

Vrednotenje potresne odpornosti lesene gradnje

Assessment of Earthquake Resistance of Timber Structures

Bruno Dujič, Roko Žarnić

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova 2, 1000, Ljubljana, Slovenija
bruno.dujic@fgg.uni-lj.si, roko.zarnic@fgg.uni-lj.si

[IZVLEČEK]

Zaradi vse večje ekološke osveščenosti in zaradi inovativnih leseni sistemov, ki se zadnje čase vse bolj uveljavljajo v gradbeništvu, je gradnja objektov z leseno konstrukcijo vse pogosteje. Tudi arhitekturne zahteve in velikosti takšnih objektov so vse večje. Kljub takšnemu trendu gradnje pa žal večina projektantov in izvajalcev ne pozna, kako se takšne stavbe dejansko odzivajo na potresno obtežbo in kako v fazi projektiranja ter nato s premišljeno izvedbo detajlov konstrukcije zagotovimo njeno vodoravno nosilnost in stabilnost. Pri leseni konstrukcijah je namreč zaradi specifičnosti nosilnega sistema in velikega števila stikov med elementi težko ovrednotiti predvsem njihovo deformabilnost pri potresni obtežbi. Stiki se namreč že pri majhnih obremenitvah obnašajo nelinearno in neelastično, njihovo obnašanje pa vpliva na obnašanje celotne konstrukcije.

Ključne besede: lesene konstrukcije, predizdelani stenski elementi, konstrukcijski detajli, potresna odpornost, strižne preiskave sten, ciklične preiskave stikov

[ABSTRACT]

Recently, the requirements related to environment-friendly construction and development of new innovative structural systems increasingly stimulate of popularity of timber structures in Europe, especially in the sector of residential buildings. On other side, the trends of contemporary architectural are tending to large open spaces that requires considerable efforts in structural design. In general, the average structural engineer is not trained enough to meet the new requirements generated by architects, particularly when building is located in earthquake prone areas. The most problematic issue is prediction of behaviour of critical structural joints exposed to earthquake excitations and consequently prediction of resistance of structural system as whole. The timber structural system is specific because of large number of mechanical fasteners and anchors. Even exposed to low dynamic load level their response may be inelastic mainly due to embedding deformation of wooden fibres around the metal fasteners. The main problem is in appropriate evaluation of their deformability that governs their response on the seismic action and consequently, behaviour of entire structure.

Key words: timber structures, prefabricated wall elements, construction details, earthquake resistance, shear wall tests, cyclic test of joints

Predstavitev problema

Kakor v ostalih razvitih deželah sveta se tudi v Sloveniji v zadnjem času gradi vse več objektov z leseno nosilno konstrukcijo predvsem zaradi ekološke osveščenosti ljudi, ekonomičnosti gradnje pri porabi materiala in časa ter vseh ostalih prednosti, ki jih nudijo lahke lesene konstrukcije. Proizvajalci in investitorji kažejo tudi želje po graditvi večnadstropnih objektov in konstrukcij večjih dimenzij. Nekaj jih je bilo v Sloveniji že zgrajenih v zadnjih letih. Vendar je inženirsko znanje o obnašanju leseni konstrukcij na potresnih področjih napram znanju o obnašanju konstrukcij iz drugačnih materialov zelo pomanjkljivo. Pri leseni konstrukcijah namreč kljub natančnemu poznavanju lastnosti uporabljenih materialov (les, vezna sredstva in obložne plošče) ne poznamo lastnosti sestavljenih elementov oz. konstrukcijskih sklopov (*Slika 3*). Zato so eksperimentalno dobljeni rezultati obnašanja posameznega konstrukcijskega sklopa, ki bistveno vpliva na odziv konstrukcije, največkrat osnova za izračun nosilnosti in predvsem deformabilnosti celotne konstrukcije na vodoravno obtežbo. Iz



Slika 1. Northridge, ZDA, 1994; delna porušitev lesene konstrukcije zaradi nepravilne zasnove -vpliv torzije objekta in prevelike podajnost sprednjega dela konstrukcije.

teh preiskav lahko namreč natančno določimo lastnosti posameznih sestavljenih konstrukcijskih elementov, na osnovi katerih izračunamo mehanske lastnosti in obnašanje celotne nosilne konstrukcije.

