



**Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko**

**<http://www.fgg.uni-lj.si/sugg/>**

**RAZISKAVE S PODROČJA  
GEODEZIJE IN GEOFIZIKE  
2016**

**zbornik del**

22. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 26. januar 2017

## **UREDNIŠKI ODBOR**

Miran Kuhar  
Rudi Čop  
Andrej Gosar  
Mira Kobold  
Polona Kralj  
Matjaž Ličer  
Gregor Skok  
Bojan Stopar  
Polona Vreča  
Martina Čarman

## **RECENZIJA**

Janez Turk  
Jože Rakovec  
Barbara Šket Motnikar  
Stanka Šebela  
Miran Kuhar  
Simona Savšek

## **ORGANIZATOR SREČANJA IN ZALOŽNIK**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova 2, Ljubljana

Naklada: 80 izvodov

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

550.3(497.4)(082)  
528(497.4)(082)

SLOVENSKO združenje za geodezijo in geofiziko. Strokovno  
srečanje (22 ; 2017 ; Ljubljana)

Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016 : zbornik del /  
22. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko,  
Ljubljana, 26. januar 2017 ; [organizator srečanja Fakulteta za  
gradbeništvo in geodezijo ; uredniški odbor Miran Kuhar ... et al.] -  
Ljubljana : Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2017

ISBN 978-961-6884-44-0

1. Kuhar, Miran 2. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Ljubljana)  
288155392

## Predgovor

Letošnji prispevki, predstavljeni na strokovnem posvetu ob vsakoletnem srečanju našega Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, so tudi tokrat objavljeni v tiskani obliki zbornika. So s petih področij, ki so združena v IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics), in so predstavitev nekajletnega sistematičnega dela posameznih raziskovalnih skupin. So pregled doseženega in osnova za nadaljnje delo.

Tudi letošnje vsakoletno srečanje je v tradicionalni obliki, zato se moram v imenu vseh zahvaliti za donacije posameznikom in nekaterim katedram. Vsekakor gre največja zahvala Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo pri Univerzi v Ljubljani, ki omogoča, da društvo deluje v njenih prostorih, da na njenem strežniku domuje njegova spletna stran in da pod njenim okriljem vsako leto izide tudi zbornik.

Obenem velja tudi opozorilo, da lahko do konca meseca decembra pri Finančni upravi Republike Slovenije <<http://www.fu.gov.si/>> oddamo Zahtevo za namenitev dela dohodnine za donacije. Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko je namreč na seznamu upravičencev za donacije s področij visokega šolstva, znanosti in tehnologije. Odločitev za tako obliko donacije ne vpliva na dohodek posameznika kot tudi ne na stopnjo njegove obdavčitve.

V letu 2016 so bili nekateri pomembnejši dogodki s področij geodezije in geofizike, ki bodo vplivali na nadaljnji razvoj stroke in znanosti:

Generalna Skupščina ZN je sprejela resolucijo o nadaljevanju dela na ustvarjanju Globalnega geodetskega referenčnega sestava GGFR (Global Geodetic Reference Frame). To je pomemben mejnik za nadaljnji razvoj geodezije. Vladam posameznih držav je bil namreč predlagan dolgoročni plan za uveljavitev in razširitev GGFR <http://ggim.un.org/>. Komite za razvoj (Visioning Committee) pri IUGG je pripravil predlog nadaljnjega razvoja v letih 2016 – 2023. Ta strateški plan je Svet IUGG (IUGG Council) po obravnavi osnutka in pripomb v novembru 2016 tudi sprejel. <[http://www.ngfweb.no/docs/IUGG\\_StrategicPlan.pdf](http://www.ngfweb.no/docs/IUGG_StrategicPlan.pdf)>

1. decembra 2016 je bila na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani svečano umeščena UNESCO Katedra za zmanjševanje tveganj ob vodnih ujmah (WRDRR). <<http://www.unesco-floods.eu/si/>>

Kot vedno bo srečanje SZGG potekalo s pregledom dela sekcij, ki delujejo na različnih področij. Raznolikost nam daje možnost vpogleda v delovanje strok in nam morda nudi tudi možnost za začetek interdisciplinarnega sodelovanja. Zato vam želim, da v prijetnem enodnevnem druženju pridobite čim širši vpogled v lanskoletno delovanje geodezije in geofizike v Sloveniji in morda ideje za delo ali sodelovanje v letošnjem letu.

predsednik SZGG

ddr. Rudi Čop



## Vsebina

Predgovor.....	3
Stanka Šebela - Spremljanje temperature zraka v turistični jami Lehman Caves (Nevada, ZDA).....	7
I. Cecić, R. Meurers, A. Tertulliani, G. Grünthal, D. Kaiser, J. Pazdirková, I. Sović - Potres 6. maja 1976 v Furlaniji - reevaluacija makroseizmičnih podatkov.....	15
M. Mole, S. Stanič, M. Živec - Meritve hitrosti gibanja zračnih mas v troposferi.....	27
P. Zupančič, G. Rajh, M. Živčič, A. Gosar, M. Čarman - Analiza magnitud in globin žarišč potresov v Sloveniji za namen ocenjevanja potresne nevarnosti.....	39
B. Grašič, P. Mlakar, M. Z. Božnar, D. Popović, D. Kokal, F. Gabrovšek, P. Mlakar, M. Z. Božnar, D. Popović, D. Kokal, F. Gabrovšek - Izvedba in zagotavljanje kakovostnih avtomatskih meritev za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam.....	51
Rudi Čop - Geomagnetne nevihte ob koncu cikla sončnih peg.....	69
K. Kregar, G. Štebe, A. Marjetič - Preverjanje stabilnosti ploskovnega objekta s terestričnim laserskim skeniranjem.....	81
B. Koler, M. Kuhar, P. Pavlovčič Prešeren, B. Stopar, O. Sterle, T. Urbančič - Pregled višinskih datumov Slovenije*.....	93
A. Trobec, A. Šmuc, S. Poglajen, M. Vrabec - Je Obala res tektonsko aktivna? Tektonska geomorfologija potopljenih rečnih korit v Tržaškem zalivu*.....	99
G. Skok, K. Kozjek, M. Dolinar - Objektivna opredelitev podnebnih regij Slovenije**.....	103

---

\* razširjen povzetek  
\*\* povzetek



# Spremljanje temperature zraka v turistični jami Lehman Caves (Nevada, ZDA)

Stanka Šebela \*

## Povzetek

V obdobju od 7. 8. 2015 do 28. 9. 2016 smo v turistični jami Lehman Caves (Nevada, ZDA) na dveh mestih (GBNP 1 in GBNP 2) spremljali temperaturo zraka z urnimi meritvami. Namen je bil ugotoviti vpliv turizma na jamsko okolje. Merilno mesto GBNP 1, ki je bilo ob turistični poti, kaže letna nihanja temperature zraka v razponu od 10,7 do 11,6° C. Povprečna letna temperatura zraka na GBNP 1 je 11,15° C, dnevna nihanja poleti znašajo 0,2° C, pozimi pa ne presežejo 0,1° C. V ne-turističnem delu v podorni dvorani West Room (GBNP 2) je temperatura stabilna skozi celo leto in sicer se giblje okrog 11,1 ° C. Prvo mesto ob turistični poti (GBNP 1) je bližje delno zaprtega prvotnega vhoda v jamo, ki predstavlja krajše (<10 m) navpično brezno, zato na tej lokaciji beležimo izrazitejši padec temperature zraka v zimskem obdobju in višjo temperaturo poleti. Višjo temperaturo zraka poleti v turističnem delu jame je treba pripisati tudi povečanemu turističnemu obisku.

**Ključne besede:** jamska meteorologija, Lehman caves, Nevada, ZDA.

**Keywords:** cave meteorology, Lehman Caves, Nevada, USA.

## Uvod

V okviru bilateralnega projekta BI-US/15-16-054 smo v sodelovanju z Univerzo v Las Vegasu (UNLV, Department of Civil and Environmental Engineering) in Great Basin National Park (GBNP, Nevada) opravljali raziskave jamske mikro-klime v turistični jami v Nevadi Lehman Caves, ki se nahaja v narodnem parku Great Basin. Na podlagi enoletnih (avgust 2015 - avgust 2016) meritev temperature jamske zraka so podani osnovni klimatski parametri kot podlaga nadgradnje študije v trajni monitoring jamskega okolja.

Večina Nevade pripada bazenu Great Basin, ki v hidrološkem smislu predstavlja teren iz katerega ni odtoka površinskih voda v morje. V geološkem smislu je to ozemlje sestavljeno iz dolin in gorskih grebenov, ki jo imenujejo Basin and Range. V Nevadi je več kot 400 gorskih grebenov, ki so usmerjeni v smeri S-J. Med najvišjimi vrhovi na področju Basin and Range sta Telescope Peak (Panamint Range, 3367 m) in Wheeler Peak (Snake Range, 3982 m), najvišji je Boundary Peak (4006 m) na meji med Nevado in Kalifornijo. Zemeljska skorja na področju Basin and Range je bila tektonsko dvignjena in stanjšana. Ekstenzija se je vršila v smeri Z-SZ in V-JV (Collier, 1990; Wernicke et al. 1988). Večina gorskih grebenov je bila nagnjenih proti V ali Z zaradi premikov ob prelomih. V splošnem so gorovja na zahodnem delu Basin and Range mlajša kot tista na vzhodu, saj se je prelamljanje in dviganje selilo proti zahodu.

Basin and Range se razteza preko sedmih zveznih držav ZDA in Mehike. Ekstenzija (v kenozoiku) je zajela 240 km velik teren, ki sega od Lake Mead preko Death Valley do južne Sierra Nevade in se zadnjih 15 milijonov let premika proti zahodu. V začetku je bila ekstenzija velikosti 2,5 cm/leto, v zadnjih 5 milijonih let se je zmanjšala na tretjino.

---

\* ZRC SAZU Inštitut za raziskovanje krasi, Titov trg 2, 6230 Postojna, Slovenija

Ekstenzija take velikosti je povezana s premikanjem kontinentov in tektoniko plošč. Basin and Range je sicer v celoti del severno Ameriške plošče. Pokrajino sestavljajo številni zmični in normalni prelomi. Večina ekstenzije v Basin and Range se vrši ob položnih normalnih prelomih. Zaradi ekstenzije je skorja pod površjem debela le 24 km. Kontinentalna skorja je na robovih debelejša, 40 km pod platojem Kolorada in 48 km pod Sierra Nevado (Collier, 1990). Današnja tektonska aktivnost se vrši ob kvartarnih prelomih v bazenih zapolnjenih z aluvijem.

V narodnem parku Great Basin je več kraških jam, vendar je turistična jama le Lehman Caves. Jama je razvita v apnencih (Pole Canyon) iz srednjega Kambrija, ki so odloženi na Pioche skrilavce. Debelina Pole Canyon apnenca v Snake Range je 550 m.

V Great Basin National Park rastejo najstarejša drevesa na svetu Bristlecone pine, ki so lahko stara tudi 4.950 let (raslo do 1964).

Jama Lehman Caves je zgrajena iz apnencev (Pole Canyon apnenca, Kambrij), ki so delno spremenjeni v marmor. Znotraj Pole Canyon apnencev zasledimo prehajanje od svetlih do temnih, tankih do masivnih karbonatov z manjšimi kvarcitnimi in skrilavimi enotami, kot tudi dolomit, kar so določili v bližnjih gorskih grebenih (Drewes & Palmer 1957). Jama je izredno bogata s kapniki v obliki palet, ki naj bi jih bilo vsaj 300. Vhod v jamo je v nadmorski višini 2130 m pod goro Wheeler Peak (3982 m), ki jo gradijo kvarciti. V jami se poleg kalcitnih kapnikov nahajajo drobni iglasti kristali aragonita in sadre. Debelina apnencev delno spremenjenih v marmor v katerih je razvita jama je 450 m. Današnji vhod v jamo in izhod sta umetno izkopana, vendar je nekoč obstajala povezava s površjem, saj so v stranskem rovu odkrili ostanke živalskih kosti in prisotnosti ljudi. Indijanci naj bi to jamo poznali v obdobju 1000 let našega štetja. Tudi obiskovalci, ki so jamo odkrili, so vanjo prišli po navpičnem rovu iz površja. Odkritelj jame je rudar Absalom S. Lehman, ki jo je našel leta 1885 (Schmidt, 1987).

Na podlagi raziskav stabilnih izotopov kapnikov ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) in slednih elementov (Mg/Ca, Sr/Ca) dveh kapnikov iz Lehman Caves (West Room, Inscriptions Room) so določili vlažno obdobje v Great Basin od 139.000-130.000 let, medtem ko je bilo od 130.000-128.000 let bolj suho obdobje. Glavni vzrok spremembe klime je taljenje ledenih plošč na severu. Za obdobje 84.000-81.000 let je značilno ohlajanje, kar povezujejo s severno Atlantsko klimo (Cross et al. 2015).

Raziskave Holocena v Great Basin so pokazale, da je starost dveh stalagmitov iz Lehman Caves (West Room, Civil Defence Room) 16.400-3.800 let. Vlažno obdobje je bilo od 12.700-8.200 let. Po globalnem dogodku pred 8.200 leti je klima prešla v sušne pogoje. Spremembe klime povezujejo z umikom ledu v Hudsonovem zalivu (Steponaitis et al. 2015).

## Metode

Lehman Caves se nahaja v nadmorski višini 2130 m. Povprečne padavine nad jamo so 33 cm/leto. Prenikla voda v jami, ki potuje skozi strop (30-60 m), je vezana na zimske padavine in potrebuje 1-4 tedne, da doseže rove. Meritve jamske klime v obdobju 2009-2010 kažejo skoraj 100% vlago v jami in povprečno letno temperaturo zraka 11 °C (Steponaitis et al. 2015).

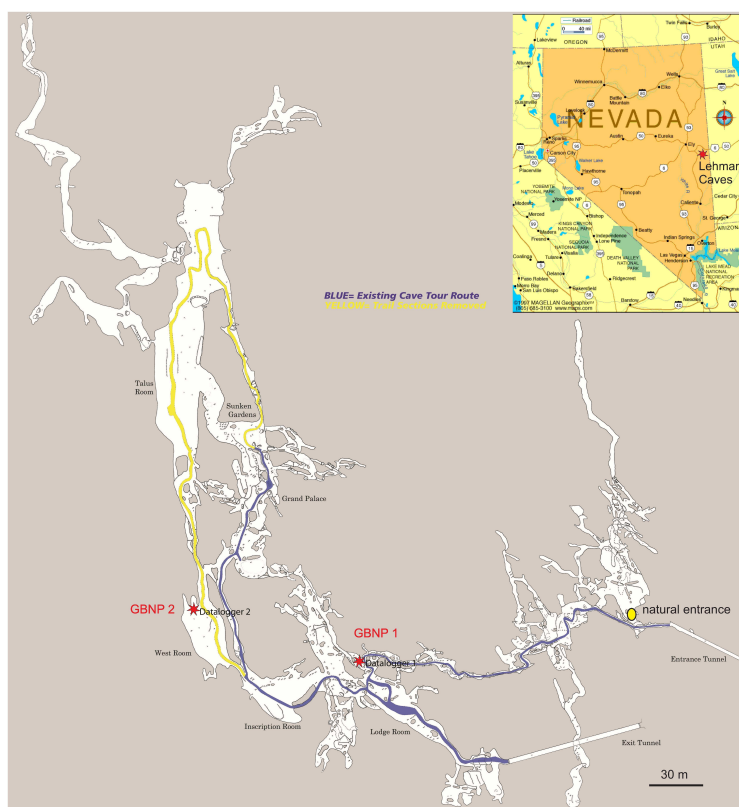
V jami Lehman Caves sta bila od 7. avgusta 2015 nameščena dva merilnika za zvezno merjenje temperature zraka in zračnega tlaka (Van Essen). Merilnika smo po pošti poslali iz Postojne. Naš namen je bil enoletno spremljanje urnih podatkov na dveh lokacijah v jami (ena ob turistični poti GBNP 1, druga stran od turistične poti v podorni dvorani West



Room GBNP 2) ter primerjava z zunanjimi meteorološkimi podatki in številom obiskovalcev. Za opravljanje teh meritev v jami smo potrebovali dovoljenje, ki smo ga dobili s strani National Park Service (GRBA-2015-SCI-0015; začetek raziskav 10. julij 2015, konec raziskav 19. julij 2016) z naslovom: Climatic monitoring in show caves: comparison of conditions from Slovene karst caves with karst areas of Southern Nevada USA. Namen raziskave je ugotoviti vpliv turizma na jamsko klimo, predvsem na temperaturo zraka v jami, hkrati pa tudi razumevanje povezave jamske klime z zunanjo. Podobne raziskave se na primeru slovenskih jam kot sta Postojnska jama in Predjama vršijo že od leta 2009.

## Rezultati

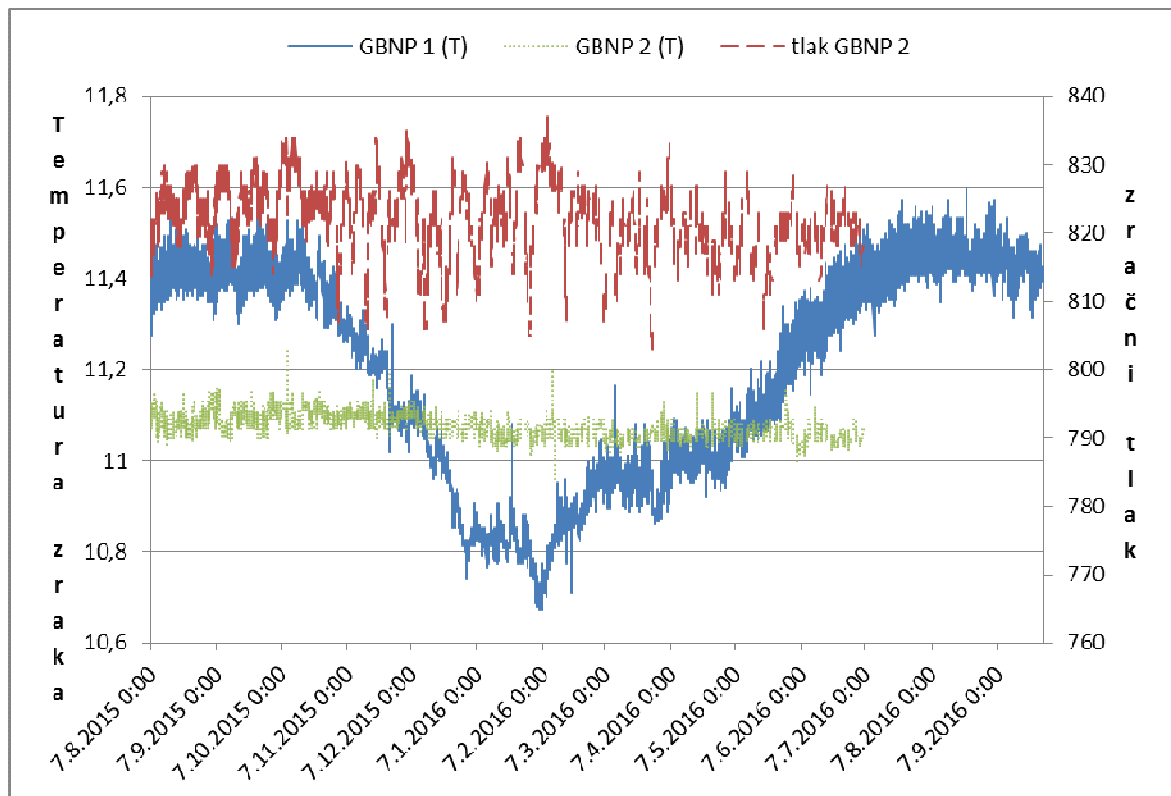
V jami smo med obiskom ZDA 24.6.-13.7.2016 odčitali podatke iz dveh inštrumentov (Sliki 1 in 2). Prvi inštrument (tik ob turistični poti) za merjenje temperature zraka in zračnega tlaka je stalno beležil urne podatke, drugi (izven turistične poti), ki je bil nameščen v podorni dvorani West Room (50 m pod površjem, Steponaitis et al. 2015), pa je le delno beležil podatke, zato smo ga 6. julija 2016 odstranili iz jame. Prvi inštrument je v jami beležil podatke do 28. septembra 2016.



Slika 1: Lehman Caves (Nevada) – položaj merjenja temperature zraka (°C) in zračnega tlaka v obdobju od 7.8.2015 do 28.9.2016. Datalogger 1 (GBNP 1), datalogger 2 (GBNP 2).

Nizke vrednosti radona in ogljikovega dioksida v jami kažejo na ventilacijo in izmenjavo zraka z zunanostjo. Letno število obiskovalcev v Lehman Caves je bilo v

obdobju julij 2015 do julij 2016, 40.600, pri čemer je bilo julija 2016, 7800 obiskovalcev. Dnevni obiski so omejeni na manjše skupine. Jamska temperatura zraka na mestu GBNP 1 ob turistični poti (Slika 3) je bila v obdobju od avgusta 2015 do 28. septembra 2016 v razponu 10,7 do 11,6° C (Slika 4). V ne-turističnem delu v podorni dvorani West Room (GBNP 2, Slika 2) je temperatura bolj konstantna skozi celo leto in sicer okrog 11,1 ° C. Prvo mesto ob turistični poti (GBNP 1, Slika 1) je bližje delno zaprtega prvotnega vhoda v jamo, ki predstavlja krajše (<10 m) navpično brezno, zato na tej lokaciji beležimo izrazitejši padec temperature zraka v zimskem obdobju in višjo temperaturo poleti. Letni razpon temperature je 0,9° C na lokaciji GBNP 1. Dnevna nihanja na GBNP 1 so poleti 0,2° C, pozimi pa  $\leq 0,1^{\circ}$  C. Povprečna letna temperatura zraka na GBNP 1 znaša 11,15° C (7 avgust 2015 do 7 avgust 2016).



Slika 2 – Temperatura zraka (°C) na dveh mestih (GBNP 1 in 2) in zračni tlak v Lehman Caves (Nevada) za obdobje od 7.8.2015 do 28.9.2016.

Tudi število obiskovalcev vpliva na dvig temperature zraka na mestu GBNP 1, kar je razvidno na Sliki 2. Temperatura zraka v avgustu in septembru 2015 je za 0,1° C nižja od enakega obdobja v letu 2016. Julija 2015 je bilo v jami 6400 obiskovalcev, julija 2016 pa 7800.

Nizke zimske temperature zraka (januar do marec 2016), kljub nizkemu številu obiskovalcev (januarja 100, februarja 200 in marca 1900) na mestu GBNP 1 kažejo na dotok hladnega zunanega zraka (skozi naravni vertikalni vhod ali/in skozi umetna tunela), saj sicer temperatura pozimi ne bi smela pasti pod stabilno letno temperaturo v West Room (GBNP 2).



Slika 3 – Lehman Caves (Nevada) – položaj merjenja temperature zraka ( $^{\circ}\text{C}$ ) in zračnega tlaka (GBNP 1). Foto: S. Šebela



Slika 4 – Lehman Caves (Nevada) – položaj merjenja temperature zraka ( $^{\circ}\text{C}$ ) in zračnega tlaka v West Room (GBNP 2). Foto: B. Luke



Slika 5 – Lehman Caves (Nevada) – razpoka v stebru, višina stebra je okrog 1,2 m.  
Foto: S. Šebela.

V jami je bogata favna (npr. psevdoškorpijoni). Iz jam v Nevadi so poročali (Disney et al. 2011) tudi o najdbi 5 novih vrst muh (Diptera: Phoridae). Največji problem v jami zaradi obiskovalcev je povečan vnos »kosmov« oblačil, ki se nabirajo na kapnikih, kot tudi v vhodnem in izhodnem umetnem tunelu. Upravljavec jame organizira prostovoljno čiščenje. Zaradi razsvetljave je na nekaterih mestih prisotna lampenflora. Nekateri kapniki so zlomljeni zaradi nevednosti (ali podjetnosti) prvih obiskovalcev. V jami so tudi stari podpisi.

Od naravnih pojavov je potrebno omeniti razpoke (npr. na stebru; Slika 5) in zlomljeno paleto, kar kaže na aktivne tektonske premike.

### **Zaključek**

V okviru bilateralnega projekta med Slovenijo in ZDA sem v letu 2016 imela predavanje na tuji univerzi (UNLV), opravili smo terensko delo v Great Basin National Park (Lehman Caves), odčitali celoletne podatke temperature zraka v jami in zračnega tlaka ter pridobili pomembne podatke za nadaljnjo obdelavo in skupno objavo. Podatki so uporabni tudi za upravljavce (Great Basin National Park) turistične jame Lehman Caves. Projekt se je od prvotne ideje (aktivna tektonika in kras) oddaljil zaradi razmer na terenu in časovne omejitve terenskega dela in se približal razumevanju jamske mikro-klime v turistični jami Lehman Caves in primerjavi z razmerami v turističnih jamah v Sloveniji (npr. Postojnska jama in Predjama).

Raziskava je bila del programa Raziskovanje krasa (P6-0119) in projektov Okoljske spremembe in trajnost v kraških sistemih (IGCP UNESCO projekt 598), Climatic monitoring in show caves: comparison of conditions from Slovene karst caves with karst areas of Southern Nevada USA (GRBA-2015-SCI-0015) in Meritve aktivnih tektonskih mikro premikov, primerjava razmer v slovenskih kraških jamah s kraškimi področji v južni Nevadi ZDA (BI-US/15-16-054).

## Literatura

- Collier, M. 1990. An Introduction to the Geology of Death Valley. Death Valley National History Association, 1-50 str., Death Valley.
- Cross, M., McGee, D., Broecker, W. S., Quade, J., Shakun, J.D., Cheng Hai, Lu Yanbin in Edwards, R. L. 2015. Great Basin hydrology, paleoclimate, and connections with the North Atlantic: A speleothem stable isotope and trace element record from Lehman Caves, NV. *Quaternary Science Reviews*, 127, 186-198.
- Disney, H.R., Taylor, S., Slay, M.E. in Krejca, J.K. 2011. New species of scuttle flies (Diptera: Phoridae) recorded from caves in Nevada, USA. *Subterranean Biology*, 9, 73-84.
- Drewes, H. in Palmer, A.R., 1957. Cambrian Rocks of Southern Snake Range, Nevada. *AAPG Bulletin*, 4, 1, 104-120.
- Schmidt, J. 1987. Lehman Caves. Great Basin National History Association, 1-33 str., Salt Lake City.
- Steponaitis, E., Andrews, A., McGee, D., Quade, J., Hsieh, Yu-Te, Broecker, W.S., Shuman, B.N., Burns, S.J. in Cheng Hai, 2015. Mid-Holocene drying of the U.S. Great Basin recorded in Nevada speleothems. *Quaternary Science Reviews*, 127, 174-185.
- Wernicke, B., Axen, G.J. in Snow, J.K. 1988. Basin and Range Extensional Tectonics at the Latitude of Las Vegas, Nevada. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1738.



# POTRES 6. MAJA 1976 V FURLANIJI – REEVALUACIJA MAKROSEZIMČNIH PODATKOV

Ina Cecić<sup>\*</sup>, Rita Meurers<sup>\*\*</sup>, Andrea Tertulliani<sup>\*\*\*</sup>, Gottfried Grünthal<sup>\*\*\*\*</sup>, Diethelm  
Kaiser<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Jana Pazdirková<sup>+</sup>, Ivica Sović<sup>++</sup>

## Povzetek

40 let po nizu močnih potresov, ki so zahtevali skoraj 1000 življenj in razrušili mesta in vasi v Furlaniji (severna Italija) in sosednjih področjih, ugotavljamo, da ne obstaja enotna čezmejna karta s prikazom potresnih učinkov. Odločili smo se ponovno oceniti vse obstoječe in dosegljive podatke, tokrat s pomočjo EMS-98 lestvice. Čeprav štiri desetletja niso ravno dolgo zgodovinsko obdobje, in četudi količina podatkovnih virov obsega več sto kilogramov papirja (vprašalniki, analize poškodb, časopisi, študije itn.), smo prišli do pretresljive ugotovitve, da so mnogi originalni podatki že zgubljeni. Ta raziskava je imela za cilj odkriti in uporabiti nove, do sedaj neznane podatkovne vire. Namen raziskave je združevanje različnih podatkovnih skupin iz vseh evropskih državah, v katerih so prebivalci čutili potres 6. maja. Podatkov iz področja nižjih vrednosti intenzitete (Švica, Madžarska, Češka, Poljska) nismo ponovno vrednotili. Vsi podatki za Avstrijo, Hrvaško, Nemčijo (posebej za vzhodni in zahodni del) in Slovenijo so bili prevrednoteni in ocenjeni po EMS-98. V članku so predstavljeni rezultati raziskave, objavljene septembra 2016 na skupščini Evropske seizmološke komisije. V nekaterih državah so bili kasneje rezultati še dopolnjeni.

## Abstract

Forty years after a devastating earthquake sequence, that has demanded almost 1000 lives and destroyed towns and villages in Friuli and adjacent regions, we have decided to take another look at the macroseismic data using the EMS-98 scale. Although four decades are not, historically speaking, a long period, and the quantity of existing data can be measured in hundred of kilograms of paper (questionnaires, damage analysis, newspapers, studies etc.) it was disturbing to find out that many of the original data are already missing and are probably lost forever. Effort was put into finding additional and yet unknown primary data, e.g. photographic material of damaged localities and eyewitness' reports.

The earthquake was felt in large part of Europe. For intensity data points (IDPs) with only low intensity values (especially in Switzerland, Hungary, Czech Republic, Poland) it was decided that the data will be included into the joint dataset without the EMS re-evaluation. For IDPs with higher intensity (especially in the countries closer to the epicentral region like Austria, Croatia, Germany – ex West and East part separately, Slovenia) the re-evaluation was performed. A particular and more complicated case concerns Italian data: the two main current Italian catalogues record two different data sets, both in IDPs number and in intensity values. Due to the methodological differences in a number of cases the EMS intensities are different than the previous MSK or MCS ones.

---

\* MOP, ARSO, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, Slovenija, [ina.cecic@gov.si](mailto:ina.cecic@gov.si)

\*\* ZAMG, Dunaj, Avstrija, [rita.meurers@zamg.ac.at](mailto:rita.meurers@zamg.ac.at)

\*\*\* INGV, Rim, Italija, [tertulliani@ingv.it](mailto:tertulliani@ingv.it)

\*\*\*\* GFZ, Potsdam, Nemčija, [ggrue@gfz-potsdam.de](mailto:ggrue@gfz-potsdam.de)

\*\*\*\*\* BGR, Hannover, Nemčija, [diethelm.kaiser@bgr.de](mailto:diethelm.kaiser@bgr.de)

+ IPE, Brno, Češka Republika, [jana@ipe.muni.cz](mailto:jana@ipe.muni.cz)

++ PMF, Zagreb, Hrvaška, [sovic@irb.hr](mailto:sovic@irb.hr)

The paper discusses the state of the art and the used methodology and data, as well as gives some insight into the collected data.

**Ključne besede:** seizmologija, potres, Furlanija, makroseizmika, intenziteta, EMS-98

**Key words:** seismology, earthquake, Friuli, macroseismology, intensity, EMS-98

## Uvod

Šestega maja 1976 ob deveti uri zvečer se je v Furlaniji zgodil potres z momentno magnitudo 6.45 (CPTI15, 2015), ki je v nadžariščnem območju dosegel intenziteto X EMS-98, naredil velikansko gmotno škodo in ubil skoraj 1000 ljudi. To je bil uvod v dolg in intenziven niz močnih potresov, ki so prizadeli Furlanijo in sosednje pokrajine. Štirideset let po tem, smo se seizmologi boleče zavedali, da enotna karta potresnih učinkov za glavni potres, ki se je zgodil 6. maja 1976, ne obstaja. Obstoječa karta, ki jo je leta 1978 objavila skupina evropskih seizmologov pod vodstvom Víta Kárníka (Kárník in drugi, 1977; Kárník, 1978), je dejansko nastala na podlagi podatkov, ki so bili ocenjeni po medsebojno zelo različnih metodologijah in z uporabo različnih intenzitetnih lestvic. Zato so na karti vidni »preskoki« vrednosti intenzitete, predvsem na državnih mejah.

Odločili smo se pregledati in ponovno oceniti vse dostopne primarne in sekundarne makroseizmične podatke, tokrat po enotni metodologiji, ki jo predpisuje Evropska potresna lestvica EMS-98 (Grünthal, 1998). Poleg tega smo sklenili poiskati nove, še neuporabljene podatke in na koncu združiti rezultate za posamezne države v enotno intenzitetno karto.

Glede na pričakovano količino podatkov in s tem povezanega dela smo bili udeleženci raziskave razdeljeni v dve skupini: države s visokimi vrednostmi intenzitete (Italija, Slovenija, Avstrija, Hrvaška) in področje nižjih intenzitet (Nemčija – nekdanja Vzhodna in Zahodna, Češka, Slovaška, Švica, Madžarska in Poljska).

## Obstoječe raziskave in objavljene karte potresnih učinkov

Po potresu 6. maja 1976 so seizmologi za različna geografska območja izdelali nekaj kart intenzitet in izoseist. Italijanske podatke je prikazal Calvino Gasparini (1976) (slika 1a). Ta karta se omeji na podatke znotraj italijanskih meja in le nakaže situacijo v Jugoslaviji in v Avstriji. Podatke za Avstrijo je obdelal in objavil Julius Drimmel (Drimmel in drugi, 1979) (slika 1b). Že na prvi pogled se vidi velika razlika v pristopu in filozofiji risanja izoseist. Za področje takratne Jugoslavije je podatke zbrala in ovrednotila skupina strokovnjakov iz Slovenije, Hrvaške, Srbije in Makedonije, na čelu z Vladimirom Ribaričem (Ribarič, 1976; Sikošek in drugi, 1979) (slika 1c). Podatke za zahodni del Jugoslavije je na skupni karti izrisal Dragutin Cvijanović (v Milošević, 1977) (slika 1d).

Znani češki seizmolog Vít Kárník, ki je navezal stike z vsemi seizmološkimi institucijami že v šestdesetih letih 20. stoletja, ko je koordiniral izdelavo evropskega kataloga potresov, je bil prava oseba tudi za vodenje projekta skupne karte potresnih učinkov furlanskega potresa. Rezultat tega sodelovanja je bila karta (slika 2), na kateri so prikazani podatki za devet evropskih držav (Kárník in drugi, 1977; Kárník, 1978).

Na kratko povzemamo vhodne podatke za to karto po posameznih državah:

**Italija:** 528 intenzitetnih točk, večinoma iz vprašalnikov, je zbral Genio Civile Regionale regije Furlanija – Julijska krajina; po zbranih podatkih je bilo 965 mrtvih, 2400 ranjenih ter

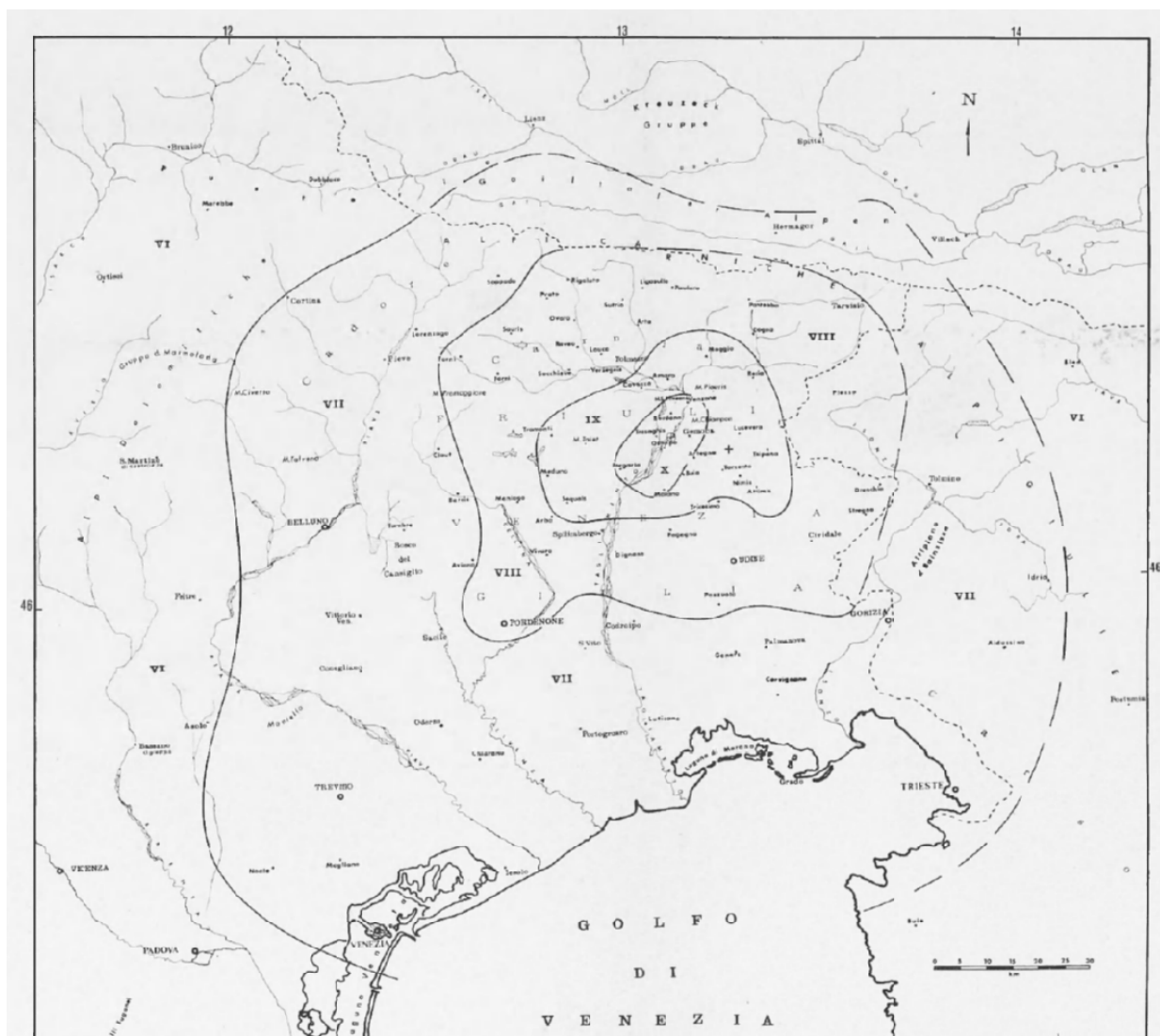


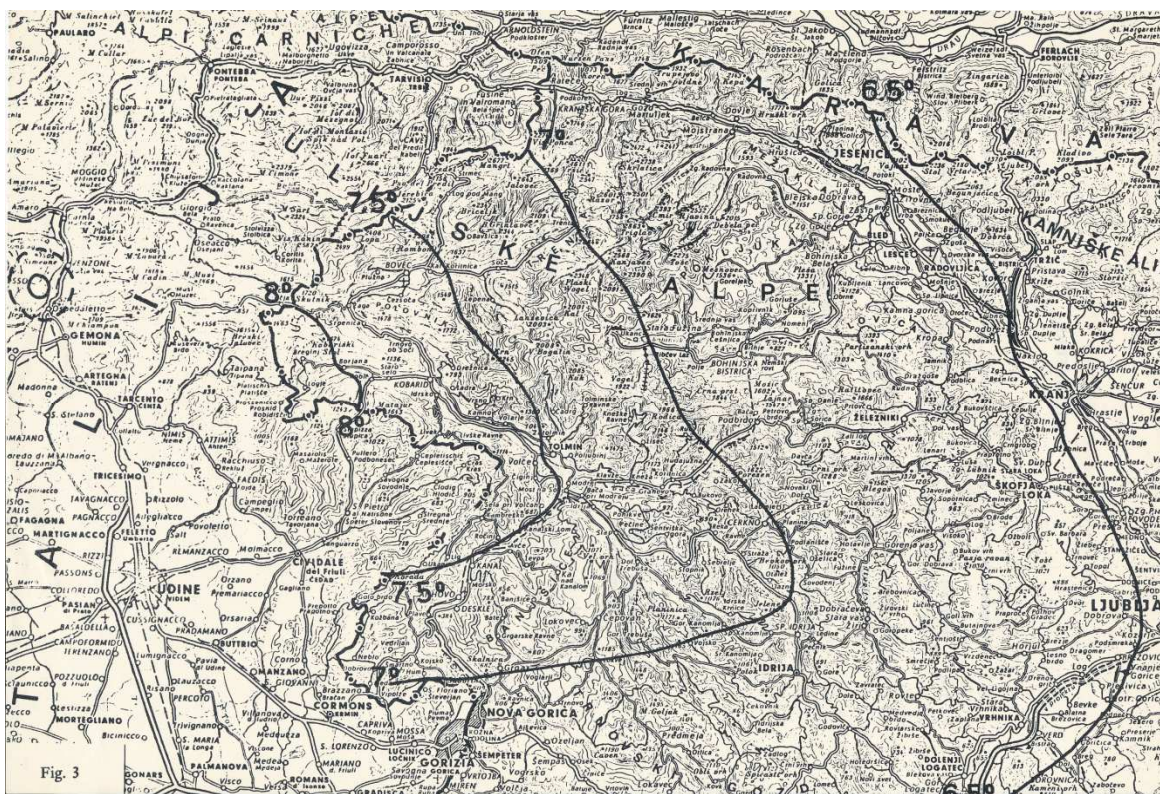
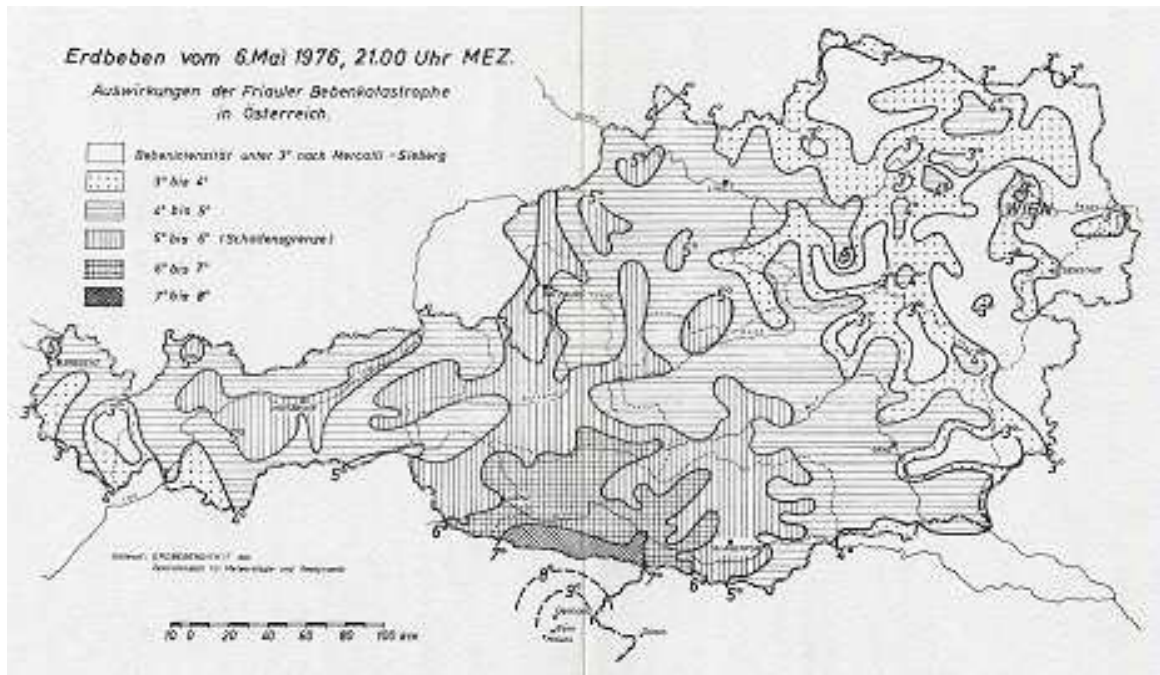
189000 oseb brez strehe nad glavo. Število uničenih zgradb je bilo ocenjeno na 17000. Največja intenziteta, dosežena v petih furlanskih krajih, je bila X MCS (Boschi in drugi, 1977).

