

KARTA POTRESNE MIKRORAJONIZACIJE MESTNE OBČINE LJUBLJANA SEISMIC MICROZONATION MAP OF THE MUNICIPALITY OF LJUBLJANA

Polona Zupančič, Barbara Šket Motnikar, Andrej Gosar in Tatjana Prosen

***Izvleček.** Po naročilu Oddelka za zaščito, reševanje in civilno obrambo Mestne občine Ljubljana (MOL) smo izdelali karto potresne mikrorajonizacije na območju MOL. Karta je namenjena izključno uporabi v sistemu varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami. Potresna mikrorajonizacija MOL je predstavljena s pospeškom tal (PGA). Pospešek na trdnih tleh smo privzeli iz Karte potresne nevarnosti Slovenije in ga pomnožili z ustreznim faktorjem tal in faktorjem povratne dobe. Tla smo klasificirali po evropskem standardu Eurocode 8, za območje Ljubljanskega barja pa smo faktor tal določili z modeliranjem.*

***Abstract.** The Municipality of Ljubljana seismic microzonation map was made for the Disaster Management Department of the Municipality of Ljubljana, for exclusive use in the system of protection from natural and other disasters. The seismic microzonation is represented with a peak ground acceleration map. Ground acceleration for rock was adopted from the official Seismic hazard map of Slovenia and multiplied with the appropriate soil coefficient and return period coefficient. The soil classification was prepared in accordance with the European standard Eurocode 8, and the soil coefficient for the Ljubljansko barje area was determined by modelling.*

Uvod

Poznavanje potresne zgodovine ter geologije in tektonike ozemlja je podlaga za ocenjevanje potresne nevarnosti na raznih območjih in v državi kot celoti. Karte potresne nevarnosti so sestavni del predpisov o potresno odporni gradnji in so poleg podatkov o ogrožencih (prebivalci, gradbeni objekti, kulturni spomeniki, proizvodnja ipd.) in njihovi potresni ranljivosti tudi osnovni podatek za ocene potresne ogroženosti, na katerih temeljijo ukrepi civilne zaščite. Civilna zaščita in potresno odporna gradnja pa sta glavni sestavini potresne preventive oz. zaščite.

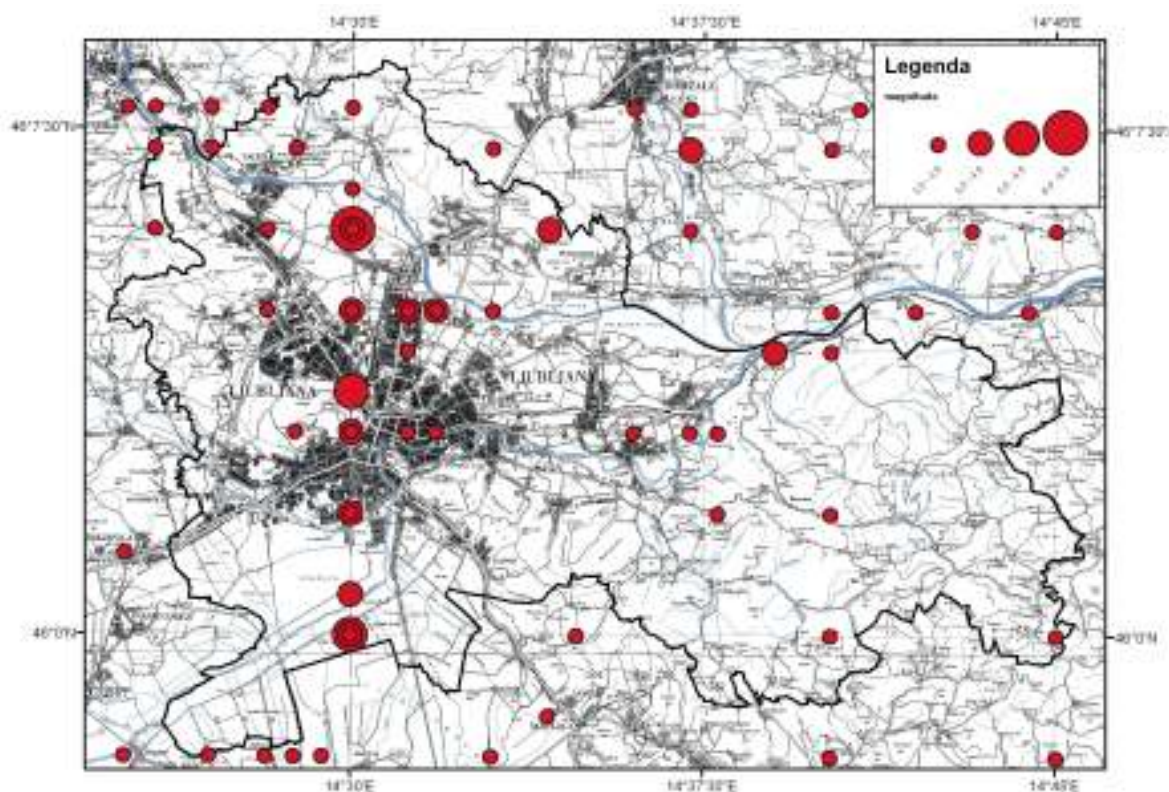
Vpliv lokalne geološke zgradbe na nihanje tal in na poškodbe zgradb ob potresu je že dolgo znan, vendar se je v preteklosti obravnaval predvsem kvalitativno ali s pomočjo empiričnih enačb. Razvoj inženirske seizmologije in prenosnih digitalnih potresnih opazovalnic pa je omogočil razvoj modernih kvantitativnih metod za oceno tega vpliva. Potresna (mikro)rajonizacija oziroma (mikro)coniranje je izraz za postopke, ki razdelijo območje na manjše dele z enakimi ali vsaj podobnimi lastnostmi in parametri.

Na območju Ljubljane se srečujemo z zelo različnimi seizmogeološkimi pogoji, od zelo dobrih na obrobju, kjer izdanjajo permski in karbonski peščenjaki in skrilavci prek srednje dobrih na območju, ki ga prekrivajo prodni nanosi reke Save, do najslabših na območju, kjer so na površini barjanski sedimenti. Poleg podatkov o litološki zgradbi območja in geomehanskih lastnostih kamnin, ki smo jih dobili iz literaturnih virov, smo pri izdelavi karte potresne mikrorajonizacije MOL (Zupančič in sod., 2003) upoštevali naslednja dva dokumenta:

- Eurocode 8 (EC8, 2003): Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules for seismic actions and rules for buildings (Draft No. 6 – Version for translation, 2003).
- Potresna nevarnost Slovenije – projektni pospešek tal in Tolmač (Lapajne in sod., 2001): karta za povratno dobo 475 let je izdelana za trdna tla v skladu z zahtevami evropskega standarda EC8. Uporablja se skupaj s slovenskim predstandardom Eurocode 8 – Projektiranje potresno odpornih konstrukcij, ki ga je izdal Slovenski inštitut za standardizacijo (2001). Slovenski predstandard EC8, Karta projektnega pospeška tal in Tolmač skupaj dopolnjujejo predpise o potresno odporni gradnji v Sloveniji. Geodetska osnova Karte projektnega pospeška tal je pregledna karta Slovenije v merilu 1 : 500.000.

Potresna zgodovina

Potresi nastajajo pretežno na stikih velikih tektonskih plošč. Največ potresov se zgodi v pasu okoli Tihega oceana, kjer se Tihoceanska in nekatere manjše oceanske plošče stikajo z Indoavstralsko, Evrazijsko, Severnoameriško in Južnoameriško ploščo. Tu so zabeleženi tudi potresi z največjimi magnitudami. Drugo veliko območje nastajanja potresov je Azijsko-evropski pas, ki poteka od Indonezije in Kitajske prek osrednje in južne Azije do Alp in prek Sredozemlja. Ta pas je za nas posebej pomemben, saj se Slovenija nahaja na njegovem severozahodnem koncu. Tektonske razmere v alpskem in sredozemskem predelu, ki so pomembne za potresno dejavnost na ozemlju Slovenije, so precej zapletene.



Slika 1. Karta nadžarišč potresov z magnitudo ≥ 3 za obdobje od leta 567 na širšem območju MOL. Lokacije predvsem starejših potresov so manj zanesljive, zato so koordinate zaokrožene.

Figure 1. Map of earthquake epicentres with magnitude ≥ 3 from 567 AD to nowadays, originated in the area of Municipality of Ljubljana. The locations of historical earthquakes are uncertain, so their coordinates are rounded up.

Največja globina potresnih žarišč pri nas je okoli 40 km, večina pa je plitvejših od 10 km. To pomeni, da so vsi potresni pojavi v vrhnjem delu Zemljine skorje, ki je na ozemlju Slovenije debela od 28 do 43 km. V Evropi so najpogostejši in najmočnejši potresi v Italiji, Grčiji in Turčiji. Velika potresna dejavnost pa je še v nekaterih balkanskih državah. Slovenija sodi med potresno srednje dejavna območja Evrope. Približno velja, da je potresna dejavnost v srednji, severni, zahodni, jugozahodni in deloma vzhodni Evropi manjša kot v Sloveniji, v južni, jugovzhodni in deloma vzhodni pa večja.

Potresi, ki so bili v preteklosti na slovenskem ozemlju, so zbrani v katalogu potresov avtorja V. Ribariča (1982) in zajemajo dogodke od leta 792 dalje. Katalog je bil dopolnjen s podatki iz katalogov sosednjih dežel, kjer so zajeti potresi od leta 567 dalje (Živčić, 1994) ter v zadnjih letih s podatki iz biltenov in letnih poročil o potresih. V dopolnjenem katalogu so nekateri potresi na novo locirani, na novo pa so preračunane tudi magnitude. V tem približno 1500-letnem obdobju je zabeleženih prek 4900 dogodkov, ki so jih prebivalci čutili, od katerih ima magnitudo 3,0 ali več okoli 2960 potresov. Številki bi morali biti v resnici nekajkrat večji, saj mnogih potresov ni nihče zabeležil.

