

# VPLIV ŽARIŠČNIH MEHANIZMOV POTRESOV 1998 IN 2004 V KRNSKEM POGORJU NA NJUNI MAKROSEIZMIČNI POLJI

**dr. Andrej Gosar**

Agencija Republike Slovenije za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Vojkova 1b, SI – 1000 Ljubljana, Slovenija in Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta  
andrej.gosar@gov.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1511-1021>

DOI: 10.3986/NN0508

UDK: 550.34(234.323.6)

## IZVLEČEK

### **Vpliv žariščnih mehanizmov potresov 1998 in 2004 v Krnskem pogorju na njuni makroseizmični polji**

Potresa v Krnskem pogorju sta nastala le 2 km narazen na istem prelomu, vendar sta njuna žariščna mehanizma nekoliko različna. Primerjava makroseizmičnih polj je pokazala presenetljive razlike, ki jih ni mogoče pojasniti z lokalnimi vplivi. Da bi pojasnili morebiten vpliv na razlike v porazdelitvi poškodb, smo raziskali vzorec izsevanja potresnih valov. Največje intenzitete so bile ugotovljene v smeri velikih amplitud SH komponente (Lovejevi valovi), ki imajo pri obeh potresih znatno različno orientacijo. Po drugi strani kaže radialna P smer, ki je za zmični mehanizem potresa 1998 skoraj povsem simetrična, da je majhna reverzna komponenta potresa 2004 povzročila izrazito povečano amplitudo v JZ smeri. Tu se nahajata dve naselji, z višjo intenziteto, čeprav je bil potres po magnitudi šibkejši. Navkljub kompleksnosti obeh makroseizmičnih polj, lahko razlike v opazovanih intenzitetah pojasnimo z različnimi vzorci izsevanja potresnih valov.

## KLJUČNE BESEDE

seizmologija, potres, žariščni mehanizem, makroseizmika, učinki potresa, Krnsko pogorje

## ABSTRACT

### **Influence of focal mechanisms of 1998 and 2004 earthquakes in Krn Mountains on their macroseismic fields**

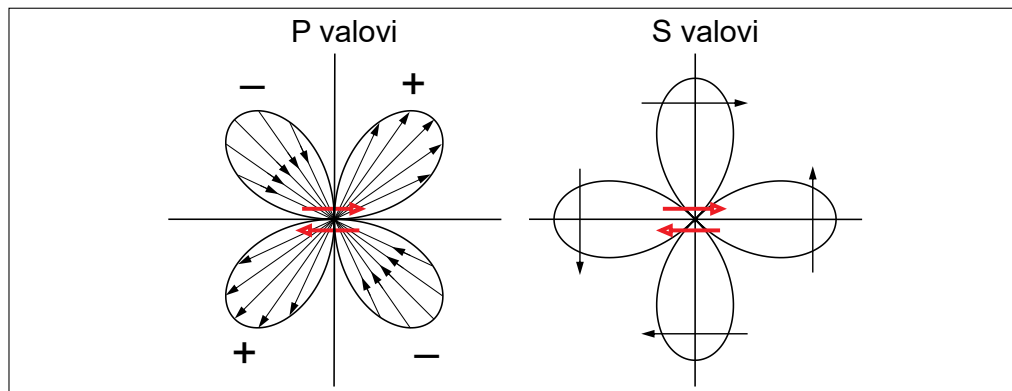
Both earthquakes in the Krn Mountains occurred only 2 km apart on the same fault, but their focal mechanisms were slightly different. Comparison of macroseismic fields showed unexpected differences which cannot be explained by site effects. Therefore, the radiation patterns were studied to explain their possible influence on the variations in damage distribution. The highest intensities were observed in directions of large amplitude lobes in SH component (Love waves), which have significantly different orientation for both events. On the other hand, radial P direction, which is almost purely symmetrical for the strike-slip mechanism of 1998 event, showed for 2004 event that its small reverse component has resulted in a very pronounced amplitude lobe in SW direction. Two settlements are located there, which expressed higher intensities, although it has lower magnitude. Despite both macroseismic fields are very complex, unusual differences in observed intensities can be explained by different radiation patterns.

