

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko

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

RAZISKAVE S PODROČJA GEODEZIJE IN GEOFIZIKE 2012

zbornik predavanj

18. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 29. januar 2013

ORGANIZACIJSKI ODBOR

Miran Kuhar
Bojan Stegenšek
Janez Goršič

UREDNIŠKI ODBOR

Miran Kuhar

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 (18 ; 2013 ; Ljubljana)

Raziskave s področja geodezije in geofizike 2012 : zbornik predavanj / 18. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 29. januar 2013 ; [organizator srečanja Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo ; uredniški odbor Miran Kuhar]. - Ljubljana : Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2013

ISBN 978-961-6884-11-2

1. Gl. stv. nasl. 2. Kuhar, Miran 3. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (Ljubljana)
264931840

Predgovor

Prvo strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko SZGG je bilo decembra 1995: takrat je izšel tudi prvi zbornik predavanj ki je na 129 straneh predstavil Zgodovino slovenske geodezije in geofizike (uredniški odbor Janez Lapajne in sod., COBISS.SI-ID 56354304). Počasi so se datumi srečanj SZGG premaknili iz decembra v januar, pa tudi tematike strokovnih predavanj so se prijavljale k sodobnim, aktualnim temam. In tako je sedaj pred nami že 18. zbornik, ki prinaša prispevke skoraj vseh sekcij združenja

Velika večina prispevkov je tako ali drugače povezanih z vodo: ob vodi se srečujejo predvsem hidrogeologi, geologi in meteorologi: s prispevki o globalnih bilancah vode na Zemlji, z meritvami in obdelavami količine padavin in količine vode v vodotokih, s prispevkom o tem, kako lahko določamo površine, pokrite z vodo v "lepi" obliki (sneg) in kako neprijetna nadloga utegne biti drugačna oblika vode (poplave, toča), kaj vse nam lahko pove njena izotopska sestava ter kako lahko procesi kondenzacije vode v ozračju (ob nevihtah) vplivajo na nekatere geofizikalne meritve. No, nekaj pa je tudi prispevkov, ki niso neposredno povezani z vodo: o transportu in disperziji primesi v ozračju, o mikroklimi jamskih prostorov ter o spremembah v troposferi, ki med drugim "motijo" tudi signale GNSS – a jih prav preko teh motenj lahko tudi zaznavamo.

Podobno kot v preteklih zbornikih lahko ugotovimo tudi letos, da člani člani SZGG seveda objavljamo tudi v mednarodnih, strogo recenziranih revijah in na konferencah. Naši člani so dejavni tudi glede poljudnega obveščanja javnosti, dosegli pa so tudi marsikatero javno priznanje. Ali se sploh še spodobi (že tretjič) zapisati „Bera je kar lepa in kaže nam pot naprej!“? Verjetno da – ker je res!

predsednik SZGG

Prof . dr. Jože Rakovec

Vsebina

Predgovor	3
M. Brenčič - Bilanca vode na Zemlji	7
P. Vreča, M. Brenčič, I. Sinjur, G. Vertačnik, M. Volk, J. Ortar, A. Torkar, V. Stibilj, M. Pavšek - Izotopska sestava padavin in snega na območju Julijskih Alp in Karavank	17
B. Breznik, P. Mlakar, M. Z. Božnar, B. Grašič - Modeliranje možnih nezgodnih izpustov iz NE Krško z Lagrangeevim modelom delcev	27
G. Dolšak, M. Šraj - Izdelava Huffovih krivulj in njihova analiza za izbrane padavinske postaje v Sloveniji	35
N. Bezak, M. Brilly, M. Šraj - Izbira metode pri verjetnostni analizi visokovodnih konic	45
G. Skok, B. Strajnar, J. Rakovec - Analiza toče v Sloveniji z uporabo radarskih podatkov: karta pogostosti, analiza trajektorij in uspešnost modelske napovedi	57
S. Šebela, J. Turk - Značilnosti temperature zraka v Predjamskem jamskem sistemu	67
M. Triglav Čekada, M. Klanjšček, M. Zorn - Preučevanje poplav novembra 2012 na podlagi nemerskih posnetkov z vključevanjem javnosti	75
M. Triglav Čekada, V. Bric, M. Klanjšček, B. Barborič, M. Pavšek - Zračno lasersko skeniranje zasneženega površja	85
S. Berk, K. Bajec, D. Radovan - Spremljanje ionosferskih motenj nad Slovenijo s pomočjo omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL	95
R. Čop, G. Milev, D. Deželjin - Vpliv neviht na geomagnetne meritve na Gori nad Ajdovščino	105
J. Kogovšek - Vpliv sušnih razmer na kakovost kraških vodnih virov (primer izvira Malenščice)	111

Bilanca vode na Zemlji

Mihael Brenčič*

Povzetek

Zemlja je planet, katerega razvoj je v veliki meri vezan na pojavljanje vode. Ta je vplivala tako na razvoj življenja, kot tudi na geološki razvoj kontinentov in morskega dna. Voda na Zemlji neprestano kroži, vendar to kroženje ni vezano zgolj na kroženje na površju v hidrosferi, temveč prihaja tudi do izmenjave vode med površino in Zemljino notranjostjo. Na kratko sta opisana plitvi in globoki vodni krog Zemlje ter globalni krog, ki ga tvorita oba skupaj, hkrati s tem pa so podane njihove osnovne bilančni značilnosti in zadrževalni časi vode v pomembnejših podsistemi globalnega vodnega kroga.