Močnejši potresi na območju Mestne občine Ljubljana od leta 567 dalje so prikazani na sliki 1. Opise močnejših potresov povzamamo po Vidrihu (2002). Najmočnejši zabeležen potres v okolici Ljubljane je bil veliki ljubljanski potres 14. aprila 1895 ob 22. uri in 17 minut po svetovnem času. Žarišče je nastalo v globini 16 km, njegova magnituda pa je ocenjena na 6,1. Največje učinke, VIII.-IX. stopnje po EMS-92, je dosegel na območju mesta Ljubljane, Ljubljanskega barja, do Vodic na severu. Potresni sunek so čutili v oddaljenosti približno 350 km. Najhujše poškodbe so nastale od Iga do Vodic, manjše poškodbe pa tudi v oddaljenosti do 50 kilometrov. Njegovo moč ponazarjajo tudi podatki, da so potres čutili prebivalci Dunaja, Splita ter v italijanskih mestih Assisi, Firence in Alessandria. Ljubljana je imela takrat približno 31000 prebivalcev, ki so živeli v okoli 1400 zgradbah. Potres je hujše poškodoval približno 10 % zgradb, ki so jih kasneje večinoma porušili. Na srečo mrtvih ni bilo veliko. V Ljubljani naj bi pod ruševinami umrlo sedem ljudi, v Vodicah pa je zasulo tri otroke. Smrtne poškodbe so večinoma povzročili odpadli deli dimnikov in strešnikov, nekatere pa so zasuli podrti stropi. Nekaj jih je umrlo med reševanjem. V Posavju so potresni sunki sprožili zemeljske in skalne plazove. Tresljaje so močno čutili v rudnikih Trbovlje, Zagorje, Hrastnik in Ojstro. V Dolenjskih Toplicah se je neposredno po potresu temperatura vode znižala za 2,5 stopinje. Glavnemu sunku je v naslednjih desetih dneh sledilo več kot 100 popotresov, ki so prebivalce še bolj begali, občasno pa so se potresi pojavljali še več kot dve leti. Potres je povzročil veliko gmotno škodo. Posledice niso imele le negativnih učinkov, saj se je v Ljubljani po potresu marsikaj spremenilo na bolje. Ob ideji o urbanistični in arhitektonski obnovi Ljubljane je nastala tudi raziskava o gradbenotehničnih normativih, ki je pripeljala do prvih smernic za potresno odporno gradnjo. Velike učinke na Ljubljano in okolico so imeli tudi naslednji potresi:

- Najmočnejši potres na Slovenskem je nastal 26. 3. 1511 ob 14. uri po svetovnem času. Nekateri avtorji menijo, da sta bila v kratkem časovnem razmiku dva močna sunka. Prvi naj bi ob omenjenem času nastal na Idrijskem, drugi pa okoli 21. ure v Furlaniji. Magnituda prvega je ocenjena na 6,8, za drugega pa nekateri avtorji ocenjujejo vrednost magnitude med 7 in 7,2. Globina prvega je bila 15 km, drugega pa okoli 20 km. Na obsežnem epicentralnem območju, ki je segalo od Čedad (Cividale) do Humina

(Gemona) pa tja do Idrije, so najmočnejši učinki potresa dosegli IX.-X. stopnjo EMS. Po nekaterih avtorjih so ponekod lokalni učinki dosegli X. stopnjo EMS. Potres je imel pomembne družbene in politične posledice, saj je pospešil zamenjavo lesenih hiš z zidanimi. Tudi zasnova ljubljanskega gradu je dobila takrat današnji obseg. Ocenjena intenziteta v Ljubljani in okolici je bila VIII-IX EMS.

- Potres 19. 5. 1963 na litijem so močno čutili tudi prebivalci Ljubljane. Magnituda potresa je bila 4,9, največja intenziteta pa VII. stopnje po EMS. Čutili so ga do 140 km daleč. Na območju mesta Ljubljana so učinki dosegli VI.-VII. stopnjo po EMS lestvici.
- Potresna sunka 6. 5. ter 15. 9. 1976 v Furlaniji sta imela magnitudo 6,4 in 6,1. Prvi je dosegel največje učinke IX.-X. stopnje EMS (ponekod z dodatnimi lokalnimi učinki celo X. stopnjo), drugi pa IX. stopnjo EMS (skupni učinki so dosegli X. stopnjo). Globina žarišč je bila med 10 in 15 km. Na srečo pri nas smrtnih žrtev ni bilo (v Italiji 987), nastala pa je ogromna gmotna škoda tako v Posočju kot tudi drugod v severozahodni Sloveniji. Na območju mesta Ljubljana so učinki dosegli V. stopnjo po EMS-98 lestvici.
- Potres 12. 4. 1998 v Zgornjem Posočju je imel magnitudo 5,7 in največjo intenziteto VII.-VIII. stopnje EMS-98. Žarišče potresa je bilo v Krnskem pogorju, v globini okoli 8 km. Potres je poleg velike gmotne škode na objektih na Bovškem, Kobariškem in Tolminskem povzročil tudi precejšnje spremembe v naravi. Na območju mesta Ljubljana in okolice je po EMS-98 dosegel naslednje učinke:
V: Center, Rakovnik, Moste, Vič, Bežigrad, Dravlje, Koseze, Podutik, Srednje Gameljne;
IV-V: BTC, Zalog, Zgornje Gameljne, Polje, Novo Polje;
IV: Šiška, Stanežiče, Šentvid, Brod, Tacen, Spodnje Gameljne, Šmartno pod Šmarno Goro, Črnuče, Zgornji Kašelj, Dobrunje.

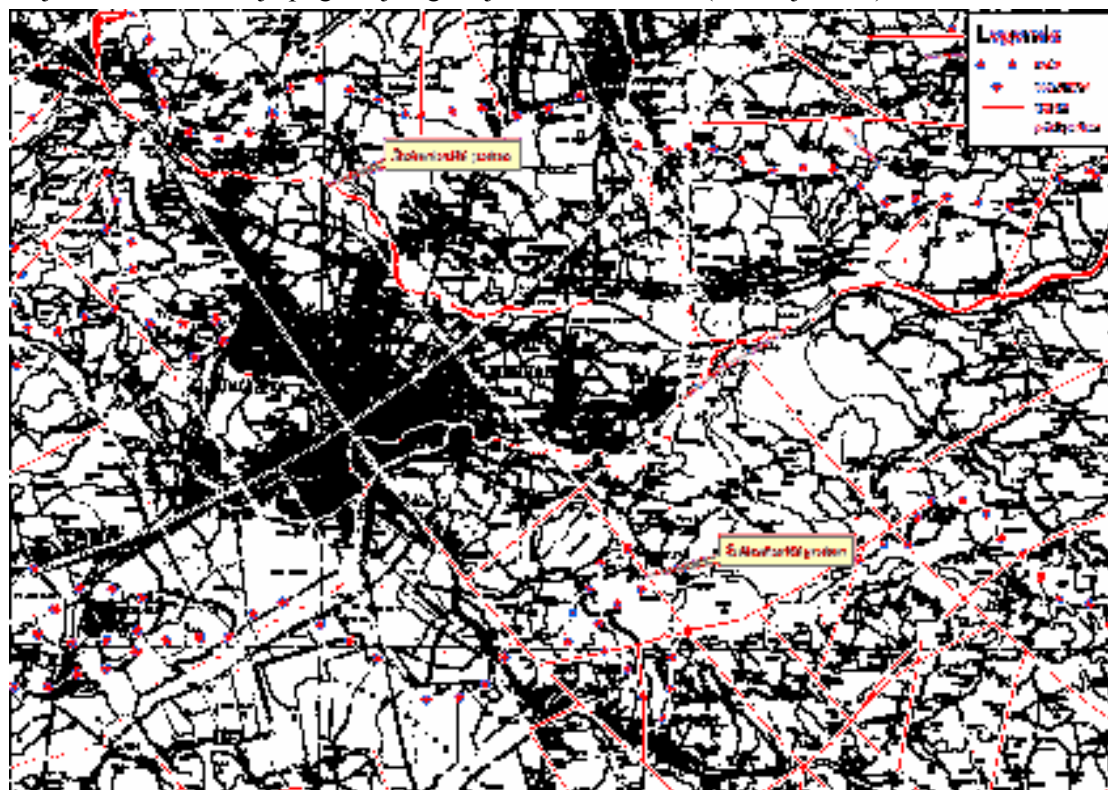
Tektonske značilnosti

Potresno dogajanje v tem delu Evrope opredeljujeta Afriška in Evropska (Evrazijska) plošča, med njima pa leži še manjša Jadranska plošča. Nedeformiran del Jadranske plošče obsega približno območje celotnega Jadranskega morja, obdajajo pa ga večje gorske verige, ki so vzdignjene zaradi medsebojnega vpliva plošč (Helenidi, Dinaridi, Alpe, Apenini). Raziskave kažejo, da se Jadranska plošča vrti v nasprotni smeri urinega kazalca, kar povzroča gubanje in narivanje na vzhodni in severni strani plošče ter deloma na severozahodni strani. Večji del Slovenije (njen južni in zahodni del) predstavlja severni del Jadranske plošče, ki je zelo deformiran in narinjen na osrednji, manj deformiran del Jadranske plošče. Premikanje plošč ustvarja na ozemlju Slovenije napetostno polje, ki kaže kompresijo približno v smeri sever-jug. Napetost se sprošča vzdolž prelomov in tako povzroča potrese. Prelomi imajo v Sloveniji več značilnih smeri. Potresno dejavni so prelomi dinarske (severozahod-jugovzhod) in prečnodinarske smeri (severovzhod-jugozahod), pa tudi narivi, ki potekajo približno v smeri vzhod-zahod (Poljak in sod., 2000).

