

# PRIMERJAVA NOVE KARTE POTRESNE NEVARNOSTI SLOVENIJE Z EVROPSKO KARTO IN SOSEDNJIMI DRŽAVAMI

Polona Zupancič<sup>1</sup>, Barbara Šket Motnikar<sup>2</sup>, Mladen Živčić<sup>2</sup>, Martina Čarman<sup>2</sup>, Andrej Gosar<sup>2</sup>

## Povzetek

Leta 2021 je Agencija RS za okolje (ARSO) končala večletni projekt razvoja novega modela potresne nevarnosti Slovenije. Potresno nevarnost smo izračunali s postopkom verjetnostnega ocenjevanja. Najpomembnejši rezultat je karta vršnega oziroma projektne pospeška tal (PGA), ki je postala priloga Nacionalnega dodatka standarda za potresno odporno projektiranje Evrokod 8 (EC8). Potresna nevarnost je največja zahodno od Bovca na meji z Italijo, kjer je vrednost PGA na novi karti 0,325 g (težni pospešek). Velika potresna nevarnost (0,300 g) je ocenjena tudi v okolici Idrije v zahodni Sloveniji. Enaka vrednost pospeška je tudi na območju Brežic. Med potresno nevarna območja (0,275 g) spada tudi Ljubljana z okolico, ki je še posebej ogrožena zaradi velike gostote naseljenosti. Razvoj slovenskega modela potresne nevarnosti je potekal hkrati s projektom posodobitve evropske karte potresne nevarnosti (ESHM20). Skupaj s strokovnjaki evropskega projekta smo usklajevali metodologijo in vhodne podatke za ozemlje Slovenije. Primerjava kart pokaže, da je razpon vrednosti na obeh kartah podoben, v zahodnem delu pa se vrednosti zaradi različnih postopkov nekoliko razlikujejo. Primerjava z uradnimi kartami sosednjih držav pokaže, da so prostorske porazdelitve potresne nevarnosti podobne, absolutne vrednosti pa se razlikujejo.

## COMPARISON OF THE NEW SEISMIC HAZARD MAP OF SLOVENIA (2021) WITH THE EUROPEAN AND NEIGHBOURING COUNTRIES' MAPS

### Abstract

In 2021, the Slovenian Environment Agency (ARSO) completed a seven-year project on the development of a new seismic hazard model in Slovenia. The most important result is the design ground acceleration map, a supplement to the National Annex of the earthquake-resistant design standard Eurocode 8. The earthquake hazard is greatest west of Bovec, where the PGA value on the new map is 0.325 g (gravitational acceleration). A high seismic hazard (0.300 g) is also estimated in the Idrija (west Slovenia) and Brežice/Gorjanci (east Slovenia) areas. The higher seismic hazard zone (0.275 g) also includes Ljubljana and its surrounding areas. The development of the Slovenian seismic hazard model was carried out in parallel with the project of updating the European seismic hazard model (ESHM20). We collaborated with the experts of the ESHM20 project. A comparison of the maps shows that the range of values on both maps is similar, but in the western part of Slovenia, they differ slightly due to different procedures. A comparison of maps of neighbouring countries shows that the spatial distribution of the estimated seismic hazard is similar, but the absolute values differ due to the differing approaches to seismic modelling and different ground-motion models used.

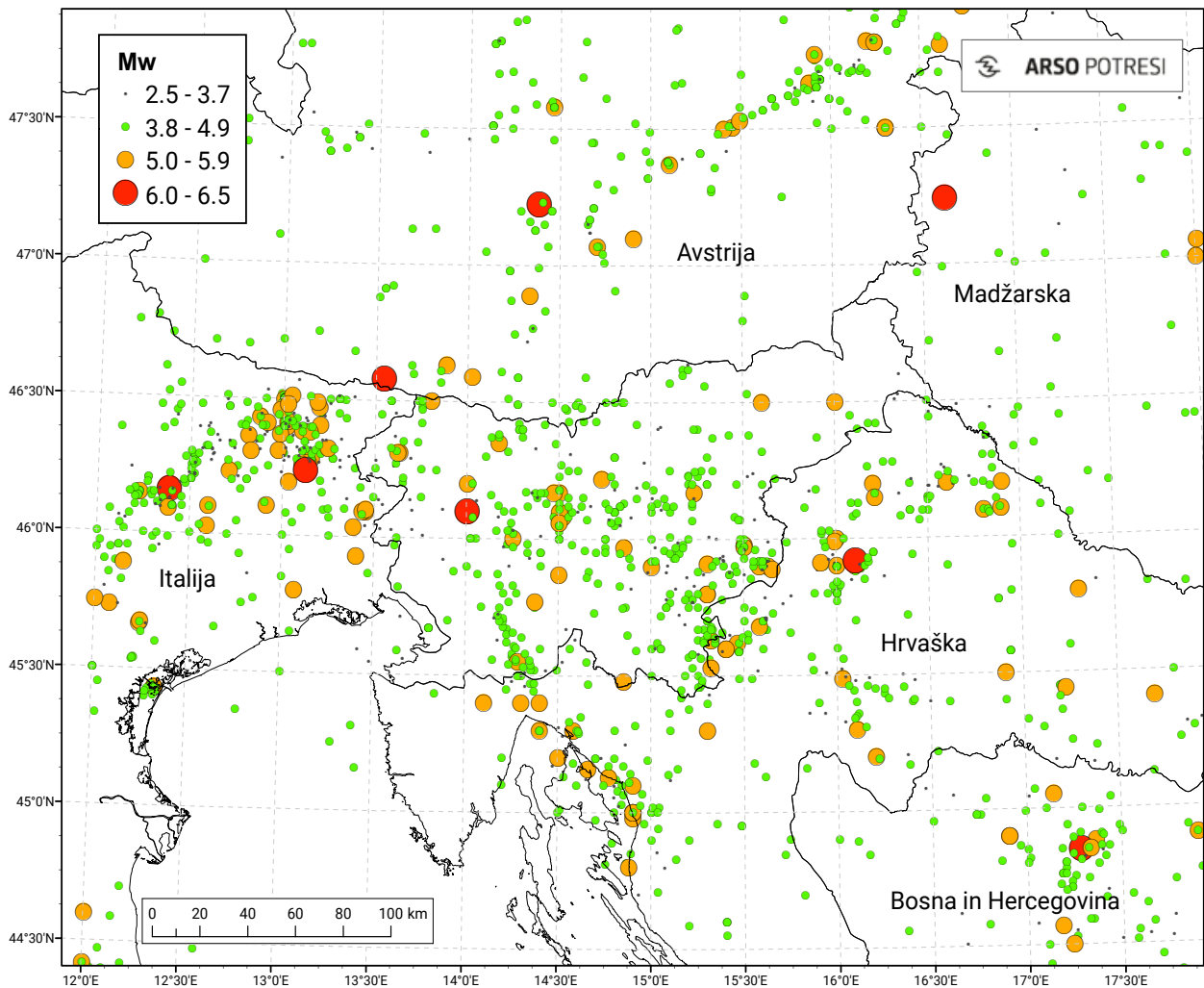
<sup>1</sup>Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, Ljubljana, polona.zupancic@gov.si

<sup>2</sup>Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, Ljubljana

## UVOD

Potresna nevarnost opiše naravno danost za nastanek potresa. Predstavimo jo lahko s kartami, krivuljami ali spektri. Poznavanje potresne nevarnosti je nujno za potresno odporno gradnjo, načrtovanje ukrepov zaščite in reševanja ter za ozaveščanje javnosti. Od zadnje študije potresne nevarnosti Slovenije (Lapajne in sod., 1995a, 2001, 2003) je minilo že 20 let in v tem času smo pridobili številne nove

podatke, modele in relacije, posodobljene so metode ocenjevanja vhodnih parametrov in razvita nova programska orodja. Ocenjevanje potresne nevarnosti je v preteklosti temeljilo skoraj izključno na potresni zgodovini (katalogu potresov), novejši izračuni pa upoštevajo možnost nastanka močnejših potresov na aktivnih prelomih. Pomemben vpliv na oceno potresne nevarnosti ima model pojemanja pospeška tal z oddaljenostjo od (nad)žarišča potresa (Šket Motnikar in sod., 2022a). Številne nove potresne



**Slika 1:** Katalog potresov za območje Slovenije in okolice brez pred- in popotresov (obdobje 456–2018). Največji potres v katalogu z navarno magnitudo 6,5 se je zgodil leta 1976 v Furlaniji.

