

# ZBORNIK

8. DNEVA INŽENIRJEV

*Potresno varna  
gradnja*

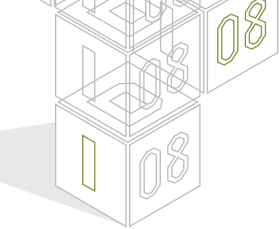




# ZBORNIK

8. DNEVA INŽENIRJEV

Potresno varna  
gradnja

**Strokovni svet:**

mag. Črtomir Remec  
dr. Branko Zadnik  
Ivan Leban  
Andrej Povšič  
dr. Željko Vukelić  
Matjaž Grilc  
Borut Zule

**Glavni in odgovorni urednik:**

dr. Željko Vukelić

**Tehnična ureditev:**

Polona Okretič

**AD&D:**

Kraft&Werk d.o.o.

**Tisk:**

Euroadria d.o.o., Ljubljana

Ljubljana, november 2008

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

624.042.7(082)  
699.841(082)

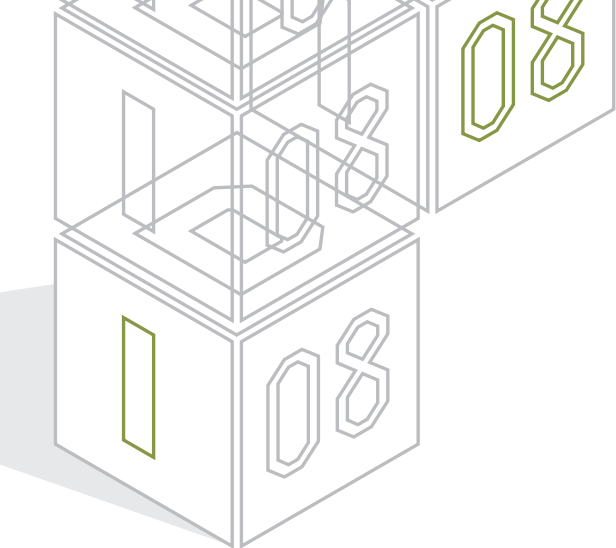
DAN inženirjev (8 ; 2008 ; Ljubljana)

Potresno varna gradnja : zbornik 8. dneva inženirjev / [glavni urednik Željko Vukelić]. - Ljubljana : Inženirska zbornica Slovenije - IZS, 2008

ISBN 978-961-6724-02-9  
1. Gl. stv. nasl. 2. Vukelić, Željko  
242384640

# Kazalo

- 5 **Predsednik IZS: mag. Črtomir REMEC**  
Uvodna beseda  
**INTRODUCTION**
- 7 **Akad. prof. dr. Peter FAJFAR**  
**Matej ROZMAN**  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo  
EVROKOD 8 – nov slovenski in evropski standard za projektiranje potresnoodpornih konstrukcij
- 15 **prof. dr. Matej FISCHINGER**  
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo  
Eksperimentalno in numerično modeliranje potresnega odziva konstrukcij v podporo razvoja sodobnih metod projektiranja
- 21 **doc. dr. Branko ZADNIK**  
IBE, d.d.  
Potresno varna graditev pregradnih objektov skozi čas
- 27 **dr. Samo GOSTIČ**  
**dr. Blaž DOLINŠEK**  
Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o.  
Upoštevanje in izkušnje pri uporabi Evrokoda 8 v okviru popotresne obnove v Posočju
- 33 **Peter KOREN**  
KO-BIRO d.o.o., Maribor  
Potresno varne zasnove mostov v projektantski praksi



# Uvodna beseda

## INTRODUCTION



Ko smo se pred dvema letoma odločili za strategijo spreminjanja gradbene kulture, še nismo vedeli, da bo vzneseno obdobje konjunktore že tako hitro zamenjala svetovna finančna in posledično tudi gospodarska kriza.

Tako zdaj lahko samo še bolj upravičeno nadaljujemo naše načrtovane aktivnosti za zagotavljanje strokovne ustvarjalnosti in vzpodbujanje inženirske inovativnosti. Kakovost in učinkovitost bosta v bolj zaostrenih razmerah postala pomembna dejavnika uspeha projektantov, izvajalcev in ostalih udeležencev v procesu graditve.

Za nosilno temo 8. Dneva inženirjev smo izbrali potresno varno gradnjo, s katero nadaljujemo naša prizadevanja za boljše obvladovanje gradbenih rizikov. Glede na veliko potresno ogroženost Slovenije in dosedanje izkušnje z večjimi in manjšimi potresi, imamo dobro razvito potresno inženirstvo, naši znanstveniki in raziskovalci pa so med vodilnimi v svetu. Tako imajo inženirji vse pogoje, da bogato znanje in izkušnje prenesejo v vsakdanjo gradbeno prakso in zagotovijo varnost ljudi in premoženja, tudi v primeru močnejših potresov.

Kljub temu, da se je že veliko inženirjev v zadnjih dveh letih udeležilo splošnih in tudi tematskih tečajev o slovenskih in evropskih gradbenih standardih, ki jih je IZS organizirala v sodelovanju s Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo, smo na letošnji strokovni del inženirskega dneva z veseljem povabili priznana profesorja in inženirje projektante, ki nam bodo na kratko predstavili njihove izkušnje pri uporabi Evrokoda 8, eksperimentalne in analitične metode ter primere potresno odporne gradnje visokih pregrad, mostov in stavb.

Vseživljenjsko izobraževanje in skrb za dobro inženirsko prakso postajata pomembno področje zborničnega delovanja. Zavedamo se pomena gradbeništva za naše gospodarstvo, zato želimo aktivno vplivati na reševanje problematike nekaterih javnih gradenj, ki mečejo slabo luč na celotno panogo. V sodelovanju z resornim ministrstvom nove vlade si bomo prizadevali, da naši strokovno utemeljeni predlogi za povečanje kakovosti in učinkovitosti procesa graditve dobijo tudi ustrezno zakonsko podlago in izvedbene podzakonske akte.

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

Predsednik Inženirske zbornice Slovenije

When we decided on a strategy for changing the culture of construction two years ago, we were not aware of the fact that the enthusiastic period of an economic boom would soon be replaced by a global financial and economic crisis. In the light of the present situation, we can even more justifiably continue with the execution of our planned activities in order to ensure professional creativity and promote engineering innovation. In these difficult conditions, quality and performance will become important factors in the success of project designers, contractors and other participants in the construction process.

A topic that will be in the forefront of the 8<sup>th</sup> Day of Engineers is earthquake-resistant construction, by means of which we continue our efforts to better manage the construction risks. Considering high seismic risk and our past experience with large and small earthquakes, our earthquake engineering is well developed and our scientists as well as researchers are among the best in the world. Therefore, our engineers have the opportunity to translate their expert knowledge and experience into everyday construction practice and thus guarantee the safety of people and their belongings in the case of more severe earthquakes.

Many engineers have attended general courses and courses dealing with the subject of Slovenian and European construction standards, organized in the last two years by the Slovenian Chamber of Engineers in cooperation with the Faculty of Civil and Geodetic Engineering. Regardless of this fact, this year's expert session during the Day of Engineers will be marked by speeches by two renowned professors and project designers, who will present their own experience in the application of Eurocode 8, their experimental and analytical methods and examples of the earthquake-resistant construction of high barriers, bridges and buildings.

Lifelong learning and the taking care of good engineering practices are becoming important subjects, included in the activities of our chamber. We are aware of the importance of construction for our economy; therefore we wish to actively participate in the resolving of issues related to some public constructions, which do not reflect well on the entire construction industry. In cooperation with the appropriate ministry, we will strive to ensure that our suggestions for improving the quality and the efficiency of the construction process get a proper legal basis together with acts for their implementation.

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

President of Slovenian Chamber of Engineers





# EVROKOD 8 — nov slovenski in evropski standard za projektiranje potresno-odpornih konstrukcij

Akad. prof. dr. Peter FAJFAR, univ.dipl.inž.grad.

Matej ROZMAN, univ.dipl.inž.grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo

## POVZETEK

Od začetka leta 2008 je v Sloveniji obvezna uporaba novega standarda za projektiranje potresno-odpornih konstrukcij Evrokod 8 (v nadaljevanju besedila EC8). Ta standard prinaša v slovensko prakso številne novosti. Uporaba novega standarda je bolj zahtevna kot uporaba starih predpisov. Konstrukcije, projektirane po novem standardu, so v povprečju nekoliko dražje, zato pa večinoma precej bolj odpor-

ne proti potresom. V prispevku so najprej na kratko predstavljene osnovne značilnosti novega standarda in postopek njegovega uvajanja v Sloveniji. Nato je na primeru armirano-betonske stavbe prikazana razlika med obnašanjem obstoječe stavbe, ki ni bila projektirana na potresno obtežbo in stavbami, ki so deloma ali v celoti projektirane po EC8.

## ABSTRACT

The use of the new standard for design of structures for earthquake resistance Eurocode 8 (EC8) has been in Slovenia compulsory since the beginning of the year 2008. EC8 introduces several new procedures in Slovenian design practice. The application of the new standard is more demanding than the application of the previous code. The cost of the structures, designed according to EC8 is, in average, somewhat higher. On the other hand, their seismic resistance is also higher.

In the paper, first the basic characteristics of the new standard and the procedure of its implementation in Slovenia are summarized. Then, using the example of a reinforced concrete building, the difference between the seismic response of an existing building, designed for gravity loading only, and buildings designed partly or completely according to EC8, is illustrated.

## 1. UVOD

Evropske (pred)standarde za projektiranje potresno-odpornih konstrukcij (Evrokod 8, EC8) smo uspešno vpeljali v slovensko gradbeno prakso že kmalu po sprejetju ustreznih predstandardov v EU leta 1994. Razlogi za to niso bili samo politični, čeprav sta bila gradnja samostojnega pravnega sistema in želja po vključitvi v evropske integracije pomembna dejavnika pri zgodnji odločitvi za prevzem Evrokodov. Na odločitev je vplival tudi izjemno hiter razvoj potresnega inženirstva v zadnjih desetletjih, ki pa mu, zaradi kaotičnega stanja v obdobju zadnjega desetletja stare države, gradbeni predpisi niso ustrezno sledili. Tako smo v novi državi podedovali že precej zastarele JUS standarde. Še zlasti je bilo kritično dejstvo, da v času pričetka avtocestnega programa nismo imeli predpisov za gradnjo potresno-odpornih mostov. Zato je bil najprej vpeljan prav del standarda EC8/2 za mostove, čeprav niti v Evropi ni bil popolnoma dokončan. Do leta 2001 so bili, kot slovenski predstandardi, sprejeti vsi deli EC8. Vsi predstandardi (razen enega), so bili prevzeti z metodo platnice. Za nekatere od njih so bili pripravljene tudi slovenski prevodi. Do leta 2005 so bili vsi evropski predstandardi iz družine EC8 pretvorjeni v standarde EN 1998. Po opravljenem glasovanju vseh članic CEN, so bili vsi tudi uradno sprejeti. Vse države članice CEN, med njimi je tudi Slovenija, so obvezane, da evropske standarde iz družine Evrokodov prevzamejo kot nacionalne standarde. Leta 2005 je bil izdan Pravilnik o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov, po katerem je uporaba standardov Evrokod v Sloveniji praktično obvezna od začetka leta 2008 dalje.

Slovenija je ves čas aktivno sodelovala pri pripravi EC8 na evropskem nivoju. Avtor tega prispevka je predstavnik Slovenije v odboru CEN/TC250/SC8, ki je bil v okviru tehničnega komiteja TC 250 zadolžen za pripravo standardov EC8. Slovenski strokovnjaki so pripravili številne pripombe na delovne materiale in prispevali predloge za izboljšave standardov. N2 metoda za poenostavljeno nelinearno analizo konstrukcij, razvita v Inštitutu za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo (IKPIR) Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, je bila vključena v zadnjo verzijo standarda. Celotno delo pri vpeljavi EC8 v Slovenijo vodi delovna skupina WG8 (Potresno-odporne konstrukcije), ki dela v okviru tehničnega odbora SIST/TC Konstrukcije.



V članku so najprej na kratko predstavljeni osnovne značilnosti novega standarda in postopek njegovega uvajanja v Sloveniji. Nato je na primeru trietažne armiranobetonske stavbe prikazana razlika med obnašanjem stavbe, ki ni bila projektirana na potresno obtežbo in štirih različic te stavbe, ki so deloma ali v celoti projektirane po EC8.

## 2. PREGLED STANDARDOV V OKVIRU EVROKODA 8

EC8 (Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij) sestavlja šest delov:

Del	Oznaka	Naziv
1	EN-1998-1	Splošna pravila, potresna obtežba in pravila za stavbe
2	EN-1998-2	Mostovi
3	EN-1998-3	Ocena in prenova stavb
4	EN-1998-4	Silos, rezervoarji in cevovodi
5	EN-1998-5	Temelji, oporne konstrukcije in geotehnični vidiki
6	EN-1998-6	Stolpi, jambori in dimniki

TABELA 1  
Struktura EC8

Slovenski inštitut za standardizacijo (SIST) je že izdal vse dele EC8 kot slovenske standarde z oznako SIST EN 1998. Vsi deli so pripravljene z metodo platnice, to je s standardom v angleškem jeziku in slovenskimi uvodnimi stranmi, le za prvi del pa obstaja slovenski prevod standarda (SIST EN 1998-1). SIST je izdal tudi slovenske nacionalne dodatke k vsem delom EC8. Nacionalni dodatki vsebujejo podatke o nacionalno določenih parametrih, odločitve o uporabi informativnih dodatkov in podatke o dodatnih informacijah, ki pomagajo pri uporabi Evrokoda in niso v nasprotju z njim. Slovenija ima seveda svojo karto potresne nevarnosti, ki določa velikost projektnih potresnih vplivov na različnih območjih. Drugače smo v Sloveniji v nacionalnih dodatkih sprejeli skoraj vse priporočene vrednosti »nacionalnih parametrov«, to je parametrov, ki jim posamezne države lahko priredijo svoje vrednosti. Eno redkih izjem pri tem predstavlja elastični spekter za enega od tipov tal, kjer je bil spekter, ob upoštevanju rezultatov raziskav potresov na Bovškem, nekoliko spremenjen.

## 3. NAMEN EVROKODA 8

EC8 dopolnjuje ostale Evrokode in vsebuje samo dodatne zahteve za projektiranje na potresnih območjih. Izrecno je navedeno, da je namen EC8:

- zaščita človeških življenj,
- omejitev škode in
- zagotovitev obratovanja pomembnih javnih objektov.

Zelo pomembno se je zavedati, da namen ni preprečitev škode, saj bi bilo to, zaradi majhne verjetnosti močnega potresa, v večini primerov neekonomično. Seveda pa imajo investitorji proste roke, da se odločijo za večjo zaščito svojih objektov kot jo predvideva standard, ki zagotavlja samo minimalne kriterije.

## 4. BISTVENE NOVOSTI V EVROKODU 8

Potresno inženirstvo je razmeroma nova veda, ki se po slabih izkušnjah nedavnih potresov hitro razvija. Tako med vsemi Evrokodi prav EC8 prinaša v projektantsko prakso največ novosti. Za slovensko (in večinoma tudi za evropsko) prakso so pomembne novosti kot so eksplicitno upoštevanje sipanja energije z redukcijskimi faktorji, uporaba pospeška tal kot projektnega parametra, kontrola pomikov, metoda načrtovanja nosilnosti, natančne zahteve pri projektiranju konstrukcijskih detajlov ter razlikovanje primarnih in sekundarnih elementov za prenos potresnih obremenitev. Standardi obravnavajo tudi nekatere konstrukcije in področja, ki niso bili zajeti v obstoječih predpisih, npr. potresnoodporno projektiranje mostov in drugih inženirskih objektov, geotehnične vidike, potresno izolacijo in konstrukcijsko prenavo potresno neodpornih stavb. Vključeni so tudi postopki nelinearne analize in elementi projektiranja kontroliranega obnašanja.

## 5. IZKUŠNJE Z UPORABO EC8 V SLOVENIJI

Slovenija je EC8 vpeljala hitreje kot druge evropske države. Na to je najprej vplival avtocestni program, drugo vzpodbudo pa je dal potres v Posočju leta 1998. Nekateri projektanti v Sloveniji so EC8 tako že uporabljali v praksi. Ker pa uporaba standarda do zdaj ni bila predpisana z zakonom, se je večkrat dogajalo, da so projektanti uporabljali le tiste dele standarda, ki bistveno ne spreminjajo že ustaljene gradbene prakse.

Dejstvo je, da je EC8 precej zahteven standard. Za široko vsakodnevno uporabo bo nujno pripraviti ustrezna orodja za projektante. Prav v tem pa je prednost standardov Evrokod. Namenjeni so več sto milijonskemu tržišču, kar zagotavlja, da bodo imeli ustrezno podporo pri uvajanju v prakso. V pripravi je komentar za uporabo v Sloveniji. Potrebni so računalniški programi. Orodja, s katerimi bi bilo mogoče opraviti celotno projektiranje v skladu z določili EC8, zaenkrat še ne obstajajo. Obstajajo pa programi za analizo pri potresni obtežbi. EC8 je že dlje časa vključen v program univerzitetnega študija na Univerzah v Ljubljani in Mariboru, tako da so mlajši projektanti že v času študija pridobili nekaj osnov. Vsi projektanti potrebujejo dodatna izpopolnjevanja. V letih 2007 in 2008 je Inženirska zbornica Slovenije, v sodelovanju s Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, organizirala tečaje, za katere je bilo med projektanti veliko zanimanja.

