

POTRESNA MIKRORAJONIZACIJA – OSNOVE, METODE, UPORABA IN STANJE V SLOVENIJI

SEISMIC MICROZONATION – PRINCIPLES, METHODS, APPLICATIONS AND ITS CONDITION IN SLOVENIA

Andrej Gosar

dr., Ministrstvo za okolje in prostor, ARSO, Urad za seizmologijo, Vojkova 1 b, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si

Povzetek

S potresno mikrorajonizacijo analiziramo, kako lokalne geološke razmere vplivajo na ojačenje potresnega nihanja tal, in opredeljujemo območja s homogenim seizmološkim odzivom. Večinoma se uporabljajo trije nivoji potresne mikrorajonizacije. Na prvem nivoju uporabljamo obstoječe podatke za opredelitev območij in je pripravljajni za višje nivoje. Na drugem nivoju opredelimo območja na podlagi enostavnejših metod, kot so empirični odnosi med parametri. Na tretjem nivoju faktorje ojačenja izračunamo z numeričnimi metodami na podlagi obsežnih geofizikalnih, vrtnih in seizmoloških podatkov. Potresna mikrorajonizacija se uporablja pri projektiranju potresno odpornih zgradb in drugih objektov, za teritorialno in urbano prostorsko načrtovanje in za krizno načrtovanje z namenom zagotoviti ustrezen odziv služb za zaščito in reševanje. Ker v Sloveniji obstoječe mikrorajonizacije niso zadostne za projektiranje in prostorsko načrtovanje, bi bilo treba uvesti ustrezen program raziskav za izdelavo potresnih mikrorajonizacij drugega in tretjega nivoja.

Abstract

Seismic microzonations identify the local geological conditions that amplify ground motion and define zones with homogeneous seismic behaviour. Usually three levels of seismic microzonation are used. Level 1 consists of collecting existing data and is preparatory for higher levels. At level 2 amplification factors are assigned to microzones through simplified methods such as empirical laws. At level 3 the amplification factors are calculated for each microzone through numerical methods based on extensive geophysical, drilling and seismological investigations. Seismic microzonation is applied in the seismic resistant design of buildings and structures, in territorial and urban planning, and in emergency planning to better address civil protection resources. Since existing microzonations in Slovenia are not sufficient for seismic resistant design and urban planning, it is necessary to start an adequate investigation programme to achieve the second and third levels of seismic microzonation.

Uvod

Regionalne (državne) karte potresne nevarnosti zaradi velikega merila ne morejo upoštevati vplivov lokalne geološke zgradbe, zato prikazujejo veličino, ki opredeljuje potresno nevarnost (intenziteta ali pospešek), ocenjeno za trdno geološko podlago (skalo). Lokalni vplivi so podani na kartah potresne mikrorajonizacije, ki na območjih z mehkejšimi sedimenti (na takih je zgrajena večina večjih naselij v Sloveniji) dopolnjujejo karto potresne nevarnosti (Reiter, 1990). Ko se potresno valovanje približuje površju in prehaja iz trših kamnin v mehkeše sedimente, se amplituda nihanja (hitrost ali pospešek) spremeni v odvisnosti od razlike v akustični impedanci (zmnožek hitrosti valovanja in gostote) in se poveča v mehkejših, manj gostih sedimentih (Ansal, 2004). Poleg tega pa prihaja na mejah kamnin z večjo razliko v akustični impedanci tudi do nastanka površinskega potresnega valovanja ter do ujetja valovanja v površinski plasti. Zato so

amplitude in trajanje nihanja tal v dolinah in kotlinah, zapolnjenih s sedimenti, znatno večji kot na skali na njihovem obrobju.

Metode potresne mikrorajonizacije so se v zadnjih petdesetih letih precej spreminjale od sprva kvalitativnih do vedno bolj kvantitativnih (Mayer-Rosa in Jimenez, 2000). Dolgo časa so mislili, da zadostuje podrobna geološka karta, s pomočjo katere ločimo sedimente glede na njihovo trdoto in če je mogoče tudi debelino ter ocenimo t. i. *prirastek seizmične stopnje*, ki pove, za koliko bo intenziteta na neki lokaciji večja kot na primerjalnih skalnih tleh. Metodologijo za tako klasifikacijo tal, ki se je dolgo uporabljala tudi pri nas, je najbolj razdelal Medvedev (1965).

Sledile so metode, ki so uporabljale vsaj en količinski podatek. Navadno je bila to hitrost širjenja strižnega seizmičnega valovanja v vrhnjih nekaj desetih metrih, ki so jo določali najprej predvsem z razmeroma dragimi

seizmičnimi refrakcijskimi raziskavami ali meritvami v vrtinah, pozneje pa tudi z novejšo metodo večkanalne analize površinskega seizmičnega valovanja (MASW). Primeri številnih potresov pa so pokazali, da učinki niso odvisni le od lastnosti tal, v katerih je objekt temeljen, ali od zgornje plasti sedimentov, debele nekaj deset metrov, ampak da pogosto na nihanje tal vpliva celoten paket sedimentov nad skalno podlago. Temu spoznanju je sledil razvoj številnih kvantitativnih metod vrednotenja vpliva lokalne geološke zgradbe (Ansal, 2004).

V Evropi in Sloveniji se zdaj za klasifikacijo tal uporablja predvsem evropski standard *Evrokod 8 – Projektiranje potresno odpornih konstrukcij* (SIST EN 1998-1, 2005). V njem je vpliv lokalnih tal na učinke potresa za nekatere značilne tipe tal predpisan s koeficientom tal. *S koeficientom tal S* (soil factor) pomnožimo vrednosti projektnega pospeška tal, ki veljajo za referenčno trdno kamnino. Evrokod 8 določa sedem tipov tal, ki so opredeljeni s tremi parametri: povprečna hitrost strižnega valovanja v vrhnjih 30 metrih, rezultat standardnega penetracijskega preizkusa in strižna trdnost tal.