**Figure 1:** Harmonized and declustered earthquake catalogue from the period 456-2018. The size and colour of the circles denote moment magnitude ( $M_w$ ). The strongest event in the catalogue is the 1976 earthquake in Friuli, Italy ( $M_w$  6.5).

opazovalnice in meritve pospeškov ob močnih potresih v zadnjih petindvajsetih letih so omogočili razvoj natančnejših modelov pojemanja pospeška tal. Sodoben postopek ocenjevanja potresne nevarnosti zahteva modeliranje negotovosti vplivnih parametrov z logičnim drevesom, v preteklosti pa smo obravnavo negotovosti omejili le na različice kataloga potresov. Vse naštetto nas je spodbudilo k razvoju novega modela potresne nevarnosti Slovenije in izračunu nove karte, ki je bila 1. maja 2022 uradno sprejeta kot karta projektnega pospeška tal. V prehodnem obdobju dveh let lahko uporabljamo ali novo ali do zdaj veljavno karto, od 1. maja 2024 pa bo nova karta edina uradno veljavna za potresno odporno projektiranje. Projektni pospešek tal je po EC8 enak navzgor zaokroženemu vršnemu (ali največjemu) pospešku tal. To je največja absolutna vrednost zapisa pospeška na prostem površju. Vršni in projektni pospešek tal izrazimo s težnim pospeškom  $g$  ( $1 g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Podrobnosti priprave vhodnih podatkov, modeliranja in izračuna potresne nevarnosti so opisane v izvornih znanstvenih člankih (Šket Motnikar in sod., 2022a, Atanackov in sod., 2021a,b) ter predstavljene na posvetovanju (Šket Motnikar in sod., 2022b). Poglavja *Uvod*, *Vhodni podatki*, *modeli in metode* ter *Nova karta potresne nevarnosti Slovenije* so povzeti po teh člankih.

## VHODNI PODATKI, MODELI IN METODE

Ocenjevanje potresne nevarnosti se začne s pripravo geološko-tektonskih in seizmoloških podatkov ter modelov, s pomočjo katerih oblikujemo potresne izvore. Geološko-tektonske podatke so strokovnjaki GeoZS zbrali v podatkovni zbirki aktivnih prelomov (Atanackov in sod., 2021a), ki je nastala z obširnimi pregledom in obdelavo vseh objavljenih ali drugače

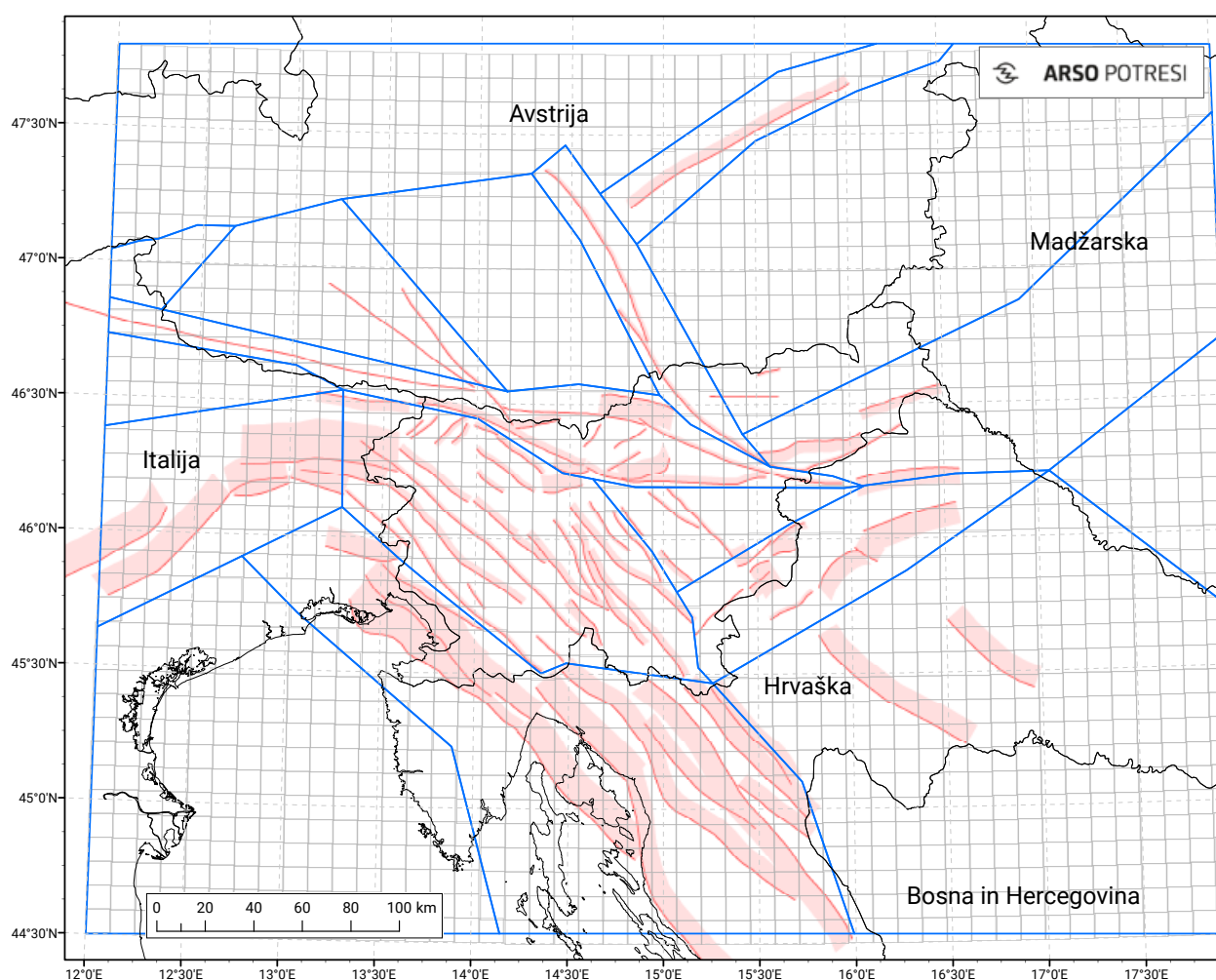
dostopnih podatkov. Slovenija je na območju aktivnega stika Jadranske in Evropske tektonske plošče, zato je tu aktivnih več prelomnih sistemov, na katerih lahko nastanejo močni potresi (Poljak in sod., 2000).

Temeljni vir seizmoloških podatkov je poenoten katalog potresov Slovenije in sosednjih dežel, ki zajema obdobje od leta 456 do leta 2018 in površino okoli 170.000 km<sup>2</sup>. Katalog potresov smo posodobili z novimi spoznanji zgodovinske seizmičnosti in razširili s podatki o potresih, ki so se zgodili zadnjih 20 let (Živčič in sod., 2018) (slika 1).