## KEY WORDS

seismology, earthquake, focal mechanism, macroseismics, earthquake effects, Krn Mountains



potresnih valov in opazovanim makroseizmičnim poljem učinkov potresa. Vpliv lastnosti potresnega vira na makroseizmično polje so že proučevali za različne potrese (npr. Sirovich in Pettanati 2009; Sirovich s sodelavci 2009).



Slika 2: Vzorec sevanja potresnih valov za radialno komponento P-valov (levo) in transverzalno komponento S-valov (desno) (po Aki in Richards 2002; Bormann in sod. 2012).

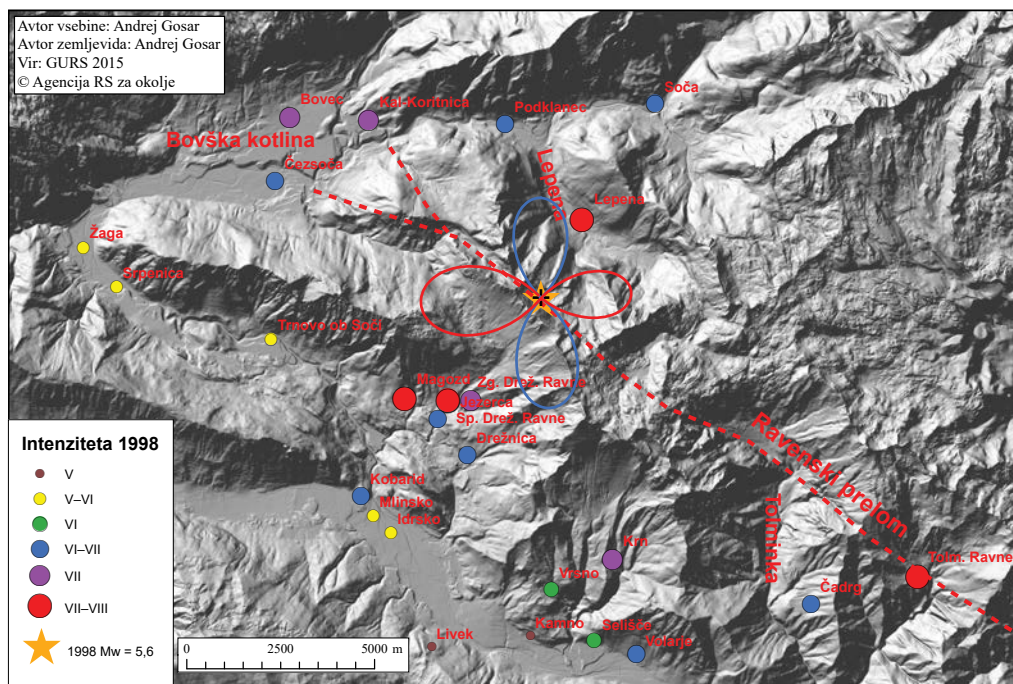
## 2 Učinki potresov v Krnskem pogorju in njuni makroseizmični polji

V nadžariščnem območju, za katerega je zaradi visokogorja značilna dokaj redka poseljenost, je bila določitev intenzitet omejena na naselja, ki se večinoma nahajajo v rečnih dolinah ali kotlinah in v Drežniškem kotu (slika 1). Za potres 1998 z navorno magnitudo 5,6 so bile najvišje intenzitete VII–VIII po Evropski potresni lestvici EMS-98 (Grünthal 1998) ugotovljene v Lepeni, Magozdu, Spodnjih Drežniških Ravnah in Tolminskih Ravnah (Zupančič s sodelavci 2001). V Bovški kotlini je bila intenziteta VII v Bovcu in Kalu - Koritnici ter VI–VII v Čezsoči (preglednica 1, slika 3). Potresu 1998 je sledila obsežna obnova poškodovanih objektov, ki pa še ni bila končana, ko je nastal potres 2004 z navorno magnitudo 5,2. To je deloma vplivalo na opredelitev intenzitet drugega potresa (Vidrih in Ribičič 2004). Najvišje intenzitete VI–VII EMS-98 so bile ugotovljene v Bovcu, Čezsoči in Vodencah (preglednica 1, slika 6), ki so vsi v Bovški kotlini.

