

# PRIPRAVA NOVIH KART POTRESNE NEVARNOSTI SLOVENIJE

Janez Lapajne\*, Barbara Šket Motnikar\*\*,  
Polona Zupančič\*\*\*

UDK 550.343 : 699.841 (497.12)

**Nova spoznanja na področju inženirske seizmologije in potresnega inženirstva ter potreba po lastni zakonodaji zahtevajo izdelavo novih predpisov za potresno varno gradnjo. Pomemben sestavni del predpisov bo ena ali več državnih kart potresne nevarnosti, ki jih bodo uporabljali pri izračunu projektnih potresnih obremenitev za velik del objektov visoke gradnje. Nove karte potresne nevarnosti bodo pripomogle tudi k ustrežnejšemu prostorskemu načrtovanju in boljšim ocenam potresne ogroženosti.**

Nekatera načela potresno varne gradnje so na območju Ljubljane vpeljali po potrebi pred sto leti. Avstrijski zakon iz leta 1896 je uvedel "stavbinski red za občinsko ozemlje deželnega stolnega mesta Ljubljane", ki vključuje omenjena načela, čeprav o potresnih obremenitvah izrecno ne govori. O teh je prvič govora v jugoslovanskih predpisih za obtežbo zgradb iz leta 1948. Prvi slovenski zakonski akt o potresno varni gradnji je Odredba o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih, ki je izšla leta 1963 (U. I. SFRJ 18/63); priložena Začasna karta seizmičnosti SR Slovenije pa je prva uradna seizmološka karta Slovenije.

Omenjena slovenska odredba je bila temelj jugoslovanskemu Pravilniku o začasnim tehničnim predpisih za grajenje na potresnih področjih, ki je izšel dobro leto po njej (U. I. SFRJ 39/64). Ta pravilnik je leta 1981 zamenjal Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih (U. I. SFRJ 31/81) s poznejšimi spremembami in dopolnitvami (U. I. SFRJ 29/83, 21/88), njemu priloženo Seizmološko karto Jugoslavije pa je zamenjala Začasna seizmična karta SFRJ (U. I. SFRJ 49/82). Vse omenjene slovenske in jugoslovanske seizmične oz. seizmološke karte so predstavljale največje ugotovljene intenzitete potresov.

## Verjetnostne seizmološke karte - karte potresne nevarnosti

Leta 1987 so izdelali prve verjetnostne Seizmološke karte SFRJ za povratne dobe potresov 50, 100, 200, 500, 1000 in 10000 let, ki so leta 1990 postale sestavni

del pravilnika iz leta 1981 (U. I. SFRJ 52/90). To so karte največje pričakovane intenzitete potresov (1, 2, 3). Verjetnostne seizmološke karte imenujemo tudi karte potresne nevarnosti. Za projektiranje objektov II. kategorije (stanovanjske hiše, hoteli, restavracije ter javne in industrijske stavbe, ki niso uvrščene v I. kategorijo) in III. (pomožne proizvodne stavbe, agrotehnični objekti) je predpisana karta za povratno dobo 500 let. Izbira te povratne dobe temelji na upoštevanju načela, da je treba s potresno varno gradnjo zavarovati predvsem življenja, kar pomeni, da se ob potresu stavbe z veliko verjetnostjo ne smejo porušiti, lahko pa se poškodujejo. Za vrednosti na karti za povratno dobo 500 let je več kot 90-odstotna verjetnost, da v 50 letih (privzeta življenjska doba stavbe) ne bodo presežene. Zadnji jugoslovanski pravilnik in karte so v Sloveniji do priprave naše zakonodaje še vedno veljavni.

Metodologija ocenjevanja potresne nevarnosti se je v zadnjih letih precej izboljšala, kar zahteva izdelavo novih kart potresne nevarnosti. To sovпада s potrebo, da dobi slovenska država svojo zakonodajo na vseh področjih. Mimo tega teče pri Uradu Republike Slovenije za standardizacijo in meroslovje postopek za prevzem evropskega predstandarda za potresno varno gradnjo (Eurocode 8). Priloga temu predstandardu je omenjena verjetnostna seizmološka karta za povratno dobo 500 let, ki jo bo kasneje zamenjala karta potresne nevarnosti, ki je v pripravi. To bo najverjetneje karta stvarnega ali efektivnega vršnega pospeška tal (EPGA) za povratno dobo 475 let. Po potrebi bodo izdelane še nekatere druge karte potresne nevarnosti, kot je praksa npr. v ZDA, Kanadi in na Japonskem (4). To so karte stvarne ali efektivne vršne hitrosti tal (EPGV), spektralne hitrosti (PSV) in spektralnega pospeška (PSA) za povratno dobo 475 let. Za posebne namene bodo lahko izdelane tudi karte za druge povratne dobe.