Potresna mikrorajonizacija se uporablja v projektiranju potresno odpornih zgradb in drugih objektov, za teritorialno in urbano prostorsko načrtovanje in za krizno načrtovanje z namenom zagotoviti ustrezen odziv služb za zaščito in reševanje ob rušilnem potresu.

Potresna mikrorajonizacija – viri vhodnih podatkov in metode

Potresna mikrorajonizacija zahteva interdisciplinarni pristop, ki vključuje različne vede, kot so geologija, geomorfologija, aplikativna geologija, geološki inženiring, seizmologija in geofizika (Bramerini in sod., 2015). Z integracijo vseh podatkov se izdela model plitvega podpovršja, ki v obliki kart prikazuje:

- območja, kjer ne pričakujemo znatnega odstopanja potresnega nihanja tal glede na trdno skalo in ravno površje,
- območja, kjer je potresno nihanje tal ojačeno,
- območja, ki so dovzetna na plazenje ali podore,
- območja, kjer lahko pride do likvifikacije (utekočinenja tal),
- območja verjetnih površinskih pretrgov ob aktivnih prelomih,
- območja diferencialnega ugrezanja.

Pri potresni mikrorajonizaciji se uporabljajo vsi obstoječi podatki, ki so ustrezno organizirani v geografskem informacijskem sistemu (GIS), in rezultati novih raziskav, ki so odvisne od načrtovanega nivoja (Reiter, 1990). Na prvem nivoju uporabljamo obstoječe podatke za opredelitev območij in je pripravljali za višje nivoje. Na drugem nivoju opredelimo območja na podlagi enostavnejših metod, kot so empirični odnosi med parametri. Na tretjem nivoju faktorje ojačenja izračunamo z numerič-

nimi metodami na podlagi obsežnih geofizikalnih, vrtalnih in seizmoloških podatkov (Ansal, 2004).

Najpomembnejši element potresne mikrorajonizacije je **ocena ojačenja nihanja tal**, ki temelji na naslednjih vhodnih podatkih:

- regionalna ocena potresne nevarnosti, ki opredeljuje referenčni pospešek nihanja tal,
- topografija površja,
- litostratigrafija sedimentov do globine trdne geološke podlage,
- morfologija trdne geološke podlage,
- geotehnična klasifikacija sedimentov in geomehanska klasifikacija razpokanih kamnin,
- hitrost strižnega seizmičnega valovanja v sedimentih in njeno spreminjanje z globino,
- ocena osnovne lastne frekvence nihanja paketa sedimentov,
- obnašanje sedimentov pod dinamično obtežbo.

Raziskovalne metode, ki se priporočajo za pridobitev teh vhodnih podatkov, so zbrane v preglednici 1.

Raziskave **nevarnosti pobočnih premikov** ob potresu, kot so zemeljski plazovi in skalni podori, so pomemben element potresne mikrorajonizacije, pri katerem moramo z različnimi metodami raziskav opredeliti številne parametre. Z uporabo digitalnih modelov višin,

Podatki, pridobljeni z raziskovalno metodo iz desnega stolpca	Raziskovalne metode
referenčna ocena potresne nevarnosti	regionalna analiza potresne nevarnosti in/ali instrumentalni seizmološki podatki
topografija površja	digitalni model višin (DMV), podrobne topografske karte
litostratigrafski profil	geološke raziskave, raziskovalne vrtine
globina in morfologija trdne geološke podlage	vrtine, geološki profili, geofizikalne raziskave
vsebnost vode ali nivo podtalnice	vrtine, geoelektrično sondiranje
geotehnična ali geomehanska klasifikacija	geomehanske analize, in-situ preiskave, laboratorijske preiskave, SPT ali CPT testi
profil strižnih seizmičnih hitrosti	seizmične metode: refrakcija, down-hole, cross-hole, MASW; korelacija z geotehničnimi podatki
osnovna lastna frekvenca nihanja sedimentov	metoda mikrotremorjev
klasifikacija sedimentov pod dinamično obtežbo	resonančni steber, cilindrični torzijski strižni preizkus, strižni preizkus
<p>Preglednica 1: Priporočljive metode raziskav za oceno ojačenja nihanja tal (Bramerini in sod., 2015)</p> <p>Table 1: Recommended investigation methods for the assessment of ground motion amplification (Bramerini et al., 2015)</p>	

podrobnih topografskih kart in terenskih topografskih meritev izdelamo natančne karte strmin pobočij. Z geološkim kartiranjem in analizo jeder iz vrtin izdelamo litostratigrafske stolpce in profile. Za geotehnično klasi-



Slika 1: Mehki sedimenti, na katerih je zgrajena večina objektov, lahko izrazito vplivajo na povečanje potresnega nihanja tal in ob potresu povzročijo večje poškodbe, kot bi jih utrpel enak objekt, zgrajen na trdni geološki podlagi. Čezsoča po potresu leta 1998 (foto: A. Gosar).

Figure 1: Soft sediments, on which most houses are built, can significantly amplify seismic ground motion, and thus in an earthquake can increase damage in comparison to the same house build on rigid rock. Čezsoča after the 1998 earthquake (Photo: A. Gosar).



Slika 2: Učinki potresov na naravno okolje se kažejo predvsem kot zemeljski plazovi in skalni podori in so pomemben element potresne mikrorajonizacije. Na sliki je podor na V. Šmohorju, ki je nastal ob potresu leta 1998 v Krnskem pogorju (foto: A. Gosar).

Figure 2: Seismic effects on the natural environment are expressed mainly as landslides and rockfalls, and are an important element of seismic microzonation. The figure shows a rockfall on V. Šmohor which was caused by the 1998 Krn Mountains earthquake (Photo: A. Gosar).

fikacijo kamnin uporabljamo standardizirane laboratorijske preiskave in standardne penetracijske teste (SPT in CPT) (Bramerini in sod., 2015). Ker je pomemben sprožilec plazjenja voda, je treba z meritvami v vrtinah in piezometrih natančno spremljati nivo podtalnice in namočenost zemljin. Odvisnost stabilnosti pobočja od strižne trdnosti zemljine analiziramo z laboratorijskimi preiskavami, SPT ali CPT testi ter cikličnimi triaksialnimi ali strižnimi preizkusi. Pred izdelavo končnega modela morebitnega plazjenja se uporablja še interpretacija letalskih posnetkov površja, geološke in geomorfološke raziskave, in-situ geotehnične in geofizikalne raziskave na površju in v vrtinah, kot so seizmične metode refrakcijske seizmike ali meritve seizmičnih hitrosti v vrtinah.