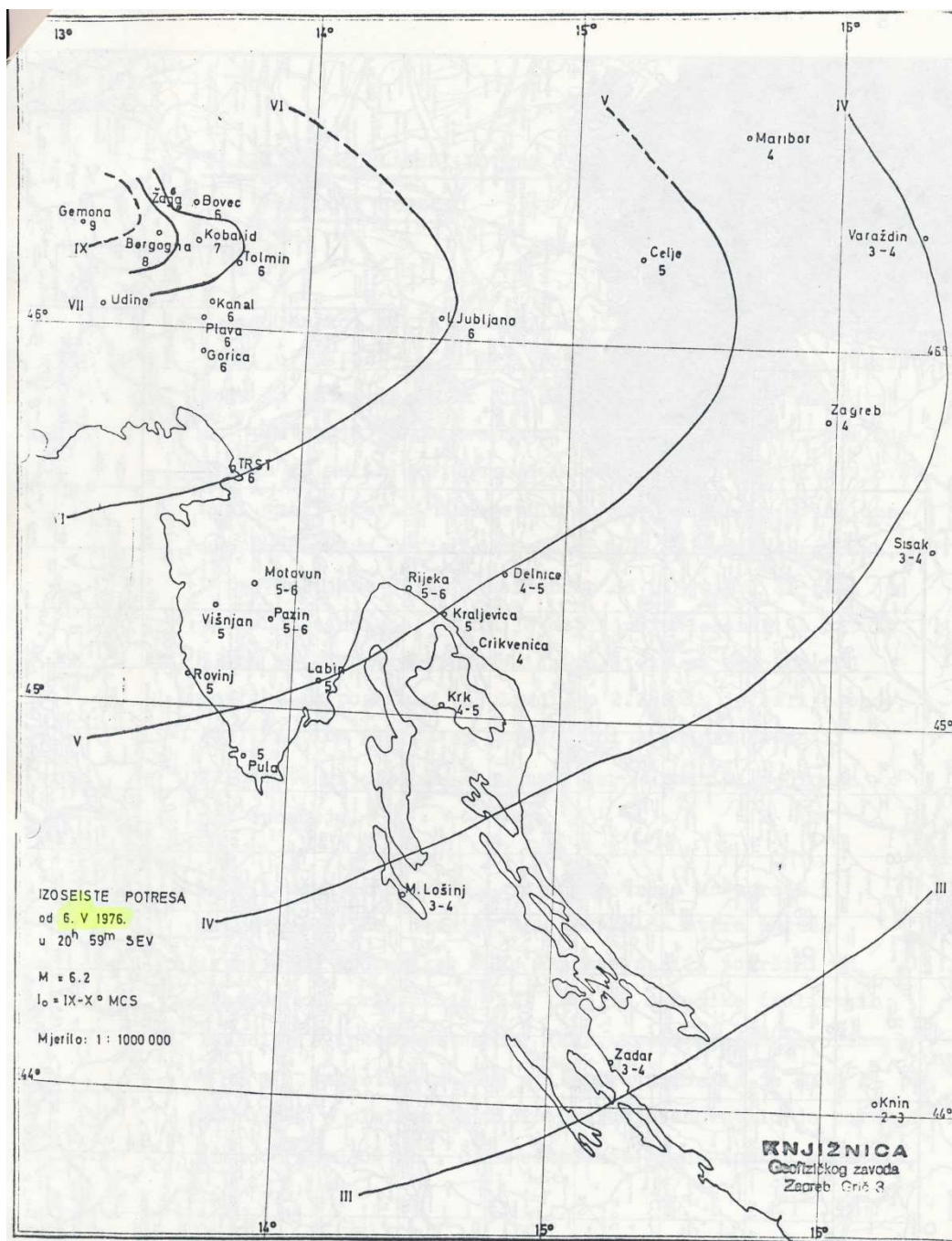
**Francija:** Podatki obsegajo področja Haut-Rhin, Bas-Rhin, Vosges, Meurthe-et-Moselle in Moselle. Intenzitete v razponu od II do V MSK. Potres so močno čutili v Renskem jarku.

**Švica:** Podatke je posredovalo 200 opazovalcev na postajah za merjenje količine dežja. Največja intenziteta je bila IV MSK v vzhodnem delu države.

**Avstrija:** Zbrani so vprašalniki iz približno 1600 precej enakomerno razporejenih krajev, mnoge so izpolnile lokalne oblasti. Na meji z Italijo je bila dosežena intenziteta VII-VIII MSK. Izoseiste so izrisane z mnogimi detajli. Področje intenzitete VII MSK in večje bilo veliko približno 800 km<sup>2</sup> (Drimmel in drugi, 1979).

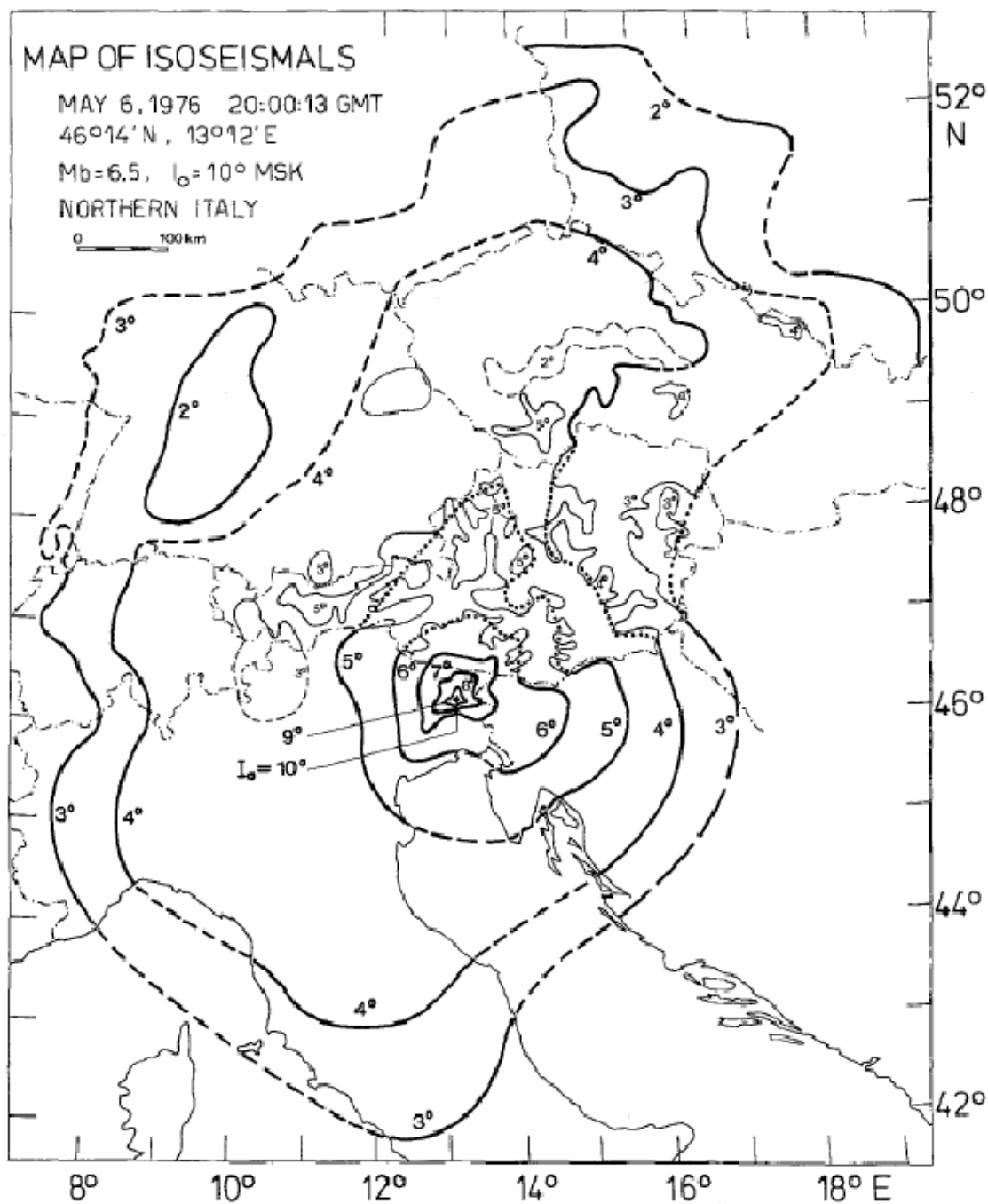






**Slika 1a:** Izoneiste potresa 6. maja 1976 v Italiji (Gasparini, 1976); **1b:** v Avstriji (Drimmel in drugi, 1979); **1c** v Sloveniji (Ribarič, 1976); **1d** v Jugoslaviji (Milošević, 1977).  
**Figure 1a:** Isoseismal lines of the earthquake on 6 May 1976 in Italy (Gasparini, 1976); **1b:** in Austria (Drimmel et al., 1979); **1c** in Slovenia (Ribarič, 1976); **1d** in Yugoslavia (Milošević, 1977).

**Zvezna Republika Nemčija:** O potresu so poročali prebivalci iz 65 krajev. Intenzitete so bile v razponu od II do V MSK. Največji učinki so bili na meji z Avstrijo. Potres so čutili tudi v mestih severno od Hannoverja (Schmedes in Leydecker, 1978).



**Slika 2:** Izoseiste potresa 6. maja 1976 v evropskih državah (Kárník in drugi, 1977; Kárník, 1978)

**Figure 2:** Isoseismal lines of the earthquake on 6 May 1976 in European countries (Kárník et al., 1977; Kárník, 1978).

**Demokratska Republika Nemčija:** Potres so čutili v več kot 200 krajih, tudi v Berlinu in celo na obalah Baltiškega morja. Največja intenziteta (IV MSK-64) je bila dosežena na severovzhodnem Saškem (Grünthal, 2016).

**Poljska:** Podatki so dostopni za približno 100 krajev v jugozahodnem delu države. Intenzitete so v razponu od II do IV MSK-64. Potres so čutili v večjih mestih, predvsem v visokih nadstropjih.

**Češkoslovaška:** Potres so čutili na Češkem in Moravskem, na Slovaškem pa le v dveh krajih. Največja intenziteta je bila IV MSK-64.

**Jugoslavija:** Potres so čutili v severozahodnem delu države (v Sloveniji in na Hrvaškem). Intenzitete so bile v razponu od II do VIII MSK-64. Izoseiste VII, IV in III so dobro usklajene z avstrijskimi, pri izoseistah VI in V pa je viden preskok na državni meji. Največja intenziteta v Sloveniji je bila VIII MSK-64, ena oseba je umrla; na Hrvaškem je bila največja intenziteta V-VI MSK-64 (Ribarič, 1976; Milošević, 1977; Sikošek in drugi, 1979).

## Nova raziskava

V prevrednotenje podatkov o furlanskem potresu smo se vključili bolj ali manj vsi seizmologi, ki se ukvarjamo z makroseizmičnimi podatki v Evropi. Dogovorili smo se, da bomo prevrednotili vse podatke za Italijo, Avstrijo, Slovenijo, Hrvaško, obe Nemčiji in Češko; dodatno bomo vključili podatke za Švico, Madžarsko in Poljsko. Za delo smo uporabili evropsko potresno lestvico EMS-98 (Grünthal, 1998) in metodologijo, ki je opisana v njej, med delom smo se veliko medsebojno konzultirali in diskutirali posamezne primere.

Sledi kratek povzetek poteka in rezultatov nove raziskave po posameznih državah:

**Italija:** Prevrednotili smo vse podatke za naselja z doslej ocenjeno intenziteto  $I > V$  MCS; zaradi razlike v metodologiji oz. intenzitetni lestvici smo intenziteto V-VI MCS (v 136 naseljih) prevedli v vrednost V EMS-98. Nekateri zaselki so združeni v skupne lokacije (10 primerov). Za 19 lokacij ni bilo možno oceniti EMS intenzitete, ker obstajajo podatki le za spomeniške zgradbe. V petih primerih je EMS intenziteta večja, kot je bila MCS. Skupno je bilo prevrednotenih 573 intenzitetnih točk. Med raziskavo je bilo ugotovljeno, da je večji del originalnih vprašalnikov žal izgubljen. Intenziteta za 67 krajev še ni prevrednotena.

**Avstrija:** Pregledani in prevrednoteni so bili podatki iz 1600 vprašalnikov, 10 časopisov, več različnih poročil in dokumentov o poškodbah. Na splošno so vrednosti EMS manjše, kot so bile MSK (predvsem zaradi neupoštevanja podatkov iz visokih nadstropij). Največja intenziteta je zdaj VII EMS-98 na Koroškem. Avstrijski podatkovni seznam zdaj vsebuje 981 intenzitetnih točk.

**Slovenija:** Pregledani in prevrednoteni so bili podatki iz vprašalnikov, časopisov, fotografskih arhivov, ter podatki iz poročil o poškodbah za občini Tolmin in Idrija. Določili smo intenziteto za 248 novih intenzitetnih točk, maksimalna vrednost VIII-IX EMS-98 je bila dosežena v Podbeli. Na slovenskem seznamu je zdaj 300 intenzitetnih točk.

**Hrvaška:** Do septembra 2016 so bili znani le preliminarni izsledki raziskave o učinkih potresa na Hrvaškem za 18 krajev. Največja intenziteta je VII EMS-98 v Pazinu.

**Nemčija:** Večina podatkov je bila zbrana v takratnem vzhodnem delu države, ker so v ZRN v takratnem obdobju stavkali tiskarji in mnogi časopisi niso izhajali, številne zvezne države takrat še niso imele svojih seizmoloških služb. Analizirani so vprašalniki in poročila, časopisni viri in dokumenti iz arhivov različnih institucij. Za vzhodno Nemčijo je ocenjena intenziteta za 204 krajev, za zahodni del pa za 55. Zaradi metodoloških razlik so vrednosti za nekatera naselja z intenziteto III-IV MSK prevrednotene v III EMS-98, (Grünthal, 2016).

**Češka:** Pregledana so originalna poročila o učinkih potresa. Opredeljene so intenzitete za 460 krajev, kot tudi za dva kraja na Slovaškem.

**Švica:** Švicarski kolegi so posredovali podatke za 153 krajev. Ker so bile vrednosti MSK intenzitet za vse kraje nizke v primerjavi z drugimi državami, smo se odločili, da jih bomo nespremenjene upoštevali kot vrednosti EMS.

**Madžarska:** Do septembra 2016 nismo imeli nobenega podatka o tem, ali so potres čutili tudi na Madžarskem. Podatki o tem so bili najdeni naknadno in niso vključeni v prikaz rezultatov v tem članku.

**Poljska:** Do septembra 2016 nismo dobili ocenjenih intenzitet, od kolegov smo pa izvedeli, da še hranijo originalne podatke. Seznam ocen intenzitet smo prejeli pozneje in ni vključen v ta članek.

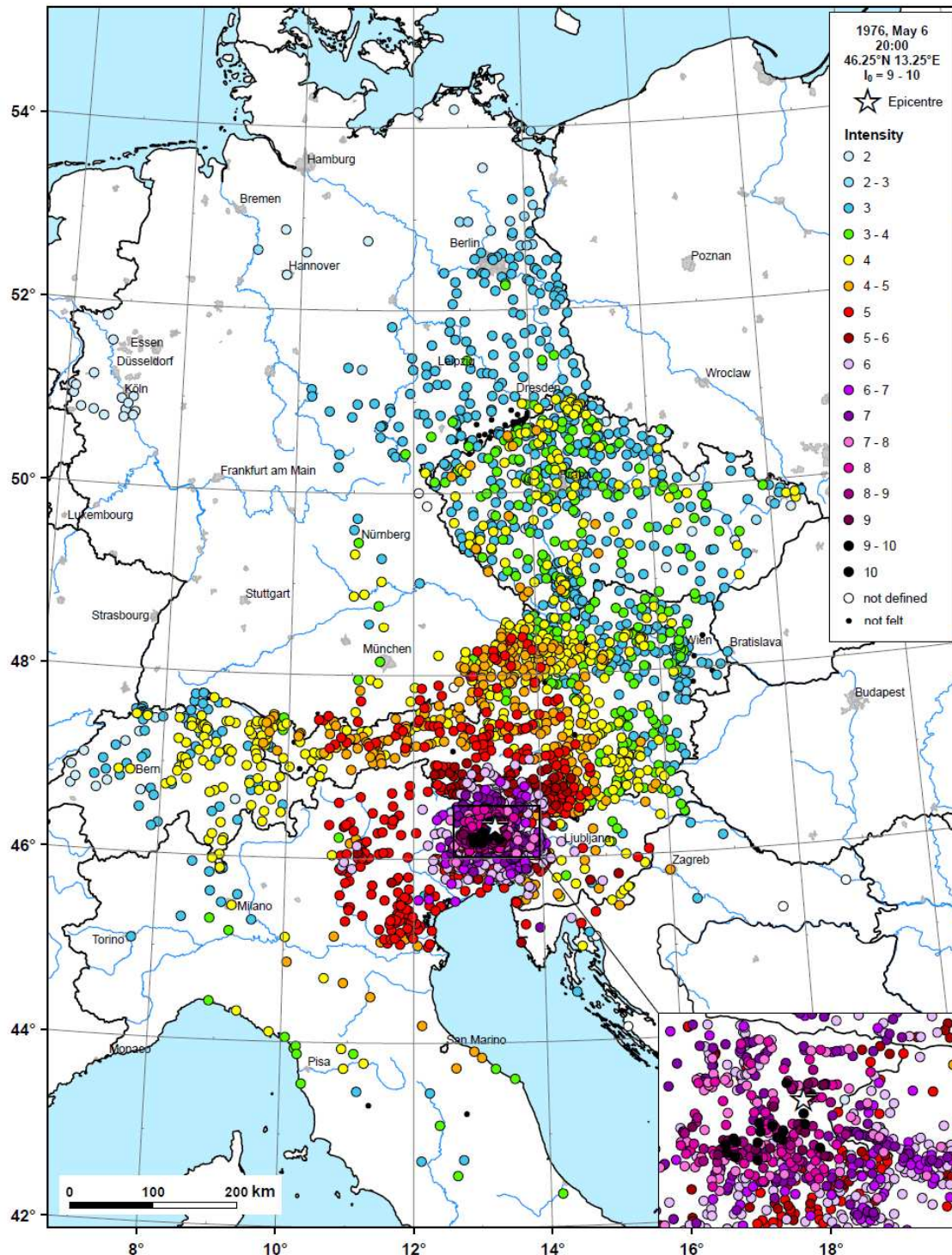
### **Nova karta potresnih učinkov**

S preučitvijo novih podatkov in z opisanim prevrednotenjem intenzitet smo izdelali novo karto potresnih učinkov za potres 6. maja 1976 (slika 3), na kateri je prikazanih več kot 2700 intenzitetnih točk (Cecić in drugi, 2016a; Cecić in drugi, 2016b)

Glavne izboljšave na novi karti so naslednje:

- vsi podatki so ocenjeni s pomočjo iste lestvice
- ni izoseist (ker je določanje preveč subjektivno)
- ni več preskoka vrednosti intenzitet na mejah posameznih držav
- dodali smo veliko novih intenzitetnih točk.

V preglednici 1 smo povzeli razliko v vrednosti največje dosežene intenzitete po posameznih državah za staro in novo raziskavo. Za Slovenijo in Hrvaško je nova največja intenziteta višja, v obeh primerih smo tudi pridobili dodatne podatke. Preglednica 2 kaže skupno število intenzitetnih točk po državah za obe raziskavi.



**Slika 3:** Rezultati nove raziskave, prikazani na karti intenzitete EMS-98 za potres 6. maja 1976 v Furlaniji (not defined = intenzitete ni bilo možno določiti; not felt = niso čutili) (Cecić in drugi, 2016a; Cecić in drugi, 2016b).

**Figure 3:** New intensity map for 6 May 1976 Friuli earthquake, in EMS-98 (Cecić in drugi, 2016a; Cecić in drugi, 2016b).

**Preglednica 1:** Primerjava največjih ocenjenih intenzitet ( $I_{max}$ ) potresa 6. maja 1976 v prejšnjih in novi raziskavi, po posameznih državah.

**Table 1:** Comparison of maximum intensities ( $I_{max}$ ) for the earthquake on 6 May 1976 in the previous studies and in this study, for each country.

Država	I max MSK-64 prejšnje raziskave	I max EMS-98 ta raziskava
Avstrija	VII-VIII	VII
Češka	VI	IV-V
Hrvaška	V-VI	VII
Nemčija - Vzhodna	IV	IV
Nemčija - Zahodna	V	V
Madžarska	čutili?	niso čutili
Italija	X MCS	X
Slovaška	III-IV	III
Slovenija	VIII	VIII-IX
Švica	IV	IV

### Nadaljnje raziskave

Prve rezultate raziskave, ki jih povzema ta predstavitev, smo pokazali na generalni skupščini Evropske seizmološke komisije v Trstu, septembra 1976 (Cecić in drugi, 2016a; Cecić in drugi, 2016b). Nato smo sodelovanje še razširili in pridobili podatke iz Francije in Belgije, izboljšani so bili podatki za Poljsko, Slovaško, Madžarsko, Nemčijo in Hrvaško. Prikazani rezultati niso dokončni, ker nas čaka še veliko dela. Obstajajo še številni podatkovni viri, ki jih je treba pregledati. Potres so zagotovo čutili v še več oddaljenih državah, in te podatke je treba šele poiskati. Največji izziv bo spopadanje z nizom popotresov, ki je bil dolg in močan. Avtorji pričakujemo, da bomo prvi dve nalogi dokončali spomladi leta 2017, ko bomo gradivo pripravili za mednarodno objavo.

**Preglednica 2:** Skupno število intenzitetnih točk (IDP) za prejšnje in to raziskavo, po posameznih državah.

**Table 2:** Total number of IDPs for the earthquake on 6 May 1976 in the previous studies and in this study, for each country.

Država	Število IDP prejšnje razisk.	Število IDP ta raziskava
Avstrija	909	981
Hrvaška	17	18
Češka	460	460
Nemčija – vzhodni del	> 200	204
Nemčija – zahodni del	> 65	55
Madžarska	?	0
Italija	770	573 + 136 + 67
Slovaška	2	2
Slovenija	52	300
Švica	153	153



## Zahvala

Švicarske podatke za to raziskavo je posredoval Donat Fäh. Madžarske arhive je pregleдала Gyöngyvér Szanyi. O poljskih podatkih je poročala Barbara Guterch. Novo karto in njene številne iteracije je potrpežljivo izrisal Uwe Lemgo.

## Literatura

- Boschi E., E. Guidoboni, G. Ferrari, G. Valensise in P. Gasperini, 1977. Catalogo dei forti terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980, ING e SGA Bologna, 973 p.
- Cecić, I., R. Meurers, A. Tertulliani, G. Grünthal, D. Kaiser, I. Sović, 2016. 6 May 1976 Friuli Earthquake – Re-evaluation of Macroseismic data. Predavanje na 35. Generalni skupščini ESC, Trst, ESC2016-516
- Cecić, I., G. Grünthal, D. Kaiser, R. Meurers, I. Sović, A. Tertulliani, 2016. 6 May 1976 Friuli Earthquake – Re-evaluation of Macroseismic data, a New Map and a Comparison With Old Intensity Estimates. Poster na 35. Generalni skupščini ESC, Trst, ESC2016-517
- CPTI15 - Catalogo Parametrico dei terremoti Italiani. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/> (zadnji dostop 20.12.2016)
- Drimmel, J., E. Fiegele in G. Lukeschitz, 1979. Die Auswirkungen der Friauler Beben in Österreich. Arbeiten aus der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Vol. 236, Heft 38, 83 p.
- Gasparini, C., 1976. Parametri ipocentrali dai dati macrosismici del terremoto del Friuli, Maggio 1976. Annali di Geofisica Vol 29, No 3
- Grünthal, G., 2016. Rich Macroseismic Material of the 1976 Friuli Earthquake in Central- and NE Germany – Revisited at its 40th Anniversary. 4th ICHM, Vienna, May 2016.
- Grünthal, G., 1998. European Macroseismic Scale. Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, 99 p.
- Kárník, V., 1978. Map of isoseismals of the main Friuli earthquake of 6 May 1976. PAGEOPH 116
- Kárník, V., D. Prochazkova, L. Ruprechtova in Z. Schenkova, 1977. Macroseismic field of the Friuli earthquake of May 6, 1976. Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., A-6, 117, 71-74
- Milošević, A., 1977. Seizmološke karakteristike riječnog područja za 1977. godinu. Manuscript
- Ribarič, V., 1976. The earthquake in Friuli, May 6, 1976. A contribution to the Study of Seismic Fields in Slovenia. Bolletino di Geofisica XIX/72, Parte 1, 861-874
- Schmedes in Leydecker, 1978. Macroseismic Intensity Map for the FRG for the Friuli Earthquake of May 6, 1979. J.Geopsy, 44.
- Sikošek, B., D. Prosen, V. Ribarič, S. Nedeljković, M. Krstanović, B. Metović in V. Tešić, 1979. Zemljotres od 6.05.1976 i njegov odraz na teritoriju SR Slovenije. ASI 5/1979



# Meritve hitrosti gibanja zračnih mas

Samo Stanič\*, Maruška Mole\*, Miha Živec\*

## Povzetek

V prispevku predstavljamo novo metodo merjenja smeri in hitrosti gibanja zračnih mas, ki temelji na kombinaciji aktivnega (lidarski sistem) in pasivnega (kamera) daljinskega zaznavanja atmosfere. S pomočjo lidarja smo določili razdaljo do oblakov, ki so služili kot sledilci v zračnem toku. Sočasno z lidarskimi meritvami smo fotografirali del neba, v katerega je bil usmerjen lidar. Iz meritev oddaljenosti oblakov ter njihovega premikanja smo izračunali hitrost potovanja oblakov in s tem tudi spodnjo mejo hitrosti zračne mase, ki je oblake nosila. Metodo merjenja hitrosti gibanja zračnih mas smo preizkusili na štirih testnih primerih v februarju in marcu 2016. Meritve so potekale v Ajdovščini v različnih vremenskih pogojih. Poleg naprav za daljinsko zaznavanje (lidar in optične kamere) smo za primerjavo uporabili tudi prizemne meritve vetra v Ajdovščini ter podatke vertikalne sondaže atmosfere v Vidmu in Ljubljani. Rezultati meritev vetra z daljinskim zaznavanjem se v vseh štirih opazovanih primerih relativno dobro ujemajo z rezultati sondaž, do odstopanj pa prihaja zaradi krajevnega in časovnega neujemanja sondaž z daljinskim zaznavanjem.

**Ključne besede:** daljinsko zaznavanje, veter, atmosfera

**Keywords:** remote sensing, wind, atmosphere

## Uvod

Atmosfera je plast plinov in aerosolov, ki obkroža Zemljo. V članku se bomo omejili na pojave v spodnji plasti, imenovani troposfera, v kateri poteka večina vremenskih procesov (Rakovec in Vrhovec, 2007). Troposfero delimo na prizemno plast (PBL) in prosto atmosfero, kjer je PBL tisto območje, v katerem še prihaja do interakcije med tlemi in zrakom. Ker se lastnosti atmosfere s časom spreminjajo, so meritve meteoroloških spremenljivk in opazovanje razvoja vremenskih procesov velikega pomena. Ugotavljanje stanja atmosfere z uporabo prizemnih točkovnih meritev je razen za najnižji del PBL večinoma nemogoče, saj nam ne omogoča vpogleda v vertikalno strukturo atmosfere. Meritve vertikalnih profilov meteoroloških spremenljivk so se tako izvajale z uporabo letal, najpogosteje pa z baloni z radiosondami. Težava takih meritev je njihova slaba časovna in prostorska ločljivost, saj se balon na določeni višini zadržuje le kratek čas, hkrati pa so tudi postaje, ki opravljajo take meritve, zelo daleč narazen. Velik napredek pri meritvah vertikalnih profilov je doprinesla uporaba naprav za daljinsko zaznavanje, ki tako s tal kot s satelitov spremljajo stanje atmosfere, kar omogoča zajem podatkov o vertikalnih profilih temperature in vlažnosti ter posledično zagotavlja boljše vhodne podatke za meteorološke modele.

Na daljavo lahko bodisi s pasivnim bodisi z aktivnim daljinskim zaznavanjem merimo tudi hitrost in smer vetra. Aktivne metode merijo lastnosti atmosfere na podlagi spremembe povratno sipanega lastnega signala, pasivne pa na podlagi spremembe signalov iz zunanjih izvorov. Naprave za daljinsko zaznavanje lahko kot signal uporabljajo zvok (SODAR) ali elektromagnetno valovanje (RADAR in LIDAR). Hitrosti gibanja zračnih mas z uporabo pasivnega daljinskega zaznavanja so določali že v 19. stoletju, kjer so za meritve hitrosti uporabljali kombinacijo dveh ali več meritev kotov do izbranih oblačnih

---

\* Univerza v Novi Gorici, Center za raziskave atmosfere, Vipavska 11c, Ajdovščina

struktur s teodolitom z različnih lokacij, pa tudi s kombinacijo dveh meritev teodolitov in dveh fotografij (brez avtorja, 1896). Z iznajdbo lidarja so metodo nadgradili, saj so z uporabo zaporednih lidarskih meritev lahko sledili oblakom in drugim atmosferskim strukturam, ter tako pridobili informacijo o hitrosti in smeri gibanja le-teh (Hooper, 1985; Mayor, 2001). V zadnjem času so v uporabi predvsem Dopplerski lidarji, ki pa za določanje hitrosti in smeri vetra uporabljajo Dopplerjev zamik prejetega signala (Chanin et al., 1989; Liu et al., 2002).

Za določitev hitrosti in smeri vetra na višini oblačne plasti z boljšo časovno ločljivostjo od standardnih meteoroloških meritev smo uporabili kombinacijo aktivne (lidarski sistem) in pasivne (kamera) metode daljinskega zaznavanja. Za sledenje gibanja zračnih mas smo uporabili oblake, ki so jih te zračne mase nosile. Dinamiko gibanja smo določili iz časovnega zaporedja fotografij ter lidarske meritve razdalje od opazovalca do oblačne plasti.

### Meritve in modeliranje stanja atmosfere

Predstavljena metoda meritve hitrosti in smeri gibanja zračnih mas temelji na uporabi aktivnega (lidar) in pasivnega (fotoaparat ali kamera) daljinskega zaznavanja stanja v atmosferi. S pomočjo lidarja smo izmerili višinske profile povratnega sipanja na delcih v atmosferi, ki smo jih uporabili za identifikacijo oblačnih plasti ter meritev njihovih razdalj od lidarskega sistema, zaporedne posnetke neba pa smo uporabili za določitev njihovega premikanja. Vse časovne oznake pri meritvah so v lokalnem času (LT). Dobljene rezultate smo primerjali s prizemnimi meritvami vetra na strehi zgradbe Univerze v Novi Gorici v Ajdovščini, ter z meritvami radiosondaž v Vidmu in v Ljubljani. Smer vetra smo primerjali tudi z napovedmi modela HYSPLIT.

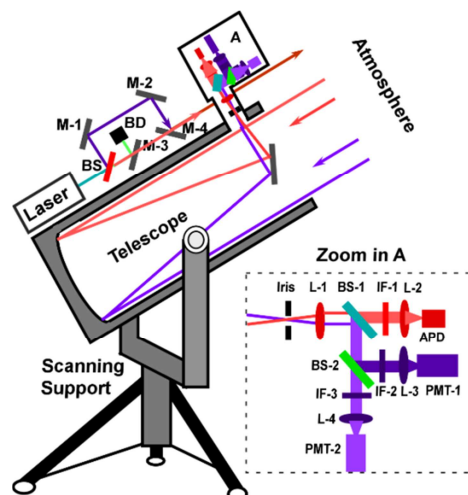
### Lidar

Lidar je naprava, ki zaznava povratno sipanje kratkih pulzov laserske svetlobe na aerosolih in molekulah vzdolž izsevanega laserskega žarka (Kovalev in Eichinger, 2004). Sestavljen je iz oddajnika (pulzni laser) in sprejemnika svetlobe (teleskop), ki je povezan z detektorjem svetlobe, ojačevalnikom in računalniškim sistemom za beleženje podatkov. Prejeti signal lahko opišemo z lidarsko enačbo za sipanje:

$$P(r) = P_0 k \frac{c\tau_0}{2} A \frac{\beta(r)}{r^2} T^2(r), \quad (1)$$

kjer je  $P_0$  moč signala, ki ga odda svetlobni izvor,  $k$  učinkovitost sistema,  $c$  hitrost svetlobe,  $\tau_0$  dolžina svetlobnega sunka,  $A$  efektivna površina sprejemnika,  $\beta(r)$  koeficient povratnega sipanja in  $T^2(r)$  oslabitev signala na poti od oddajnika do sprejemnika.

Meritve smo izvedli z mobilnim lidarjem Univerze v Novi Gorici (He et al., 2010), ki kot oddajnik uporablja Nd:YAG pulzni laser z valovno dolžino 1064 nm in frekvenco sunkov 10 Hz, za sprejemnik pa 300 mm Newtonski teleskop, povezan s plazovno fotodiodo. Višinski profili jakosti povratnega sipanja so povprečje meritev desetih zaporednih pulzov. Končna meritev ima časovno ločljivost 1 s, ločljivost pri določanju razdalje do določenega sipalca pa je 3,75 m.



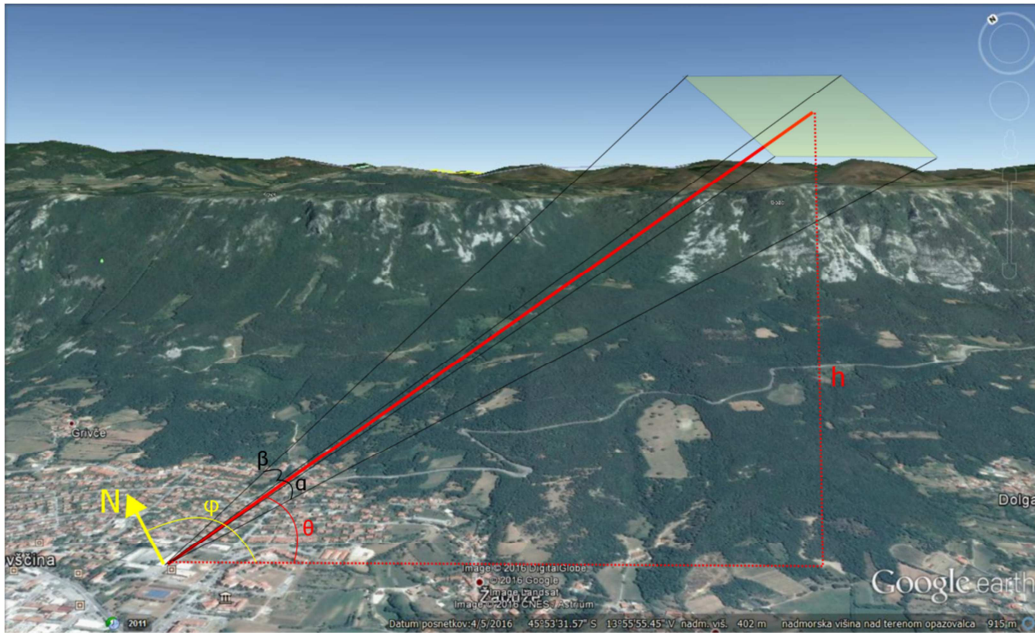
Slika 1: Shema mobilnega lidarskega sistema Univerze v Novi Gorici (He et al., 2010). Svetlobni sunek, ki ga odda laser, se v atmosferi povratno siplje na aerosolih in molekulah. Sipano svetlobo zberemo s teleskopom in jo vodimo skozi filterski sistem na plazovno fotopomnoževalko. Signal, ki ga sistem zazna, opišemo z enačbo (1). Mobilni lidar UNG omogoča meritve z ultravijolično in infrardečo svetlobo, pri čemer je slednja zaradi manjše oslabitve boljše izbira za meritev oddaljenosti oblačnih plasti.