Primerjava intenzitet obeh potresov za vsa naselja v nadžariščnem območju (preglednica 1) pokaže nekatere nepričakovane značilnosti obeh makroseizmičnih polj. Čeprav je bil potres 1998 po magnitudi precej močnejši in je imel tudi za eno stopnjo večjo najvišjo intenziteto, se ta razlika ne kaže enakomerno v vseh naseljih. Za potres 1998 so bile najvišje intenzitete jugozahodno (Magozd in Spodnje Drežniške Ravne) in severovzhodno (Lepena) od nadžarišča na epicentralni oddaljenosti manjši od 2,5 km. Le Tolminske Ravne se nahajajo 7 km proti jugovzhodu (slika 3), vendar to naselje leži na ledeniški moreni, kjer so pričakovani lokalni vplivi, ki so verjetno botrovali večjim poškodbam. Po drugi strani so bile za potres 2004 vse ugotovljene najvišje intenzitete v naseljih Bovške kotline (Bovec, Čezsoča in Vodena), medtem ko so bile intenzitete v Magozdu in Lepeni za 1,5 stopnje nižje, v Spodnjih Drežniških Ravnah pa za 2 stopnji nižje kot leta 1998 (slika 6). Za Tolminske Ravne leta 2004 ni bilo zbranih dovolj podatkov za oceno intenzitete. Razlika v intenzitetah v Bovcu in Kalu - Koritnici je bila eno stopnjo, v Čezsoči pa je bila za oba potresa ugotovljena enaka intenziteta. Za dve naselji (Srpenica in Trnovo ob Soči) pa je bila intenziteta za potres 2004 celo višja za 0,5 stopnje (preglednica 1), čeprav je bil po magnitudi šibkejši.

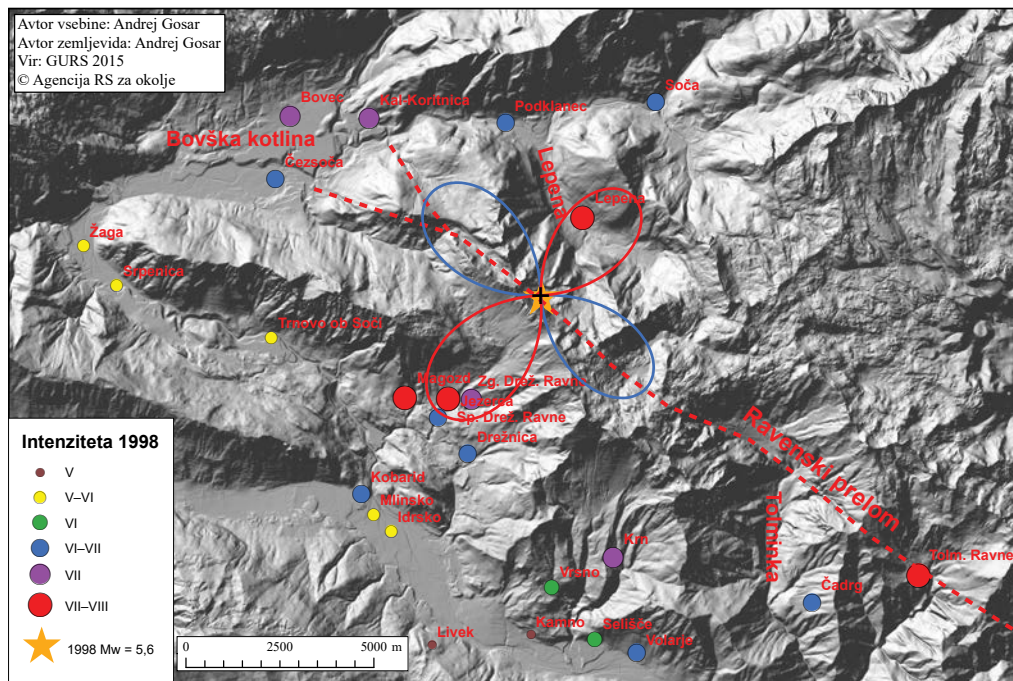
Preglednica 1: Intenzitete (EMS-98) potresov v Krnskem pogorju v nekaterih naseljih v Zgornjem Posočju in njihova razlika (2004–1998).