Ključne besede: globalna vodna bilanca, plitvi vodni krog, globoki vodni krog

Key words: global water balance, shallow water cycle, deep water cycle

Uvod

Voda je spojina, ki v veliki meri opredeljuje Zemljo, od nastanka in razvoja življenja na njej, pa vse do vpliva na geofizikalne procese. Prav tako je voda ključna za preživetje človeštva, pri tem igra številne pomembne vloge, od fizioloških, higienskih do socioekonomskih, česar se kot družba premalo zavedamo. Zaradi pomena vode za številne segmente družbe z njo poskušamo upravljati, da pa bi to lahko čim bolj učinkovito počeli, moramo poznati njene količine ter njeno pojavljanje v času in prostoru. Vse to lahko zajamemo s pojmom vodna bilanca, ki je eno od osrednjih zanimanj tako znanstvenih ved, ki se ukvarjajo z vodo, kot tudi inženirsko strok. Vodno bilanco, odvisno od potreb, izračunavamo v različnih časovnih in prostorskih merilih. Tako poznamo globalno vodno bilanco, vodno bilanco na ravni posameznih političnih in gospodarskih združenj ali pa na ravni držav ali celo pokrajin. Pri podrobnejših analizah se vodne bilance lotevamo tudi v posameznih porečjih ali povodjih ali pa v posameznih prokrajinskih enotah. Toda vse te vodno bilančne izračune temeljimo predvsem na tistem delu vodnega kroga, ki je viden, ki ga lahko merimo ali zaznavamo kako drugače. To so na primer površinska vodna telesa, atmosferska voda ali voda v vodonosnikih. Zelo malo ali skoraj nič pa ne vemo o tem, kako je z vodo v globljih predelih Zemlje.

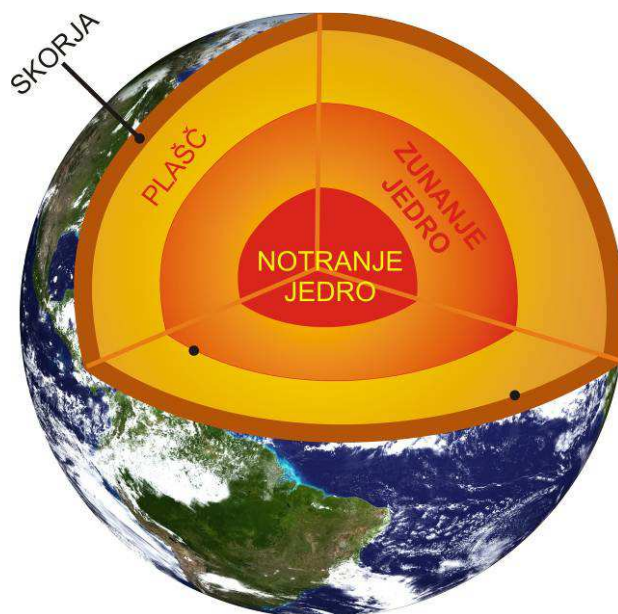
Prav zaradi tega v zadnjem času v znanstveni literaturi naletimo na objave, ki se intenzivno ukvarjajo z vodno bilanco v globljih predelih Zemlje in s tem z vtokom in iztokom vode pri subdukcijskih ter divergentnih procesih tektonike plošč. Razumevanje teh procesov ima pomembne posledice pri razumevanju razvoja in nastanka Zemlje, vse od nastanka z akrecijo pa do vzpostavitve delovanja tektonike plošč ter vseh posledic, ki izhajajo iz tega. Podroben premislek pokaže, da je globalni vodni krog sestavljen iz površinskega ali plitvega vodnega kroga, ki je običajno predmet raziskav v hidrologiji in globokega vodnega kroga, ki je vezan na tektoniko plošč, procese v plašču in v jedru. Namen prispevka je na kratko prikazati vodno bilančne značilnosti globalnega vodnega kroga, ki ga razumemo kot vsoto plitvega in globokega vodnega kroga. Besedilo prispevka

* Oddelek za geologijo, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 12, 1000 Ljubljana, in Oddelek za hidrogeologijo, Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana

temelji na poznavanju literature in na samostojnih premislekih v zvezi z odprtimi vprašanji vezanimi na zgodovino vodnega kroga in na dolgo časovno spremenljivost vodne bilance Zemlje.

Struktura Zemlje

Pri razumevanju globalnega vodnega kroga je pomembno poznavanje globalne strukture Zemlje in delovanje tektonike plošč. Zemlja je v notranjosti sestavljena iz treh glavnih delov, ki jih obravnavamo tudi kot lupine (Slika 1). V zgornjem delu imamo opraviiti s skorjo, navzdol ji sledi plašč, nato pa jedro. Mase posameznih lupin so predstavljene v Preglednici 1. Ti trije glavni deli pa seveda niso homogeni.



Slika 1. Shematski prikaz lupinaste strukture Zemlje (skica ni v merilu)

Skorja predstavlja le 0,5% celotnega premera Zemlje, v primerjavi z globljimi predeli je najboljše preiskana, z razvojem geoloških znanosti pa smo dosegli tudi visoko stopnjo poznavanja geoloških procesov, ki jo preoblikujejo. Sestavljena je iz gostejše oceanske skorje, ki je debela od 5 do 10 km in nekoliko redkejša kontinentalne skorje, ki dosega večje globine, njena debelina znaša v povprečju 35 km, v predelih pod obsežnimi gorstvi pa sega tudi do 70 km globoko. Skorjo od toge litosfere loči Mohorovičičeva diskontinuiteta. Pod skorjo sledi toga litosfera, ki že predstavlja del Zemljinega plašča. Debelina litosfere je pod oceani 100 km, pod kontinenti pa je njena debelina v razponu od 100 do 200 km. Navzdol se litosfera nadaljuje v astenosfero. Skorjo in litosfero sestavlja 7 velikih plošč in številne makro in mikro plošče. Vse plošče se zaradi kroženja magme v plašču premikajo v različnih smereh in z različnimi hitrostmi zaradi česar se na njihovih stikih ustvarjajo kompleksne geološke razmere. Tako poznamo konvergentne stike, divergentne stike in zdrsne stike tektonskih plošč. Na konvergentnih stikih prihaja do podpiranja plošče z večjo gostoto pod ploščo z nižjo gostoto, takemu stiku pravimo subdukcija. Na območju divergentnih stikov prihaja do razmikavanja plošč. Večina teh stikov se nahaja na oceanskem dnu in predstavlja obsežna območja srednjeoceanskih grebenov. Poleg podpiranja in razpiranja plošč prihaja tudi do zdrsa med ploščami, najbolj znan primer je prelom Svetega Andreja na zahodu Združenih držav Amerike.