PSV in PSA določata odzivni spekter preprostega nihala. Če je lastna frekvenca

(oz. nihajni čas) preprostega nihala enaka lastni frekvenci določene zgradbe, lahko elastični odziv zgradbe na potresno nihanje tal dokaj dobro aproksimiramo z odzivom tega nihala. Iz pomika nihala dobimo hitrost in pospešek najpreprosteje tako, da predpostavimo sinusno nihanje. Največja PSV je potem kar zmnožek kotne frekvence in pomika ( $PSV = \omega \cdot D$ ; kotna frekvenca je  $\omega = 2\pi/T$ ,  $T$  pa je nihajni čas), največji PSA pa zmnožek kotne frekvence in spektralne hitrosti ( $PSA = \omega \cdot PSV$ ). Ker je potresno nihanje dokaj zapleteno in pomik preprostega nihala ni čisto sinusno nihanje (pa tudi odziv preprostega nihala je le približek odziva zgradbe), izračunana PSV in PSA nista prava hitrost in pospešek. Zato ju imenujemo psevdohitrost in psevdopospešek (kar je vidno iz kratice). Zaradi preprostosti pa predpono psevdo pogosto izpuščajo.

Angleški izraz peak ground acceleration (PGA) smo doslej prevajali kot maksimalni pospešek tal ali največji pospešek tal, kar pa ni niti dober niti ustrezen prevod, saj ima PGA za določen potres od mesta do mesta različne vrednosti. Največja vrednost PGA je torej največji največji pospešek tal oz. največji maksimalni pospešek tal, kar je neroden izraz. Ker je PGA določen kot največji odklon oz. vrh (angl. "peak") na zapisu pospeška nihanja tal, predlagam izraz vršni pospešek tal. Iz istih razlogov predlagam izraz vršna hitrost tal za peak ground velocity (PGV). Za izdelavo omenjenih novih kart potresne nevarnosti so potrebne predhodne seizmološke, geološke in seizmotektonske razprave, ki zahtevajo nekajletno delo in seveda precej sredstev. Prevzemanje evropskega predstandarda in potreba po lastni zakonodaji po drugi strani vsiljujeta pospešeno pripravo novih kart, ki opredeljujejo že omenjene fizikalne količine. Zato smo se odločili, da z novo metodologijo ocenjevanja potresne nevarnosti takoj začnemo pripravljati začasne karte na podlagi razpoložljivih podatkov, obenem pa se potrudimo, da se bodo pripravile tudi omenjene raziskave.

\* , \*\* dr., Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava Republike Slovenije za geofiziko, Kersnikova 3, Ljubljana

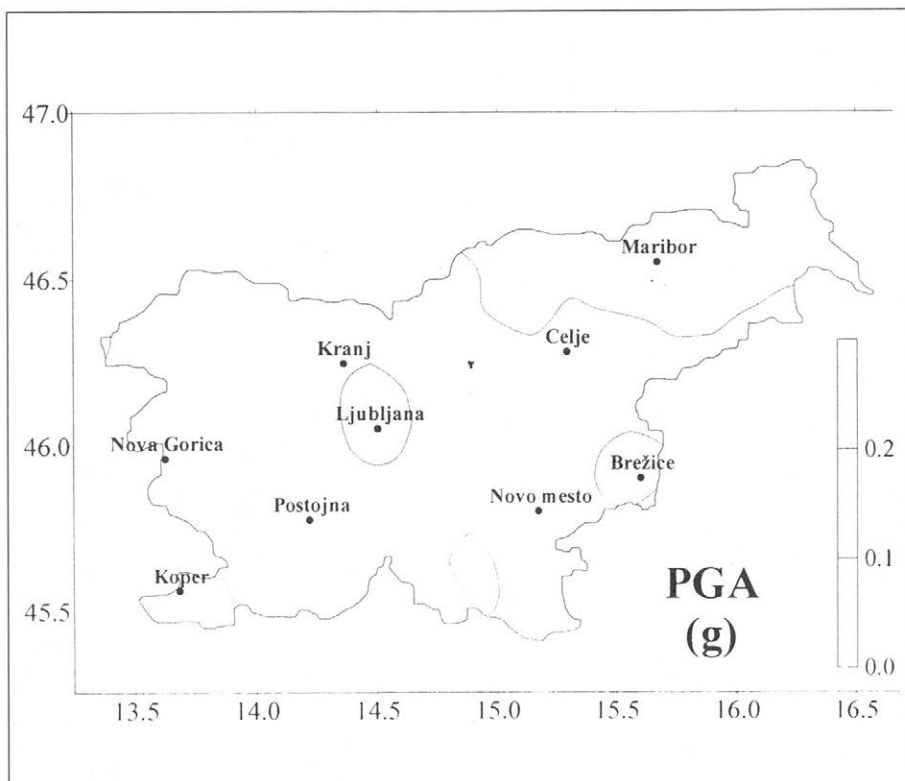
\*\*\* Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava Republike Slovenije za geofiziko, Kersnikova 3, Ljubljana