Raziskovano ozemlje leži v Zunanjih Dinaridih, ki obsegajo večji del jugozahodne Slovenije. Severno od Ljubljanske kotline mejijo Zunanji Dinaridi na Južne Alpe. Kamniško-Savinjske Alpe so proti jugu narinjene na Posavske gube, ki ležijo zahodno od Ljubljanske kotline. Južni del Posavskih gub spada že v Zunanje Dinaride.

Prelomi na tem območju imajo v glavnem smer SZ-JV (dinarska smer) ter SV-JZ (prečnodinarska smer). Najizrazitejši regionalni prelom je Žužemberški prelom (slika 2). Prelomi potekajo po Ljubljanski kotlini ali po njenih robovih in so v kotlini prekriti s kvartarnimi sedimenti. Ljubljansko barje predstavlja kotlino, ki je pliocenske do kvartarne

starosti in se je pogreznila ob prelomih dinarske smeri SZ-JV. Z vrtnami in geofizikalnimi raziskavami je dokazano, da je skalna podlaga pod Barjem valovita in razrezana v številne kotanje in globeli, ki so zapolnjene s prodom in rečnimi sedimenti. Zanesljivo je ugotovljeno, da je vzhodni del Barja pogreznjen globlje kot zahodni del (Mencej, 1989).



Slika 2. Tektonski strukturni elementi na področju Mestne občine Ljubljana in okolice (prirejeno po Poljaku, 2000)

Figure 2. Tectonic structural elements within the area of Municipality of Ljubljana (after Poljak, 2000)

Vpliv lokalnih tal

Vpliv lokalne geološke zgradbe na nihanje tal in na poškodbe zgradb ob potresu je že dolgo znan, vendar se je v preteklosti obravnaval predvsem kvalitativno ali s pomočjo empiričnih enačb. Razvoj inženirske seizmologije in prenosnih digitalnih potresnih opazovalnic je omogočil razvoj modernih kvantitativnih metod za oceno tega vpliva. Učinki potresa na izbrani lokaciji so odvisni od:

- žariščnih lastnosti potresa (magnituda, globina, oddaljenost, smer preloma in smer premika ob prelomu),
- regionalne geološke zgradbe (hitrost širjenja valovanja, dušenje), ki vpliva na potresnega valovanja med žariščem in bližino lokacije,
- lokalne geološke zgradbe (mehanske lastnosti, debelina in oblika sedimentacijskega bazena ter relief površja).

V strokovni literaturi je vpliv teh dejanikov znan pod imenom »site effects«, mi pa ga imenujmo »vpliv lokalnih tal«. Kvantitativno ga upoštevamo s faktorjem tal *S* (soil coefficient), s katerim pomnožimo vrednosti, ki veljajo za referenčno trdno kamnino (včasih namesto faktorja tal uporabljajo tudi prirastek intenzitete).

Vpliv lokalne geološke zgradbe lahko ocenimo z modeliranjem, z meritvami seizmičnega šuma ali s primerjavo zapisov potresov na različnih tleh. V primeru, ko so na voljo bolj podrobni geološki podatki o plastoviti zgradbi podpovršja, lahko odziv tal pri različnih frekvencah izračunamo z modeliranjem. Večinoma se uporablja enodimenzionalno modeliranje, pri katerem predpostavimo vodoravno plastovitost. V zadnjem desetletju je razvoj računalnikov omogočil dvodimenzionalno modeliranje učinkov z upoštevanjem oblike podlage sedimentnih bazenov in topografije površja. Razvoj pa gre še naprej v smeri pravih tridimenzionalnih modelov. Z meritvami naravnega in umetnega seizmičnega šuma in analizo spektra navpične in vodoravnih komponent lahko neposredno merimo odziv tal pri različnih frekvencah, ne da bi podrobneje poznali zgradbo podpovršja. Povečanje amplitude nihanja tal (ojačenje) najbolj realno ocenimo s primerjavo zapisov potresov in njihovih spektrov na lokaciji, prekri s sedimenti, in na lokaciji, kjer podlaga teh sedimentov izdaja na površju. Redkeje se uporablja primerjava z zapisi seizmometra, nameščenega v vrtini, ki je dosegla podlago. Iz spektralnega razmerja med zapisi na površju sedimentov in tistimi na podlagi lahko izračunamo vpliv sedimentne plasti.

Eurocode 8

Preglednica 1. Vrste tal in faktor tal po Eurocode 8.

Vrsta tal faktor tal S	Opis stratigrafskega profila	Parametri		
		$v_{s,30}$ (m/s) (hitrost strižnega valovanja)	N_{SPT} (standardni penetracijski preizkus) (udarci / 30 cm)	c_u (strižna trdnost tal) (kPa)
A 1,0	Skala ali druga skali podobna geološka formacija, na kateri je največ 5 m slabšega površinskega materiala	>800	-	-
B 1,2	Sedimenti zelo gostega peska, proda ali zelo goste gline, debeli vsaj nekaj 10 m, v katerih se mehanske lastnosti izboljšujejo z globino	360-800	>50	>250
C 1,15	Globoki sedimenti gostega ali srednje gostega peska, proda ali zbite gline z debelino od nekaj 10 m do več 100 m	180-360	15-50	70-250
D 1,35	Sedimenti rahle do srednje nevezane (z ali brez posameznih mehkih vezanih plasti) ali večinoma mehke do trdne vezane zemljine	<180	<15	<70
E 1,4	Profil zemljine sestoji iz površinskega aluvija, ki ima vrednost $V_{s,30}$ tipa C ali D in debelino med 5 in 20 m pod tem pa leži trdnejši material z $V_{s,30} > 800$ m/s			
S_1 --	Sedimenti sestavljeni iz (ali pa vsebujejo plast debelo vsaj 10 m) mehkih glin/muljev z visoko vrednostjo plastičnosti ($PI > 40$) in veliko vsebnostjo vode	<100	-	10-20
S_2 --	Sedimenti zemljin in glin, dovzetnih za utekočinjenje ali katera koli druga zemljina, ki ni bila vključena v vrste tal od A do E ali S_1			

Table 1. Ground types in EC8.

Ground type Soil factor S	Description of stratigraphic profile	Parameters		
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT} (Standard Penetration Test) (blows/30cm)	c_u (kPa)
A 1.0	Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface	>800	-	-
B 1.2	Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface	360-800	>50	>250
C 1.15	Deep deposits of dense or medium - dense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of m	180-360	15-50	70-250
D 1.35	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil	<180	<15	<70
E 1.4	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with $V_{s,30}$ values of type C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with $V_{s,30} > 800$ m/s			
S_1 --	Deposits consisting – or containing a layer at least 10 m thick – of soft clays/silts with high plasticity index ($PI \geq 40$) and high water content	<100	-	10-20
S_2 --	Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A –E or S_1			

Z raziskavami na podlagi omenjenih metod so vpliv lokalnih tal na učinke potresa ocenili za nekatere značilne vrste tal in faktor tal predpisali v evropskem standardu EC8 (2003). EC8 določa sedem vrst temeljnih tal: A, B, C, D, E, S_1 in S_2 , ki so opisane s stratigrafskim profilom in tremi parametri: hitrost strižnega valovanja, rezultat standardnega penetracijskega preizkusa in strižna trdnost tal. Za vrste tal B, C, D in E je vpliv lokalnih tal na potresne učinke predpisan s faktorjem tal S glede na tla vrste A (preglednica 1). Za posebni vrsti tal S_1 in S_2 faktor tal ni podan in ga je potrebno določiti z raziskavami.

Povprečna hitrost strižnega valovanja $v_{s,30}$ je izračunana po enačbi

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}},$$

kjer h_i in v_i označujeta debelino (v metrih) in hitrost strižnega valovanja i -te formacije ali plasti, od skupno N , ki obstajajo v zgornjih 30 metrih. Vrsta tal na lokaciji je določena glede na vrednost $v_{s,30}$, če to ni mogoče, pa uporabimo vrednost standardnega penetracijskega preizkusa.

Klasifikacija tal MOL po EC8

Na območju Ljubljane se srečujemo z zelo različnimi seizmogeološkimi pogoji, od zelo dobrih na obrobju, kjer izdanjajo permski in karbonski peščenjaki in skrilavci, prek srednje dobrih na območju, ki ga prekrivajo prodni nanosi reke Save, do najslabših na območju, kjer so na površini barjanski sedimenti.

Geološko in litološko zgradbo Mestne občine Ljubljana smo povzeli po Osnovni geološki karti 1:100.000 (OGK 100), listi Kranj, Ljubljana, Postojna in Ribnica (Buser, 1965, 1969; Buser in sod., 1967; Grad in Ferjančič, 1968, 1974; Pleničar, 1963; Premru 1980, 1982). Območje občine je geološko precej razgibano: Ljubljansko polje je zapolnjeno s kvartarnimi sedimenti (konglomerat, prod, pesek), Ljubljansko barje v globini s prodom in peskom, na površini pa z jezerskimi sedimenti, obrobno hribovje pa v veliki meri sestavljajo permokarbonski skrilavi glinovci, peščenjaki in konglomerati ter mezozojske karbonatne kamnine. Ker so geološke karte (OGK 100) nastajale v daljšem časovnem obdobju, so metodološko zelo različne in jih težko primerjamo. Pri samem delu smo uporabili računalniške verzije omenjenih geoloških kart, ki jih je pripravil Geološki zavod Slovenije. Karti Ljubljana in Kranj imata med seboj usklajene robove, Postojno in Ribnico pa smo prilagodili za potrebe projekta.

Ob upoštevanju EC8 smo na podlagi geološke karte OGK 100 klasificirali kamnine, kot je navedeno v preglednici 2. Združevanje oziroma klasifikacijo tal smo naredili na digitaliziranih kartah OGK 100, ki jih je izdelal Geološki zavod Slovenije v letih 1997 do 2003. Ker je tiskana karta OGK narejena na slabi geodetski podlagi, je tudi njena natančnost v digitalni obliki slabša. Zato smo se odločili, da bomo na končni karti privzeli natančnost tematskega sloja 50 m.