V primerjavi s skorjo plašč in jedro izgledata na videz bolj homogena, procesi, ki tečejo v notranjosti pa monotonejši. Vendar je takšno gledanje na globoko Zemljino notranjost prej posledica pomanjkanja podatkov, kot pa enostavnosti procesov. Da temu verjetno ni tako, napeljuje kompleksnost skorje.

Plašč razdelimo na tri glavne dele. Ta razdelitev je v prvi vrsti rezultat natančnih seizmičnih meritev in fizikalno kemijskega modeliranja in eksperimentiranja. Ker nekaterih anomalij v plašču ni mogoče razložiti le na podlagi faznih sprememb, je v razlago potrebno vključiti tudi mineraloške vzroke. Tako današnja tridelna razdelitev plašča temelji na interpretaciji prehodov med različnimi mineralni. Zgornji plašč se nahaja med Mohorovičičevo diskontinuiteto in naslednjo prvo veliko seizmično diskontinuiteto na globini okoli 410 km. Zgornji del plašča je pretežno sestavljen iz kamnin, ki jih imenujemo peridotiti. V njihovi sestavi prevladujeta minerala olivin in piroksen. V manjši meri v tem predelu nastopajo tudi eklogiti, ki jih sestavljajo minerali granati in pirokseni. (Koch, 2003) Nezveznost na globini 410 km je vezana na prehod z magnezijem bogatega olivina v mineral wadsleyit. Sprememba je vezana predsvem na tlačne razmere. Prehod je postopen in se dogodi na intervalu dolžin od 4 km do 20 km in pri temperaturah, ki so ocenjene na interval od 1400 do 1700°C. Pri prehodu iz olivina v wadsleyit se gostota poveča za 8%. (Ringwood, 1991; Flanagan & Shearer, 1998). Pomembna ugotovitev mineraloških raziskav pri visokem tlaku je, da wadsleyit lahko vsebuje do 3,3 ut% vode, kar je več kot olivin.

Preglednica 1. Mase posameznih lupin Zemlje (McDonough, 2004)

	Masa [kg]	Delež mase [%]
Skorja	1,55E+21	0,026
Plašč	4,04E+24	67,65
Zunanje jedro	1,84E+24	30,71
Notranje jedro	9,68E+22	1,62
Zemlja - skupaj	5,98E+24	

Naslednja velika seizmična nezveznost nastopa na globini 660 km. Območje med obema nezveznostima imenujmo območje prehoda. Območje prehoda vsebuje tudi manjšo nezveznost na globini 520 km. Na tej globini in pri temperaturah okoli 1500°C se wadsleyit pretvori v strukturo minerala špinel imenovano tudi γ -faza ali ringwoodit. Ta nezveznost je slabše izražena in se pojavlja na daljšem intervalu kot prva, v tem predelu gostota naraste za 2 % (Shearer, 1990, 1996). Nezveznost na globini 660 km je posledica disproporcionacijske reakcije med ringwooditom $[(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{SiO}_4]$ v perovskit $[(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3]$ in $(\text{Mg},\text{Fe})\text{O}$ periklaz pri temperaturi 1600°C. Prehod na tej globini je oster, do sprememb pride le na dolžini 4 km, gostota pa naraste za 11%. (Ringwood, 1991) Spodnji del plašča vsebuje najobsežnejši predel od globine 660 km pa vse do jedra.

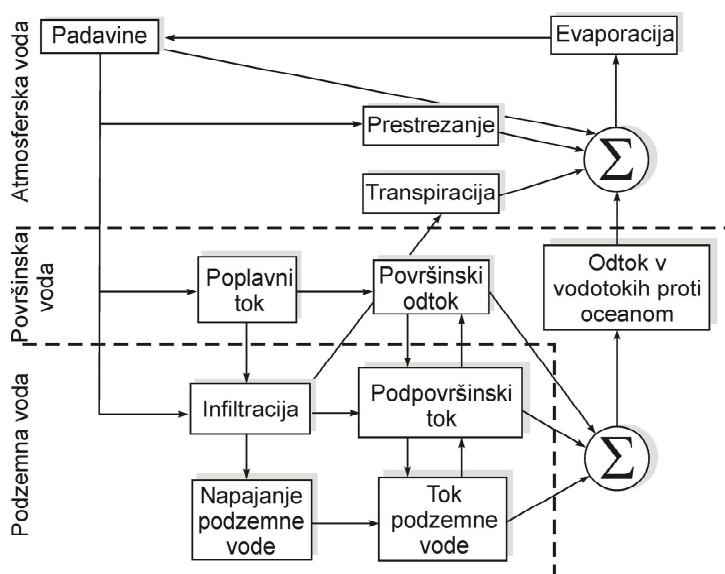
Zaradi nepravilne oblike Zemlje kot celote in procesov zgodnje diferenciacije po akreciji, je neenakomeren tudi prehod iz plašča v jedro. Ta predel je v seizmologiji označen tudi kot območje D" ali CMB (ang. core mantle boundary). Debelina tega območja se giblje od 200 do 250 km in je zelo nepravilna (Campbell & O'Neill, 2012). Območje prehoda iz plašča v jedro je vezano na prehod iz minerala perovskita v mineral posperovskit in je izrazito nehomogeno, kar se kaže v odboju seizmičnih valov. Meja med jedrom in plaščem se nahaja na globini 2891 ± 5 km, kar pomeni, da je premer jedra 3483 ± 5 km (Lister, 2008; Aubert et al., 2008). Tudi jedro ni homogeno, razdeljeno je na tri dele. Zunanji del jedra ima manjšo gostoto, kot je bi pričakovali na podlagi predpostavke, da je sestavljeno iz utekočinjenega niklja in železa. Ta razlika je verjetno posledica prisotnosti

lahkohlapnih elementov, vendar pa se ocene o njihovem deležu in kombinacijah zelo razlikujejo. Ta del jedra je pod vplivom magneto telurskih tokov v turbulentnem režimu, ki so odgovorni za zemljino magnetno polje (Lister, 2008; Aubert et al., 2008). Notranje jedro ima premer 1220 ± 10 km. Novejši seizmični podatki kažejo, da je tudi notranje jedro nehomogeno. Seizmični modeli nakazujejo na razlike v mehanskih lastnostih med vzhodno in zahodno hemisfero jedra, do premera 600 km je vzhodna hemisfera plastovita, zahodna pa ne. Ta predel nekateri raziskovalci imenujejo tudi notranje notranje jedro (ang. inner inner core).