Potresni izvor je geografsko območje, v katerem predpostavljamo enake strukturno-geološke in kinematske značilnosti ter homogeno seizmičnost. V novem modelu potresne nevarnosti Slovenije smo razvili tri

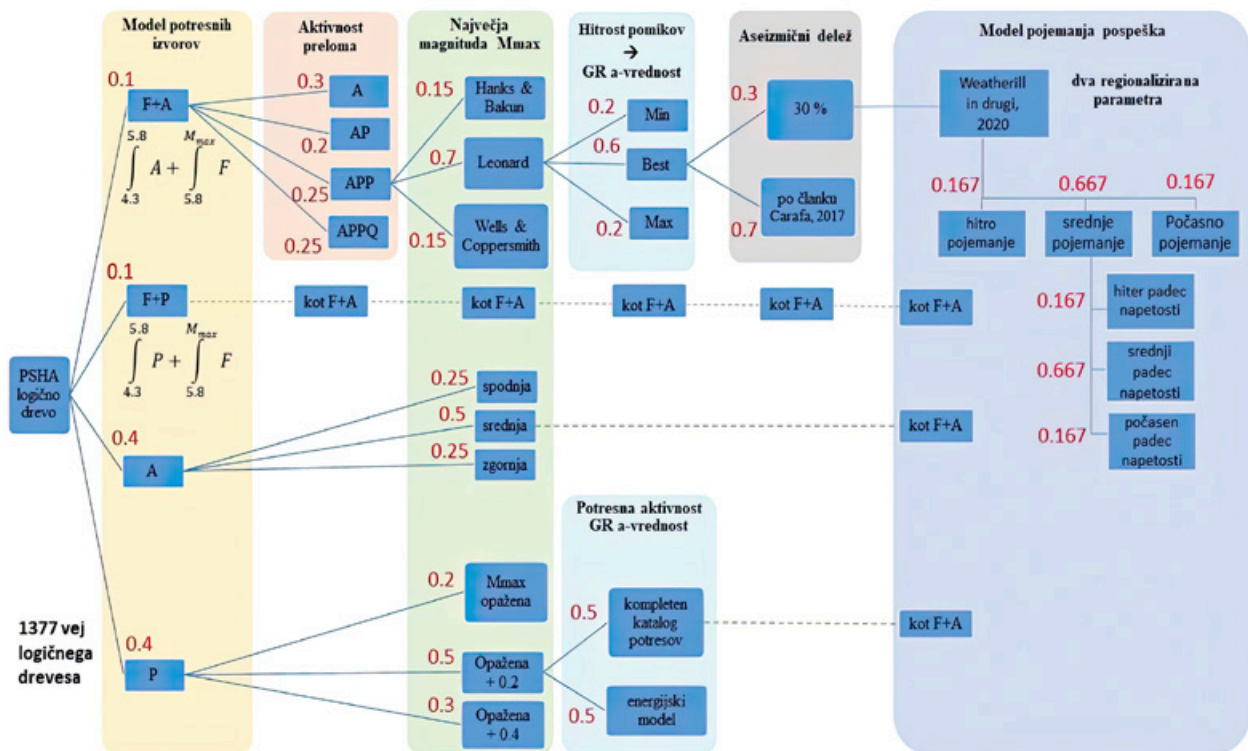
modele potresnih izvorov: točkovnega, ploskovnega in prelomnega z ozadjem (slika 2). Za vsak potresni izvor je poleg prostorske opredelitve treba oceniti številne parametre, kot so povprečna letna aktivnost, največja mogoča magnituda, seizmogena in žariščna globina ter prevladujoči tipi prelomov. Geometrija ploskovnih in prelomnih potresnih izvorov ter vrednosti njihovih parametrov so dosegljive v spletni podatkovni zbirki Pangaea (Atanackov in sod., 2022).

V izračunu potresne nevarnosti nastopajo številni parametri, ki jih ocenimo na podlagi vseh razpoložljivih podatkov in interpretacij. Ker so ocene negotove, smo za najvplivnejše parametre predvideli več vrednosti. Negotovost parametra (ki ima nepoznano, a samo eno mogočo vrednost) modeliramo v logičnem drevesu. Struktura logičnega drevesa za



**Slika 2:** Modeli potresnih izvorov (Atanackov in sod., 2021b, Atanackov in sod., 2022), ki so bili uporabljeni v novem izračunu potresne nevarnosti: model glajene pretekle seizmičnosti v točkovnih izvorih – središčih celic mreže 10 x 10 km (siva barva), model ploskovnih potresnih izvorov (modra barva) in model prelomnih potresnih izvorov – seizmogeni prelomi in projekcije prelomnih ploskev na površino (rdeča barva).

**Figure 2:** Seismogenic sources (Atanackov et al., 2021b, Atanackov et al., 2022) used in the 2021 seismic hazard model for Slovenia: the smoothed seismicity model – the point sources are the centres of 10x10 km grid cells (grey); the area source model (blue); and the seismogenic fault source model: fault traces and fault plane surface projections (red).



Slika 3: Logično drevo za slovenski model potresne nevarnosti ima 1377 vej; njihove uteži so podane z rdečimi vrednostmi.

Figure 3: Logic tree of the Slovenian PSHA model with 1377 branches

slovenski model potresne nevarnosti ima 1377 vej (slika 3), ki predstavljajo alternativne vrednosti najplivnejših parametrov v modelu potresnih izvorov in modelu pojemanja pospeška.