Predhodni izračuni bodo pokazali, ali bodo rezultati po novi metodologiji bistveno različni, in ali bo treba sedaj veljavne karte čimprej zamenjati.

## Modeli potresnih izvorov

Izračun potresne nevarnosti zahteva oblikovanje modela potresnih izvorov, to je območij, kjer nastajajo potresi. Pri opredeljevanju potresnih izvorov predpostavljamo, da je največja verjetnost za pojav potresa tam, kjer so v preteklosti potresi že bili in posebej tam, kjer so bili pogosti. Vsaj tako pomembna, če ne celo bolj, so za določanje potresnih izvorov območja aktivnih geoloških prelomov. Zaradi pomanjkljivega poznavanja geološko-tektonskih razmer oz. dokaj nezanesljivih podatkov o aktivnosti prelomov smo pri izdelavi modela potresnih izvorov pripisali večji pomen seizmološkemu podatku, čeprav je tudi njihova nezanesljivost precejšnja. Pri modeliranju potresnih izvorov in izračunu kart smo uporabili potresni katalog, ki vsebuje podatke o 1643 potresih z magnitudo, večjo ali enako 3,5 od leta 567 do 1990 in pokriva približno 70.000 km<sup>2</sup> (5).

Da bi omilili pomanjkljivo vedenje in veliko nezanesljivost vhodnih podatkov, smo napravili tri različne modele potresnih izvorov, ki smo jih utežili po subjektivni strokovni presoji (6). Subjektivno uteževanje modelov potresnih izvorov je uveljavljeno tudi drugje po svetu, kadar ni na voljo dovolj ustreznih objektivnih meril. Dva modela temeljita na podatkih o preteklih potresih. Prvi temelji na porazdelitvi epicentrov potresov, drugi na sproščeni potresni energiji. Tretji model, ki temelji na Prelogovičevi seizmotektonski študiji, smo sprejeli iz verjetnostne analize potresne nevarnosti lokacije jedrske elektrarne Krško (7,8). Ker je bil ta model namenjen za oceno potresne nevarnosti na lokaciji jedrske elektrarne, so bili ustrezno podrobno opredeljeni le potresni izvori v okolici te lokacije. Oddaljeni izvori, katerih vpliv na potresno nevarnost na lokaciji jedrske elektrarne je zanemarljiv, pa so bili le grobo določeni in model ni najbolj primeren za izdelavo karte potresne nevarnosti. Zato smo mu pripisali le utež 0,3, čeprav bi kot seizmotektonski model moral sicer imeti večjo težo. Še manjšo utež (0,2) smo določili modelu, ki temelji na gostoti epicentrov, saj območja pogostih potresov ne sovpadajo vedno z mesti najmočnejših potresov. Modelu, ki temelji na sproščeni potresni energiji, smo dali največjo utež (0,5), saj so območja največje sproščene energije območja najmočnejših potresov, ki največ prispevajo k potresni nevarnosti.