Globalni vodni krog

Kroženje vode na Zemlji razdelimo na plitev in na globok vodni krog, ki skupaj tvorita globalni vodni krog. Plitvi vodni krog je dobro poznan in njegov prikaz najdemo skoraj v vsakem splošnem geografskem in hidrološkem učbeniku. Zato plitvega vodnega kroga na tem mestu ne bomo opisovali podrobneje. Primer konceptualnega modela plitvega vodnega kroga je prikazan na Sliki 2.

Plitvi vodni krog obravnavamo kot sistem, ki je sestavljen iz treh velikih podsistemov, to je podsistemov atmosferske, površinske in podzemne vode. V teh podsistemih so prisotne posamezne podkomponente, katerih opis in sistematizacija sta v veliki meri odvisna od koncepta in načina kako natančno želimo obravnavati vodni krog. Osnovna značilnost plitvega vodnega kroga je ta, da so posamezni podsistemi in njihove komponente med seboj povezani v povratnih zankah, med katerimi poleg prenosa mase oziroma količin vode, poteka tudi prenos energije.



Slika 2. Shematski prikaz plitvega vodnega kroga

V plitvem vodnem krogu si velja ogledati tudi količine po posameznih podkomponentah. Te so zbrane v Preglednici 2. Zaradi primerjave podatkov z vodo v notranjosti Zemlje, je poleg volumna podan tudi preračun mase. Daleč največjo maso predstavljajo oceani, ki predstavljajo kar 96,5% celotne mase vode v plitvem vodnem krogu. Drug najpomembnejši rezervoar vode predstavljajo ledeniki, sledijo pa jim podzemne vode, v katere so zajete tako sladke podzemne vode, kot tudi slanice. Pri oceni slednje nastopa nekaj težav, saj ni jasno ali je to voda, ki bilančno že pripada litosferi in s tem

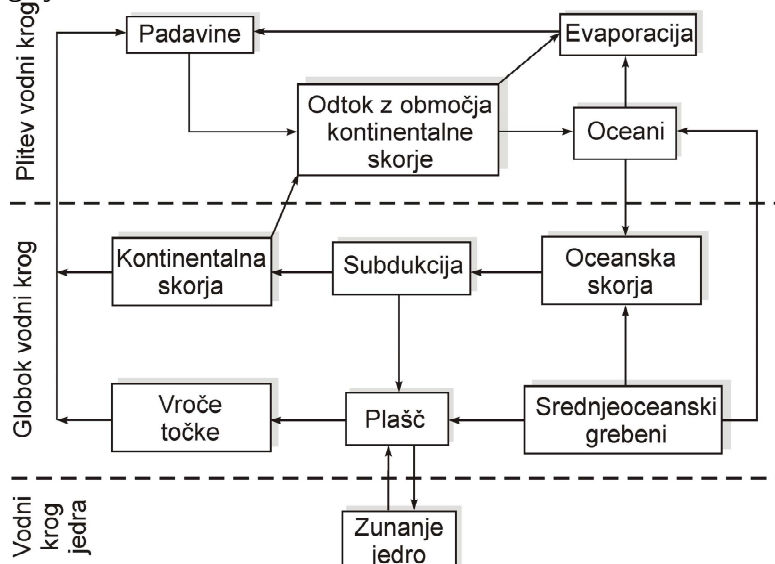
plašču, ali pa je to le voda, ki se nahaja v skorji. Celotna masa vode v plitvem vodnem krogu predstavlja le 0,23 ‰ celotne mase Zemlje.

V vsakdanjem življenju in praksi najlažje zaznavamo površinske vodotoke in njihov pretok. Celotni volumen vode v rekah znaša le 2120 km³, celoten letni pretok pa je mnogo večji in na globalni ravni za bilančno obdobje od 1958 do 2001 znaša 36812 km³/leto (van Beek et al., 2011).

Preglednica 2. Prikaz vodne bilance plitvega vodnega kroga (po Chow et al., 1988)

Komponenta	Volumen [km ³]	Masa [kg]
Oceani	1338000000	1,338E+21
Podzemna voda	12870000	1,287E+19
Vlaga v tleh	16500	1,650E+16
Ledeniki s stalnim ledom	24023500	2,402E+19
Led permafrosta	340600	3,406E+17
Voda v jezerih - sladka	91000	9,100E+16
Voda v jezerih - slana	85400	8,540E+16
Voda v močvirjih	11470	1,147E+16
Voda v rekah	2120	2,120E+15
Biološka voda	1120	1,120E+15
Atmosferska voda	12900	1,290E+16
Skupaj	1385984610	1,386E+21

Na podoben način kot plitev vodni krog lahko razdelimo tudi globoki in s tem tudi globalni vodni krog, katerega koncept v obliki sistema in podsistemov je prikazan na Sliki 3. Tudi v tem primeru imamo opraviti s kroženjem mase ali količin vode ter energije. V tem primeru sta glavna podisistema plitev in globok vodni krog. Na Sliki 3 je poleg obeh podisistemov, iz razlogov, ki bodo podani v nadaljevanju, prikazan še podsistem vodnega kroga Zemljinega jedra.