naselje	intenziteta 1998	intenziteta 2004	razlika v intenziteti
Bovec	VII	VI-VII	-0,5
Čezsoča	VI-VII	VI-VII	0,0
Kal - Koritnica	VII	VI	-1
Vodenca	ni podatka	VI-VII	
Lepena	VII-VIII	VI	-1,5
Soča	VI-VII	VI	-0,5
Magozd	VII-VIII	VI	-1,5
Spodnje Drežniške Ravne	VII-VIII	V-VI	-2,0
Zgornje Drežniške Ravne	VII	V-VI	-1,5
Drežnica	VI-VII	VI	-0,5
Kobarid	VI-VII	VI	-0,5
Tolminske Ravne	VII-VIII	ni podatka	
Žaga	V-VI	V-VI	0,0
Srpenica	V-VI	VI	+0,5
Trnovo ob Soči	V-VI	VI	+0,5
Vrsno	VI	V-VI	-0,5



Slika 3: Diagram radialne komponente za potres 1998 in podatki o intenzitetah v nadžariščnem območju. Pozitivne amplitude so prikazane rdeče in negativne amplitude modro.





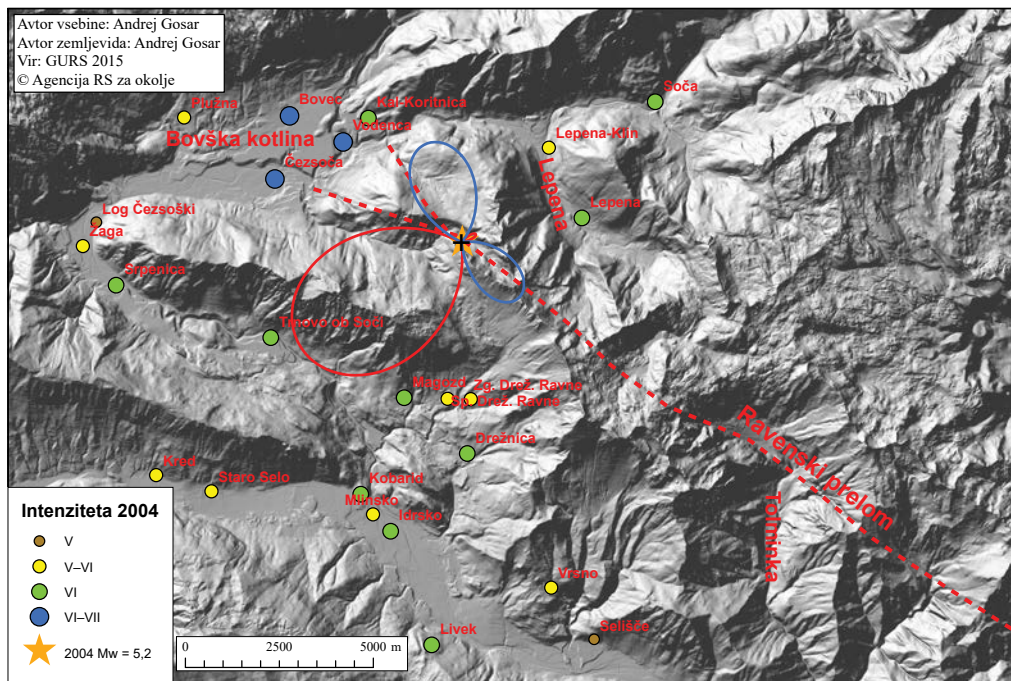
Slika 5: Diagram SH komponente za potres 1998 in podatki o intenzitetah v nadžariščnem območju. Pozitivne amplitude so prikazane rdeče in negativne amplitude modro.