Slika 1. Karta vršnega pospeška tal za povratno dobo 475 let

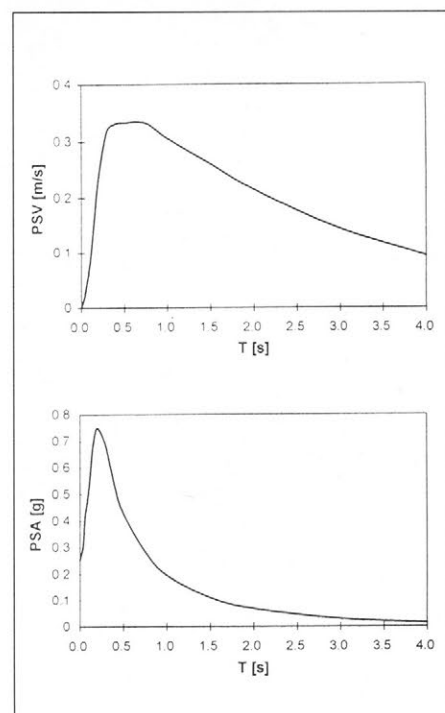
Figure 1. PGA map for 475 years return period

## Model pojemanja tresljajev

Za izračun oz. oceno vpliva nekega potresnega izvora na izbrani lokaciji je treba poleg poznavanja izvora tudi vedeti, kako pojema tresljaji pri širjenju potresnega valovanja oz. oddaljevanju od izvora. Podatke o pojemanju (s tujko imenujemo pojemanje atenuacija) dobimo z ustrezno mrežo merilnikov močnih nihanj – akceleroagrafov, ki zaznajo pospešek nihanja tal na različnih oddaljenostih od potresnega izvora. Na žalost imamo v Sloveniji na voljo le nekaj takih meritev, iz katerih ni mogoče napraviti modela pojemanja tresljajev za Slovenijo. Zato smo bili prisiljeni uporabiti primeren objavljen model. Odločili smo se za model italijanskih avtorjev Puglieseja in Sabette (9). Njun model je rezultat statistične analize zapisov nihanja tal pri potresih v Italiji, pri čemer je bila skoraj polovica zapisov iz Furlanije. Model daje enačbe pojemanja tresljajev za vodoravno komponento PGA, PGV in PSV za 14 nihajnih časov oz. frekvenc pri 5 % kritičnem dušenju.

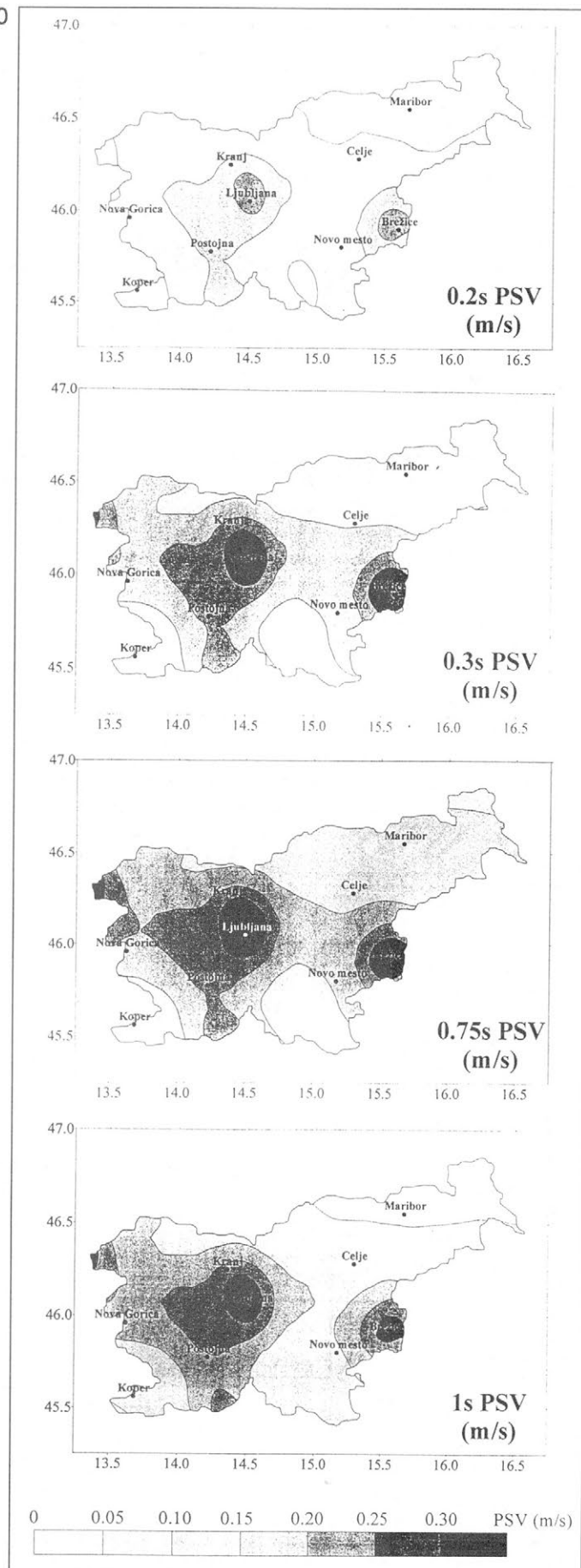
Objavljeni modeli pojemanja tresljajev drugih avtorjev temeljijo na meritvah, ki so bile narejene daleč od Slovenije in so zato verjetno za nas manj primerni. Izbira modela pojemanja tresljajev je zelo pomembna, saj analize občutljivosti kažejo,