Slika 3. Shematski prikaz globokega vodnega kroga

V oceanih na območjih subdukcijskih con prihaja do velikega vrivanja vode v plašč. Voda skupaj s kamninami potuje v plašč, od koder se ponovno vrača na površje. Ta pot navzgor poteka preko vulkanizma na srednjeoceanskih grebenih, preko otočnega vulkanizma in s tem povezanimi vročimi točkami ali pa že med samo subdukcijo, kjer prihaja do dvigovanja z vodo bogate magme, ki se predvsem v obliki andezitnega vulkanizma razliva na površje skozi ločne in zaločne vulkane (ang. arc in back-arc). Tako

se voda, ki je bila vtisnjena s subdukcijo, vrača na površje in ponovno postaja del plitvega vodnega kroga.

Še vedno ostaja odprto vprašanje vodnega kroga v jedru. Izračuni kažejo, da je v zunanem delu jedra prisoten deficit mase, ki bi ga lahko razložili tudi s prisotnostjo lahko hlapnih elementov in spojin, med njimi tudi vode. Prav tako novejša raziskava kažejo, da nekatere subducirane plošče dokončno razpadejo šele na meji plašč jedro. V zunanem jedru imamo opraviti s turbulentnim režimom preko katerega prihaja do intenzivnega prenosa toplote v plašč in s tem posledično do zelo izrazitega vpliva na njegovo konvekcijo. Prej opisani procesi nakazujejo na to, da je pri teh procesih udeležena tudi voda, s tem pa je tudi jedro udeleženo pri globokem vodnem krogu.

Razumevanje izmenjave vode med plitvim vodnim krogom in plaščem je v veliki meri vezano na razumevanje porazdelitve vode v subduciranih ploščah. Na teh območjih transport vode poteka v obliki porne vode v sedimentih, ki so se odložili na dnu oceana ter v kamninah skorje ter litosfere, kjer je voda kemijsko vezana v sedimentih, oceanski skroji in serpentiniziranem delu litosfere. V subdukcijski coni se del vode pri visokih temperaturah in tlakih sprosti zaradi razpada mineralov, ki vsebujejo vodo. Ta voda povzroča taljenje kamnin v akrecijski prizmi v začetnem delu subdukcijskega območja in s tem nastanek magme, ki se dvigne na površje skozi ločni (ang. arc) in zaločni (ang. back-arc) vulkanizem (Slika 4). Vsa voda, ki je ostala v subducirani plošči tudi preko območja tvojenja magme predstavlja napajanje plašča z vodo. Tej vodi pravimo postmagmatska voda.

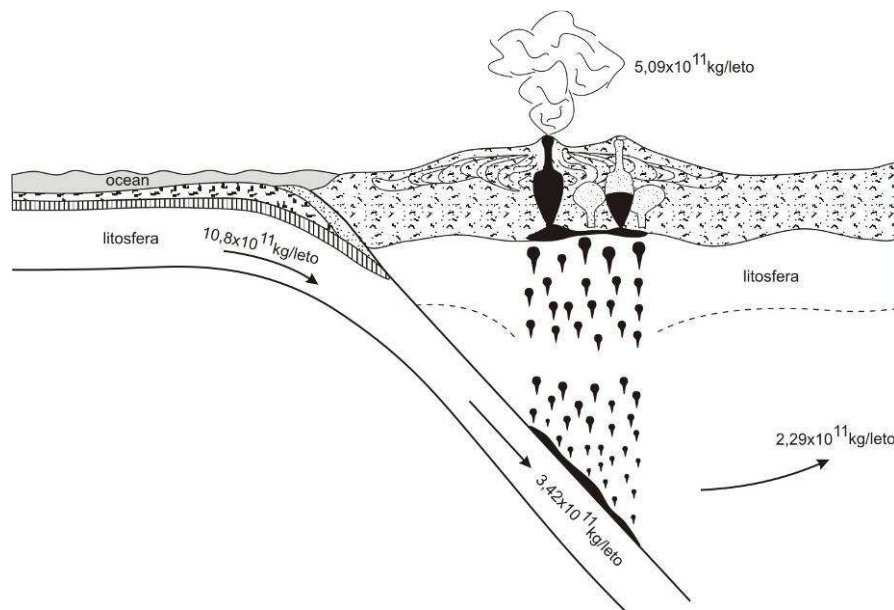
Do iztrazite magmatske aktivnosti prihaja tudi na območju srednje oceanskih grebenov, kjer nastajajo srednje oceanski bazalti (MORB – Mid Oceans Ridge Basalts). To so območja, ki jih masno bilančno opredelimo kot območja obnavljanja. Tu se oceanska skorja razriva in nastaja nova. V tem procesu naj bi na plano prihajala tudi postmagmatska voda. Del mase skorje se obnavlja tudi skozi vulkanizem srednje oceanskih otokov na katerih nastajajo srednje oceanski bazalti (OIB – Ocean Islands Basalts). Ta območja so vezana na vroče točke, katerih izvor naj bi bil v D'' območju (Campbell & O'Neill, 2012). OIB se od MORB razlikujejo tako po sestavi, kot tudi po vsebnosti vode.