Ocena dovzetnosti mehkih z vodo nasičenih zemljin za **likvifikacijo** (utekočinjenje) ob potresu je zelo pomembna, saj predstavljajo taka območja največjo nevarnost za

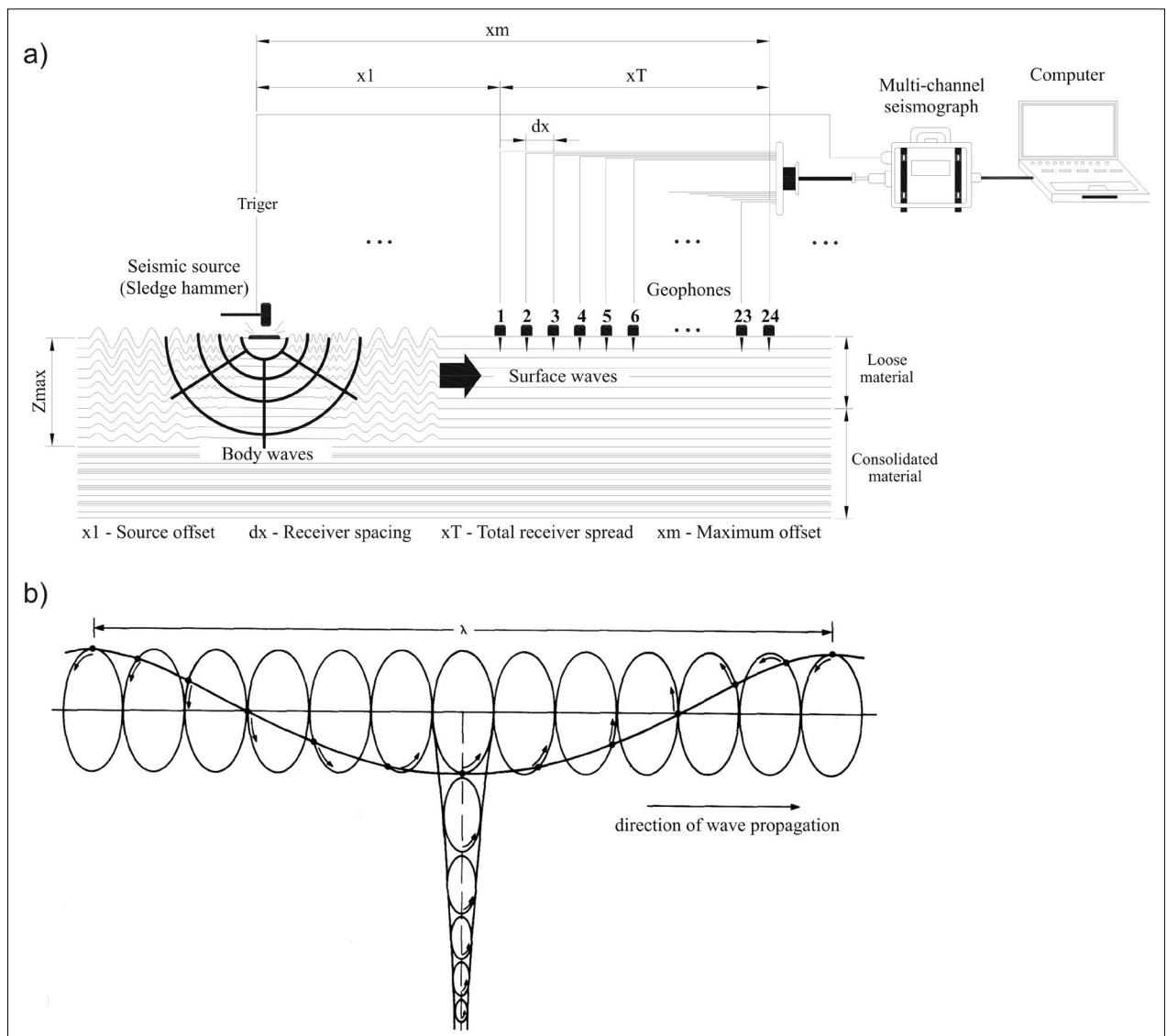


Slika 3: Za določitev hitrosti seizmičnega strižnega valovanja, ki omogoča kvantitativno klasifikacijo sedimentov, se uporablja geofizikalna metoda refrakcijske seizmike. Slika prikazuje tipično refrakcijsko razvrstitev geofonov in generiranje seizmičnega valovanja s težkim kladivom (foto: A. Gosar).

Figure 3: To determine the velocity of shear seismic waves, which enable the quantitative classification of sediments, the geophysical seismic refraction method is used. The figure shows the typical refraction layout of geophones and the generation of seismic waves by sledgehammer (Photo: A. Gosar).

prebivalce in objekte (Youd, 2003). Posebej problematična so umetna nasutja, ki so pogosta na morskih ali jezerskih obrežjih. Pred izdelavo ocene likvifikacije je treba zbrati številne geološke, geomehanske in geofizikalne podatke. Ker lahko pride do likvifikacije le pri dovolj velikem potresnem nihanju tal, omejimo raziskave na območja s pričakovanim pospeškom, večjim od 0,15 g. Litostratigrafski profil izdelamo na podlagi analize jeder iz vrtin in geofizikalnih karotažnih meritev v vrtinah. Zelo pomembna je granulometrična analiza velikosti zrn sedimentov, ki se opravi v laboratoriju. Pri geotehnični klasifikaciji uporabljamo laboratorijske preiskave, SPT ali CPT teste in ciklične triaksialne ali strižne preizkuse. Hidrogeološki parametri, kot so nasičenost zemljine z vodo, temeljijo na meritvah v piezometrih in laboratorijih. Odvisnost nevarnosti likvifikacije od trdnosti zemljine nato analiziramo z laboratorijskimi preiskavami, SPT ali CPT testi ter cikličnimi triaksialnimi ali strižnimi preizkusi.