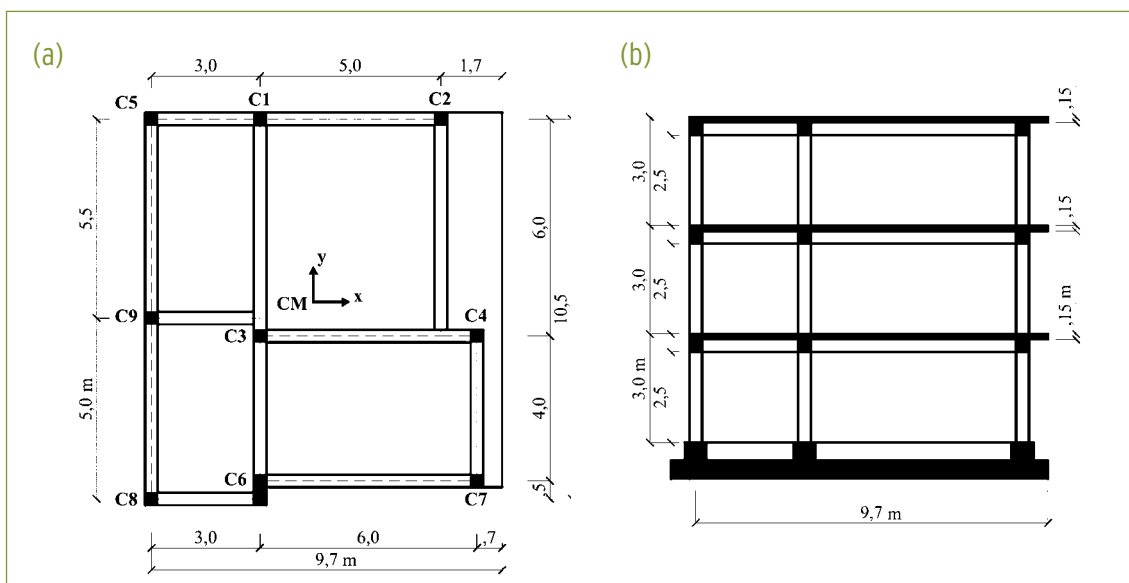
## 6. ANALIZA POTRESNEGA OBNAŠANJA TESTNE KONSTRUKCIJE

### 6.1 Opis različic testne konstrukcije in obtežbe

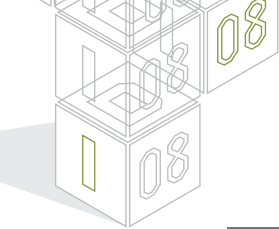
Za testni primer je uporabljena trietažna nesimetrična armiranobetonska (AB) okvirna stavba. Primerjali bomo potresno obnašanje petih različic obravnavane konstrukcije. Prikazani so samo osnovni podatki in rezultati, več podrobnosti je v članku (Rozman, Fajfar, 2008). Osnovna konstrukcija SPEAR (Test) je tipični primer projektantske prakse izpred pol stoletja in je bila projektirana le na vertikalno obtežbo. Konstrukcija je bila v okviru evropskega projekta SPEAR psevdodinamično (PsD) preizkušena v laboratoriju Evropske unije ELSA v Ispri, Italija (Negro et al., 2004, Fajfar et al., 2006). Osnovni model bomo primerjali z različicama Test 0,15 in Test 0,25. Obe različici smo projektirali pri nespremenjeni vertikalni obtežbi, geometriji in dimenzijah nosilnih elementov po Evrokodu 8, za območji s projektnim pospeškom tal 0,15 g oziroma 0,25 g (za tla tipa A). Ob predpostavki, da so testne konstrukcije temeljene na tleh tal tipa C ( $S = 1,15$ ), znašata tako projektna pospeška tal 0,17 g in 0,29 g. Zaradi nespremenjenih dimenzij, kljub bistveno povečani armaturi, nismo mogli zadostiti pogoju globalne duktilnosti, ki ga zahteva EC8. Zaradi tega smo analizirali še različici EC8 M in EC8 H, ki sta bili v celoti projektirani po zahtevah EC8. V ta namen smo morali pri obeh konstrukcijah povečati dimenzije stebrov in nekoliko prilagoditi dimenzije gred. Obe različici sta bili projektirani na projektni pospešek 0,25 g ob upoštevanju faktorja tal 1,15, torej na 0,29 g. Pri EC8 M smo upoštevali srednjo stopnjo duktilnosti (DCM), pri EC8 H pa visoko stopnjo duktilnosti (DCH). Poleg primerjav obnašanja pri potresni obtežbi bomo prikazali tudi primerjave količine betona in vzdolžne armature za vse analizirane konstrukcije, kar omogoča oceno vpliva zahtev novih standardov na ceno konstrukcije.



SLIKA 1  
Konstrukcija SPEAR

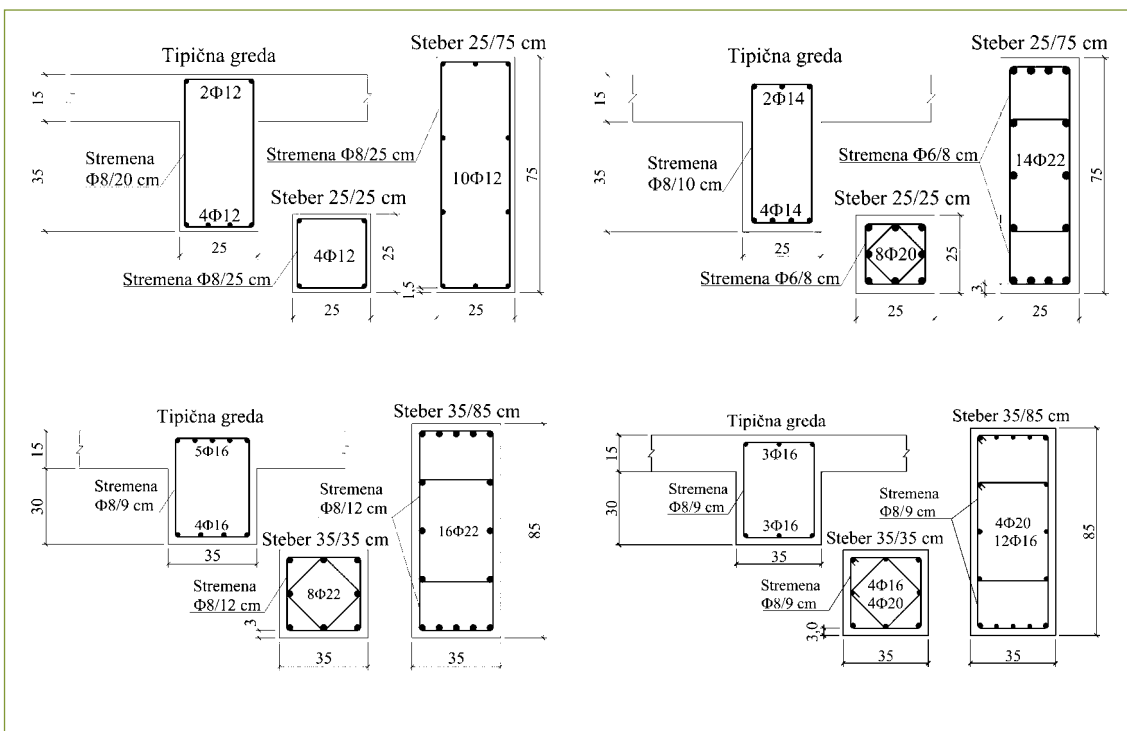


SLIKA 2  
(a) Tloris in (b) prečni prerez konstrukcije SPEAR



Različica	Opis
Test	Prvotna konstrukcija, ki je bila PsD preizkušana v laboratoriju ELSA (Ispra)
Test 0,15	Konstrukcija delno projektirana po EC8 ( $a_g = 0,15$ g, DCM ( $q = 3,45$ ), tip tal C ( $S = 1,15$ )) ob nespremenjeni geometriji, dimenzijah nosilnih elementov in vertikalni obtežbi
Test 0,25	Kot Test 0,15, vendar s povečanim projektnim pospeškom ( $a_g = 0,25$ g namesto $a_g = 0,15$ g)
EC8 M	Konstrukcija projektirana po EC0, EC1 in EC8 ( $a_g = 0,25$ g, DCM ( $q = 3,45$ ), tip tal C ( $S = 1,15$ )) ob nespremenjeni geometriji, dimenzije nosilnih elementov so bile ustrezno povečane
EC8 H	Kot EC8 M, vendar za DCH ( $q = 5,20$ ) namesto za DCM ( $q = 3,45$ )

Tabela 1 Obravnavane različice konstrukcije

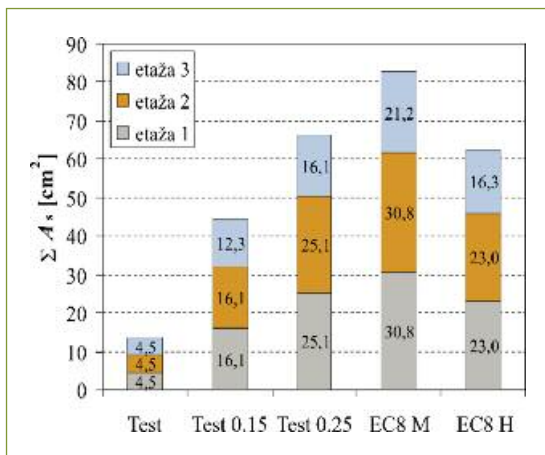


SLIKA 3 Tipični prerezi grede in stebrov (a) Test, (b) Test 0,25, (c) EC8 M, (d) EC8 H

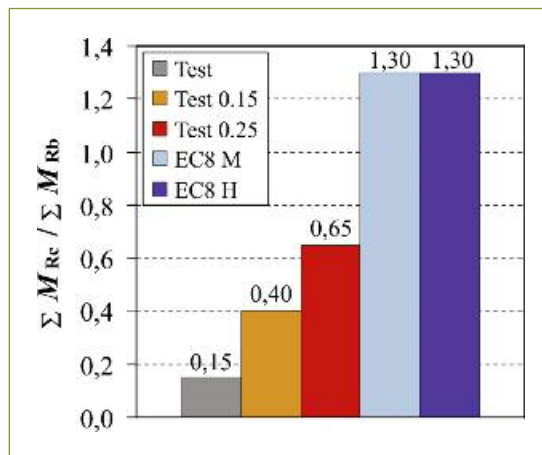
Pri različicah Test smo upoštevali obtežbo, ki je bila uporabljena pri testu v Ispri, medtem ko smo pri različicah EC8 upoštevali realne vrednosti za težo, tako da smo poleg lastne teže konstrukcije upoštevali še dodatno težo v velikosti  $2,7 \text{ kN/m}^2$ , medtem ko je dodatna teža pri testnih konstrukcijah znašala samo  $0,5 \text{ kN/m}^2$ . Potresni vpliv smo upoštevali po EC8. Faktor obnašanja  $q$  je znašal  $3,45$  za srednjo stopnjo duktilnosti (DCM) in  $5,20$  za visoko stopnjo duktilnosti (DCH).

## 6.2 Primerjava obravnavanih različic konstrukcije

Primerjava vzdolžne armature v tipičnem stebri posameznih različic, je podana na sliki 4. Čeprav je vzdolžna armatura pri modelu Test 0,25 povečana do maksimalne mere, ki jo dovoljuje standard EC8 ( $\rho_l = 4,0 \%$ ), pa pogoju globalne duktilnosti, ki zahteva, da je vsota nosilnosti vseh stebrov v vsakem vozlišču vsaj za  $30 \%$  večja od vsote nosilnosti vseh prečk, ni bilo mogoče zadostiti brez povečanja dimenzij stebrov na  $b/h = 35/35 \text{ cm}$ . Prilagodili smo tudi dimenzije gred ( $b/h = 35/45 \text{ cm}$ ). Pri tem se je skupna količina betona nosilne konstrukcije (stebri, grede, plošče) povečala za  $9,33 \text{ m}^3$  ( $13,7 \%$ ), kar ob relativno nizki ceni betona povzroča zelo majhno povečanje stroškov nosilne konstrukcije. Količina stremenske armature v stebrih različic Test 0,15 in Test 0,25, EC8 M, in EC8 H je  $2,8$ ,  $4,2$ , in  $5,6$  krat večja od količine stremenske armature v testni konstrukciji. Razmerja vsot nosilnosti stebrov in gred za najbolj kritično vozlišče so prikazana na sliki 5.



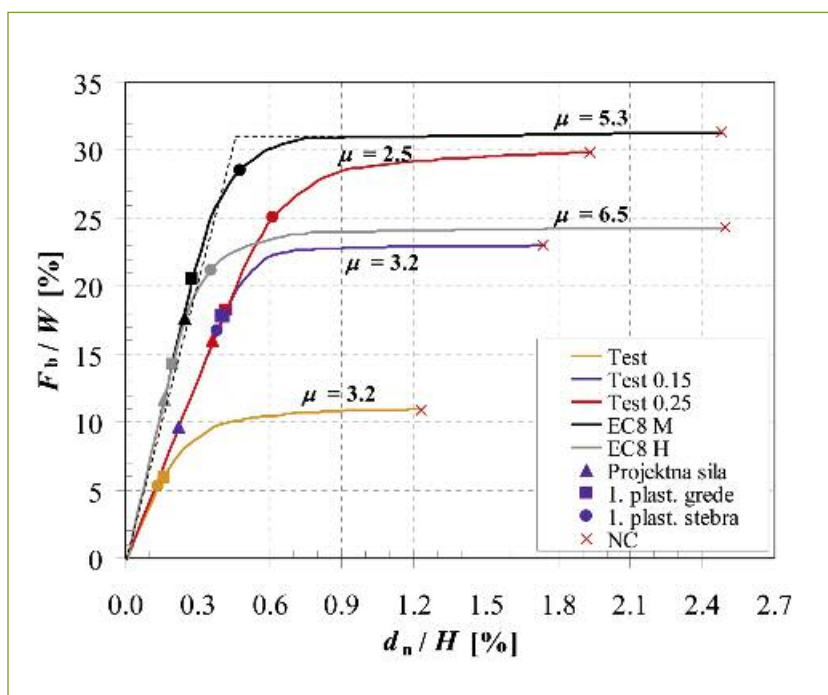
SLIKA 4  
Primerjava količine vzdolžne armature v tipičnem steburu



SLIKA 5  
Primerjava razmerja vsot upogibnih nosilnosti stebrov in gred

### 6.3 Analiza konstrukcij

Za analizo konstrukcij smo uporabili komercialen program SAP2000. Stebre in grede smo modelirali z linijskimi elementi. Predpostavili smo, da so AB plošče neskončno toge v svoji ravnini in povsem podajne izven svoje ravnine. Pri nelinearni analizi smo upoštevali plastične členke na koncih linijskih elementov. Odnos med celotno prečno silo in pomikom na vrhu konstrukcije (»pushover« krivuljo) smo izračunali z nelinearno statično (»pushover«) analizo. Na sliki 6 so za x-smer, ki je merodajna, predstavljeni odnosi med prečno silo, normirano s celotno težo konstrukcije, in pomikom na vrhu, normiranim z višino konstrukcije. Označeni so tudi začetek plastifikacije posameznega obravnavanega modela in projektna vodoravna sila, na katero je bil določen model projektiran. Označeno je tudi mejno stanje konstrukcije NC (»near collapse«, to je stanje, ko je konstrukcija blizu porušitve). V naših analizah smo upoštevali, da je NC mejno stanje konstrukcije doseženo takrat, ko je doseženo NC mejno stanje v prvem steburu. Na sliki 6 je predstavljena tudi globalna duktilnost konstrukcije za vse različice, ki smo jo definirali kot razmerje med pomikom pri mejnem stanju NC in pomikom na meji elastičnosti bilinearnega sistema z ekvivalentno začetno togostjo. Ekvivalentna začetna togost je določena na podlagi pogoja, da sta ploščini pod dejanskim in idealiziranim odnosom med obtežbo in deformacijo enaki (glej rezultate za EC8 M na sliki 6).



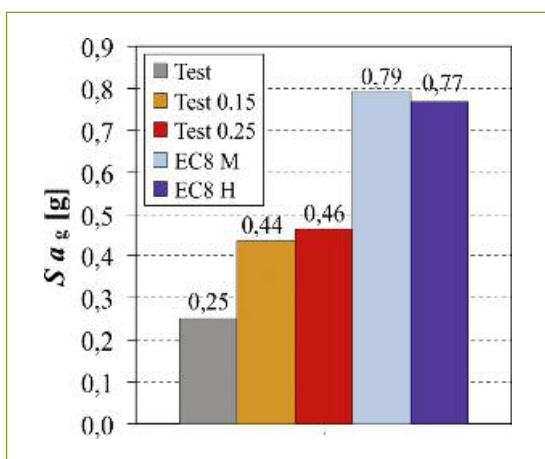
SLIKA 6  
Diagrami normirana sila – normiran pomik (x smer)

## 6.4 Ocena obnašanja

Na sliki 6 je opazna velika razlika v togosti med testno konstrukcijo in različicama EC8, prav tako imata različici EC8 veliko večjo nosilnost (upoštevati moramo 50 % večjo težo) in tudi duktilnost. Različica EC8 H ima za 23 % večjo duktilnost od različice EC8 M. Pri vseh različicah konstrukcije je opazna tudi precejšnja dodatna nosilnost (»over-strength«), ki je predvsem posledica prerazporeditve sil zaradi statične nedoločenosti konstrukcij in nekoliko večje količine armature kot bi bila računsko potrebna (5 do 15 %). Dodatna nosilnost je večja od tiste, ki je bila upoštevana pri projektiranju. Pri ponovnem projektiranju konstrukcij bi lahko zato upoštevali za 30 % manjši potresni vpliv. Rezultati, prikazani v članku (Rozman, Fajfar, 2008), kažejo pri obeh različicah EC8 tudi ugoden globalen plastični mehanizem, kjer so večinoma plastificirane grede in stebri spodaj, ob mestu vpetja. Po drugi strani pri vseh različicah Test plastificirajo predvsem stebri, plastični mehanizem pa se tvori preko spodnjih dveh etaž.

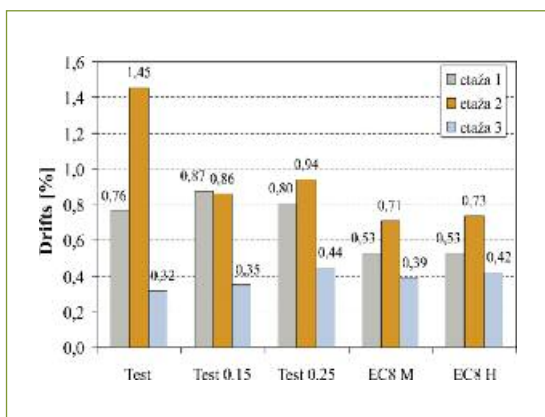
Potresno kapaciteto konstrukcije, ki jo definiramo kot največjo intenziteto potresa, ki jo konstrukcija lahko prenese, smo ocenili s pomočjo N2 metode. N2 metoda je bila razvita v IKPIR FGG in je vključena v EC8. Povezuje nelinearno statično analizo sistema z več prostostnimi stopnjami in spektralno analizo ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo. Metoda je podrobneje razložena v članku (Fajfar, 2002). Vpliv torzije smo upoštevali po postopku opisanem v članku (Fajfar et al., 2005).

Na sliki 7 so predstavljene potresne kapacitete, izražene z maksimalnim pospeškom tal (upoštevati je faktor tal  $S = 1,15$ ), pri mejnem stanju NC. Rezultati kažejo, da smo z ukrepi, ki jih predpisuje EC8, konstrukciji zagotovili veliko potresno odpornost. Potresna kapaciteta različic EC8 M in EC8 H je podobna. EC8 M ima 30 % več vzdolžne armature in 25 % manj stremenske armature v stebrih. Različica EC8 H ima manjšo nosilnost, vendar večja količina strižnih stremen omogoča večjo mejno rotacijo prerezov in posledično tudi večjo globalno duktilnost. Različici Test 0,15 in Test 0,25 imata zaradi večje količine armature večjo potresno odpornost kot osnovna konstrukcija Test, vendar zaradi manjše globalne duktilnosti ne dosežata potresne odpornosti različic EC8. Če bi obravnavano konstrukcijo projektirali po starih predpisih (Pravilnik, 1981), bi bila njena potresna kapaciteta nekje med različicama Test in Test 0,15.

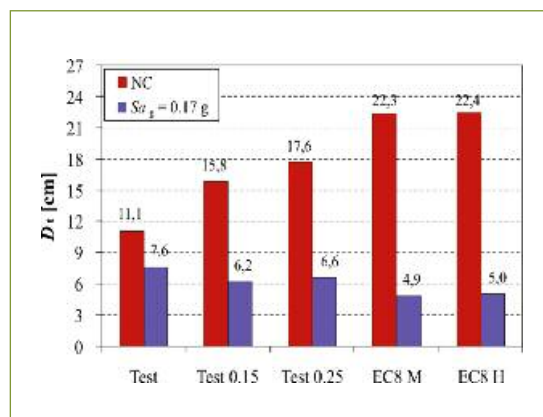


SLIKA 7  
Primerjava potresnih kapacitet konstrukcij, izraženih z maksimalnim pospeškom tal (upoštevati je faktor tal  $S = 1,15$ )

Primerjava normiranih etažnih pomikov za tri etaže vseh različic konstrukcije je prikazana na sliki 8. Zaradi lažje primerjave so v vseh primerih prikazani pomiki pri enaki obremenitvi, to je pri pospešku tal  $S a_g = 0,17$  g. Opazno je, da je pri prvotni konstrukciji kritična druga etaža, kar se je pokazalo tudi pri psevdodinamičnih testih. Pri različicah s povečano armaturo (Test 0,15 in Test 0,25), so etažni pomiki druge etaže bistveno manjši. Pri različicah EC8 M in EC8 H so zaradi večje togosti konstrukcije etažni pomiki manjši v prvih dveh etažah, ki sta kritični za obnašanje konstrukcije. To je dodatna prednost različic, ki so v celoti projektirane v skladu z EC8.