Globoka vodna bilanca

V literaturi bomo zasledili zelo raznolike ocene količin vode v plašču ter posameznih delih plašča. Prav tako bomo zasledili dokaj različne ocene vrivanja vode v plašč preko subdukcije. Ringwood (1975) je na podlagi pirolitskega modela plašča ocenil, da znaša masa vode v plašču od 4 do 21 mas današnjih oceanov, kar ustreza masi od $5,35 \times 10^{21}$ kg do $28,0 \times 10^{21}$ kg. Na podlagi kristalografskega modela minerala wadsleyita je Smyth (1994) ocenil, da lahko plašč vsebuje $5,35 \times 10^{21}$ kg vode. Na podlagi analize nodul iz plašča je Wänke s sodelavci (1984) ocenil, da znaša masa vode v plašču od $2,54 \times 10^{21}$ kg do $4,95 \times 10^{21}$ kg, model magmatskega oceana (Liu, 1988) podaja oceno 10 kratne mase današnjih oceanov, to je $13,38 \times 10^{21}$ kg, akrecijski model (Ahrens, 1989) podaja maso $2,68 \times 10^{21}$ kg in analiza na podlagi razmerja K_2O/H_2O podaja oceno v razponu od $2,14 \times 10^{21}$ kg do $7,22 \times 10^{21}$ kg (Jambon & Zimmerman, 1990). Iwamori (2007) ocenjuje, da je v plašču vode od $6,01 \times 10^{21}$ do $12,0 \times 10^{21}$ kg. Iz podatkov izhaja, da se masa vode v plašču nahaja na intervalu od $2,14 \times 10^{21}$ kg do $28,0 \times 10^{21}$ kg, pri čemer je slednja ocena verjetno pretirana. Hacker (2008) je kot najbolj zanesljivo uporabil oceno Iwamori (2007).

Podobno različne so ocene vrivanja vode v subdukcijskih območjih. Peacock (1990) je ocenil, da znaša subdukcija vode $8,7 \times 10^{11}$ kg/leto, Rea in Ruff (1996) sta na podlagi

geokemičnih izračunov ocenila, da znaša pretok 9×10^{11} kg/leto, Bebout (1996) je izračunal vtok na interval med 9×10^{11} do 19×10^{11} kg/leto, Javoy (1998) ocenjuje na podlagi akrecijskega modela vrednost na 10×10^{11} kg/leto, Maruyama (1999 v Bounama et al., 2001) na podlagi analize faznih diagramov podaja vrednost $11,2 \times 10^{11}$ kg/leto, Schmidt in Poli (1998) sta podala oceno na intervalu od $19,8 \times 10^{11}$ do $22,8 \times 10^{11}$ kg/leto, Jarrad (2003) je podal oceno $7,4 \times 10^{11}$ kg/leto, Rüpke in sodelavci (2004) so podali oceno na intervalu od $8,6 \times 10^{11}$ kg/leto do 18×10^{11} kg/leto, Hacker (2008) je podal oceno $13,3 \times 10^{11}$ kg/leto ter van Keken in sodelavci (2011) oceno 10×10^{11} kg/leto. Parai & Mukhopadhyay (2012) sta opravila analizo prej navedenih literaturnih podatkov in s pomočjo verjetnostnega modeliranja z metodo Monte Carlo prišla do ocene, da znaša pretok vtoka vode skozi subdukcijska območja od $10,3 \times 10^{11}$ kg/leto do $11,7 \times 10^{11}$ kg/leto s povprečno vrednostjo $10,8 \times 10^{11}$ kg/leto.



Slika 4. Območje subdukcije z vrisanim delom globoke vodne bilance po Parai & Mukhopadhyay (2012)

Zelo pomembna je tudi ocena količine vode, ki se sprosti v ločnih vulkanih in postmagmatske vode, ki nadaljuje pot naprej v plašč ter vode, ki se sprosti na srednjeoceanskih grebenih in oceanskih otokih. Teh ocen je v literaturi manj, zato so zelo grobe in manj zanesljive. Peacock (1990) je ocenil, da se v ločnem vulkanizmu sprosti $1,4 \times 10^{11}$ kg/leto vode, na srednje oceanskih grebenih pa $0,6 \times 10^{11}$ kg/leto, po njegovem mnenju je tako postmagmatske vode $4,0 \times 10^{11}$ kg/leto. Po mnenju Hackerja (2008) je postmagmatske vode $9,0 \times 10^{11}$ kg/leto. Parai & Mukhopadhyay (2012) za postmagmatsko vodo podajata oceno masnega pretoka na intervalu od $2,52 \times 10^{11}$ kg/leto do $4,32 \times 10^{11}$ kg/leto, s srednjo oceno $3,42 \times 10^{11}$ kg/leto. Po njunih izračunih je masni pretok vode skozi srednje oceanske grebene $1,35 \times 10^{11}$ kg/leto, skozi vulkanizem srednje oceanskih otokov pa $0,94 \times 10^{11}$ kg/leto. Iz bilančnih razlik izhaja, da znaša pretok vode skozi ločni vulkanizem $5,09 \times 10^{11}$ kg/leto. Vodna bilanca po Parai & Mukhopadhyay (2012) je prikazana na Sliki 4.

Pregled podane literature pokaže na velika razhajanja v metodologiji ocene globokega vodnega kroga na podlagi katere so podane ocene vtokov in iztokov vode v in iz Zemljine notranjosti. Velike težave nastopijo že pri medsebojni primerjavi rezultatov, ki so podani v

zelo raznolikih enotah in za različno dolga časovna obdobja. Pri marsikaterem modelu opazimo krišitev osnovnega načela vodne bilance, po katerem mora biti ta zaključena.

Vodnobilančna izhodišča

V izhodišču vsi vodno bilančni izračuni, ne glede na to kakšno je bilančno območje, bodisi da gre za plitev vodni krog bodisi za globok vodni krog, ali pa kar globalni vodni krog, temeljijo na preprosti enačbi, ki izhaja iz principa zveznosti:

$$I(t) = O(t) \pm S(t)$$

kjer so $I(t)$ – vhodne količine vode, $O(t)$ – izhodne količine vode in $S(t)$ – uskladiščenje v (pod)sistemu. Osnovno načelo, ki izhaja iz enačbe, je da mora biti vodna bilanca zaključena. Ko obravnavamo kroženje vode skozi različne podsisteme globalnega vodnega kroga, nas pogosto zanima, kakšen je zadrževalni čas vode τ v posameznem podsistemu. Ta je definiran kot

$$\tau = \frac{V(t)}{Q(t)}$$

kjer je $V(t)$ – volumen ali masa vode v podsistemu, $Q(t)$ pa masni ali volumski pretok skozi sistem.