Ocena nevarnosti **površinskega pretrga ob prelomu** pri močnem potresu temelji na geoloških, tektonskih in paleoseizmoloških podatkih. Z metodami daljinskega zaznavanja (npr. letalski posnetki, podrobni digitalni modeli višin, LiDAR) in terenskim kartiranjem izdelamo karte aktivnih prelomov, ki prikazujejo potek teh prelomov na površju. Litostratigrafske profile izdelamo na podlagi geotehničnih in paleoseizmoloških analiz ter podatkov iz vrtin. Za oceno prelomnih pretrgov in premikov ob njih se uporabljajo paleoseizmološke analize, ki obsegajo metode tektonske geomorfologije, geofizikalne raziskave in paleoseizmološke razkope, s podrobnim kartiranjem njihovih sten in datacijo deformiranih sedimentov. Potek prelomov v globini temelji predvsem na geofizikalnih raziskavah, kot je refleksijska seizmika, in analizah seizmičnosti. Za datiranje ugotovljenih premikov in deformacij ob prelomih uporabljamo predvsem radiometrične metode raziskav na ustreznih vzorcih, kot so koščki oglja.



Slika 4: Metoda večkanalne analize površinskega valovanja [MASW] je učinkovita metoda za pridobitev hitrostnega globinskega profila strižnega potresnega valovanja, ki je ključen za potresno mikrorajonizacijo (po Park in sod., 2007).

Figure 4: Multichannel analysis of surface waves [MASW] is an effective method to derive a vertical depth profile of shear waves, which is crucial for seismic microzonation (after Park et al., 2007).



Slika 5: Za meritve mikrotremorjev se uporabljajo posebni seizmografi. S to metodo opredeljujemo osnovne lastne frekvence nihanja sedimentov in objektov ter posledično nevarnost resonančnih učinkov ob potresu (foto: A. Gosar).

Figure 5: Special seismographs are used for microtremor measurements. This method is used to determine the fundamental frequencies of sediments and structures, and thus for assessment of the danger of resonance effects during an earthquake (Photo: A. Gosar).

Ocena nevarnosti **diferencialnega posedanja** temelji na geoloških, geotehničnih in geofizikalnih podatkih. Za prepoznavanja površinskih pokazateljev pojavov posedanja uporabljamo interpretacijo letalskih posnetkov in podrobnih digitalnih modelov višin ter terensko kartiranje. Litostratigrafske profile izdelamo s pomočjo vrtin in geotehničnih preiskav. Za opredelitev geometrije med različnimi litološkimi tipi zemljin uporabimo geofizikalne metode, kot sta seizmična refrakcija in geoelektrična tomografija, ter razpoložljive geotehnične podatke.

Trije nivoji potresne mikrorajonizacije

Glede na cilje študije in razpoložljive podatke se potresna mikrorajonizacija izvaja v treh nivojih (Bramerini in sod., 2015).

Nivo I

Najnižji nivo je pripravljalni za oba višja nivoja in je le v izjemnih primerih zadosten. Cilj je določiti *območja s homogenim seizmičnim odzivom* v merilu karte med 1 : 5.000 in 1 : 10.000. Ta karta prikazuje območja, kjer se verjetno pojavijo različne vrste učinkov potresa, kot so ojačenje nihanja tal, nestabilnosti pobočij ali likvifikacija. Analiza temelji na obstoječih geoloških, geomorfoloških in litostratigrafskih podatkih, ki so podani

na kartah ustreznih meril (vsaj 1 : 10.000). Če ni na voljo geoloških podatkov v ustrezno velikem merilu, ne moremo izdelati karte mikrorajonizacije v tem merilu in so potrebne nove terenske raziskave. Na karti mikrorajonizacije se ozemlje razdeli v tri kategorije:

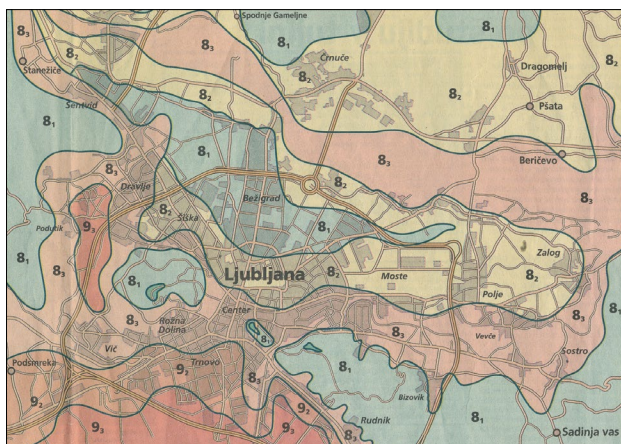
- stabilna območja**, kjer ni pričakovanih lokalnih vplivov (na površju so trdne geološke formacije, topografija je ravna ali nagnjena za manj kot 15°),
- stabilna območja, na katerih se pričakuje ojačenje potresnega nihanja tal** zaradi lokalnih litostratigrafskih in topografskih pogojev,
- območja, dovzetna za nestabilnost**, kjer seizmični učinki povzročijo trajne deformacije, kot so pobočne nestabilnosti, likvifikacija, aktivni prelomi, diferencialno pogrezanje.