### Optične kamere

Dinamiko gibanja oblakov smo določili iz časovnega zaporedja fotografij. Fotoaparati je bil med meritvami nepremično pritrjen in usmerjen v isti del neba kot lidar (Slika 2), tako da so vsi posnetki v zaporedju pokrivali isti kos neba. Enakomerni časovni interval zajemanja fotografij smo dosegli z avtomatskim proženjem. Frekvenca zajemanja fotografij je bila dovolj visoka, da smo lahko sledili izbranemu delu oblaka skozi več zaporednih fotografij. Za opazovanje neba smo uporabili dva različna optična sistema – zrcalno refleksni fotoaparati (Canon EOS 1000D) in CCD kamero (Mignon IPC-20C). Podrobne lastnosti obeh sistemov so predstavljene v Tabeli 1.

Tabela 1: Glavne lastnosti fotoaparata in kamere, ki sta bila uporabljena pri meritvah gibanja zračnih mas.

Tip optičnega sistema	Canon EOS 1000D	Mignon IPC-20C
Ločljivost posnetka	3888 × 2592	640 × 480
Horizontalni kot zaslone (β)	48 °	36,4 °
Vertikalni kot zaslone (α)	30,9 °	27,4 °
Horizontalna kotna ločljivost	0,012 °/ piko	0,057 °/ piko
Vertikalna kotna ločljivost	0,012 °/ piko	0,057 °/ piko
Časovna ločljivost	15 s	60 s



Slika 2: Stranski pogled na izvedbo eksperimenta. Debela rdeča črta predstavlja pravokotnico na vidno polje kamere skozi središče vidnega polja, rumeno območje pa vidno polje kamere.  $\theta$  je elevacijski kot kamere,  $\alpha$  in  $\beta$  pa sta vertikalni in horizontalni kot, ki ga pokrije odprta zaslonka. Rumena puščica je usmerjena proti severu,  $\varphi$  je azimutni kot optične osi kamere glede na sever.

### Model HYSPLIT

Trajektorije zračnih mas je mogoče modelirati s pomočjo numeričnih modelov. Za primerjavo izmerjenih vrednosti z modelskimi napovedmi smo se zaradi enostavne uporabe odločili za model HYSPLIT (Stein et al, 2015), ki med drugim omogoča izračun povratnih trajektorij, in ga uporabili za primerjavo smeri vetra na višini baze oblakov nad Ajdovščino.

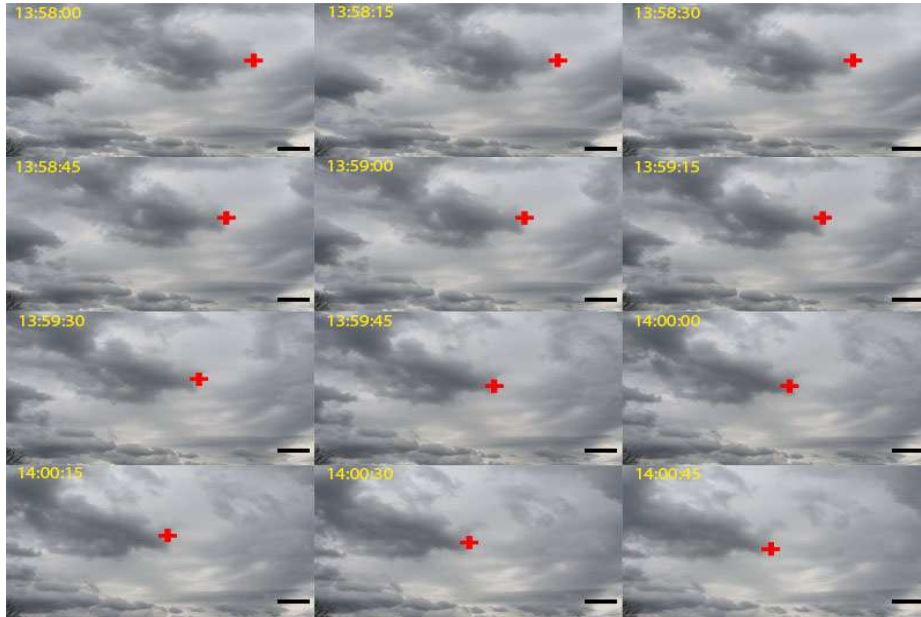
### Radiosondaža

Vertikalne profile meteoroloških spremenljivk običajno merimo z uporabo radiosond. V študiji smo za primerjavo z meritvami vetra z daljinskim zaznavanjem uporabili podatke radiosond iz Ljubljane in iz Vidma, ki so prosto dostopni na spletni povezavi <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

### Izračun hitrosti in smeri vetra

Izračun smeri in spodnje meje hitrosti vetra temelji na predpostavkah, da se višina opazovane oblačne plasti med nekaj minutno meritvijo ne spreminja ter da se takrat zračne mase v tej plasti gibljejo s konstantno hitrostjo. Za potrebe izračuna definiramo tri koordinatne sisteme: sistem  $S$ , ki sovпада z lokacijo merilnega sistema (njegova abscisna os kaže proti vzhodu, ordinatna os pa proti severu), sistem fotografije  $S_s$ , ki ima izhodišče v središču vidnega polja kamere (njegova abscisna os kaže proti desni, ordinatna os pa navzdol v ravnini fotografije), ter sistem oblačne plasti  $S'$  z istim koordinatnim izhodiščem

kot  $S_s$ , pri čemer njegova abscisna os sovpada z abscisno (horizontalno) osjo sistema fotografije, ordinatna os pa kaže v smeri horizontalne projekcije optične osi kamere (Slika 4). Sistem  $S'$  je torej zasukan glede na  $S$  okoli skupne navpičnice za azimutni kot  $\varphi$  optične osi kamere (Slika 2).



Slika 3: Zaporedje fotografij, uporabljenih pri izračunu hitrosti dne 19. 2. 2016. Posnete so bile s fotoaparatom Canon EOS1000D s konstantnim časovnim intervalom 15 s. V zgornjem levem kotu je čas posnetka, rdeč križec pa označuje strukturo, ki smo ji sledili. Črna črta v spodnjem desnem kotu je prostorsko merilo in predstavlja zorni kot  $5^\circ$ .

Za izračun smeri in spodnje meje hitrosti vetra na fotografijah najprej izberemo del oblaka, ki se pojavlja na več zaporednih fotografijah, ga označimo in oznaki sledimo skozi zaporedje fotografij (Slika 3). V testni študiji smo oblačno strukturo izbrali in označili ročno. Lego oznake v sistemu fotografije  $S_s$  izračunamo kot

$$x_{i,s}(t) = \frac{2n_i(t) - N_i}{N_i} R \tan\left(\frac{\psi_i}{2}\right),$$

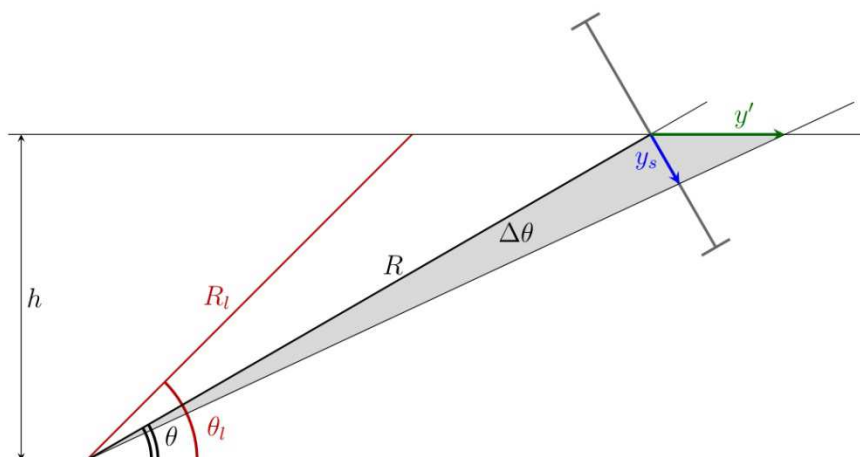
kjer je za izbrano smer ločljivost fotografije (celotno število točk)  $N_i$ ,  $n_i$  koordinata oznake v točkah v tej smeri,  $R$  razdalja od kamere do baze oblakov v središču vidnega polja kamere ter  $\psi_i$  zorni kot kamere. Za smer osi  $x_s$  je to horizontalni zorni kot  $\beta$ , za smer osi  $y_s$  pa vertikalni zorni kot  $\alpha$ , ki sta za vsak tip uporabljene kamere podana v Tabeli 1. Razdaljo med merilnim sistemom  $R$  in bazo oblakov izmerimo z lidarjem. V primeru, da optični osi lidarja in kamere nista popolnoma poravnani, pri različnih elevacijah optične osi kamere  $\theta$  in lidarja  $\theta_l$  razdaljo do oblačne plasti v sredini fotografije (Slika 4) iz lidarske meritve izrazimo kot

$$R = \frac{\sin(\theta_l)}{\sin(\theta)} R_l.$$

Iz izmerjenih leg oznake v sistemu fotografije  $S_s$  nato izračunamo lego označenega dela oblaka v koordinatnem sistemu oblačne plasti  $S'$ . Odmiki v smeri osi  $x'$  so enaki horizontalnim odmikom na fotografiji,  $x' = x_s$ , odmike v smeri osi  $y'$  pa izrazimo z odmiki v smeri osi  $y_s$  (Slika 4) kot

$$y' = R \frac{\sin(\Delta\theta)}{\sin(\theta - \Delta\theta)}, \quad (2)$$

kjer je  $\tan(\Delta\theta) = \frac{y_s}{R}$ .



Slika 4: Prečni pogled na tipično postavitev meritve hitrosti oblačnih mas. Oblačna plast je na višini  $h$  in se giblje v horizontalni ravnini. Razdalja do oblakov vzdolž optične osi lidarja z elevacijo  $\theta_l$  je  $R_l$ , vzdolž optične osi kamere z elevacijo  $\theta$  pa  $R$ .  $y_s$  je projekcija horizontalnega odmika v smeri osi  $y'$  v koordinatni sistem fotografije

V sistemu  $S'$  iz povprečne vrednosti premikov med zaporednimi legami v znanih časovnih intervalih izračunamo obe komponenti vektorja hitrosti oznake, napako pa ocenimo s standardnim odklonom. Velikost vektorja

$$v' = \sqrt{v'_x{}^2 + v'_y{}^2} \quad (2)$$

je enaka hitrosti vetra. Ker je smer vetra po dogovoru smer, iz katere veter piha, jo s komponentami vektorja hitrosti oznake izrazimo kot

$$\gamma' = \arctan\left(\frac{v'_x}{v'_y}\right) + 180^\circ. \quad (3)$$

Da bi lahko rezultate meritev z daljinskim zaznavanjem primerjali z meritvami radiosondaž in napovedmi modela HYSPLIT, moramo vektor hitrosti oznake zapisati v koordinatnem sistemu merilnega sistema  $S$ . Hitrost vetra se pri tem ne spremeni,  $v = v'$ , pri smeri vetra pa upoštevamo še azimutni kot kamere,  $\gamma = \gamma' + \varphi$ .

## Rezultati

Meritve smeri in hitrosti gibanja zračnih mas s kombinacijo aktivnega in pasivnega daljinskega zaznavanja smo izvedli v Ajdovščini v februarju in marcu 2016 na štirih



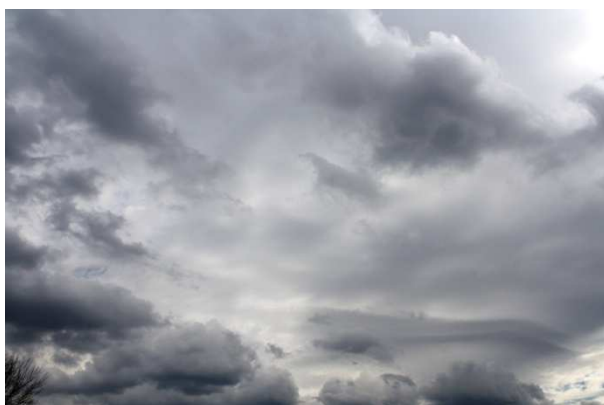
testnih primerih pod različnimi vremenskimi pogoji. Eksperimentalne podrobnosti, vključno s časom začetka in konca optičnih meritev in lidarskimi rezultati so predstavljene v Tabeli 2. Časovna in kotna ločljivost optične meritve sta odvisni od tipa uporabljenega optičnega sistema in sta podani v Tabeli 1.

Tabela 2: Opis osnovnih parametrov optičnih meritev in lidarskih meritev za štiri testne primere gibanja zračnih mas, ki smo jih opazovali februarja in marca 2016 v Ajdovščini.

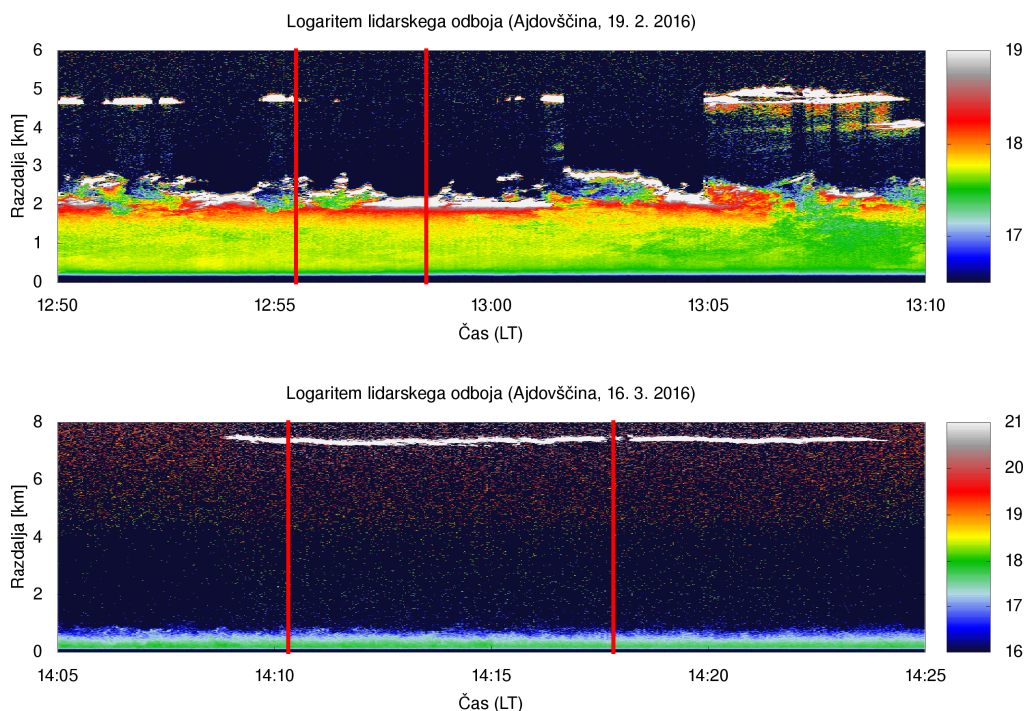
Oddaljenost in višina baze oblakov sta izračunani iz lidarskih podatkov.  $\varphi$  in  $\varphi_l$  sta azimutna kota,  $\theta$  in  $\theta_l$  pa elevacijska kota kamere in lidarja.

	<b>Primer 1</b>	<b>Primer 2</b>	<b>Primer 3</b>	<b>Primer 4</b>
<b>Datum in čas</b>	<b>19. 2. 2016 12:55 – 12:58</b>	<b>16. 3. 2016 14:10 – 14:18</b>	<b>17. 3. 2016 7:00 – 7:10</b>	<b>30. 3. 2016 10:06 – 10:12</b>
$\varphi_l$ [°]	142	144	144	144
$\theta_l$ [°]	30	30	20	30
$\varphi$ [°]	142	144	144	144
$\theta$ [°]	30	9	9	9
Razdalja $R_l$ [m]	2199 ± 154	7109 ± 8	6523 ± 48	3612 ± 10
Višina [m]	1100	3555	2231	1806
Ločljivost	3888 × 2592	640 × 480	640 × 480	640 × 480

V Primeru 1 z dne 19. 2. 2016 med 12:49 in 13:19 (Slika 5 levo) je bilo vreme oblačno. Med meritvijo sta bili prisotni dve plasti oblakov, nižji krpasti oblaki na višini 1100 m ter višji strnjeni oblaki z bazo na višini 2250 m (Slika 6 zgoraj). Nižji krpasti oblaki so precej hitro spreminjali obliko, kar je bil vzrok za veliko nedoločenost razdalje do baze nižjih oblakov (14 %). V Primeru 2 z dne 16. 3. 2016 med 13:00 in 15:00 LT (Slika 5 desno) je bilo delno oblačno vreme, v Ajdovščini pa je pihala burja. Baza oblakov je bila stabilna (Slika 6 spodaj), med meritvijo je bil odklon razdalje do baze le okoli 0,1 %. Primera 3 in 4 sta podobna Primeru 2. Rezultati meritev za vse štiri primere so predstavljeni v Tabelah 3 in 4.



Slika 5: Pokritost neba nad Ajdovščino 19. 2. 2016 ob 12:55 LT (levo) in 16. 3. 2016 ob 14:10 LT (desno). Na levi sliki je vidnih nekaj krpastih oblakov (Pannusov) na višini približno 1100 m pod glavno bazo oblakov na višini 2250 m, medtem ko na desni prevladujejo srednji oblaki, ki pripadajo rodu Altocumulusov.



Slika 6: Lidarski meritvi povratnega sipanja na aerosolih v ozračju iz dne 19. 2. 2016 (zgoraj) in 16. 3. 2016 (spodaj). Razdaljo merimo od položaja lidarskega sistema. V obeh primerih je časovni interval za izračun hitrosti in smeri vetra označen z navpičnima rdečima črtama. V zgornjem primeru se oblačna plast, ki smo jo uporabili za izračun vetra, nahaja na razdalji med 2 in 3 km, vidno je tudi spreminjanje oddaljenosti baze znotraj izbranega obdobja. V nasprotju s primerom iz 19. 2. je baza oblakov v spodnjem primeru bolj konstantna in se nahaja približno 7,5 km od merilnega sistema.

### Primerjava rezultatov z drugimi meritvami vetra in z modelom HYSPLIT

Rezultate meritev z daljinskim zaznavanjem smo primerjali s podatki radijske sondaže v Vidmu in v Ljubljani (Tabela 3), pri čemer smo izbrali meritve, ki so bile našim časovno najboljše. Opazili smo dobro ujemanje, pri čemer lahko razlike pojasnimo s časovnim in prostorskim zamikom med meritvami z daljinskim zaznavanjem in meritvami z radiosondami.

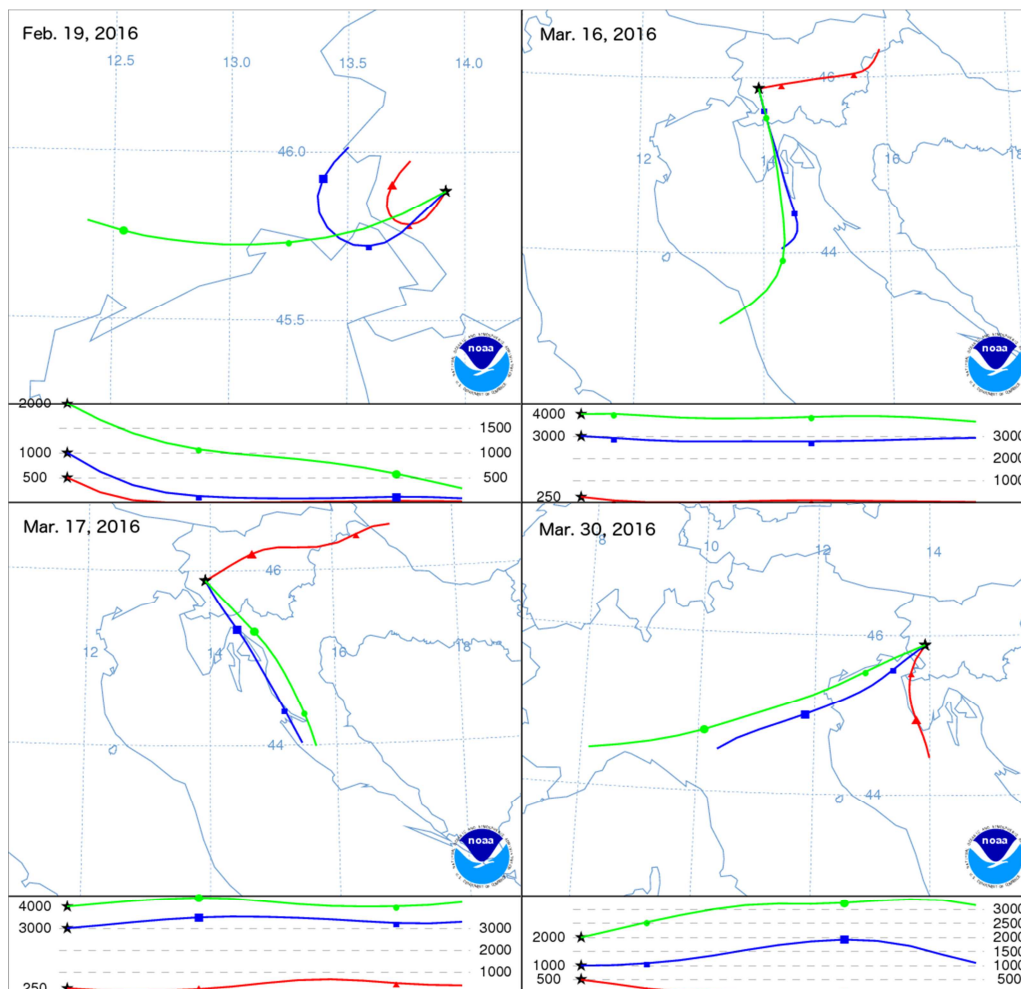
Tabela 3: Primerjava rezultatov, pridobljenih iz meritev z daljinskim zaznavanjem in meritev radijske sondaže v Ljubljani in Vidmu. Pri sondaži smo izbrali meritve, ki so bile našim po času in po višini najboljše.

Datum	Daljinsko zaznavanje		Ljubljana		Videm	
	Hitrost	Smer	Hitrost	Smer	Hitrost	Smer
	m/s	°	m/s	°	m/s	°
19. 2.	4,4 ± 0,8	258 ± 13	5,1	265	2,6	144
16. 3.	8,6 ± 2,1	191 ± 15	7,2	120	9,8	150
17. 3.	6,2 ± 1,7	182 ± 14	8,2	135	5,1	160
30. 3.	15,8 ± 1,7	243 ± 18	11,8	245	11,8	235

Ob primerjavi rezultatov, pridobljenih z daljinskim zaznavanjem in rezultatov meritev z ultrazvočnim anemometrom v Ajdovščini, nameščenim 10 m nad tlemi (Tabela 4), je prišlo do večjih odstopanj. Razlike so opazne tako v hitrosti vetra kot v njegovi smeri. Razlika v smeri je še posebej opazna v Primerih 2 in 3, ko je pri tleh pihala burja. Čeprav so bile hitrosti vetra 10 m nad tlemi in na višini baze oblakov primerljive, so se smeri vetra razlikovale za okoli 130°. Opaženo spremembo smeri z višino dne 16. 3. 2016 potrjuje tudi pojav oblakov ob Kelvin-Helmholtzovem valovanju, ki je posledica strižnih vetrov (Mole et al., 2016), z njo pa se skladajo tudi napovedi povratnih trajektorij modela HYSPLIT za Ajdovščino (Slika 7).

Tabela 4: Primerjava hitrosti in smeri vetra, izmerjenih z daljinskim zaznavanjem, s povprečnimi vrednostmi meritve anemometra v Ajdovščini v istih časovnih intervalih.

Datum	Čas LT	Daljinsko zaznavanje			Anemometer	
		Višina	Hitrost	Smer	Hitrost	Smer
		m	m/s	°	m/s	°
19. 2.	12:55-12:58	1070±77	4,4 ± 0,8	258 ± 13	0,9±0,6	218±85
16. 3.	14:10-14:18	3720±4	8,6 ± 2,1	191 ± 15	9,5±2,6	56±18
17. 3.	7:00-7:10	3370±16	6,2 ± 1,7	182 ± 14	8,2±2,5	49±19
30. 3.	10:00-10:06	2020±5	15,8 ± 1,7	243 ± 18	0,3±0,1	89±42



Slika 7: Povratne trajektorije modela HYSPLIT za zračne mase nad Ajdovščino v dneh 19. 2., 16. 3., 17. 3. in 30. 3. 2016. V času burje (16.-17. 3.) so zračne mase pritekale pri tleh iz severne, severovzhodne strani (rdeče trajektorije), višje v troposferi pa iz jugovzhodne strani (modre in zelene trajektorije).

## Zaključek

Razvili smo metodo za merjenje smeri in spodnje meje hitrosti premikanja zračnih mas na višini baze oblakov s kombinacijo aktivnega in pasivnega daljinskega zaznavanja premikanja oblakov. Metodo smo v februarju in marcu 2016 v Ajdovščini preizkusili na štirih testnih primerih v različnih vremenskih pogojih, kjer je bilo razvidno, da se oblaki premikajo. Meritve z daljinskim zaznavanjem se dobro ujemajo z meritvami radijske sondaže v Vidmu in Ljubljani, pri čemer neujemanja pripisujemo krajevni in časovni zamiku med njimi. Izmerjeni odklon smeri vetra v višjih plasteh glede na veter pri tleh med pojavom burje potrjuje opažen nastanek oblakov ob Kelvin-Helmholtzovem valovanju, ki je bilo posledica strižnih vetrov. V vseh testnih primerih se izmerjena smer vetra na višini oblačne plasti dobro ujema z napovedjo poteka povratnih trajektorij modela HYSPLIT.

Metoda nam omogoča meritev smeri in spodnje meje hitrosti vetra z dobro krajevno in časovno ločljivostjo, njena glavna omejitev pa je, da smo vezani na višino najnižje oblačne plasti. Uporabnost metode je nadalje odvisna od stopnje oblačnosti in tipa oblakov, saj

neposredno vplivata na napako pri določanju razdalje do oblakov ter na možnost sledenja posameznih struktur. Izboljšali bi jo lahko z avtomatskim prepoznavanjem vzorcev, kar bi zmanjšalo napako meritve zaradi ročne določitve oznak, ter z optimizacijo dolžine časovnih intervalov med zaporednimi posnetki.

## Literatura

- Brez avtorja (1896), Measurement of cloud heights and velocities, *Popular Astronomy*, vol. 4, pp.141-143.
- Chanin, M. L., Garnier, A., Hauchecorne, A., Porteneuve, J. (1989), A Doppler lidar for measuring winds in the middle atmosphere, *Geophysical Research Letters*, vol. 16, št. 11, <http://dx.doi.org/10.1029/GL016i011p01273>.
- He, T., Gao, F., Stanič, S., Veberič, D., Bergant, K., Dolžan, A., Song, X-Q. (2010), Scanning mobile lidar for aerosol tracking and biological aerosol identification, *Proc. SPIE*, 7832, 7832U 2010, <http://dx.doi.org/10.1117/12.868387>.
- Hooper, W. P., Eloranta, E. W. (1985), Lidar Measurements of Wind in the Planetary Boundary Layer: The Method, Accuracy and Results from Joint Measurements with Radiosonde and Kytoon, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 25, July 1986, 990 - 1001.
- Kovalev, V.A., Eichinger, W.E. (2004 ). *Elastic Lidar: Theory, Practice and Analysis Methods*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Liu Z-H., Wu, D., Liu, J-T., Zhang, K-L., Chen, W-B., Song, X-Q., Hair, J. W., She, C-Y. (2002), Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter, *Appl. Opt.* 41, 7079-7086.
- Mayor, S. D., Eloranta, E. W. (2001), Two-Dimensional Vector Wind Fields from Volume Imaging Lidar Data. *Journal of Applied Meteorology*, vol. 40, August 2001, 1331 - 1346.
- Mole, M., Wang L., Stanič S., Bergant K., Eichinger W., Ocaña F., Strajnar B., Škraba P., Vučković M., Willis W. (2016), Lidar measurements of Bora wind effects on aerosol loading, *J.Quant. Spect.* (In Press), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.05.020>.
- Rakovec, J., Vrhovec, T. (2007), *Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike*. DMFA - založništvo, Ljubljana.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. (2015), NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.



# Analiza največjih magnitud in globin žarišč potresov v Sloveniji za namen ocenjevanja potresne nevarnosti

Gregor Rajh\*, Polona Zupančič\*\*, Mladen Živčić\*\*, Andrej Gosar\*\*\*, Martina Čarman\*\*

## Povzetek

Potresno nevarnost ocenjujemo z determinističnim (DSHA) ali verjetnostnim (PSHA) pristopom. Danes PSHA pripisuje velik pomen seizmotektonskim podatkom, ki jih podajamo predvsem v obliki aktivnih prelomov in seizmotektonskih območij. Aktivni prelomi v Sloveniji so bili v zadnjih letih predmet obsežnih raziskav. Rezultati so spodbudili natančnejšo analizo potresnih izvorov na podlagi pretekle seizmičnosti. Uporabili smo zgodovinsko-instrumentalni (od leta 456 do 2013) in instrumentalni (od leta 2004 do 2014) potresni katalog, prvega za določitev največjih magnitud in drugega za oceno seizmogenih globin potresnih izvorov. Analizo smo izvedli z orodji GIS, ki so olajšala objektivno analizo danih geoloških in seizmoloških razmer v Sloveniji. Vzpostavili smo prostorski odnos med tektonskimi podatki in preteklo seizmičnostjo ter na ta način opredelili največje magnitude in seizmogene globine. Zanesljivost analize globin smo zagotovili z uporabo različnih meril pri izboru potresov iz instrumentalnega potresnega kataloga. Rezultate prikazujemo na kartah magnitud in globin za seizmotektonska območja, celice in prelomne potresne izvore. Ugotavljamo, da so bili najmočnejši potresi v preteklosti v zahodni in osrednji Sloveniji, z nekaterimi izstopajočimi vrednostmi tudi v drugih predelih Slovenije. Globine potresov so večje v zahodnem delu Slovenije. Rezultati analize bodo uporabni pri določanju vhodnih parametrov za verjetnostno oceno potresne nevarnosti v Sloveniji.

**Ključne besede:** potresna nevarnost, seizmotektonika, GIS, potresni izvor, aktivni prelom, seizmotektonsko območje, seizmogeni globina, največja magnituda, PSHA

**Key words:** seismic hazard, seismotectonics, GIS, seismic source, active fault, seismotectonic province, seismogenic depth, maximum magnitude, PSHA

## Uvod

Potresna nevarnost je opredeljena z jakostjo tresenja tal, ki so jo na nekem območju zmožni povzročiti potresi v izbrani povratni dobi. Ocenimo jo lahko z determinističnim ali verjetnostnim pristopom in predstavlja izhodišče za analizo potresne ogroženosti. Verjetnostno ocenjevanje potresne nevarnosti (PSHA) upošteva porazdelitev potresov in učinke potresov različnih magnitud z vseh potresnih izvorov obravnavanega območja (Reiter, 1991; McGuire, 2004). Uradna karta potresne nevarnosti Slovenije (Lapajne in drugi, 2001) temelji na verjetnostnem pristopu z glajenjem seizmičnosti. Glajenje je bilo deloma pogojeno s količinskim seizmotektonskim modelom, ki povzema značaj in orientacijo večjih prelomov ali tektonskih struktur znotraj posameznih območij. Seizmotektonska območja so bila obravnavana kot homogena in s tem zanemarjene lastnosti posameznih manjših struktur, ki so prav tako pomembne za oceno potresne nevarnosti. Takšen pristop je bil uporabljen zaradi pomanjkanja kvalitetnih seizmotektonskih podatkov. Razvoj geodetskih metod in paleoseizmologije ter številne geološke in geofizikalne raziskave so nam v zadnjem času omogočile pridobitev podrobnejših seizmotektonskih podatkov na ozemlju Slovenije in bližnje okolice. Geološki zavod Slovenije (Atanackov in drugi, 2014 in 2015) je za namen PSHA izdelal karto aktivnih, verjetno aktivnih in

---

\* Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana

\*\* MOP, Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

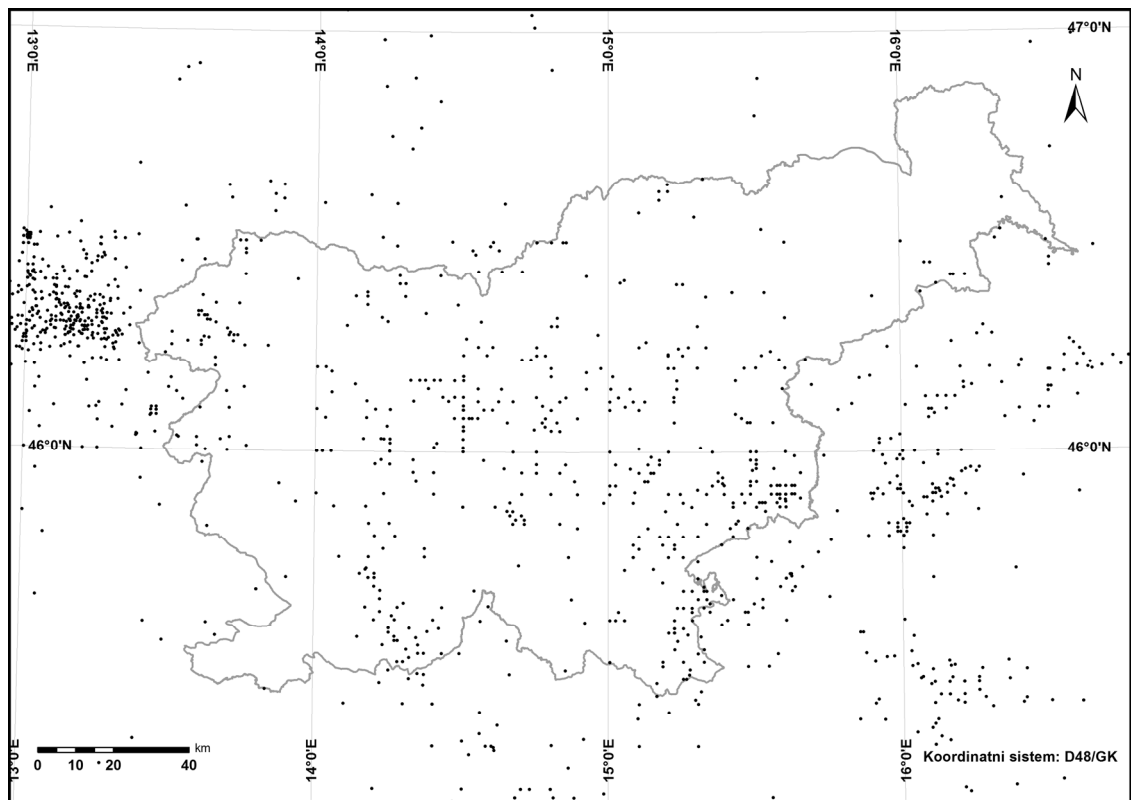
potencialno aktivnih prelomov ter podal parametrizacijsko tabelo s podatki o prelomih. Ti podatki so spodbudili natančnejše seizmološke analize različnih vhodnih podatkov za PSHA. V tej študiji smo se osredotočili na določitev največje magnitude potresov, ki so se zgodili v določenem potresnem izvoru (največja magnituda) in na opredelitev globine posameznih potresnih izvorov. Tektonski vhod v analizo so predstavljali prelomi, pridobljeni na podlagi karte aktivnih prelomov (Atanackov in drugi, 2014 in 2015) in seizmotektonska območja. Slednja smo na ARSO izdelali v okviru mednarodnega projekta BSHAP (Gülerce et al., 2015). Podatke o pretekli seizmičnosti smo črpali iz zgodovinsko-instrumentalnega (od leta 456 do 2013) in instrumentalnega (od leta 2004 do 2014) potresnega kataloga (ARSO, 2014 in 2015). Analizo smo izvedli s pomočjo orodij GIS (ArcGIS) in skriptnega programskega jezika (Python2) z razširitvami. Rezultati so pokazali, da je na ta način mogoče izvesti dovolj podrobno in objektivno analizo največjih magnitud in globin žarišč potresov po potresnih izvorih tudi na območju Slovenije. Tovrstna analiza je zaradi relativno počasnih premikov ob prelomih in zmerne potresne aktivnosti zelo zahtevna. Rezultati največjih magnitud in globin potresnih izvorov so pomembni za verjetnostni izračun nove karte potresne nevarnosti Slovenije.

### Vhodni podatki

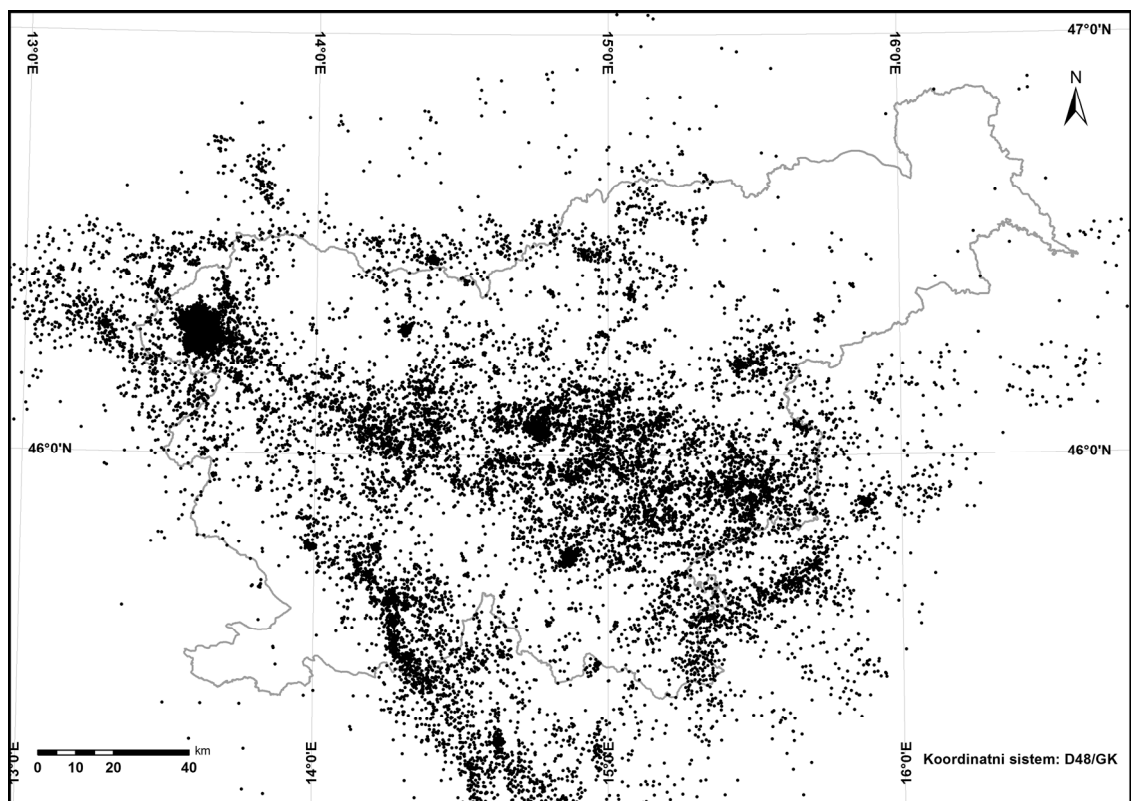
Temelj analize magnitud in globin žarišč potresov sta dva potresna kataloga, ki obsegata območje Slovenije s širšo okolico. Zgodovinsko-instrumentalni potresni katalog (ARSO, 2014), prikazan na sliki 1, obsega obdobje od leta 456 do 2013 in vsebuje 2109 zgodovinskih in instrumentalno opredeljenih parametrov potresov. Najmočnejši potres v katalogu doseže  $M_w$  6,5. Katalog vsebuje zmerne in močne potrese ( $M_w \geq 3,5$ ) na območju med  $44^\circ$  in  $48^\circ$  SGŠ in med  $12^\circ$  in  $18.5^\circ$  VGD. V analizi smo ga geografsko omejili na Slovenijo in neposredno okolico. Ta katalog smo zaradi daljšega časovnega razpona uporabili za določitev največjih magnitud v potresnih izvorih.