Preglednica 2. Klasifikacija tal na podlagi OGK 100 in EC8.

Litostratigrafska enota	Starost	OGK list	vrsta tal EC8
nanosi rek in potokov	Hc	Kranj	C
melišča	Hc	Kranj	D
deluvij	Hc	Kranj	D
jezerski in barjanski sedimenti	Q ₁ , Q ₂	Kranj	S ₁ , E
prod, pesek – prodni zasip	Q ₁	Kranj	C
konglomerat, slabo sprijet prod, glina - konglomeratni zasipi	Q ₁	Kranj	C
glinast lapor, plastovit apnenec, apnenčeva breča	K _{1,2}	Kranj	A
debeloskladovit apnenec, dolomitiziran apnenec, ponekod dolomit	T ₃ , J	Kranj	A
plastovit in pasovit dolomit, redko apnenec - glavni dolomit	T ₃ ²⁺³	Kranj	A
pisan peščenjak, argilit, tufit, apnenec, ponekod z rožencem	T ₃ ¹	Kranj	A
svetlo siv neplastovit apnenec	² T ₂ ²	Kranj	A
neplastovit dolomit	T ₂	Kranj	A
laporni apnenec, dolomit, peščen skrilavec, oolitni apnenec	T ₁	Kranj	A
groedenski skladi - rdeč peščenjak, meljevec, prehodi v skrilavec in konglomerat	P ₂ ²	Kranj	A

Litostratigrafska enota	Starost	OGK list	vrsta tal EC8
glinast skrilavec, meljevec, peščenjak in konglomerat	C, P	Kranj	A
aluvij v splošnem	Q	Ljubljana	C
proluvij-vršaj in spralina s pobočij	Q	Ljubljana	C
deluvij-ilovica in jerina	Q	Ljubljana	D
glinast prod, peščena glina in glina	Q	Ljubljana	D
glina in peščena glina	Q	Ljubljana	D
mlajši prodni zasip	Q	Ljubljana	C
konglomerat, peščenjak, lapor, glina, apnenec	Ol ₂	Ljubljana	D
fliš: glinasti skrilavec, lapor, peščenjak, breča, konglomerat	K _{1,2}	Ljubljana	A
apnenec	T, J	Ljubljana	A
apnenec, dolomit, glinasti skrilavec, oolit in tuf	T ₃ ¹	Ljubljana	A
dolomit	T ₂ ²	Ljubljana	A
lapor, meljevec, skrilavec, apnenec, roženec, dolomit, tuf in tufit	T ₂ ^{1,2}	Ljubljana	A
dolomit, lapor, apnenec, oolit, skrilavec, meljevec in peščenjak	T ₁	Ljubljana	A
peščenjak, meljevec, skrilavec	P ₂	Ljubljana	A
peščenjak, meljevec, skrilavec z vložki dolomita	P ₂	Ljubljana	A
peščenjak, meljevec, skrilavec in konglomerat	C, P	Ljubljana	A
glinasti skrilavec	C, P	Ljubljana	A
kremenov peščenjak	C, P	Ljubljana	A
kremenov konglomerat	C, P	Ljubljana	A
jezerski in barjanski sedimenti	Hc	Ribnica	S ₁ , E
pasast in zrnat dolomit	T ₃ ²⁺³	Ribnica	A
glinavec, peščenjak, breča, ooliten boksit, tuf; v zgornjem delu dolomit s plastmi laporja	T ₃ ¹	Ribnica	A
svetlo siv apnenec	² T ₂ ²	Ribnica	A
bel zrnat dolomit z vložki apnenca	² T ₂ ²	Ribnica	A
belo siv dolomit	T ₂ ¹	Ribnica	A
dolomit s plastmi sljudnatega skrilavca; skrilavec in peščenjak z oolitnim apnencem	T ₁	Ribnica	A
rdeč peščenjak, argilit in meljevec	P ₂ ²	Ribnica	A
glinast skrilavec, peščenjak in konglomerat	C, P	Ribnica	A
jezerski in barjanski sedimenti	Q ₁ , Q ₂	Postojna	S ₁

Table 2. Classification of soil according to OGK (Basic Geological Map of SFRY 1:100000) and EC8 ground types.

Lithostratigraphic unit	Age	OGK sheet	Ground type EC8
Alluvium: river and stream deposits	Q ₂	Kranj	C
Scree (talus)	Q ₂	Kranj	D
Deluvium	Q ₂	Kranj	D

Lithostratigraphic unit	Age	OGK sheet	Ground type EC8
Lacustrine and paludal deposits	Q ₁ , Q ₂	Kranj	S ₁ , E
Gravel, sand – gravel dams	Q ₁	Kranj	C
Conglomerate, weakly cemented gravel, clay - conglomerate dams	Q ₁	Kranj	C
Clay marl, stratified limestone, limestone breccia	K _{1,2}	Kranj	A
Thick-bedded limestone, dolomitized limestone, partly dolomite	T ₃ , J	Kranj	A
Bedded and banded dolomite, rarely limestone	T ₃ ²⁺³	Kranj	A
Variegated sandstone, argillite, tuffite, limestone, partly with chert	T ₃ ¹	Kranj	A
Light - grey unstratified limestone	2 T ₂ ²	Kranj	A
Unstratified dolomite	T ₂	Kranj	A
Marly limestone, dolomite, sandy schists, oolitic limestone	T ₁	Kranj	A
Groeden layers - red sandstones, aleurolites, schist and conglomerate	P ₂ ²	Kranj	A
Clay schist, aleurolite, sandstone and conglomerate	C, P	Kranj	A
Alluvium in general	Q	Ljubljana	C
Proluvium: fan, talus slope	Q	Ljubljana	C
Deluvium: loam and terra rossa	Q	Ljubljana	D
Clay gravel, sandy clay and clay	Q	Ljubljana	D
Clay and sandy clay	Q	Ljubljana	D
Younger gravel dam	Q	Ljubljana	C
Conglomerate, sandstone, marl, clay and limestone	Ol ₂	Ljubljana	D
Flysch: clay shale, marl, sandstone, brecciaconglomerate	K _{1,2}	Ljubljana	A
Limestone	T, J	Ljubljana	A
Limestone, dolomite, clay shale, oolite and tuff	T ₃ ¹	Ljubljana	A
Dolomite	T ₂ ²	Ljubljana	A
Marl, siltstone, shale, limestone, chert, dolomite, tuff and tuffite	T ₂ ^{1,2}	Ljubljana	A
Dolomite, marly limestone, oolite, shale siltstone and sandstone	T ₁	Ljubljana	A
Sandstone, siltstone, shale	P ₂	Ljubljana	A
Sandstone, siltstone, shale with interbeds dolomite	P ₂	Ljubljana	A
Sandstone, siltstone, shale and conglomerate	C, P	Ljubljana	A
Clay shale	C, P	Ljubljana	A
Quartz sandstone	C, P	Ljubljana	A
Quartz conglomerate	C, P	Ljubljana	A
Lacustrine and paludal deposits	Q ₂	Ribnica	S ₁ , E
Banded and grained dolomite	T ₃ ²⁺³	Ribnica	A
Argillite, sandstone, breccia, oolitic bauxite, tuff; in the upper part dolomite with beds of marl	T ₃ ¹	Ribnica	A
Light-grey limestone	2 T ₂ ²	Ribnica	A
White grained dolomite with limestone intercalations	2 T ₂ ²	Ribnica	A
White-grey dolomite	T ₂ ¹	Ribnica	A

Lithostratigraphic unit	Age	OGK sheet	Ground type EC8
Dolomite with micaceous slate; slate and sandstone with oolitic limestone	T ₁	Ribnica	A
Red sandstone, argillite and alevrollite	P ₂ ²	Ribnica	A
Clay schist, aleurolite, sandstone and conglomerate	C, P	Ribnica	A
Lacustrine and paludal deposits	Q ₁ , Q ₂	Postojna	S ₁

Mikrorajonizacija tal na območju MOL temelji na uporabi obstoječih geoloških, geofizikalnih in seizmoloških podatkov, ki so bili večinoma pridobljeni za druge namene ali pa za uporabo drugačne metode izračuna prirastkov intenzitete. Obsežna zbirka podatkov je nastala z raziskavami »Seizmična mikrorajonizacija Ljubljane«, ki so potekale od leta 1960 do 1971 in so zajele ožje območje mesta Ljubljana (manjši del današnje Mestne občine Ljubljana). V okviru te dolgoletne naloge so v več poročilih raznih avtorjev zbrali mnoge podatke iz plitvih vrtin, gradbenih razkopov, geofizikalnih meritev ter hidrogeološke podatke. Za nas so bili predvsem zanimivi podatki meritev plitve refrakcijske seizmike, ki jih je izvedel Geološki zavod Ljubljana v letih 1969-70 (Lapajne, 1970). V okviru teh raziskav so izmerili 441 refrakcijskih seizmičnih profilov z registracijo vzdolžnih (longitudinalnih) valov v_p in 70 geoelektričnih sond. Za izračun prirastkov seizmične stopnje (prirastek intenzitete) so uporabili metodo Medvedeva (1965). Na žalost so od študije leta 1971 ohranjene le karte z vrednostmi prirastkov za privzeti globini 10 in 20 m in izrisane izolinije, ne pa tudi rezultati refrakcijskih meritev (seizmične hitrosti in debeline plasti). Zato smo se odločili, da bo mikrorajonizacija slonela predvsem na litoloških lastnostih enot, v manjši meri pa pa so nam pomagale tudi iz seizmičnih prirastkov izračunane hitrosti v_s . Za natančnejšo in boljšo mikrorajonizacijo bi vsekakor potrebovali več meritev hitrosti strižnega valovanja.