Nivo II

Cilj drugega nivoja potresne mikrorajonizacije je s podrobnejšimi raziskavami natančneje opredeliti nezanesljivosti, ugotovljene na prvem nivoju in s preprostejšimi metodami, kot so empirični odnosi, podati kvantificirano oceno ojačenja nihanja tal ali trajnih deformacij. Rajonizacija v tri kategorije prvega nivoja se najprej dopolni s poglobljenimi raziskavami, nato pa se s preprostejšimi empiričnimi odnosi podajo faktorji ojačenja za dve različni periodi nihanja ali celoten spekter odziva ter kvantitativno opredelijo območja trajnih deformacij. Na tem nivoju se predvsem podrobneje opredeli nevarnost in obseg plazenja v mehkejših sedimentih ali pojava skalnih podorov v trših kamninah. Likvifikacija v zelo mehkih sedimentih, zasičenih z vodo, lahko nastane pri močnejših nihanjih tal s pospeškom, večjim od 0,15 g. Ker gre za zelo nevaren pojav, jo je potrebno kvantitativno opredeliti z indeksom možnosti likvifikacije, ki se oceni za vse razpoložljive navpične prereze skozi sedimente. Na ta način klasificiramo tla v tri vrste z majhno, veliko in zelo veliko nevarnostjo likvifikacije. Izsledki se prikažejo na karti, ki ne podaja le opredeljenih območij, ampak tudi lokacije raziskanih navpičnih prerezov skozi sedimente in izračunane vrednosti indeksa. Za aktivne prelome, ki bi lahko povzročili površinske pretrge in diferencialno pogrezanje, nivo II ne predvideva dodatnih analiz.

Nivo III

Najvišji nivo mikrorajonizacije podrobno kvantitativno opredeli lokalno ojačenje potresnega nihanja tal ali pobočnih nestabilnostih pri kompleksnih geoloških in geotehničnih pogojih, ki jih ni bilo mogoče zadovoljivo rešiti na obeh nižjih nivojih. Glede na geološko zgradbo se pripravi program podrobnih geoloških, geofizikalnih, geotehničnih in seizmoloških raziskav, katerih metode se najprej testirajo na izbranih lokacijah. V nadaljevanju se uporabijo le metode, ki so se pri testiranju izkazale za uspešne. Raziskovalne metode vključujejo seizmometrične meritve, raziskovalno vrtanje z meritvami v



Slika 6: Stara potresna mikrorajonizacija območja Ljubljane z uporabo metode prirastkov seizmične stopnje za uporabo s karto potresne nevarnosti, ki podaja intenziteto (po Godec in sod., 1991).

Figure 6: An old seismic microzonation of the Ljubljana area shows increments of seismic degrees and is used with an intensity seismic hazard map (after Godec et al., 1991).

vrtnah ter površinske geofizikalne raziskave za določitev navpičnega profila hitrosti strižnega seizmičnega valovanja (refrakcijska seizmika, večkanalna analiza površinske seizmičnega valovanja – MASW) in laboratorijske geotehnične preiskave (statične in dinamične). Dodatno se izvedejo še meritve mikrotremorjev za določitev osnovne lastne frekvence nihanja paketa sedimentov, ki je odložen na trdni geološki podlagi. Za kvantifikacijo ojačenja nihanja tal in dinamično analizo nestabilnosti pobočij ter dovzetnosti za likvifikacijo se uporabljajo numerične 1D in 2D simulacije. Ocena nevarnosti trajnih deformacij vzdolž aktivnih prelomov pa vključuje različne paleoseizmološke metode raziskav.

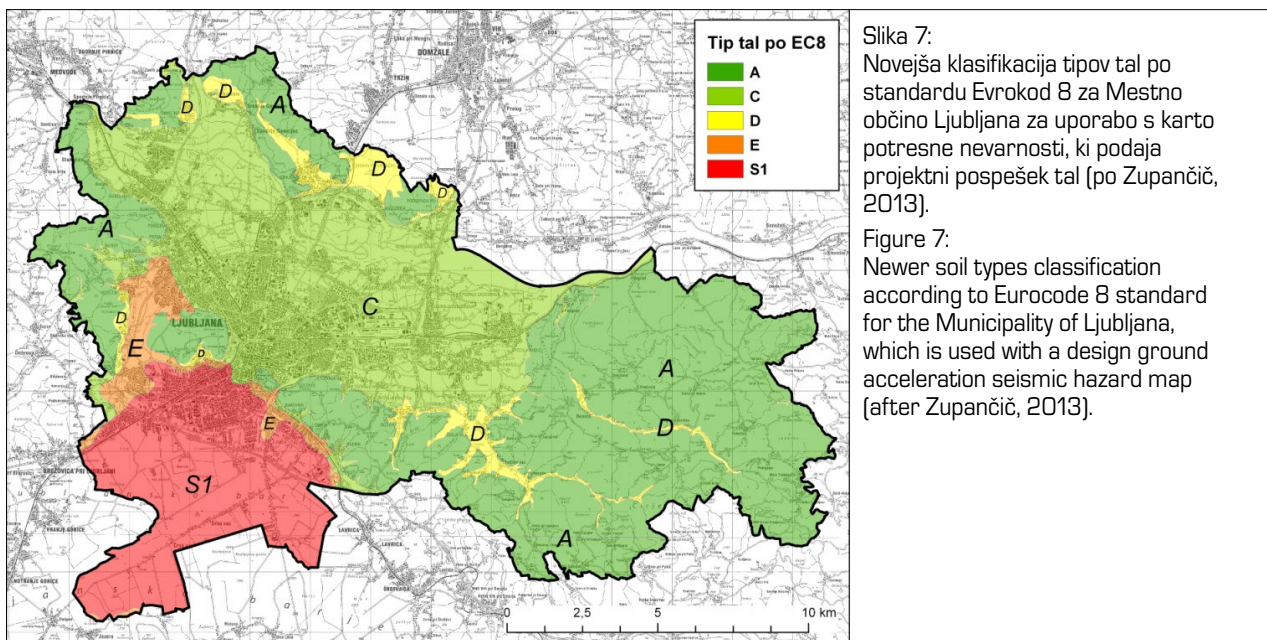
Primer dobre prakse pri izvajanju potresne mikrorajonizacije