in se podajo številčno ali kot grafični prikaz žarišnega mehanizma (slika 1). Uporablja se predvsem smer prvega odmika na navpični komponenti seizmograma pri vstopu potresnega valovanja. Za opis sevalne funkcije se uporablja šest skalarnih produktov (Aki in Richards 2002). Grafična predstavitev žariščnih mehanizmov ne poudari nujno dovolj razlike v vzorcu sevanja, zato je treba te izračunati in izrisati kot amplitudne oble za vse tri komponente.

### 3.2 Vzorci izsevanja potresnih valov za potresa 1998 in 2004

Razlika v žariščnih mehanizmih obeh potresov se zdi na prvi pogled razmeroma majhna (slika 1). Zato sem iz njih izračunal amplitude za vse tri pravokotne komponente in jih prikazal grafično na kartah skupaj z makroseizmičnimi podatki. Pozitivne amplitude so prikazane rdeče, negativne pa modro. Za potres 1998 so vzorci sevanja na slikah 3-5, za potres 2004 pa na slikah 6-8. Za vse slike je uporabljeno enako merilo amplitud, kar omogoča primerjavo.

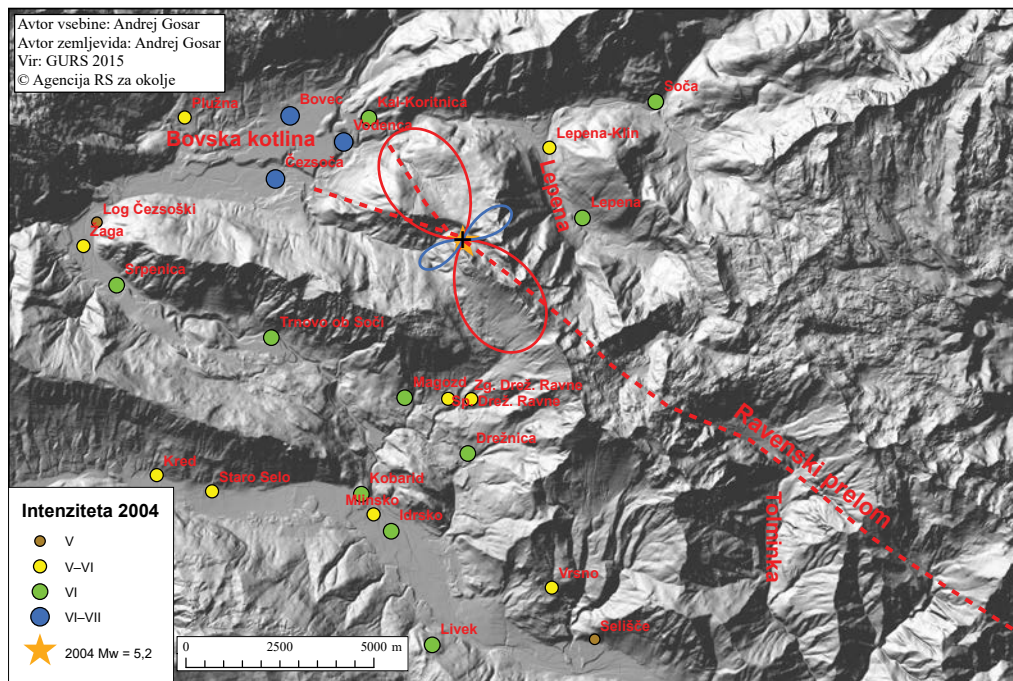
Vzorci izsevanja za potres 1998 odražajo skoraj popolnoma desnozični žariščni mehanizem ob prelomu dinarske smeri s skoraj navpično prelomno ploskvijo (vpad je  $86^\circ$  proti severovzhodu) in so zato zelo podobni idealiziranemu primeru iz slike 2. Radialna P (slika 3) in SV (slika 4) komponenti imata najmanjše amplitude v smeri preloma in največje amplitude pod kotom  $45^\circ$  glede na prelom. Predznak pozitivnih in negativnih amplitud v severovzhodni smeri je obraten glede na P smer. Razlika v obliki obel je zelo majhna, le zahodna obla v P smeri je nekoliko večja od vzhodne. Po drugi strani so v SH smeri (slika 5) največje amplitude v smeri striga in pravokotno nanj. Amplitude v vseh štirih smereh so precej večje v primerjavi s P in SV smerema. SH smer