SLIKA 8  
Primerjava etažnih pomikov pri projektnejm pospešku  $S a_g = 0,17$  g



SLIKA 9  
Primerjava pomikov na vrhu konstrukcije pri mejnem stanju NC in pri  $S a_g = 0,17$  g

Slika 9 prikazuje pomik na vrhu konstrukcije pri potresu s pospeškom tal  $S a_g = 0,17 g$  in pomik pri mejnem stanju NC (blizu porušitve), to je pomik, pri katerem prvi stebler doseže mejno rotacijo. Primerjava razmerja obeh pomikov daje predstavo o tem, kolikšno rezervo ima še posamezna obravnavana konstrukcija pri nekem zmernem potresu, ki se lahko dogodi na območju Slovenije.

## 7. SKLEP

EC8 prinaša v slovensko prakso bistvene novosti na področju projektiranja in izvedbe potresnoodpornih konstrukcij. Zahteve EC8 so v splošnem nedvomno strožje v primerjavi s starimi predpisi. To velja za porabo materiala in še bolj za obseg potrebnega dela pri projektiranju. Po drugi strani pa primerjalne analize kažejo, da EC8 tudi bistveno povečuje potresno odpornost konstrukcij pri močnem potresu in zmanjšuje obseg poškodb pri zmernem potresu. Ustrezno zasnovane konstrukcije, projektirane po novem standardu EC8, imajo zaradi večjih potresnih sil večjo nosilnost, zaradi boljših detajlov in zaradi zagotovitve ustreznega plastičnega mehanizma, pa veliko večjo lokalno in globalno duktilnost. Njihove deformacije so manjše, kar pomeni manjšo škodo tudi pri manjših, bolj pogostih potresih. Rezultati analiz testnega primera kažejo, da sta različici, v celoti projektirani po Evrokodu 8, sposobni prenesti potrese s pospeški tal do okrog 2/3 g. Ta vrednost je precej visoka, vendar je treba upoštevati velik raztros podatkov in rezultatov, ki je značilen za potresno inženirstvo. Glede na to lahko pričakujemo, da ima določen delež konstrukcij, projektiran po EC8, manjšo potresno kapaciteto. Upoštevati je treba tudi, da bi glede na rezultate analize, v naslednjem koraku lahko projektirali EC8 različici z za 30 % manjšo potresno obtežbo, če bi upoštevali dejansko dodatno nosilnost, ki je precej večja od tiste, ki smo jo upoštevali v računu.

Vpeljava EC8 v prakso ni in ne bo brez težav. Potrebna so dodatna izobraževanja projektantov in priprava ustreznih računalniških programov. Mestoma bo potrebno spremeniti tudi način mišljenja. Predvsem bo potrebno bolje razumeti in upoštevati odnos med začetnimi vlaganji in morebitnimi posledicami v primeru močnih potresov. Glede na to, da Slovenija uvaja Evrokode pred drugimi evropskimi državami, lahko to pomeni primerjalno vrednost naših projektantov pri pridobivanju projektov na tujih tržiščih v prihodnjih letih.

## 8. LITERATURA

1. EC 8-1 (2005). SIST EN 1998-1:2005. Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe.
2. EC 8-3 (2005). SIST EN 1998-3:2005. Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 3. del: Ocena in prenova stavb.
3. Fajfar, P. (2002). Poenostavljena nelinearna analiza konstrukcij pri potresni obtežbi. Gradbeni vestnik, let. 51, str. 302-315, november 2002.
4. Fajfar, P., Marušič, D., Peruš, I. (2005). Torsional effects in the pushover-based seismic analysis of buildings. Journal of Earthquake Engineering, Vol.9, No. 6, 831-854.
5. Fajfar, P., Dolšek, M., Marušič, D., Stratan, A. (2006). Pre- and post-test mathematical modelling of a plan-asymmetric reinforced concrete frame building. Earthquake Engineering and Structural Dynamics; 35(11):1359-1379.
6. Negro, P., Mola, E., Molina, J., Magonette, G. E. (2004). Full scale PSD testing of a torsionally unbalanced three-storey non-seismic RC frame. Proc. 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver.
7. Pravilnik (1981). Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih. Uradni list SFRJ, 844-855, št. 31, 1981.
8. Rozman, M., Fajfar, P. (2008). Primerjava potresnega obnašanja armiranobetonske okvirne stavbe starejše in sodobne gradbene prakse, Gradbeni vestnik, 57, 129-140.
9. SAP2000 (2002). Analysis Reference Manual, Computers and Structures, Inc., Berkeley.





# Eksperimentalno in numerično modeliranje potresnega odziva konstrukcij v podporo razvoja sodobnih metod projektiranja

prof. dr. Matej FISCHINGER, univ.dipl.inž.grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo

## POVZETEK

Odziv konstrukcij na močne potrese je izrazito nelinearen. V članku je prikazano, da lahko tudi tako zapletene pojave računsko modeliramo z zadovoljivo zanesljivostjo. V potrditev te izjave smo uporabili rezultate vrste preizkusov v velikem merilu. Prikazani preizkusi vključujejo dva eksperimenta armiranobetonskih sten v velikem merilu na potresnih

mizah in psevdo dinamični test montažne armiranobetonske industrijske stavbe v naravnem merilu. Nekateri rezultati raziskav so že upoštevani v evropskih standardih Evrokod 8. Spremembe na področju projektiranja montažnih hal bodo odločilno povečale konkurenčnost te veje gradbene industrije.

## ABSTRACT

Response of structures to strong earthquakes is highly non-linear. The paper demonstrates that even such complex phenomena can be numerically modelled with sufficient reliability. To verify this statement a number of large scale experiments was performed. The presented experiments include two large-scale shaking table tests of reinforced concrete structure

ral walls and a pseudo-dynamic test of a full-scale precast industrial building. Some results of the research have been already applied in the European standards Eurocode 8. The changes introduced into the seismic design of precast industrial buildings will strongly increase the competitiveness of this branch of construction industry.

## 1. UVOD

Odziv konstrukcij na močan potres je zelo zapleten. Ker je takšen dogodek redek, lahko običajne konstrukcije projektiramo tako, da pri močnem potresu preidejo v post-kritično področje in se približajo porušitvi. V tem področju je obnašanje materialov izrazito nelinearno (jeklo se plastificira, beton se drobi). Analitični model mora biti sposoben modelirati takšen pojav, poln nezanesljivosti. Ob tem pa mora biti dovolj zanesljiv, da prepreči porušitev. Takšnih modelov ni mogoče razvijati brez eksperimentalnega ovrednotenja.

V članku so povzeti rezultati nekaj zanimivih projektov, ki so bili podprti z velikimi eksperimenti armiranobetonskih konstrukcij (sten in montažnih hal) na potresnih mizah in reakcijskih stenah. Prikazali bomo vpliv nekaterih bistvenih rezultatov na razumevanje in razvoj evropskih standardov Evrokod 8 za gradnjo potresno odpornih konstrukcij.

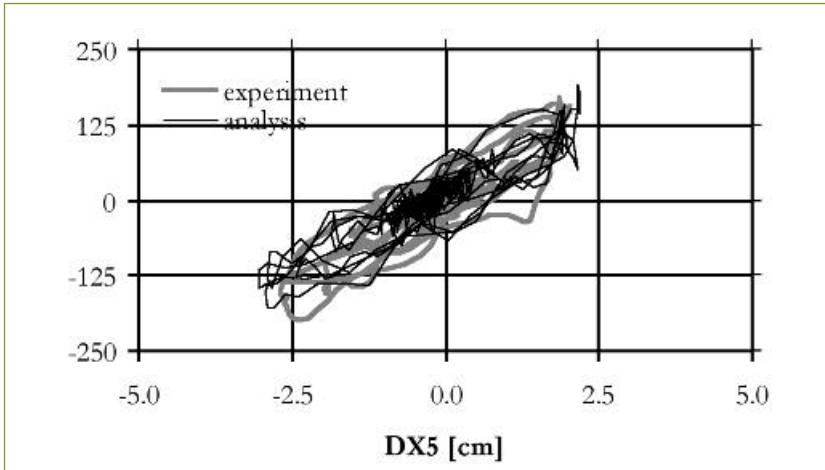
## 2. OPIS PROBLEMA

Problem določanja časovnega odziva konstrukcije na potresno obtežbo formalno obravnavamo z reševanjem sistema diferencialnih enačb

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{\ddot{U}_t\},$$

kjer so  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  matrike mas, dušenja in togosti,  $\{U\}$ ,  $\{\dot{U}\}$ ,  $\{\ddot{U}\}$  vektorji relativnih pomikov, hitrosti in pospeškov, in  $\{\ddot{U}_t\}$  vektor pospeškov temeljnih tal (akceleroگرام potresa).

Matematično gledano sistem ni zelo zapleten. Vendar kmalu opazimo vrsto težav. Omenimo le dve poglavni. Pospeški temeljnih tal so časovno spremenljivi, predvsem pa povsem naključni. Celotni potresi s povsem enakim frekvenčnim sestavom imajo lahko povsem drugačen časovni potek. Drugi problem, ki ga bomo podrobneje obravnavali v tem članku, je v nelinearnosti, saj se togostna matrika spreminja zaradi progresivne poškodovanosti konstrukcije pri močni ciklični obtežbi. Primer histerezne zveze med prečno silo ob vpetju armiranobetonske stene (T) in pomikom na vrhu stene (DX), je prikazan na sliki 1.

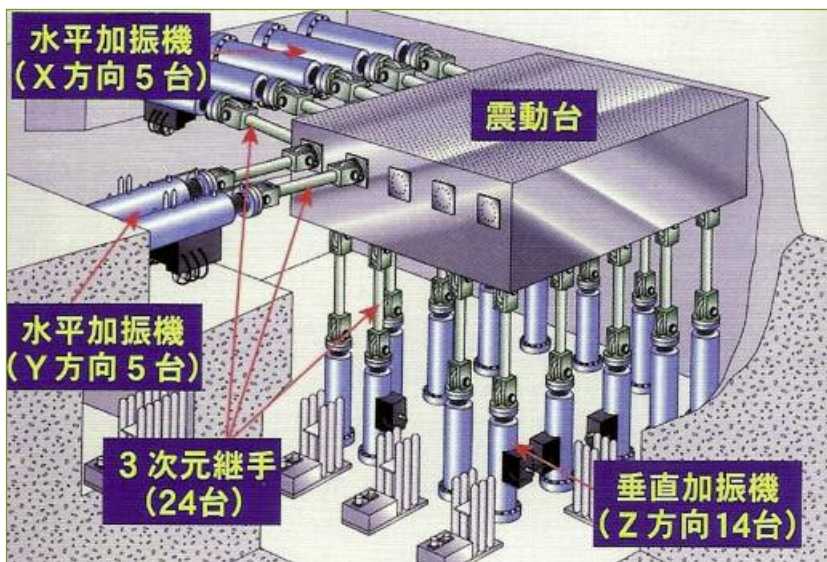


SLIKA 1  
Značilna nelinearna zveza med silo in pomikom pri časovnem odzivu armiranobetonske stene z odprtini

Zelo neregularna zveza med silo in pomikom ni enolična, ampak v različnih časih istemu pomiku ustrezajo različne sile. Naklon krivulje, ki izraža togost stene, se s časom (s stopnjo poškodb) manjša. Inženirski izziv je v primernem zapisu tako neregularnega histereznega odnosa. Numerična pravila morajo primerno natančno opisati dejansko dogajanje, morajo pa biti tudi dovolj robustna in enostavna, da zagotavljajo fizikalno obvladljivost modela, numerično stabilnost in še sprejemljiv obseg računskega dela. Naloga ni preprosta in eksperimentalne preveritve so nujne.

### 3. EKSPERIMENTALNO PREIZKUŠANJE V POTRESNEM INŽENIRSTVU

Preizkusi v laboratorijih so bili najprej statični ali ciklični. Tako nismo mogli povsem dobro modelirati časovno spremenljivi značaj potresnega odziva. Kasneje so se začele uporabljati potresne mize (toge ploščadi, ki jih s hidravličnimi bati krmilimo tako, da se gibljejo kot tla med potresom). Vendar je bila njihova uporaba omejena na razmeroma majhne preizkušance. Šele nedavno so na Japonskem in v ZDA zgradili dovolj velike potresne mize, da lahko z njimi preizkušajo cele stavbe (s težo do 1000 ton) v naravnem merilu. Na sliki 2 je prikazana shema trenutno največje potresne mize (20 x 15 m) na svetu »E-defense«, v bližini mesta Kobe na Japonskem.



SLIKA 2  
Shema potresne mize "E-defense"

### 4. USPEŠNA NAPOVED POTRESNEGA ODZIVA ARMIRANOBETONSKE STENE

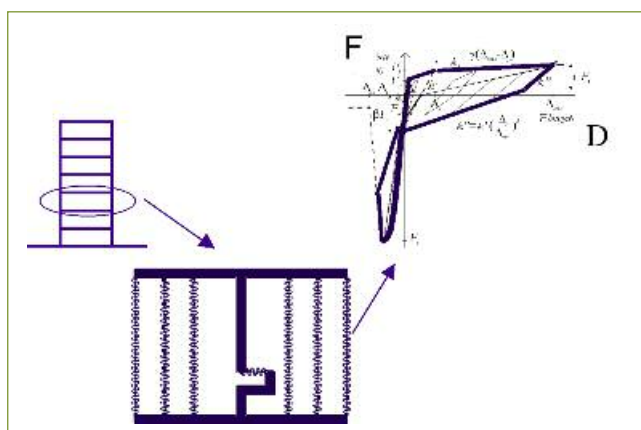
Najboljši način testiranja numeričnih modelov je vnaprejšnja napoved. Tu raziskovalec pozna podatke o konstrukciji in gibanju potresne mize, ne pa tudi eksperimentalno izmerjenega odziva. Raziskovalna skupina iz Ljubljane je med drugim sodelovala v tekmovanju za najboljšo vnaprejšnjo napoved odziva 7-nadstropne stavbe z armiranobetonsko steno. Preizkus je bil narejen na Univerzi v Kaliforniji v San Diegu, v okviru NEES programa. NEES (Network of Earthquake Engineering Simulation) je največji organiziran program s področja potresnega inženirstva na svetu. Povezuje vse najpomembnejše univerze in največje laboratorije v ZDA. Ta preizkus je bil narejen z namenom popularizacije armiranobetonskih stanovanjskih stavb v ZDA in priprave ustreznih zahtev v ameriških predpisih, za potresno varno gradnjo takšnih stavb.

Preizkušane, ki je prikazan na sliki 3, je bil z 22 m višine najvišja konstrukcija, ki je bila kadar koli preizkušena na potresni mizi.



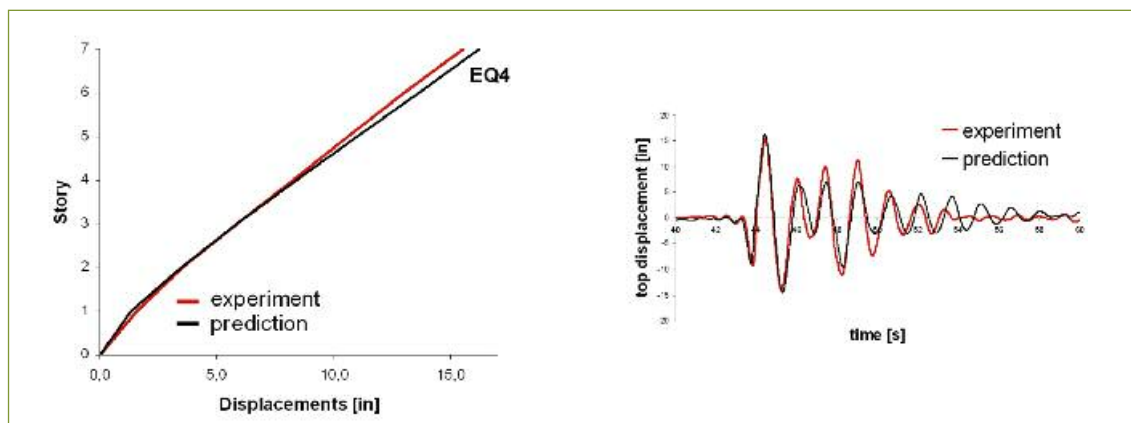
**SLIKA 3**  
Na potresni mizi UC San Diego je bila preizkušena 22 m visoka stena. Slovenski raziskovalci so vnaprej najbolje napovedali odziv

Slovenska skupina je razvila in uporabila glede na problem zelo enostaven, vendar učinkovit model, ki je v konkurenci 20 vodilnih svetovnih inštitucij uspel najbolje napovedati odziv. Relativna preprostost in robustnost modela ter fizikalno razumevanje so bili ključni parametri za uspešnost modeliranja. Model je prikazan na sliki 4. Navpične vzmeti opisujejo nelinearno raztezanje in krčenje posameznih območij stene po prikazanih poenostavljenih pravilih.

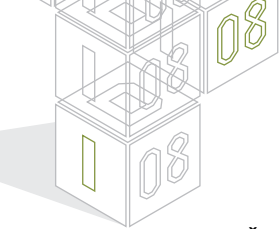


**SLIKA 4**  
Računski makro model stene z več navpičnimi vzmetmi in pripadajoča histerezna pravila

Vnaprejšnja napoved je bila skoraj idealna (slika 5). Raziskovalci v Ljubljani se zavedamo, da tako dobra napoved ni možna brez nekaj sreče. Kljub temu pa je bil to le eden v vrsti dokazov, da je uspešno numerično modeliranje nelinearnega potresnega odziva gradbenih konstrukcij možno.