Priprava študij in kart potresne mikrorajonizacije v svetu praviloma ni organizirana na državni ravni tako, kot je priprava državnih kart potresne nevarnosti, ki so sestavni del gradbenih predpisov in so jih projektanti dolžni upoštevati pri projektiranju objektov. Zato pogosto prihaja do tega, da se tudi znotraj iste države potresne mikrorajonizacije lotevajo na zelo različne načine kljub nekaterim standardom, kot je Evrokod 8, ki ga je prevzela večina evropski držav. Številne analize so pokazale, da klasifikacija tal po tem standardu, ki temelji predvsem na povprečni hitrosti strižnega seizmičnega valovanja v vrhnjih 30 metrih sedimentov, ni zadovoljiva, saj ne zajema vseh možnih vplivov na potresno nihanje tal. Hiter razvoj znanosti na področju raziskovanja vpliva mehkih sedimentov na potresno nihanje tal in razvoj novih metod raziskav in analiz (Ansal, 2004)

kličejo k oblikovanju smernic in navodil za bolj standardizirano obravnavo potresne mikrorajonizacije, ki upošteva tudi vse lokalne posebnosti, ki lahko vplivajo na potresno nevarnost. Ker gre za izrazito interdisciplinarne raziskave, ki se večinoma izvajajo v lokalnih okoljih, saj tamkajšnji izvajalci študij najbolj poznajo geološko zgradbo ozemlja in razpolagajo z vsemi obstoječimi podatki, je nevarnost, da se bodo uporabljali na različnih območjih zelo različni pristopi, še toliko večja. Po drugi strani pa se je v preteklosti že pogosto izkazalo, da centralizacija tako pomembne dejavnosti na ravni celotne države, ki ima lahko sicer dober namen zagotoviti enake standarde raziskav, večinoma ne daje dobrih rezultatov.

V Italiji, ki je poleg Grčije in Turčije v Evropi potresno najbolj ogrožena, so prepoznali vse naštetih težave, ki ovirajo, da bi potresno mikrorajonizacijo na ozemlju celotne države izvajali tako poenoteno, da bi postala učinkovita podpora potresno odpornemu projektiranju, prostorskemu načrtovanju in delovanju služb za zaščito in reševanje. Vsi rušilni potresi, ki so se zgodili v Italiji v zadnjih desetletjih, so obenem jasno pokazali na nujnost dobre potresne mikrorajonizacije za zmanjšanje žrtev in škode. Zato so na pobudo nacionalnega raziskovalnega sveta (CNR) in njegovih Oddelka za zemeljske vede in okolje ter Inštituta za okoljsko geologijo in geoinženiring leta 2015 ustanovili *Center za potresno mikrorajonizacijo in njeno uporabo* (CentroMS). Pred njegovo ustanovitvijo je vsaj tridesetletno obdobje z nekaterimi pomembnejšimi mejniki. Leta 1986 so na podlagi izkušenj potresov v Furlaniji 1976 in Iripiniji 1980 izvedli prvi niz raziskav z namenom določiti najboljše metode za potresno mikrorajonizacijo. Po potresu 1997 v Umbriji in Markah so na 60 območjih opravili podrobne študije, ki so omogočile uspešnejšo rekonstrukcijo poškodovanih objektov. Nadaljnje intenzivne raziskave do leta 2002, ko se je zgodil potres v San Giulianu di Puglia, so privedle do tega, da leto 2002 šteje za prelomno, ko je potresna mikrorajonizacija postala ključno orodje za zmanjšanje potresne ogroženosti. Posebna delovna skupina strokovnjakov je do leta 2006 pripravila nacionalna *Navodila za potresno mikrorajonizacijo* (ICMS). Ta so nato še dopolnjevali v končno objavljeno verzijo (ICMS-2008), ki podrobno opisuje raziskovalne metode in kriterije ter pomeni nacionalno referenco. Po rušilnem potresu leta 2009 v L'Aquilu so bila navodila ICMS s posebnim zakonom predpisana za uporabo. Obsežno sodelovanje strokovnjakov in pri tem pridobljeno znanje sta bila nato podlaga za ustanovitev *Centra za potresno mikrorajonizacijo in njeno uporabo* v začetku leta 2015 (Bramerini in sod., 2015).

Osnovne naloge *Centra za potresno mikrorajonizacijo in njeno uporabo* (CentroMS) so izvajanje raziskav in izobraževanja ter nudenje znanstveno-tehnične podpore vsem izvajalcem študij za potrebe mikrorajonizacije, torej inštitucijam, strokovnjakom in prebivalstvu. Razvijajo nove metode raziskav in zagotavljajo strokovno podporo pri



Slika 7: Novejša klasifikacija tipov tal po standardu Evrokod 8 za Mestno občino Ljubljana za uporabo s karto potresne nevarnosti, ki podaja projektni pospešek tal (po Zupančič, 2013).

Figure 7: Newer soil types classification according to Eurocode 8 standard for the Municipality of Ljubljana, which is used with a design ground acceleration seismic hazard map (after Zupančič, 2013).

analizah, ki se na primer izvajajo na terenu neposredno po vsakem močnejšem potresu, da bi lahko boljše načrtovali sanacijo škode. V centru sodeluje več kot sto raziskovalcev iz petih oddelkov nacionalnega sveta za raziskave (CNR), štirih raziskovalnih inštitutov in štirih oddelkov univerz v Catanii, Milanu, Rimu in Sieni. Center razpolaga z lastno merilno geofizikalno in seizmološko opremo in usklajuje uporabo raziskovalne opreme v vseh drugih organizacijah po državi. Delovanje centra je komplementarno delovanju vseh raziskovalnih ustanov, ki se v Italiji ukvarjajo z ocenjevanjem potresne nevarnosti in ogroženosti. Podpira tudi raziskovalne organizacije, vladne ustanove in vse druge ustanove, ki so povezane z geološkimi, geotehničnimi in geofizikalnimi vprašanji raziskav, s prostorskim načrtovanjem ali obvladovanjem tveganj pri naravnih nesrečah.