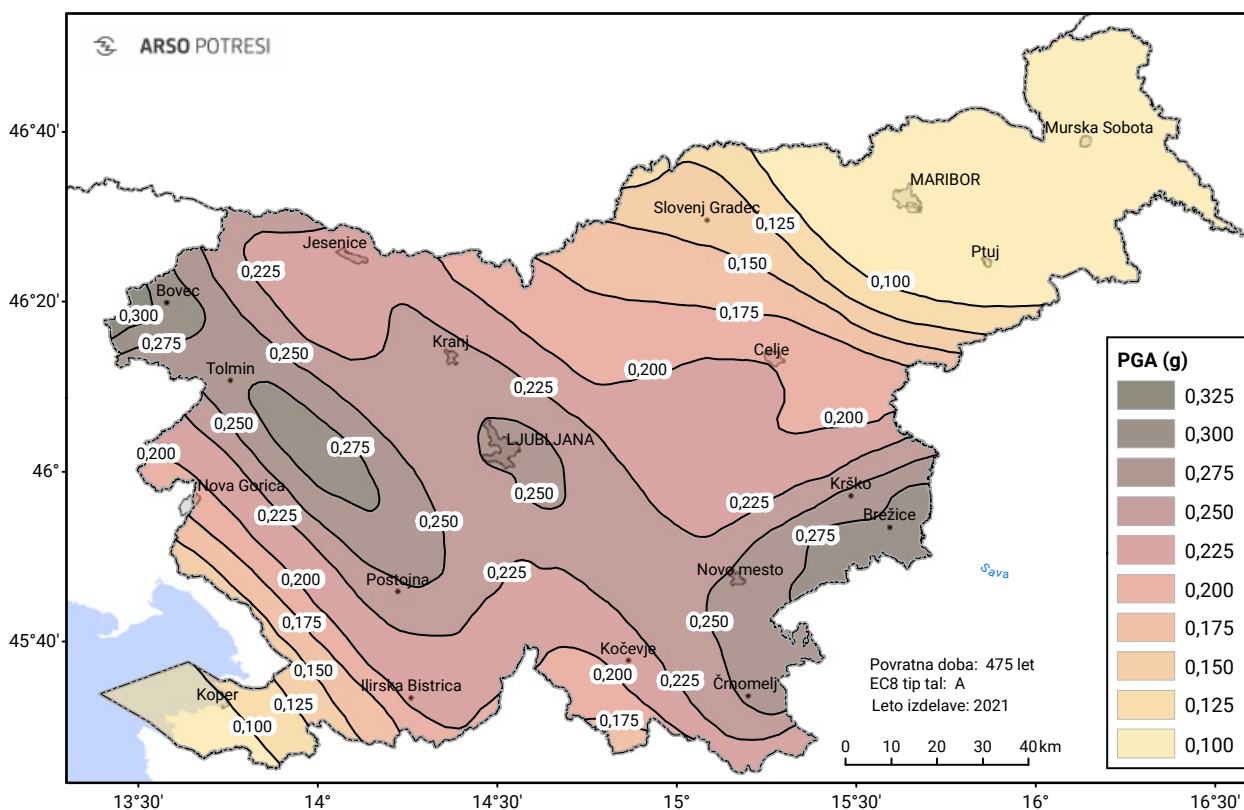
## NOVA KARTA POTRESNE NEVARNOSTI SLOVENIJE

Nove izračune potresne nevarnosti Slovenije smo predstavili s karto projektnega pospeška tal (PGA) (slika 4) in z desetimi kartami spektralnih pospeškov za trdna tla (tla vrste A po EC8) in za povratno dobo 475 let (SIST EN 1998-1:2005). Karto projektnega pospeška tal smo naredili tako, da smo izračunane vrednosti vršnega pospeška razdelili na deset razredov širine 0,025 g (od 0,100 g do 0,325 g) in jih zaokrožili na zgornjo mejo razreda. Vršne pospeške, manjše od 0,100 g, v severovzhodni in jugozahodni Sloveniji smo uvrstili v razred 0,100 g. Razredi na karti so prikazani z barvno lestvico, ki jo lahko reproduciramo tudi v črno-beli tehniki in je zato primerna za ljudi, ki ne morejo zaznavati razlik med barvami (Cramer, 2021). Karta (ARSO, 2021) je priloga Nacionalnega dodatka EC8 (SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005), v katerem se bo v prehodnem obdobju dveh let uporabljala kot projektni pospešek tal skupaj z do zdaj veljavno karto potresne nevarnosti (Lapajne in sod., 2001).

Za izbrane lokacije smo izračunali tudi krivulje potresne nevarnosti in spektre enotne potresne nevarnosti. V okviru tega prispevka prikazujemo le karto projektnega pospeška tal, vsi izdelki pa so dostopni v spletnem pregledovalniku na spletni strani ARSO (ARSO, 2022). V pregledovalniku so prikazani nova uradna karta projektnega pospeška tal, pa tudi informativne karte pospeška tal za povratno dobo 475 let in različne spektralne čase ter percentilne vrednosti in karte za različne povratne dobe (Lapajne in sod., 1995b). Dostopni so tudi spektri in krivulje potresne nevarnosti za večje kraje v Sloveniji.

Večja potresna nevarnost je v zahodni Sloveniji in v pasu, ki poteka čez celotno Slovenijo od severozahoda do jugovzhoda. Projektni pospešek tal doseže največjo vrednost (0,325 g) zahodno od Bovca na meji z Italijo, kar je posledica velike pretekle potresne aktivnosti v Furlaniji in aktivnih prelomov na tem območju. Pospešek 0,300 g zajema območje okrog Idrije, ki sovpada z nekaterimi pomembnimi aktivnimi prelomi in obsega tudi najbolj verjetno lokacijo najmočnejšega potresa v Sloveniji, ki se je zgodil leta 1511 z navorno magnitudo 6,4 (Košir in Ceci, 2011). Drugo območje je okolica Brežic in Gorjancev, kjer so zelo pogosti zmerni potresi.





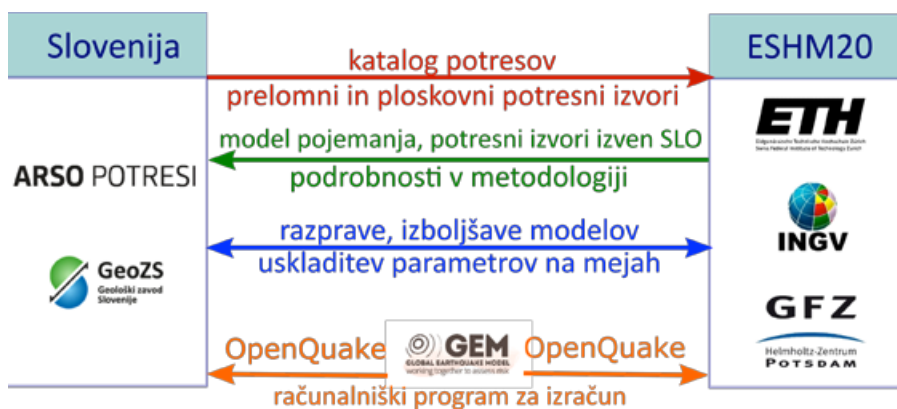
Slika 4: Nova karta potresne nevarnosti Slovenije (2021): projektni pospešek tal na trdnih tleh ( $v_{s,30} = 800$  m/s) za povratno dobo 475 let

Figure 4: New seismic hazard map of Slovenia (2021): design ground acceleration on rock ( $v_{s,30} = 800$  m/s) for a 475-year return period

## EVROPSKA KARTA POTRESNE NEVARNOSTI

Prva prizadevanja za oceno potresne nevarnosti na območju celotne Evrope so se začela leta 1992 v okviru svetovnega projekta GSHAP (projekt Globalna ocena potresne nevarnosti, angl. *Global Seismic Hazard Assessment Program*) (Giardini, 1999; Grünthal in sod., 1999). Nacionalni modeli potresne nevarnosti temeljijo na sicer podobnih postopkih, uporabljajo pa različne vhodne podatke in modele, kar lahko povzroči precejšnje razlike na mejah držav. Za odpravljanje takih razlik je bil leta 2007 zasnovan

projekt Usklajevanje potresne nevarnosti v Evropi (angl. *Seismic Hazard Harmonization in Europe – SHARE*), ki je zajel širše območje Evrope, pri tem pa upošteval najnovejše podatke, nove pristope pri modeliranju potresnih izvorov in nove modele pojemanja. SHARE je združil vodilne znanstvenike iz 18 evropskih raziskovalnih ustanov v 12 državah. Jedro ekipe je oblikovalo več kot 50 raziskovalcev – seizmologov, geologov, geodetov, zgodovinarjev, potresnih inženirjev, informatikov, statistikov in komunikologov. Na številnih srečanjih je sodelovalo več kot 250 pomembnih evropskih in svetovnih strokovnjakov. Širok nabor rezultatov v obliki kart, krivulj in spektrov