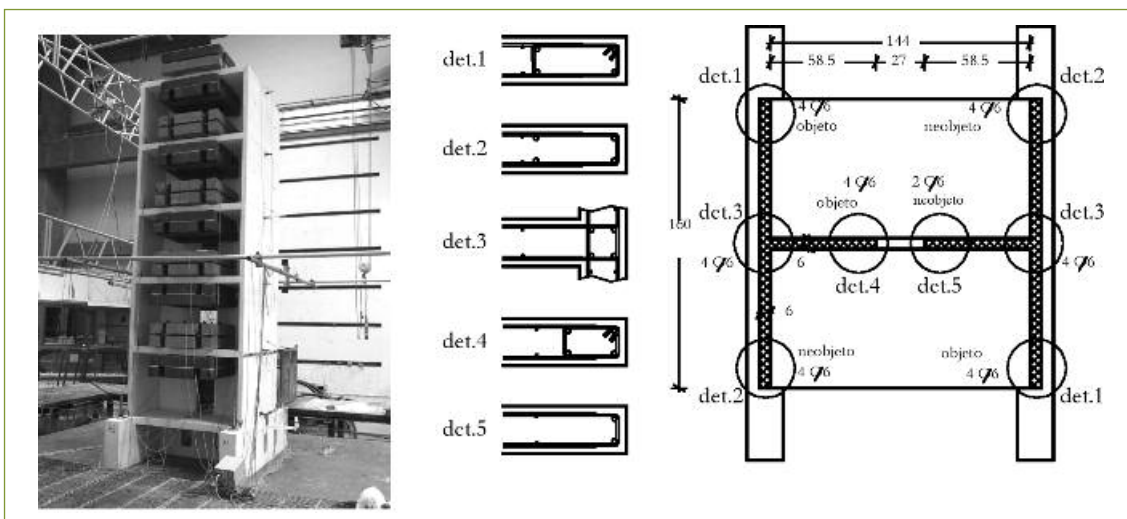


**SLIKA 5**  
Ujemanje numerično napovedanih in eksperimentalno izmerjenih pomikov stene (levo je prikaz po višini stene in desno časovni potek pomika na vrhu stene)



## 5. ŠTUDIJA POTRESNEGA ODZIVA STENE Z ODPRTINAMI, ZGRAJENE V SKLADU S SLOVENSKO PRAKSO

Slovenskim raziskovalcem je na podlagi uspešnih predlogov omogočena brezplačna uporaba velikih eksperimentalnih naprav v Evropi. Tako smo v okviru projekta ECOLEADER na potresni mizi laboratorija LNEC v Lizboni, v velikem merilu 1:3 preizkusili model stene z odprtinami (slika 6), ki je bila zgrajena v skladu z dosedanja gradbeno prakso (ki pa ni povsem ustrezala zahtevam standardov Evrokod 8). Študirali smo obnašanje robov stene z različno stopnjo armaturnega objetja, obnašanje tankih diagonalno armiranih prečk in uspešnost minimalnih armaturnih detajlov v slovenski praksi.



SLIKA 6  
»Slovenska stena«, preizkušena v evropskem laboratoriju LNEC

Raziskava je dala številne pomembne rezultate. Opredelila je stopnjo seizmičnosti in pripadajočo največjo višino konstrukcij do katere še zadoščajo konstrukcijski detajli, ki smo jih uporabljali v naši praksi. Izkazalo se je, da ti detajli zadoščajo za stavbe do 5 etaž in zgradbe na območjih s pričakovanimi potresi do intenzitete VII. Raziskava je pokazala tudi učinkovitost objetja vogalov stene s stremeni po evropskih standardih (slika 7) in nevarnost strižne porušitve slopov sten, ki niso projektirani s postopkom načrtovanja nosilnosti iz evropskih standardov. Izboljšali smo tudi model strižne vzmeti v numeričnemu modelu stene.



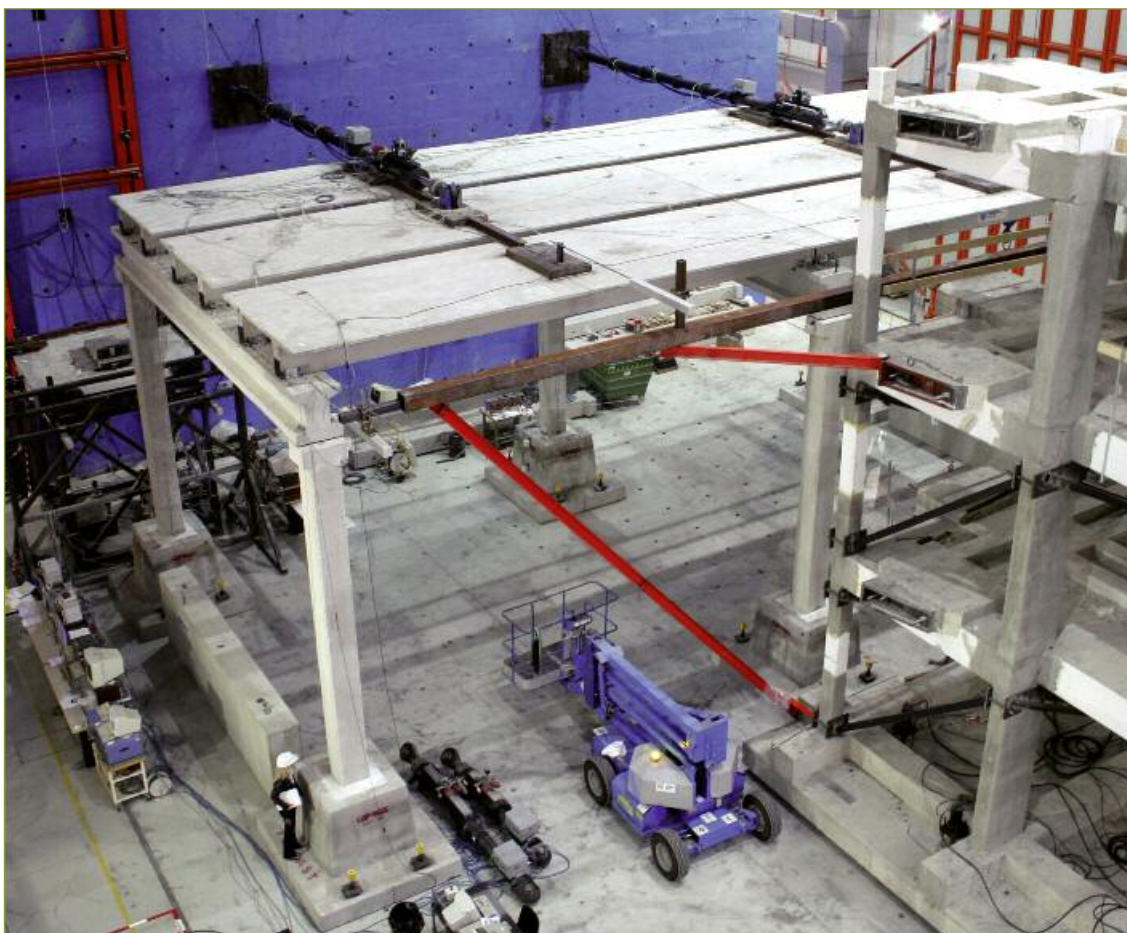
SLIKA 7  
Slabše obnašanje vogala, ki ni bil objet s stremeni po evropskih predpisih (slika levo; armaturni detajl 2 na sliki 6)

## 6. ŠTUDIJA POTRESNEGA TVEGANJA ZA MONTAŽNE ARMIRANOBETONSKE HALE Z MOČNIMI STIKI

Montažne armiranobetonske hale so pogost konstrukcijski sistem, ki je pomemben za slovensko in evropsko gradbeno industrijo. V takšnih konstrukcijah deluje velik del slovenske gospodarske dejavnosti z mnogo zaposlenimi in z opremo velike vrednosti. V zadnjem času se takšen konstrukcijski sistem pogosto uporablja pri gradnji velikih trgovskih centrov z deset tisoči obiskovalcev na dan. Morebitne velike poškodbe ali celo porušitve teh konstrukcij med močnim potresom bi tako lahko imele katastrofalne posledice z veliko neposredno in predvsem posredno škodo zaradi prekinitve proizvodnje.

Majhno število raziskav montažnih sistemov se je do nedavnega zrcalilo v predpisih za gradnjo potresno odpornih konstrukcij. Tudi zgodnja verzija novih skupnih evropskih standardov za gradnjo potresno odpornih konstrukcij Evrokod 8 iz leta 1994, je montažne konstrukcije obravnavala le v »informativnem dodatku«. Določila tega dodatka so bila neobvezna, kar je kazalo na dejstvo, da so bile zaradi pomanjkanja znanja na tem področju mnoge zahteve nedorečene, predlagani koeficienti pa zelo grobo opredeljeni. Predvsem pa so bili ti koeficienti v nekaterih primerih precej konzervativno določeni. Če bi obveljali, bi bilo potrebno montažne armiranobetonske industrijske hale računati na nekajkrat večje potresne sile glede na tiste, ki se uporabljajo v dosedanji praksi. To bi lahko brez preverjenega razloga resno ogrozilo to pomembno vejo gradbene industrije.

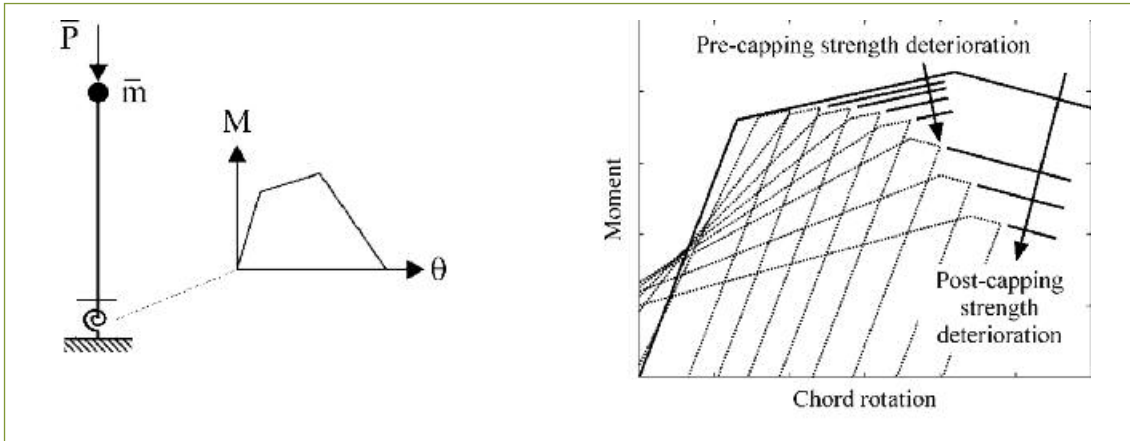
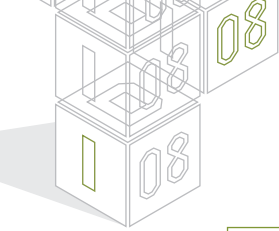
Zato smo v okviru projekta »PRECAST« 5. EU okvirnega programa preizkusili nekaj modelov hal v naravni velikosti (slika 8). Pri tem smo z načrtovanjem nosilnosti po standardu Evrokod 8 naredili stike, močnejše od betonskih elementov. Preizkus je bil narejen psevdo dinamično. To pomeni, da so se sile prenašale na konstrukcijo počasi preko batov, ki so bili naslonjeni na zelo togo reakcijsko steno. Sile v batih pa so se numerično krmitile tako, da so upoštevale dinamični vpliv predpostavljenega gibanja tal in izmerjene lastnosti konstrukcije na koncu predhodnega koraka nanosa obtežbe. Ta način preizkušanja sicer ne upošteva vpliva hitrosti nanosa obtežbe, omogoča pa preizkušanje velikih modelov (v naravnem merilu) in boljšo kontrolo poteka preizkusa.



SLIKA 8  
 Montažna hala v naravnem merilu med psevdo dinamičnim preizkusom

Pri preizkušanju so se stebri hale močno deformirali (izmerjeni pomik na vrhu hale je bil 8 % višine stebra, kar je bilo pri 5 m visokem steburu 40 cm). Stebri so se zelo približali rušnemu stanju. Kljub temu smo odziv uspešno modelirali.

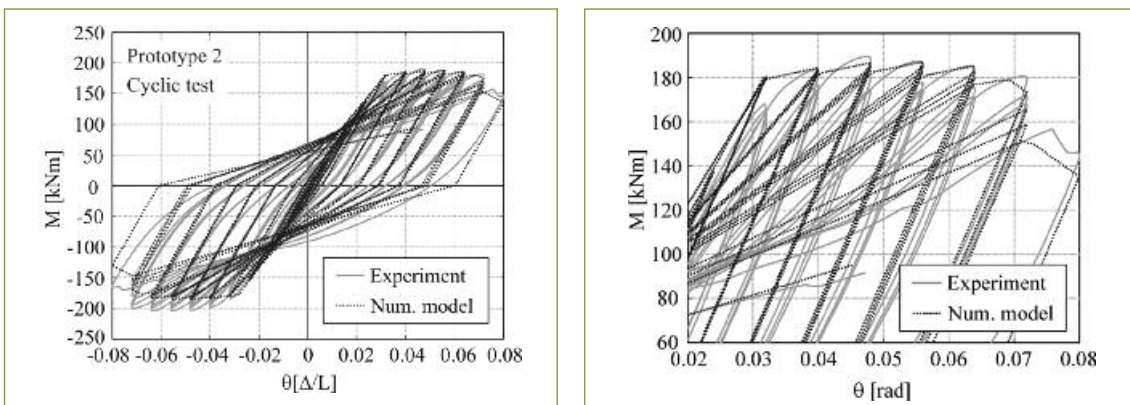
Tudi tu smo izbrali razmeroma preprost računski model s koncentriranim plastičnim členkom ob vpetju stebra (slika 9 levo). Za opis histereze smo izbrali Ibarriin model, ki lahko na podlagi parametra sipane energije opiše deterioracijo betonskega elementa (slika 9 desno).



SLIKA 9

Model hale/stebra (levo) in histerezna pravila, ki upoštevajo deterioracijo konstrukcije pri cikličnem odzivu (desno)

Ker so bila izbrana pravila razvita za mnogo manj vitke stebre, v obravnavanem primeru (opisani eksperiment je bil prvi te vrste na svetu) niso ustrezno delovala. S pridobljenimi eksperimentalnimi podatki smo jih primerno modificirali in dobili zelo dobro ujemanje med eksperimentalnimi in numeričnimi rezultati (slika 10).



SLIKA 10

Primerjava med izmerjenim in računsko določenim cikličnim odzivom montažne industrijske hale – kompletna histereza (levo) in detajl (desno)

Raziskava je imela pomemben vpliv na razvoj evropskih standardov Evrokod 8. Predvsem je omogočila veliko znižanje računskih potresnih sil. Je pa obenem tudi jasno opredelila pogoje, ko je to znižanje dopustno. Predvsem morajo biti stiki projektirani z načrtovanjem nosilnosti. Za uspešno uvedbo takšnega postopka v prakso smo že pričeli z intenzivnimi raziskavami (inovativnih) stikov v okviru projekta »SAFECAS7« 7. EU okvirnega programa.

## 7. SKLEP

Kljub tridesetletnemu delu na področju modeliranja nelinearnega odziva armiranobetonskih konstrukcij na močno potresno obtežbo (ali pa prav zaradi teh izkušenj), se avtor tega članka še vedno čudi, da je možno tako zapleten pojav zadovoljivo opisati z numeričnimi postopki. Prikazani primeri pa ponovno dokazujejo prav to. Vendar številkam ne gre slepo in nekritično verjeti. Eksperimenti preizkušancev velikega merila, v podporo razvoja numeričnih modelov, so nujni. Računski modeli sami pa morajo biti dovolj enostavni in robustni, da jih fizikalno razumemo in obvladujemo. Osebnostno zadovoljstvo z uspešnim ujemanjem eksperimentalnih in numeričnih rezultatov pa je le en, subjektiven rezultat tega dela. Ključni cilj je v pripravi izboljšanih praktičnih postopkov projektiranja, ki se najboljše uveljavijo preko ustreznih standardov za projektiranje konstrukcij. Zato je še posebej pomembno to, da so nekateri prikazani rezultati pomembno vplivali na oblikovanje standarda Evrokod 8.

## 8. ZAHVALA

Najprej se zahvaljujem svojim kolegom, prof. Tatjani Isaković, dr. Petru Kantetu in dr. Mihi Kramarju, s katerimi smo skupaj delali na opisanih projektih. Delo je v prvi vrsti financiralo Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo RS. Delo pa je bilo vključeno tudi v evropske projekte v okviru 5. okvirnega programa in raziskave UC v San Diegu, v okviru ameriškega programa NEES (Network of Earthquake Engineering Simulation).

# Potresno varna graditev pregradnih objektov skozi čas

doc. dr. Branko ZADNIK, univ.dipl.inž.grad.

IBE, d.d.

## POVZETEK

Potresna obtežba, kot ena od bistvenih obtežb na pregrado, se je pri nas pričela uvajati v projektantsko prakso v začetku šestdesetih let prejšnjega stoletja. Takratne ocene velikosti horizontalnih pospeškov posameznih lokacij, so bile za današnje poznavanje problematike zelo nizke (horizontalni pospeški v rangju nekaj procentov od pospeška prostega pada). Razvoj znanosti na področju potresnega inženirstva je pripeljal do boljšega poznavanja tega naravnega fenome-

na in posledično tudi do spoznanj, da je potrebno pri potresno odporni gradnji upoštevati veliko večje potresne obtežbe, ki se za zahtevne objekte tipa dolinskih pregrad določajo na osnovi posebnih študij seizmičnosti lokacije. Podan je pregled vpliva teh sprememb na zasnovo novih objektov na Savi, pa tudi na obnovo starejših objektov na Dravi, kjer so, zaradi povečanja potresne obtežbe, sanirali jez Melje.

## ABSTRACT

Seismic influence on the dam structures has begun to be introduced in the design practice in the early sixties of the last century. First used values of the free field acceleration of the construction site were underestimated (e.g. the horizontal accelerations were concerned in the range of only few percent of the gravity acceleration). Since that time considerable progress has been achieved in the field of earthquake engineering. Better understanding of seismicity

provided much higher loads based on specific research studies of each dam location. The overview of such changes is illustrated on the chain on the hydropower plants on lower Sava river which are under construction and on the chain of the existing dams on the Drava river. Due to the seismic safety evaluation of the existing dam Melje, serious improvement of the dam safety were completed.

## 1. UVOD

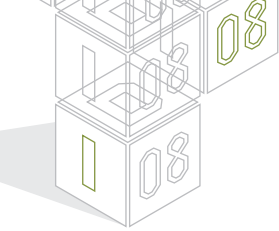
Od daljne preteklosti, to je iz časov davnih civilizacij, pa do današnjih dni, je prihajalo do rušitev pregradnih objektov praktično v vseh delih sveta. Pregrade, ki so se gradile za zadrževanje voda, so ob katastrofalnih dogodkih zahtevale veliko število človeških žrtev in ogromno gospodarsko škodo. Poškodbe so se pojavljale na pregradah grajenih brez potrebnega znanja, pa tudi na tistih, kjer je bilo ob gradnji prisotno najnovejše inženirsko znanje. To kaže na nikoli končano borbo človeštva z naravnimi silami, ki jih vedno znova in popolneje dojemamo. Potresi so v preteklosti poškodovali večje število pregrad. V večini primerov so bili ti objekti grajeni v potresno zelo dejavnih območjih zahodnega dela ZDA, Čila, Kitajske, Japonske in Tajvana. Vendar sta prav tako poznana primera pregrade Ealsburn iz Škotske (1839) in pregrade Koyna v Indiji (1967), ki opozarjata, da lahko tudi potresi na potresno manj dejavnih področjih, resno ogrozijo varnost pregradnega objekta in njegove okolice.

Današnje stanje pri nas bi lahko opisali kot pogojno zadovoljivo, saj do sedaj večjih incidentov na pregradnih objektih ni bilo, vendar ugotavljamo, da vse aktivnosti zagotavljanja varnosti temeljijo predvsem na splošni gradbeno tehnični regulativi, ki pa v mnogih segmentih ne pokriva specifičnosti pregradnega inženirstva. Pri nas bo potrebno uvesti, tako kot to že imajo v razvitih državah, posebne tehnične predpise za te objekte, ki so lahko iz varnostnega zornega kota potencialna nevarnost za prebivalstvo, ki živi v vplivnem področju akumulacije.