Potresna mikrorajonizacija v Sloveniji

V Sloveniji so bili obsežnejši projekti potresne mikrorajonizacije izvedeni konec šestdesetih in v začetku sedemdesetih let prejšnjega stoletja in so obsegali vsa večja urbana območja (npr. Lapajne, 1970). Skladno s takrat uveljavljano metodologijo določanja *prirastkov seizmične stopnje* k ocenjeni intenziteti (Medvedev, 1965), se je uporabljal ta pristop. Za območje Ljubljane so zbrali vse razpoložljive geološke in geotehnične podatke o lastnostih sedimentov in izvedli nekatere geofizikalne raziskave, kot sta upornostno geoelektrično sondiranje in refrakcijska seizmika z longitudinalnim seizmičnim valovanjem (Lapajne, 1970). Žal niso bile opravljene nobene raziskave s strižnim seizmičnim valovanjem, ki bi kasneje omogočale ocene povprečne seizmične hitrosti tega valovanja v vrhnjih 30 metrih za klasifikacijo tal po Evrokod 8 (SIST EN 1998-1, 2005). Vse te potresne mikrorajonizacije ustrezajo opisanemu

nivoju I, saj niso vključevale empiričnih odnosov določitve ojačenja nihanja tal, ki so se uveljavili šele pozneje, ko so karte intenzitet pri ocenjevanju potresne nevarnosti nadomestile novejše karte pospeška nihanja tal za izbrano povratno dobo.

Leta 1991 so za potrebe civilne zaščite izdelali nove potresne mikrorajonizacije večine takratnih občin v Sloveniji, ki so po tedaj veljavni karti potresne nevarnosti bolj ogrožene: Tolmin, Idrija, Brežice, Krško in ljubljanske občine (Godec in sod., 1991; Vidrih in sod., 1991). Mikrorajonizacijo so izvedli za uporabo s karto potresne intenzitete iz leta 1987 (Ribarič in sod., 1987), izključno z uporabo podatkov *Osnovne geološke karte* v merilu 1 : 100.000 in drugih objavljenih podatkov, brez dodatnih terenskih raziskav. Ponovno je bila uporabljena metoda prirastkov seizmične stopnje (Medvedev, 1965). Te potresne mikrorajonizacije zaradi vrste uporabljenih podatkov in prevelikega merila le deloma ustrezajo opisanemu nivoju I in so uporabne le v sistemu zaščite in reševanja, ne pa tudi za projektiranje objektov.

Ob potresih leta 1998 in 2004 v Posočju se je zelo jasno pokazalo, da je na porazdelitev poškodb objektov precej vplivala lokalna geološka zgradba. Predvsem v Bovški kotlini je bila neenakomerna porazdelitev poškodb med različnimi naselji ali celo znotraj samega naselja (npr. Bovec) izrazita in je ni bilo mogoče pojasniti drugače kot z vplivom heterogenih ledeniško-rečnih sedimentov, ki zapolnjujejo kotlino. Z metodo seizmičnih prirastkov intenzitete je zato Ribarič s sodelavci (2000) pripravil novo mikrorajonizacijo večjega merila od predhodnih. Kokošin in Gosar (2013) pa sta s podrobnim inženirsko-geološkim kartiranjem izdelala potresno mikrorajonizacijo Breginjskega kota, ki je bil najbolj prizadeto območje v Sloveniji ob potresu v Furlaniji leta 1976. Ker sta uporabila dovolj veliko merilo (1 : 5.000) ter dvojno klasifikacijo tal s prirastki in po standardu Evrokod 8, ta mikrorajonizacija ustreza nivoju II.

V Bovški kotlini so bili z raziskavami z metodo mikrotremorjev dokazani resonančni učinki med sedimenti in objekti, ki so lokalno povečali učinke potresov (Gosar, 2007). Obsežne raziskave z metodo spektralnih razmerij mikrotremorjev so bile pozneje opravljene tudi v Kobaridu, Ilirski Bistrici, Litiji in Brežicah in ugotovljeno je bilo, da lahko v vseh sedimentnih bazenih, na katerih so zgrajena ta mesta, pričakujemo seizmične resonančne učinke (Gosar, 2012), kar je pomemben podatek za prihodnjo kvantitativno mikrorajonizacijo višjega nivoja. Najobsežnejše raziskave z metodo mikrotremorjev so bile izvedene na območju Ljubljane, kjer je bilo opravljenih 1200 meritev na prostem površju in več kot 130 meritev v stavbah (Gosar in sod., 2010), kar je omogočilo izpeljavo empiričnih odnosov med višino objektov in lastno frekvenco nihanja ter s tem posplošitev rezultatov na večji del stavbnega fonda z uporabo podatkov o višinah objektov. Vse raziskave z metodo mikrotremorjev, ki so bile izvedene v zadnjem desetletju v Sloveniji, predstavljajo enega od pomembnih vhodnih podatkov za morebitno prihodnjo mikrorajonizacijo nivoja III.

V okviru projekta Potrog – Potresna ogroženost v Sloveniji (Lutman in sod., 2013) so za območja, kjer je na karti potresne nevarnosti Slovenije (Lapajne in sod., 2001) projektni pospešek tal enak ali večji kot 0,225 g (SZ Slovenija, osrednja Slovenija, območje Brežic), izvedli poenostavljeno mikrorajonizacijo po standardu Evrokod 8, ki ni vsebovala dodatnih terenskih raziskav ali meritev. Pri tem so uporabili obstoječe mikrorajonizacije, kot so mikrorajonizacija Bovše kotline (Ribičič in sod., 2000), Breginjskega kota (Kokošin in Gosar, 2013) in Ljubljane (Zupančič in sod., 2004). Na območjih, kjer drugih podatkov ni, so podatke o vrsti in koeficientu tal ocenili na podlagi *Osnovne geološke karte* v merilu 1 : 100.000 in primerljivih podatkov iz literature ter dostopnih podatkov o geofizikalnih meritvah. Tudi te potresne mikrorajonizacije kljub uporabi klasifikacije po standardu Evrokod 8 zaradi velikega merila ne presegajo nivoja I in so namenjene izključno za oceno ogroženosti v sistemu zaščite in reševanja, ne pa za projektiranje objektov.