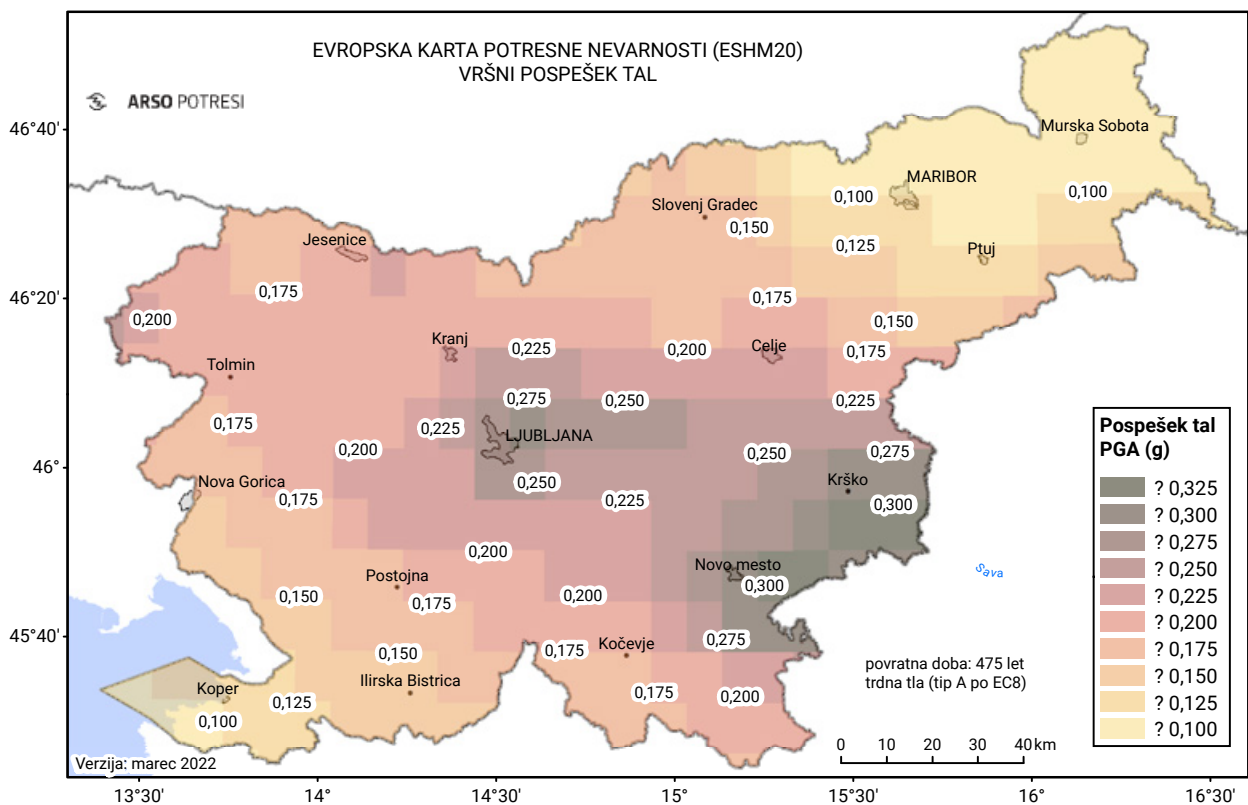
Slika 5: Shema izmenjave podatkov in znanja med ekipama, ki sta pripravljali slovensko in evropsko karto (ESHM20) potresne nevarnosti

Figure 5: Knowledge, data, and model flow between the teams that prepared the Slovenian and European (ESHM20) seismic hazard maps

(ESHM13) je bil leta 2014 prvič dosegljiv prek spleta širši javnosti za znanstveno uporabo, pri načrtovanju odziva na naravne nesreče in v zavarovalništvu (Giardini in sod., 2014; Woessner in sod., 2015). Zaradi hitrega napredka znanosti in številnih novih zapisov močnih potresov je posodabljanje ocene potresne nevarnosti priporočljivo vsakih deset let. Zato so se nekatere raziskovalne skupine v evropskih organizacijah (INGV Rim, GFZ Potsdam, ETH Zürich) povezale z GEM (*Global Earthquake Model Foundation*), EPOS (*European Plate Observing System*) in EFEHR (*European Facilities for Earthquake Hazard and Risk*) in nadaljevale delo. Tako je nastal nov evropski model potresne nevarnosti (ESHM20) (Danciu in sod., 2019, 2021).

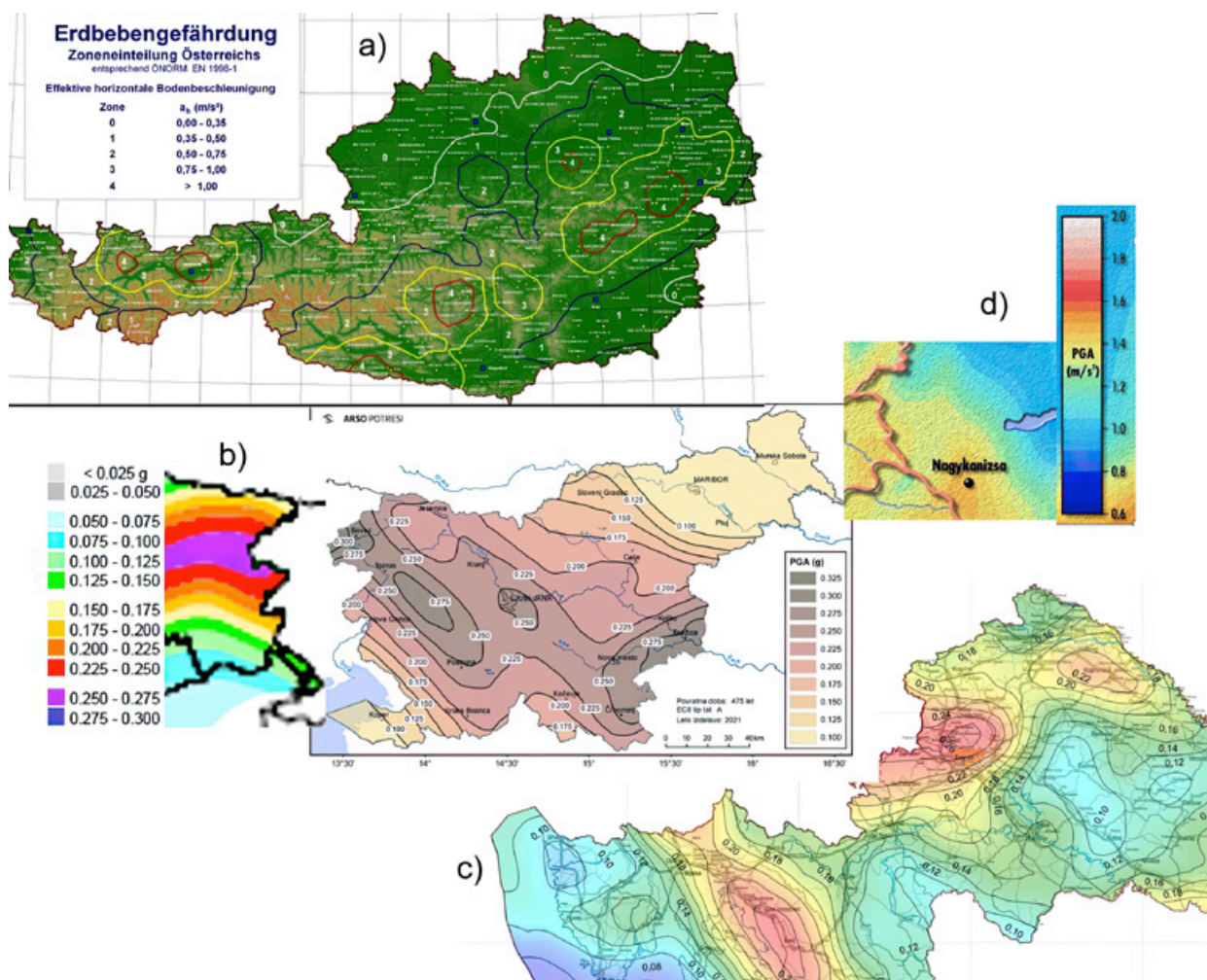
V proces posodabljanja evropskega modela potresne nevarnosti so bili vključeni številni evropski in svetovni strokovnjaki, dejavno pa smo sodelovali tudi slovenski seizmologi. Izmenjave mnenj, usklajevanje vhodnih podatkov in razprave o podrobnostih postopka so

potekale na več regionalnih delavnicah, na katerih je bil tako za izračun nove evropske karte razvit in usklajen model pojemanja pospeška tal (Weatherill in sod., 2020; Kotha in sod., 2020), ki je eden najvplivnejših dejavnikov v izračunu potresne nevarnosti in opisuje pojemanje pospeška tal z oddaljenostjo od (nad)žarišča potresa. Na območjih zunaj meja Slovenije smo privzeli prelomne potresne izvore, uporabljene v evropski karti (Basili in sod., 2013, DISS delovna skupina, 2018). V nabor vhodnih podatkov za izračun evropske karte smo prispevali katalog potresov (Živčič in sod., 2018) in ploskovne ter prelomne potresne izvore za območje Slovenije (Atanackov in sod., 2022). Za izračun potresne nevarnosti smo uporabili računalniški program OpenQuake (Pagani in sod., 2014), ki je bil uporabljen tudi za izračun ESHM20. Shema izmenjave podatkov in znanja med ekipama, ki sta pripravljali slovensko in evropsko karto potresne nevarnosti, je na sliki 5. Vsi rezultati, vhodni podatki in dokumentacija za ESHM13 in ESHM20 so dosegljivi na spletnih straneh (EFEHR, 2022).