Določitev faktorja tal za območje Ljubljanskega barja

Večina tal na območju MOL spada v vrste A, C, D in E. Južno obrobje Ljubljane pa leži na jezerskih in barjanskih sedimentih, ki po EC8 spadajo v vrsto tal S₁, zato smo faktor tal določili s posebno raziskavo. Za analizo vpliva lokalnih tal na odziv med potresom smo uporabili računalniški program Shake oz. Shake 91 (Schnabel in sod., 1972; Idriss in Sun, 1992). Program računa odziv za poljuben paket vodoravnih, idealizirano neomejenih plasti (1D modeliranje) na strižno valovanje, ki izhaja navpično iz skalnate podlage - polprostora pod podanimi plastmi. Vsaka plast je določena z vrednostmi geomehanskih parametrov (strižni modul oz. hitrost strižnega valovanja, faktor dušenja, gostota in debelina). Strižno valovanje podamo z vhodnim akceleroگرامom, kjer so vrednosti pospeška zapisane v enakomernih časovnih intervalih.

Izbrali smo tri lokacije na južnem delu Ljubljane, ki ležijo na jezerskih in barjanskih usedlinah: Mestni log – Mali graben (ML), Pot na Rakovo jelšo (RJ) in Športni park Svoboda (PS). Za določitev sestave tal na teh lokacijah smo uporabili podatke iz literature. Uporabili smo predvsem podatke iz plitvih vrtin in gradbenih razkopov, ki so bili zbrani v raziskavi »Seizmična mikrorajonizacija Ljubljane« od leta 1960 do 1971. Podatke o geomehanskih in geofizikalnih lastnostih tal smo povzeli tudi iz naloge »Geofizikalne raziskave lokacij monitoringa močnih potresov na območju mesta Ljubljane« (Živanović in Stopar, 1995).

Za izbrane tri lokacije (ML, RJ in PS) smo določili geomehanske profile, t.j. parametre, ki jih zahteva program Shake (preglednica 3). Oznake CL (glina / clay), S (pesek / sand) in R (kamnina / rock) pomenijo vrsto materiala, za katerega so uporabljene dinamične relacije.

Preglednica 3. Geomehanski profili izbranih lokacij na Ljubljanskem barju.

Table 3. Geotechnical profiles for three selected locations on the Ljubljansko barje.

tip	globina [m]	debelina [m]	v_s [m/s]	ρ [g/cm ³]
type	depth [m]	thickness [m]	v_s [m/s]	ρ [g/cm ³]
Mestni log - Mali graben				
CL	0	3	100	1.3
CL	3	13	180	1.6
S	16	64	700	1.7
R	80		2000	2.2
Pot na Rakovo jelšo				
CL	0	3	110	1.3
CL	3	10	370	1.5
CL	13	15	550	1.6
CL	28	2	370	1.5
S	30	30	550	1.6
R	60		2000	2.2
Športni park Svoboda				
CL	0	2	110	1.5
CL	2	14	180	1.6
S	16	74	1000	1.8
R	90		2000	2.2

Akceleroگرامи

Za izračun odziva tal potrebujemo akceleroگرام, s katerim simuliramo gibanje tal na skalnati podlagi pod navedenimi plastmi opazovane lokacije. Idealni akceleroگرام za vzbujanje je zapis močnega potresa, ki je nastal blizu potresne opazovalnice. Zaželeno je, da je opazovalnica na trdnih tleh, saj le tako dobimo verodostojne podatke o pomikih tal med potresom. Če tla niso trdna, lahko pride do močnih ojačitev posameznih frekvenc potresa, ki v akceleroگرامu povzročijo vrhove. V programu Shake potrebujemo akceleroگرام po ničelni korekciji in korekciji zaradi vpliva inštrumenta na zapis potresa, ne smemo pa odstraniti seizmičnega šuma.

Za analizo odziva tal smo izbrali štiri zapise potresov z dvema vodoravnima komponentama. Osnovne lastnosti izbranih akceleroگرامov in potresov so opisane v preglednici 4. Podana je tudi največja vrednost pospeška tal (PGA – peak ground acceleration), vzorčna frekvenca DT , magnituda M , razdalja med nadžariščem in opazovalnico R ter odsek originalnega akceleroگرامa, ki je bil uporabljen pri izračunu tal. Zaradi omejitve števila opazovanj n (točk akceleroگرامa) v programih je bilo namreč potrebno večino zapisov skrajšati. Akceleroگرامi

so zbrani v Slovenski bazi močnih potresov (SSMD) (Fajfar in Lapajne, 2000) in v Evropski bazi močnih potresov (ESMD) (Ambraseys in sod., 2000) ter v arhivu ARSO.

Preglednica 4. Osnovni podatki o akceleroگرامih in potresih.

Table 4. Basic data about accelerograms and recorded earthquakes.

opazovalnica	E opazovalnica	N opazovalnica	potres	datum	E potres	N potres	M	R [km]
station	E station	N station	earthquake	date	E earthquake	N earthquake	M	R [km]
Lepena	13,677	46,308	Krn aft.	06.05.98	13,696	46,280	4,4	3,4
Valle	13,394	46,158	Krn	12.04.98	13,632	46,309	5,7	24,9
Ljubljana, Golovec	14,528	46,044	Trebnje	31.08.98	14,875	45,929	4,2	29,6
Tolmezzo	12,982	46,382	Furlanija	06.05.76	13,320	46,320	6,5	26,9

opazovalnica	komp.	DT [s]	n	čas [s]	vir	odsek	PGA [g]	inštrument
station	comp.	DT [s]	n	time [s]	source	section	PGA [g]	instrument
Lepena	EW NS	0,004	3751	15	SSMD	10 s-25 s	0,115 0,311	Kinematics ETNA
Valle	EW NS	0,008	4087	32,688	ESMD	10s-42,7s	0,025 0,024	GURALP CMG-5T
Ljubljana	EW NS	0,005	4061	20,3	ARSO	9,7s-29,7s	0,005 0,005	Kinematics SSR-1
Tolmezzo	EW NS	0,02	752	15,04	ESMD	ves	0,315 0,348	RFT-250

Faktor tal na Ljubljanskem barju

Na izbranih treh lokacijah Ljubljanskega barja (ML, PS, RJ) smo s programom Shake izračunali odziv tal na 8 akceleroگرامov (4 opazovalnice, obe vodoravni komponenti): opazovalnica v Tolmezzu je zapisala furlanski potres (1976), opazovalnica v Ljubljani potres v Trebnjem (1998), opazovalnica Valle je zapisala krnski potres (1998), v Lepeni pa njegov popotres.

Na vsak akceleroگرام smo izračunali štiri odzive tal glede na štiri različne nivoje normiranja. Največji pospešek tal vhodnega akcelerograma smo normirali na 0,1 g, 0,25 g (kar v Ljubljani ustreza povratni dobi 475 let), 0,3 g (1000 let) ali pa 0,55 g (10,000 let). Za vsako od štirih normiranj smo izračunali faktor tal kot razmerje med največjim vhodnim in izhodnim pospeškom tal, nato pa še povprečno vrednost faktorja tal ter njegovo mediano (srednjo vrednost) glede na osem vhodnih akceleroگرامov. Razlike med akceleroگرامi so precejšnje, zato je prav, da jih v izračunu upoštevamo več. Končna vrednost faktorja tal za Ljubljansko barje je povprečna vrednost treh median vseh treh lokacij. V preglednici 5 je prikazan največji izhodni pospešek tal ter pripadajoč faktor tal za vse tri lokacije in vsa štiri normiranja (največji vhodni pospešek).

Preglednica 5. Največji vhodni in izhodni pospešek tal ter faktor tal na treh lokacijah Ljubljanskega barja. Odziv tal je izračunan z normiranimi zapisi obeh vodoravnih komponent štirih potresnih opazovalnic.

Table 5. Maximum input and output ground acceleration and soil factor for three locations on Ljubljansko barje. Ground response on normalised horizontal components is calculated from four seismic stations.

Mestni log								
	pospešek tal (acceleration) [g]				FAKTOR TAL za PGA (PGA SOIL FACTOR)			
normiran akceleroگرام		475 let	1000 let	10000 let		475 let	1000 let	10000 let
	0.1	0.25	0.3	0.55				
normalised accelerogram		475 years	1000 y.	10000 y.		475 years	1000 y.	10000 y.
	0.1	0.25	0.3	0.55				
TOEW	0.438	0.928	1.09	1.71	4.38	3.71	3.63	3.11
TONS	0.352	0.692	0.8	1.157	3.52	2.77	2.67	2.10
LJNS	0.439	0.819	0.933	1.364	4.39	3.28	3.11	2.48
LJEW	0.329	0.686	0.796	1.274	3.29	2.74	2.65	2.32
VAEW	0.305	0.677	0.776	1.175	3.05	2.71	2.59	2.14
VANS	0.298	0.519	0.578	0.905	2.98	2.08	1.93	1.65
LEEW	0.218	0.383	0.429	0.741	2.18	1.53	1.43	1.35
LENS	0.233	0.446	0.488	0.78	2.33	1.78	1.63	1.42
Povprečje (average):					3.27	2.58	2.45	2.07
Mediana (median):					3.17	2.73	2.62	2.12

Športni park Svoboda								
	pospešek tal (acceleration) [g]				FAKTOR TAL za PGA (PGA SOIL FACTOR)			
normiran akceleroگرام		475 let	1000 let	10000 let		475 let	1000 let	10000 let
	0.1	0.25	0.3	0.55				
normalised accelerogram		475 years	1000 y.	10000 y.		475 years	1000 y.	10000 y.
	0.1	0.25	0.3	0.55				
TOEW	0.361	0.828	0.966	1.569	3.61	3.31	3.22	2.85
TONS	0.341	0.676	0.751	1.053	3.41	2.70	2.50	1.91
LJNS	0.27	0.568	0.655	0.998	2.70	2.27	2.18	1.81
LJEW	0.265	0.511	0.587	0.929	2.65	2.04	1.96	1.69
VAEW	0.249	0.496	0.595	0.924	2.49	1.98	1.98	1.68
VANS	0.23	0.49	0.567	0.861	2.30	1.96	1.89	1.57
LEEW	0.318	0.625	0.703	0.92	3.18	2.50	2.34	1.67
LENS	0.316	0.62	0.699	0.975	3.16	2.48	2.33	1.77
Povprečje (average):					3.27	2.58	2.45	2.07
Mediana (median):					3.17	2.73	2.62	2.12