Potrebno je poudariti, da so pregradni objekti, objekti posebne vrste, s povečanim nivojem rizika za dolvodno prebivalstvo in da jih lahko s tega gledišča primerjamo z jedrskimi objekti. Zaradi tega jih tudi slovenski standard o protipotresni gradnji Evrokod 8 (Lit.7), v poglavju 1.1.1 (2), eksplicitno izključuje in jih prepušča posebnim študijam in raziskavam.

### 1.1. Seizmičnost področja in projektni potres

Določanje seizmičnosti nekega področja temelji na izsledkih obsežnih seizmoloških raziskovalnih del na terenu in v laboratorijih, ki se praviloma opravijo še pred pričetkom gradnje. Rezultati teh raziskav nam predočijo tako seizmično aktivnost bližnje in daljne okolice pregrade, možnost nastopa potresa iz neznanih in v teku raziskav odkritih prelomnic, kakor tudi energetske karakteristike lokalnih in oddaljenih žariščnih con. Rezultat teh aktivnosti je podan v definiranju »projektnega potresa«, za katerega se najpogosteje uporablja definicija, ki dovoljuje večkratni nastop tega potresa v življenjski dobi objekta, brez nastopa poškodb. Drugi cilj pa je določitev »maksimalnega možnega potresa«, to je potresa, pri katerem dopuščamo poškodbe objekta s pogojem, da le-te ne povzročijo katastrofalnih vplivov na okolico.



## Inducirana seizmičnost

Potres, ki ga lahko sproži vodno zajetje za novo zgrajeno pregrado (z akumulacijo inducirana seizmičnost – AIS), je v strokovnih krogih še vedno protisloven pojav. Vzrokov za njegov nastanek ni lahko dokazati in je zato deležen posebne pozornosti. Tako na primer poroča Rothe (Lit. 2) o vrsti potresov, ki so nastali po zajezitvi reke Acheloos (umetno akumulacijsko jezero Kremasta) v Grčiji. Potresna dejavnost je tam dosegla vrhunec 5. februarja 1966 v potresu z magnitudo 6.3, ki je imel za posledico eno smrtno žrtev, 60 ranjenih, 480 porušenih in 1200 močno poškodovanih objektov. O tem dogodku sicer piše Meade leta 1991, da je bil le del normalne potresne dejavnosti tega področja in trdi, da ni bilo vzročne povezave s polnjenjem zajetja. Strinja pa se s trditvami, da je bila inducirana seizmičnost vzrok za potrese pri pregradah Kariba, Hsingfengkiang, Manic 3, Hoover in Nurek. Inducirana seizmičnost zaradi polnitve vodnega zajetja naj bi bila tudi vzrok za nastanek potresa Koyna. Sama pregrada je bila pri tem potresu težko poškodovana, vendar se ni porušila. Rušilna moč tega potresa se je pokazala tudi na dolvodno ležečem mestu Koynanagar, kjer je 180 ljudi izgubilo življenje, okrog 2000 pa je bilo ranjenih.

### 1.2. Seizmološki monitoring

#### Splošno o seizmološkem monitoringu

Seizmološko opazovanje pregradnih objektov je sestavni del ocenjevanja potresne nevarnosti lokacij pregradnih objektov in presoje potresne varnosti samih objektov. Zapisi dejanskih potresnih dogodkov služijo za presojo in določitev projektnih obtežb, na katere bo (je bil) konkreten objekt dimenzioniran, oceno njegove varnosti in ogroženosti dolvodnega območja.

Seizmološki monitoring se izvede predvsem na velikih pregradah ter na pregradah, kjer je prisotna velika dolvodna ogroženost. Težnja je, da se vse možne lokacije pregrad v potresno dejavnih območjih opremijo s seizmološkimi opazovalnimi sistemi nekaj let pred pričetkom izgradnje pregradnih objektov. V tem času se opazuje potresna dejavnost na lokaciji tako, da je mogoče kasneje ugotoviti morebitno, s pregrado oziroma z vodnim zajetjem povzročeno povečanje seizmične dejavnosti, oziroma spremljati eventualno, z vodnim zajetjem oziroma akumulacijo inducirano seizmičnost (AIS).

Oprema omogoča zapisovanje potresnih dogodkov v treh, med seboj pravokotnih smereh. Danes se zapisovanje potresnih nihanj povezuje tudi s sistemom merjenja ostalih količin, ki popisujejo odziv pregrade na zunanjo obtežbo. To so nepovratni pomiki konstrukcije, spremembe pornih pritiskov v telesu pregrade in v temeljnih tleh, velikost hidrodinamičnih pritiskov na vodnem licu pregrade, itd. Takšen povezan sistem omogoča kvalitetno analizo vseh merskih podatkov, kar poda kompletnejšo sliko o dogajanju v telesu pregrade.

Uvedbo seizmološkega monitoringa v svetu običajno urejajo tehnična navodila in pravilniki, ki so odvisni od ekonomske moči države, zgodovinskega razvoja tega področja in lokalnih izkušenj. V slovenskem prostoru smo v preteklih letih uredili izhodišča za to področje z izdajo lastnega pravilnika o seizmološkem monitoringu velikih pregrad (Lit.1). S tem so bile dane osnove za spremljanje enega najpomembnejših vplivov na kapitalsko zahtevne pregradne objekte, posredno pa se zagotavlja tudi večja varnost samih objektov in dolvodnih območij.

## 2. VARNOST PREGRADE

### 2.1. Splošno

Doseganje primerne stopnje varnosti pregrade skozi njen življenjski cikel je kontinuiran in dinamičen proces v sklopu katerega se moramo zavedati, da so vsa navodila, pravila ali praktične izkušnje podvržene spremembam, ter da jih je potrebno periodično preverjati in usklajevati z napredkom znanosti in stroke. Vse odkrite pomanjkljivosti je potrebno opustiti oziroma izpopolniti, istočasno pa vzpodbujati razvoj uspešnih novih postopkov.

Kljub velikemu napredku v znanosti so še vedno ne zadosti razumljeni naravni dogodki, ki bistveno vplivajo na pregradne objekte (npr. poplave, potresi). Ugotavljanje njihovega pojavljanja in tudi velikosti, temelji še vedno na presoji matematične verjetnosti njihovega nastopa. Za pregrade je posebna neznanka tudi ocena verjetnosti sočasnega nastopa več ekstremnih dogodkov. Kot kaže zgodovina ne smemo izključiti tudi razdiralnih vplivov sabotaž in vojnih akcij ter tudi obnašanja gradbenih materialov v takšnih posebnih okoliščinah.

Monitoring obstoječih pregrad in hitre reakcije na nenormalno obnašanje pregrade mora biti stalna skrb lastnika v času obratovanja objekta. Pazljivo organiziran in izvajan monitoring ter hitre reakcije lahko preprečijo poškodbe objekta, vključno s tistimi, ki bi izvirale iz pomanjkljivosti pri izgradnji.

### 2.2. Preiskave in projektiranje na potres

#### Projektiranje na potresno obtežbo

Prvi korak v teh analizah je določitev dveh projektnih nivojev potresne obtežbe, na katere se preveri pregrada in njeni pomožni objekti. Imenujemo ju **projektni potres**, ki je najmočnejši potres, ki lahko ogrozi objekt v času njegove amortizacijske dobe. Za povratni čas takšnega potresa se privzame 200 let. Drugi je **maksimalni potres**, ki lahko ogrozi objekt v času njegove življenjske dobe. Privzame se povratni čas potresa 1000 let.



Na potresno obtežbo je potrebno preveriti celotno zasnovo konstrukcije pregrade, globalno stabilnost objekta, napetostna stanja v telesu pregrade in temeljnih tleh, stabilnost bregov, možnosti prelivanja pregrade, eventualni potencial likvefakcije v temeljnih tleh ali telesu nasute pregrade, možnost nastopa razpok ali velikih deformacij.

Pri projektnih analizah je potrebno uporabiti metode, s katerimi določimo oceno varnosti konstrukcije. Uporabljajo se psevdo statične ali dinamične analize konstrukcije, v skladu z dobro inženirsko prakso.

### 3. PREGLED IZKUŠENJ DOLOČANJA POTRESNE OBTEŽBE PRI PROJEKTIRANJU PREGRADNIH OBJEKTOV

#### 3.1. Pregradni objekti v sklopu hidroelektrarn

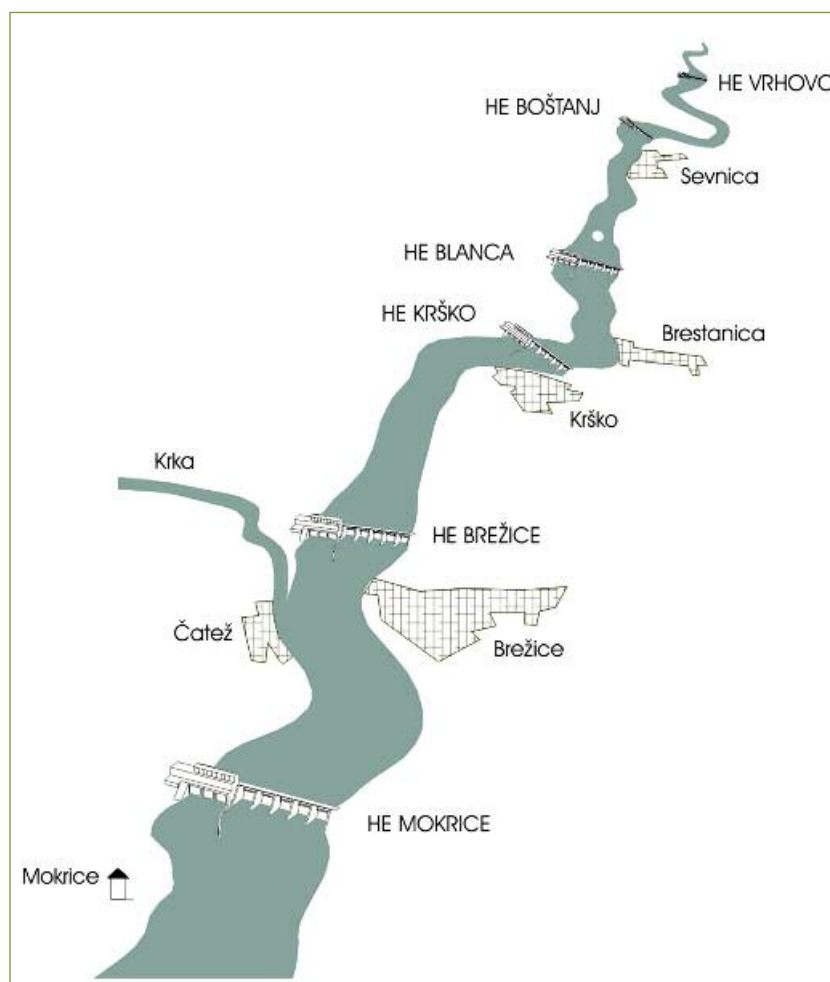
Začetek izgradenj hidroelektrarn sega v Sloveniji v leto 1918. Takrat je bila zaključena gradnja prve hidroelektrarne v Sloveniji – HE Fala na reki Dravi. Od takrat do sedaj je bilo zgrajenih 17 večjih hidroelektrarn, ki so danes vse v obratovanju. Poleg tega je bila v tem času izkoriščanju vodne sile v Sloveniji namenjena stalna raziskovalno-razvojna pozornost, katere intenzivnost je zelo variirala in je bila v veliki meri odvisna od družbeno-političnih ter gospodarskih razmer v širši družbeni skupnosti. Potres kot naravni pojav, ki lahko vpliva na konstrukcijo pregrade, se je pričel vpeljevati v analize v začetku šestdesetih let prejšnjega stoletja.

Za prikaz razvoja znanja in poznavanja potresne ogroženosti posamezne lokacije v Sloveniji, so v naslednjih dveh poglavjih podani osnovni parametri potresne obtežbe konkretnih lokacij pregrad tako, kot so se spreminjali skozi čas. Ti podatki direktno odražajo stopnjo razvoja potresnega inženirstva v določenem časovnem obdobju.

#### 3.2. Pregled osnovnih seizmičnih parametrov lokacij elektrarn na Spodnji Savi

V obdobju od leta 1981 do leta 1985, so bile za potrebe načrtovanja niza takrat predvidenih sedmih spodnjesavskih hidroelektrarn obdelane seizmološke raziskave (Lit. 3) in določeni preliminarni projektni parametri. Ti rezultati so bili kasneje v letu 2004 (Lit. 4) preverjeni in na novo določeni na osnovi novejših in obsežnejših podatkov za končno določeni lokaciji HE Blanca in HE Krško. Od ostalih lokacij je v času projektne snovanja celotne spodnjesavske verige izpadla HE Brestanica, ki se zato pojavlja le v zgodnejših analizah seizmičnih vplivov.

Povratne dobe potresa so v Lit [3] in Lit [4] privzete različno (200 oziroma 475 let za projektni potres in 1000 oziroma 2000 let za maksimalni potres, glede na filozofijo varnosti in obravnavanja pomembnosti tovrstnih objektov v različnih časovnih obdobjih).



SLIKA 1  
Niz elektrarn na Spodnji Savi



Zanimivo pri obeh študijah je, da ne obravnavata vertikalne komponente vzbujanja temeljnih tal, ki vsekakor ni zanemarljiva pri obravnavi stabilnosti pregradnih objektov. To kaže na nedorečenost zakonodaje, ki uravnava zasnovano pregradnih objektov na potresnih območjih. Tudi novi evropski in slovenski standard Evrokod 8 (Lit 7) pregradnih objektov ne obravnava tako, da je odločitev prepuščena naročniku oziroma od njega pooblaščenemu projektantu.

#### Privzete vrednosti projektnih pospeškov tal po objektih

V zgornjem poglavju je možno slediti razvoju spoznavanja seizmičnih vplivov na posameznih lokacijah in načina njihove uporabe pri posameznih objektih. Pri tem se moramo zavedati, da so v času od leta 1985, ko je bila izdelana prva študija (Lit. 3), do danes, znanost in stroka ter poznavanje obravnavane problematike na tem področju doživeli svoj razvoj. V tem časovnem obdobju je prišlo tudi do opustitve ene od prvotno predvidenih lokacij (HE Brestanica) in sprememb nekaterih mikro lokacij objektov, ki jih sicer obravnavajo vse študije pod istim imenom. Vse to sicer uvaja v celovitost pregleda in primerjav rezultatov študij določeno stopnjo negotovosti, po drugi strani pa doprinese k popolnejšem razumevanju izbora seizmičnih parametrov celotnega področja spodnje Save in s tem tudi posamezne lokacije.

Analogno velja pri vrednotenju potresnih vplivov na konstrukcije pregradnih objektov, kar je še posebej vidno ob upoštevanju vertikalnega potresnega vzbujanja tal. Danes vemo, in razvoj seizmoloških in potresnih znanosti kaže, da je vertikalno vzbujanje tal potrebno upoštevati pri statičnih in dinamičnih analizah stabilnosti tovrstnih objektov. Pri nas tehnična regulativa temu še ne sledi in jo pri novejših objektih projektantska praksa kvalitetno prehiteva.

Zap. št.	Lokacija pregrade	Projektni pospešek $a(g)$			Leto projektne analize
		Projektni potres $a_p$	Maksimalni potres $a_m$	Vertikalna komponenta $a_v$	
1	HE Vrhovo	0.100 – 0.135	0.165	ni upoštevana	1987
2	HE Boštanj	0.180	0.200	50 % $a_H$	2002
3	HE Blanca	0.190	0,25 50 % $a_H$		2005
4	HE Brestanica	Lokacija odpade			-
5	HE Krško	0.200	0.380	50 % $a_H$	2007
6	HE Brežice	še ni v fazi projektiranja			-
7	HE Mokrice	še ni v fazi projektiranja			-

**TABELA 1**  
Vrednosti pospeškov temeljnih tal upoštevane v projektni dokumentaciji

#### Jez Melje na reki Dravi

Jez v Melju (vzhodni del Maribora), ki zajezuje reko Dravo na koti 253,00 m.n.m, služi za odvajanje vode iz originalnega rečnega korita v dovodni kanal HE Zlatoličje, ki se odcepi od reke Drave na desnem bregu. Jezovna zgradba je razdeljena na šest pretočnih polj razpetine po 17 m, ki so opremljena s segmentnimi zapornicami.



1 – jez; 2 – levoobrežna in 3 – desnoobrežna stena dovodnega kanala

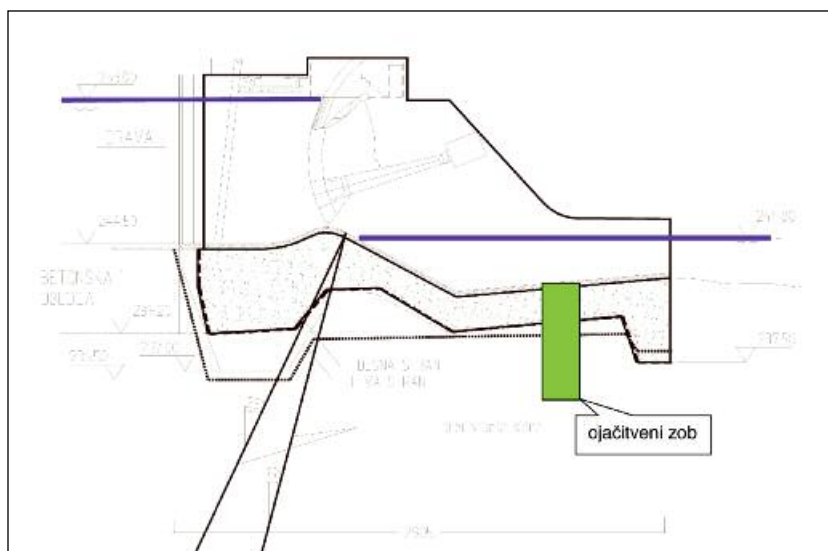
**SLIKA 2**  
Situacija in pogled iz zraka na jez Melje

Jez je bil zgrajen v letih 1964 in 1965. Med gradnjo desnih treh pretočnih polj so bile ugotovljene slabše geomehanske lastnosti temeljnih tal od predhodno pričakovanih, zato je bilo med gradnjo sklenjeno, da se stabilnost jezusa proti zdrsu poveča s prednapetimi sidri. Ukrep sidranja se je izvedel za desno polovico pregrade, ki je bila že zgrajena, medtem ko se je za levo polovico jezusa izvedla poglobitev vzdolžne pete še v času gradnje. S prednapetimi sidri je bil dosežen faktor varnosti na zdrsu  $F=1,1$ . Projekt je predvideval redno tehnično opazovanje objekta s kontrolnimi meritvami sil v prednapetih sidrih, česar pa se po letu 1965 ni več izvajalo.

### Seizmični parametri lokacije

Sam objekt je bil v času projektiranja (1963) preverjen na horizontalno potresno obtežbo 0.025 g, kar je gledano z današnjega zornega kota premalo, in kar je bilo tudi dokazano s posebnimi analizami stabilnosti.