da je vpliv pojemanja tresljajev na izračun potresne nevarnosti večji od vplivov vseh drugih dejavnikov. Ta ugotovitev je tudi vzpodbuda za čimprejšnjo postavitev primerne števila akceleroagrafov na ozemlju Slovenije.

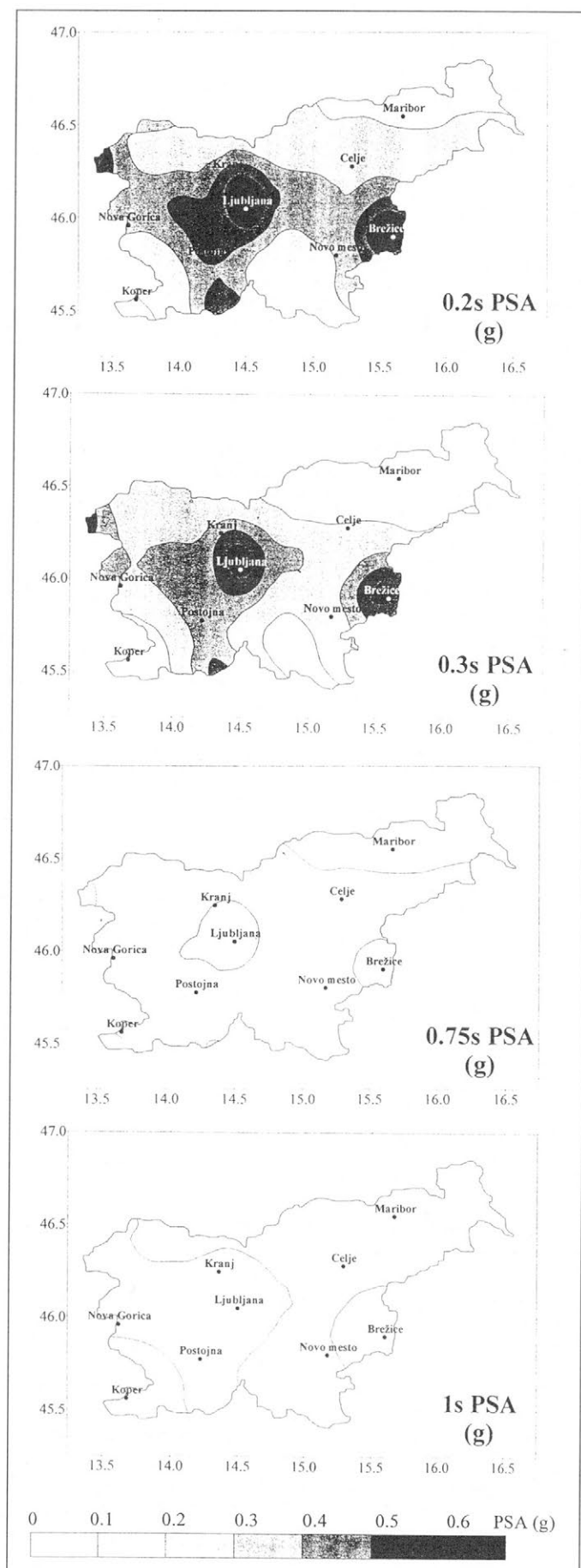


Slika 2. Spekter hitrosti in pospeška v Ljubljani za povratno dobo 475 let in 5 % kritično dušenje

Figure 2. Pseudovelocity and pseudoacceleration spectrum for Ljubljana for 475 years return period and 5 % critical damping