Pot na Rakovo jelšo								
	pospešek tal (acceleration) [g]				FAKTOR TAL za PGA (PGA SOIL FACTOR)			
normiran akcelrogram		475 let	1000 let	10000 let		475 let	1000 let	10000 let
	0.1	0.25	0.3	0.55				
normalised accelerogram		475 years	1000 y.	10000 y.		475 years	1000 y.	10000 y.
	0.1	0.25	0.3	0.55				
TOEW TONS	0.293 0.316	0.653 0.605	0.718 0.707	1.017 0.993	2.93 3.16	2.61 2.42	2.39 2.36	1.85 1.81
LJNS LJEW	0.435 0.428	1.035 0.951	1.246 1.096	1.954 1.752	4.35 4.28	4.14 3.80	4.15 3.65	3.55 3.19
VAEW VANS	0.384 0.325	0.768 0.617	0.856 0.72	1.332 1.318	3.84 3.25	3.07 2.47	2.85 2.40	2.42 2.40
LEEW LENS	0.283 0.268	0.546 0.573	0.604 0.664	0.867 1.039	2.83 2.68	2.18 2.29	2.01 2.21	1.58 1.89
Povprečje (average): Mediana (median):					3.42 3.21	2.87 2.54	2.75 2.40	2.33 2.14
povprečje treh povprečij (average of three averages):					3.21	2.62	2.50	2.09
Končni faktor tal za PGA je povprečje treh median: Final soil factor is an average of three medians:					3.10	2.55	2.42	2.00

Potresna mikrorajonizacija MOL

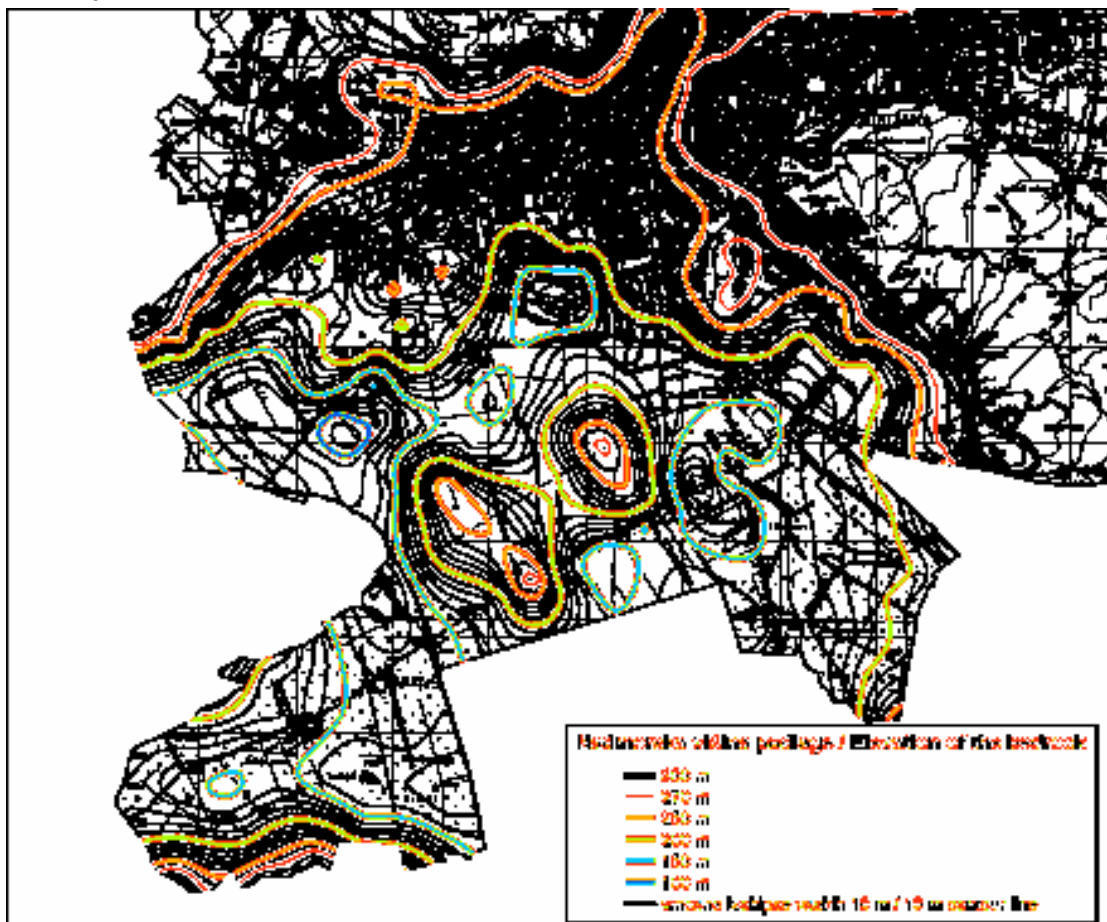
Poenotena karta tal na območju MOL

Večino tal na območju MOL smo uvrstili v vrsto A, C, D ali E. Jezerski sedimenti Ljubljanskega barja spadajo v vrsto tal S₁, kar smo posebej opisali. Severno obrobje Ljubljanskega barja smo obravnavali kot posebno enoto in jo uvrstili v vrsto tal E zaradi literarnih podatkov o globini do podlage (Mencej, 1989; Prestor, 1988). Podlago v tem primeru sestavljajo skrilavi glinavci, peščenjaki in konglomerati permokarbonske starosti (ocenjene hitrosti v_s so 2000 m/s). Vrednosti globine do podlage smo interpolirali in zrisali karto izohips podlage (slika 3). EC8 za tla vrste E predvideva do 20 m slabšega materiala, pod njim pa leži trdnější material. Na severnem robu Ljubljanskega barja je povprečna nadmorska višina površja približno 290 m, zato smo upoštevali izohipso podlage 270 m in z njo omejili območje vrste tal E.

Faktor tal za vrste A, C, D in E je določen v EC8, faktor tal za vrsto S₁ pa smo ocenili sami. Poenotena karta tal MOL s pripadajočim faktorjem tal je prikazana na sliki 4.

Temeljna karta potresne nevarnosti Slovenije je karta projektnega pospeška tal za povratno dobo 475 let, ki je izdelana v skladu z zahtevami evropskega standarda EC8. Uporablja se skupaj s slovenskim predstandardom EC8 – Projektiranje potresno odpornih konstrukcij, ki ga je izdal Slovenski inštitut za standardizacijo (2001). Slovenski predstandard EC8, Karta

projektne pospeška tal in Tolmač skupaj dopolnjujejo predpise o potresno odporni gradnji v Sloveniji.



Slika 3. Nadomska višina podlage (permokarbonski glinovci in peščenjaki, triasni in jurski apnenci in dolomiti) pod Ljubljanskim barjem. Podatki so povzeti po Menceju (1989) in Prestorju (1988).

Figure 3. The elevation of the bedrock (Carboniferous-Permian shale and sandstone, Triassic and Jurassic limestone and dolomite) under the Ljubljansko barje (after Mencej, 1989, and Prestor, 1988).

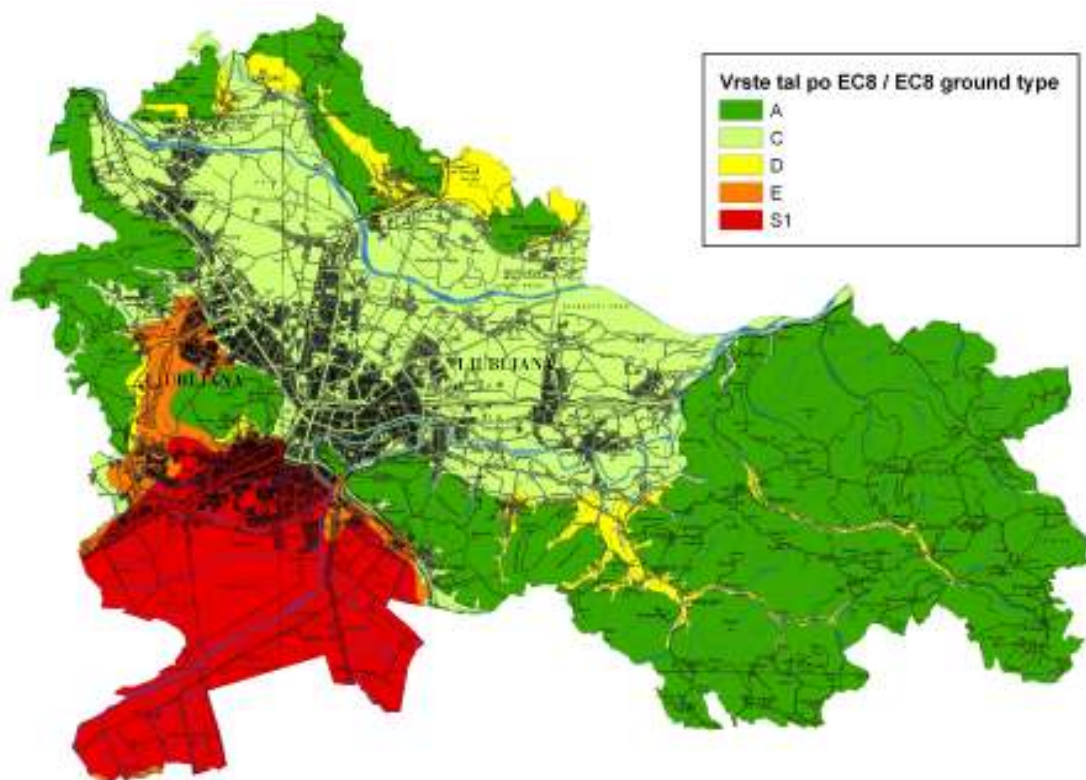
Projektni pospešek tal na trdnih tleh

Karta projektne pospeška tal ima na območju Mestne občine Ljubljana tri različne vrednosti. Severozahodni del občine spada v območje, kjer so ocenjeni pospeški do 0,250 g, vzhodneje pa sta cona s pospeški do 0,225 g in 0,200 g. Omenjeni pospeški so izračunani za trdna tla, ki so definirana kot skala ali druga geološka formacija z največ 5 metrov slabšega površinskega materiala.