Močnejši potresi so v preteklosti že pokazali, da se lesene konstrukcije, ki niso bile pravilno zasnovane in konstruirane na potresno obtežbo, lahko močno poškodujejo ali celo porušijo. Večina obstoječih sodobnih lesenih objektov v Evropi še ni bila izpostavljena močnejšim potresom, saj večina dežel, kjer je zgrajenih največ takšnih objektov, ni potresno ogrožena.

Zato tako slikovitih primerov o dejanskem obnašanju lesenih objektov med močnimi potresi v ZDA (*Slika 1*) in na Japonskem, v Evropi nimamo. Lahko pa se iz različnih vrst poškodb tovrstnih objektov med potresi marsikaj naučimo in s premišljenim načrtovanjem in računsko določitvijo potresne odpornosti nosilne konstrukcije preprečimo tveganja, ki nam jih nalagajo nestrokovne ocene ter ugibanja o potresni varnosti lesenih objektov.

Pri nas so do sedaj namreč velikokrat presojali potresno odpornost montažnih objektov

predvsem na grobi oceni, da so tovrstni objekti potresno varni predvsem zaradi majhne lastne teže konstrukcije. A je potrebno pri takšnih predpostavkah tudi upoštevati, da imajo nosilni elementi v lahki montažni konstrukciji enako vlogo pri prevzemanju stalne in koristne obtežbe kot bolj togi elementi v masivnejših konstrukcijah in da so stenski elementi leseni montažnih hiš veliko manj nosilni in precej bolj deformabilni, kot pa so to masivnejši stenski elementi, ki so izdelani iz drugačnih materialov; npr. opečna ali armiranobetonska stena, opečna stena z vodoravnimi in vertikalnimi AB vezmi in podobno.

Splošna ocena obnašanja lesenih objektov pri potresni obtežbi je, da so le ti večinoma varni pred porušitvijo, se pa lahko zaradi podajnosti konstrukcijskih sklopov in stikov precej deformirajo in s tem poškodujejo. Pri močnejših potresih deformacije stikov med nosilnimi elementi konstrukcije lahko povzročijo velike poškodbe nekonstrukcijskih oz. nenosilnih elementov v objektu.

[O AVTORJU]

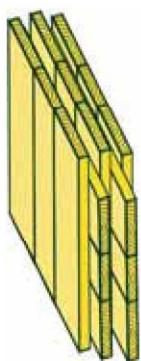


Bruno Dujic, rojen 19.6.1971 v Mariboru, dipl. 1996, dokt. 2001, od takrat dalje zaposlen na UL FGG. Raziskuje na področju potresne odpornosti lesenih in kompozitnih konstrukcij. Sodeluje pri razvoju inovativnih križno lepljenih lesenih konstrukcij. 2001 je za raziskovalno delo v am. projektu CUREE-Caltech prejel priznanje. 2003 je prejel štipendijo japonske agencije za promocijo znanosti (JSPS) za raziskovanje na Japonskem. Na področju raziskav in projektiranja lesenih konstrukcij sodeluje s slovenskimi in tujimi podjetji. 2007 je sodeloval s statiki iz Londona pri projektiranju najvišje 8-etažne lesene stanovanjske stavbe na svetu