Slika 6: Diagram radialne komponente za potres 2004 in podatki o intenzitetah v nadžariščnem območju. Pozitivne amplitude so prikazane rdeče in negativne amplitude modro.

ustreza predvsem Lovejevim valovom, ki so navadno najbolj rušilen del potresnega nihanja tal. Slika 5 zelo jasno pokaže, da so vsa naselja z najvišjimi ugotovljenimi intenzitetami (VII–VIII EMS-98) v smereh štirih največji SH amplitud, kar ustreza ugotovitvi, da je Lovejevo valovanje najbolj rušilen del nihanj tal. V Bovški kotlini sta Bovec in Kal - Koritnica (intenziteta VII) v smeri severozahodne oble največjih amplitud. Tretje naselje (Čezsoča), ki je sicer bližje nadžarišču, pa je imelo nekoliko nižjo intenziteto (VI–VII), kar lahko pojasnimo s tem, da leži zunaj oble največjih amplitud. Enako velja za zaselek Podklanec pri vasi Soča (VI–VII), severno od nadžarišča, ki leži skoraj v smeri najmanjše SH amplitude.

Vzorci izsevanja za potres 2004 zelo jasno pokažejo odstopanje žariščnega mehanizma od čistega desnozmničnega, saj ima še nezanemarljivo reverzno komponento ob strmi prelomni ploskvi (vpad je  $72^\circ$  proti severovzhodu). Sevalni vzorci so zato izrazito nesimetrični. Radialna P komponenta (slika 6) ima največje pozitivne amplitude v jugozahodni smeri in zelo majhne v nasprotni, severovzhodni smeri. V jugozahodni smeri ležita Srpenica in Trnovo ob Soči z intenziteto VI, ki je celo višja od intenzitete V–VI za potres 1998 (preglednica 1). To je presenetljivo, saj gre za sicer po magnitudi šibkejši potres. Po drugi strani je bila v Lepeni na severovzhodni strani preloma intenziteta 2004 precej manjša (VI) v primerjavi z 1998 (VII–VIII). Takšne razlike v makroseizmičnem polju zato verjetno odsevajo izrazito asimetričnost radialne P smeri. Ni pa jasne korelacije med porazdelitvijo poškodb in vzorcem sevanja SV komponente (slika 7). Ta je dokaj simetrična in ima velike pozitivne amplitude v smeri preloma in majhne negativne pravokotno na njo. Vzorec sevanja SH komponente (slika 8) ima največje negativne amplitude v smeri Bovške kotline (zahod–severozahod), vendar usmerjene približno  $30^\circ$  bolj proti zahodu v primerjavi z potresom 1998 (slika 5). To lahko pojasni, zakaj je bila najvišja intenziteta potresa 2004 ne le v Bovcu in Vodencah,