Faktor za različne povratne dobe

V EC8 je priporočena povratna doba 475 let, kar ustreza verjetnosti 90 %, da vrednosti projektne pospeška tal v 50 letih ne bodo presežene. Privzeto je, da je 50 let predvidena življenjska doba običajnih objektov, medtem ko za objekte posebne pomembnosti (npr. zdravstvene ustanove, šole, vrtci,...) zahtevamo izračun nevarnosti za povratno dobo 1000 let ali (npr. za jedrske objekte) celo 10000 let. Povprečno razmerje med projektnim pospeškom

tal na karti Slovenije za povratno dobo 1000 (oz. 10000) let in 475 let je 1,25 (oz. 2,50), kar privzamemo za faktor ustrezne povratne dobe.



Slika 4. Klasifikacija tal po EC8
Figure 4. Map of EC8 ground types

Karta potresne mikrorajonizacije

Končne vrednosti pospeška tal na območju MOL so zaokroženi zmnožki projektnega pospeška tal na trdnih tleh z ustreznim faktorjem tal in faktorjem povratne dobe. Vrednosti so prikazane v preglednici 6 in na slikah 5a in 5b.

Sklep

Na podlagi klasifikacije tal, evropskega standarda EC8 ter Karte potresne nevarnosti Slovenije smo izdelali karto potresne mikrorajonizacije Mestne občine Ljubljana.

Po EC8 so tla razvrščena glede na geomehanske lastnosti, predvsem glede na hitrost strižnega valovanja v vrhnjih 30 m tal. Ker so neposredni podatki o strižnih hitrostih na območju MOL zelo redki, smo v izračunih uporabili podatke iz nekaterih drugih raziskav in iz njih posredno izračunali želene parametre. Tla smo klasificirali na podlagi geološke karte OGK 100. Združevanje tal smo naredili na digitaliziranih kartah OGK 100. Upoštevali smo napako digitalizacije ter slabo geodetsko podlago originalnih OGK 100 in se odločili, da bomo na končni karti privzeli natančnost tematskega sloja 50 m.

Faktor tal smo določili po EC8, za območje Ljubljanskega barja pa smo izvedli posebno raziskavo. Tla na območju MOL smo razdelili v pet območij z ustreznim faktorjem tal:

- vrsta tal A: faktor tal 1,00;
- vrsta tal C: faktor tal 1,15;
- vrsta tal D: faktor tal 1,35;
- vrsta tal E: faktor tal 1,40;
- vrsta tal S₁: faktor tal 2,55.

Preglednica 6. Faktor tal, faktor povratne dobe in končne vrednosti pospeška tal.

Table 6. Soil factor, return period factor and final ground acceleration values.

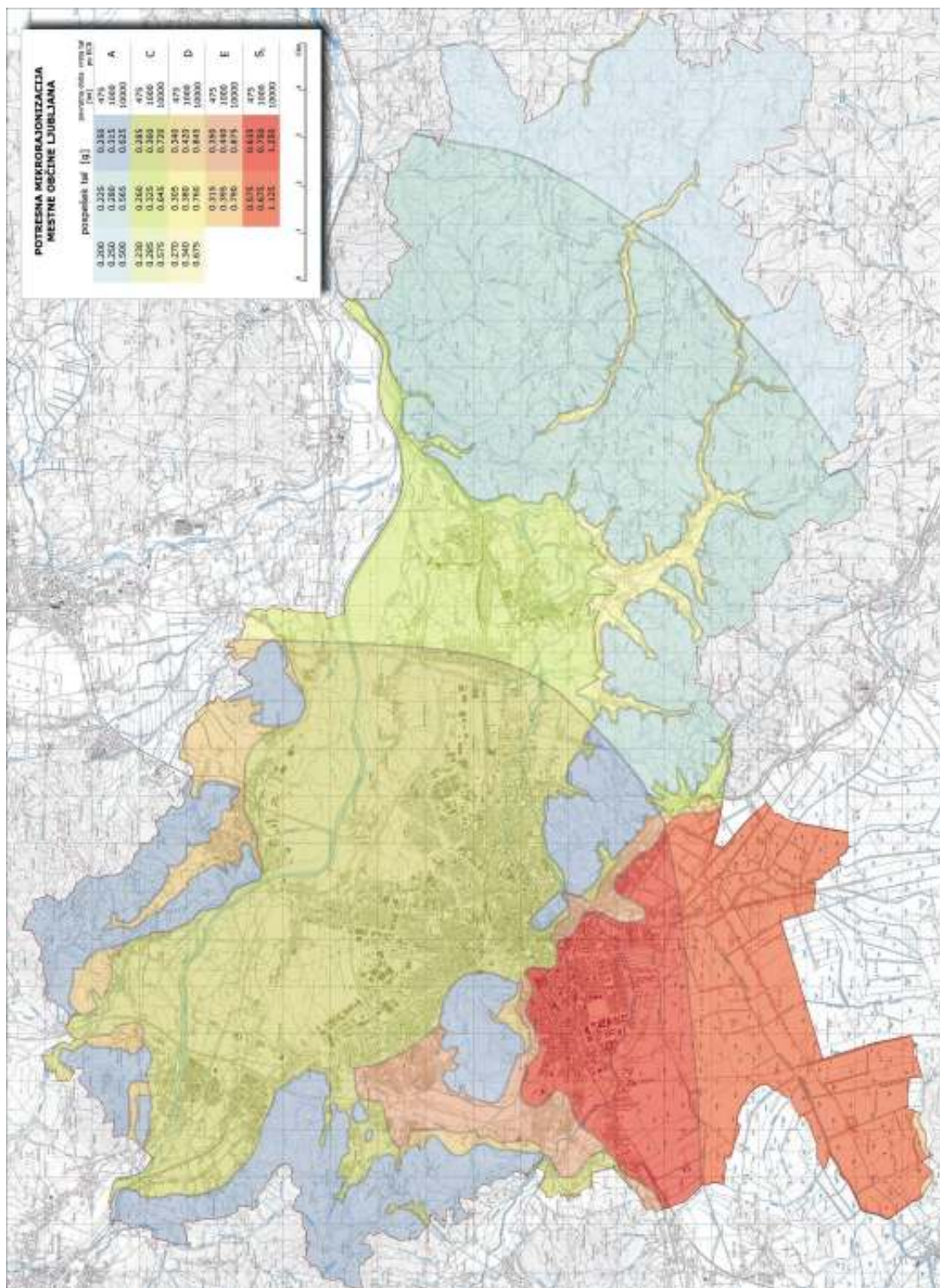
vrsta tal ground type	faktor tal soil factor	faktor povratne dobe return period factor	projektni pospešek tal na skali [g] design ground acceleration on rock [g]		
			0.250	0.225	0.200
			POSPEŠEK TAL [g] GROUND ACCELERATION [g]		
A	1.00	475 let, years	0.250	0.225	0.200
C	1.15		0.285	0.260	0.230
D	1.35	1.00	0.340	0.305	0.270
E	1.40		0.350	0.315	0.280
S ₁	2.55		0.635	0.575	0.510
A	1.00	1000 let, years	0.315	0.280	0.250
C	1.15		0.360	0.325	0.285
D	1.35	1.25	0.420	0.380	0.340
E	1.40		0.440	0.395	0.350
S ₁	2.40		0.750	0.675	0.600
A	1.00	10000 let, years	0.625	0.565	0.500
C	1.15		0.720	0.645	0.575
D	1.35	2.50	0.845	0.760	0.675
E	1.40		0.875	0.790	0.700
S ₁	2.00		1.250	1.125	1.000

Glede na povratno dobo smo upoštevali naslednji faktor:

- povratna doba 475 let: faktor 1,0;
- povratna doba 1000 let: faktor 1,25;
- povratna doba 10.000 let: faktor 2,50.

Potresno mikrorajonizacijo smo predstavili s karto pospeška tal (*PGA*) in je namenjena za izključno uporabo v sistemu varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami. Poleg pospeška tal je vpliv lokalnih tal pomemben tudi pri spektralnih vrednostih pospeška oz. hitrosti, predvsem ko nas zanimajo določene vrste objektov. Za potrebe projektiranja ali ko preučujemo potresno varnost že zgrajenega objekta, pa je potrebno natančneje analizirati njegovo lokacijo.

Mikrorajonizacija območja MOL temelji na uporabi obstoječih geoloških, geofizikalnih in seizmoloških podatkov, ki so bili večinoma pridobljeni za druge namene ali pa za uporabo drugačne metode izračuna prirastkov intenzitete (študija iz let 1960 - 1971). Za natančnejšo in boljšo mikrorajonizacijo bi potrebovali več meritev hitrosti strižnega valovanja na območju MOL. V zadnjih tridesetih letih so metode potresne rajonizacije zelo napredovale, ker je v seizmologiji in potresnem inženirstvu vedno bolj prevladovalo spoznanje o pomembnosti



Slika 5b. Karta potresne mikrorajonizacije na območju Mestne občine Ljubljana. Območja PGA so prikazana glede na vrste tal.