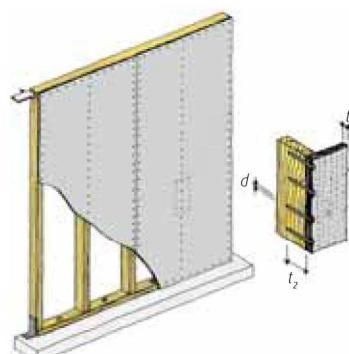
Bruno Dujic, born on June 19th, 1971 in Maribor, graduated in 1996, Ph.D. degree in 2001. Since then he has been working at UL, Faculty of Civil and Geodetic Engineering. His main research topic is seismic resistance of timber and composite constructions. He is involved in research and development of innovative cross-laminated timber structures. In 2001 he received acknowledged for his research contribution in the CUREE-Caltech Woodframe Project. In 2003 he was awarded with fellowship of Japan Society for Promotion of Science (JSPS) for the purpose of visiting researchers in Japan. He is involved in applied research and design of timber structures for Slovenian and foreign companies. In 2007, in cooperation with London engineers, he designed the tallest 8-storey timber residential building in the world.

Opis nosilnega sistema lesene konstrukcije

Konstrukcijski sistemi lesenih konstrukcij se lahko medsebojno zelo razlikujejo, zato smo se v prispevku omejili predvsem na sisteme, kjer vodoravno in navpično obtežbo lesenega objekta prenašajo stenski elementi. V takšnem sistemu se namreč izdeluje večina lesenih objektov tako preizdelanih oz. montažnih kakor tudi sestavljenih na terenu.



Slika 2. Primer stenskega segmenta križno lepljene lesene masivne stene, ki ima veliko strižno togost v ravni steni. Lesene lamele so v masivno steno zlepilene v različnem številu slojev z različno usmerjenostjo lesenih vlaken. Stene se medsebojno in s temeljno konstrukcijo povezujejo z mehanskimi veznimi sredstvi.

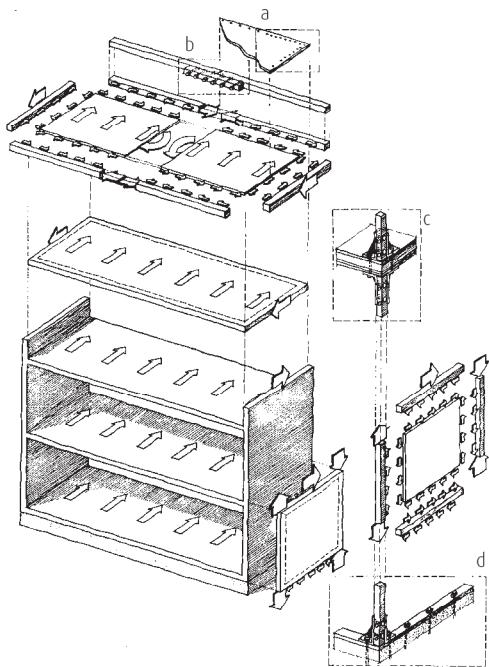


Slika 3. Primer sestave tipskega segmenta lesene okvirne stene, ki zavreje klasične lesene montažne objekte. Večinoma so stene sestavljene iz lesenega okvirja in obložnih plošč, ki jih povezujejo mehanska vezna sredstva. Okvir je lahko na različne načine sidran in povezan z ostalo konstrukcijo objekta.

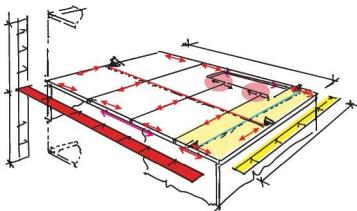
Vpliv potresne obtežbe na nosilno konstrukcijo

Potresna odpornost montažne hiše je odvisna od lokacije objekta, od tlorisne zasnove ter zasnove konstrukcije po višini, dimenzijs posameznih elementov, vrste uporabljenih materialov in veznih sredstev, konstrukcijskih detajlov, izvedbe stikov med leseni elementi, poznavanja obnašanja konstrukcije (stenskih elementov, stikov in sider) pri spremnajoči se obtežbi ter računske analize, ki jo na osnovi teh podatkov izvrši projektant v sklopu projektne dokumentacije pred začetkom gradnje. Hkrati pa je glede na lastno nihajno dobo konstrukcije pomemben tudi frekvenčni sestav, pospešek in amplitudo potresnega nihanja tal pri potresu, ki ga na lokaciji objekta pričakujemo.