**Slika 6:** Evropska karta potresne nevarnosti ESHM20: vršni pospešek tal na trdnih tleh za povratno dobo 475 let (Danciu in sod. 2021). Karta je narejena na podlagi podatkov (ESHM20 delovna skupina, 2022). Za lažjo primerjavo so razredi prikazani z isto barvno lestvico kot slovenska karta (slika 4), prikazane so vrednosti znotraj Slovenije. Točke za izračun rezultatov ESHM20 so razporejene v pravilni mreži, velikosti 0,1 stopinje. Vrednosti PGA so razvrščene v razrede, na karti pa so prikazane na mejah razredov (Šket Motnikar in sod., 2022a).

**Figure 6:** Mean PGA map for rock ground type and 475 year return period from ESHM20 (Danciu et al. 2021). The PGA values within Slovenia's borders are not spatially interpolated, but are grouped into the same classes as on the national map (Figure 4) and shown at the class boundaries. Computational grid points for seismic hazard calculation of ESHM20 are equally spaced at 0.1 degree intervals. The map is based on data (ESHM20 delovna skupina, 2022) (Šket Motnikar et al., 2022a).



Slika 7: Karte potresne nevarnosti Slovenije (v sredini) in sosednjih držav: a) Avstrija (Lenhardt, 2010), b) Italija (Stucchi in sod., 2004), c) Hrvaška (Herak in sod., 2011), d) Madžarska (Toth in sod., 2006). Vse karte prikazujejo projektni pospešek tal za povratno dobo 475 let in trdna tla. Enote na kartah Slovenije, Italije in Hrvaške so v (g), na kartah Avstrije in Madžarske pa v ( $m/s^2$ ).

Figure 7: Earthquake hazard maps of Slovenia (centre) and neighbouring countries: a) Austria (Lenhardt, 2010); b) Italy (Stucchi et al., 2004); c) Croatia (Herak et al., 2011); d) Hungary (Toth et al., 2006). All maps show the design (peak) ground acceleration (PGA) for a return period of 475 years for the rock site. The units on the maps of Slovenia, Italy and Croatia are in gravitational acceleration ( $g$ :  $1 g = 9.81 m/s^2$ ), and on the maps of Austria and Hungary in ( $m/s^2$ ).

Primerjali smo novo slovensko (slika 4) in novo evropsko karto (ESHM20) (slika 6) vršnega pospeška tal za povratno dobo 475 let in trdna tla. Evropsko karto smo narisali na podlagi podatkov (ESHM20 delovna skupina, 2022), ki niso prostorsko interpolirani, ker smo želeli prikazati izvirne vrednosti. Za lažjo primerjavo so vrednosti razvrščene v iste razrede in prikazane z isto barvno lestvico kot slovenska karta. Največje vrednosti ( $0,325 g$ ) so enake kot na slovenski karti, prav tako pas največjih vrednosti potresne nevarnosti poteka od severozahoda proti jugovzhodu države. Vendar ima evropska karta največje vrednosti na območju Brežic in Gorjancev ( $0,325 g$ ), slovenska karta pa ima največje vrednosti v okolici Bovca ( $0,325 g$ ) ter dve enako visoki območji potresne nevarnosti ( $0,300 g$ ): poleg Brežic na vzhodu je še območje okoli Idrije v zahodni Sloveniji.

Sedanja seizmičnost v tem delu zahodne Slovenije je razmeroma nizka, vendar tu potekajo nekateri pomembni aktivni prelomi, ki prispevajo k večji potresni nevarnosti. Na tem območju je tudi nadžarišče najmočnejšega ( $M_w 6,4$ ) znanega slovenskega potresa iz leta 1511 (Košir in Ceci, 2011). Predvsem ta in še nekateri močnejši potresi v zahodni Sloveniji so glavni razlog za večje vrednosti na nacionalni karti kot na ESHM20, saj smo v slovenskem izračunu, ne pa tudi v evropskem, uporabili tudi energijski model glajenja (Lapajne in sod., 2003), s katerim nevarnost izračunamo na podlagi kataloga preteklih močnih potresov.

Glavno vodilo pri razvoju ESHM20 je bila harmonizacija vhodnih podatkov in njihova čezmejna usklajenost na območju Evrope. Evropski model je uporaben kot referenčni model v širšem regionalnem ali



evropskem merilu, kot vhod za ocenjevanje potresne ogroženosti in pri načrtovanju strategij za njeno zmanjševanje. Pomembno lahko prispeva tudi k posodobitvi evropskih predpisov o potresno odpornem projektiranju stavb (EC8). Model ESHM20 ne nadomešča nacionalnih modelov potresne nevarnosti (tudi slovenskega), ki so sestavni del gradbene zakonodaje za potresno odporno projektiranje objektov zaradi majhnega merila, v katerem je narejen.

## KARTE POTRESNE NEVARNOSTI SOSEDNIH DRŽAV

Vse sosednje države imajo kot del zakonodaje o potresno odporni gradnji tudi karte projektnega pospeška tal za povratno dobo 475 let in trdna tla (slika 7). Nobena izmed sosednjih držav svoje uradne karte še ni posodobila. Najstarejšo uradno karto imajo v Avstriji (Lenhardt, 2010, 2019), saj je ista karta priloga standardu že od leta 1997. Uradna karta Italije je nastala leta 2004, uzakonili so jo leta 2006 (Stucchi in sod., 2004; Protezione Civile, 2017). Madžarska karta potresne nevarnosti je nastala leta 2006 (Toth in sod., 2006, 2013), karta Hrvaške pa leta 2011 (Herak in sod., 2011). Leta 2019 so avstrijski seizmologi (Weginger in sod., 2019) predstavili novo karto potresne nevarnosti Avstrije, vendar še ni postala priloga zakonodaji o potresno odporni gradnji. Leta 2021 so italijanski strokovnjaki predstavili nov model potresne nevarnosti za Italijo (Meletti in sod., 2021). Primerjava slovenske karte z uradnimi kartami sosednjih držav pokaže, da so prostorske porazdelitve potresne nevarnosti podobne, absolutne vrednosti pa se razlikujejo. Vrednosti na mejnem območju na karti Avstrije ( $1 \text{ m/s}^2$  ali približno  $0,1 \text{ g}$ ) so izrazito nižje od nove slovenske karte. Vrednosti na kartah Italije ( $0,275 \text{ g}$ ) in Hrvaške ( $0,24 \text{ g}$ ) na mejah s Slovenijo so nekoliko nižje, na uradni karti Madžarske ( $1,5 \text{ m/s}^2$  ali približno  $0,15 \text{ g}$ ) pa nekoliko višje od vrednosti na novi slovenski karti za obmejno območje. Primerjava z ESHM20 pokaže, da so vrednosti pospeška na uradni karti Avstrije in Italije na celotnem ozemlju teh držav nižje od evropske karte. Na karti potresne nevarnosti Hrvaške so vrednosti pospeška primerljive z evropsko, nekoliko različna pa je prostorska porazdelitev območij večje potresne nevarnosti. Vrednosti na madžarski karti so na vsem območju večje od ESHM20, več je tudi območij povečane potresne nevarnosti.