Za določitev globin potresnih izvorov smo uporabili instrumentalni potresni katalog (ARSO, 2015), prikazan na sliki 2, v katerem so lokacije žarišč določene točneje. Le-ta vsebuje 20.832 potresov in obsega obdobje od leta 2004 do 2014. Začetek kataloga sovpada s končano izgradnjo nove državne mreže potresnih opazovalnic, ki je bila predpogoj za točnejše lociranje žarišč potresov in predvsem določitev njihovih globin. V obeh katalogih so podane ocene napak parametrov. V instrumentalnem katalogu smo pred analizo globin izločili slabše locirana žarišča posameznih potresov z uporabo meril, ki temeljijo na številu potresnih opazovalnic, največji azimutni vrzeli med žariščem potresa in posameznimi opazovalnicami (vrzel ali ang. gap) ter na razmerju med oddaljenostjo potresnih opazovalnic od nadžarišča in globino žarišča (razmerje D/H). Preizkusili smo različne kombinacije meril za izbor potresov. V analizi uporabljamo globine potresnega podkataloga, filtriranega z merili, ki smo jih po strokovni presoji izbrali za najprimernejše. Podani so v preglednici 1. Tako filtriran podkatalog vsebuje 8174 potresov, z najglobljim potresom na 35,1 km.





Slika 1 – karta lokacij nadžarišč potresov v zgodovinsko-instrumentalnem potresnem katalogu



Slika 2 – karta lokacij nadžarišč potresov v instrumentalnem potresnem katalogu

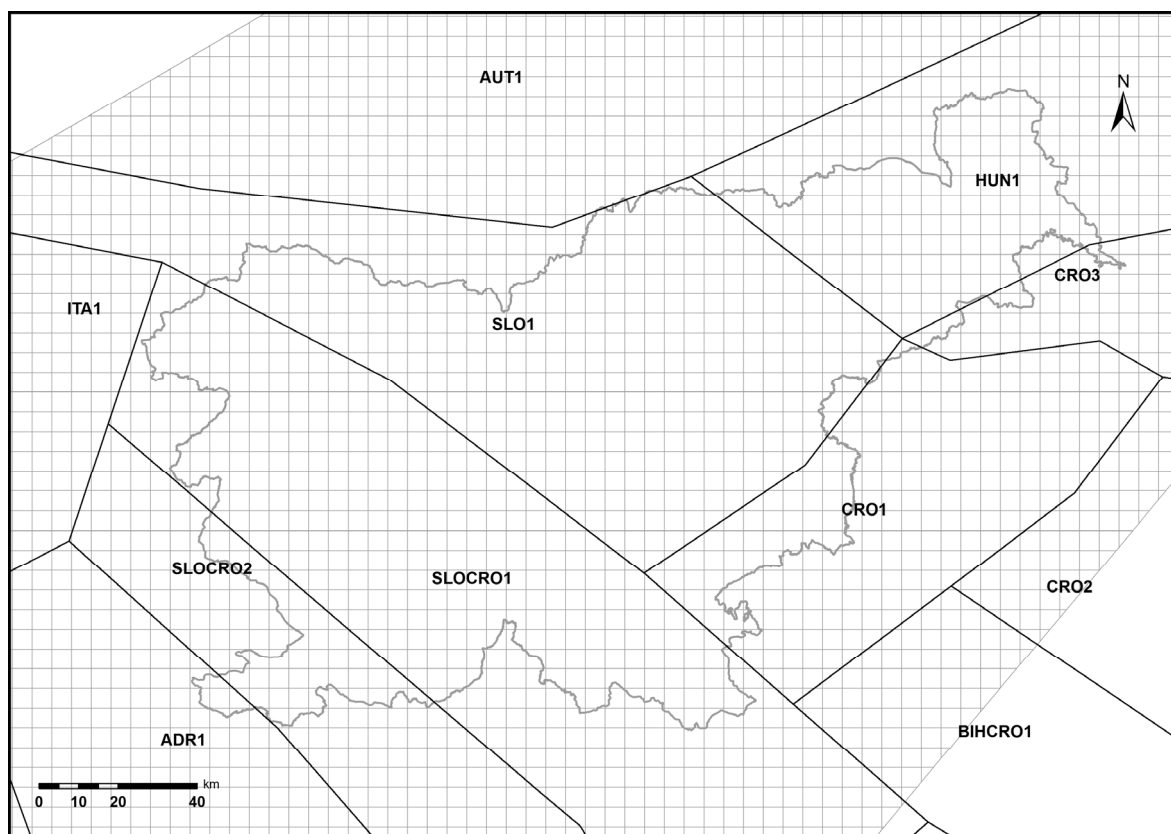
Preglednica 1 – uporabljena merila za izbor bolje lociranih žarišč potresov

Število potresnih opazovalnic	> 4
Azimutna vrzel [°]	≤ 180
Razmerje D/H	≤ 1,5

Prostorsko analizo smo izdelali na treh nivojih. Prvi nivo so seizmotektonska območja, ki smo jih na ARSO izdelali v okviru mednarodnega projekta BSHAP (Gülerce in drugi, 2015). Večji del Slovenije pripada petim seizmotektonskim območjem, manjši deli pa segajo v dodatna tri območja (slika 3).

Za boljšo preglednost in lažje razločevanje med regionalnimi in lokalnimi prostorskimi spremembami smo raziskovano območje razdelili na kvadratne celice velikosti 5 x 5 km (slika 3) in 2,5 x 2,5 km, ki nam omogočajo izvedbo analize globin, neodvisno od tektonskih podatkov. Iz analize celic so bila izločena območja, v katerih so potresi redki.

Seizmotektonska območja in celice nam podajajo grobo sliko porazdelitve največjih magnitud in globin potresov. Na ta način lahko razberemo določene regionalne spremembe.



Slika 3 – prikaz seizmotektonskih območij BSHAP in celic velikosti 5 x 5 km, uporabljenih v analizi

Poleg seizmotektonskih območij in celic smo vzporedno uporabili tudi prelome, ki jih je v okviru projekta "Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije" pripravil Geološki zavod Slovenije (Atanackov in drugi, 2014 in 2015). Prelomi so geometrijsko podani kot linijski sloj (slika 4) s številnimi parametri in temeljijo na trasah 89 aktivnih, verjetno aktivnih in potencialno aktivnih prelomov (v nadaljevanju prelomov). V programskem okolju GIS smo za vsak prelom oblikovali prelomno območje, ki je na podlagi testiranj široko 5 km od vsake točke, prečno na prelom. S tem smo vsaj delno upoštevali napako lokacije nadžarišč in zaobjeli globinsko geometrijo prelomov. Dobljena območja smo zaradi manjšega prekrivanja podaljšali vzdolžno za 2 km v obe smeri. Končna oblika prelomnih območij je prikazana na sliki 4.

## **Analiza**

Največjo magnitudo in globino žarišč potresov po seizmotektonskih območjih, celicah in prelomnih območjih smo določili s pomočjo orodij GIS (ArcGIS) in skriptnega programskega jezika (Python2) z razširitvami. Pred tem smo podatke transformirali v enoten koordinatni sistem (D48/GK). Prostorske poizvedbe smo opravili na obeh potresnih katalogih in tako vsakemu potresu pripisali pripadajoče seizmotektonsko območje, celico in prelomno območje. Seizmotektonska območja smo zaradi njihove razprostranjenosti lahko pripisali vsem potresom. Nekaterim potresom nismo mogli pripisati nobenega preloma, ker so se nahajali izven vseh prelomnih območij. V primeru prekrivanja prelomnih območij smo enemu potresu pripisali več prelomov. Nekatera prelomna območja so ostala brez pripadajočih potresov. Za njih bomo privzeli rezultate iz bližnjih prelomnih območij.

V vsakem seizmotektonskem območju, celici in prelomnem območju smo poiskali največjo in najmanjšo vrednost magnitud in globin ter 5., 10., 90. in 95. percentil globin. Prav tako smo izračunali razliko globin med največjo in najmanjšo vrednostjo, 95. in 5. percentilom, 90. in 10. percentilom ter dodali tudi podatek o številu potresov. Z uporabo percentilnih vrednosti globin smo se izognili izstopajočim vrednostim, ki so lahko posledica netočne lokacije žarišč. Z razliko med največjimi in najmanjšimi vrednostmi ter razliko med percentilnimi vrednostmi smo si pomagali pri opredelitvi potresnih izvorov po globini.

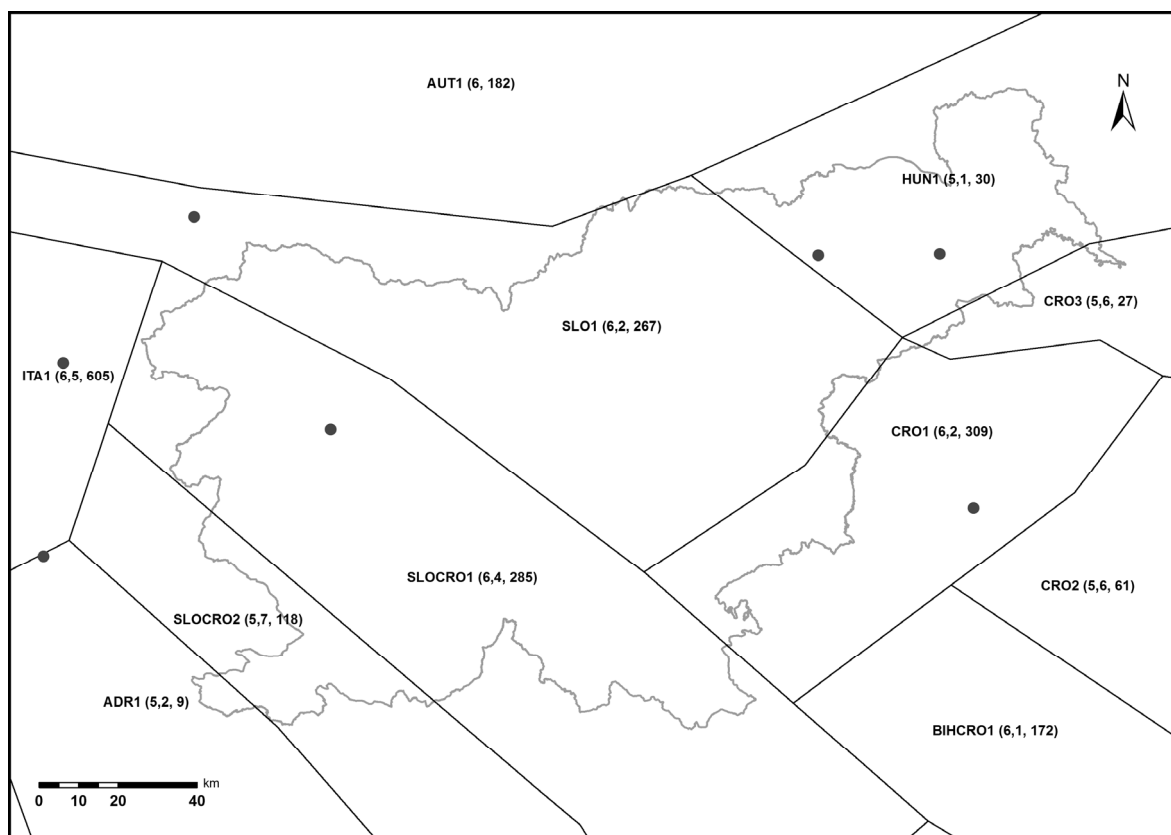


Slika 4 – karta prelomov in prelomnih območij

## Rezultati

### Največje magnitude

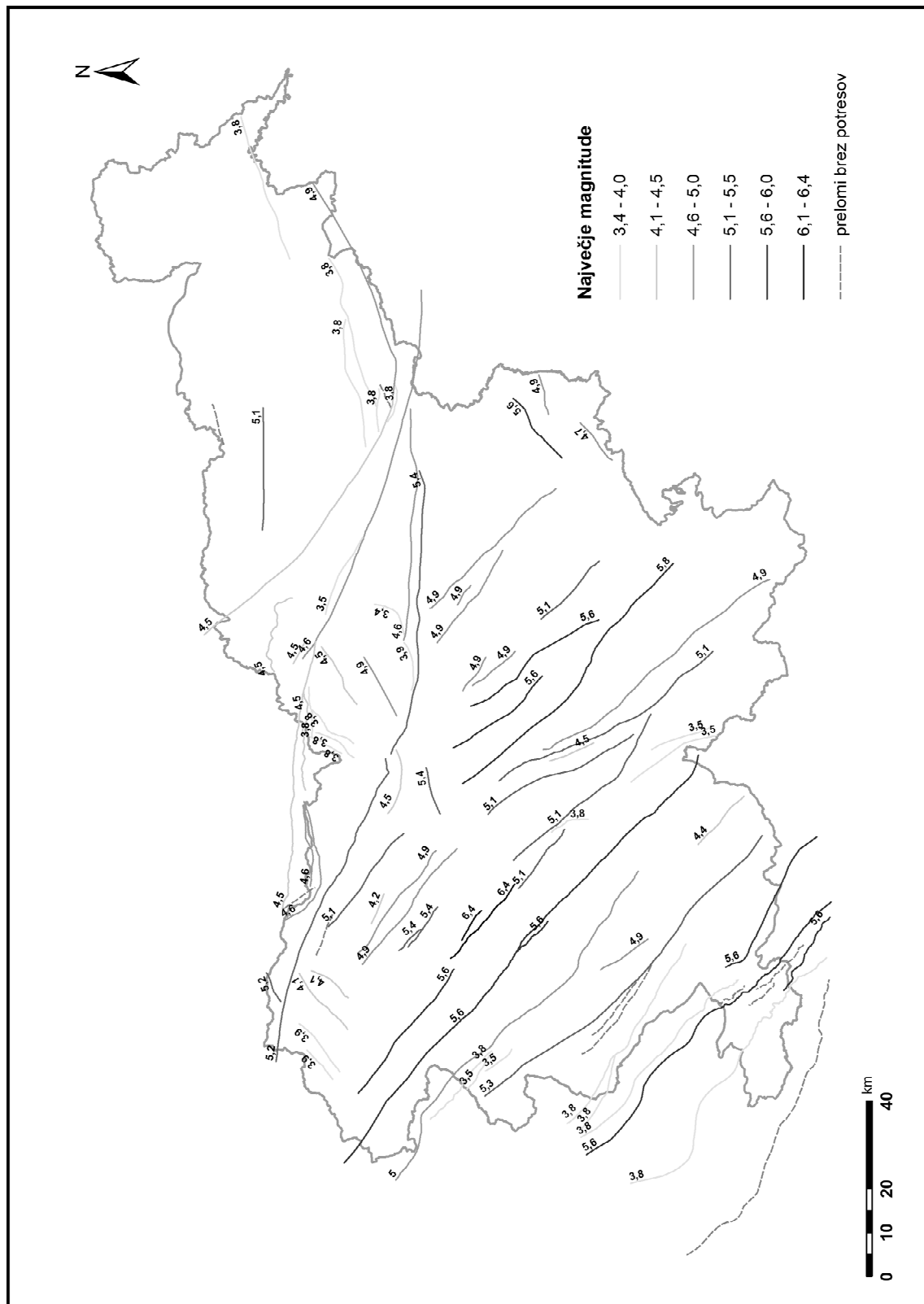
Za oceno zmožnosti seizmogenih virov potrebujemo magnitudo najmočnejših opaženih potresov. Na sliki 5 so prikazane največje opažene vrednosti magnitud za seizmotektonska območja BSHAP. Večji del Slovenije pripada območjem SLO1, SLOCRO1 in CRO1, za katere je največja opažena magnituda nad 6,0. Vidno je zmanjševanje največjih magnitud in hkrati tudi števila potresov v smeri proti SV (Panonskemu bazenu) in JZ (Jadranskemu predgorju). Največja opažena magnituda na prikazanem ozemlju je 6,5 na območju ITA1. Najmanjšo vrednost največjih opaženih magnitud 5,1 zasledimo na območju HUN1. Za vsako območje so prikazane lokacije najmočnejših potresov (slika 5). Nekateri najmočnejši potresi se nahajajo izven prikazane karte.



Slika 5 – največje opažene vrednosti magnitud za seizmotektonska območja BSHAP s številom potresov in lokacijami nadžarišč najmočnejših opaženih potresov

Slika 6 prikazuje rezultate analize največjih magnitud znotraj prelomnih območjih. Zaradi boljše preglednosti so na karti prikazani prelomi. Regionalne spremembe so pričakovano podobne tistim, ki jih opažamo že na karti seizmotektonskih območij, saj rezultati temeljijo na istem (zgodovinsko-instrumentalnem) potresnem katalogu. Prelomi z največjimi opaženimi magnitudami so dinarske smeri (SZ–JV) in dosega največje magnitude v zahodni in osrednji Sloveniji. Poleg njih se pojavljajo prelomi z največjimi opaženimi magnitudami 5,6 v vzhodnem in jugozahodnem delu Slovenije. Največja opažena magnituda znotraj prelomnih območij je 6,4. Določena je bila za prelomni območji Čeplez in Trebija in je zaradi bližine obeh rezultat istega potresa iz leta 1511. Lokacija za ta potres je določena

le iz makroseizmičnih raziskav in je zato manj točna. Prelomno območje z najmanjšo opaženo vrednostjo največjih magnitud 3,4 je Vransko. Prelomnim območjem je bilo pripisanih 483 potresov. Znotraj desetih prelomnih območjih ni bilo zabeleženih nobenih potresov, zato so pripadajoči prelomi prikazani brez vrednosti največjih magnitud.

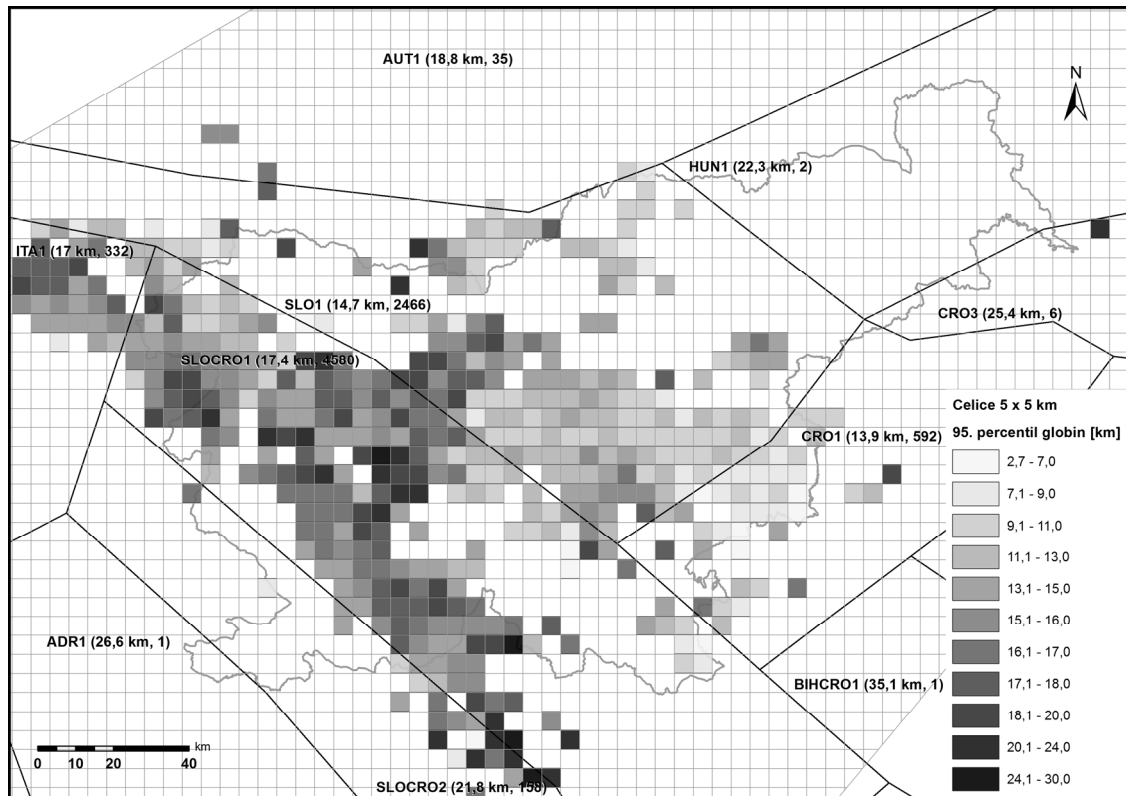


Slika 6 – rezultati analize največjih magnitud po prelomnih območjih

## Globine

Po strokovni presoji kart različnih percentilov smo se odločili, da bomo za dana merila (preglednica 1) upoštevali 95. percentil globine v določenem seizmotektonskem območju, celici ali prelomnem območju. Za lažjo odločitev smo na karte dodali tudi število potresov, na podlagi katerih so bile izračunane vrednosti.

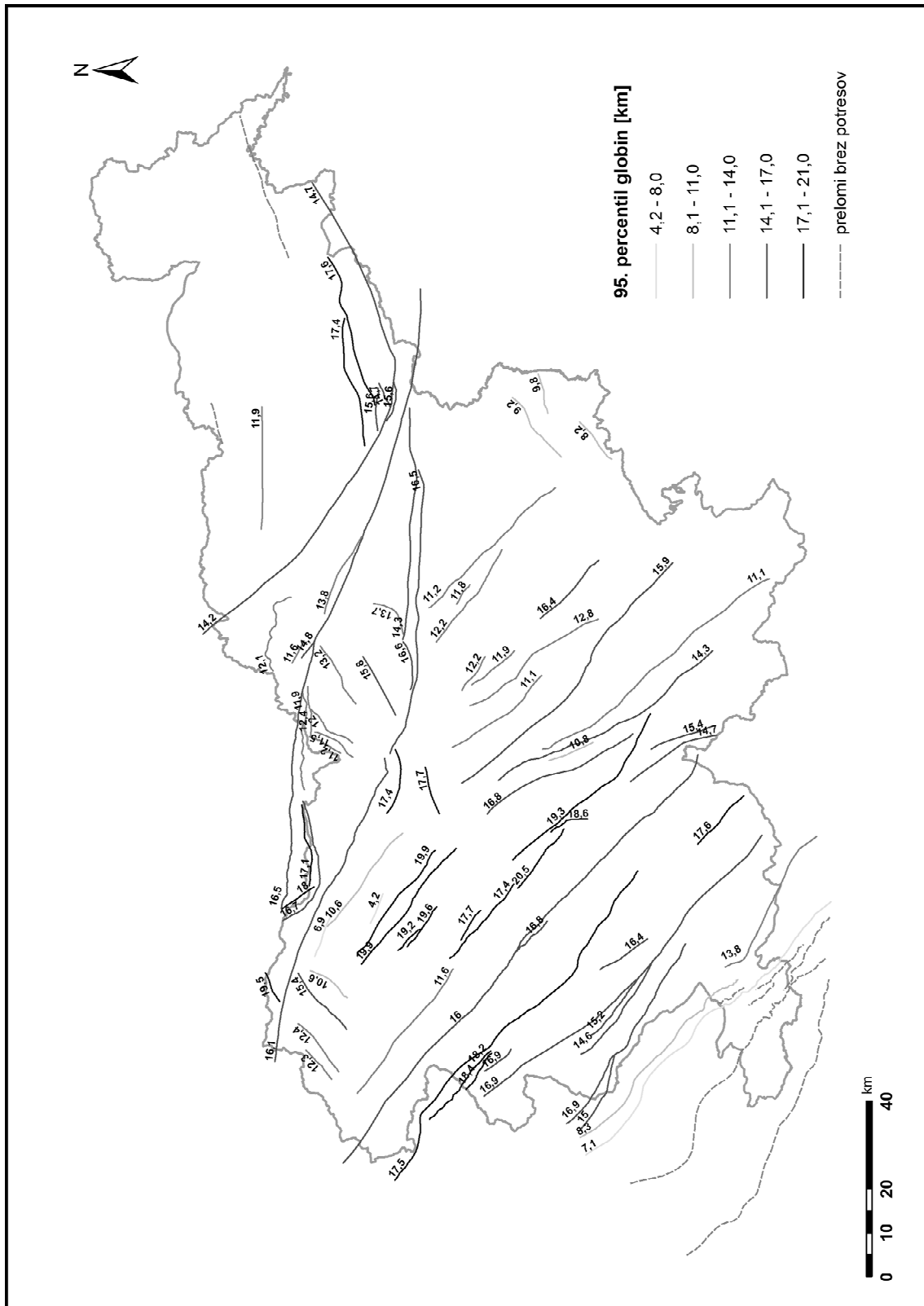
Globine za seizmotektonska območja BSHAP so prikazane na sliki 7. Zanesljivost določenih globin je majhna za območja z manj kot 100 potresi (npr. ADR1, HUN1, CRO3), zato so vrednosti zanje lahko zavajajoče in jih v nadaljevanju ne bomo komentirali. Za večji del Slovenije prikazane globine naraščajo približno v smeri SV–JZ, tj. od okoli 14 km za območja SLO1 in CRO1 ter do 21,8 km za območje SLOCRO2. Smer naraščanja je lahko posledica oblike seizmotektonskih območij. Celice velikosti 5 km odražajo porazdelitev globin (slika 7), ki ni popačena zaradi oblike seizmotektonskih območij. V tem primeru se Slovenija deli na dva dela. Globine potresov so bistveno večje v zahodnem delu z vrednostmi do okoli 25 km. V vzhodnem delu Slovenije globine ne presežejo 18 km, potresi pa se le redko pojavljajo tudi pod globino 16 km. Preostanejo območja brez prikazanih celic, kjer za obdobje instrumentalnega kataloga nismo mogli določiti globin zaradi zelo majhnega števila ali popolne odsotnosti potresov. Prikazane so celice, ki vsebujejo najmanj tri potrese.



Slika 7 – prikaz 95. percentila globin ter števila potresov za seizmotektonska območja BSHAP in celice velikosti 5 x 5 km

Slika 8 prikazuje globine po prelomih za posamezna prelomna območja, ki jim skupno pripada 5928 potresov. Največje vrednosti globin zasledimo na prelomnih območjih v severozahodnem in zahodnem delu Slovenije in se nadaljujejo proti njenemu jugozahodnemu in deloma južnemu delu. Največja globina pripada prelomnemu območju Vrhiškega preloma in znaša 20,5 km. Povečane vrednosti globin zasledimo tudi na

skrajnem severozahodu in severu. Višje percentilne vrednosti globin na prelomnih območjih severovzhodne Slovenije so manj zanesljive zaradi večje oddaljenosti potresnih opazovalnic od njihovih žarišč. Seizmičnih globin ni bilo mogoče določiti sedmim prelomnim območjem, saj znotraj njih ni bilo potresov.



Slika 8 – rezultati analize 95. percentila globin po prelomnih območjih



## Zaključek

V okviru študije smo vsakemu seizmotektonskemu območju, celici in prelomnemu območju določili največjo opaženo magnitudo potresa in opredelili seizmogeno globino. Na podlagi seizmotektonskih območij (Gülerce in drugi, 2015), celic različnih velikosti in karte aktivnih, verjetno aktivnih in potencialno aktivnih prelomov (Atanackov in drugi, 2014 in 2015) ter dveh potresnih katalogov (ARSO, 2014 in 2015) smo izvedli prostorsko analizo. Ugotavljamo, da se največje opažene magnitude potresov pojavljajo v zahodni in osrednji Sloveniji. Globine potresov so v splošnem večje v zahodnem delu Slovenije. Rezultati analize bodo osnova za določevanje seizmoloških vhodnih parametrov za verjetnostno oceno potresne nevarnosti pri izdelavi nove karte potresne nevarnosti Slovenije.

## Literatura

- Agencija RS za okolje (ARSO) (2014). Katalog potresov od leta 456 do 2013. Arhiv Agencije RS za okolje.
- Agencija RS za okolje (ARSO) (2015). Katalog potresov od leta 2004 do 2014. Arhiv Agencije RS za okolje.
- Atanackov, J., Bavec, M., Celarc, B., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Novak, M., Milanič, B. (2014). Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije. 1. del. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Atanackov, J., Bavec, M., Celarc, B., Jamšek Rupnik, P., Jež, J., Novak, M., Milanič, B. (2015). Seizmotektonska parametrizacija aktivnih prelomov Slovenije. 2. del. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana.
- Gülerce, Z., Salic, R., Hrvatovic, H. I., Kovacevic, V., Kuka, N., Markusic, S., Mihaljevic, J. (2015). Final report of improvements in the Harmonized Seismic Hazard Maps for the Western Balkan Countries (BSHAP-2) Project. NATO SfP-984374. <http://wbalkanseismicmaps.org> (10. 12. 2016)
- Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. (2001). Nova karta potresne nevarnosti – projektni pospešek tal namesto intenzitete. Gradbeni vestnik 50/6, 140–149.
- McGuire, R. K. (2004). Seismic Hazard and Risk Analysis. Earthquake Engineering Research Institute, Kolorado, ZDA.
- Reiter, L. (1991). Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights. Columbia University Press, New York, ZDA, str. 254.



# Izvedba in zagotavljanje kakovostnih avtomatskih meritev za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam

Boštjan Grašič\*, Primož Mlakar\*, Marija Zlata Božnar\*, Darko Popović\*, Dragana Kokal\*,  
Franci Gabrovšek\*\*

## Povzetek

V prispevku je predstavljena izgradnja in delovanje jamskega informacijskega sistema v Postojnski jami. Podrobneje je opisana izgradnja osnovnih gradnikov jamskega informacijskega sistema kot je pet jamskih avtomatskih merilnih postaj s senzorji za merjenje temperature zraka, pretoka zraka, koncentracije CO<sub>2</sub> ter centralne enote za zbiranje, shranjevanje, obdelavo in prikaz podatkov. Sistem zagotavlja kakovostne avtomatske meritve za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam. Izgradnja temelji na dobri praksi katere osnovo predstavljajo dolgoletne izkušnje s področja meritev v zunanji atmosferi in pet let izkušenj z meritvami v kraških jamah ter upoštevanje načela nenehnega izboljševanja na osnovi priporočil ISO 9001 standarda za zagotavljanje kakovosti.

**Ključne besede:** izvedba in zagotavljanje kakovostnih meritev, kraške jame, mikroklima  
**Key words:** quality measurements implementation and assurance, carst caves, microclimate

## Uvod

Za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam potrebujemo kakovostne avtomatske meritve različnih fizikalnih veličin na različnih merilnih mestih za katere prepostavljamo, da nam lahko dovolj dobro opisujejo glavna dogajanja v jami. Za kakovostno spremljanje fizikalnih veličin v zunanji atmosferi so na voljo podrobna priporočila Svetovne meteorološke organizacije (World Meteorological Organization, 2008), medtem ko za spremljanje mikrometeorologije v kraških jamah še ni podobnih priporočil.

Podatki so kakovostni kadar izpolnjujejo vnaprej določene zahteve kot so natančnost, oziroma negotovost, ločljivost, reprezentativnost, pravočasnost in druge zahteve, ki so odvisne od namena uporabe. Kakovostne meritve lahko zagotavljamo z uporabo ustreznih senzorjev, pretvornikov, ustreznih z računalnikom podprtih obdelav pa tudi z ustreznim sistemom vodenja kakovosti. Kljub temu, da so vsi izmerjeni podatki neidealni – imajo večjo ali manjšo merilno negotovost, so za določen namen povsem uporabni, če je njihova kakovost znana (World Meteorological Organization, 2008).

Svetovna meteorološka organizacija priporoča zelo podrobno kako je potrebno meriti meteorološke spremenljivke (World Meteorological Organization, 2008). Priporočila se razlikujejo glede na namen meritev. Za sinoptične merilne postaje, ki posredujejo podatke za napovedovanje vremena, so najbolj striktna. Na primer: meritve temperature zraka se morajo izvajati v posebnih meteoroloških hišicah, ki so postavljene 2 m od tal. Okolica merilnikov mora biti pokošen travnik. V bližini ne sme biti visokih dreves in zgradb. Veter se meri na višini 10 m od tal. Sinoptične postaje morajo biti postavljene na lokacijah, ki so reprezentativne za večje področje. Veliko sinoptičnih postaj je postavljenih ob letališčih. Za okoljske postaje, ki merijo kvaliteto zraka pa so zahteve bolj ohlapne, zato jih lahko postavimo v naselja.

\* MEIS storitve za okolje, d.o.o., Mali Vrh pri Šmarju 78, SI-1293 Šmarje-Sap, Slovenija

\*\* Inštitut za raziskovanje krasi ZRC SAZU, Titov trg 2, SI-6230 Postojna, Slovenija

V okviru tega prispevka predstavljamo pridobljene izkušnje in spoznanja pri izgradnji in zagotavljanju kakovostnih avtomatskih meritev za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam, ki temeljijo na dobri praksi in ustrezni dopolnitvi in prilagoditvi priporočil Svetovne meteorološke organizacije za meritve v zunanji atmosferi (World Meteorological Organization, 2008).

### **Jamski informacijski sistem**

Jamski informacijski sistem je sestavljen iz poljubnega števila jamskih avtomatskih merilnih postaj in vozlišč za prenos podatkov ter jamske centralne enote. Jamske avtomatske merilne postaje na izbranih lokacijah neprekinjeno izvajajo meritve različnih okoljskih parametrov (npr. temperature zraka, koncentracijo CO<sub>2</sub>, itd) v vnaprej predpisanih časovnih intervalih tako za vzorčenje kot za statistične obdelave in jih v digitalni obliki posredujejo centralni enoti. Podatke lahko centralna enota pridobiva direktno iz jamske merilne postaje ali preko dodatnih vozlišč za prenos podatkov.

Jamska centralna enota je sestavljena iz enega ali več strežniških računalnikov, ki opravljajo več različnih nalog: zbiranje podatkov iz avtomatskih merilnih postaj, dodatno preverjanje in obdelava zbranih podatkov, shranjevanje preverjenih in obdelanih podatkov v ustrezno strukturirano zgodovinsko bazo podatkov, zagotavljanje dostopa uporabnikom do baze podatkov (sprotnih in zgodovinskih) in dostop do prikaza zadnjih izmerjenih vrednosti na javni spletni strani.

Kakovost jamskega informacijskega sistema je odvisna tudi od njegovega namena, saj je na primer izgradnja sistema za sproti nadzor (monitoring) jame manj kompleksna in zahtevna kot pa na primer izgradnja sistema za znanstveno proučevanje, kjer je poleg bolj kompleksne zgradbe zahtevana tudi večja kakovost meritev.

Jamski informacijski sistem mora med drugim zagotavljati tudi orodja za analize in znanstveno proučevanje, kot so na primer časovni grafi, histogrami, rože vetrov, daljše časovne statistike in sončnice (Božnar et al., 2015). Dodatno mora tak sistem zagotavljati in vzdrževati popolno zgodovinsko bazo meritev. Na mesečni ravni je potrebno delovanje celotnega sistema periodično pregledovati in preverjati, da bi pravočasno ugotovili napake, odstopanja, itd. Za takšen namen je zelo primeren način izdelovanja QA/QC (Quality Assurance/Quality Control) poročil vsak mesec, kjer so vse meritve prikazane in primerjane na časovnih grafih. Dodatno se v poročilu izdelata tudi razpoložljivost, statistika in kakovost vseh merjenih spremenljivk (parametrov) ter vizualizira vse meritve na primeren način (na primer meritve vetra v obliki rož vetrov). Po pregledu poročila se po potrebi podatki v bazi ustrezno prečistijo (označijo kot neveljavni), organizira pa se tudi ustrezen ukrep za popravilo meritve, kadar je to potrebno.

Reden periodičen pregled vseh gradnikov jamskega informacijskega sistema (postaj, vozlišč, podatkovnih mul, računalnikov, itd) na terenu je potreben vsaj vsake tri mesece ne glede na dobre rezultate QA/QC poročil. Preventivno čiščenje senzorjev in filtrov ter vizualni pregled opreme sistema prepreči veliko nepotrebnih izrednih vzdrževalnih del. Včasih je glede na uporabljene gradnike potreben pregled na terenu tudi pogosteje.

Sistem bo deloval bolj kakovostno, če vsebuje tudi avtomatiko za sprotno odkrivanje napak v meritvah, pri prenosu podatkov ali pri shranjevanju na centralni enoti. opozorilo lahko sproži relativno hitro izvedbo izrednega servisa in s tem odpravo napake pred rednim periodičnim pregledovanjem.

Kakovosten jamski informacijski sistem mora zagotavljati vsaj 98% razpoložljivost podatkov.

### Jamska avtomatska merilna postaja

Jamsko merilno postajo sestavljajo senzorji povezani z merilnimi vmesniki in napravami ter vgradni ali osebni računalnik. Vgradni računalnik neprekinjeno zajema, zbira in kontrolira podatke iz merilnih vmesnikov ter jih samodejno ali na zahtevo posreduje eni ali več centralnim enotam.

Pri izvedbi jamske avtomatske merilne postaje je kakovost odvisna od končnega namena jamskega informacijskega sistema. Medtem, ko so za namen varovanja zdravja in življenja ljudi v jami povsem dovolj manj natančni indikatorski merilniki (detektorji), je za znanstveno proučevanje jam potrebna uporaba znanstvene opreme, ki jo sestavljajo senzorji in naprave ter programska oprema.

Znanstvena oprema za take potrebe mora biti zelo kakovostna in prilagodljiva oziroma mora imeti možnosti dograjevanja in dopolnitev. Glavne značilnosti takšne jamske avtomatske merilne postaje so:

- uporaba kakovostnega merilnega vmesnika (data loggerja) za priklop vsaj nekaj senzorjev za merjenje različnih parametrov, ki omogoča majhno porabo električne energije, dodatno shranjevanje na lasten stalni spominski medij (na primer CF kartico), ki je prilagodljiv ter odporen na ekstremno okolje v jami in ga je možno tudi reprogramirati;
- uporaba naprednega neprekinjenega napajanja, ki temelji na mikrokontrolerju z izredno majhno porabo električne energije in mora skrbeti za: dobro kondicijo baterije, mora premostiti krajšne izpade elektrike (vsaj do 2 dni), vnaprej signalizirati operacijskemu sistemu skorajšen izklop zaradi zaščite podatkov na stalnem spominskem mediju, ki je občutljiv na nenadne izpade električne energije in mora spremljati stanje baterije vsaj tako dobro kot ostale parametre v okolju,
- poraba električne energije mora biti čim manjša in optimizirana (trenutno stanje elektronike omogoča skupno porabo pod 2W), da se v okolico postaje ne oddaja preveč energije, ki lahko omogoča rast raznih mikroorganizmov v bližnji okolici;
- tudi pri zagotavljanju energije je potrebno upoštevati lokalno onesnaževanje jame ali pa tudi direkten vpliv na meritve; aktivni viri, kot so to na primer gorivne celice ali agregati, ne pridejo v poštev, ker oddajajo CO<sub>2</sub> in se močno grejejo, zato pride zaenkrat v poštev samo dovod energije preko dolgih kablov (več dela pri izgradnji za neprekinjeno napajanje) ali baterij (preprostejša montaža, vendar jih je potrebno periodično polniti),
- ustrezno je potrebno zavarovati senzorje pred kondezacijo vode in padajočimi vodnimi kapljicami (na primer CO<sub>2</sub> senzor z lastnim gretjem ali majhnim nastreškom, itd) in priključke (konektorje), kjer je pri montaži potrebno biti pazljiv, da nikjer ne povzročimo zadrževanja vode, oziroma, da poskrbimo za njeno odtekanje;
- uporaba ustreznega dobro izoliranega ohišja in tudi silikagela, kar z odpadno toploto uporabljene elektronike onemogoča kondenzacijo vode na ohišju, ki se dogaja v jami kljub relativno nespremenljivi temperaturi zraka glede na zunanji zrak, saj je velikokrat v jamah prisotna 100% relativna vlaga;
- IoT (Internet of Things) vgradni računalnik na osnovi standardnega vgradnega operacijskega sistema (embedded Linux) z ustreznim trajnim spominskim medijem (mikroSD kartica), možnostjo Ethernet in/ali WiFi povezave ter povezave preko RS232/RS485/RS422 ali USB z merilnim vmesnikom (data loggerjem) tudi na daljše razdalje.