Manjša masa lesene konstrukcije povzroči manjše vztrajnostne sile na nosilni konstrukciji, ki se porazdelijo na veliko število konstrukcijskih sklopov oziroma stikov. Potresno obtežbo v obliki vztrajnostnih sil, ki se v konstrukciji aktivirajo zaradi gibanja temeljnih tal, predpostavimo v računski analizi kot linijsko obtežbo na nivoju vsake etaže (*Slika 5*). Nosilna konstrukcija mora biti načrtovana in konstruirana tako, da omogoči zvezen prenos potresne obtežbe preko vseh konstrukcijskih sklopov v temeljno konstrukcijo objekta (*Slika 4*).



Slika 4. Primer odziva lesene konstrukcije na vodoravno obtežbo. Z označbami so prikazani detajli, s katerimi zagotovimo zvezen prenos potresnih sil med posameznimi konstrukcijskimi sklopi: (a) kotna ojačitev v medetažni plošči pri poploščitvi stropnikov – v vogalih je potrebna dodatna povezava vodoravne zavetrovalne plošče z nosilno medetažno konstrukcijo, ki je sestavljena iz stropnikov in prečnih povezav; (b) natezna ojačitev stikovanega robnega nosilca medetažne konstrukcije zaradi upogibne napetosti v medetaži zaradi prenosa vztrajnostni sil pri potresni obtežbi na stenske elemente; (c) zveznost povezav med stojkami v etažah, ki so lahko med potresno obtežbo natezno obremenjene; (d) preprečitev dviga v nateznih stojkah in zdrsa stene po temeljni konstrukciji.



Osnovni element konstrukcije pri montažnih lesenihi hišah je stenski element, ki prenaša navpično obtežbo (lastno težo konstrukcije, stalno in občasno obtežbo), hkrati pa pri delovanju potresa ali vetra prevzema vodoravno obtežbo in zagotavlja konstrukciji določeno togost. Stenski element lahko predstavlja segment masivne stene (*Slika 2*), ki je lepljena iz lesenihi lamel, lahko pa je stenski element sestavljen iz lesenihi okvirnih panelov z obložnimi ploščami (*Slika 3*).

V tem primeru so v leseni okvir panela povezani elementi iz masivnega lesa (pokončniki in prečniki), znotraj okvirja je nameščena topotna izolacija, okvir pa je z ene ali z obe strani zaprt z različnimi vrstami nosilnih obložnih plošč, ki so na osnovi lesa (iverne plošče, vezane plošče, OSB plošče) ali na osnovi drugačnih materialov kot sta mavec in cement z različnimi dodatki (mavčne-kartonske in mavčno-vlaknaste plošče, cementno-iverne plošče ter druge). Elementi so v steno (*Slika 3*) povezani z veznimi sredstvi (jeklene sponke, žebli, vijaki...), ki se razlikujejo med različnimi proizvajalci.



Slika 5. Uporaba križno lepljenih leseni masivnih plošč za medetažno konstrukcijo bistveno izboljša sodelovanje vseh stenskih elementov v spodnji etaži pri vodoravnem odzivu konstrukcije na potresno obtežbo.