Slika 3. Karta spektralne hitrosti za povratno dobo 475 let in 5 % kritično dušenje. Nihajni čas: a) 0, 2 s, b) 0, 3 s, c) 0, 75 s, d) 1 s  
 Figure 3. PSV map for 475 years return period and 5 % critical damping. Period: a) 0, 2 s, b) 0, 3 s, c) 0, 75 s, d) 1 s



Slika 4. Karta spektralnega pospeška za povratno dobo 475 let in 5 % kritično dušenje. Nihajni čas: a) 0, 2 s, b) 0, 3 s, c) 0, 75 s, d) 1 s  
 Figure 4. PSA map for 475 years return period and 5 % critical damping. Period: a) 0, 2 s, b) 0, 3 s, c) 0, 75 s, d) 1 s



# Izračun kart potresne nevarnosti

Novi evropski predstandard za potresno varno gradnjo stavb (EUROCODE 8) predvideva karte potresne nevarnosti za povratno dobo potresov 475 let. To ustrezno verjetnosti 90 %, da na karti dane vrednosti ne bodo presežene v 50 letih. Za izračun smo uporabili dva ameriška računalniška programa (10, 11); oba temeljita na dopolnjenem osnovnem postopku Cornella (12), ki predpostavlja Poissonovo porazdelitev potresov. Za vsakega od opisanih treh modelov potresnih izvorov smo najprej izračunali karto za vršni pospešek tal (PGA). Nato smo izračunali uteženo karto, ki jo predstavlja slika 1. Različne frekvence potresnega nihanja različno močno zatresejo zgradbo. Zato je dobro poznati odzivni spekter preprostega nihala. Slika 2 kaže spekter hitrosti in pospeška za preprosto nihalo v Ljubljani. Spekter lahko dobimo za katerokoli izbrano točko v Sloveniji, za celotno ozemlje pa je pregledneje predstaviti spektralne vrednosti hitrosti in pospeška na kartah za nekaj primerno izbranih vrednosti nihajnega časa. Izbrali smo nihajne čase 0,2, 0,3, 0,75 in 1 s. Podobno kot za vršni pospešek smo tudi za spektralno hitrost pri izbranem nihajnem času najprej izračunali karto za vsak model potresnih izvorov posebej; iz treh kart smo potem izračunali uteženo karto za izbran nihajni čas. Utežene karte spektralne hitrosti za vse štiri izbrane nihajne čase kaže slika 3. Iz teh smo končno izračunali še pripadajoče karte za spektralni pospešek, ki jih kaže slika 4. Zaradi večje zanesljivosti smo napravili izračun z obema omenjenima računalniškima programoma, ki sta dala za vsako količino nihanja nekoliko različni karti. Njuno povprečje smo upoštevali pri končni obliki karte. Vsaka karta je torej uteženo povprečje šestih kart (karte treh modelov, izračun z dvema programoma). Ker daje uporabljeni model pojemanja tresljajev enačbe za vodoravno komponento nihanja, predstavljajo tudi izračunane karte vodoravne komponente PGA, PSV in PSA pri 5-odstotnem kritičnem dušenju.

## Sklep

Izračunane karte potresne nevarnosti so namenjene pripravi metodologije in ponazoritvi postopka. Na njihovi podlagi se bodo strokovnjaki s področja potresnega inženirstva in inženirske seizmologije dogovorili in odločili, kakšna in katera karta (ali karte) bo najustreznejša za prilogo privzetemu evropskemu predstandardu ali novim predpisom o potresno varni gradnji. Glede na priporočilo v evropskem predstandardu bo to karta stvarnih vršnih pospeškov tal (EPGA) za povratno dobo

475 let, ki pa se verjetno ne bo bistveno razlikovala od predstavljene karte vršnih pospeškov tal (PGA), na kateri bo temeljila. Koristna dopolnitev bodo lahko karte potresne nevarnosti za druge povratne dobe ter karte spektralnih pospeškov in hitrosti za nekaj nihajnih časov.

