nahberger, Razgledni stolp parabolične oblike višine 30 m, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor doc. dr. Tomaž Žula

Boštjan Oblak, Odvajanje komunalnih odpadnih voda iz Paške vasi in Slatin v Šmartnem ob Paki, mentor viš. pred. Matjaž Nekrep Perc, somentorica asist. Blanka Grajfoner

Matej Peršak, Steklo, okno, fasada, mentor izr. prof. dr. Andrej Štrukelj

Daniel Pesek, Spoji v jeklenih konstrukcijah, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor doc. dr. Simon Šilih

Andrej Pilih, Trietažni jekleni poslovni objekt 20 x 24 x14 m, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor doc. dr. Simon Šilih

Denis Podbevšek, Tehnologija izvedbe digestorjev ter njihova sanacija, mentor izr. prof. dr. Andrej Štrukelj

Matej Robič, Zasnova in analiza prizidka stanovanjske hiše, mentor doc. dr. Milan Kuhta, somentorica Diana Zupanc

Sebastijan Rukav, Analiza jeklene hale 18 x 35 m na trajno in požarno stanje, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor doc. dr. Tomaž Žula

Blaž Šonc, Računska analiza jeklene konstrukcije kompostarne Spodnji Stari grad v Krškem s programskim paketom Tower 3D, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor doc. dr. Tomaž Žula

Silvija Umek, Celostna zasnova prometnih in ostalih zunanjih površin kompleksa Osnovne šole Leskovec pri Krškem, mentorica doc. dr. Kaja Pogačar, somentor Dušan Blatnik, univ. dipl. inž. arh.

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Lucija Sečkar, Analiza projekta "Oskrba s pitno vodo Pomurja – Sistem A", mentorica doc. dr. Janja Kramer Stajnko, somentorica asist. Blanka Grajfoner

Mihael Vajda, Jekleni most s poševnimi zategami dolžine 80 m, mentor red. prof. dr. Stojan Kravanja, somentor doc. dr. Tomaž Žula

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Michel Fišer, Razvijanje geodetskih mrež in njihova analiza, mentor pred. dr. Rok Kamnik, somentor izr. prof. dr. Boštjan Kovačič

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Študij je zaključil z diplomskim izpitom:

Filip Peharda

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Ela Dvoršćak, Semaforizirana izvennivojska križišča, mentor red. prof. dr. Tomaž Tollazzi

David Golob, Celovit pristop investitorja k energetskim sanacijam javnih stavb, mentorica doc. dr. Nataša Šuman, somentor Ferdo Jehart, univ. dipl. inž. grad.

III. STOPNJA – DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Jurij Jančar, Nadgradnje obstoječih stavb z lahkimi lesenimi konstrukcijami s stališča potresne odpornosti, mentor red. prof. dr. Miroslav Premrov

DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Daniela Dvornik Perhavec, Učinkovitejše načrtovanje projektov obnove zgodovinskih objektov z integracijo tehnologij za upravljanje znanja, mentor red. prof. dr. Danijel Rebolj, somentorja doc. dr. Andrej Tibaut in red. prof. dr. Matjaž Perc

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO – EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

INTERDISCIPLINARNI UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA – SMER GRADBENIŠTVO

Uroš Cafnik, Rekognosciranje katastra gospodarske infrastrukture in finančna analiza sanacije poškodb v javni infrastrukturi, mentorja izr. prof. dr. Boštjan Kovačič – FGPA in doc. dr. Barbara Bradač Hojnik – EPF

I. STOPNJA – UNIVERZITETNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Študij je zaključil z diplomskim izpitom:

Žan Pušnik

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

KOLEDAR PRIREDITEV

10.-11.10.2016

11th Conference on Advanced Building Skins
Bern, Švica
http://abs.green/home/

13.-14.10.2016

Simpozij Vodni dnevi 2016
Podčetrtek, Slovenija
www.vodnidnevi.si

16.-19.10.2016

IALCCE2016 – 5th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering
Delft, Nizozemska
www.ialcce2016.org

17.-18.10.2016

Sabor hrvatskih graditelja 2016: EU i hrvatsko graditeljstvo
Cavtat, Hrvaška
http://sabor.hsgi.org/ocs/index.php/sabor/sabor2016

17.-19.10.2016

SBE16 – Thessaloniki International Conference "Sustainable Synergies from Buildings to the Urban Scale"
Solun, Grčija
http://sbe16-thessaloniki.gr/

19.-20.10.2016

13. slovenski kongres o cestah in prometu
Portorož, Slovenija
www.drc.si

18.-24.11.2016

International Seminar on Roads, Bridges, and Tunnels
Solun, Grčija
http://isrbt2016.civil.auth.gr/

30.11.-1.12.2016

23rd international conference Concrete Days 2016
Litomyšl, Češka
www.cbsbeton.eu/en/seminars/odborne-akce/23rd-concrete-days-2016-call-for-papers

19.-20.1.2017

PowerSkin Conference 2017
München, Nemčija
www.powerskin.org/

22.-24.2.2017

WSCE 2017 – World Symposium on Civil Engineering 2017
Hong Kong, Kitajska
www.iaeng.org/WSCE/WSCE2017/

7.-9.3.2017

Smart Cities – Exhibition and Conference for South-East Europe
Sofija, Bolgarija
http://viaexpo.com/en/pages/smart-cities

10.-12.3.2017

ICACE 2017 – International Conference on Architecture and Civil Engineering 2017
Singapur, Singapur
http://icace.coreconferences.com/index.html

25.-28.4.2017

International Exhibition for Construction Technology, Equipment, Machinery, Vehicles & Materials
Hanoi, Vietnam
http://contechvietnam.com/en/

15.-18.5.2017

ICBEST Istanbul – International Conference on Building Envelope Systems and Technologies
Istanbul, Turčija
http://icbestistanbul.com/

29.5.-2.6.2017

4. svetovni forum o zemeljskih plazovih
Ljubljana, Slovenija
www.sloged.si/?page_id=716

7.-9.6.2017

S.ARCH 2017 – the 4th International Architecture Conference
Hong Kong, Kitajska
http://s-arch.net/

15.-19.7.2017

GeoMEast 2017 International Conference "Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology"
Sharm El-Sheik, Egipt
www.geomeast2017.org/

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