in trenja. Mehčanje stikov povzroči povečanje lastne nihajne dobe konstrukcije, kar pa posredno vpliva na zmanjšanje sil v konstrukcijskih elementih. Vendar tega ne moremo pospoliti na vse vrste lesenih konstrukcij, saj se lesene konstrukcije oziroma lahki montažni objekti medsebojno močno razlikujejo že v sami osnovi kompozitnega stenskega elementa zaradi uporabe različnih materialov in veznih sredstev. Tako je natančna računska analiza za tovrstne objekte brez predhodnih eksperimentalnih preiskav stenskih elementov in stikov skoraj neizvedljiva. Iz eksperimentalno določenega odziva stenskega elementa pri ciklično spremenljivi obtežbi izhajajo namreč osnovni parametri, ki jih potrebujemo za računsko analizo potresne odpornosti celotnega objekta. S takšnim pristopom pa lahko računsko analiziramo različno arhitekturno zasnovane objekte, če so le ti sestavljeni iz osnovnih konstrukcijskih sklopov – to je osnovnih stenskih segmentov z uporabo tipskih stikov, ki so bili eksperimentalno preizkušeni. Torej, dokler proizvajalec uporablja isti konstrukcijski sistem, se eksperimentalne preiskave izvedejo le enkrat, v poročilu pa preizkuševalna inštitucija navede mehanske parametre stenskega elementa, ki jih nato projektanti uporabijo pri računskih analizah tovrstnega konstrukcijskega sistema na vodoravno oziroma potresno obtežbo.

Tako EC5 določa, da se odziv kompozitne stene, ki je sestavljena iz dveh panelnih enot, razšče pri kombinaciji navpične in monotono naraščajoče obtežbe v skladu s standardom EN 594 (*Slika 6*). Standard točno določa potek preiskave za določitev strižne togosti in nosilnosti stenskega elementa. S takšno preiskavo določimo bistvene parametre, ki so potrebni pri projektiranju potresoodpornih lesenih konstrukcij.

Načrtovanje potresne odpornosti

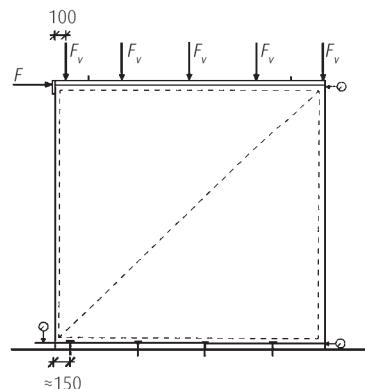
Pri projektiranju montažnih objektov na potresnih območjih je potrebno določiti potresno obtežbo na nosilni konstrukciji zaradi vztrajnostnih sil, ki jih povzroči gibanje temeljnih tal med potresom. Stavbe je potrebno projektirati na potresno obtežbo, ki lahko na določeni lokaciji z določeno verjetnostjo nastopi na konstrukciji. Pri potresih z veliko verjetnostjo, da se zgodijo v življenjski dobi objekta, je potrebno dimenzionirati elemente na mejne deformacije konstrukcije, ki jih lahko dopustimo

pri nadaljnji uporabi objekta glede na nastalo škodo, ki je še dopustna v primerjavi z vrednostjo objekta. Pri močnejših potresih pa moramo konstrukciji zagotoviti dovolj veliko nosilnost, ki ji zagotavlja varnost pred porušitvijo (*Slika 6*). Pri tem nastanejo določene poškodbe v konstrukciji, ki jih lahko z nekoliko večjimi začetnimi vlaganji bistveno zmanjšamo. V potresnem inženirstvu namreč velja načelo, da se običajni objekti projektirajo tako, da ostanejo v glavnem nepoškodovani med bolj pogostimi oziroma šibkejšimi potresi in da se ne porušijo med najmočnejšimi potresi.