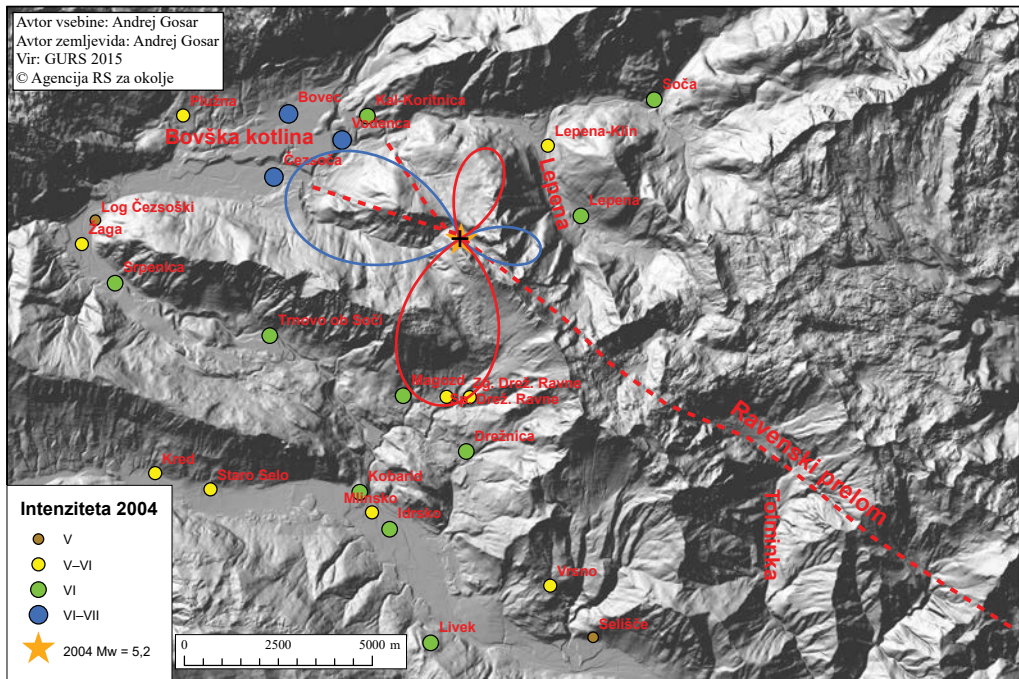
Slika 7: Diagram SV komponente za potres 2004 in podatki o intenzitetah v nadžariščnem območju. Pozitivne amplitude so prikazane rdeče in negativne amplitude modro.

temveč tudi v Čezsoči na južnem obrobju Bovške kotline. Po drugi strani pa leži Kal - Koritnica z nižjo intenziteto (VI) zunaj pozitivne SH oble. Druga največja pozitivna SH obla leži v smeri jug-jugozahod, kjer so bile v Magozdu, Drežnici in Drežniških Ravnah intenzitete VI ali V-VI. Tudi za potres 2004 lahko zaključimo, da so največja potresna nihanja tal in posledično poškodbe povezane s SH smerjo (Lovejevi valovi), z največjimi amplitudami v smeri Bovške kotline. Poleg tega pa je zanimivo povečanje učinkov potresa v dveh krajih na jugozahodu (Srpenica in Trnovo ob Soči), ki se nahajata v smeri močnih amplitud radialne P komponente. To je tudi najbolj izrazit asimetričen pojav sevalnega vzorca potresa 2004.

## 4 Sklep

Makroseizmični podatki vedno vsebujejo določeno stopnjo nezanesljivosti zaradi pomanjkanja podatkov iz nekaterih naselij in subjektivnosti pri ocenjevanju intenzitet. V Zgornjem Posočju so na to vplivali še trije faktorji. Prvi je v dveh zaporednih potresih, ki sta povzročila poškodbe, zaradi česar so ocene intenzitet za drugi potres lahko vplivane od prvega, saj sanacija do leta 2004 še ni bila končana. Drugi faktor predstavljajo izraziti vplivi heterogenih ledeniško-rečnih sedimentov v dolinah in kotlinah, v katerih je prišlo lokalno do izrazitih ojačenj potresnega nihanja tal in resonančnih učinkov s stavbami. Tretji faktor je vpliv zelo neenakomerne poseljenosti v nadžariščnem območju, zaradi katere je makroseizmično polje neenakomerno vzorčeno in opredeljeno. Kljub temu smo s podrobno analizo vzorcev sevanja različnih potresnih valov, ki so posledica razlik žariščnih mehanizmov obeh močnih potresov lahko pojasnili nekatere pomembne razlike v makroseizmičnih poljih obeh potresov.