Za meritev posameznih fizikalnih veličin v jamah priporočamo glede na njihove značilnosti, kakovost in izkušnje sledeče senzorzje:

- temperatura zraka: pasivni PT100 uporovni senzor;
- pretok zraka: ultrasonični senzor;
- ogljikov dioksid CO<sub>2</sub>: CO<sub>2</sub> sonda na osnovi NDIR (Nondispersive infrared sensor) senzorja (absorpcijska presvetlitvena metoda merjenja plinov na osnovi IR svetlobe)

Na izbiro senzorja vpliva tudi njegova časovna konstanta, ki mora biti ustrezno manjša glede na način merjenja fizikalne veličine v jami. Za znanstveno proučevanje jame morajo zadostiti senzorzji spodnjim časovnim intervalom vzorčenja, ki morajo za vsako spremljano fizikalno veličino zadostiti Nyquist–Shannon teoremu vzorčenja, ki pravi, da je potrebno vzorčiti z vsaj dvakratno frekvenco vzorčenja kot je frekvenca opazovanega signala (Shannon, 1949), v praksi pa vsaj z desetkratno za kakovostnejše rezultate:

- temperatura zraka: 10 sekund;
- pretok zraka: 1 sekunda;
- ogljikov dioksid CO<sub>2</sub>: 10 sekund (pod 20 sekund)

Programska oprema kakovostne jamske avtomatske merilne postaje ima možnosti majših dopolnitev in prilagoditev na terenu v obliki nastavitvenih datotek in pa možnosti nadgradnje. Sestavljajo je skupina različnih programov, ki skrbijo za neprekinjeno in sprotno zajemanje podatkov iz senzorjev ter posredovanje obdelanih podatkov centralni enoti:

- program za zajem, statistično obdelavo in kontrolo signalov iz senzorjev;
- program za lokalno shranjevanje podatkov za omejen čas (do 1 meseca);
- dodaten program za lokalno vizualizacijo podatkov na mestu meritve;
- program za prenos podatkov na centralno enoto;
- ter program za nadzor delovanja vseh ostalih programov (zaustavitev in ponoven zagon ob nepravilnem delovanju katerega izmed njih.

Za dolgoročno kakovostno delovanje jamske avtomatske merilne postaje je osrednjega pomena avtomatska kontrola podatkov iz senzorjev (Mlakar et al., 1990). Osnovna naloga kontrole podatkov je neprekinjeno avtomatsko preverjanje podatkov. V primeru detekcije napake meritve se takšni podatki označijo kot neveljavni, kljub temu pa se pošljejo v centralno enoto, kjer služijo za avtomatsko opozarjanje na napako in analizo napake pred odhodom serviserjev na popravilo na terenu. Kot primer ene izmed avtomatskih kontrol predstavlja preverjanje ali je stalnost hitrosti pretoka zraka izven mej s čimer se detektira okvaro senzorja. Drug primer je preverjanje ali so vrednosti v predpisanem območju meritve in ali je standardna deviacija meritve v predpisanem območju (predpisana območja so določena za vsako fizikalno spremenljivko posebej).

Pomembna lastnost avtomatske merilne postaje, ki vpliva na kakovost merilnih podatkov, je tudi reprezentativnost meritev (World Meteorological Organization, 2008). Reprezentativnost najbolje opisujejo metapodatki merilne postaje, ki natančno opisujejo za vsako merilno okoljsko spremenljivko vrsto senzorja, njegove lastnosti, kakovost, podrobno lokacijo, datum kalibracije ter senzorjevo okolico. V jamskih merilnih sistemih se je z razvojem digitalnih fotoaparatorov kakovost metapodatkov pomembno izboljšala, saj lahko z rednim fotografiranjem avtomatske merilne postaje ob vseh spremembah iz več različnih zornih kotov vodimo zelo kakovostno bazo metapodatkov.

## Jamska centralna enota

Vsi merilni podatki iz jamskih avtomatskih postaj se po različnih komunikacijskih poteh zbirajo, dodatno obdelujejo in shranjujejo na jamski centralni enoti. Število jamskih centralnih enot je za različne potrebe lahko različno.

Kakovost centralne enote se ne razlikuje bistveno glede na vrsto okoljskega informacijskega sistema, v grobem pa MEISove določajo naslednje značilnosti:

- zgrajena je na osnovi zmogljivega računalnika, po potrebi se posamezne naloge lahko razporedijo na več medsebojno povezanih osebnih računalnikov;
- mora opravljati vse osnovne naloge centralne enote kot so zbiranje podatkov iz avtomatskih merilnih postaj, shranjevanje podatkov v izvorni obliki (običajno v obliki prenosnih datotek), shranjevanje podatkov v skupno enotno bazo podatkov, obdelava in dodatna kontrola podatkov v bazi in zagotavljanje dostopa do shranjenih podatkov;
- skupna enotna ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability) baza podatkov, ki omogoča atomičnost (vsaka operacija v bazi podatkov mora biti izvedena do konca), konsistenco (baza podatkov mora ostati enovita in popolna po vsaki izvedeni operaciji), ločenost (rezultat vzporednega izvajanja operacij mora biti enak rezultatu izvajanja istih operacij zaporedno) in trajnost podatkov (po vsaki izvedeni operaciji mora ostati baza podatkov trajno obstojna) ter temelji na SQL (Structured Query Language) relacijskem urejevalnem sistemu podatkovnih baz, ki je kompatibilen vsaj SQL-92 standardu (International Organization for Standardization, 1992), ki predstavlja tretjo večjo revizijo SQL jezika za poizvedovanje v bazah podatkov;
- na voljo mora imeti širikopasoven dostop do svetovnega spleta ali lokalne mreže, ki zagotavlja možnost dostopa do podatkov več uporabnikom sočasno,
- v bazi podatkov se mora za vsako meritev posebej beležiti tako čas opravljene meritve kot čas dospelja in shranitve podatka na centralni enoti, izračunana razlika v teh časih določa zakasnitev prenosa podatkov in je pomemben podatek za vzdrževalce sistema, ki z analizo teh podatkov lahko odkrivajo težave na komunikacijskih poteh, dodatno pa je pomemben tudi za sisteme, kjer so sprotni podatki bolj pomembni od zakasnenih,
- vse shranjene podatke v izvorni obliki, bazo podatkov, programsko opremo in po potrebi tudi sliko operacijskega sistema je potrebno redno periodično varnostno shranjevati na vsaj 100 km oddaljeni lokaciji, saj je samo v takšnem primeru možno centralno enoto vzpostaviti v ponovno delovanje tudi v primeru najhujših naravnih nesreč po priporočilih standarda ISO/IEC 27040:2015 (International Organization for Standardization, 2015b);
- dologoročno kakovostno delovanje centralne enote določa tudi napredno neprekinjeno napajanje, ki lahko premošča krajše časovne izpade električne energije (do 30 minut), v primeru daljšega časovnega izpada električne energije pa računalniško opremo nadzorovano izključi, saj je večina trajnih spominskih medijev (na primer trdi diski, itd) občutljiva na nenadne izklope;
- prostor, kjer se nahaja računalniška oprema mora biti ustrezno klimatiziran, za zagotavljanje čim daljše življenske dobe računalniške opreme, ki se z izpostavljenostjo višjim temperaturam krajša;
- centralna enota je opremljena s sistemom avtomatskega opozarjanja (alarmiranjem) o izpadih prenosa podatkov iz avtomatskih postaj, podatkovnih vozlišč (komunikatorjev), o izpadu delovanja ostalih centralnih enot in o napakah na postajah, sistem opozarjanja je prilagodljiv in omogoča tudi vsakodnevno ponavljanje opozarjanja. Za opozarjanje je možnih več vrst opozoril glede na osebe, ki se jih opozarja (vzdrževalci, upravniki), opozarjanje pa poteka preko različnih medijev, ki so

trenutno na voljo (pošiljanje kratkih SMS sporočil na mobilne telefone, uporaba elektronske pošte, pošiljanje FAX sporočil preko klasičnih modemov, itd).

Kakovost okoljskega informacijskega sistema je glede na njegov namen večja za sisteme, ki so prilagojeni zahtevam za znanstveno proučevanje. Glavno razliko predstavljajo programska orodja in vmesniki za dostop do podatkov. Za sisteme za trenutni nadzor (monitoring) okolja je običajno dovolj dostop do trenutnih podatkov in kratka zgodovina v obliki časovnih grafov. Za znanstveno proučevanje pa so potrebna bolj napredna orodja za pregled in analizo dolgih časovnih vrst podatkov kot so na primer časovni grafi, histogrami, rože vetrov, daljše časovne statistike in sončnice (Božnar et al. 2015; Grašič et al. 2003; Mlakar & Božnar 1995; Božnar 2004; Lesjak et al. 2002).

### Prenos podatkov v jamskem informacijskem sistemu

Prenos podatkov v jamskem informacijskem sistemu predstavlja edinstven problem, ki temelji predvsem na dejavnih ekstremnega okolja (tako za opremo kot za ljudi). V jamah vlada popolna tema, sončno sevanje pa je na voljo le na vhodih v jame. V večini primerov vlada v slovenskih jamah 100% relativna vlaga, ki ima velik vpliv na kakovost brezžičnih komunikacij (Mottola et al., 2010). V vseh treh dimenzijah prostora so jame zelo razgibane in večinoma nepravilnih geometrijskih oblik, kar skoraj povsod dodatno slabi ali onemogoča brezžične komunikacije na daljše razdalje. Zaradi vseh naštetih razlogov je tudi poraba energije za brezžične povezave večja. Okolje je v veliko točkah pravzaprav podobno vesolju, zato je tudi zelo primerno za uporabo in testiranje novih DTN tehnologij za vesolje (Gabrovšek et al., 2014).

Uporaba DTN tehnologij je zelo primerna za jamsko okolje, ker je odporna na prekinitev in motnje komunikacij ter se lahko prilagodi različnim tehnikam prenosa, vendar pa zato podatki niso povsem sprotni, kar pa za jamski informacijski sistem, ki je namenjen znanstvenemu proučevanju, ni ključno.

Dodatno je DTN tehnologija uporabna zaradi možnosti uporabe nekonvencionalne oblike za prenos podatkov (podatkovna mula na vlakcu, mobilni telefoni in tablice vodičev) (Božnar et al., 2012; Gabrovšek et al., 2014; Grašič et al., 2010; Grašič et al., 2011; Vrbinc et al., 2010).

Glavne značilnosti kakovostnega omrežja za prenos podatkov temeljijo na odpornosti na prekinitev in motnje komunikacijskih poti:

- sistem samodejno poskuša ponovno vzpostaviti komunikacijo ob motnji ali prekinitvi,
- komunikacija poteka z uporabo standardnega protokola, ki ima zmožnost odkrivanja napak,
- med prekinitvijo se podatki kopičijo in čakajo na ponovno vzpostavitev prenosa,
- ob ponovni vzpostavitvi se prenašajo samo podatki, ki še niso prenešeni, ostali se ne prenašajo po nepotrebnem ter s tem ne zapolnjujejo komunikacijskih poti, zaradi tega se tudi vodi evidenca prenosov.

### **Jamski informacijski sistem Postojnske jame »Jam'ca«**

Primer izvedbe in zagostavljanja kakovostnih meritev za znanstveno proučevanje klime v kraških jamah predstavlja jamski informacijski sistem Postojnske jame z interno oznako »Jam'ca«. Postojnska jama je ena najpomembnejših turističnih jam na svetu in najbolj

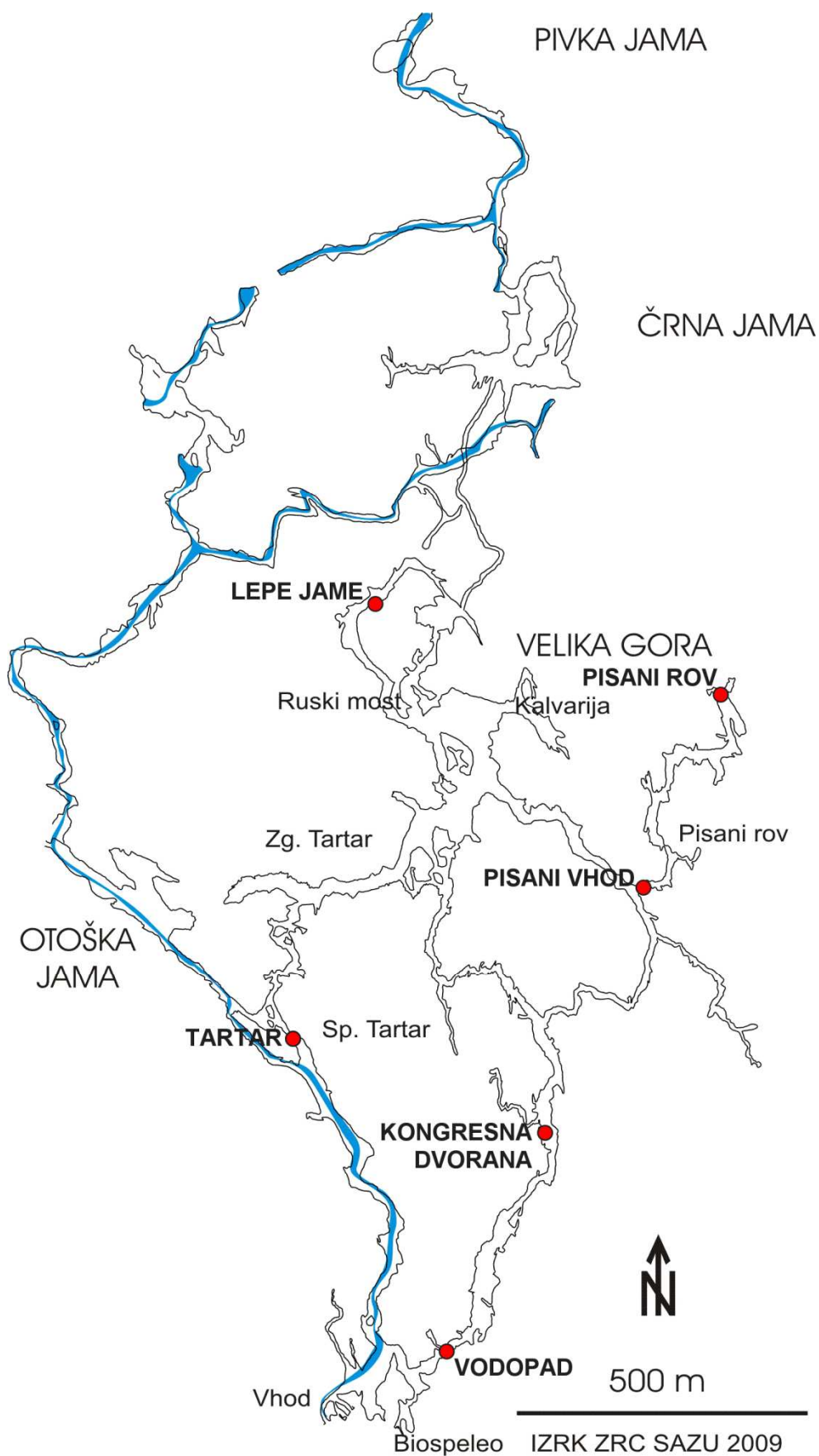


obiskan turistični cilj v Sloveniji. V zadnjih letih jo vsako leto obiše preko pol milijona turistov, od leta 1819 pa jo je obiskalo že več kot 37 milijonov obiskovalcev.

Preko 20 km dolg jamski sistem s petimi znanimi vhodi, je razvit v krednem apnencu med Pivško kotlino in Planinskim poljem. V grobem lahko rečemo, da je sistem razvit v dveh nivojih: turisti obišejo zgornji nivo, ki je hidrološko neaktiven. Spodnji nivo sestavljajo kanali z aktivnim tokom ponikalnice Pivke, ki jo lahko v sistemu spremljamo slabe 4 km in odteka po še neraziskanih rovih proti Planinski jami. Postojnska jama je zibelka speleobiologije in je v vrhu jam z največjo biodiverzitetjo na svetu.

Eden glavnih izzivov upravljanja turističnih jamah je, kako razvijati jamski turizem s pripadajočo infrastrukturo in pri tem čim manj vplivati na občutljivo jamsko okolje ter zagotoviti varnost obiskovalcev in zaposlenih. Poleg neposrednega fizičnega vpliva pri gradnji jamske infrastrukture, človek s svojimi dejavnostmi in prisotnostjo najbolj vpliva na jamsko atmosfero. Jamska mikroklima je ključen dejavnik jamskega ekosistema, od katerega je odvisno preživetje številnih endemnih jamskih živalskih vrst, pomembno pa vpliva tudi na ohranitev in izločanje sige.

Na zemljevidu Postojnske jame (Slika 1) so predstavljene lokacije jamskih avtomatskih merilnih postaj v Postojnski jami, ki delujejo od leta 2010. Lokacije so bile določene glede na namen in razpoložljiva denarna sredstva. Postaja »Vodopad« opisuje razmere v bližini enega izmed vhodov v jama, postaja »Lepe jame« razmere v turistično najbolj obiskanem delu jame, postaja »Tartar« razmere v bližini toka reke Pivke v jami, postaja »Pisani rov« pa razmere v delu jame, ki je najbolj oddaljen in neodvisen od turističnega vpliva v jami. Dodatno se nahaja v jami tudi postaja »Prehod« v »Kongresni dvorani«, kjer je na voljo optična povezava z internetom in služi predvsem kot glavno vozlišče za prenos podatkov iz jame v centralno enoto izven jame. Na diagramu (Slika 2) so prikazani glavni gradniki okoljskega informacijskega sistema »Jam'ca« v Postojnski jami.



Slika 1: Lokacije jamskih avtomatskih merilnih postaj v Postojnski jami (avtorica kartografije: Stanka Šebela, Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna, Slovenija)



Slika 2: Diagram glavnih gradnikov okoljskega informacijskega sistema »Jam'ca« v Postojnski jami

### Jamska avtomatska merilna postaja »JaMo«

Glavni gradniki jamske avtomatske merilne postaje so predstavljeni na diagramu (Slika 3) in so za vse postaje v sistemu »Jam'ca« enaki, zato v nadaljevanju sledi samo podroben opis postaje »Pisani rov«, opis pa velja tudi za vse ostale postaje.

Postaja za meritve posameznih okoljskih spremenljivk v jami je opremljena s sledečimi senzorji:

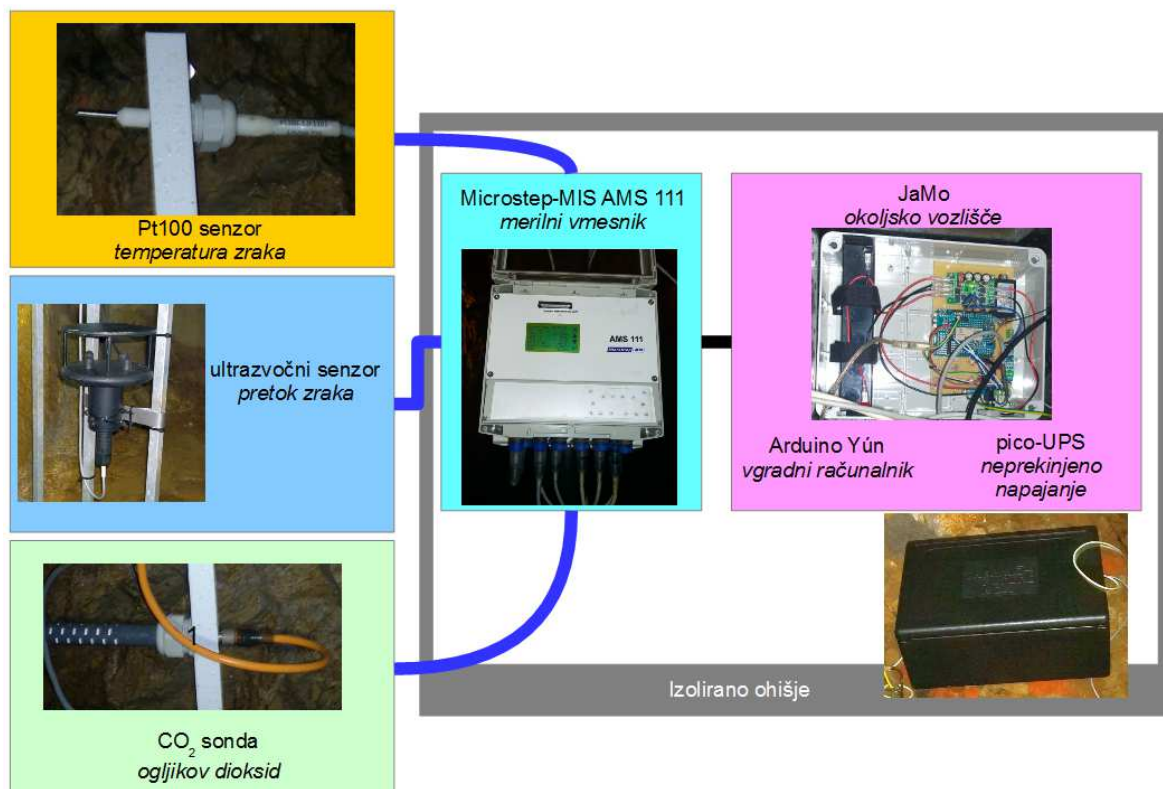
- temperatura zraka: PT100 senzor, tip »Pt100 Therometer 1/5 DIN«, natančnost  $\pm 0.10^{\circ}\text{C}$ , območje od  $-65^{\circ}\text{C}$  do  $+70^{\circ}\text{C}$ , odzivni čas  $< 20$  sekund, dolgoročna stabilnost  $0.1^{\circ}\text{C}/\text{leto}$ , proizvajalec MicroStep-MIS;
- pretok zraka: ultrasonični senzor vetra, tip »WindSonic«, natančnost hitrosti vetra  $\pm 2\%$  pri 12 m/s, natančnost smeri vetra  $\pm 3\%$  pri 20 m/s, območje hitrosti vetra od 0 m/s do 60 m/s in smeri vetra od  $0^{\circ}$  do  $359^{\circ}$ , proizvajalec Gill Instruments Limited;
- ogljikov dioksid  $\text{CO}_2$ :  $\text{CO}_2$  sonda, tip »GMT 200 series«, natančnost  $\pm(1.5\% \text{ od območja} + 2\% \text{ od izmerka})$ , območje od 0 ppm do 10000 ppm, odzivni čas  $< 20$  sekund, dolgoročna stabilnost  $< \pm 5\% \text{ od območja} / 2 \text{ leti}$ , proizvajalec Vaisala.

Zajem izmerjenih podatkov poteka iz merilnega vmesnika microStep-MIS AMS 111, preko RS485 komunikacijskega vmesnika. Za zajem, zbiranje, statistično obdelavo, kontrolo, lokalno shranjevanje in prenos v centralno enoto skrbi okoljsko vozlišče MEIS JaMo. Naprava JaMo temelji na vgradnem računalniku Arduino Yún, ki omogoča relativno dobro računalniško zmogljivost glede na porabo (manj kot 2W), kakovostno brezžično WiFi povezovanje in trajni spominski medij microSD. Dodatno je naprava JaMo

opremljena tudi s kakovostnim neprekinjenim napajanjem na osnovi 12V svinčeve baterije, ki omogoča premostitev izpada električne energije do 12 ur ali več glede na kapaciteto baterije ter dodatno omogoča tudi nadzorovan izklop naprave za zaščito podatkov na spominskem mediju. Programska oprema okoljskega vozlišča MEIS JaMo ustreza vsem lastnostim opisanim v podpoglavju »*Jamska avtomatska merilna postaja*«, podroben opis pa je na voljo v prispevku (Grašič et al., 2011).

Vsa elektronika jamske merilne postaje, razen senzorjev, je nameščena v ustrezno izolirano ohišje, ki onemogoča kondenzacijo vode na ohišju. Slika merilne postaje na lokaciji »Pisani rov« je predstavljena na slikah (Slika 4). Posebnost te postaje predstavlja relativno velika razdalja (cca. 500 m) med merilnim vmesnikom na lokaciji »Pisani rov« in okoljskim vozliščem JaMo na lokaciji »Pisani vhod«. JaMo je postavljen na to lokacijo zaradi bližine jamske železniške proge po kateri se občasno pripelje jamski turistični vlakec opremljen s podatkovno mulo za prenos podatkov na osnovi DTN tehnologije (Gabrovšek et al., 2014).

Senzorji so nameščeni glede na možnosti in potrebe na posameznih lokacijah. Medtem ko so na lokacijah »Pisani rov«, »Pisani vhod« in »Tartar« pritrjeni z uporabo steznih plastičnih vezic kar na obstoječe nosilce (Slika 6), se na lokacijah »Vodopad« in »Lepe jame« uporablja prenosni stolp (Slika 7).



Slika 3: Diagram glavnih gradnikov jamske avtomatske merilne postaje



Slika 4: Slike jamskih avtomatskih merilnih postaj za meritve na lokacijah »Pisani rov« (levo zgoraj je slika izoliranega ohišja v katerem se nahaja merilni vmesnik, levo spodaj pa slika okoljskega vozlišča »JaMo« prav tako v izoliranem ohišju) in »Vodopad« (desno)



Slika 5: Slike jamske avtomatske merilne postaje za meritve na lokaciji »Tartar«



Slika 6: Slike montaže senzorjev na lokacijah »Pisani rov - vhod« (levo) in »Tartar« (desno«).



Slika 7: Slike montaže senzorjev na prenosne merilne stolpe (levo na lokaciji »Lepe jame«, desno na lokaciji »Vodopad«).

#### Centralna enota jamskega okoljskega sistema »Jam'ca«

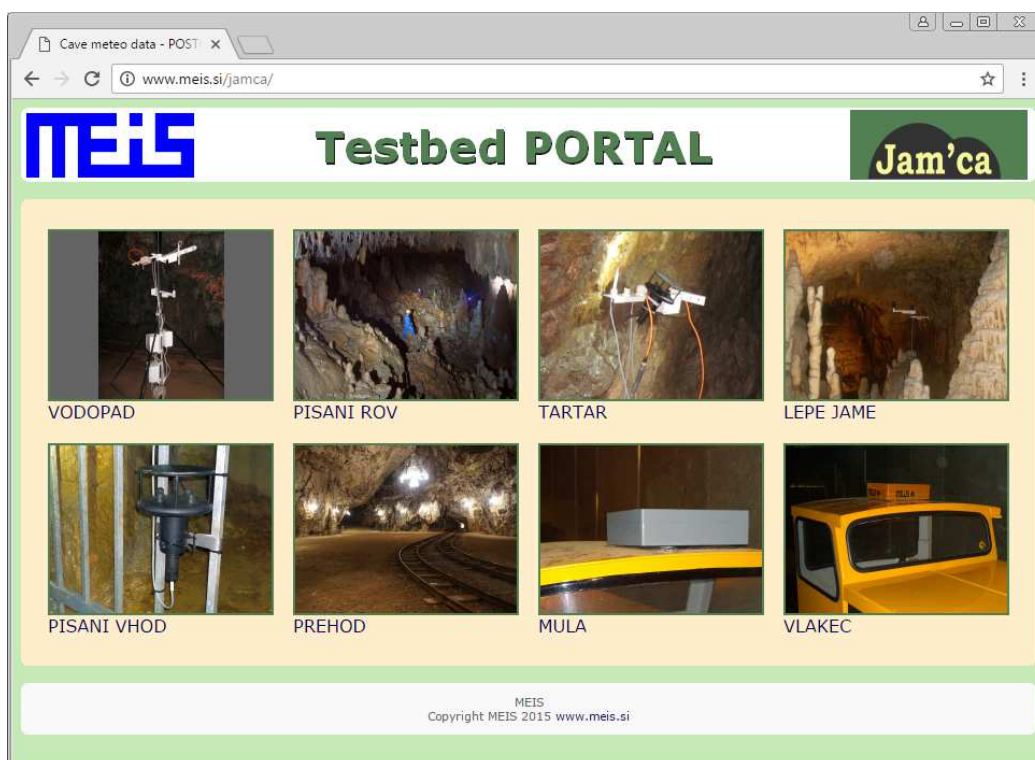
Jamska centralna enota sistema »Jam'ca« se nahaja v prostorih MEIS-a) in ustreza vsem opisanim lastnostim v podpoglavju »*Jamska centralna enota*«.

Sestavljena je iz več računalnikov primerne zmogljivosti:

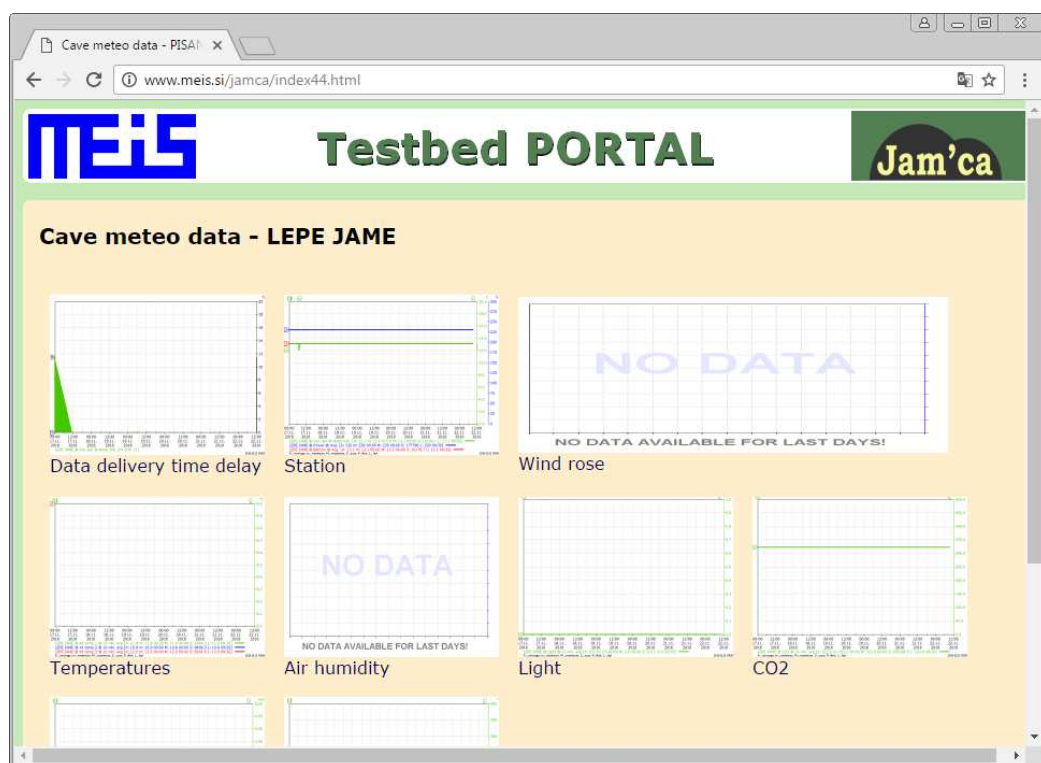
- okoljskega vozlišča JaMo z oznako »Centrala«, ki je glavno vozlišče za sprejem podatkov preko svetovnega spleta (interneta) na osnovi Arduino Yun vgradnega računalnika ali preko Ad-Hoc brezžične povezave s podatkovno mulo JaMu;
- zmogljivega strežniškega računalnika z oznako »Maid« na osnovi Intel I7 mikroprocesorja in veliko količino trajnega spomina na trdem disku (1 TB), kjer je nameščena programska oprema za dodatno kontrolo in shranjevanje prejetih podatkov iz postaj v MySQL bazo podatkov, na tem računalniku je nameščena tudi programska oprema za dostop do shranjenih podatkov ter prenos izmerjenih vrednosti za zadnjih 5 dni iz vseh postaj v obliki grafov na javno spletno stran (Slika 8 in Slika 9) (Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU & MEIS, 2015),
- najetega strežniškega prostora izven prostorov MEISa za gostovanje javne spletne strani,
- ter osebnega računalnika z oznako »CinCin« opremljenega s sistemom avtomatskega opozarjanja (alarmiranja) na detektirane izpade ali napake v sistemu »Jam'ca« prek elektronskih sporočil in kratkih SMS sporočil.

Dostop do vseh sprotnih in zgodovinskih podatkov je omogočen z uporabno namenskega prikazovalnega programa »Mungo«, ki omogoča pregled, grafično predstavitev in statistične prikaze tudi izven internega omrežja MEISa na osebnih računalnikih. Za vizualizacija in statistično obdelavo so na voljo tudi druga namenska orodja kot je na primer program »webSolarRose« za risanje sončnic (

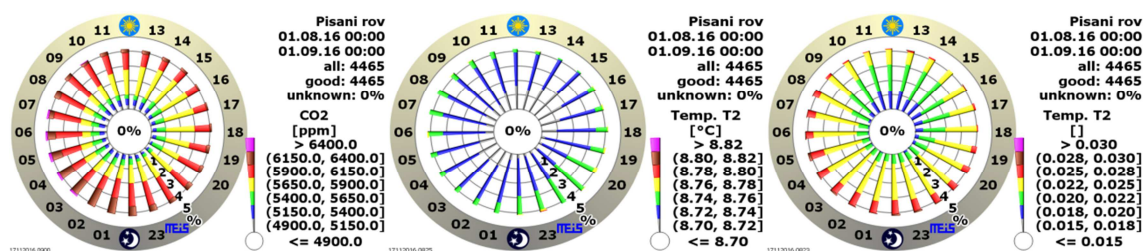
Slika 10).



Slika 8: Vstopna slika javno dostopne spletne strani jamskega okoljskega sistema »Jam'ca« na spletni strani <http://www.meis.si/jamca>



Slika 9: Primer predstavitve izmerjenih podatkov jamske merilne postaje na javno dostopni spletni strani jamskega okoljskega sistema »Jam'ca« za preteklih 5 dni



Slika 10: Analiza merilnih podatkov iz lokacije »Pisani rov« z uporabo orodja »Sončnica« (levo: povprečna koncentracija CO<sub>2</sub>, sredina: povprečna temperatura T2, desno: standardna deviacija povprečne temperature T2) z uporabo namenskega programa »webSolarRose«

### DTN prenos podatkov

Za prenos podatkov v jamskem okoljskem sistemu »Jam'ca« se uporablja DTN tehnologija prenosa podatkov, ki je predstavljena v podpoglavju »Prenos podatkov v jamskem informacijskem sistemu«. Za prenos podatkov se uporabljata dve DTN podatkovni muli JaMu (Slika 11), ki se izmenjujeta na turističnem vlakcu, ko zmanjka električne energije v baterijah. Podatkovna mulla JaMu vsebuje za varčevanje z energijo senzor vibracij, ki skrbi, da se JaMu izklopi, kadar vlak miruje. S tem je ob kapaciteti sedmih eno-celičnih LiPo baterij, ki znaša 42 Ah, zagotovljena avtonomija približno za 25 dni. Ob srečanju z jamsko postajo ima podatkovna mulla na voljo povprečno 10-15 sekund za izmenjavo podatkov.





Slika 11: Slika DTN podatkovne mule montirane na turističnem vlakcu v Postojnski jami z uporabo magnetnega nosilca

### Zaključki

V okviru tega prispevka so predstavljene pridobljene izkušnje pri izgradnji in zagotavljanju kakovostnih avtomatskih meritev za znanstveno proučevanje mikrometeorologije kraških jam, ki temeljijo na dobri praksi in ustrezni dopolnitvi in prilagoditvi priporočil Svetovne meteorološke organizacije za meritve v zunanji atmosferi (World Meteorological Organization, 2008).



Slika 12: Demingov krog PDCA (planiraj – izvedi – preveri – ukrepaj) z zagozdo, ki jo predstavlja standard povzeto po standardu kakovosti ISO9001:2015 (International Organization for Standardization, 2015b)

Izgradnja in zagotavljanje kakovostnih avtomatskih meritev je v skladu z najnovejšo izdajo standarda kakovosti ISO9001:2015 (International Organization for Standardization, 2015b), ki določa sedem glavnih načel vodenja kakovosti med katerimi je bilo pri našem delu najbolj izpostavljeno načelo nenehnega izboljševanja (Slika 12), (International Organization for Standardization, 2015a). Nekatere pridobljene izkušnje in spoznanja predstavljene v tem prispevku bi bilo za izvajanje mikrometeoroloških meritev v jami

možno v prihodnosti uporabiti tudi kot standard (zagozdo Demingovega kroga PDCA, Slika 12).

Dodatno so v okviru tega prispevka opisane tudi možnosti kakovostnega prenosa podatkov v okoljskih merilnih sistemih, ki jih priporočila Svetovne meteorološke organizacije še ne pokrivajo (World Meteorological Organization, 2008) in so osnovane na podlagi uporabe sodobne DTN tehnologije, ki se razvija za komunikacije v vesolju in na področjih s slabo ali neobstoječo infomacijsko infrastrukturo.

V zadnjih časih se mnogokrat narobe predpostavlja, da je možno enako dobre meritve kot iz kakovostne merilne naprave pridobiti z večjo količino meritev iz več manj kakovostnih merilnih naprav včasih celo indikatorjev (detektorjev), kar je posledica hitrega razvoja in dostopnosti cenejših in manj kakovostnih merilnih naprav. Odgovore ali je to možno, predstavlja tudi ta prispevek, ki predstavlja potrebne pogoje za kakovostne meritve. Glede na pregled lastnosti kakovostnega avtomatskega merilnega sistema lahko zaključimo, da lahko večja količina meritev (tako v času kot prostoru) samo v nekaj lastnostih ohranja ali povečuje kakovost merilnega sistema kot je na primer razpoložljivost in sprotnost podatkov, pod določenimi pogoji tudi reprezentativnost in ločljivost, nikakor pa ne more izboljšati lastnosti kot je natančnost.

## Zahvala

Za izvedbo predstavljenega jamskega informacijskega sistema »Jam'ca« smo bili sofinancirani s strani raziskovalnega projekta ARRS z oznako L2-6762.

## Literatura

- Božnar, M., Mlakar, P., Grašič, B., Gabrovšek, F. (2012). "E-learning" lectures for setting up a modern DTN communications based cave micrometeorological stations, example of Postojna Cave, Slovenia. *Guide Book and Abstracts*, 16–17.
- Božnar, M. Z. (2004). Environmental information systems in Slovenia---the present and future state. *Nuovo Cimento C Geophysics Space Physics C*, 27, 307. <https://doi.org/10.1393/ncc/i2004-10022-2>
- Božnar, M. Z., Grašič, B., Mlakar, P., Soares, J., de Oliveira, A. P., Costa, T. S. (2015). Radial frequency diagram (sunflower) for the analysis of diurnal cycle parameters: Solar energy application. *Applied Energy*, 154, 592–602.
- Gabrovšek, F., Grašič, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P., Udén, M., Davies, E. (2014). Karst show caves – how DTN technology as used in space assists automatic environmental monitoring and tourist protection – experiment in Postojna Cave. *Natural Hazards and Earth System Science*, 14(2), 443–457. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-443-2014>
- Grašič, B., Mlakar, P., Božnar, M. Z., Lesjak, M. (2003). Use of open source operating system and TCP/IP connectivity in urban environmental monitoring. In *IEEE International conference on industrial technology, Vols 1 and 2, Proceedings* (pp. 1257–1261).
- Grašič, B., Vrbinc, S., Božnar, M., Mlakar, P., Popović, D. (2010). Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN) test bed in Slovenia. *Nova vizija tehnologij prihodnosti*, 103–114.
- Grašič, B., Vrbinc, S., Mlakar, P., Božnar, M. (2011). Software applications for environmental measurements using DTN connectivity. *Zbornik 14. Mednarodne Multikonference Informacijska Družba - IS 2011, 10.-14. Oktober 2011*, 207–210.
- Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, MEIS. (2015). Projekt JAMCA: Ocena vpliva naravnih in antropogenih procesov na mikrometeorologijo Postojnske jame z uporabo numeričnih

- modelov ter sodobnih metod zajemanja in prenosa okoljskih podatkov. Retrieved November 21, 2016, from <http://www.meis.si/jamca/>
- International Organization for Standardization. (1992). ISO/IEC 9075:1992 Information technology - Database languages - SQL. Maynard, Massachusetts. Retrieved from [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=16663](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=16663)
- International Organization for Standardization. (2015a). ISO/IEC 27040:2015 Information technology - Security techniques - Storage security.
- International Organization for Standardization. (2015b). ISO 9001:2015 Quality management systems - Requirements.
- Lesjak, M., Grašič, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P. (2002). New Internet connected air pollution monitoring network of Slovenia. *Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies*, 185–190.
- Mlakar, P., Božnar, M. (1995). Environmental information systems in Slovenia. *Air Pollution III. Vol. 2, Air Pollution Engineering and Management*, 259–266.
- Mlakar, P., Diallo, B., Lesjak, M., Čuhajev, I. (1990). Avtomatizirano vrednotenje kvalitete podatkov v računalniških ekoloških merilnih sistemih. *Programska merilna oprema*, 77–83.
- Mottola, L., Picco, G. Pietro, Ceriotti, M., Gună, Ș., Murphy, A. L. (2010). Not All Wireless Sensor Networks Are Created Equal: A Comparative Study on Tunnels. *ACM Trans. Sen. Netw.*, 7(2), 15:1--15:33. <https://doi.org/10.1145/1824766.1824771>
- Shannon, C. E. (1949). Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, 37(1), 10–21.
- Vrbinc, S., Grašič, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P. (2010). SymbioNode Data Carrier in Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN). In *Collaboration, Software and Services in Information Society (CSS-COT 2010)* (pp. 1–6). Retrieved from [http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary;jsessionid=93FAF44D8DB8208A18608CA39866C45F?doi=10.1.1.374.4830%5Cnhttp://www.n4c.eu/Download/8.4/DTN\\_SYMBIONODE\\_IJS\\_v5.0.pdf](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary;jsessionid=93FAF44D8DB8208A18608CA39866C45F?doi=10.1.1.374.4830%5Cnhttp://www.n4c.eu/Download/8.4/DTN_SYMBIONODE_IJS_v5.0.pdf)
- World Meteorological Organization. (2008). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8.