Razlike so posledica različnih pristopov k modeliranju seizmičnosti, drugačne opredelitve in

parametrizacije potresnih izvorov ter različnih vrst in kakovosti vhodnih podatkov, pa tudi različnih modelov pojemanja pospeška z oddaljenostjo od žarišča potresa. Modeli pojemanja so se v zadnjih dveh desetletjih zelo spremenili, zato vemo, da so v preteklosti podcenjevali potresno nevarnost.

## SKLEPNE MISLI

Z novim modelom potresne nevarnosti Slovenije smo omogočili izračun nove karte projektnega pospeška tal, ki je v skladu z zahtevami evropskega standarda EC8 za potresno odporno gradnjo. Karta je priloga Nacionalnega dodatka EC8 (SIST EN 1998-1 : 2005/oA101:2005), v katerem se bo v prehodnem obdobju dveh let uporabljala kot projektni pospešek tal skupaj z dosedanjo uradno karto potresne nevarnosti (Lapajne in sod., 2001).

Potresno nevarnost smo predstavili s kartami, krivuljami in spektri potresne nevarnosti. Rezultati so javnosti na voljo v spletnem pregledovalniku na spletnih straneh ARSO (ARSO, 2022).

Razvoj slovenske karte potresne nevarnosti je potekal hkrati s projektom posodobitve evropske karte (Danciu in sod., 2019, 2021). Skupaj s strokovnjaki evropskega projekta smo usklajevali metodologijo in vhodne podatke za ozemlje Slovenije.

Evropski model je uporaben kot referenčni model v širšem regionalnem ali evropskem merilu, kot vhod pri ocenjevanju potresne ogroženosti in pri načrtovanju strategij za njeno zmanjševanje. Pomembno lahko prispeva tudi k posodobitvi evropskih predpisov o potresno odpornem projektiranju stavb (EC8). Slovenska in evropska karta potresne nevarnosti sta narejeni na podlagi sodobnih metod modeliranja seizmičnosti, najnovejših vhodnih podatkov in modelov pojemanja pospeška z oddaljenostjo od nadžarišča. Zato sta primerljivi glede ocen pospeška tal, slovenska karta pa je izračunana v bolj podrobnem merilu.

Vse sosednje države imajo kot del zakonodaje o potresno odporni gradnji tudi karte projektnega pospeška tal za povratno dobo 475 let in trdna tla. Vrednosti na kartah so ocene, izračunane s postopkom verjetnostnega ocenjevanja. Primerjava z novo slovensko karto pokaže precejšnje razlike v vrednostih na mejnih območjih. Karte so nastale v različnih obdobjih, med najstarejšo (avstrijsko) in najnovejšo (slovensko) karto je minilo več kot 20 let. Razlike



med kartami so zato posledica različnih pristopov k modeliranju seizmičnosti oziroma potresnih virov, različnih vrst in kakovosti vhodnih podatkov in uporabe različnih modelov pojemanja. Zaradi hitrega napredka znanosti in številnih novih zapisov močnih potresov je posodabljanje ocene potresne nevarnosti priporočljivo vsaj vsakih deset let.

## ZAHVALA

Pri pripravi vhodnih podatkov za nov model potresne nevarnosti smo tesno sodelovali s strokovnjaki Geološkega zavoda Slovenije. Modela prelomnih in ploskovnih potresnih virov, ki so ju pripravili Jure Atanackov, Petra Jamšek Rupnik in sodelavci, sta pomembna sestavina nove karte. Razvoj slovenskega

modela potresne nevarnosti in izračun novih kart sta potekala hkrati s projektom nadgradnje evropskega modela potresne nevarnosti, kar je omogočilo izmenjavo in usklajevanje vhodnih podatkov ter razpravo o podrobnostih postopka z evropskimi strokovnjaki. Najlepše se zahvaljujemo Laurentiu Danciu za dolgoletno podporo pri razvoju slovenskega modela in uporabi računalniškega programa OpenQuake. Vanja Kastelic je s svojim obširnimi znanjem pomagala pri parametrizaciji prelomnih potresnih virov, Michele Carafa nam je svetoval o določitvi seizmičnega deleža premikov ob prelomih, Graeme Weatherill pa je prijazno posredoval podrobnosti o modelu pojemanja. Hvala tudi Gregorju Rajhu za izdelavo uporabnih programov python, ki so olajšali pretvorbo podatkov v standardizirano obliko.

## Viri in literatura

1. ARSO, 2021. Potresna nevarnost Slovenije – Projektni pospešek tal. Karta za tisk. [http://potresi.arso.gov.si/doc/dokumenti/Karta\\_potresne\\_nevarnosti\\_2021.jpg](http://potresi.arso.gov.si/doc/dokumenti/Karta_potresne_nevarnosti_2021.jpg).
2. ARSO, 2022. Potresna nevarnost Slovenije – Spletni pregledovalnik. Agencija Republike Slovenije za okolje. <https://gis.arso.gov.si/portal/apps/opsdashboard/index.html#/48ad6a51977c4ee886722a3c09c4f470?locale=sl>.
3. Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Celarc, B., Novak, M., Milanič, B., Markelj, A., Bavec, M., Kastelic, V., 2021a. Database of Active Faults in Slovenia: Compiling a New Active Fault Database at the Junction Between the Alps, the Dinarides and the Pannonian Basin Tectonic Domains. *Front. Earth Sci.* 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.604388>.
4. Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Celarc, B., Jež, J., Novak, M., Milanič, B., Markelj, A., 2021b. Tolmač potresnih virov in ocenjevanje geološko določenih parametrov za karto potresne nevarnosti Slovenije. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana, 139 str.
5. Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Zupančič, P., Šket Motnikar, B., Živčič, M., Čarman, M., Milanič, B., Kastelic, V., Rajh, G., Gosar, A., 2022. Seismogenic fault and area sources for probabilistic seismic hazard model in Slovenia. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.940100>.
6. Basili, R., Kastelic, V., Demircioglu, M. B., Garcia Moreno, D., Nemser, E. S., Petricca, P., Sboras, S. P., Besana-Ostman, G. M., Cabral, J., Camelbeeck, T., Caputo, R., Danciu, L., Domac, H., Fonseca, J., Garcia-Mayordomo, J., Giardini, D., Glavatic, B., Gulen, L., Ince, Y., Pavlides, S., Sesetyan, K., Tarabusi, G., Tiberti, M. M., Utkucu, M., Valensise, G., Vanneste, K., Vilanova, S., Wössner, J., 2013. The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE. <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf>. <https://doi.org/10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF>.
7. Cornell, C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1583–1606.
8. Crameri, F., 2021. Scientific colour maps (7.0.1). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5501399>, 16. 3. 2022.
9. Danciu, L., Hiemer, S., Nandan, S., Weatherill, G., Lammers, S., Rovida, A., Antonucci, A., Basili, R., Carafa, M. M. C., Kastelic, V., Maesano, F., Tiberti, M., Sesetyan, K., Vilanova, S., Beauval, C., Bard P.-Y., Cotton, F., Wiemer, S., Giardini, D., 2019. Status, Milestones and Next Activities on the Development of the 2020 European Seismic Hazard Model (ESHM20), (2019), *Geophys Res Abstr.* Vol. 21, p1-1. 1p.
10. Danciu, L., Nandan, S., Reyes, C., Basili, R., Weatherill, G., Beauval, C., Rovida, A., Vilanova, S., Sesetyan, K., Bard, P.-Y., Cotton, F., Wiemer, S., Giardini, D., 2021. The 2020 update of the European Seismic Hazard Model: Model Overview. EEFHR Technical Report 001, v1.0.0. <https://doi.org/10.12686/a15>.
11. DISS delovna skupina, 2018. Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, 30. 11. 2021. <https://doi.org/10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1>.
12. EEFHR, 2022. The European Facilities for Earthquake Hazard and Risk - Earthquake hazard across Europe. <http://hazard.efehr.org/en/home/>.
13. ESHM20 delovna skupina, 2022. <http://hazard.efehr.org/en/hazard-data-access/hazard-maps/>.
14. Giardini, D., 1999. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)–1992/1999. *Ann di Geofis* 42: 957–974. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1992.tb00609.x>.
15. Grünthal, G., GSHAP Region 3 delovna skupina, 1999. Seismic hazard assessment for Central, North and Northwest Europe: GSHAP Region 3. *Ann. Geophys.* <https://www.annalofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/3783>. <https://doi.org/10.4401/ag-3783>.
16. Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančič, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović, I., 2011. Republika Hrvatska – Karta potresnih područja. Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Geofizički odsjek. <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>.
17. Kotha, S. R., Weatherill, G., Bindi, D., 2020. A regionally-adaptable ground-motion model for shallow crustal earthquakes in Europe. *Bull Earthquake Eng.* <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00869-1>.
18. Košir, M., in Cecić, I., 2011. Potres 26. marca 1511 v luči novih raziskav (The Earthquake on 26 March 1511 – Interpretation of Some Unknown Historical Sources). *Idrijski razgledi* 56(1): 90–104.
19. Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 1995a. Priprava novih kart potresne nevarnosti Slovenije. *Ujma* 9, 178–181.
20. Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 1995b. Pogostost potresov v Sloveniji. *Ujma* 9, 156–159.
21. Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 2001. Nova karta potresne nevarnosti – projektni pospešek tal namesto intenzitete. *Gradbeni vestnik* 50, 140–149.