Vse predstavljene karte kažejo nekatere temeljne podobnosti, razlike pa so predvsem nastale zaradi različno močnih tresljajev pri različnih nihajnih časih oz. frekvencah potresnega nihanja. Na vseh izstopata dve območji največje potresne nevarnosti, to sta ljubljansko in brežiško. Ker na kartah zaradi boljše preglednosti ni podrobnih vrednosti PSV in PSA, razen na sliki 3 c (PSV pri 0,75 s), ni vidno, da je na ljubljanskem območju potresna nevarnost nekoliko večja kot na brežiškem. Tretje območje, ki je deloma primerljivo z ljubljanskim in brežiškim, je breginjski kot, kjer prispeva k večji potresni nevarnosti bližina Furlanije. Najmanjša potresna nevarnost je v severovzhodni Sloveniji, na Kočevskem in na Koprskem. Podobno kot na potresno bolj nevarnih območjih pa je treba tudi v teh predelih upoštevati morebiten vpliv slabih tal, ki na kartah ni upoštevan, lahko pa bistveno poveča potresne učinke.

Predstavljene karte potresne nevarnosti se v oceni potresnih območij bolj in manj razlikujejo od dosedanjih seizmoloških kart oz. kart potresne nevarnosti. To lahko delno pripišemo nekaterim popravkom v potresnem katalogu, predvsem pa drugačni metodologiji izračuna potresne nevarnosti. Razmeroma velike razlike na nekaterih območjih (posebej v zahodni Sloveniji) kažejo na potrebo po čimprejšnji izdelavi novih kart, saj je nova metodologija objektivnejša in računsko zanesljivejša.

Za projektiranje objektov, katerih poškodbe ali rušenje bi pomenilo posebno nevarnost za širšo okolico, take karte ne bodo zadostovale, ampak bodo podobno kot doslej potrebne posebne raziskave potresne nevarnosti na lokaciji bodočega objekta.

1. Lapajne, J., 1992. Določanje projektnih potresnih parametrov. Ujma, 6, Ljubljana.
2. Lapajne, J., 1992. Projektni potresni parametri za jedrsko elektrarno Krško. Ujma, 6, Ljubljana.
3. Lapajne, J., 1992. Projektni potresni parametri za pregrado HE Golica. Ujma, 6, Ljubljana.
4. McGuire, K. R., 1993. The practice of earthquake hazard assessment. International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior.
5. Živčič, M., 1992. Katalog potresov. Priloga študije: Verjetnostna ocena potresne nevarnosti na lokaciji Nuklearne elektrarne Krško, Revizija 1, Končno poročilo. Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani.
6. Lapajne, J. K., Šket Motnikar B., Zupančič P., 1995. Preliminary seismic hazard maps of Slovenia, XX General Assembly of the

European Geophysical Society, Hamburg, 181 Germany.

7. Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, 1994. Verjetnostna ocena potresne nevarnosti na lokaciji Nuklearne elektrarne Krško, Revizija 1, Končno poročilo. Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani.
8. Lapajne, J. K., Prelogović E., Šket Motnikar B., Zupančič P., 1994. Constraints in the estimation of seismic source parameters for Krško NPP site in Slovenia, 9th International Seminar on Earthquake Prognostics, San José, Costa Rica.
9. Pugliese, A., Sabetta F., 1989. Stima di spettri di risposta da registrazioni di forti terremoti italiani, Ingegneria Sismica VI/2, 3-14.
10. Bender, B., Perkins D.M., 1987. Seisrisk III: A Computer Program for Seismic Hazard Estimation, US Geological Survey, Washington.
11. Risk Engineering, 1988. FRISK88 User's Manual, Version 1.2, Risk Engineering, Golden, Colorado.
12. Cornell, C.A., 1968. Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seism. Soc. Am. 58, 1583-1606.

**Janez Lapajne,  
Barbara Šket Motnikar,  
Polona Zupančič**

## The Preparation of New Seismic Hazard Maps of Slovenia

New research results in the field of engineering seismology and earthquake engineering and the establishment of the independent state of Slovenia demand the preparation of a new seismic building code and new seismic hazard map(s). The new seismic building code should be consistent with the European prestandard Eurocode 8 - Earthquake resistant design of structures, which is in preparation. To overcome the lack of seismological and particularly geological data, a multiple model (three different seismic source models) approach was used. Two models were based mainly on the seismicity of the investigated area and the third model was based on rough seismotectonic settings. Published ground motion attenuations based on strong motion records of recent strong earthquakes in Italy were used. The maps of peak ground acceleration (PGA), pseudo spectral acceleration (PSA) and pseudo spectral velocity (PSV) were prepared. Pseudovelocity and pseudoacceleration spectra for Ljubljana were prepared as well. All maps and spectra were computed for a return period of 475 years and will be used as a basis for preparation of the map of effective peak ground acceleration (EPGA) prescribed in Eurocode 8.