# Geomagnetne nevihte ob koncu cikla sončnih peg

Rudi Čop<sup>1</sup>

## Povzetek

Geomagnetne nevihte nastajajo ob povečani aktivnosti Sonca. Najstarejši način ugotavljanja te aktivnosti je štetje sončnih peg na vidni strani sončnega diska. Danes to aktivnost spremljamo s pomočjo instrumentov na vesoljskih plovilih. Ob času pomladnih in jesenskih enakonočij in ob nekaterih prehodih Zemlje skozi mejno področje magnetnega polja v medplanetarnem prostoru se poveča število tako polarnih sijev kot geomagnetnih neviht. Geomagnetne nevihte lahko povzročajo izbruhi v koroni Sonca ali prehodi Zemlje preko tokovnic sončnega vetra z različno hitrostjo in gostoto. Učinki interakcije medplanetarnega in zemeljskega magnetnega polja se ne kažejo enako po celotni zemeljski obli. Magnetogrami geomagnetnih neviht, izmerjeni na geomagnetnih observatorijih v srednjem širinskem pasu niso enaki magnetogramom, izmerjenih v ekvatorialnem pasu ali v polarnem območju. V članku so obdelani tipični primeri geomagnetnih neviht, izmerjeni na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenia) tekom leta 2016. Aktivnost Sonca je bila v tem letu zelo majhna, ker je cikel sončnih peg postopoma prehajal v obdobje svojega minimuma.

**Ključne besede:** izvori geomagnetnih neviht, sončni cikli, mejno področje magnetnega polja v medplanetarnem prostoru, ekvatorialni krožni električni tok

**Key words:** sources of geomagnetic storms, solar cycles, heliospheric current sheet, equatorial ring current

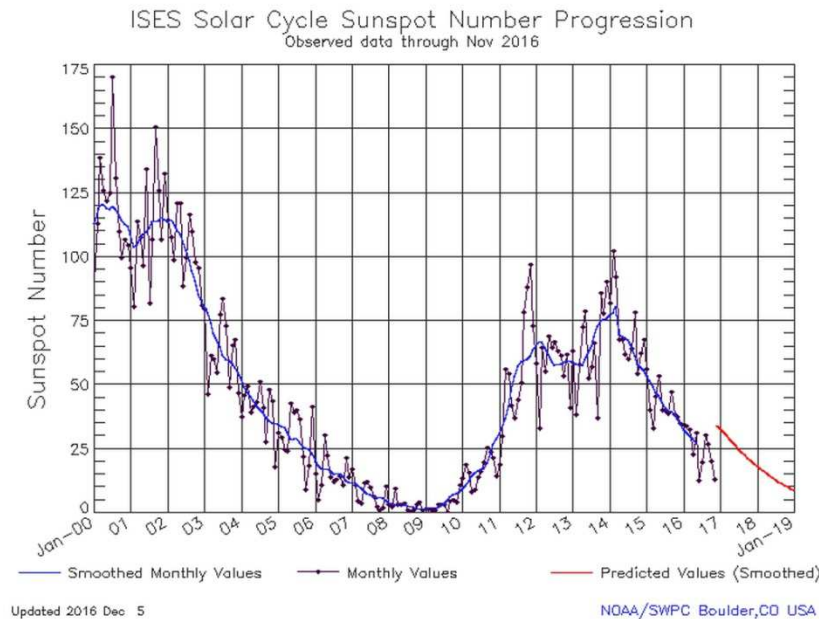
## Ciklične spremembe števila geomagnetnih neviht

Geomagnetne nevihte so močne in nestalne spremembe zemeljskega magnetnega polja. Nastajajo zaradi udarnih valov, nastalih v sončnem vetru (Čop, 2016) ob izbruhih v koroni Sonca CME (angl. coronal mass ejections) ali zaradi prehodov Zemlje preko tokovnic sončnega vetra s povečano hitrostjo CIR (angl. corotating interaction regions), ki izhajajo iz lukenj v koroni Sonca (Lakhina & Tsurutani, 2016). V primeru, da je magnetno polje IMF (angl. interplanetary magnetic field) v medplanetarnem prostoru v bližini Zemlje obrnjeno v južno smer, potem se le-to poveže z zemeljskim magnetnim poljem in se zato v magnetosferi ustvarijo razpoke (Parker, 2001; Rangarajan & Barreto, 2000). Skozi te razpoke nato vdre sončni veter in vpliva tako na magnetosfero kot tudi na celotno atmosfero. Geomagnetne nevihte je mogoče meriti na geomagnetnih observatorijih na površini Zemlje. Stanje vremena v vesolju v bližini Zemlje (angl. space weather) (Kane, 2006), ki pogojuje njihov nastanek, merimo s pomočjo merilnih instrumentov na vesoljskih plovilih.

Pogostnost geomagnetnih neviht je vezana na cikel sončnih peg (Maunder, 1904; Geomagnetic Storms, 2011) in je največja v času njegovega maksimuma ter v času njegovega pojanja. Tako v ciklu sončnih peg kot v ciklu geomagnetnih neviht je zaznaven 27 dnevni efektivni obrat Sonca (Reuveni & Price, 2009) in 22 letni cikel preklopov njegovih magnetnih polov (Mursula et al., 2002). Velik del geomagnetnih neviht se namreč ponavlja v ritmu efektivnega obrata Sonca (Dan et al., 2014) (Slika1). Zaradi tega so geomagnetne nevihte napovedljive, predvsem tiste z manjšo jakostjo.

---

<sup>1</sup> Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje



Slika 1 - Potek druge polovice 23. in sedanjega 24. sončnega cikla (Solar Cycle Progression, 2016). V krivulji, ki ni glajena, so opazni učinkoviti obrati Sonca.

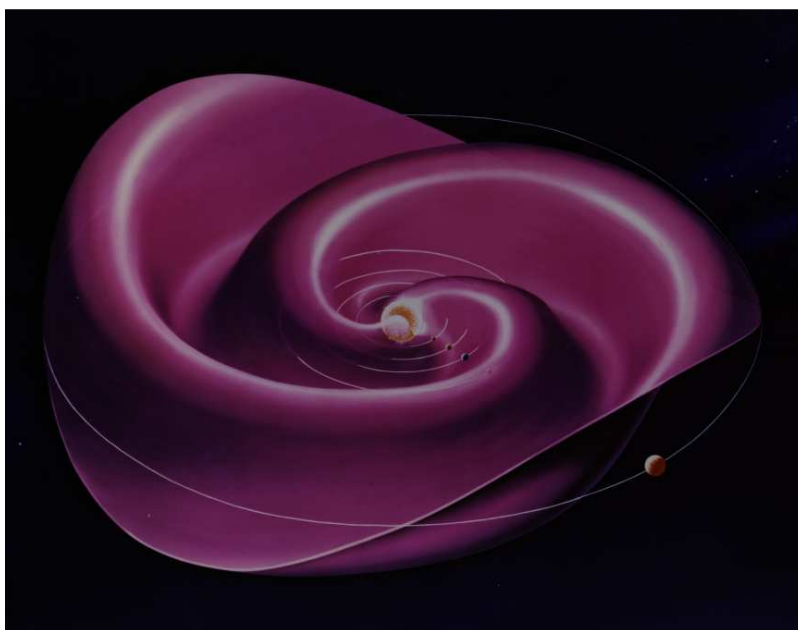
Osnovno določilo za aktivnost Sonca je število in površina sončnih peg v posameznem dnevu leta, opaženih na vidnem delu sončnega diska (Hathaway, 2010; Svalgaard, 2013). Solarna aktivnost ni določena s številom sončnih peg samo zaradi enostavnosti in točnosti tega določevanja, temveč tudi zaradi dolžine teh opazovanj, ki se merijo v stoletjih. Sončne pege so temnejši deli sončeve površine, v katerih magnetno polje iz notranjosti Sonca prodre na površino in se v obliki zank zaključuje nad njo. Število sončnih peg se povečuje in zmanjšuje v periodah, ki v povprečju trajajo nekaj več kot 11 let. Vendar se aktivnost Sonca ne opisuje le s številom sončnih peg, temveč tudi z njegovim sevanjem elektromagnetnih valov dolžine 10,7 cm, emisijo elementarnih delcev velikih energij SEP (angl. solar energetic particles) ter številom sončnih bakel in izbruhov v koroni Sonca CME. Vsa ta opazovanja je mogoče uspešno opraviti le iz vesoljskih plovil. Opazovanje Sonca s pomočjo solarnih radioteleskopov pa je mogoče tudi iz površine Zemlje in to ob vsakem vremenu. Jakost mikrovalov dolžine 10,7 cm (2,8 GHz) izsevanih iz Sonca (angl. solar flux) je namreč proporcionalna jakosti tako njegovih žarkov X kot tudi jakosti celotnega spektra ultravijoličnih žarkov. Je v korelaciji s stopnjo ionizacije atmosfere in je zato jakost mikrovalov frekvence 2,8 GHz skupaj z geomagnetnimi indeksi pomembna za napoved širjenja elektromagnetnih valov skozi zemeljske zračne plasti (Tohmatsu, 1990; Eddy, 2009).

Že pred stoletji so opazili, da se pogostnost polarnih sijev poveča na vsake pol leta. Po začetku sistematičnih geomagnetnih meritev v prvi polovici devetnajstega stoletja je bil tudi v njih prepoznan vzorec polletne spremenljivosti. Polletne spremembe geomagnetne aktivnosti poskušajo razložiti s pomočjo relativnih sprememb položaja Zemlje glede na vidni disk Sonca, relativnih sprememb položaja osi vrtenja Zemlje glede na zveznico med njo in Soncem ter na osnovi šestmesečne spremembe medplanetarnega magnetnega polja, obravnavanega v solarnih koordinatah (Russell & McPherron, 1973; Clivera, et al., 2002). Nobena od teh skupin razlag pa ne uspe vključiti tudi dnevne spremembe zemeljskega magnetnega polja, izmerjene na površini Zemlje. Na polletne spremembe geomagnetne aktivnosti očitno močno vplivajo medsebojna povezava (interakcije) sončnega vetra in magnetosfere Zemlje ter prenos energije med njima. Te povezave se v zadnjem desetletju

pospešeno raziskuje s floto satelitov, ki preletavajo območje zemeljske magnetosfere (Blagau, 2007; Choi, 2016).

### **Prehod Zemlje skozi mejno področje magnetnega polja v medplanetarnem prostoru**

Na osnovi meritev medplanetarnega magnetnega polja, ki so se začele v šestdesetih letih preteklega stoletja s pomočjo satelitov, je bil potrjen obstoj najprej sončnega vetra, nato pa še medplanetarnega magnetnega polja (Ness, 1967). Najprej so bile te meritve narejene okoli Zemlje, z razvojem satelitske, telekomunikacijske in merilne tehnike pa tudi v preostalem medplanetarnem prostoru vse do roba heliosfere (Burlaga, et al. 2008). Vzporedno so se razvijali tudi ustrezni matematični modeli medplanetarnega magnetnega polja (Zhao & Hoeksema, 1994; Linker, 1998). Znanje o njem pa se še vedno dopolnjuje.



Slika 2 - Risba mejnega področja magnetnega polja v medplanetarnem prostoru s Soncem v sredini. Njegovo magnetno polje je v začetni fazi sončnega cikla bipolarno (Artist's Conception, 2006).

Izvor magnetnega polja v medplanetarnem prostoru je Sonce, sončni veter pa ga po tem prostoru raznaša v radialni smeri (Boberg, et al., 2002). Ta izhodiščna razlaga se je postopoma dopolnila z ugotovitvijo, da se medplanetarno magnetno polje začneja oblikovati v sončevi fotosferi. Z oddaljenostjo od Sonca se sicer zamotana podoba magnetnega polja v njegovi fotosferi vedno bolj poenostavlja. Na oddaljenosti okoli 2,3 polmera Sonca se v njegovem ekvatorialnem delu ustvari enotno mejno področje, ki deli medplanetarni prostor v dva dela. V enem delu je magnetno polje usmerjeno proti, v drugem pa od Sonca. V tem solarnem mejnem področju tečejo električni toki (angl. heliospheric current sheet). Tokovna plošča, ki obdaja Sonce, je nagnjena glede na njegov ekvator za  $15^\circ$ .

Tokovni disk, ki obkroža Sonce in se širi po celotni heliosferi, obstaja v območju, kjer sončevo magnetno polje spremeni svojo smer. V tem tokovnem disku nastajajo valovi majhnih amplitud, podobni Alfvenovim strižnim valovom (Wilcox & Scherrer, 1981;

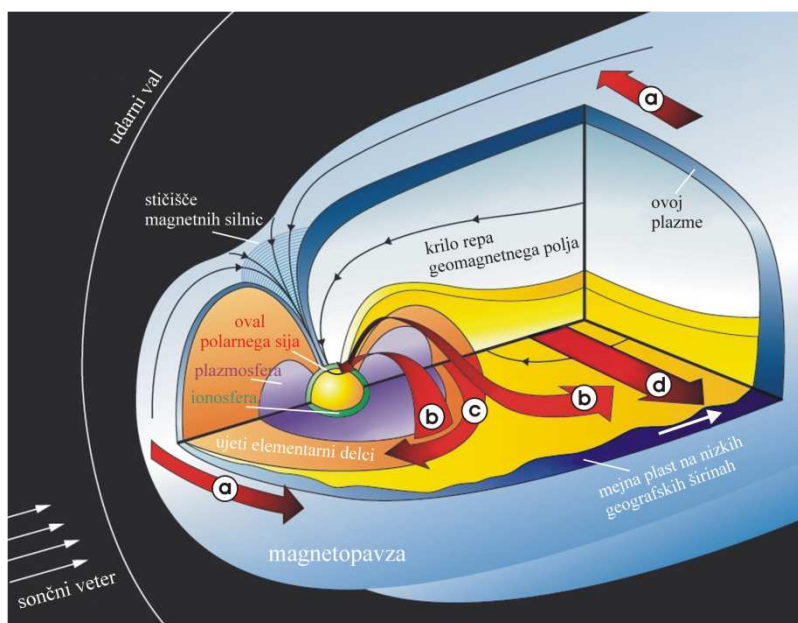
Bertin & Coppi, 1985). Zaradi vrtenja nam najbližje zvezde se ti valovi oblikujejo v spirale (Gekelman, et al., 1997).

Celotno mejno področje preoblikujejo spremembe v sončnem vetru, ki se širijo v medplanetarni prostor s povprečno hitrostjo med 300 in 800 km/s (Svalgaard & Wilcox, 1976). Za krajši ali daljši čas pa nanj močno vplivajo izbruhi v koroni Sonca CME (Kataoka, et al., 2009). Skoraj v celotnem sončnem ciklu je oblika mejnega področja medplanetarnega magnetnega polja rezultat bipolnega magnetnega polja Sonca (Slika 2) z motnjami, ki jih ustvarja njegovo štiri-polno magnetno polje. Štiri-polno magnetno polje se pojavi okoli maksimuma sončnega cikla. V samem maksimumu, ob preklopu magnetnih polov na Soncu, pa postane oblika magnetnega polja Sonca zelo komplicirana (Hudson, et al., 2015).

Solarno mejno področje zajema celotni solarni sistem in je eno največjih struktur v njem. Med seboj ločuje področja z nasprotno usmerjenostjo medplanetarnega magnetnega polja. Zemlja pri svojem obhodu okoli Sonca to strukturo večkrat prečka. Preide jo v nekaj urah do največ v nekaj dneh, kar pomeni, da je relativno zelo tanka. Ker v njej tečejo električni toki, so ob prehodu Zemlje skozi pogostejši polarni siji in geomagnetne nevihte.

### Krožni električni tok

Krožni električni tok (angl. ring current) teče v ravnini geomagnetnega ekvatorja znotraj magnetosfere (Slika 3). V času geomagnetnih neviht povzroča znatne spremembe zemeljskega magnetnega polja v krajih z nižjo geografsko širino (Kobe, et al., 1998; Egeland & Burke, 2012).



Slika 3 - Poenostavljena slika magnetosfere s prisojne strani Zemlje z električnimi toki: a) na dnevni in na nočni strani magnetopavze; b) vzdolž magnetnih silnic Zemlje (FAC - field-aligned current, Birkeland current); c) krožni električni tok v ravnini ekvatorja; in d) prečni električni tok v repu magnetosfere (Eddy, 2009).



Prvi je teorijo o obstoju krožnega električnega toka objavil norveški matematik in fizik Carl Størmer (1874-1957) leta 1910 (Egeland & Burke, 2013). Z njo je razložil premik polarnih sijev od polov proti ekvatorju v času močnih geomagnetnih neviht. S to teorijo pa se ni dalo razložiti prehoda elementarnih delcev iz sončnega vetra med plasti magnetosfere, kjer tvorijo krožni električni tok.

Z odkritjem šibkega toda stalnega medplanetarnega magnetnega polja in njegove povezave z magnetnim poljem Zemlje (merging – reconnection model) (Reconnection of Magnetic Fields, 2007) je bil odkrit tudi mehanizem vnosa elementarnih delcev sončnega vetra v magnetosfero, v plazmosfero. Še vedno pa je neznan mehanizem pospeševanja sicer hladnih ionov kisika  $O^+$  na energijski nivo krožnega električnega toka (Kistler, 2017; Moore et al., 2017), ali z drugimi besedami, ni še razložen način prenosa energije na te pozitivne ione.

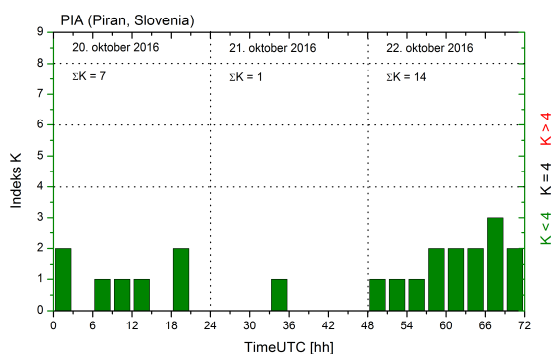
### Geomagnetno miren dan

Na geomagnetnem observatoriju PIA se za zvezno registracijo sprememb zemeljskega magnetnega polja uporablja triosni magnetometer fluxgate. Iz eno-sekundnih merilnih podatkov, ki jih magnetometer izmeri, se skoraj v realnem času izračunajo enominutne srednje vrednosti, iz njih pa nato geomagnetni indeksi  $K$  (Čop, et al., 2015). Indeks  $K$  podaja relativno spremembo v triurnem časovnem intervalu glede na geomagnetno miren dan. Izračunan je iz meritve horizontalnih komponent zemeljskega magnetnega polja na posameznem geomagnetnem observatoriju v času UTC (Coordinated Universal Time). Vrednosti tega indeksa so prilagojene vsakemu geomagnetnemu observatoriju posebej. V daljšem časovnem obdobju se njegove vrednosti ponovijo na vseh observatorijih približno enako krat. Ker je indeks  $K$  logaritmične oblike, bi bila zato dnevna vsota vrednosti vseh osmih indeksov posameznega dneva geometrijska vsota (Understanding Solar Metrics Data, 2015). Linearni ekvivalent geomagnetnega indeksa  $K$  je indeks  $a$  (preglednica 1). Vsota vseh osmih indeksov  $a$  posameznega dne je indeks  $A$ , ki pa je aritmetična vsota.

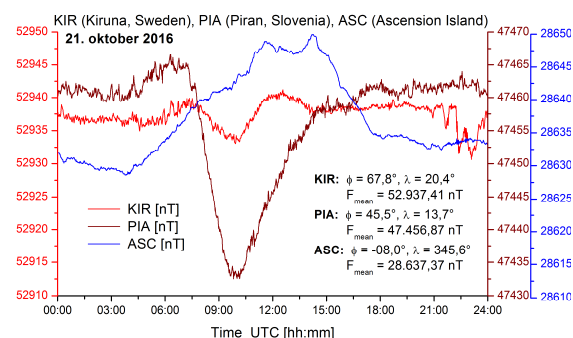
Preglednica 1 - Geomagnetni indeks  $K$  in  $a$  ter stanje geomagnetnega polja.

Indeks:	Vrednosti:									
$K$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a$	0	3	7	15	27	48	80	140	240	400
Stanje:	mirno	mirno	nestanovitno	razburkano	geomagnetna nevihta					
Nevihta:					manjša	zmerna	močna	huda	ekstremna	
					G1	G2	G3	G4	G5	

Geomagnetno zelo miren dan je določen s pomočjo geomagnetnih indeksov  $K$  (Čop, et al., 2015), kot primer so izračunani na osnovi meritev na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenia) (Slika 4). 21. oktobra 2016 je bila na tem observatoriju vsota geomagnetnega indeksa  $\Sigma K = 1$ ,  $A = 3$ , na planetarni ravni pa  $\Sigma K_p = 3$ ,  $A_p = 9$  (Preglednica 1). Observatorij PIA leži v srednjih severnih geografskih širinah na  $\phi = 45,5^\circ$ . Na ta geomagnetno zelo miren dan je bila izmerjena absolutna vrednost vektorja zemeljskega magnetnega polja  $F$  [nT] na treh geomagnetnih observatorijih na zelo različnih geografskih širinah (Slika 5). V meritvi opravljeni na observatoriju ASC (Ascension Island) se opazi vpliv krožnega električnega toka. Ta observatorij leži v ekvatorialnem pasu na južni geografski širini  $\phi = 8,0^\circ$ .



Slika 4 - Vrednosti lokalnih geomagnetnih indeksov  $K$  na observatoriju PIA od 20. do 22. oktobra 2016.



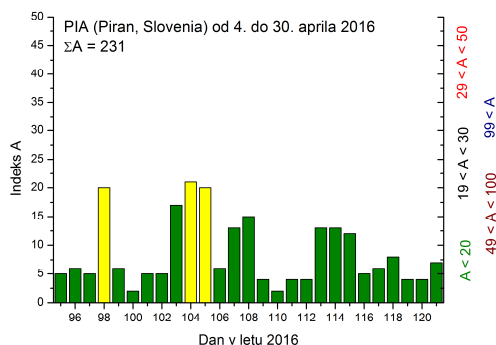
Slika 5 - Magnetogrami izmerjeni 21. oktobra 2016 na treh geomagnetnih observatorijih z različno geografsko širino.

### Geomagnetne nevihte v začetku maja 2016

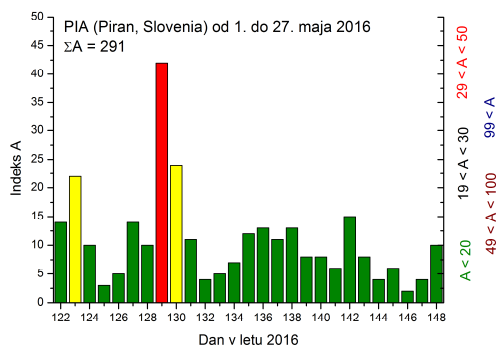
Geomagnetne nevihte v začetku maja 2016 spadajo v opazovano obdobje dveh učinkovitih obratov Sonca, ki vsak traja po 27 dni (Wilcox et al., 1974; Švestka, 1968). Opazovano obdobje se je začelo 4. aprila 2016 in se je končalo 27. maja 2016. Sonce je bilo preko vsega opazovanega obdobja zelo mirno. Ni bilo zaznanih izbruhov v koroni Sonca CME, zato je bilo geomagnetno polje pretežno mirno in le občasno zmerno razburkano (Preliminary Report, 2016a).

2. aprila 2016 je Zemlja v nekaj urah prešla prehodni del medplanetarnega magnetnega polja. Ob tokratnem prehodu skozi to območje je Zemlja prišla v območje negativnega magnetnega polja (Preliminary Report, 2016a). Medplanetarno magnetno polje s tako usmeritvijo ima komponento  $Z$  usmerjeno proti jugu in se zelo lahko poveže z magnetnim poljem Zemlje. Zato so se v opazovanem obdobju pojavili spomladanski polarni siji in ponavljajoče se geomagnetne nevihte. Te nevihte so bile v opazovanem obdobju povzročene izključno zaradi prehodov Zemlje preko tokovnic hitrejšega sončnega vetra, ki je izhajal iz lukenj v koroni Sonca.

V prvih 27 dneh opazovanega obdobja od 4. do 30. aprila 2016, od 95. do 121. dneva v letu 2016, sta bili na observatoriju PIA registrirani dve geomagnetni nevihti (Slika 6), na planetarni ravni pa tri. V drugem učinkovitem obratu Sonca, ki je trajal od 1. do 27. maja 2016 ali od 122. do 148. dneva v letu 2016, sta bile registrirani tako na observatoriju PIA kot tudi na planetarni ravni dve geomagnetni nevihti (Slika 7). V vsem opazovanem obdobju nobena od geomagnetnih neviht ni preseгла zmerne stopnje G2 (angl. moderate) (Preglednica 1) (NOAA, 2011; Poole, 2000). Dnevna geomagnetna aktivnost, ki je bila izmerjena na observatoriju PIA, je izražena s 24-urnim geomagnetnim indeksom  $A$ . V celotnem prvem delu opazovanega obdobja je bila ta aktivnost, podana kot vsota posameznih dnevnih aktivnosti,  $\Sigma A = 231$ , v drugem pa  $\Sigma A = 291$  ali za 1/4 večja (25,97%) od predhodnega obdobja.



Slika 6 – Lokalni geomagnetni indeks A za posamezni dan od 4. do 30. aprila 2016.



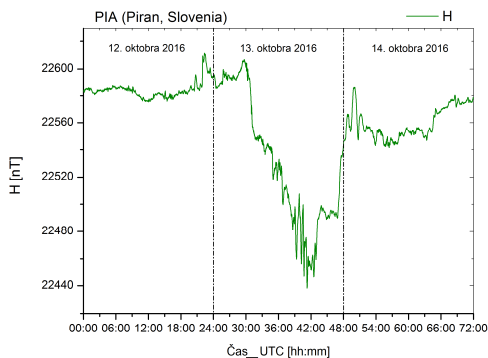
Slika 7 – Lokalni geomagnetni indeks A za posamezni dan od 1. do 27. maja 2016.

Iz luknje v koroni Sonca izhajajoči sončni veter povečane hitrosti je povzročil geomagnetno nevihto 8. maja 2016 (129 dan v letu 2016), ki je trajala preko 24 ur. Bila je najmočnejša v prvi polovici leta 2016 in je na nekaterih delih planeta dosegla stopnjo G3 (angl. strong). Ta luknja v koroni Sonca je nato zašla za zahodnim limbom sončnega diska. Že po koncu opazovanega obdobja se je ponovno pojavila na vzhodni strani Sonca. Ponovno je povzročila geomagnetno nevihto 4. in 5. junija 2016. Tokrat je bila šibkejša kot v predhodnem efektivnem obratu Sonca od 1. do 27. maja 2016, kljub temu pa je na višjih geografskih širinah zaznavno vplivala na elektroenergetske sisteme in na širjenje radijskih signalov. Vesoljska plovila so se zaradi povečane hitrosti sončnega vetra težje samodejno orientirala, v nižjih orbitah pa se je povečal pritisk nanje (Extreme space weather, 2013).

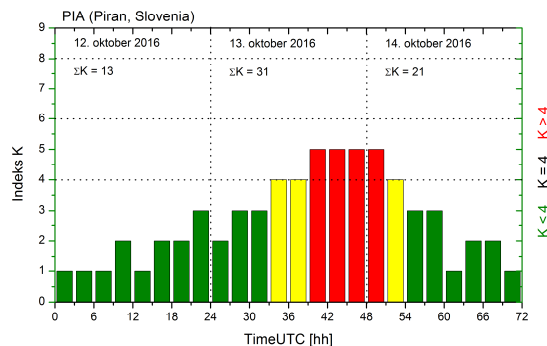
### Dva izvora geomagnetnih neviht

8. oktobra 2016 okoli 16:00 UTC je na severni polobli Sonca nastala eksplozija v njegovem magnetnem polju, ki je kot izbruh v koroni CME odnesla sončevo plazmo v medplanetarni prostor (Preliminary Report, 2016b). Ta prehodni pojav v heliosferi je zemeljsko magnetosfero dosegel 12. oktobra malo pred koncem tega dneva (Slika 8). Najprej je bil zaznan nenadni impulz v zemeljskem magnetnem polju. Ker je bila magnetna orientacija izbruha v koroni Sonca, ki je ta dan dosegel Zemljo, v smeri proti jugu, sta se obe magnetni polji med seboj povezali in povzročili geomagnetno nevihto. Ta je naslednji dan dosegla stopnjo G1 (angl. minor), ki se je nato 14. oktobra 2016 umirila (Slika 9).

Med 11. in 12. oktobrom 2016 je na južni polobli Sonca v koroni nastala obsežna luknja. Iz nje je v smeri proti Zemlji izhajal sončni veter večje hitrosti, ki je Zemljo dosegel 16. oktobra 2016. Na prednjem robu toka sončnega vetra s povečano hitrostjo je bilo prehodno območje med tistim z nižjo in tistim z višjo hitrostjo. Ta prehod je skupaj z razliko gradienta gostote delcev sončnega vetra ter ustrezna usmerjenost spremljajočega magnetnega polja povzročil geomagnetno nevihto značilne oblike (Slika 10, Slika 11).



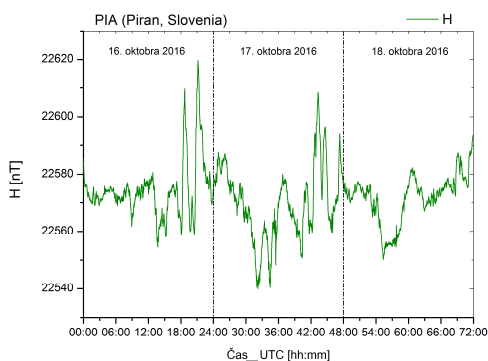
Slika 8 - Na observatoriju PIA izmerjena sprememba horizontalne komponente geomagnetnega polja H v dneh od 12. do 14. oktobra 2016.



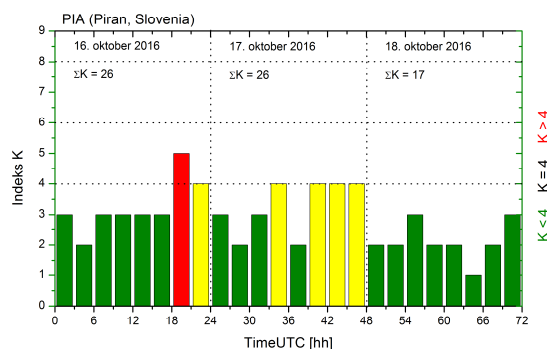
Slika 9 – Lokalni geomagnetni indeksi K izračunani na osnovi meritev na observatoriju PIA v treh zaporednih dneh od 12. do 14. oktobra 2016.

### Zaključki

V letu 2016 ni bilo mogoče opaziti sončnih peg na Soncu tudi po ves teden. To se je zgodilo prvič po letu 2010, ko se je zaključil predhodni sončni cikel. Torej tudi sedanji 24. sončni cikel prehaja v obdobje minimuma. Iztekel pa se bo v letu 2019 ali 2020, ko sončne pege ne bodo vidne tudi po ves mesec. Manjše število sončnih peg pomeni, da je sončnih bakel vse manj in da so izbruhi v koroni Sonca CME vse redkejši. Čeprav je Sonce mirno, pa je stanje v vesolju okoli Zemlje le spremenjeno glede na obdobje maksimuma. Zgornje zračne plasti Zemlje so se skrčile. Pogoji širjenja elektromagnetnih valov skozi zračne plasti so se torej spremenili kot tudi pogoji kroženja predmetov okoli Zemlje na nizkih orbitah. Zaradi manjše aktivnosti Sonca se je skrčila tudi celotna heliosfera in medzvezdni prostor se je približal Zemlji. Zato se je povečala emisija kozmičnih žarkov na njeno površino. Subatomske delci velikih energij, ki sestavljajo kozmične žarke, pa pospešujejo tvorbo oblakov v nižjih plasteh Zemljine atmosfere (Svensmark, 2000).



Slika 10 - Na observatoriju PIA izmerjena sprememba horizontalne komponente zemeljskega magnetnega polja H v dneh od 16. do 18. oktobra 2016.



Slika 11 – Lokalni geomagnetni indeksi K izračunani na osnovi meritev na observatoriju PIA v treh zaporednih dneh od 16. do 18. oktobra 2016.

V obdobju minimuma sončnega cikla povzročajo geomagnetne nevihte predvsem prehodi Zemlje preko tokovnic različnih hitrosti sončnega vetra. En sam izvor geomagnetnih neviht pa poenostavi opazovanje prehoda Zemlje skozi solarno mejno področje, kar je bilo v obdobju maksimalne aktivnosti Sonca težje izvedljivo. Razlaga merilnih rezultatov spremembe zemeljskega magnetnega polja, ki so bili izmerjeni na geomagnetnem observatoriju na površini Zemlje, je poenostavljena. Ko je medplanetarno magnetno polje orientirano tako, da se združi z zemeljskim magnetnim poljem, vsak prehod našega planeta preko tokovnic različnih hitrosti sončnega vetra povzroči tudi geomagnetno nevihto.

## Literatura

- Artist's Conception of the Heliospheric Current Sheet (2006). Stanford (CA, US): The Wilcox Solar Observatory – WSO.  
<http://wso.stanford.edu/gifs/HCS.html> (3. april 2016)
- Bertin, G., Coppi, B. (1985). Bending Waves and Current Disk Model for the Heliosphere. *The Astrophysical Journal*, 298, 387-399.
- Blagau, A. (2007). Characteristics of Earth's magnetopause from Cluster measurements. Dissertation. München (D): Ludwig-Maximilians-Universität München; Faculty of Geosciences.
- Boberg, F., Lundstedt, H., Hoeksema, J. T., Scherrer, P. H., Liu, W. (2002). Solar mean magnetic field variability: A wavelet approach to Wilcox Solar Observatory and SOHO/Michelson Doppler Imager observations. *Journal of Geophysical Research*, 107 (A10: 1318).
- Burlaga, L. F., Ness, N. F., Acuna, M. H., Wang, Y.-M., Sheeley Jr, N. R., Wang, C., Richardson, J. D. (2008). Global structure and dynamics of large-scale fluctuations in the solar wind: Voyager 2 observations during 2005 and 2006. *Journal of Geophysical Research*, 113, A02104.
- Choi, Q. C. (2016). NASA Probes Witness Powerful Magnetic Storms Near Earth, a Space First. *Space.com*, 12 May 2016.  
<http://www.space.com/32866-explosive-magnetic-reconnection-storms-spotted-nasa-probes.html> (14. maj 2016)
- Cliвера, E. W., Kamideb, Y., Ling, A. G. (2002). The semiannual variation of geomagnetic activity: phases and profiles for 130 years of *aa* data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, 47–53.
- Čop, R., Deželjin, D. De Reggi, R. (2015). Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa *K*. *Geodetski vestnik*, 59 (4), 697-708.
- Čop, R. (2016). Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije. *Geodetski vestnik*, 60 (2), 197-211.
- Dan, A., Chaudhuri, D., Nag, A. (2014). Geomagnetic Parameters Influencing Geomagnetic Storms in Relation to Solar Terrestrial Relationship. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology IJRSET*, 3 (6), 63-67.
- Eddy, A. J. (2009). *The Sun, the Earth, and Near-Earth Space. A Guide to the Sun-Earth system.* NASA Living With a Star grant number NNG06EC631. NASA Publication #NP-2009-1-066-GSFC. Washington (DC, US): U.S. Government Printing Office.
- Egeland, A., Burke, W. J. (2012). *The ring current: a short biography.* *History of Geo and Space Sciences*, 3, 131–142.
- Egeland, A., Burke, J. W. (2013). *Carl Størmer, Auroral Pioneer.* *Astrophysics and Space Science Library.* Berlin, Heidelberg (D): Springer.
- Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure* (2013). London (UK): Royal Academy of Engineering.
- Geomagnetic Storms* (2011). OECD/IFP Futures Project on “Future Global Shocks”. Burlington (MA, US): CENTRA Technology.

- Gekelman, W., Vincena, S., Leneman, D., Maggs, J. (1997). Laboratory Experiments on Shear Alfvén Waves, and their Relationship to Space Plasmas. *Journal of Geophysical Research*, 102, 7225-7236.
- Hathaway, H. D. (2010). The Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 7, 1.
- Hudson, H., Svalgaard, L., Hannah, I. (2015). Solar Sector Structure. arXiv.org; Open access to 1,143,281 e-prints in Physics, Mathematics, Computer Science, Quantitative Biology, Quantitative Finance and Statistics. Ithaca (NY, US): Cornell University; Cornell University Library.
- Kane, R. P. (2006). The idea of Space Weather – A historical perspective. *Advances in Space Research*, 37, 1261–1264.
- Kataoka, R., Ebisuzaki, T., Kusano, K., Shiota, D., Inoue, S., Yamamoto, T. T., Tokumaru, M. (2009). Three-dimensional MHD modeling of the solar wind structures associated with 13 December 2006 coronal mass ejection. *Journal of Geophysical Research*, 114, A10102.
- Kobe, A. T., Amory-Mazaudier, C., Do, J. M., Luhr, H., Houngninou, E., Vassal, J., Blanc, E., Curto, J. J. (1998). Equatorial electrojet as part of the global circuit: a case-study from the IEEY. *Annales Geophysicae*, 16, 698-710.
- Kistler, M. L. (2017). The Impact of O<sup>+</sup> on Magnetotail Dynamics. *Magnetosphere-Ionosphere Coupling in the Solar System. Geophysical Monograph 222*. Editors: Charles R. Chappell, Robert W. Schunk, Peter M. Banks, James L. Burch, Richard M. Thorne. Washington (DC, US): American Geophysical Union AGU; Hoboken (NY, US): John Wiley and Sons, 79-100.
- Lakhina, S. G., Tsurutani, T. B. (2016). Geomagnetic storms: historical perspective to modern view. *Geoscience Letters*, 3:5.
- Linker, A. J. (1998). Global Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Corona. Final report. NASA Contract: NASW-4968. San Diego (CA, US): Science Application International Cooperation.
- Maunder, E. W. (1904). Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874-1902. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 64, 747-761.
- Moore, E. T., Brenneman, S. K., Chappell, R. C., Clemmons, H. J., Collinson, A. G., Cully, C., Donovan, E., Earle, D. G., Gershman, J. D., Heelis, R. A., Kistler, M. L., Kepko, L., Khazanov, G., Knudsen, J. D., Lessard, M., MacDonald, A. E., Nicolls, J. M., Pollock, J. C., Pfaff, R., Rowland, E. D., Sanchez, E., Schunk, R. W., Semeter, J., Strangeway, J. R., Thayer, J. (2017). Future Atmosphere-Ionosphere-Magnetosphere Coupling Study Requirements. *Magnetosphere-Ionosphere Coupling in the Solar System. Geophysical Monograph 222*. Editors: Charles R. Chappell, Robert W. Schunk, Peter M. Banks, James L. Burch, Richard M. Thorne. Washington (DC, US): American Geophysical Union AGU; Hoboken (NY, US): John Wiley and Sons.
- Mursula, K., Usoskin, I. G., Kovaltsov, G. A. (2002). A 22-year cycle in sunspot activity. *Advances in Space Research*, 29 (12), 1979-1984.
- Ness, F. N. (1967). Direct measurements of interplanetary magnetic field and plasma. X-612-67-293; NASA TM X-55830. Greenbelt (MA, US): Goodard Space Flight Center.
- NOAA Space Weather Scales (2011). Boulder (CO, US): National Oceanic and Atmospheric Administration; National Weather Service; National Centers for Environmental Prediction; Space Weather Prediction Center.
- Parker, E. N. (2001). A history of early work on the heliospheric magnetic field. *Journal of Geophysical Research*, 106 (A8), 15,797-15,801.
- Poole, I. (2002). Understanding Solar Indices. Newington (CT, US): American Radio Relay League – ARRL. QST, September 2002, 38-40.
- Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data (The Weekly). SWPC PRF 2119 – 2126 (2016a). Boulder (CO, US): National Weather Service; Space Weather Prediction Center - SWPC, 1996-2016.
- Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data (The Weekly). SWPC PRF 2119 – 2126 (2016b). Boulder (CO, US): National Weather Service; Space Weather Prediction Center - SWPC, 2144-2149.
- Rangarajan, G. K., Barreto, L. M. (2000). Long term variability in solar wind velocity and IMF intensity and the relationship between solar wind parameters & geomagnetic activity. *Earth Planets Space*, 52, 121–132.