22. Lapajne, J. K., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 2003. PSHA methodology for distributed seismicity, BSSA, Vol. 93, No. 6, 2502–2515.
23. Lenhardt, W., 2010. Erdbebengefährdung Zoneinteilung Österreichs. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Dunaj. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/geophysik/erdbebengefaehrungs-karte-in-hoher-aufloesung>.
24. Lenhardt, W., 2019. Entwicklung der Erdbebenorm. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Dunaj. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/erdbeben/erdbeben-in-oesterreich/entwicklung-der-erdbebenorm>.
25. Meletti, C., Marzocchi, W., D'Amico, V., Lanzano, G., Luzi, L., Martinelli, F., Pace, B., Rovida, A., Taroni, M., Visini, F., in MPS19 delovna skupina: The new Italian Seismic Hazard Model (MPS19). *Annals of Geophysics*, 64 (1), 515 doi:10.4401/ag-8579, 2021.
26. Paganì, M., Monelli, D., Weatherill, G., Danciu, L., Crowley, H., Silva, V., Henshaw, P., Butler, L., Nastasi, M., Panzeri, L., Simionato, M., Vigano, D., 2014. OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismol Res Lett* 85:692-702. <https://doi.org/10.1785/0220130087>.
27. Poljak, M., Živčič, M., Zupančič, P., 2000. The Seismotectonic Characteristics of Slovenia. *Pure and Applied Geophysics*, 157(1), 37–55. <https://doi.org/10.1007/PL00001099>.
28. Protezione Civile, 2017. Io non rischio – I don't take risks communication campaign: Seismic hazard. <https://iononrischio.protezionecivile.it/en/earthquake/interactive-maps/seismic-hazard/>.
29. SIST EN 1998-1:2005 - Evrokod 8, 2005. Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij - 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, slovenski standard, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2005 - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, angl. standard, I.
30. SIST EN 1998-1:2005/oA101:2005 - Evrokod 8, 2005. Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij - 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe : nacionalni dodatek, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana.
31. Stucchi, M., Meletti, C., Montaldo, V., Akinci, A., Faccioli E., Gasperini, P., Malagnini, L., Valensise, G., 2004. Pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale MPS04 [Data set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/sh/mps04/ag>.
32. Šket Motnikar, B., Zupančič, P., Živčič, M., Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Čarman, M., Kastelic, V., Danciu, L., Gosar, A., Carafa, M. M. C., Weatherill, G., Rajh, G., Basili, R., 2021. Development of a new seismic hazard map of Slovenia (2021) and interaction with the European Seismic Hazard Model ESHM20. V: 37th General Assembly of the European Seismological Commission, 19-24 September 2021, Book of abstracts. Athens, 262–263.
33. Šket Motnikar, B., Zupančič, P., Živčič, M., Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Čarman, M., Danciu, L., Gosar, A., 2022a. The 2021 seismic hazard model for Slovenia (SHMS21): overview and results. *Bull Earthquake Eng* (2022). <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01399-8>.
34. Šket Motnikar, B., Zupančič, P., Živčič, M., Atanackov, J., Jamšek Rupnik, P., Čarman, M., Kastelic, V., Gosar, A., 2022b. Nov model potresne nevarnosti Slovenije (2021). V Kuhar, M., Vreča, P., Zupančič, P., Čarman, M., Šraj, M., Triglav Čekada, M., Skok, G., Ličer, M., Stopar, B., Čop, R., (uredniki), Raziskave s področja geodezije in geofizike 2021 : zbornik del. 27. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 27. januar 2022. Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko. [http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2022/SZGG\\_2022\\_Sket\\_in\\_dr.pdf](http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2022/SZGG_2022_Sket_in_dr.pdf).
35. Tóth, L., Győri, E., Mónus, P., Zsíros, T., 2006. SEISMIC HAZARD IN THE PANNONIAN REGION. V Pinter, N., Gyula, G., Weber, J., Stein, S., Medak, D. (uredniki) *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards*. Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, vol 61. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4235-3\\_25](https://doi.org/10.1007/1-4020-4235-3_25).
36. Tóth, L., Győri, E., Mónus, P., Zsíros, T., 2013. Seismic hazard in Hungary. Kövesligethy Radó Seismological Observatory, Institute of Earth Physics and Space Science, 2013. <http://www.seismology.hu/index.php/en/seismicity/seismicity-and-seismic-hazard/24-seismic-hazard-in-hungary>.
37. Weatherill, G., Kotha, S. R., Cotton, F., 2020. A regionally-adaptable "scaled backbone" ground motion logic tree for shallow seismicity in Europe: application to the 2020 European seismic hazard model. *Bull Earthquake Eng* 18, 5087–5117. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00899-9>.
38. Weginger, S., Jia, Y., Papi-Isaba, M.d.P., Lenhardt, W., Hausmann, H., 2019. Entwicklung einer regionalen Erdbebengefährdungskarte für Österreich. 16. D-A-CH Tagung Erdbebeningenieurwesen & Baudynamik (D-A-CH 2019) 26. in 27. september 2019, Universität Innsbruck, 27–34.
39. Woessner, J., Danciu, L., Giardini, D., in SHARE konzorcij, 2015. The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results, *Bull. Earthq. Eng.*, doi:10.1007/s10518-015-9795-1.
40. Živčič, M., Cecić, I., Čarman, M., Jesenko, T., Ložar Stopar, M., Pahor, J., 2018. Earthquake catalogue KPN2018 of Slovenia and surrounding, rev. 3, Agencija RS za okolje (ARSO), Urad za seizmologijo, Ljubljana.