Figure 5b. Seismic microzonation map of the Municipality of Ljubljana. The PGA values are shown with respect to the ground type.

V okviru UNESCO-vega projekta Mednarodnega geološkega korelacijskega programa (IGCP) z naslovom Realistično modeliranje potresne nevarnosti v velemestih in velikih urbanih

območjih (IGCP 414) smo osvojili eno od trenutno vodilnih numeričnih metod za modeliranje lokalnega valovnega polja. Gre za hibridno metodo, ki združuje sumacijo modov za enodimenzionalni regionalni model in metodo končnih elementov za dvodimenzionalni model sedimentnega bazena. Zaradi zelo izrazite topografije skalne podlage sedimentov Ljubljanskega barja in njihove heterogenosti, lahko namreč za potresne izvore, ki ležijo južno od Ljubljane, pričakujemo velik vpliv tega bazena na potresne valove (Gosar in sod., 1999). S to metodo bi lahko izračunali tudi vpliv na drugih območjih MOL (Ljubljansko polje), vendar ne poznamo dovolj dobro geološke podlage pod sedimenti in bi zato potrebovali dodatne geofizikalne raziskave (npr. refrakcijska seizmika).

Neposredno oceno vpliva lokalnih tal lahko dobimo s primerjavo zapisov potresov, zabeleženih na lokaciji, prekrti s sedimenti, z zapisom na skalni podlagi doseženi v vrtini, kar je redko izvedljivo, ali z zapisom na čim bližji točki, kjer se skalna podlaga nahaja na površju. Če primerjamo zapise dovolj oddaljenih potresov, lahko majhno razliko v poti zanemarimo. Manjša študija (Gosar in Živčič, 1998) ojačenja nihanja tal zaradi vpliva lokalnih tal je bila izvedena leta 1998 s primerjavo zapisov močnejših regionalnih potresov v Grčiji in Italiji, zapisanih na dveh potresnih opazovalnicah na Rakovi jelši (barjanski sedimenti) in observatoriju na Golovcu (permokarbonski skrilavci, peščenjaki in konglomerati). Pomanjkljivost te sicer zelo zanesljive metode je, da moramo postaviti akceleroграfe na različne lokacije za daljši čas in čakati na primerne zapise potresov. Zato bi bilo smiselno, da bi v prihodnosti postavili več stalnih opazovalnic za močne potrese na različnih geoloških podlagah na širšem območju mesta Ljubljana.

V zadnjih 15-ih letih so se zelo uveljavile analize seizmičnega nemira (mikrotremorjev), predvsem Nakamura metoda razmerja spektrov zapisa vodoravne in navpične komponente, ki je povezana s spektrom ojačenja tal. Čeprav je fizikalno ozadje metode nekoliko nejasno in predmet številnih diskusij, je uspešnost metode pri določanju frekvenčnih območij ojačenja dokazana, bolj vprašljivi pa so sami koeficienti ojačenja. Metodo smo uspešno uporabili pri študiji, ki smo jo opravili po potresu leta 1998 v Posočju (Gosar, 1999; Gosar in sod., 2000). Prednost metode so predvsem relativno enostavne in kratkotrajne meritve, ki ne zahtevajo trajnejše postavitve inštrumentov, zato bi bila zelo primerna tudi za območje MOL.

Za izračun vpliva lokalnih tal je še vedno najbolj razširjeno enodimenzionalno modeliranje s programi, kot je Shake (Idriss in Sun, 1992), pri čemer je sestava tal podana s paketom vodoravnih plasti z različnimi fizikalnimi lastnostmi. Ključni so dobri vhodni podatki, ki zahtevajo geofizikalne raziskave, predvsem z metodo refrakcijske seizmike in meritvami hitrosti seizmičnih valov v vrtinah. Na območju Ljubljane je bilo nekaj takšnih raziskav opravljenih za izbor lokacij monitoringa močnih potresov (Živanović in Stopar, 1995), vendar bi za boljšo mikrorajonizacijo vsekakor potrebovali več takšnih meritev.

Pri nadaljnjih študijah za izboljšanje mikrorajonizacije območja Ljubljane bi bilo koristno uporabiti večino od opisanih metod v ustreznem razmerju. S tem bi namreč močno zmanjšali nezanesljivost ocen in pomanjkljivost posameznih metod, obenem pa bi ostali stroški študije dovolj nizki.

Literatura

- Ambraseys N., Smit P., Berardi R., Rinaldis D., Cotton F., Berge-Thierry C., 2000: ESMD, European Strong Motion Database, 2000: Dissemination of European Strong Motion Data. CD-ROM collection. European Council, Environment and Climate Research. (<http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/>)
- Buser, S., 1965: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, Tolmač lista Ribnica. Zvezni geološki zavod, 60 str., Beograd.
- Buser, S., 1969: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, list Ribnica. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Buser, S., Grad, K., Pleničar, M., 1967: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, list Postojna. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Eurocode 8, 2001: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – Del 1-1: Splošna pravila – Potresna obtežba in splošne zahteve za konstrukcije (SIST ENV 1998-1-1) in 5. del: Projektiranje konstrukcij na potresnih področjih: Temelji, oporne konstrukcije in geotehnični vidiki (SIST ENV 1998-5), Slovenski inštitut za standardizacijo.
- Eurocode 8, 2003: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (Draft No. 6, Version for translation, January 2003), European Committee for Standardization.
- Fajfar P., Lapajne J., 2000: Projektni parametri za potresno odporno projektiranje gradbenih objektov po EUROCODE 8, Vzpostavitev baze podatkov močnejših potresov v Sloveniji. Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo in Uprava RS za geofiziko, Ljubljana.
- Gosar, A., Živčič, M., 1998: Ojačanje nihanja tal zaradi lokalne geološke zgradbe na južnem obrobju Ljubljane (Rakova jelša). Potresi v letu 1997, 59-66, MOP - Uprava RS za geofiziko, Ljubljana.
- Gosar, A., 1999: Rezultati raziskav o vplivih lokalne geološke zgradbe na poškodbe objektov (Potres 12. aprila 1998 v Krnskem pogorju). Ujma 13, 102-106, Uprava RS za zaščito in reševanje – Ministrstvo za obrambo, Ljubljana.
- Gosar, A., Živčič, M., Suhadolc, P., Marrara, F., 1999: Seismic ground motion modelling for the Ljubljana basin (Slovenia). XXII General Assembly of the IUGG, Abstracts, B.186, Birmingham.
- Gosar, A., Stopar, R., Car, M., Mucciarelli, M., 2000: The earthquake on 12 April, 1998 in Krn mountains (Slovenia): ground motion amplification study using microtremors and modelling based on geophysical data. Journal of Applied Geophysics, 47/2, 153-167, Elsevier, Amsterdam.
- Grad, K., Ferjančič, L., 1968: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, Tolmač lista Kranj. Zvezni geološki zavod, 70 str., Beograd.
- Grad, K., Ferjančič, L., 1974: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, list Kranj. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Idriss I. M., Sun J., I., 1992: User's Manual for Shake91, a Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analysis of Horizontally Layered Soil Deposits. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis, California.
- Lapajne, J., 1970: Seizmična mikrorajonizacija Ljubljane. Geofizikalne raziskave 1969-1970. Tipkano poročilo. Geološki zavod Ljubljana, Ljubljana.
- Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 2001: Karta potresne nevarnosti Slovenije – projektni pospešek tal in Tolmač. Ministrstvo za okolje, prostor in energijo, Uprava RS za geofiziko oz. Agencija RS za okolje, Ljubljana.
- Medvedev, S. V., 1965: Inženjerska seizmologija (prevod v srbohrvaščino), Građevinska knjiga, 268 str., Beograd.

- Mencej, Z., 1989: Prodni zasipi pod jezerskimi sedimenti Ljubljanskega barja. *Geologija* 31, 32, 517-553, Ljubljana.
- Pleničar, M., 1963: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, Tolmač lista Postojna. Zvezni geološki zavod, 62 str., Beograd.
- Poljak, M., 2000: Strukturno tektonska karta Slovenije v merilu 1:250.000, Tiskana karta. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Poljak, M., Živčič, M., Zupančič, P., 2000: The seismotectonic characteristics of Slovenia, *Pure and Applied Geophysics* 157, 37-55., Basel.
- Premru, U., 1980: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, Tolmač lista Ljubljana. Zvezni geološki zavod, 75str., Beograd.
- Premru, U., 1982: Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000, list Ljubljana. Zvezni geološki zavod, Beograd.
- Prestor, J., 1988: Hidrogeološka zgradba kvartarnega zasipa južnega območja Ljubljane. Diplomski naloga, Fakulteta za naravoslovje in tehnologijo, 46 str., Ljubljana.
- Ribarič, V., 1982: Seizmičnost Slovenije - Katalog potresov, *Seismicity of Slovenia – Catalogue of earthquakes*. Seizmološki zavod SR Slovenije, Ljubljana.
- Schnabel P., Lysmer J., Seed H. B., 1972: Shake, a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, College of Engineering, University of California, Berkeley, California.
- Vidrih, R., 2002: Potresi. Zbornik Nesreče in varstvo pred njimi (urednik B. Ušeničnik), Uprava za zaščito in reševanje Ministrstva za obrambo, Ljubljana.
- Zupančič P., Šket Motnikar B., Gosar A., Prosen T. (2003), Karta potresne mikrorajonizacije Mestne občine Ljubljana, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo, Ljubljana.
- Živanović, M., Stopar, R., 1995: Geofizikalne raziskave lokacij monitoringa močnih potresov na območju mesta Ljubljane, Tipkano poročilo, arhiv Geoinženiringa.
- Živčič M., 1994: Katalog potresov (1992), Priloga k: Fajfar P., Lapajne J., Breška Z. in sod. Verjetnostna ocena potresne nevarnosti na lokaciji Nuklearne elektrarne Krško, Revizija 1, Končno poročilo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo, Ljubljana.