V sklopu projekta obnovitvenih del na vseh hidroelektrarnah na reki Dravi v prejšnjem desetletju, je bila med ostalimi opravljena tudi presoja varnosti jezusa Melje. Po tem, ko so bile maja 1994, prvič po letu 1965, opravljene ponovne meritve prednapetosti sider, se je izkazalo, da so bila nekatera sidra, ki so zagotavljala varnost na zdrsu, močno poškodovana, njihova natezna sila pa precej nižja od začetne. V letu 1996 je bila izvedena tudi študija (Lit. 5), na osnovi katere so bili določeni novi projektni seizmični parametri. Upoštevana je bila eksploatacijska doba objekta 200 let. Za 10 % verjetnost pojava pričakovanega potresa v eksploatacijski dobi objekta, je bil določen maksimalni horizontalni pospešek temeljnih tal 0.18 g. Za analizo stabilnosti objekta pa se je uporabilo tudi sinhrono delovanje potresa v vertikalni smeri, v velikosti 50 % horizontalnega pospeška.



SLIKA 3  
Sanacija pretočnega polja v prerezu –  
schematsko

## 4. TEHNIČNA REŠITEV PROBLEMA

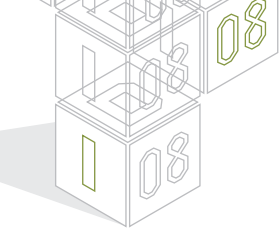
Tehnična rešitev problema stabilnosti na zdrsu celotne konstrukcije, ki bi nastopil v primeru potresa, je bila dobljena z izgradnjo armirano betonskih zob v območju plošč pretočnih polj. Z izgradnjo treh zob na vsako pretočno polje, je bil dosežen premik potencialne drsine globlje v temeljno podlago, z boljšimi geomehanskimi karakteristikami. Doseženi faktorji varnosti na zdrsu so sedaj lokalnega ranga 1.24, kar je več od zahtevane vrednosti 1.10.

## 5. ZAKLJUČEK

Potresna obtežba kot ena od bistvenih obtežb na pregrado, se je pri nas pričela uvajati v projektantsko prakso v začetku šestdesetih let prejšnjega stoletja. Takratne ocene velikosti horizontalnih pospeškov posameznih lokacij so bile, za današnje poznavanje problematike, zelo nizke (horizontalni pospeški v rangu nekaj procentov od pospeška prostega pada). Razvoj znanosti na področju potresnega inženirstva je pripeljal do boljšega poznavanja tega naravnega fenomena in posledično tudi do spoznanj, da je potrebno pri potresno odporni gradnji upoštevati veliko večje potresne obtežbe, katere se za zahtevne objekte tipa dolinskih pregrad določajo na osnovi posebnih študij seizmičnosti lokacije. V zadnjem desetletju je prišlo pri obravnavi določanja potresnih obtežb in analiz konstrukcij do spoznanja, da je potrebno pri načrtovanju objekta upoštevati tudi vertikalno komponento potresnega vzbujanja. To postavlja pred projektante zahtevnejšo nalogo za zagotavljanje zadostne stabilnosti objekta kot je bilo to še v začetku devetdesetih let.

Minimalni projektni nivo obtežb mora biti relativno visok pri pregradah, ki ogrožajo poseljena vplivna območja. Pri potresnih obtežbah je ta problem moč rešiti z vpeljavo »maksimalnega možnega potresa« in projektnih rešitev, ki dovoljujejo v izrednih primerih poškodovanje objekta, istočasno pa zagotavljajo še tolikšno integriteto konstrukcije, da je zagotovljeno njeno osnovno funkcioniranje, to je kontrolirano zadrževanje akumulirane vode.

Odločitev o vrednosti letne prekoračitve projektnega pospeška je za končni rezultat določanja obtežbe bistvenega pomena. Odvisna je predvsem od pripravljenosti družbe za finančna vlaganja v zaščito potencialno ogroženih območij pod pregradami.



## 6. LITERATURA

- [1] Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade, U.I. RS, št. 92/1999, november 1999.
- [2] Rothe J.P.: Earthquakes and Reservoir Loadings, Proceedings, 4. World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 1969.
- [3] IZIS: »Statična i seizmična analiza tipskih elektrana na reci Savi, mašinski blok, (Tipska brana sa osovinskim rasponom izmedju turbina LO = 13.0 m), Skopje, Makedonija, december 1985.
- [4] IKPIR: »Projektne potresne parametri za HE Blanca in HE Krško«, Ljubljana, oktober 2004.
- [5] Definiranje potresnih parametrov za objekt "Jez Melje" s pripadajočimi objekti, Institut za zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, Izveštaj IZIS 96-44, Univerzitet "Sv. Kiril i Metodij" – Skopje, Skopje, junij 1996
- [6] Zadnik B.: Kritični projektne parametri pri zasnovi pregrad, University of Washington, Department of CE, Report No. 01/10-95, Seattle, WA, ZDA, november 1995.
- [7] SIST EN 1998-1:2006, Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1 del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe.

# Upoštevanje in izkušnje pri uporabi Evrokoda 8 v okviru popotresne obnove v Posočju

dr. Samo GOSTIČ, univ.dipl.inž.grad.

dr. Blaž DOLINŠEK, univ.dipl.inž.grad.

Gradbeni inštitut ZRMK d.o.o.

## POVZETEK

V zadnjih desetih letih sta Posočje prizadela dva močnejša potresa. Prvi je bil leta 1998, drugi leta 2004, tik preden je bila zaključena obnova objektov, prizadetih v prvem potresu. Na srečo noben od obeh potresov ni zahteval smrtnih žrtev, škoda na stavbah in infrastrukturi pa je bila kljub temu zelo velika.

Leta 1998 je veliko ljudi ostalo brez varne strehe nad glavo, zaradi česar je bila pri popotresni obnovi potrebna pomoč države. Zaradi obsežnosti poškodovanega območja je država za namene koordinacije dela v okviru popotresne obnove ustanovila Državno tehnično pisarno. Naloge pisarne so ocenjevanje škode, ocene stroškov in koordinacija projektov obnove na področju projektiranja, gradnje, nadzora in

knjigovodenja. V okviru odpravljanja posledic naravne katastrofe je bilo 80 % vseh konstrukcijskih načrtov namenjenih obnovi zidanih stavb. Po letu 2004 pa so se cilji popotresne obnove nekoliko spremenili. Tehnična pisarna je ostala pomemben člen, prav tako pa ni bilo veliko sprememb v priporočenih načinih obnove. Do sprememb je prišlo predvsem pri določanju stopnje poškodovanosti objekta, ki več ne dopušča obnove, temveč zahteva nadomestno gradnjo. Zaradi sprememb v zakonodaji morajo biti projekti obnove zasnovani tako, da ustrezajo višjim standardom Evrokoda. Popotresna obnova se bo ob učinkovitem nadzoru del, ki se izvajajo, izkazala za uspešno, ko (če) bo Posočje prizadejal naslednji potres.

## SUMMARY

In the last ten years two earthquakes hit the Posočje region. First in year 1998 and then again in 2004 just before the post-earthquake reconstruction after the first one had been completed. Luckily none of them claimed death victims but the extent of damage to the buildings and infrastructure was great.

In the 1998 earthquake, a lot of residents suddenly lost safe home thus the governmental help was needed for the reconstruction effort. Due to the extent of damaged area the government set up a State Technical Office for management of the reconstruction projects. The tasks of the Office have been from damage assessment and performing quick cost estimates to managing reconstruction projects from design, construction and supervision together with accountancy.

According to "natural disaster remedy article" it was possible to quickly elaborate reconstruction plans for simple masonry buildings so 80 % of design plans were of that type.

After the earthquake 2004 some shift of renewal goals were made. The necessity of the Office remained and there were no big differences in recommended reconstruction techniques. But there were changes to the threshold when building is better to be replaced instead of reconstructed. Due to changes in legislation the reconstructions have to be designed now according to Eurocodes which has higher demands. Together with more strict control of works we consider that the reconstruction effort will prove successful when (if) another earthquake happens.

## 1. UVOD

Posočje sta v zadnjih desetih letih prizadela dva močnejša potresa. Prvi je bil leta 1998, drugi pa leta 2004, ravno v času, ko se je obnova po prvem potresu zaključevala. Na srečo nobeden od omenjenih potresov ni zahteval človeških žrtev, povzročila pa sta veliko gmotno škodo. Po potresu 1998 se je večina prebivalstva čez noč znašla brez varne strehe nad glavo, zato je bila državna pomoč pri obnovi nujna.

Že prej so potresi zaznamovali to pokrajino, saj sta v letu 1976 dva potresa (6.5. in 11.9.), z epicentrom v bližnji Furlaniji, povzročila veliko škode tudi v Sloveniji. Takrat je bilo poškodovanih 12.000 stavb, od katerih je bilo 4.200 ocenjenih kot začasno neuporabnih. Izkušnje takratne popotresne obnove, predvsem pri obnovi Breginja, so v veliki meri vplivale na izhodišča obnove po potresu 1998.

Takoj po potresih so bile aktivirane sile civilne zaščite in reševanja, ki so dokaj tekoče in utečeno opravile začetne aktivnosti reševanja in začasne namestitve. Na srečo se je zrušilo samo nekaj nenaseljenih stavb, tako da reševanje iz ruševin ni bilo potrebno.



Po potresu leta 1998 je bilo zabeleženih več kot 4.000 poškodovanih objektov, od katerih je bilo več kot 3.000 stanovanjskih. Za bivanje neuporabnih (nevarnih), je bilo zabeleženih približno 500 stavb. Za prebivalce teh objektov je bilo potrebno urediti začasno nastanitev. Po potresu 2004 pa je bilo poškodovanih približno 1.800 objektov, od katerih je bilo 20 ocenjenih kot (začasno) nevarnih za bivanje.

Zaradi obsežnosti prizadetega območja predstavlja obnova zahteven organizacijsko tehnični problem, zato je bila ustanovljena Državna tehnična pisarna, ki deluje na terenu in vodi vse postopke za oškodovance glede obnove objektov. Delovanje pisarne se je ohranilo tudi po potresu 2004, kljub takratnim očitkom v javnosti, saj se je po neodvisni strokovni analizi izkazalo, da je pristop pravilen.

## 2. PRISTOP K POPOTRESNI OBNOVI

Po potresih se je potrebno najprej na politični ravni odločiti koliko in kako pomagati prizadetim ljudem. Po potresu leta 1998 je bil sprejet *Zakon o popotresni obnovi objektov in spodbujanju razvoja v Posočju – ZPOOSRP* (Ur.l. RS 45/98), kjer je bila določena oblika in pogoji državne pomoči. Stroka in javnost sta bili še vedno pod vtisom posledic potresa leta 1976 na Tolminskem, kjer so v več primerih odstranili celotna (z velikim deležem poškodovanih stavb) naselja in zgradili nova montažna naselja. Pristop je bil cenovno, predvsem pa časovno učinkovit, vendar pa je spreminjal kulturno krajino področja. Splošen konsenz je bil, da se to ne sme več ponoviti, zato je obstajala tudi težnja, da se objekti (po letu 1998) v čim večji meri rekonstruirajo. Potem je potres 2004 povzročil, da je bilo potrebno upoštevati nove izkušnje, predvsem verjetnost pogostega ponavljanja takšnih potresov, zato je poleg zagotavljanja statične stabilnosti pomembna tudi ranljivost objektov oziroma materialna škoda, tako da je ohranjanje arhitekturnega izgleda relativno izgubilo pomen glede na ekonomske kriterije obnove.

Faza obnove je s strokovnega vidika precej bolj zahtevna kot se zdi na prvi pogled. Gre namreč za popravilo objektov, ki skoraj v ničemer ne izpolnjujejo zahtev današnjih standardov o varnosti in bivanjskih razmerah. Objekti so večinoma dotrajani in ne vzdrževani ter izpostavljeni nestrokovnim posegom v preteklosti, ko so jih lastniki prilagajali modernemu načinu življenja. Pristop k obnovi takih objektov se precej razlikuje od pristopa pri novogradnjah. Projektant mora pri rekonstrukcijah že v fazi projektiranja ugotoviti vse lastnosti objekta, predvsem nosilni sistem, konstrukcijske pomanjkljivosti, napake itd. Zato mora poznati in upoštevati številne dejavnike, ki bodo vplivali na končni uspeh obnove, od poznavanja materialov in načina gradnje v času izgradnje objektov do samih možnosti in postopkov utrditvenih ukrepov. Pri vsem tem pa je potrebno paziti tudi na stroške rekonstrukcij, saj se lahko hitro približajo vrednosti novogradnje ali jo celo presežejo, kar pa lahko popolnoma izniči trud projektanta. Ne glede na stroške se vztraja pri obnovi samo pomembnejših kulturnih spomenikov, ki jih je potrebno na vsak način ohraniti.

V Posočju sta potresa iz let 1998 in 2004 predvsem prizadela zidane stavbe, katerih delež je na tem območju tudi največji (okoli 75 %). Gre pretežno za kamnite zidane stavbe z debelimi kamnitimi zidovi, grajenimi iz neobdelanega kamna, brez ali z malo malte ter votlikavim srednjim slojem. Stropne konstrukcije so lesene ali pa betonske plošče, z vprašljivo količino armature. Včasih so tudi brez armature, samo vgrajene med jeklene profile. Pri običajni vertikalni obtežbi, ki so ji objekti večino časa izpostavljeni, se slabosti te gradnje ne pokažejo, na potresno obtežbo pa ti zidovi niso dovolj odporni. Poleg popravila samih potresnih poškodb je nujno potrebno tudi njihovo statično in protipotresno utrjevanje za zagotavljanje zadostne potresne varnosti po sedanjih predpisih.



SLIKA 1  
Tipična kamnita zidana stavba v Posočju

Osnoven princip rekonstrukcije takšnih stavb je, da se zidovi medsebojno povežejo in da se utrdijo (injektirajo s cementno maso). S takimi metodami se izboljša nosilnost konstrukcije, v večini primerov vsaj toliko, da je objekt, v kolikor pride do močnejšega potresa, varen pred porušitvijo. Seveda pa, kot tudi velja pri projektiranju novogradenj, ukrepi nikakor ne zagotavljajo varnosti pred

poškodbami objektov, v primeru naslednjega potresa. Ravno to je pokazal "ponovljen" potres leta 2004, ki je ponovno poškodoval nekatere že sanirane objekte. Pri tem stabilnost teh objektov v večini primerov ni bila ogrožena, vendar je bila materialna škoda kljub temu visoka.

Potres 2004 sicer ni imel velike magnitude (M 4.9 v primerjavi z M 5.6 leta 1998), vendar je bil plitek in je zato imel lokalno (predvsem v Bovcu in Čezsoči) veliko intenziteto. V Bovcu so bili izmerjeni celo pospeški do 0,47 g, in po upoštevanju geološke kategorije tal je bilo izračunano, da so bili pospeški na trdni osnovi velikosti pričakovanega projektnega pospeška za območje Posočja (0,225 g). Tako da je nastanek poškodb, vendar ne porušitve, pričakovan tako na novogradnjah kot na rekonstruiranih objektih.

Izkazalo se je tudi, da novejša zidane stavbe zgrajene (vsaj) po določilih Predpisa iz leta 1981, torej s horizontalnimi in vertikalnimi vezmi, večinoma niso bile resneje poškodovane. Posebna skupina, s karakteristično več resnimi poškodbami, so bile zidane stavbe z medetažami, kar kaže na neustreznost takšne zasnove pri gradnji potresnoodpornih konstrukcij.

Dobro so potres prestale tudi montažne lesene stavbe. Ker so po letu 2004 kriteriji ekonomske upravičenosti pri odločanju o rekonstrukciji/nadomestni gradnji pridobili na veljavi, se je povečalo število nadomestnih gradenj. Med zgrajenimi nadomestnimi stavbami pa se je zelo povečal delež lesenih montažnih stavb.



SLIKA 2  
Nadomestne stavbe so pogosto lesene montažne izvedbe, vendar po izgledu sledijo tipični arhitekturi Posočja

### **Organizacijski pristop**

Zaradi velike množice izvajalcev, projektantov, objektov in raznih idej utrjevanja, ni bilo možno, da bi vsak delal po svoje in izvajal neke svoje rešitve, ampak je bilo potrebno določiti, kateri postopki so ustrezni. Pri tem so sodelovali vsi vidni predstavniki stroke v Sloveniji. Postopki utrjevanja so morali biti praktično preizkušeni, njihovi učinki pa dokazani tudi v praksi.

Sprejete utrditvene postopke je bilo potrebno nato tehnološko obdelati, normirati tako po porabi materiala, časa in tudi cenovno ter usposobiti izvajalce in projektante za njihovo uporabo. Tako je za lažje in hitrejše načrtovanje, obračun in spremljavo sredstev, DTP izdala enotne popisne postavke del in tudi enotne cene za postavke, s čimer smo se izognili izvajanju dolgotrajnih razpisov za vsak objekt posebej in izločili eventualno dogovarjanje med izvajalci, in s tem umetno višanje cen.

Država je močno pomagala tudi s poenostavitvijo upravnih postopkov. V primerih lažjih rekonstrukcij je po potresu leta 1998 omogočila izvajanje rekonstrukcij brez pridobivanja gradbenega dovoljenja, dovolj je bila odločba o priglasitvi dovoljenih del, kar je s praktičnega vidika precej hitreje. Osnova so bili elaborati sanacij, ki so jih izvajale projektantske ekipe v DTP. Na tak način je bilo projektiranih kar 80 % rekonstrukcij po potresu 1998. Ostale so šle čez postopek pridobivanja gradbenega dovoljenja.

Popotresna obnova je trajala dlje kot so bile optimistične napovedi takoj po dogodkih, in sicer predvsem iz treh razlogov:

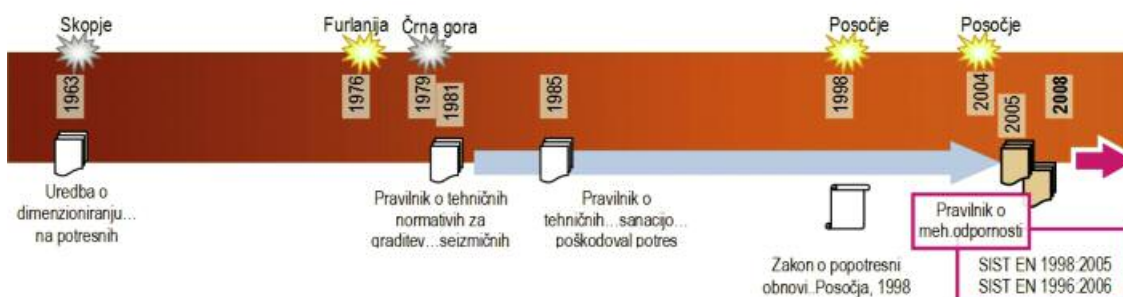
- potrebno se je bilo dogovoriti o načinu pomoči (od višine sredstev, organizacijskega pristopa do tehničnih rešitev),
- na začetku je zaradi nenadne velike količine dela primanjkovalo tako projektantov kot izvajalcev in
- težavo so predstavljali tudi nerešeni lastniški odnosi, ki so zavrlji marsikatero rekonstrukcijo.

Kljub temu je bilo konec leta 2000, dve leti in pol po potresu, saniranih že 1.200 objektov, kar je predstavljalo 90 % vseh za rekonstrukcijo predvidenih objektov v okviru državne popotresne obnove.