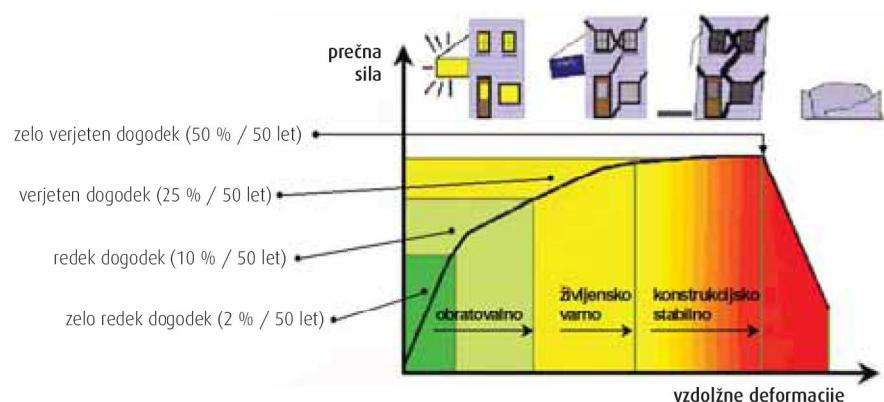
Tako je potrebno v fazi načrtovanja objekta z naročniki določiti nivo zaščite objekta. Lastniki se lahko odločijo za večjo zaščito od tiste, ki jo ponujajo predpisi, kar pomeni nekoliko večja začetna vlaganja in bistveno zmanjšanje škode med morebitnim potresom.

Vendar pa morajo izvajalci in projektanti na vsak način naročniku zagotoviti predpisano varnost, ki jo je potrebno z veljavnimi računskimi postopki določanja potresnega vpliva na posameznih objektih tudi dokazati.

Projektiranje potresoodpornih konstrukcij po EC8 temelji na načrtovanju mejnih stanj. Potresni vpliv na konstrukcijo oziroma velikost potresne obtežbe določimo s projektnim spektrom, v katerem izrazimo intenzitetu potresa z vrednostjo največjega pospeška temeljnih tal in upoštevanjem sposobnosti disipiranja potresne energije v nosilni konstrukciji objekta. Seizmološka karta Slovenije podaja direktno efektivne pospeške tal. Pri projektiranju je potrebno zadostiti predvsem dvema kriterijema, ki konstrukciji zagotavljata ustrezno stopnjo zanesljivosti na potresnih območjih. Prvi kriterij je zahteva, da v življenjski dobi objekta ne pride do porušitve zaradi potresa, ki ga na določeni lokaciji pričakujemo s povratno peri-



Slika 6. Shema strižne preiskave tipskega stenskega elementa etažne višine in dolžine 2,4 m po EN 594.



Slika 6. Načrtovanje odziva konstrukcije glede na stopnjo tveganja, ki temelji na verjetnosti dogodka v določenem obdobju (povzeto iz PEER Research Plan; <http://peer.berkeley.edu>).

[VIRI IN LITERATURA]

[1] CECCOTTI, Ario. Detailing of timber structures in seismic areas. Timber Engineering STEP 2, edited by Blass H.J. et al., 1995, D10/1-10.

[2] CECCOTTI, Ario, TORATTI, Tomi, DUJIČ, Bruno. Design of timber structures in seismic zones according to Eurocode 8 - 2002 version. Meeting 35 - International Council for Research and Innovation in Building and Construction – Working Commission W18 – Timber Structures, 2002, str. 1-12.

[3] DUJIČ, Bruno, ŽARNIĆ, Roko. Modeliranje in izračun dinamičnega odziva leseni okvirnih konstrukcij na potresno obtežbo = Modelling and calculation of dynamic response of woodframe structures on earthquake excitation. Gradbeni vestnik, november 2001, str. 260-272.

[4] DUJIČ, Bruno, ŽARNIĆ, Roko. Projektiranje konstrukcij leseni montažnih hiš na potresnih območjih = Structural design of prefabricated timber houses in seismic regions. Gradbeni vestnik, oktober 2001, str. 240-250.

[5] DUJIČ, Bruno. Eksperimentalno podprt modeliranje odziva leseni okvirnih panelov na vodoravno ciklično obtežbo. Doktorska disertacija, 2001.

[6] DUJIČ, Bruno, ŽARNIĆ, Roko. Numerical predictions of the seismic response of a two-story woodframe house. V: CUREE-Caltech woodframe project. San Diego: University of California, 2001, str. 1-15.