- Reconnection of Magnetic Fields; Magnetohydrodynamics and Collisionless Theory and Observations (2007). Edited by J . Birn and E . R . Priest. Cambridge University.
- Reuveni, Y., Price, C. (2009). A new approach for monitoring the 27-day solar rotation using VLF radio signals on the Earth's surface. *Journal of Geophysical Research*, 114, A10306.
- Russell, C.T., McPherron, R. L. (1973). Semiannual Variation of Geomagnetic Activity. *Journal of Geophysical Research*, 78 (1), 92.
- Solar Cycle Progression; Sunspot Number Progression (2016). Boulder (CO, US): National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); Space Weather Prediction Center (SWPC). <http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (15. december 2016)
- Svalgaard, L. (2013). Solar activity – past, present, future. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, A24.
- Svalgaard, L., Wilcox, J. M. (1976). Three-dimensional structure of the extended solar magnetic field and the sunspot cycle variation in cosmic ray intensity. Stanford (CA, US): Stanford University, 1976.
- Svensmark, H. (2000). Cosmic Rays and Earth's Climate. *Space Science Reviews*, 93, 155-165.
- Švestka, Z. (1968). Effects associated with the Sector Boundary crossing on July 8, 1966. *Solar Physics*, 4 (3), 361-372.
- Tohmatsu, T. (1990). *Compendium of Aeronomy*. Translated by Ogawa, T. *Developments in Earth and Planetary Sciences, Series Volume 7*. Rotterdam; Springer Netherlands, p.31.
- Understanding Solar Metrics Data; Making Sense of the Solar Metrics (2015). AM 5-610. Fort Huachuca (AZ, US): Department of the Army Military Auxiliary Radio System.
- Wilcox, M. J., Scherrer, H. P., Svalgaard, L., Roberts, O. W., Olson, H. R., Jenne, L. R. (1974). Influence of Solar magnetic Sector Structure on Terrestrial Atmospheric Vorticity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, 581- 588.
- Wilcox, M. J., Scherrer, H. P. (1981). What Causes the Warp in the Heliospheric Current Sheet? *Journal of Geophysical Research*, 86 (A7), 5899-5900.
- Zhao, X., Hoeksema, J. T. (1994). A coronal magnetic field model with horizontal volume and sheet currents. *Solar Physics*, 151, 91-105.





# Preverjanje stabilnosti ploskovnega objekta s terestričnim laserskim skeniranjem

Klemen Kregar,<sup>1</sup> Gašper Štebe<sup>1</sup> in Aleš Marjetič<sup>1</sup>

## Povzetek

V prispevku opišemo metodo zaznavanja sprememb oblike ali položaja grajenega ploskovnega objekta na podlagi meritev s terestričnim laserskim skenerjem. Postopek je izveden na primeru prelivne stene na levem bregu kanala HE Zlatoličje, pri jezcu Melje na Dravi.

Jez smo skenirali v treh terminskih izmerah s štirih stojišč s terestričnim laserskim skenerjem Riegl VZ-400. Podatki so bili transformirani v koordinatni sistem geodetske mreže, ki je bila predhodno vzpostavljena za klasično spremljanje stabilnosti objekta. Prelivno steno smo razdelili na 10 sektorjev sledeč diskontinuitetam v betonu, nato pa s postopkom RANSAC filtrirali oblake točk. Z metodo najmanjših kvadratov smo skozi točke posameznih sektorjev izravnali ravnine v vsaki terminski izmeri ter tako določili parametre ravnin in njihove natančnosti.

Zaznava spremembe položaja ali oblike grajenega objekta pomeni malo, če je ne moremo statistično ovrednotiti. Sprememba položaja in oblike objekta se izraža skozi spremembe parametrov ravnin. Ob predpostavki o normalni porazdelitvi pogreškov meritev, je moč razlike med parametri statistično testirati glede na natančnosti teh razlik. Skupno spremembo ravnine pa računamo po zgledu iz točkovne deformacijske analize kot koren vsote kvadratov razlik parametrov. Skupna razlika se ne porazdeljuje po normalni porazdelitveni funkciji, zato s simulacijo Monte-Carlo empirično določimo porazdelitveno funkcijo. Spremembe ravnin in njihove statistične značilnosti podajamo v tabelarni in grafični obliki. Rezultati analiz se skladajo z rezultati klasičnega postopka.

**Ključne besede:** deformacijska analiza, zaznavanje premikov, terestrično lasersko skeniranje, pregradni objekti

**Key words:** deformation analysis, change detection, terrestrial laser scanning, dams

## Uvod

Terestrično lasersko skeniranje (TLS) je merska metoda v geodeziji, s katero, za razliko od klasične izmere, določamo položaje veliki množici točk. Za spremljanje stabilnosti velikih grajenih objektov s klasičnimi geodetskimi pristopi določamo položaje posameznim značilnim točkam na objektu z visoko natančnostjo. S TLS pa lahko izmerimo veliko točk na celotni površini objekta s slabšo natančnostjo posamezne točke (Scaioni & Wang 2016).

Direktna primerjava položaja točke med dvema zaporednima časovnima izmerama s tehnologijo TLS ni mogoča, ker s skeniranjem ne moremo izmeriti položaja poljubne izbrane točke. Prednost te tehnologije je v zajemu velike količine točk na površini objekta. Z ustrezno obravnavo takšnega oblaka točk lahko ravno tako določamo spremembe oblike in položaja objekta (Holst & Kuhlmann 2016).

V prispevku predstavljamo postopek za zaznavo in statistično ovrednotenje sprememb ploskovnega objekta. Samo zaznavanje spremembe nima uporabne vrednosti, če ne moremo oceniti kakovosti določitve te spremembe. Tako pri različnih metodah

---

<sup>1</sup> UL FGG, Oddelek za geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

deformacijske analize v geodeziji pogosto zasledimo tudi statistično vrednotenje rezultatov. Gamse et al. (2016) uporabljajo statistično testiranje deformacij jezov določenih z meritvami nihala in geodetskimi merjenji, Lindenbergh & Pfeifer (2005) statistično testiranje opravita s pomočjo testne statistike globalnega testa modela pri izravnavi, v katero so vključene vrednosti iz dveh terminskih izmer. Primer iz TLS pa je statistično testiranje neodvisnosti parametrov diferencialnih enačb, s katerimi sta Gordon & Lichti (2007) opisovala krivljenje nosilca pod obremenitvijo.

TLS se pogosto uporablja za spremljanje stabilnosti pregradnih objektov oziroma jezov (Schafer et al. 2004). Postopek, ki ga predlagamo v prispevku pa je, glede na znano literaturo, inovativen in enostaven. Uporabili smo ga na praktični nalogi preverjanja stabilnosti prelivne stene jezov Melje v Mariboru.

V prispevku bomo opisali obravnavano delovišče, izvedbo geodetske mreže za zagotovitev koordinatnega sistema, skeniranje TLS in georeferenciranje podatkov, izravnavo ravnin skozi oblak točk ter primerjavo parametrov ravnin med posameznimi terminskimi izmerami s statističnim testiranjem.

## Meritve in izračuni

### Delovišče

Jez Melje stoji na reki Dravi, kjer ta zapušča mesto Maribor. Jez z vodo oskrbuje HE Zlatoličje, s katero ga povezuje 17 km dolg kanal. Na začetku kanala je njegov levi breg nekoliko nižji od desnega, kar bi v primeru nenadejanih težav v HE Zlatoličje zagotovilo prelitje vode iz kanala na levo stran nazaj v strugo Drave. Ker je predviden biološki minimum pretoka vode po stari strugi reke  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , so se odločili v prelivno steno vgraditi malo hidro elektrarno (MHE), ki bo izkoriščala tudi potencial vode, prelite zaradi biološkega minimuma. Gradnja MHE je povzročila napetosti v prelivni steni, zato se je upravljavec (DEM) odločil za geodetske meritve kritičnega odseka prelivne stene (Slika 1).

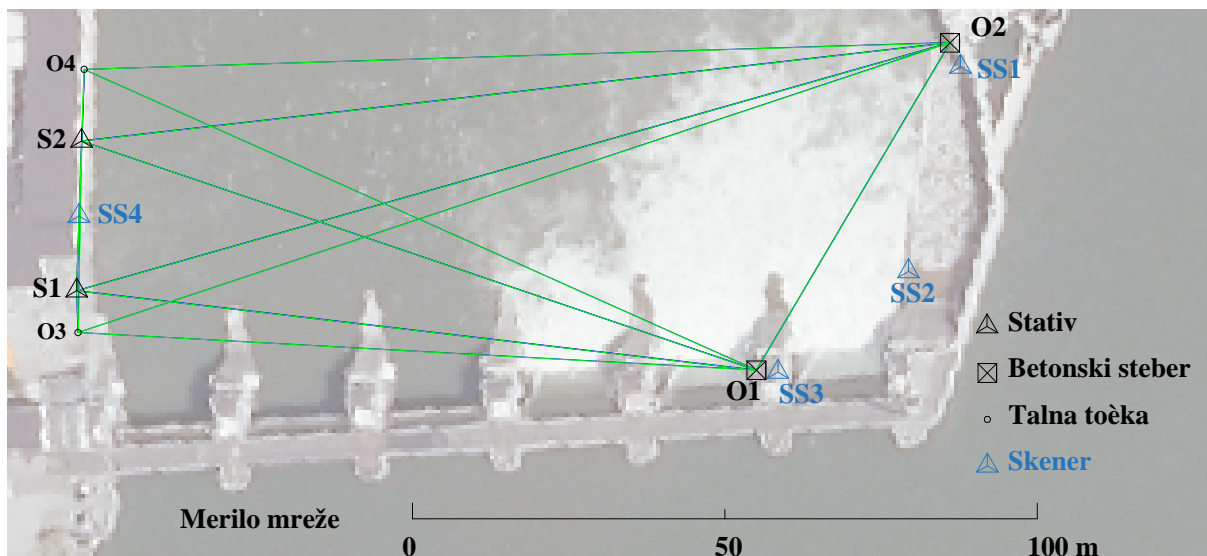


Slika 1: Situacija prelivne stene z malo hidroelektrarno

### Koordinatna osnova – Geodetska mreža

Na jezov Melje smo v vsaki terminski izmeri izmerili geodetsko mrežo visoke natančnosti. Geodetska mreža je sicer namenjena klasičnemu spremljanju stabilnosti prelivne stene, v našem primeru pa smo točke geodetske mreže uporabili za georeferenciranje skeniranih podatkov, to je transformacijo vseh skeniranih podatkov v stabilni koordinatni sistem. Mreža je prikazana na Sliki 2 in ima šest točk: O1 in O2 sta

stabilizirani kot betonska stebra; O3 in O4 sta talni točki, ki ne omogočata postavitve instrumenta; S1 in S2 sta stabilizirani s stativom. Merjenja smo izvedli v treh terminskih izmerah: 21. aprila 2015, 14. julija 2015 in 10. oktobra 2016. Merili smo s preciznim tahimetrom Leica TS30 v kombinaciji s preciznimi merskimi prizmami Leica GPH1P. Instrument in prizme so bili prisilno centrirani v podnožja na točkah O1, O2, S1 in S2, na točkah O3 in O4 pa sta bili vedno le prizmi.



Slika 2: Geodetska mreža in stojišča skenerja na jezcu Melje

Smeri z vseh stojišč proti vsem vidnim točkam smo merili v 7 girusih, istočasno so bile merjene zenitne razdalje in poševne dolžine v 7 ponovitvah v obeh krožnih legah. Za meteorološko redukcijo dolžin smo merili tudi meteorološke parametre. Datum geodetske mreže določata domnevno stabilni talni točki O3 in O4. Meritve v geodetski mreži smo izravnali (Kuang 1996), rezultat izravnave so položaji točk in njihove natančnosti.

### Terestrično lasersko skeniranje

Za skeniranje smo uporabili skener Riegl VZ-400 v kombinaciji z Leica 6" okroglimi »tilt & turn« tarčami (Slika 3). Skener je stal na stojiščih, ki so označena na Sliki 2. Na vsakem stojišču smo najprej skenirali tarče, centrirane na stojišča geodetske mreže, z gostoto  $1 \times 1$  mm, nato pa še obravnavani del prelivne stene (Slika 1) z gostoto približno  $2 \times 2$  cm.



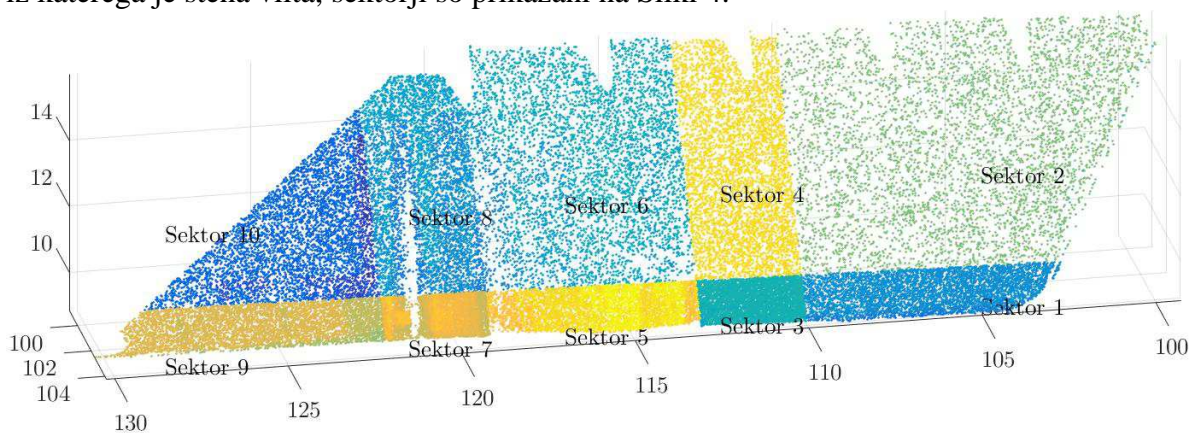
Slika 3: Uporabljena merska oprema

Skenograme z vseh stojišč smo transformirali v skupni koordinatni sistem, ki ga določajo položaji točk geodetske mreže. Centre skeniranih tarč v skenerjevem lastnem sistemu smo iz finih oblakov točk določili s posebnim postopkom, ki je opisan v (Kregar et al. 2013), njihovi položaji v referenčnem koordinatnem sistemu, pa so določeni z izravnavo geodetske mreže.

Ko so vsa stojišča georeferencirana, lahko oblake točk skeniranega dela prelivne stene združimo in nato s postopkom RANSAC (Fischler & Bolles 1981; Urbančič et al. 2016) odstranimo vse točke, ki ne ležijo na obravnavani ravnini prelivne stene.

#### Izravnava ravnin

Glavni namen raziskave je zaznati spremembe položaja ali oblike objekta preko sprememb parametrov ravnin izravnanih skozi skenirani oblak točk objekta. Majhne spremembe na zgolj majhnem odseku prelivne stene ne bi značilno vplivale na ravnino izravnano skozi celotno steno. Odločili smo se za razdelitev stene na manjše sektorje, s čimer bomo spremembe lažje opazili. Meje med sektorji sledijo diskontinuitetam v betonu, iz katerega je stena vlita, sektorji so prikazani na Sliki 4.

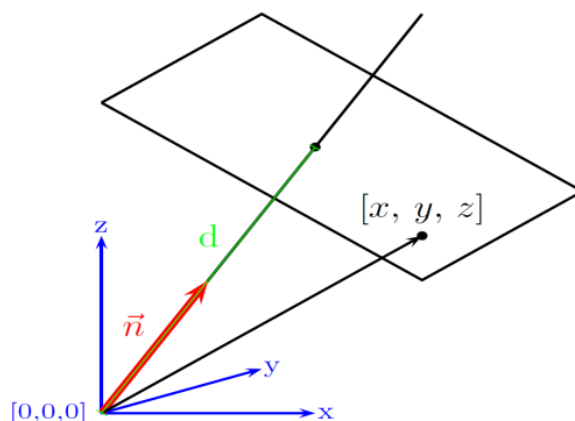


Slika 4: Razdelitev stene na sektorje

Skozi oblak točk vsakega sektorja izravnamo ravnino, ki je matematično opisana s štirimi parametri, kot kaže Slika 5. Orientacijo ravnine določa normalni vektor  $\vec{n} = [a \ b \ c]$ , položaj ravnine pa parameter  $d$ , ki predstavlja oddaljenost ravnine od koordinatnega izhodišča. Osnovna enačba ravnine je

$$\begin{aligned} ax + by + cz &= d \\ \vec{n} \cdot \vec{x} &= d \end{aligned} \quad (1)$$

Z drugimi besedami: pravokotna projekcija vsake točke ravnine na vektor normale je enaka  $d$ .



Slika 5: Parametri ravnine

Prileganje oziroma izravnavo ravnine je opisal že Pearson (1901), mi pa smo jo izvedli z geodetsko metodo najmanjših kvadratov (Ghilani 2011). Rezultat izravnave so parametri ravnine  $a, b, c$  in parameter  $d$  in njihove natančnosti, ki izhajajo iz variančno-kovariančne matrike

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & \sigma_{ab} & \sigma_{ac} & \sigma_{ad} \\ & \sigma_b^2 & \sigma_{bc} & \sigma_{bd} \\ & & \sigma_c^2 & \sigma_{cd} \\ [sym. & & & \sigma_d^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Zaradi ogromne količine točk v skeniranem oblaku so z izravnavo določene natančnosti često precenjene. Natančnost parametrov je hkrati ključni element pri statistični obravnavi značilnosti sprememb ravnine med terminskimi izmerami, zato je nujno natančnost ovrednotiti bolj realistično.

Ocena natančnosti mora biti neodvisna od števila točk v oblaku, zato smo izvedli postopek s povečevanjem naključnega vzorca. Iz celotnega oblaka smo po 50-krat izbrali po  $N$  naključnih točk, skozi njih izravnali ravnino, ter opazovali razpršenost parametrov ravnine v teh 50 ponovitvah. Velikost naključnega vzorca smo po korakih povečevali  $N = 20000, 40000, \dots$  Grafi v poglavju z rezultati bodo pokazali, kako se razpršenosti rezultatov iz tega testa skladajo s standardnimi odkloni parametrov iz izravnave.

### Deformacijska analiza

Sprememba položaja ali oblike dela prelivne stene se mora izraziti kot sprememba parametrov ravnine nekega sektorja med dvema terminskima izmerama. Spremembo parametrov moramo statistično ovrednotiti. Uredimo parametre ravnine nekega sektorja iz 1. terminske izmere v vektor  $\mathbf{p}_1 = [a_1 \ b_1 \ c_1 \ d_1]$ , ter parametre ravnine istega sektorja iz 2. terminske izmere v vektor  $\mathbf{p}_2 = [a_2 \ b_2 \ c_2 \ d_2]$ . Sprememba ravnine izražena po komponentah je preprosto razlika vektorjev

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 = [a_2 - a_1 \ b_2 - b_1 \ c_2 - c_1 \ d_2 - d_1] = [\Delta a \ \Delta b \ \Delta c \ \Delta d] \quad (3)$$

Deformacijsko analizo smo izvedli po zgledu (Savšek-Safić et al. 2006), zato celotno spremembo ravnine računamo tako, kot sicer računamo skupni premik točke

$$\delta = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta c^2 + \Delta d^2} \quad (4)$$

Za statistično ovrednotenje sprememb  $\Delta$  in  $\delta$  moramo poznati natančnost njune določitve. Pri analizi po komponentah določimo natančnosti razlik parametrov z vsoto variančno-kovariančnih matrik ravnine v posamezni terminski izmeri

$$\sigma_{\Delta p}^2 = \text{diag}(\Sigma_1 + \Sigma_2) \quad (5)$$

Za natančnost skupne spremembe ravnine  $\delta$  pa uporabimo zakon o prenosu varianc in kovarianc

$$\mathbf{J} = [-\Delta a \quad -\Delta b \quad -\Delta c \quad -\Delta d \quad \Delta a \quad \Delta b \quad \Delta c \quad \Delta d]/\delta \quad (6)$$

$$\sigma_{\delta}^2 = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \mathbf{J}^T \quad (7)$$

Statistično testiranje izvedemo v petih korakih (Turk 2012). Spremembo ravnine med dvema terminskima izmerama testiramo s statističnim testom domneve o srednji vrednosti slučajne spremenljivke. Zanima nas ali je sprememba parametra (ali skupna sprememba ravnine) enaka nič ali ne?

1. *Nastavimo ničelno in alternativno hipotezo*  
 $H_0: \Delta = 0$  ali  $\delta = 0$  – sprememba ni značilna  
 $H_1: \Delta \neq 0$  ali  $\delta \neq 0$  – sprememba je značilna
2. *Izberemo testno statistiko, ki ustreza ničelni hipotezi ter določimo njeno porazdelitev.*  
 Testna statistika je razmerje med spremembo  $\Delta$  in njeno natančnostjo  $\sigma_{\Delta}$ .

$$T_{\Delta} = \Delta/\sigma_{\Delta} \quad (8)$$

Ker je sprememba  $\Delta$  linearna kombinacija normalno porazdeljenih slučajnih spremenljivk iz izravnave, lahko rečemo, da je normalno porazdeljena tudi testna statistika  $T_{\Delta}$ . Za skupno spremembo  $\delta$  pa je testna statistika

$$T_{\delta} = \delta/\sigma_{\delta} \quad (9)$$

Porazdelitev te testne statistike je neznana.

3. *Izberemo stopnjo značilnosti testa  $\alpha$  in glede nanjo določimo meje kritičnega območja zavrnitve ničelne hipoteze.* Za izbrano stopnjo značilnosti  $\alpha = 5\%$  so meje območja  $(-\infty, k_{\alpha/2}] \cup [k_{1-\alpha/2}, \infty)$  kar za normalno porazdelitev znaša  $(-\infty, -1.96] \cup [1.96, \infty)$ .  
 Za skupno spremembo  $\delta$  bomo uporabili enostranski test, ker  $\delta$  ne more biti negativna vrednost. Kritično območje je  $[t_{1-\alpha}, \infty)$ , konkretne vrednosti pa zaradi neznanne porazdelitve še ne moremo določiti.
4. *Izračunamo testno statistiko  $T$  in preverimo ali leži v kritičnem območju.*
5. *Testiranje zaključimo z eno od trditev:*

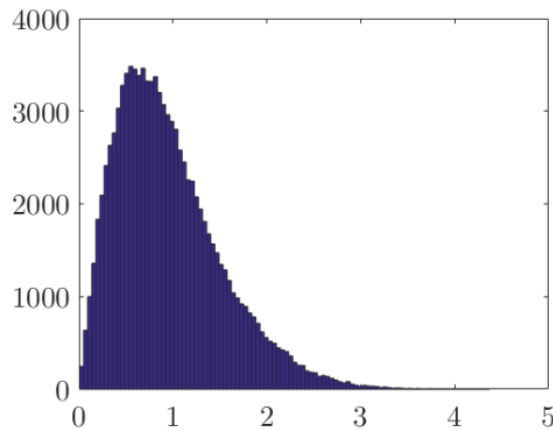
- Če  $T$  pade v kritično območje, zavrnilo ničelno hipotezo in sprejmemo alternativno ob tveganju  $\alpha$ . *Ravnina se je med terminskima izmerama statistično značilno spremenila.*
- Če  $T$  pade izven kritičnega območja, ničelne hipoteze ne moremo zavrniti ob tveganju  $\alpha$ . *Ne da se trditi, da se je ravnina med terminskima izmerama spremenila.*

Ker skupna sprememba ravnine  $\delta$  ni linearna kombinacija normalno porazdeljenih parametrov ravnin iz izravnave, smo njeno porazdelitev izračunali z znano metodo Monte-Carlo, ki je bila za deformacijsko analizo že uporabljena (Savšek-Safić et al. 2006). Za simulacijo potrebujemo veliko naključnih vektorjev  $\mathbf{y}_i$ , ki predstavljajo simulacije vektorja sprememb  $\Delta \mathbf{p}$ . Vektorji se morajo porazdeljevati skladno s kovariančno matriko prave spremembe ravnine  $\Sigma_{\Delta \mathbf{p}}$ . To dosežemo tako, da z metodo Box & Muller (1958) simuliramo normalno porazdeljene vektorje  $\mathbf{n}_i$  in jih nato množimo z  $\mathbf{U}$ , ki je rezultat Choleskyjevega razcepa matrike  $\Sigma_{\Delta \mathbf{p}}$ .

$$\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \Sigma_{\Delta \mathbf{p}} \quad (10)$$

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{U}^T \mathbf{n}_i \quad (11)$$

Sedaj lahko za vsak simuliran vektor sprememb izračunamo skupno spremembo  $\delta$ , njeno natančnost  $\sigma_\delta$  in testno statistiko  $T_\delta$ . Na Sliki 6 je histogram testnih statistik  $T_\delta$ , za 100.000 simuliranih sprememb.



Slika 6: Histogram simuliranih testnih statistik  $T_\delta$

Mejo kritičnega območja za zavrnitev ničelne hipoteze preberemo iz histograma in sicer tako, da poiščemo vrednost  $t$ , za katero velja, da je 5 % (to je v našem primeru 5.000) simuliranih testnih statistik večjih od nje.

$$t_{1-\alpha} = T_{\delta, n(1-\alpha)} \quad (12)$$

Za vsak sektor, ki smo ga v dveh terminskih izmerah skenirali ter skozi oblak točk izravnali ravnino, lahko zdaj določimo testno statistiko  $T_\delta$  in mejo kritičnega območja  $t_{1-\alpha}$ . S primerjavo teh dveh vrednosti lahko podamo izjavo o značilnosti spremembe ravnine posameznega sektorja med izmerama.

## Rezultati

### Geodetska mreža in georeferenciranje

Merjenja smo izvedli v treh terminskih izmerah: 21. aprila 2015, 14. julija 2015 in 10. oktobra 2016. V vsakem terminu smo izmerili geodetsko mrežo. Mreža ima 6 točk, od katerih sta dve točki talni in ne omogočata postavitve instrumenta. Talni točki definirata geodetski datum mreže. V izravnavi kot opazovanja nastopajo: 20 merjenih horizontalnih smeri, 14 horizontalnih dolžin in 14 višinskih razlik ter kot neznanke: 12 koordinatnih in 4 orientacijske neznanke. Nadštevilnost modela je 32. V Preglednici 1 podajamo nekaj cenilk kakovosti geodetske mreže v vsaki od terminskih izmer.

Preglednica 1: Podatki o izravnavah geodetske mreže

	1. terminska izmera	2. terminska izmera	3. terminska izmera
A-priori natančnosti opazovanj $\sigma_a$ ; $\sigma_d$ ; $\sigma_{\Delta h}$	1"; 0,3 mm; 1,5 mm	2"; 0,2 mm; 0,8 mm	2"; 0,2 mm; 0,3 mm
Globalni test modela	1,19	1,06	1,18
Povprečna natančnost koordinat: $\sigma_x$ ; $\sigma_y$ ; $\sigma_z$	0,28; 0,13; 0,73 mm	0,38; 0,14; 0,46 mm	0,29; 0,12; 0,19 mm

V vsaki terminski izmeri smo skenirane podatke transformirali v koordinatni sistem geodetske mreže. Transformacija je izvedena s pomočjo oslonilnih točk. V Preglednici 2 podajamo statistike o kakovosti georeferenciranja stojišč skenerja.

Preglednica 2: Kakovost georeferenciranja: 1. vrstica – natančnosti parametrov rotacije (kot in vektor); 2. vrstica – natančnosti parametrov translacije; 3. vrstica – skupni pogrešek

Stojišče skenerja	1. terminska izmera	2. terminska izmera	3. terminska izmera
SS1		37" [0,11 0,16 0,38] mm [2,78 1,46 0,85] mm 5,21 mm	2" [0,01 0,02 0,01] mm [0,24 0,24 1,64] mm 0,81 mm
SS2	24" [0,10 0,07 0,11] mm [1,86 1,33 2,70] mm 2,97 mm	15" [0,13 0,10 0,10] mm [3,90 3,14 4,87] mm 6,11 mm	10" [0,23 0,25 1,18] mm [2,39 2,09 2,66] mm 4,24 mm
SS3	18" [0,05 0,07 0,12] mm [1,02 1,03 1,36] mm 3,42 mm	2" [0,30 0,21 4,56] mm [0,46 0,84 0,42] mm 3,20 mm	4" [0,23 0,16 1,50] mm [0,67 1,55 0,36] mm 6,29 mm
SS4	6" [0,04 0,04 0,02] mm [1,52 1,16 1,32] mm 4,09 mm	47" [0,12 0,15 0,43] mm [2,43 1,39 0,95] mm 3,99 mm	21" [0,04 0,04 0,11] mm [1,45 1,28 0,41] mm 5,80 mm

Kakovost georeferenciranja se spreminja glede na stojišča in tudi glede na izmere. Bistveno je, da se (ne)natčnost parametrov pravilno upošteva pri določanju natančnosti parametrov ravnin, ki jih primerjamo v deformacijski analizi.

### Izravnavo ravnine

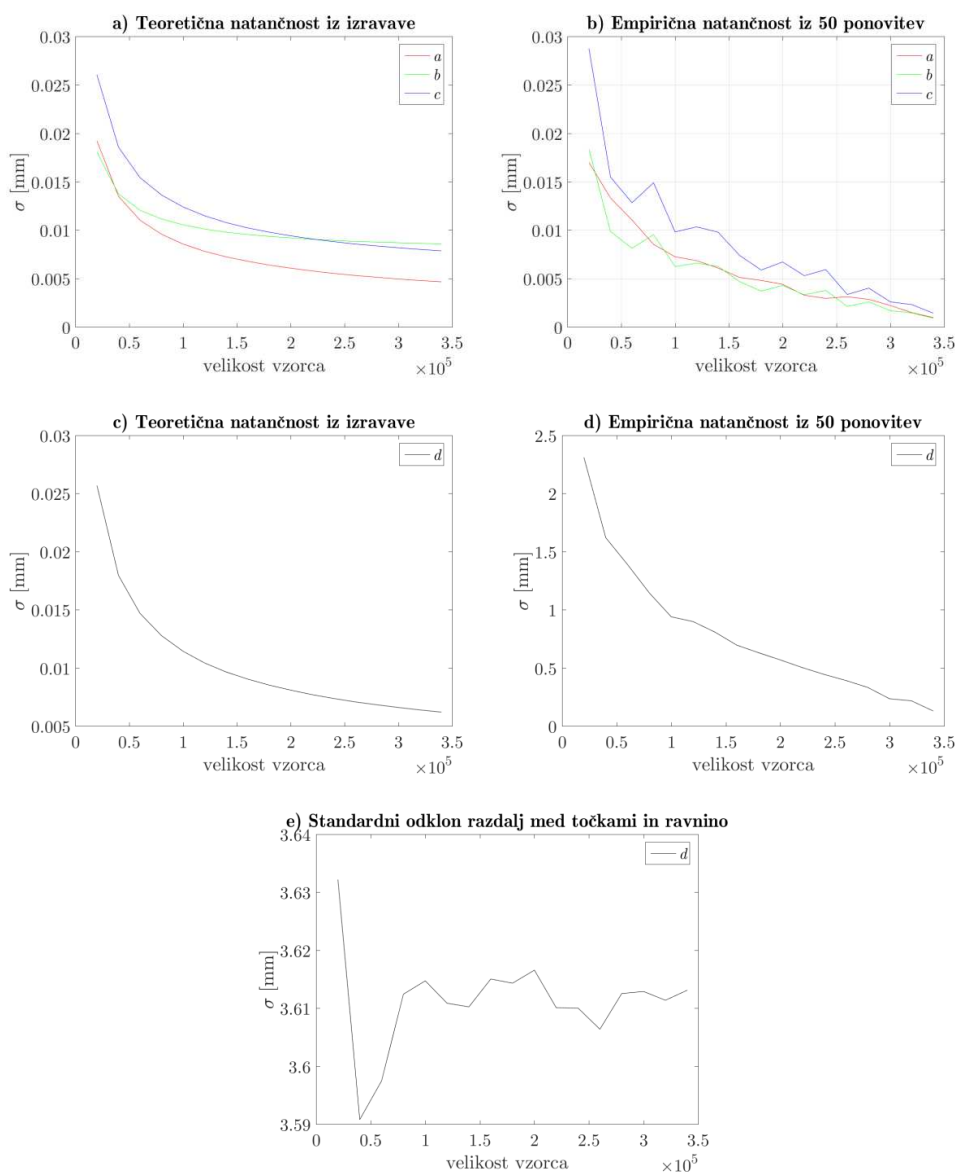
Skozi oblake točk vsakega sektorja v vsaki terminski izmeri smo izravnali ravnino. Rezultati so parametri ravnin in njihove natančnosti. A-priori natančnost točk, ki vstopajo v izravnavo kot opazovanja, je določena iz natančnosti skenerja (Kregar 2016), upoštevana



pa je tudi natančnost georeferenciranja. Za vse točke posameznega sektorja je privzeta enaka a-priori natančnost, izračunana za središčno točko sektorja.

Rezultati testa postopnega povečevanja vzorca, s katerim želimo realistično oceniti natančnost parametrov izravnanih ravnih, so prikazani na Sliki 7. Pri oceni parametrov normale ravnine  $a$ ,  $b$  in  $c$ , z večanjem števila točk razpršenosti padajo tako za natančnosti iz izravnave, kot za razpršenosti 50 ponovitev (Sliki 7a in 7b). Sklepamo, da so natančnosti normale realistično ocenjene v izravnavi.

Pri oceni parametra  $d$  (Sliki 7c in 7d) pa moramo upoštevati spremembo merila v izrisih. Vrednosti natančnosti parametra  $d$  iz izravnave so približno stokrat manjše od empiričnih. Boljša izbira za opis natančnosti parametra  $d$  zna biti razpršenost točk okoli ravnine, ki jo prikazuje Slika 7e in ni odvisna od velikosti vzorca.



Slika 7: Teoretične – iz izravnave (a in c) in empirične – iz 50 ponovitev (b in d) razpršenosti parametrov ravnin.

## Rezultati deformacijske analize

Rezultate izravnjav ravnin in realistične ocene natančnosti smo uporabili v predlaganem postopku deformacijske analize. Najprej smo primerjali ravnine izravnane skozi oblake točk skenirane v istem terminu z različnih stojišč in tako preverili kakovost georeferenciranja, šele nato smo med seboj primerjali terminske izmere z vseh stojišč.

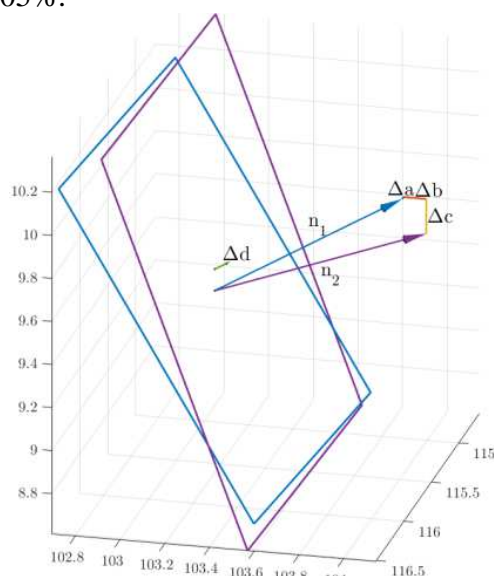
Rezultate predstavljamo v tabelarni in grafični obliki, pri čemer se v tem prispevku omejimo le na enega od sektorjev. V Preglednici 3 so v prvih dveh vrsticah podani parametri ravnine sektorja 5 v 1. in 2. terminski izmeri. Razlike med parametri so izračunane v 3. vrstici, natančnosti teh razlik pa v 4. vrstici. Testne statistike, ki so razmerje med spremembo parametra in natančnostjo spremembe, so podane v 5. vrstici.

Na desni strani preglednice je izračunana skupna sprememba ravnine  $\delta$ , njena natančnost  $\sigma_\delta$  in testna statistika  $T_\delta$ , povsem na desni pa še meja kritičnega območja za skupno spremembo.

Preglednica 3: Sprememba ravnine v sektorju 5 med 1. in 2. terminsko izmero

Sektor 5	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>		
$p_1$ [m]	0.0514	0.8520	0.5210	2.0744		
$p_2$ [m]	0.0539	0.8418	0.5371	2.0653		
$\Delta p$ [m]	0.0025	-0.0102	0.0161	-0.0091	$\delta = 0.0213$	
$\sigma_{\Delta p}$ [m]	0.0002	0.0038	0.0023	0.0126	$\sigma_\delta = 0.0054$	
$T_\Delta$	10.9	2.7	6.9	0.7	$T_\delta = 4.0$	$t_{1-\alpha} = 2.1$

Iz Preglednice 3 vidimo, da so se parametri normale ravnine *a*, *b* in *c* značilno spremenili, saj so testne statistike absolutno večje od meje kritičnega območja  $k_{\alpha/2} = 1.96$ . Celotna testna statistika skupne spremembe leži v kritičnem območju zavrnitve ničelne hipoteze, zato ob tveganju  $\alpha = 5\%$  trdimo, da se je ravnina sektorja 5 med 1. in 2. terminsko izmero statistično značilno spremenila. Ob danih vrednostih je dejansko tveganje za to trditev le 0.005%.



Slika 8: Nazoren grafični prikaz spremembe ravnine

Slika 8 je poskus nazornega grafičnega prikaza spremembe ravnine sektorja 5 med 1. in 2. terminsko izmero. Modri in vijoličasti vektor  $\vec{n}_1$  in  $\vec{n}_2$  predstavljata normali ravnine v 1. in 2. terminski izmeri. Razlika med njima je označena z  $\Delta a$ ,  $\Delta b$  in  $\Delta c$ , pri čemer je prva

komponenta komaj vidna. Sprememba parametra  $d$  je označena z zeleno puščico in oznako  $\Delta d$ . Sprememba seveda ni izrisana v merilu, ampak je zaradi nazornosti povečana.