### 3. UPOŠTEVANJE PREDPISOV O POTRESNO VARNI GRADNJI

V Posočju je velik delež starejših stavb, ki so bile grajene po prvi in drugi svetovni vojni, v časih pomanjkanja gradbenega materiala in še pred uveljavitvijo posebnih predpisov, ki urejajo protipotresno gradnjo. Tovrstne stavbe so bile med bolj poškodovanimi. Sorazmerno slabo so se odrezale tudi stavbe, ki so bile zgrajene v 70-ih letih. Običajno niso imele vertikalnih AB vezi, ker po **Odredbi o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih** iz leta 1963 to ni bilo potrebno (zahtevane so bile samo horizontalne AB vezi v višini stropov). Pogosta napaka je bila tudi zidanje z zidaki, ki so imeli vodoravne luknje (BH zidak).

Po potresu leta 1998, sta bila v veljavi **Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih** iz leta 1981 in **Pravilnik o tehničnih normativih za sanacijo, ojačitev in rekonstrukcijo objektov visoke gradnje, ki jih je poškodoval potres ter za rekonstrukcijo in revitalizacijo objektov visoke gradnje** iz leta 1985. Zaradi števila poškodovanih objektov in želje po čim prejšnji obnovi, se je za večino objektov pripravilo elaborate za priglasitev del, kar je tudi omogočal takratni **Zakon o graditvi objektov**. Elaborati so bili narejeni za enostavne stanovanjske objekte, kjer so bile uporabljene standardne metode utrditve (povezovanje z jeklenimi protipotresnimi vezmi, injektiranje kamnitih zidov, podbetoniranje, vgradnja novih zidov, AB vezi itd.), kot so navedene v Pravilniku iz leta 1985. Za večje objekte so bili narejeni projekti PGD, ki so glede potresne odpornosti prav tako upoštevali navodila pravilnikov iz let 1981 in 1985.



SLIKA 3  
Časovnica vplivnih potresov in spremembe pravilnikov o potresno varni gradnji

Po ponovnem potresu 2004., ko niti še ni bila zaključena obnova po potresu iz leta 1998, je bilo odločeno, da je potrebno za vse objekte izdelati vso gradbeno dokumentacijo od idejne zasnove, PGD do PZI. Poleg tega je bilo sklenjeno, da se v okviru popotresne obnove Posočja, za izračun potresne odpornosti rekonstruiranih stavb, namesto zastarelega pravilnika iz leta 1981, začne uporabljati novi evropski standard o potresno odporni gradnji – Evrokod 8.

Zahteve glede projektiranja so se po letu 2003 spreminjale, saj je takrat sprejeti *Zakon o graditvi objektov* (ZGO-1) zahteval, da morajo biti objekti projektirani tako, da izpolnjujejo bistvene zahteve. Zahteve veljajo za novogradnje in tudi za rekonstrukcije. Vendar so bili v Sloveniji, šele z objavo seznama standardov v Uradnem listu RS (št. 114/2005), najprej vzporedno (od 1.1.2006) in nato obvezno (od 1.1.2008 dalje), uveljavljeni evropski standardi za projektiranje. Če projektiramo v skladu z njimi se domneva, da bo prva (in delno druga) bistvena zahteva objekta izpolnjena. Za popotresno obnovo Posočja so, poleg ostalih iz družine Evrokodov, seveda najbolj pomembni standardi za projektiranje potresno odpornih konstrukcij (SIST EN 1998-1:2005), standard za projektiranje rekonstrukcij (SIST EN 1998-3:2005) in standardov za projektiranje zidanih konstrukcij (SIST EN 1996-1:2006).

V primeru obnove potresno poškodovanih objektov v Posočju se upošteva tudi *Zakon o popotresni obnovi objektov* in spodbujanja razvoja v Posočju (zadnje prečiščeno besedilo ZPOOSRP-UPB1), po katerem mora projektna dokumentacija vsebovati vsaj dokumentacijo o izpolnjevanju prve bistvene zahteve – zahteve o mehanski odpornosti in stabilnosti.

### 4. IZKUŠNJE PRI UPORABI EVROKODA 8

Večina objektov, ki so bili rekonstruirani v Posočju, so zidane stavbe, zato bodo predstavljene tovrstne izkušnje. Osnovni principi projektiranja se pravzaprav bistveno ne razlikujejo od Pravilnika iz leta 1981. Nosilni zidovi morajo biti povezani, tloris sorazmerno kompaktnih oblik, prenos obtežbe mora biti zagotovljen čim bolj direktno do temeljnih tal, itd.. Same zahteve novih standardov (Evrokod 8) po potresni odpornosti potresno odpornih konstrukcij so višje, razlikuje se tudi način dokazovanja, vendar po drugi strani ne vpeljujejo radikalno drugačnih metod za rekonstrukcijo poškodovanih objektov. V osnovi Evrokod 8 pozna enake kategorije tipov zidanih konstrukcij kot prej (zidane, zidane z vertikalnimi vezmi in armirano zidovje). Podobne so zahteve glede največjih razmikov nosilnih zidov, AB vezi in samega detajliranja vezi. Še najbolj moti določilo, da se kot nosilni zid smejo upoštevati samo zidovi z debelino večjo od 24 cm, kar je več od vrednosti iz prejšnjega Pravilnika (19 cm), ki se pogosto uporablja. Hkrati pa na večini zidanih konstrukcij, z običajnimi 19 cm opečnimi bloki, ni bilo opaziti posebnih večjih potresnih poškodb.

Po standardu SIST EN 1998-1 obstaja možnost, da ni potrebno računsko dokazati potresne odpornosti za zidane stavbe, če izpolnjuje pravila za "enostavne zidane stavbe". Vendar to ne velja na območju večje potresne ogroženosti, kjer je pospešek tal večji od 0.2 g. To žal velja za celotno Posočje (poleg ostalih delov Slovenije, npr. Ljubljane), zato na teh območjih ni mogoče projektirati po pravilih za enostavne zidane stavbe.



Potresno odpornost konstrukcije je potrebno izračunati in jo primerjati s potresno obremenitvijo, od katere mora biti odpornost seveda večja. Po Evrokodu 8, se skupna mejna prečna sila zaradi potresa (oziroma razmerje med skupno potresno silo in teži stavbe nad togo podlago BSC) določi na podoben način kot po Pravilniku iz leta 1981, le da so uporabljeni drugačni koeficienti. Pri teži stavbe se, zaradi drugačne predpostavke o verjetnosti prisotnosti koristne obtežbe na stavbi v času potresa, uporabljajo drugačni koeficienti (npr. ni potrebno upoštevati teže snega za izračun vztrajnostnih potresnih sil). Pospešek temeljnih tal ( $a_g$ ) je potrebno vzeti iz nove karte projektnih pospeškov (2001).

Evrokod 8 na splošno za vse konstrukcije zahteva, da računski model ustrezno upošteva porazdelitev togosti in mase po konstrukciji, tako da so zajete vse pomembne nihajne oblike. V primeru nelinearne analize mora računski model ustrezno obravnavati tudi porazdelitev nosilnosti. Upoštevati moramo še nenosilne elemente, ki lahko vplivajo na odziv nosilne konstrukcije. Za toge stropne konstrukcije (v njihovi ravnini), se mase lahko koncentrirajo v težišču tlorisa posamezne etaže. Za tlorisno regularne konstrukcije, se analiza lahko izvede na dveh (za vsako smer tlorisa) ploskovnih modelih. Tudi pri zidanih konstrukcijah se pri izračunu togosti elementov upošteva razpokan prerez, v odsotnosti natančnejšega izračuna se lahko vzame polovična vrednost nerazpokanega. Pri računu je potrebno upoštevati še slučajno ekscentričnost pri položaju mase glede na strižno središče.

Glede na karakteristike stavbe (pravilnost tlorisov in po višini), se potresni odziv izračuna z linearno metodo ekvivalentnih vztrajnostnih sil ali modalno analizo, lahko pa se tudi izračuna z nelinearno "pushover" metodo oziroma časovno dinamično analizo. Pri nelinearni analizi se na nivoju elementov upoštevajo relacije deformacija-sila, pri čemer mora biti ta relacija vsaj bilinearna. V informativnem dodatku C standarda SIST EN 1998-3, so tudi dodatna določila kaj je potrebno upoštevati v računskem modelu in kako.

Zgoraj navedenemu ustreza pri nas že dolgo uporabljana "pushover" metoda izračuna potresne odpornosti zidanih konstrukcij – SREMB.

Pri ugotavljanju dejanskega stanja se čim natančneje določijo materialne lastnosti vgrajenih materialov (po SIST EN 1998-3). Najboljše (in v skladu z Evrokodom 6) je izvesti eksperimentalno določitev materialnih karakteristik vgrajenih materialov na terenu samem (in-situ strižne preiskave zidov). Žal je to redko ekonomsko utemeljeno, zato se takrat na objektu odpre sonde. Če z njimi dokažemo, da imamo enako vrsto zidovine kot so primeri v literaturi, za katere so bile izvedene preiskave, lahko povzamemo karakteristične vrednosti in jih upoštevamo z varnostnim faktorjem  $C_F=1.2$ .

Pri izračunu novo zgrajenih opečnih nosilnih zidov je potrebno upoštevati karakteristike in delne materialne varnostne faktorje skladno s SIST EN 1996-1-1 in 1998-3 ( $\gamma_M$  za seizmični izračun je glede na kakovost proizvodnje zidakov in kakovost gradnje med 1,5 in 2,0).

## 5. ZAKLJUČEK

Napredek na področju potresnoodporne gradnje sledi tako iz rezultatov raziskav kot tudi iz izkušenj in opazovanj po potresih. Teh je bilo obilo po potresih v Posočju, predvsem za zidane stavbe.

Veljavna zakonodaja zahteva, da se tudi rekonstruiranim objektom zagotovi minimalno potresno odpornost, ki ni nič manjša kot se zahteva za nove objekte. S sprejetjem evropskega standarda Evrokod 8 (obvezna uporaba od 1.1.2008), je ta zahteva za zidane stavbe višja kot pri prejšnji zakonodaji. Vendar je še vedno možno tovrstne objekte uvrstiti do zahtevanega nivoja s poznanimi in preizkušenimi načini protipotresnega utrjevanja. Uspešnost uvrstitve je odvisna predvsem od splošnega stanja objekta, njegove konstrukcijske zasnove, prisotnih gradbenih napak in predelav v preteklosti.

Zaradi tega se vsak objekt posebej obravnava in postopno vrednoti skozi proces projektiranja, od idejne zasnove do končnih izvedbenih projektov. V vsaki fazi se kontrolirajo stroški gradnje ter ukrepi. V primeru prekoračitve stroškov rekonstrukcije preko sprejemljivega ekonomskega praga, se predlaga nadomestna gradnja. V takem primeru je potrebno spoštovati zahteve pristojnih Zavodov za varstvo kulturne dediščine glede gabaritov, oblikovanja in obdelav objekta, da se čim bolj ohrani izgled kulturne krajine.

Po Evrokodih je način dokazovanja potresne odpornosti sicer drugačen, čeravno ne bistveno. Tudi metode za rekonstrukcijo poškodovanih objektov ostajajo podobne. Izkušnje potresov so pokazale, da so stavbe, ki so korektno grajene po modernih predpisih, zelo dobro prestale potrese. Prav tako so se kot ustrezne izkazale uporabljane tehnične rešitve protipotresnih utrditev, če so le bile dosledno izvedene in načrtovane. Med obnovo po potresih v Posočju se je spreminjala tudi zakonodaja s področja gradnje, kar je bilo potrebno upoštevati.

Proces obnove, predvsem faze načrtovanja, poteka zato počasneje in preudarneje, vendar verjamemo, da je to v prid sami kakovosti obnove. Tako da bodo izpolnjeni cilji obnove: da se objekte utrdi, da bodo varni za bivanje v primeru novega potresa, da bo materialna škoda v takem primeru čim manjša in da se čim bolj ohrani izgled tipične slovenske kulturne krajine.

## 6. LITERATURA

- SIST EN 1996-1-1:2006, Evrokod 6 – Projektiranje zidanih konstrukcij, del 1-1: Pravila za armirano in nearmirano zidovje
- SIST EN 1998-1:2005, Evrokod 8 – Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, del 1-1: Splošna pravila
- SIST EN 1998-3:2005 Evrokod 8 – Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 3. del: Ocena in prenova stavb



# Potresno varne zasnove mostov v projektantski praksi

**Peter KOREN, univ.dipl.inž.grad.**

KO-BIRO d.o.o.

## POVZETEK

Prispevek podaja osnovne praktične napotke za zasnovo potresno varnih mostov (mostov, viaduktov, nadvozov, podvozov), ob upoštevanju Pravilnika o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov, ki zavezuje projektante k upoštevanju načel in pravil Evrokodov, v navezavi pa tudi k upoštevanju slovenskega standarda SIST EN 1998-2:2006, Evrokod 8: Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih – 2. del:

Mostovi, in njegovega nacionalnega dodatka. Poleg zahtev, ki jih določajo predpisi, je projektant dolžan upoštevati obilico drugih specifičnih pogojev, s katerimi se srečuje ob snovanju mostu. Konstrukcija naj bo ob tem, da je mehansko odporna, brez posebnih ukrepov, tudi potresno varna, trajna in enostavna za vzdrževanje.

## ABSTRACT

This paper introduces basic guidelines for design of earthquake resistant bridge structures (bridges, viaducts, overpasses), according to Eurocodes, that commit engineers to implement their rules and principles with respect to Slovenian standard SIST EN 1998-2:2006, Evrokod 8: Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih – 2. del. In

addition to Eurocodes, designer must fulfill many other specific requirements that he or she encounters, while designing bridge structure. Structure must be mechanic and earthquake resistant without special measures, durable and easy to maintain.

## 1. UVOD

Namen prispevka je podati osnovne napotke za zasnovo potresno varnih mostov (mostov, viaduktov, nadvozov, podvozov) v vsakdanji projektantski praksi, ob upoštevanju Pravilnika o mehanski odpornosti in stabilnosti objektov, ki zavezuje projektante k upoštevanju načel in pravil Evrokodov, in v navezavi tudi k upoštevanju slovenskega standarda SIST EN 1998-2:2006, Evrokod 8: Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih – 2. del: Mostovi, in njegovega nacionalnega dodatka. Poleg zahtev, ki jih določajo predpisi, je projektant dolžan upoštevati tudi obilico drugih projektnih pogojev, s katerimi se srečuje ob snovanju mostu. Konstrukcija naj bo ob tem, da je mehansko odporna, brez posebnih ukrepov, pa tudi potresno varna, trajna in enostavna za vzdrževanje.

Posebno področje je obnavljanje objektov, kjer se pogosto srečujemo s potresno povsem nezadovoljivo zasnovanimi mostnimi konstrukcijami. Praviloma povečujemo maso zgornjih konstrukcij ob povsem neustrezno zgrajenih stebrih, pri katerih v primeru potresa ne moremo pričakovati duktilnega obnašanja.

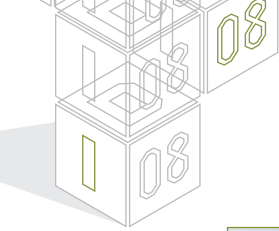
## 2. DELITEV MOSTOV Z VIDIKA ZAGOTAVLJANJA POTRESNE VARNOSTI

Mostove, z vidika zagotavljanja potresne odpornosti, v osnovi delimo na:

- velike objekte izjemnih razsežnosti (veliki mostovi in viadukti) in
- na objekte običajnih razsežnosti.

S tega vidika je tudi pristop v snovanju specifičen. Pri izjemnih objektih moramo zasnovo potresno ustreznega objekta, že v zelo zgodnjih fazah načrtovanja, uskladiti z osnovnimi principi potresno varne zasnove, ker je v postopku umeščanja prometnice v prostor (prostorsko načrtovanje), še možen vpliv na vodenje prometnice in lokacijo objekta. V tej fazi je nujno pritegniti k sodelovanju najvidnejše strokovnjake s področja potresnega inženirstva, geologije, geomehanike, hidrologije in vse druge specialiste, katerih specialistična znanja, združena v projektantski skupini, zagotavljajo, da bo dosežena optimalna tehnična rešitev. Pri izjemnih objektih je smiselna in dopustna tudi uporaba izjemnih rešitev za zagotavljanje potresne ustreznosti objekta. Prvenstveno se izognemo območjem s slabimi geološkimi pogoji za gradnjo.

Pri bolj običajnih objektih (manjši mostovi, nadvozi, podvozi), pri snovanju katerih je prav tako potrebno upoštevati predpise za zagotavljanje protipotresne varnosti, pa je pomembno, da inženirji poznamo osnovna pravila, ker se bo v takem primeru projektant o zasnovi bržčas odločil sam, ob sodelovanju inženirja strokovnjaka za temeljenje. Konstrukcija naj bo v teh primerih brez posebnih ukrepov, mehansko odporna ter ob tem seveda tudi potresno varna, trajna in enostavna za vzdrževanje.



SLIKA 1  
Eden izmed "izjemnih", most Pont  
du Normandie, Francija



SLIKA 2  
Običajna objekta iz vsakodnevne projektantske prakse

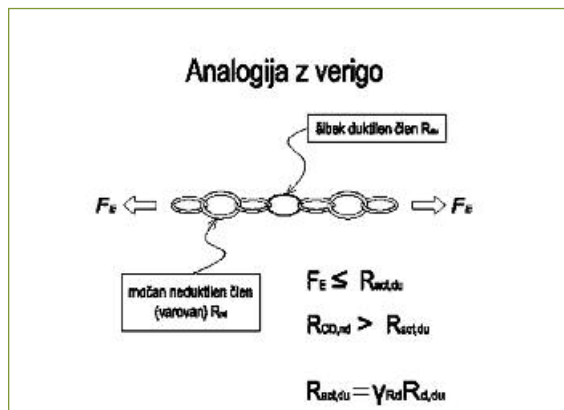
V skupini strokovnjakov, ki snujejo nov objekt poiščemo soglasje med inženirji, ki snujejo konstrukcijo z vidika zagotavljanja nosilnosti in stabilnosti, z inženirji strokovnjaki za temeljenje in stabilnost temeljnih tal, z inženirji strokovnjaki za potresno inženirstvo in dinamično stabilnost ter z oblikovalci, v primeru specifičnih potreb pa tudi z drugimi.

### 3. IZPOLNJEVANJE ZAHTEV IZ PREDPISOV IN VPLIVI NA ZASNOVO

#### 3.1

Slovenija je v upoštevanju Evrokoda 8 zagotovo med vodilnimi v svetu, kar je predvsem posledica intenzivne izgradnje AC programa in minuli potresi v Posočju. Temu primerno so bili že dokaj zgodaj prilagojeni programi na slovenskih univerzah, tako da ima dober del inženirjev, ob končanem študiju, že dobro osnovno znanje o potresnem inženirstvu. Ob uvajanju SIST EN 1998, pa je predvsem Inženirska zbornica Slovenije zagotovila tudi kvalitetna izobraževanja za projektante. 3.2 Uvedba SIST EN 1998-2:2006, prinaša predvsem sledeče osnovne zahteve: 3.2.1 Zahtevano je globalno duktilno obnašanje konstrukcije z metodo načrtovanja nosilnosti, kar pomeni, da je potrebno že v zasnovi konstrukcijo koncipirati tako, da je določena hierarhija nosilnosti in plastičnih mehanizmov. Z ustreznim izborom duktilnih elementov v konstrukcijskem sistemu (lokacija, detajliranje) ustvarimo varovalke, ki sipajo energijo in varujejo manj odporne elemente konstrukcije;

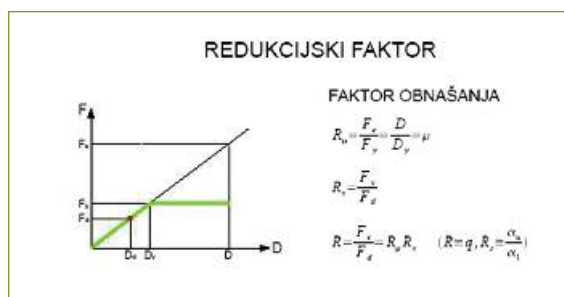
zahteva ima za posledico izbiranje enostavnih, integriranih zasnov, z zadostno upogibno in strižno nosilnostjo stebrov, z zadostno upogibno in torzijsko togostjo prekladne konstrukcije ter s primerno izbranimi lokacijami varovalk. Enostavne konstrukcije tudi zagotavljajo enostavnejše modeliranje in bolj zanesljivo analizo.