[7] FAJFAR, Peter. Eurocode 8: Splošno in analiza, Uvajanje sodobnih evropskih standardov "EUROCODE" v Sloveniji, Zbornik seminarja ob 100-letnici potresnega inženirstva na Slovenskem v Postojni, urednik Fischinger M., 1995; str. 151-176.

odo 475 let. Glede na predvideno življenjsko dobo lahkih leseni objektov, ki je okoli 50 let, to pomeni, da obstaja 10 % verjetnost, da se tak potres zgodi v času obstoja objekta. Drugi kriterij pa je mejno stanje uporabnosti, po katerem bi morali objektu zagotoviti ustrezeno togost. V primeru močnejšega potresa, za katerega obstaja velika verjetnost, da se pojavi v življenjski dobi objekta, mora konstrukcija ostati nepoškodovana oziroma ne sme utrpeti škode, ki bi bila velika v primerjavi s ceno same konstrukcije.

Glede na specifično nelinearno obnašanje leseni konstrukcij, bi bilo potrebno zagotoviti lesenim konstrukcijam "elastični odziv" na potres s povratno periodo 50 let. Pri tem je potrebno poudariti, da obravnavani konstrukcijski sistemi zaradi velikega števila stikov ne izkazujejo značilnega linearnega obnašanja, zato prihaja postopoma pri različnih kombinacijah obtežb na konstrukciji do postopnega utrujanja in mehčanja stikov, kar skozi življenjsko dobo objektov pomeni večjo podajnost in občutljivost na določene potresne vplive. Zato je potrebno smiselnovrednotiti mejo elastičnosti konstrukcijskih stikov, elementov oziroma sklopov, kar nam zagotavlja stabilizacijo nosilnosti pri večkratnih ponovitvah obtežbe.

Pri načrtovanju konstrukcij s sposobnostjo disipiranja energije ($q > 1$) je priporočljivo, da je nosilnost in togost leseni elementov večja od nosilnosti in togosti stikov. S tem zagotovimo plastifikacijo stikov in preprečimo večinoma krhke porušitve leseni elementov zaradi naravnih defektov lesenega medija, kot so npr. grče. Masivni in lepljeni leseni elementi se tako pri nezgodnih obtežbah zaradi potresa ali močnega vetra obnašajo elastično. Nelinearno obnašanje in sposobnost disipiranja energije izkazujejo lesene konstrukcije predvsem zaradi delno togih stikov med različnimi elementi, kar je značilno za stike pri uporabi mehanskih veznih sredstev.

no načrtovati ter računsko izkazati njihovo potresno odpornost. S časovno oddaljenostjo potresov namreč v miselnosti ljudi potresna nevarnost izgublja pomen in ljudje niso pravljeni vlagati dodatnih sredstev, ki so povezani s potresno zaščito, vse dokler ponovno ne občutijo posledic močnejšega potresa.

Zaradi raznolikosti sistemov gradnje in sestave montažnih stenskih elementov pri različnih proizvajalcih bi bilo potrebno skladno z evropskimi standardi določiti odziv osnovne konstrukcijske enote, ki prevzema vodoravno obtežbo objekta. Velikostenski elementi se namreč izdelujejo serijsko, v njih so uporabljeni tipski stiki, vsak stenski element pa je sestavljen iz enakih panelnih enot. Ti podatki o konstrukcijskem sistemu so osnova za računski izkaz potresne odpornosti objekta.

Zaključek

Tudi lesene konstrukcije so lahko potresno ogrožene, če jim v fazi načrtovanja ne zagotovimo ustrezne nosilnosti in togosti. Gradbeniki oziroma projektanti se moramo zavedati, da je potrebno na potresno ogroženih področjih, kamor sodi tudi Slovenija, tako lesene konstrukcije kakor tudi ostale konstrukcije skrb-