## Zaključek

V prispevku predlagamo postopek za zaznavanje sprememb oblike ali položaja grajenega objekta. Postopek je primeren za spremljanje sprememb ploskovnih objektov z metodo izmere, katere rezultat je oblak točk.

Glavna vrednost predlaganega postopka je celovito statistično ovrednotenje sprememb objekta. Poleg tega v prispevku predstavljamo celoten potek dela od terenske izmere, zagotovitve koordinatnega sistema in izravnave ravnin s posebnim poudarkom na realističnem ocenjevanju parametrov, ki jih primerjamo v deformacijski analizi.

Rezultati postopka so predstavljeni za konkreten primer v tabelarni in grafični obliki. V tabelarni obliki so podani parametri ravnin v dveh terminskih izmerah, razlike med njimi, statistične cenilke spremembe ter njihova statistična značilnost. Grafični prikaz skuša nazorno predstaviti zaznana sprememba.

Predlagani postopek je dovolj občutljiv, da lahko zazna najmanjše še zaznavne spremembe objekta, ob dani natančnosti merske metode. Zaradi občutljivosti metode je izjemnega pomena zagotovitev ustreznih podatkov za analizo. Posebno pozornost je potrebno nameniti kakovostni oceni natančnosti vseh količin v postopku. Poleg tega je zelo pomembno, da v podatkih ni točk, ki v resnici ne ležijo na objektu. To smo zagotovili s postopkom RANSAC, ki pa na mejah obravnavane ravnine vedno obdrži tudi nekatere točke, ki ne ležijo na njej. Obravnavano območje bi bilo zato potrebno predhodno ročno točno obrezati, česar pa v našem delu zaradi demonstrativne narave prispevka nismo naredili.

Predlagana statistična analiza se sicer lahko uporabi na skeniranih objektih poljubnih oblik, dokler je to obliko mogoče matematično opisati s parametri in določiti natančnosti teh parametrov.

## Literatura in viri

- Box, G.E.P. & Muller, M.E., 1958. A Note on the Generation of Random Normal Deviates. *Ann. Math. Statist.*, 29(2), 610–611.
- Fischler, M.A. & Bolles, R.C., 1981. Paradigm for Model model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Graphics and Image Processing*, 24(6), 381–395.
- Gamse, S., Henriques, M.J. & Oberguggenberger, M., 2016. Assessment of long term pendulum and geodetic observations on a concrete arch dam. V: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) in Vienna from 30th March–1st April 2016*.
- Ghilani, C.D., 2011. *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*, Wiley.
- Gordon, S.J. & Lichti, D.D., 2007. Modeling Terrestrial Laser Scanner Data for Precise Structural Deformation Measurement. *Journal of Surveying Engineering*, 133(2), pp.72–80.
- Holst, C. & Kuhlmann, H., 2016. Challenges and Present Fields of Action at Laser Scanner Based Deformation Analyses. V: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) in Vienna from 30th March–1st April 2016*.

- Kregar, K., 2016. *Optimizacija postopkov terestričnega laserskega skeniranja za meritve visoke natančnosti*. Doktorska disertacija, UL Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana
- Kregar, K., Grigillo, D. & Kogoj, D., 2013. High precision target determination from a point cloud. V: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. II-5/W2, pp. 11–13.
- Kuang, S., 1996. *Geodetic Network Analysis and Optimal design*, Ann Arbor Press, Inc., Chelsea, Michigan
- Lindenbergh, R. & Pfeifer, N., 2005. A statistical deformation analysis of two epochs of terrestrial laser data of a lock. V: *Proc. 7th Conf. Optical-3D Measurement Techniques, 3-5 Oct., Vienna*, 61–70.
- Pearson, K., 1901. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine*, 2(6), 559–572.
- Savšek-Safić, S. et al., 2006. Determination of point displacements in the geodetic network. *Journal of Surveying Engineering-Asce*, 132(2), 58–63.
- Scaioni, M. & Wang, J., 2016. Technologies for Dam Deformation Measurement : Recent Trends and Future Challenges. V: *3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) in Vienna from 30th March–1st April 2016*.
- Schafer, T. et al., 2004. Deformation measurement using terrestrial laser scanning at the hydropower station of Gabčíkovo. In *INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia*, 1–10.
- Turk, G., 2012. *Verjetnostni račun in statistika*, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Urbančič, T., Vrečko, A. & Kregar, K., 2016. Zanesljivost metode RANSAC pri oceni parametrov geometrijskih oblik. *Geodetski vestnik*, 60(1), 69–97.

# Pregled višinskih datumov Slovenije

Božo Koler\*, Tilen Urbančič\*, Miran Kuhar\*, Polona Pavlovčič Prešeren\*, Bojan Stopar\*,  
Oskar Sterle\*

## Povzetek

V prispevku predstavljamo pregled višinskih datumov nivelmanskih mrež Slovenije, ki so bili določeni na osnovi večletnih opazovanj na različnih mareografih ob Jadranski obali. Predstavljamo določitev višinskega datuma Koper za novo državno nivelmansko mrežo 1. reda. Uvedba novega višinskega datuma v Sloveniji ima poleg določitve izhodišča za določitev nadmorskih višin pomen tudi v določitvi globinskega datuma. Povezava višinskega in globinskega datuma bo omogočila enolično povezavo višin na kopnem z globinami na morju.

**Ključne besede:** mareograf, višinski datum, globinski datum

**Keywords:** Tide gauge, height datum, chart datum

## Uvod

Mareograf je naprava, ki v časovni vrsti beleži nivo morja. Srednji nivo morja predstavlja ekvipotencialno ploskev, ki poteka skozi izbrano izhodiščno točko, to je *mareograf*, in predstavlja referenčno ploskev za določitev višin s postopki geometričnega nivelmana. Mareografska opazovanja služijo za določitev višinskega datuma nivelmanskih mrež oziroma izhodišče za določitev nadmorskih višin točk na kopnem. Določitev višinskega datuma nivelmanskih mrež na območju Slovenije je povezana z opazovanji na mareografih v Trstu, Bakru, vzdolž vzhodne jadranske obale (Koper, Rovinj, Bakar, Split in Dubrovnik) in Kopru. Na osnovi mareografskih opazovanj je določen tudi globinski datum. Povezava med višinskim in globinskim datumom je pomembna za varno odvijanje pomorskega prometa kot tudi poenotenje oziroma povezavo višin na kopnem z globinami na morju.

Višinski datum nivelmanske mreže nam predstavlja srednji nivo morja, ki ga izračunamo iz dolgoletnih opazovanj nihanj nivoja morja na mareografu. Da dobimo zanesljive podatke, moramo nihanje nivoja morja neprekinjeno opazovati vsaj 18,6 let. Po dogovoru ima srednji nivo morja oziroma ničelna nivojska ploskev absolutno višino enako nič. Lega ničelne nivojske ploskve je definirana z vertikalno oddaljenostjo od normalnega reperja, ki je stabiliziran na geološko stabilnem območju (Stefanović, 1955).

## Pregled višinskih datumov nivelmanskih mrež v Sloveniji

Višinski datumi na območju Slovenije so povezani z različnimi obdobji, ko je bilo ozemlje Slovenije sestavni del drugih držav. Prvi višinski datum je bil določen v času Avstro-Ogrske monarhije, drugi v času SFRJ in zadnji v času Slovenije kot samostojne države. Kakovost določitve višinskega datuma je povezana s kakovostjo instrumentov kot tudi z nekaterimi ključnimi odločitvami tedanjih strokovnjakov. Kot primer naj izpostavimo večkrat slišano problematiko mareografa v Trstu, kjer so za določitev datuma privzeli le enoletna opazovanja nihanj nivoja morja. Takratne odločitve so vodile do anomalij, na katere so kasneje opozarjali številni strokovnjaki.

---

\* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana

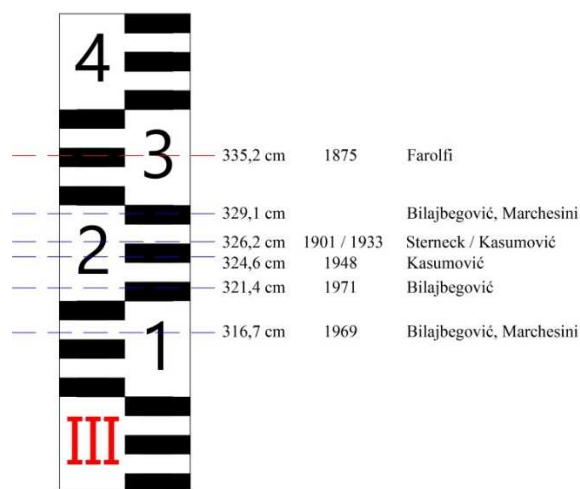
Tehnološki razvoj je omogočil posodobitev opreme na mareografih. Medtem ko je bil stari mareograf v Kopru (slika 1) še mehanski, je novi opremljen z radarskim mareografom in mareografom s plovcem, katerega položaj se registrira digitalno.



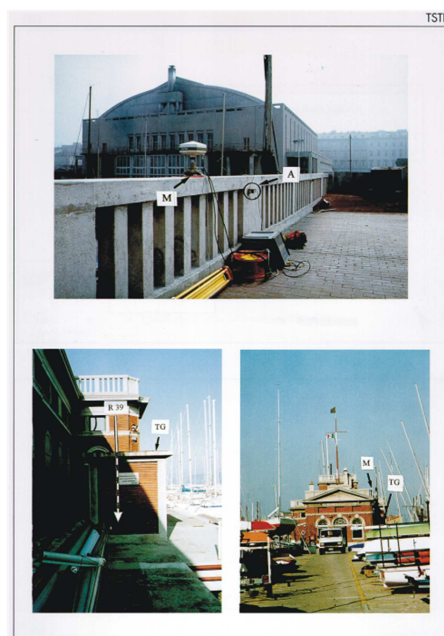
Slika 1: Stari mareograf (levo) in novi mareograf (desno) v Kopru

### Višinski datum Trst 1875

Normalni reper za navezavo avstro-ogrske nivelmanske mreže predstavlja reper na pomolu Sartorio v Trstu (slika 3). Čeprav so mareograf postavili leta 1869, so prve podatke o registraciji nivoja Jadranskega morja za leto 1875 objavili leta 1877, torej pred pretekom 18,6-letnega niza potrebnih kontinuiranih opazovanj na mareografu. Odločitev, da bodo višino normalnega reperja ( $3,352 \text{ m} \pm 0,01 \text{ m}$ ) določili na osnovi enoletnih opazovanj, so sprejeli zato, ker so želeli povezati srednji nivo Sredozemskega morja s severnimi morji in določiti enotni normalni reper za celo Evropo. Normalni reper v Trstu nikoli ni bil preračunan na enotni normalni reper Evrope. Razlog za to je bilo dejstvo, da je srednji nivo Sredozemskega morja za 13 cm nižji od srednjega nivoja severnih morij, zato so države obdržale svoje normalne reperje (Zeger, 1986). Te odločitve niso bile podrobno utemeljene oziroma zapisane, zato so kasneje o problematični višini normalnega reperja v Trstu strokovnjaki le sklepali oziroma nanjo opozarjali. Prvi je na to opozoril leta 1904 Sterneck, kasneje tudi drugi. Kasumović je izračunal razliki 8,9 cm (1933) in 10,6 cm (1948) na osnovi opazovanj nihanj morja v Bakru za leto 1933 in z upoštevanjem spremembe konstante mareografa leta 1948. Na *Istituto Talassografico Trieste* so iz opazovanj mareografa v Trstu za leto 1969 izračunali razliko 18,5 cm (Koler, 1994). Leta 1991 so z opazovanji nihanja nivoja morja v Bakru in z znano višinsko razliko med reperjema mareografov v Bakru in Trstu določili razliko 6,056 cm (Bilajbegović in Marchesini, 1991). Bilajbegović je izračunal razliko 13,8 cm iz opazovanj nihanj nivoja morja v Bakru za leto 1971. Na sliki 2 prikazujemo različne vrednosti srednjega nivoja morja v Trstu.



Slika 2: Srednji nivoji morja v Trstu za različna obdobja



Slika 3. Objekt na pomolu Sartorio v Trstu, v katerem se nahaja mareograf

Problematična višina normalnega reperja v Trstu je vrsto let vplivala na izračune nadmorskih višin točk v Sloveniji. Različne vrednosti srednjih nivojev v Trstu so se pri avtorjih pojavile zato, ker so bile vrednosti določene na različnih mareografih (Bakar, Trst), nanašale so se na različne nize opazovanj in so bile določene za različna leta (1901, 1933, 1948, 1969 in 1971).

Po 2. svetovni vojni je bila na območju bivše SFRJ narejena izmera I. nivelmana visoke natančnosti (I. NVN) in navezana na ohranjene repere avstro-ogrškega nivelmana. Mreža I. NVN ima isti višinski datum (Trst1875) kot avstro-ogrška nivelmanska mreža.

### **Višinski datum Bakar 1933**

Leta 1957 so v Kopru postavili mehanski mareograf (slika 1). Takrat je bil za izhodiščni reper za navezavo nivelmanske izmere na območju tedanje Jugoslavije (I. NVN) privzet reper mareografa v Bakru. Nove mareografe ob vzhodni jadranski obali so vključili v nivelmansko mrežo na osnovi srednjega nivoja morja mareografa v Bakru, ki ga je izračunal *Geofizički institut v Zagrebu* iz meritev v obdobju od 1930 do 1938 za leto 1933.

Prvi podatek o višinski razliki med reperjem 5486 koprskega mareografa in vrhom vodomerne late izvira iz poročila iz februarja 1958 in skice nivelmanske izmere, ki je bila izdelana 26. 8. 1958. Na osnovi te izmere je bila določena nadmorska višina reperja 5486, ki je znašala 2,0356 m. Konstanta mareografa, ki predstavlja višinsko razliko med ničlo vodomerne late in vrhom reperja mareografa 5486 v Kopru, je bila 4,0356 m, kar pomeni, da je srednji nivo morja v vertikalnem datumu Bakar 1933 bil na 200,00 cm vodomerne late. Nadmorske višine reperjev na tem območju so bile do preračuna nivelmanske mreže v letu 2000 določene v višinskem datumu Bakar 1933.

### **Višinski datum Maglaj 1971**

Nivelmanska mreža II. reda je bila prvič navezana na normalni reper bivše SFRJ. Stabilizirali so ga v mestu Maglaj v Bosni in Hercegovini. Višinski datum II. NVN je bil določen na osnovi mareografskih opazovanj na mareografih vzdolž vzhodne Jadranske obale. Najstarejša sta mareografa v Bakru in Splitu, ki so ju postavili leta 1929. Po 2. svetovni vojni so zgradili še mareografe v Splitu na rtu Marjana (1952), v Dubrovniku (1954), v Rovinju (1955), v Kopru (1957) in Baru (1964). Srednji nivoji morja na posameznih mareografih so določeni za dan 3. 7. 1971 iz podatkov registracij nihanj nivoja morja od 1962,2 do 1980,8 (Bilajbegović, 1989).

### **Višinski datum evropske nivelmanske mreže UELN95**

Nivelmanska mreža II. NVN je bila vključena v evropsko nivelmansko mrežo UELN95, ki je navezana na normalni reper v Amsterdamu. Na območju Slovenije smo stabilizirali 11 reperjev in jim višine določili tudi v višinskem datumu Amsterdam, med njimi je bil tudi reper 5486 v Kopru, katerega višina je 1,5392 m.

### **Slovenski višinski sistem 2000 (SVS2000)**

Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS) je leta 1990 začela sanirati nivelmanske mreže. Za nivelmanske mreže višjih in nižjih redov, ki so stabilizirane na območju Slovenije, je bilo značilno, da niso bile nikoli izravnane kot celota. Večkratno preračunavanje nivelmanskih poligonov je povzročilo dvojne ali celo trojne višine identičnih reperjev, ki so se med seboj razlikovale. Probleme so rešili z izravnavo nivelmanske mreže Slovenije v letu 2000, ki so jo navezali na avstro-ogrski fundamentalni reper FR-1049. Ta se nahaja v bližini Ruš, ob železniški progi Maribor–Dravograd (slika 4). Višina reperja FR-1049 se nanaša na višinski datum Trst 1875. Nadmorske višine točk, ki jih danes uporabljamo v Sloveniji, so zato določene v višinskem datumu avstro-ogrške nivelmanske mreže.



## Višinski datum Koper 2010

Stari mareograf v Kopru so postavili leta 1957 in ga leta 2005 modernizirali s sodobno mareografsko opremo. Nahaja se na Ukmarjevem trgu, kjer je več desetletij stala stara mareografska postaja. Poleg spremljanja srednjega nivoja in temperature morja so danes na voljo tudi natančni meteorološki podatki (hitrost in smer vetra, zračni tlak, temperatura zraka in vlažnost) ter geodetska opazovanja (GNSS, gravimetrične meritve in geometrični nivelman).

Preglednica 1. Srednji nivoji nivelmanskih mrež Slovenije

Višinski datum			Srednji nivo morja (cm)	Razlika (cm)
Naziv	Določen	Iz niza opazovanj nihanj morja		
Trst	1875	1 leto	208,5	0
Bakar	1933	1930 –1938	200,0	8,5
Maglaj	3. 7. 1971	1962,2 –1980,8	215,2	– 6,7
Koper	10. 10. 2010	21.5.1997 – 31.12.2015	224,0	– 15,5
NAP	1995 (UELN95)	18,6 let	249,6	–41,1

Preglednica 1 vsebuje informacije o določitvi srednjih nivojev morja posameznih višinskih datumov nivelmanskih mrež na območju Slovenije. Višinska datuma Maglaj in Koper sta bila določena iz niza 18,6 –letnih opazovanj. Nivelmanske mreže na območju Slovenije, razen območje Kopra in dela Primorske, ki je bilo navezано na vertikalni datum Bakar, so navezane na višinski datum Trst (enoletna opazovanja). V višinskem datumu Maglaj so bile izračunane višine reperjev v II. nivelmanski mreži velike natančnosti (II. NVN), ki nikoli niso bile uradne nadmorske višine na območju Slovenije, saj se je Slovenija pred izračunom osamosvojila. Po preračunu nivelmanskih mrež leta 2000 so vse višine na območju Slovenije določene v Slovenskem višinskem sistemu 2000 (SVN2000) v višinskem datumu Trst 1875. Iz preglednice vidimo, da odstopanja glede na višinski datum Trst znašajo od 8,46 cm do –15,55 cm. To pomeni, da so z odstopanjem obremenjene vse nadmorske višine reperjev v nivelmanskih mrežah Slovenije.

### Zaključek

Iz zgoraj zapisanega vidimo pestro dogajanje pri določanju višinskega datuma nivelmanskih mrež Slovenije. Danes so uradne višine v Sloveniji določene v višinskem datumu Trst, ki je bil določen leta 1875 na osnovi enoletnih opazovanj nivoja morja na mareografu v Trstu. Številni raziskovalci so na osnovi različnih analiz ugotovili, da je bil srednji nivo morja v Trstu iz leta 1875 previsok od 6,1 cm do 18,5 cm.

V letu 1957 postavljen mareograf v Kopru so povezali v mrežo mareografov vzdolž vzhodne jadranske obale. Srednji nivo v Kopru je bil določen na osnovi srednjega nivoja morja na mareografu v Bakru za leto 1933. To pomeni, da so bile višine reperjev na območju Kopra določene v vertikalnem datumu Bakar 1933. Nivelmanska mreža II. NVN, ki je bila izmerjena v 70. letih prejšnjega stoletja in navezана na normalni reper v Maglaju, vendar višine v Sloveniji niso bile nikoli uradne višine v višinskem datumu Maglaj 1971.

Leta 2000 so bile višine reperjev nivelmanskih mrež na območju Slovenije preračunane v višinski datum Trst 1875, ki je bil na območju Slovenije realiziran z višino reperja FR 1049 v Rušah. Takrat so bile višine vseh reperjev na območju Slovenije prvič določene v enotnem višinskem datumu Trst 1875.

Po letu 2000 smo pričeli z novo izmero nivelmanske mreže 1. reda Slovenije. V projektu *Posodobitev prostorske podatkovne infrastrukture za zmanjšanje tveganj in posledic poplav*, ki ga je ob finančni podpori Finančnega mehanizma EGP 2009–2014 izvajala GURS s partnericama Norveško geodetsko upravo in Islandsko geodetsko upravo, je bil določen višinski datum Koper 2010, ki prvič predstavlja enotno slovensko izhodišče za določitev višin na območju Slovenije.

## Literatura

- Bilajbegović, A., 1989. Nivelman visoke točnosti Jugoslavije – svezak 1. Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za višu geodeziju, Zagreb, 3–4.
- Bilajbegović, A., Marchesini, C., 1991. Jugoslavenski vertikalni datumi i preliminarno povezivanje nove jugoslovenske nivelmanske mreže s austrijskom i talijanskom. Geodetski list (45), Zagreb, št. 7–9, 233–49.
- Koler, B., 1994. Vertikalni datumi nivelmanskih mrež Slovenije. Geodetski vestnik, let. 38, št. 1, 11–15.
- Stefanović, M., 1955. Normalni reper nivelmanske mreže. Geodetski list (9), št. 1–2, 3–14.
- Zeger, J., 1986. Historische Entwicklung des Präzisionsnivellements in Österreich. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen in Photogrammetrie (74), št. 4, 250–263.

# Je Obala res tektonsko aktivna? Tektonska geomorfologija potopljenih rečnih korit v Tržaškem zalivu

Ana Trobec<sup>\*</sup>, Andrej Šmuc<sup>\*</sup>, Sašo Poglajen<sup>\*\*</sup>, Marko Vrabc<sup>\*</sup>

**Ključne besede:** zapolnjena korita, podpovršinski sonar, pleistocen, holocen, aktivna tektonika

**Keywords:** buried channels, sub-bottom sonar, Pleistocene, Holocene, active tectonics

## Razširjeni povzetek

Tržaški zaliv se nahaja na skrajnem severovzhodnem delu Jadranskega morja na meji med Italijo, Slovenijo in Hrvaško. Predstavlja razmeroma plitev zaliv, njegove globine se gibljejo med 20 in 30 metri. Za obdobje zadnjega glacialnega viška je značilna 120-130 metrov nižja višina morske gladine od današnje, kar se je izražalo tudi v sedimentacijskih pogojih na raziskovanem območju, ki je v tem obdobju predstavljalo aluvialno ravnino rek Ter, Soče, Nadiže in Tilmenta (Marocco, 1989, 1991; Zecchin et al., 2015a). Območje Tržaškega zaliva je morje začelo zalivati v holocenu, pri čemer je glavnino zaliva morje prekrilo pred približno 10,000 leti (Ogorelec et al., 1981, 1997; Covelli et al., 2006; Zecchin et al., 2015a). Od takrat se v zalivu odlaga plitvomorski klastični sediment, ki prekriva in domnevno izravnava pleistocensko kontinentalno paleotopografijo. Visokoločljive batimetrične raziskave pa so pokazale, da so v morskem dnu vidne zasute geomorfološke oblike, ki bi jim lahko pripisali nastanek v kontinentalnem sedimentacijskem okolju (Slavec, 2012). V naši raziskavi se osredotočamo na dve izmed teh geomorfoloških oblik, na Paleorižano in Paleoreko.

Čeprav velja Tržaški zaliv za seizmično razmeroma neaktivno območje (Di Bucci & Angeloni, 2013), je v zadnjih letih bilo objavljenih več del, ki na podlagi sedimentoloških in arheoloških indikatorjev ter geodetskih meritev ugotavljajo vertikalne premike v rangu do milimetra na leto (Rižnar et al., 2007; Antonioli et al., 2009; Furlani et al., 2011; Surić et al., 2014; Zampa et al., 2015; Biolchi et al., 2016; Trobec et al., 2016). Aktivno tektoniko dokazujejo tudi tektonske strukture, ki deformirajo kvartarni sediment Tržaškega zaliva (Romeo, 2009; Busetti et al., 2010b). Obala Tržaškega zaliva predstavlja močno industrializirano in gosto poseljeno območje, zato je dobro poznavanje aktivnosti tektonskih struktur in stopnje deformacij na podlagi geoloških in geomorfoloških podatkov izjemnega pomena za določevanje potresne nevarnosti. S holocenskimi sedimenti prekrute pleistocenske geomorfološke oblike so bile v zadnjih 10.000 letih sedimentološko razmeroma stabilne, zato predstavljajo uporabno orodje za prepoznavanje in kvalitativno določanje potencialne holocenske tektonske aktivnosti.

---

<sup>\*</sup> Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo, Privoz 11, 1000 Ljubljana

<sup>\*\*</sup> Harpha Sea d. o. o., Čevljarska ulica 8, 6000 Koper

Geološko podlago v Tržaškem zalivu predstavljata mezojsko-kenozojski karbonati in eocenski fliš, ki sestavljata tudi večji del obale (Placer et al., 2010; Carulli, 2011; Placer, 2015; Jurkovšek et al., 2016). Mezozojsko-eocenska sekvenca je prekrita z več sto metri plio-pleistocenskega sedimenta mešanega kontinentalno-morskega izvora, ki se je odlagal v transgresijsko-regresijskih ciklih (Buseti et al., 2010a; Carulli, 2011; Vrabcet et al., 2014). Najmlajše sedimentno zaporedje predstavlja holocenski sediment, ki se odlaga zadnjih 10.000 let od pričetka holocenske transgresije (Ogorelec et al., 1981, 1997; Lambeck et al., 2004; Covelli et al., 2006; Zecchin et al., 2015b). Za vzhodne obale zaliva je značilna naluskana zgradba z glavnimi prelomnimi sistemi v smeri SZ-JV in manjšimi prečnimi strukturami (Placer et al., 2010; Carulli, 2011; Placer, 2015; Biolchi et al., 2016; Jurkovšek et al., 2016), ki je nastala kot posledica eocensko-oligocenskega narivanja proti JZ in kasnejšega miocenskega podpiranja Istre pod Zunanje Dinaride (Placer et al., 2010).

Naša raziskava temelji na 64 profilih podpovršinskega sonarja (cca. 120 km), ki smo jih zajeli s plovilom Lyra (v lasti Harpha Sea d. o. o.). Za zajem smo uporabili podpovršinski sonar Innomar Parametric Sediment Echo Sounder SES-2000 Compact subb-bottom sonar pri oddajnih frekvencah 6 ali 8 kHz. Dodatno smo uporabili izseke iz natisnjenih sonarskih profilov, ki jih je leta 1998 v Koprskem zalivu zajela ameriška mornarica na krovu USS Littlehales (T-AGS 52). Parametri zajema te podatkovne zbirke niso znani. Batimetrični model v ločljivosti 10 m x 10 m (Slavec, 2012) je bil izdelan iz podatkov večsnopnega in enosnopnega sonarja. Podatki večsnopnega sonarja so bili zajeti na krovu Lyre z Reson SeaBat 8125 sonarjem pri frekvenci 455 kHz, podatki enosnopnega sonarja pa so bili zajeti z gumenjakom z Elac Hydrostar 4300 sonarjem pri čemer je frekvenca oddajanja znašala 50 ali 200 kHz (Slavec, 2012).

V naši raziskavi smo se osredotočili na s holocenskim sedimentom prekriti geomorfološki obliki Paleorižane in Paleoreke, pri čemer smo uporabljali digitalni model morfologije morskega dna in profile podpovršinskega sonarja. Paleorižano smo interpretirali kot meandrski pas na poplavni ravnici, pri čemer smo iz reliefa morskega dna prepoznali značilne geomorfološke oblike, kot so opuščeni rečni kanali, mrtvice in meandrski preseki. Odboji iz podpovršinskih profilov v območju poplavne ravnice nakazujejo na laminirane drobnozrnate sedimente odložene v sedimentacijskem okolju srednje energije, kar je značilno tudi za nekohezivne poplavne ravnice srednje energije (cf. Nanson and Croke, 1992; cf. Veeken, 2007). Paleoreka je v reliefu morskega dna vidna kot rahlo valovito korito z izrazitimi nasipi, ki se dvigajo nekaj metrov nad poplavno ravnico. Na batimetričnem modelu in na profilih podpovršinskega sonarja na raziskovanem območju nismo opazili opuščenih korit, zato smo Paleoreko interpretirali kot bočno stabilno rečno korito, pri katerem je prevladovala sedimentacija z vertikalnim priraščanjem. Okoliški sedimenti poplavne ravnice nakazujejo, da Paleoreka predstavlja rečni sistem enega korita znotraj nizkoenergijske poplavne ravnice (cf. Nanson and Croke, 1992). Obe rečni telesi sta prekriti z nekaj metri holocenskega morskega sedimenta, zato predpostavljamo, da nista mlajši od 10.000 let.

Paleoreka se razteza približno pravokotno na glavne prelomne sisteme, ki so bili prepoznani v slovenski Istri in se nadaljujejo v zaliv (Buseti et al., 2010b; Placer et al., 2010; Vrabcet et al., 2014). Obenem je v obdobju po zadnji holocenski transgresiji sedimentološko razmeroma stabilna in tako predstavlja izvrsten potencialen geomorfološki tektonski indikator. V naši raziskavi smo uporabili globine zasute koritnice, ki smo jih določili iz profilov podpovršinskega sonarja na 31 lokacijah, kjer so prečkali korito. Višinska razlika koritnice na odseku v dolžini 15 km med prvo in zadnjo lokacijo znaša 5 metrov, pri čemer povprečen gradient med sosednjima lokacijama znaša 0.7 m/km. Prečni profil višin koritnice ne izkazuje

izrazitih skokov in ni skladen s predvidenim relativnim spustom v Koprskem zalivu v velikosti približno 10 m, ki bi na podlagi hitrosti vertikalnih premikov (Rižnar et al., 2007) nastal v 10.000 letih. Ker geodetsko določeni premiki niso izraženi v dolgoročnem sedimentnem zapisu, predpostavljamo, da izražajo kratkoročno seizmično deformacijo. Oblika krivulje vertikalnih premikov (Rižnar et al., 2007) spominja na obliko deformiranega površja nad zataknenim narivom, kot jo predvideva elastična dislokacijska teorija (Okada, 1985; Matsu'ura & Sato, 1989). Iz lokacij prevojev na krivulji vertikalnih premikov predvidevamo, da premike povzročata Svetokriški ali Buzetski nariv.

## Zahvale

Raziskava je bila financirana iz raziskovalnega projekta L1-5452 "Uporaba sonarja v raziskavah aktivne tektonike in paleoseizmologije na ozemljih z nizko intenzivnostjo deformacij", ki sta ga sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in podjetje Harpha Sea d.o.o. Za gostoljubje se zahvaljujemo posadki Lyre. Zahvaljujemo tudi Ameriški mornarici in Geodetskemu Inštitutu Slovenije, ki sta nam omogočila dostop do natisnjenih sonarskih profilov iz snemanja iz leta 1998.

## Literatura

- Antonioli, F., Ferranti, L., Fontana, A., Amorosi, A., Bondesan, A., Braitenberg, C., Dutton, A., Fontolan, G., Furlani, S., Lambeck, K., Mastronuzzi, G., Monaco, C., Spada, G., Stocchi, P., 2009. Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian and Istrian coastlines. *Quat. Int.* 206, 102–133. doi:10.1016/j.quaint.2008.11.008
- Biolchi, S., Furlani, S., Covelli, S., Busetti, M., Cucchi, F., 2016. Morphoneotectonics and lithology of the eastern sector of the Gulf of Trieste (NE Italy). *J. Maps* 12, 936–946. doi:10.1080/17445647.2015.1099572
- Busetti, M., Volpi, V., Barison, E., Giustiniani, M., Marchi, M., Ramella, R., Wardell, N., Zanolla, C., 2010a. Meso-Cenozoic seismic stratigraphy and the tectonic setting of the Gulf of Trieste (northern Adriatic). *GeoActa SP 3* 1–14.
- Busetti, M., Volpi, V., Nicolich, R., Barison, E., Romeo, R., Baradello, L., Brancatelli, G., Giustiniani, M., Marchi, M., Zanolla, C., Wardell, N., Nieto, D., Ramella, R., 2010b. Dinaric tectonic features in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea). *Boll. di Geofis. Teor. ed Appl.* 51, 117–128.
- Carulli, G.B., 2011. Structural model of the Trieste Gulf: A proposal. *J. Geodyn.* 51, 156–165. doi:10.1016/j.jog.2010.05.004
- Covelli, S., Fontolan, G., Faganeli, J., Ogrinc, N., 2006. Anthropogenic markers in the Holocene stratigraphic sequence of the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea). *Mar. Geol.* 230, 29–51. doi:10.1016/j.margeo.2006.03.013
- Di Bucci, D., Angeloni, P., 2013. Adria seismicity and seismotectonics: Review and critical discussion. *Mar. Pet. Geol.* 42, 182–190. doi:10.1016/j.marpetgeo.2012.09.005
- Furlani, S., Biolchi, S., Cucchi, F., Busetti, M., Melis, R., 2011. Tectonic effects on Late Holocene sea level changes in the Gulf of Trieste (NE Adriatic Sea, Italy). *Quat. Int.* 232, 144–157. doi:10.1016/j.quaint.2010.06.012
- Jurkovšek, B., Biolchi, S., Furlani, S., Kolar-Jurkovšek, T., Zini, L., Jež, J., Tunis, G., Bavec, M., Cucchi, F., 2016. Geology of the Classical Karst Region (SW Slovenia–NE Italy). *J. Maps* 1–12. doi:10.1080/17445647.2016.1215941
- Lambeck, K., Antonioli, F., Purcell, A., Silenzi, S., 2004. Sea-level change along the Italian coast for

- the past 10,000 yr. *Quat. Sci. Rev.* 23, 1567–1598. doi:10.1016/j.quascirev.2004.02.009
- Marocco, R., 1991. Evoluzione tardopleistocenica-olocenica del delta del F. Tagliamento e delle Lagune di Marano e Grado (Golfo di Trieste). *Quat.* 1b, 223–232.
- Marocco, R., 1989. Evoluzione quaternaria della Laguna di Marano (Friuli-Venezia Giulia). *Quat.* 2, 125–137.
- Matsu'ura, M., Sato, T., 1989. A dislocation model for the earthquake cycle at convergent plate boundaries. *Geophys. J. Int.* 96, 23–32. doi:10.1111/j.1365-246X.1989.tb05247.x
- Nanson, G.C., Croke, J.C., 1992. A genetic classification of floodplains. *Geomorphology* 4, 459–486. doi:10.1016/0169-555X(92)90039-Q
- Ogorelec, B., Faganeli, J., Mišič, M., Čermelj, B., 1997. Reconstruction of paleoenvironment in the Bay of Koper (Gulf of Trieste, Northern Adriatic). *Annales* 11, 187–200.
- Ogorelec, B., Mišič, M., Šercelj, A., Cimerman, F., Faganeli, J., Stegnar, P., 1981. Sediment of the salt marsh of Sečovlje. *Geologija* 24, 180–216.
- Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 75, 1135–1154.
- Placer, L., 2015. Simplified structural map of Kras Kras (Slovene), Carso (Italian) = Geographical unit. *Geologija* 58, 89–93. doi:10.5474/geologija.2015.008
- Placer, L., Vrabec, M., Celarc, B., 2010. The bases for understanding of the NW Dinarides and Istria Peninsula tectonics. *Geologija* 53, 55–86. doi:10.5474/geologija.2010.005
- Rižnar, I., Koler, B., Bavec, M., 2007. Recent activity of the regional geologic structures in western Slovenia. *Geologija* 50, 111–120. doi:10.5474/geologija.2007.009
- Romeo, R., 2009. Studio geofisico integrato ad alta risoluzione dei depositi marini e della struttura del substrato della Riviera di Miramare (Golfo di Trieste). University of Trieste.
- Slavec, P., 2012. Analiza morfologije morskega dna slovenskega morja. University of Ljubljana.
- Surić, M., Korbar, T., Juračić, M., 2014. Tectonic constraints on the late Pleistocene-Holocene relative sea-level change along the north-eastern Adriatic coast (Croatia). *Geomorphology* 220, 93–103. doi:10.1016/j.geomorph.2014.06.001
- Trobec, A., Šmuc, A., Poglajen, S., Vrabec, M., 2016. Buried MIS 5 abrasion platforms in the Bay of Koper (Gulf of Trieste, Northern Adriatic) confirm long-term subsidence of the Northern Adriatic region, in: European Geosciences Union, General Assembly 2016, Vienna, Austria, 17-22 April 2016 : Geophysical Research Abstracts. European Geosciences Union, München, p. 11963.
- Veeken, P.C.H., 2007. Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterisation. Elsevier.
- Vrabec, M., Busetti, M., Zgur, F., Facchin, L., Pelos, C., Romeo, R., Sormani, L., Slavec, P., Tomini, I., Visnovic, G., Žerjal, A., 2014. Refleksijske seizmične raziskave v slovenskem morju SLOMARTEC 2013, in: Kuhar, M., Čop, R., Gosar, A., Kobold, M., Kralj, P., Malačič, V., Rakovec, J., Skok, G., Stopar, B., Vreča, P. (Eds.), *Raziskave S Področja Geodezije in Geofizike 2013*. University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, pp. 97–101.
- Zampa, L.S., Busetti, M., Furlani, S., Baradello, L., Romeo, R., 2015. Evidence of neo-tectonic tilting in the Gulf of Trieste, in: Furlani, S., Antonioli, F., Anzidei, M., Busetti, M., Ferranti, L., Mastronuzzi, G., Orrù, P. (Eds.), *Proceedings : GeoSUB - Underwater Geology, Trieste, 13-14 October 2015*. Trieste, pp. 72–73.
- Zecchin, M., Ceramicola, S., Lodolo, E., Casalbore, D., Chiocci, F.L., 2015a. Episodic, rapid sea-level rises on the central Mediterranean shelves after the Last Glacial Maximum: A review. *Mar. Geol.* 369, 212–223. doi:10.1016/j.margeo.2015.09.002
- Zecchin, M., Gordini, E., Ramella, R., 2015b. Recognition of a drowned delta in the northern Adriatic Sea, Italy: Stratigraphic characteristics and its significance in the frame of the early Holocene sea-level rise. *The Holocene* 25, 1027–1038. doi:10.1177/0959683615575358

# Objektivna opredelitev podnebnih regij Slovenije

Katja Kozjek<sup>\*</sup>, Mojca Dolinar<sup>\*</sup>, Gregor Skok<sup>\*\*</sup>

## Povzetek

V študiji smo karseda objektivno, samo z uporabo podnebnih podatkov in s statističnimi metodami razvrščanja v skupine, določili podnebne regije Slovenije. Uporabljeni so bili podnebni podatki v pravilni mreži za zadnje tridesetletno referenčno obdobje 1981-2010. S predhodno analizo podatkov smo določili ključne podnebne spremenljivke na podlagi katerih smo opredelili podnebne regije. Razvrščanje smo izvedli s kombinacijo dveh statističnih metod. Najprej smo na podatkih izvedli faktorsko analizo, ki ji je sledilo razvrščanje v skupine po metodi voditeljev. Ugotovili smo, da na območju Slovenije najbolj smiselno in reprezentativno razvrstitev predstavlja razvrstitev v šest podnebnih skupin oz. regij. S takšno razvrstitvijo dobimo primorsko regijo, zelo namočeno regijo severozahodnega dela dinarsko-alpske pregrade, dvignjeno regijo dinarsko-alpskega sveta, regijo visokogorja, suho regijo nižinskega sveta vzhodne in osrednje Slovenije ter višjo in malo bolj namočeno regijo osrednje Slovenije. Za te podnebne regije smo predlagali naslednja imena: omiljeno sredozemsko podnebje, vlažno podnebje hribovitega sveta, omiljeno gorsko podnebje, gorsko podnebje, omiljeno celinsko podnebje ter zmerno podnebje hribovitega sveta.

**Ključne besede:** podnebje, podnebne regije, faktorska analiza, razvrščanje v skupine, metoda voditeljev

**Keywords:** climate, climate classification, factor analysis, k-means clustering

---

<sup>\*</sup> Agencija RS za okolje, Ministrstvo za okolje in prostor

<sup>\*\*</sup> Fakulteta za Matematiko in Fiziko, Univerza v Ljubljani