SLIKA 3  
Načrtovanje nosilnosti,  
analogija z verigo

### 3.2.2

Uvedba pravil zahteva tudi določanje faktorja obnašanja, kar pomeni, da sile, dobljene z linearno analizo, reduciramo s faktorjem obnašanja ter tako dobimo sile pri realnem – nelinearnem obnašanju. Pri bolj duktilnih konstrukcijah lahko močnejše reduciramo in obratno, pri čemer lahko projektant izbere stopnjo duktilnosti; zahteva neposredno vpliva na izbor oblike elementov, izbiramo materiale z dobrimi duktilnimi lastnostmi, s pravilnim projektiranjem zmanjšamo potresne vplive.



SLIKA 4  
Redukcija sil iz linearne analize

### 3.2.3

Zahtevana je analiza pomikov in deformacij, s preverjanjem mejnih stanj konstrukcije (pomikov in deformacij).

### 3.2.4

Za konstrukcije iz različnih materialov so podane zahteve za zasnovo elementov konstrukcij in za detajle.

### 3.2.5

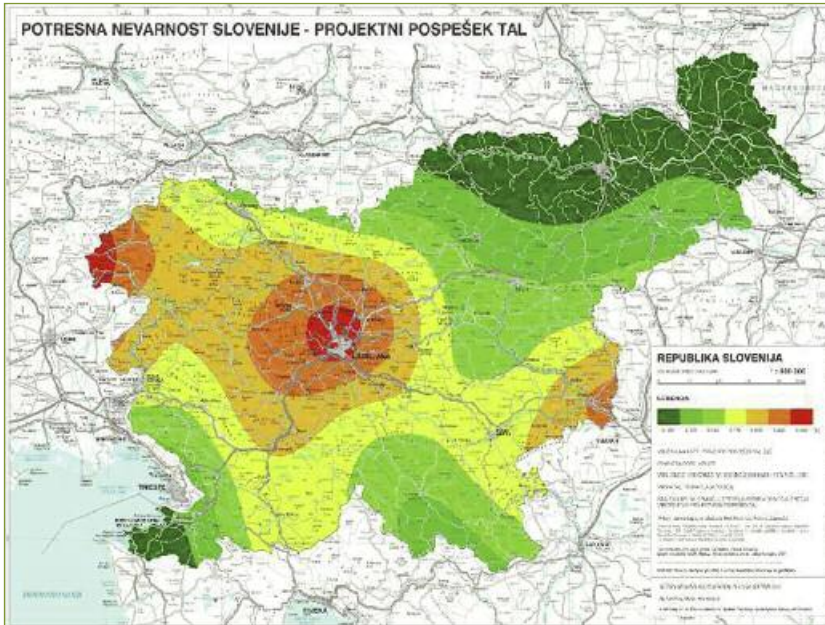
Zahtevana je uporaba karte projektnih pospeškov tal v Sloveniji (objava MOP), izdelane na osnovi Evrokoda 8, za povratno dobo 475 let.

Preglednica 6.2 N: Mejne vrednosti projektnega potresnega pomika pri opomikih, ki so togo povezani z voziščno ploščo

Faktor pomembnosti mostu	Mejni pomik $d_{lim}$ (mm)
III	30
II	60
I	Ni omejitve

SLIKA 5  
Tabela dovoljenih pomikov integriranega mostu iz nacionalnega dodatka k SIST EN 1998-2:2006

Ugotavljamo, da predpisi s svojimi določili že v osnovi vplivajo na zasnovo, saj pri zgrešeni zasnovi težko oziroma ni možno izpolniti pogojev iz predpisa.



SLIKA 6  
Karta potresne nevarnosti za Slovenijo, za vrsto tal "A", za povratno dobo 475 let

#### 4. VIDIKI, KI VPLIVAJO NA ZASNOVO ZARADI UMESTITVE MOSTU V PROSTOR

Ob upoštevanju predpisov za potresno varno projektiranje in gradnjo mostov, je naslednji pomemben parameter, ki vpliva na potrebno varno zasnovo, umestitev mostu v prostor.

Pri izboru trase prometnice moramo upoštevati, da slabo vodena trasa z vidika umeščanja objektov v trasi ali prek nje, pomeni povečanje zahtevnosti objektov in povečanje rizika za slabše obnašanje mostu v primeru potresa.

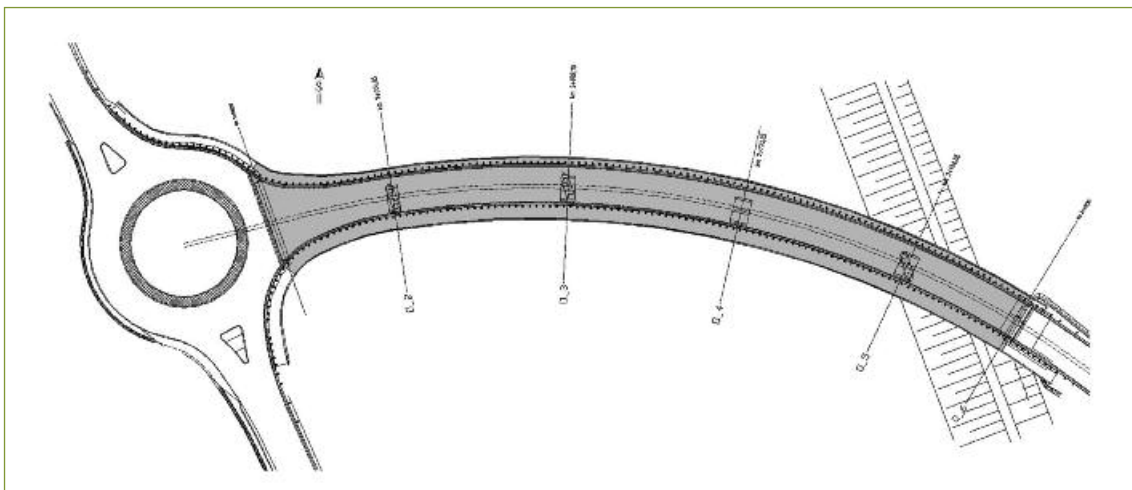
Projektant trase lahko s primernim izborom trase omogoči bistvene poenostavitve zasnove objekta(ov).

##### 4.1

#### Morfologija ovire, ki jo premoščamo

Izbiramo takšno mesto za postavitev mostu, kjer ima konstrukcija mostu čim bolj pravilno obliko:

- Manj primerni za dobro potresno odpornost so pobočni objekti;
- Neželeni so močno ukrivljeni objekti s težko določljivimi smermi pomikov in položajem masnih središč, s problematičnim kontroliranjem torzije;
- Prav tako so neprimerne zasnove močno poševni objekti, z nejasnimi smermi pomikov, s slabo razporejenimi in močno spremenljivimi reakcijskimi silami;
- Problematično je potresno obnašanje (tudi analiza) objektov z močnimi skoki v višini in togosti stebrov, želena je simetrija v geometriji ovire;



SLIKA 7  
Primer "nečiste" geometrije mostu

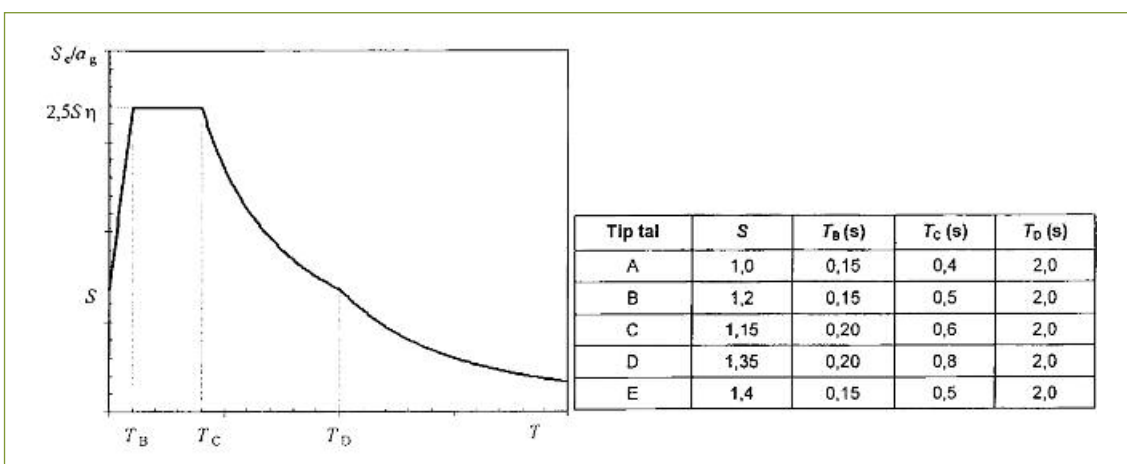
- Neželene so objekti z visokimi priključnimi nasipi;
- Za vse objekte komplicirane geometrije je značilno, da je določitev pravih vhodnih podatkov problematična, da je težavno modeliranje v analizi potresnih vplivov in da so rezultati nezanesljivi in jih je težko kontrolirati.

#### 4.2

##### Geološko geomehanske razmere na območju ovire

Izbiramo lokacije z dobrimi tlemi za temeljenje – že bežen pogled na parametre za analizo, ki jih pogojuje tip tal, kaže močan vpliv kvalitete temeljnih tal na potresne sile in odzive:

- Neželene so lokacije s plastovitimi tlemi s tendenco polzenja, kjer se lahko med potresom sprožijo zdrsi, premiki;
- Izogibamo se lokacijam z zelo spremenljivimi razmerami za temeljenje, z zelo razgibanim in heterogenim geološkim profilom;
- Ogibamo se lokacijam s tektonskimi prelomi, podori, z območij zdrobljenih zemljin;
- Izogibamo se lokacijam, kjer pobočni plazovi podori, sproženi med potresom, ogrožajo objekt, ki je sicer korektno temeljen;
- Neželene so lokacije s plastmi z ujeta talno vodo ali z vodo nasičenimi peski (likvefakcija);
- Lokacija objekta, kjer z obsežnimi sanacijskimi terenskimi deli zagotavljamo možnost postavitve mostu, se bo v primeru potresa obnašala z mnogimi nepredvidenimi odzivi.



SLIKA 8  
Vrednosti parametrov priporočenega spektra odziva od vrste tal

#### 4.3 Hidrologija na območju ovire

- Izogibamo se lokacijam, ki so lahko nevarne zaradi vpliva potresa na obvodne zgradbe, upoštevamo možnost rušitev vodnih pregrad;
- Upoštevati je treba vplive premika vodnih mas v času potresa (v Sloveniji manj verjetno).

#### 4.4 Drugi uporabniki prostora na območju mostu

- Danes mostov, predvsem tistih v urbanih območjih, ne moremo več obravnavati kot objekte, ki so namenjeni izključno premagovanju ovir za potrebe prometa. Mostovi omogočajo tudi prehod mnogih vodov komunalne infrastrukture, vanjo posegajo in lahko predstavljajo hrbtenico prenosa številnih pomembnih infrastrukturnih povezav, ki morajo v primeru potresa zanesljivo obratovati (telekomunikacije, vodovod, energetika) ali pa so lahko v primeru poškodb v potresu, tudi nevarni za ljudi, za sam objekt in za okolje (plinovodi, naftovodi, kanalizacije, energetski vodi idr.).
- Vsi ti vodi morajo biti na mostu ustrezno nameščeni in trdno pritrjeni, zavarovani, po potrebi vodeni v posebnih koridorjih, na mestu priključevanja na zaledje pa neoporečno tehnično izvedeni.

### 5. VIDIKI, KI VPLIVAJO NA ZASNOVO ZARADI UPOŠTEVANJA PRAVIL GRADBENE MEHANIKE, PRINCIPOV IN PRAVIL EVROKODOV IN PRAVIL ZA ZAGOTAVLJANJE NEOPOREČNE FUNKCIJE

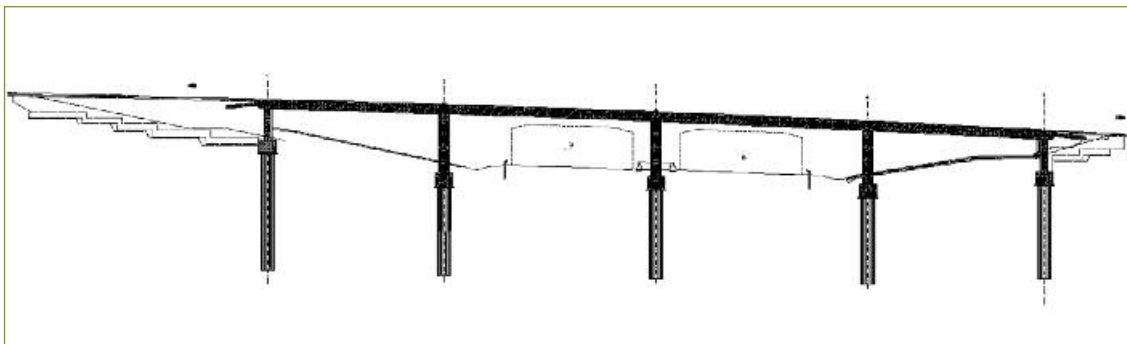
#### 5.1 Enostavnost konstrukcij

Nova spoznanja pri snovanju mostov, narekujejo zasnove s karseda enovito nosilno konstrukcijo (integrirana konstrukcija), z minimalnim členjenjem in z dilatacijami in ležišči tam, kjer je to nujno potrebno. Takšne konstrukcije so bolj trajne in bolj enostavne za vzdrževanje.

Integrirane konstrukcije zahtevajo tudi pravila Evrokodov. Takšna zahteva je razumljiva, ker je konstrukcija praviloma integrirana v okvir s številnimi lokacijami, kjer je možno vgraditi varovalke. Mase so regularno porazdeljene v elementih konstrukcije, tako da so tudi potresne sile povzročene s pospeški, enakomerno porazdeljene v elementih konstrukcije in tako lažje obvladljive. V manj čle-



njeni konstrukciji je tudi manj mest, na katerih lahko pride do slabo kontroliranih obnašanj s težkimi poškodbami ali celo rušitvami (padec prekladne konstrukcije z ležišč zaradi vplivov potresa). Takšne konstrukcije so praviloma enostavnejše zasnove, z enostavnejšimi računskimi modeli ko jih analiziramo in z lažje določljivimi robnimi pogoji. Taka analiza daje bolj zanesljive rezultate, ki jih, ker so bolj pregledni, lažje kontroliramo.

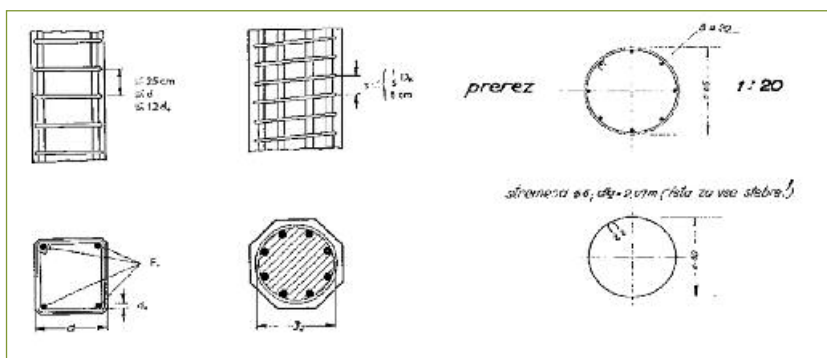


SLIKA 9  
Podolžni prerez nadvoza s povsem integrirano konstrukcijo

### 5.2 Ustrezno konstruiraje (detalji)

Zagotovitev globalnega duktilnega obnašanja konstrukcije zahteva preudarno snovanje, s pravilnim dimenzioniranjem elementov in detajlov ter s pravilnim razmerjem togosti, upoštevaje metodo načrtovanja nosilnosti. Vsi detajli konstrukcije morajo biti pravilno načrtovani in izvedeni, zato je zahtevana izdelava kvalitetnih načrtov gradbenih konstrukcij tako v fazi PGD kakor tudi PZI. Predvsem to velja za pravilno konstruiranje armature pri AB konstrukcijah, oziroma za pravilno izvedbo vozlišč, stikov in ojačitev v jeklenih konstrukcijah.

SIST EN standardi za mostove iz različnih materialov, podajajo podrobne konstrukcijske zahteve. Takšne konstrukcije analiziramo na računskih modelih, ki se po svoji analogiji kar najbolj približajo zasnovi.



SLIKA 10  
Detajl stremenske armature v stebri, s pričakovanim duktilnim in neduktilnim obnašanjem

### 5.3 Pravilno temeljenje

Kot je že spredaj zapisano mora biti potresno varna mostna konstrukcija zanesljivo temeljena. Konstrukcije temeljev po možnosti povežemo s konstrukcijo mostu v celoto. Praviloma zasnujemo samo eno vrsto temeljev (plitvih ali globokih). Temelji morajo biti regularno razporejeni, tako da enakomerno prevzamejo obremenitve konstrukcije.

Razumljivo je, da mora biti potresno varna konstrukcija temeljena na zanesljivih tleh, ki morajo s svojim stabilnim obnašanjem zagotavljati globalno nosilnost, ki je večja od globalne nosilnosti objekta.

## 6. ZAKLJUČEK

Podan prispevek ne podaja oprijemljivih napotkov za analizo konstrukcij ali za detajliranje, ker menimo, da so bili ti napotki projektantom posredovani v zadovoljivem obsegu že med študijem in na več kvalitetnih predavanjih, s strani slovenskih strokovnjakov za potresno inženirstvo, ki sodijo v svetovni vrh. V prihodnosti tudi pričakujemo izid prepotrebnih priročnikov za praktično podporo projektantom pri potresnih analizah konstrukcij. Če bo prispevek bralca morda le opomnil na vsaj eno prezrto izhodišče pri snovanju mostov, je bil njegov namen dosežen.



## 7. VIRI

1. SIST EN 1998-2:2006,
2. SIST EN 1998-2:2006/A101 (nacionalni dodatek), OENORM 5004
3. Fajfar, EVROKOD 8, Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, IZS, Seminar 2007
4. Meskouris, Hinzen, Butenweg, Mistler, Bauwerke und Erdbeben, Vieweg 2007
5. [www.student-info.net/sis-mapa/skupina\\_doc/fgg...](http://www.student-info.net/sis-mapa/skupina_doc/fgg...)
6. [www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2000/u\\_clanek34.pdf](http://www.sos112.si/slo/tdocs/ujma/2000/u_clanek34.pdf)
7. [wiki.worldflicks.org/pont\\_de\\_normandie.html](http://wiki.worldflicks.org/pont_de_normandie.html) – 30k
8. [wiki.worldflicks.org/pont\\_de\\_normandie.html](http://wiki.worldflicks.org/pont_de_normandie.html) – 30k