Obstoječe potresne mikrorajonizacije območij z večjo potresno nevarnostjo v Sloveniji ne ustrezajo hitremu razvoju v svetu na tem področju. Večina jih je bila izvedena pred več desetletji z metodami prirastkov seizmične stopnje za uporabo s kartami potresne nevarnosti, ki prikazujejo pričakovane intenzitete (Lapajne, 1970; Vidrih in sod. 1991; Godec in sod. 1991). Te se danes ne uporabljajo več, razen za potrebe zaščite in reševanja (Šket Motnikar in Zupančič, 2011), saj so jih nadomestile ustrežnejše karte, ki podajajo potresno nevarnost kot projektni pospešek tal (Lapajne in sod., 2001). Nekatero novejšo mikrorajonizacijo, ki ne presegajo nivoja I ali izjemoma II po opisani metodologiji, so bile izdelane za potrebe sistema zaščite in reševanja, ne pa za projektiranje objektov (Zupančič, 2013; Lutman in sod., 2013). Zato bo v prihodnje nujno treba začeti ustrezne interdisciplinarnе študije za potresno mikrorajonizacijo, ki bo na najbolj potresno nevarnih in ogroženih območjih zagotavljala nivo III, na večini drugih območij, kjer se pričakuje vpliv mehkih sedimentov na potresno nihanje tal, pa vsaj nivo II.

Sklepne misli

Izkušnje rušilnih potresov v zadnjih desetletjih in skokovit razvoj raziskovalnih metod so pokazali, da so vplivi mehkih sedimentov, na katerih je zgrajena večina večjih naselij, na potresna nihanja tal večji od pričakovanih. Državne karte potresne nevarnosti je zato nujno treba nadgraditi z ustreznimi kartami potresne mikrorajonizacije za vsa ogrožena urbana območja. Šele skupna uporaba državnih kart potresne nevarnosti in mikrorajonizacije omogoča ustrezno potresno odporno projektiranje, prostorsko načrtovanje in učinkovito delovanje sistema zaščite in reševanja. Vzoru drugih držav, ki so se že lotile izvedbe obsežnih interdisciplinarnih študij, nujnih za moderno potresno mikrorajonizacijo, ki kvantitativno opredelijo pričakovana ojačenja potresnega nihanja tal in druge parametre, kot je nevarnost proženja zemeljskih plazov in podorov ali likvifikacija, bo morala čim prej slediti tudi Slovenija.

Viri in literatura

1. Ansal, A., 2004. Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 354 str.
2. Brammerini, F., Castenetto, S., Naso, G., 2015. Guidelines for Seismic Microzonation. Conference of Regions and Autonomous Provinces of Italy – Civil Protection Department. Rome, 120 str.
3. Godec, M., Vidrih, R., Lapajne, J., 1991. Potresna ogroženost mesta Ljubljane – II. del. Seizmološki zavod republike Slovenije, Ljubljana, 102 str.
4. Gosar, A., 2007. Microtremor HVSF study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes. Engineering geology, 91, 178–193.
5. Gosar, A., Rošar, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 2010. Microtremor study of site effects and soil-structure resonance in the city of Ljubljana (central Slovenia). Bulletin of earthquake engineering, 8/3, 571–592.
6. Gosar, A., 2012. Determination of masonry building fundamental frequencies in five Slovenian towns by microtremor excitation and implications for seismic risk assessment. Natural Hazards, 62/3, 1059–1079.
7. Kokošin, J., Gosar, A., 2013. Seismic microzonation of Breginjski kot (NW Slovenia) based on detailed engineering geological mapping. The Scientific World Journal, Article ID 626854, 12 str.
8. Lapajne, J., 1970. Seizmična mikrorajonizacija Ljubljane – geofizikalne raziskave. Geološki zavod Ljubljana, Ljubljana, 16 str.
9. Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 2001. Nova karta potresne nevarnosti – projektni pospešek tal namesto intenzitete. Gradbeni vestnik 50, 140–149.

10. Lutman, M., Weiss, P., Klemenc, I., Zupančič, P., Šket Motnikar, B., Banovec, P., Cerk, M., 2013. POTROG – Potresna ogroženost v Sloveniji za potrebe Civilne zaščite. Uprava RS za zaščito in reševanje, Ljubljana, 640 str.
11. Mayer-Rosa, D., Jimenez, M. J., 2000. Seismic zoning: State of the art and recommendations for Switzerland. Geologische Berichte Nr. 26, Bern.
12. Medvedev, S. V., 1965. Inženjerska seizmologija (prevod iz ruščine v srbohrvaščino). Građevinska knjiga, Beograd, 268 str.
13. Reiter, L., 1990. Earthquake hazard analysis. Columbia University Press, New York, 253 str.
14. Ribarič, V., Hadžijevski, V., Pekevski, D., Jorgić, M., Kuk, V., Šupič, V., Vukašinović, M., 1987. Seizmološke karte SFR Jugoslavije i Tumač. Zajednica za seizmologiju SFR Jugoslavije, Beograd.
15. SIST EN 1998-1, 2005. Evrokod 8 – Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, slovenski standard, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana.
16. Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 2011. Karta potresne intenzitete Slovenije. Ujma 25, 226–231.
17. Vidrih, R., Godec, M., Lapajne, J., 1991. Potresna ogroženost Slovenije: občina Brežice, občina Idrija, občina Krško, ljubljanske občine, občina Tolmin. Seizmološki zavod Republike Slovenije, Ljubljana, 214 str.
18. Ribičič, M., Vidrih, R., Godec, M., 2000. Seizmogeološki in geotehnični pogoji gradnje v zgornjem Posočju. Geologija, 43/1, 115–143.
19. Zupančič, P., Šket Motnikar, B., Gosar, A., Prosen, T., 2004. Karta potresne mikrorajonizacije Mestne občine Ljubljana. Potresi v letu 2002, 12, 32–54.
20. Zupančič, P., 2013. Potresna mikrorajonizacija Ljubljane. Ujma, 27, 148–152.
21. Youd, T. L., 2003. Liquefaction mechanisms and induced ground failure. V: Lee in sod (ur.): International handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Academic Press, Amsterdam, 1159–1173.