Slika 8: Diagram SH komponente za potres 2004 in podatki o intenzitetah v nadžariščnem območju. Pozitivne amplitude so prikazane rdeče in negativne amplitude modro.

Zahvala: Avtor se zahvaljuje Ini Cević za makroseizmične podatke obeh potresov. Raziskava je bila izvedena s podporo raziskovalnega programa P1-0011, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost (ARRS).

## 5 Viri in literatura

- Aki, K., Richards, P. G. 2002: Quantitative Seismology. Sausalito. DOI: <https://doi.org/10.1002/gj.3350160110>
- Boatwright, J., Choy, G. L. 1992: Acceleration source spectra anticipated for large earthquakes in north-eastern North America. Bulletin of the Seismological Society of America 82-2.
- Bormann, P., Wendt, S., Starke, U. 2012: Radiation patterns of earthquake fault mechanisms. New Manual of Seismological Observatory Practice: Information Sheet 1.1. Potsdam. DOI: [https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2\\_IS\\_1.1](https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_1.1)
- Cević, I., Živčič, M., Jesenko, T., Kolar, J. 2006: Potresi v Sloveniji leta 2004. Ljubljana.
- Cunningham, D., Grebby, S., Tansey, K., Gosar, A., Kastelic, V. 2006: Application of airborne LiDAR to mapping seismogenic faults in forested mountainous terrain, southeastern Alps, Slovenia. Geophysical Research Letters 33-20. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006GL027014>
- Gosar, A., Stopar, R., Car, M., Mucciarelli, M. 2001: 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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00058-1](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00058-1)

- Gosar, A. 2007: Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes. *Engineering Geology* 91, 2-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.01.008>
- Gosar, A. 2008: Site effects study in a shallow glaciofluvial basin using H/V spectral ratios from ambient noise and earthquake data: The case of Bovec basin (NW Slovenia). *Journal of Earthquake Engineering* 12-1. DOI: <https://doi.org/10.1080/13632460701457140>
- Gosar, A. 2010: Site effects and soil-structure resonance study in the Kobarid basin (NW Slovenia) using microtremors. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10-4. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-761-2010>
- Gosar, A. 2014: Analysis of the impact of fault mechanism radiation patterns on macroseismic fields in the epicentral area of 1998 and 2004 Krn Mountains earthquakes (NW Slovenia). *The Scientific World Journal*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/206843>
- Grünthal, G. 1998: *European Macroseismic Scale 1998*. Luxemburg.
- Kastelic, V., Vrabec, M., Cunningham, D., Gosar, A. 2008: Neo-Alpine structural evolution and present day tectonic activity of the eastern Southern Alps: the case of the Ravne Fault, NW Slovenia. *Journal of Structural Geology* 30-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.03.009>
- Sirovich, L., Pettenati, F. 2009: Validation of a kinematic and parametric approach to calculating intensity scenarios. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 29-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.12.007>
- Sirovich, L., Pettenati, F., Sandron, D. 2009: Source- and site-effects in the intensities of the M 5.4 29 July 2008 earthquake in south Los Angeles. *Seismological Research Letters* 80-6. DOI: <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.6.967>
- Vidrih, R., Ribičič, M. 2004: Potres 12. julija 2004 v zgornjem Posočju – preliminarne geološke in seizmološke značilnosti. *Geologija* 47-2. DOI: <https://doi.org/10.5474/geologija.2004.016>
- Zupančič, P., Cecić, I., Gosar, A., Placer, L., Poljak, M., Živčič, M. 2001: The earthquake of 12 April 1998 in the Krn Mountains (Upper Soča valley, Slovenia) and its seismotectonic characteristics. *Geologija* 44-1. DOI: <https://doi.org/10.5474/geologija.2001.012>