Preglednica 3. Pregled osnovnih komponent globalne masne bilance vode na Zemlji

	Masa [kg]
Skupna masa vode na Zemlji	$10,5 \times 10^{21}$
Masa vode v plašču	$9,1 \times 10^{21}$
Masa vode v hidrosferi	$1,4 \times 10^{21}$

Kot izhodišče za obravnavo vodne bilance povzemamo volumne in mase plitve vodne bilance, kot jo je podal Chow s sodelavci (1988), za globoko vodno bilanco, izhajamo iz masnih pretokov, ki sta jih podala Parai & Mukhopadhyay (2012) in iz srednje ocene količine vode, ki jo je za plašč podal Iwamori (2007). Ker so podatki o količini vode v jedru zelo skopi in nezanesljivi morebitno maso vode v jedru iz ocene izpuščamo. Ocena glavnih komponent globalne vodne bilance je podana v Preglednici 3.

Iz podanih podatkov in ocen izhaja, da je skupna masa vode na Zemlji vsaj $10,5 \times 10^{21}$ kg, kar predstavlja 0,18 ‰ celotne mase Zemlje. Masa vode uskladiščene v plašču je vsaj 6,5 krat večja kot je masa vode v plitvem vodnem krogu.

Na podlagi pretokov in vtokov si je zanimivo ogledati tudi zadrževalne časa v posameznih pomembnejših delih globalnega vodnega kroga. Če izhajamo iz prej navedenih podatkov (Chow et al., 1988; van Beek et al., 2011) znaša v površinskih vodah povprečni zadrževalni čas 21 dni. V atmosferski vodi je zadrževalni čas še krajši in ob upoštevanja globalne količine padavin $5,02 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{leto}$ (Oki & Kanae, 2006) znaša le 9 dni. Če izhajamo zgolj iz predpostavke, da je kroženje vode v oceanih vezano le na oceanske tokove in da voda tudi v najglobljih predelih oceana ne stagnira in glede na evaporacijo s proste vodne površine oceana, ki ustreza $4,38 \times 10^5 \text{ km}^3/\text{leto}$ (Oki & Kanae, 2006), zadrževalni čas vode v oceanih znaša 3065 let.

Oglejmo si sedaj še izračun zadrževalnih časov, ki izhajajo iz podatkov o globoki vodni bilanci. Celoten volumen oceanov se skozi ločni vulkanizem v ozračje povrne v 2,63 milijardah let. Če izhajamo le iz količin postmagmatske vode in ocenjenega volumna vode pa znaša zadrževalni čas v plašču 26,2 milijarde let, kar pa je nesmislen rezultat, saj znaša

starost Zemlje 4,56 milijarde let. Kljub temu ta rezultat nakazuje na to, da porazdelitev vode v plašču bodisi ni homogena in da se preko srednje oceanskih grebenov in srednje oceanskih otokov zrači le del plašča, bodisi da voda na teh področjih izhaja iz še ne prezračenega diferenciranega materiala po akreciji Zemlje.

Sklep

Razumevanje globalnega vodnega kroga je pomembno z več vidikov. Porazdelitev vode v notranjosti Zemlje ima pomemben vpliv na potek taljenja plašča, na reologijo plašča in skorje, na načine konvekcije in na strukturo skorje, kroženje vode v globljih predelih Zemlje pa vpliva tudi na kroženje ostalih lahkih elementov in spojin. Poznavanje dinamike globokega vodnega kroga je seveda pomembno tudi zaradi razumevanja obnašanja plitvega vodnega kroga skozi daljša – geološka časovna obdobja. Spremembe v tektoniki plošč in s tem v subdukciji ter razpiranju plošč imajo za posledico spremembe v transportu vode v notranjost Zemlje, s tem pa znatno vplivajo na evstatična nihanja gladine oceanov.

Poznavanje vpliva vode na subdukcijske procese je pomembno tudi s stališča razumevanja Wilsonovega cikla. Zemlja je v svoji preteklosti šla skozi vsaj pet ciklov pri katerem je superkontinent razpadel v več manjših kontinentov, ti pa so se nato ponovno združili. Posamezen cikel od razpada do združitve kontinenta traja od 300 do 500 milijonov let. Sedanja globalna slika porazdelitve kontinentov je posledica razpada superkontinenta Pange. Ob nastanku superkontinenta se subdukcija upočasni ali skoraj ustavi, to pa ima za posledico, da so v plašču zadržane večje količine vode. Te nato povzročijo spremembe v konvekciji plašča in nastanek razpornih jarkov, ki predstavljajo začetek novega cikla tektonike plošč.

In nenazadnje, poznavanje globalnega vodnega kroga je pomembno tudi za celovito razumevanje plitvega vodnega kroga, katerega učinke neposredno spremljamo vsak dan. Hidrološki izračuni vedno predpostavljajo, da je količina vode na površju konstantna. Kot lahko vidimo, takšne predpostavke držijo le v kratkem časovnem obdobju, merjenem s človekovimi očmi.

Zahvala

Prispevek je bil pripravljen v okviru aktivnosti programske skupine »Podzemne vode in geokemija – P1-0020«, ki deluje na Geološkem zavodu Slovenije in ki jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Viri in literatura

- Ahrens, T.J., 1989: Water storage in the mantle. *Nature* 342, 122–123.
- Aubert, J., Amit, H., Hulot, G., Olson, P., 2008: Thermochemical flows couple the Earth's inner core growth to mantle heterogeneity. *Nature* 454, 758 – 761.
- Bebout, G.E., 1996: Volatile transfer and recycling at convergent margins: mass-balance and insights from high-p/t metamorphic rocks. *Geophysical Monograph* 96, 179–193.
- Bounama, C., Franck, S. & von Bloh, W., 2001: The fate of Earth's ocean. *Hydrology and Earth System Sciences* 5, 569–575.
- Campbell, I.H. & O'Neill, H.S.C., 2012: Evidence against a chondritic Earth. *Nature* 483, 553–558.

- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W., 1988: Applied hydrology. McGraw-Hill Book Company, 572 pp., New York.
- Flanagan, M.P., Shearer, P.M., 1998: Global mapping of topography on transition zone velocity discontinuities by stacking SS precursor. *Journal of Geophysical Research* 97, 4489- 4495.
- Hacker, B.R., 2008: H₂O subduction beyond arcs. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9, Q03001.
- Iwamori, H., 1998: Transportation of H₂O and melting in subduction zones: Earth and Planetary Science Letters, 160, 65–80.
- Jambon, A., Zimmermann, J.L., 1990: Water in oceanic basalts: evidence for dehydration of recycled crust. *Earth and Planetary Science Letters* 101, 323–331.
- Jarrard, R.D., 2003: Subduction fluxes of water, carbon dioxide, chlorine, and potassium. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4, 8905
- Javoy, M., 1998: The birth of the Earth's atmosphere: the behaviour and fate of its major elements. *Chemical Geology* 147, 11–25.
- Koch, M., 2003: Phase relations and thermodynamic properties of spineloid phases in the system Mg₂SiO₄ – Fe₂SiO₄ – Fe₃O₄ at high temperatures and pressures. Dissertation – Ruperto – Carola University, Heidelberg, 85 pp.
- Lister, J., 2008: Structuring the inner core. *Nature* 454, 701 – 702.
- Liu, L.-G., 1988: Water in the terrestrial planets and the moon. *Icarus* 74, 98–107.
- Maruyama, S., 1999: Leaking water into the Earth. Abstract for the 1999 AGU Fall Meeting
- McDonough, W.F., 2004: Compositional model for the Earth's core. In: Carlson, R.W. (ed.), *The Mantle and Core, Treatise on Geochemistry 2*. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 547–568.
- Ohtani, E., 2005: Water in the mantle. *Elements* 1, 25–30.
- Okai, T. & Kanae, S., 2006: Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313, 1068–1072.
- Parai, R., & Mukhopadhyay, S., 2012: How large is the subducted water flux? New constraints on mantle degassing rates. *Earth and Planetary Science Letters* 317–318, 396–406.
- Peacock, S. M., 1990: Fluid processes in subduction zones. *Science* 248, 329–337.
- Rea, D.K., Ruff, L.J., 1996: Composition and mass flux of sediment entering the world's subduction zones: implications for global sediment budgets, great earthquakes, and volcanism. *Earth and Planetary Science Letters* 140, 1–12.
- Ringwood, A.E., 1975: *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Ringwood, A.E., 1991: Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle. *Geochim et Cosmochim Acta* 55, 2083 – 2110.
- Rüpke, L.H., Morgan, J.P., Hort, M., Connolly, J.A.D., 2004: Serpentine and the subduction zone water cycle. *Earth and Planetary Science Letters* 223, 17–34.
- Shearer, P.M., 1990: Seismic imaging of upper mantle structure with new evidence for a 520 km discontinuity. *Nature* 344, 121 – 126.
- Shearer, P.M., 1996: Transition zone velocity gradients and the 520 km discontinuity. *Journal of Geophysical Research* 101, 3053 – 3066.
- Schmidt, M.W., Poli, S., 1998: Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth and Planetary Science Letters* 163, 361–379.
- Smyth, J. R., 1994: A crystallographic model for hydrous wadsleyite (β - Mg₂SiO₄): An ocean in the Earth's interior? *American Mineralogist*, 79, 1021 – 1024.
- van Beek, Wada, Y., Bierkens, F.P., 2011: Global monthly water stress: 1. Water balance and water availability. *Water Resources Research* 47, W07517, 25.
- van Keken, P.E., Hacker, B.R., Syracuse, E.M., Abers, G.A., 2011: Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H₂O from subducting slabs worldwide. *Journal of Geophysical Research - Solid Earth* 116, B01401.
- Wänke, H., Dreibus, G., Jagoutz, E., 1984: Mantle chemistry and accretion history of the Earth. In: Kröner, A. et al. (Eds.), *Archean Geochemistry*. Springer, Berlin/Heidelberg, 1–24.

Izotopska sestava padavin in snega na območju Julijskih Alp in Karavank

Polona Vreča¹, Mihael Brenčič^{2,3}, Iztok Sinjur⁴, Gregor Vertačnik⁵, Manca Volk⁶,
Jaka Ortar⁶, Anja Torkar², Vekoslava Stibilj¹, Miha Pavšek⁶

Povzetek

Padavine in snežna odeja ter njeno taljenje pomembno vplivajo na vodni krog. Da bi poglobili znanje o vplivu talečnega snega na vodno bilanco kraških vodonosnikov v SZ Sloveniji smo v letu 2010 pričeli s podrobnejšimi raziskavami kroženja vode z uporabo izotopov kisika in vodika. V prispevku predstavljamo prve rezultate izotopske sestave padavin in snega na območju Julijskih Alp in Karavank.

Ključne besede: padavine, sneg, izotopska sestava, kisik, tritij

Key words: precipitation, snow, isotopic composition, oxygen, tritium

Uvod

Spremljanje snežne odeje v Sloveniji kaže, da je njeno trajanje vse krajše, zmanjšuje se njena vodnatost, sneg pa se pričenja taliti prej. To se posledično odraža na celotnem odtoku (Dolinar et al., 2008, Frantar et al., 2008). Kljub pomembnosti vpliva snega na vodno bilanco, so njegove lastnosti ter prostorska in časovna spremenljivost še vedno relativno slabo raziskane.

Snežna odeja skozi daljše časovno obdobje zadrži večje količine vode, zato predstavlja v pomladnih mesecih njeno taljenje v visokogorju pomemben del napajanja tako vodonosnikov, kot tudi površinskih vodotokov. Snežna odeja in njeno taljenje se prostorsko in časovno zelo spreminjata. Za napajanje vodonosnikov je ključno, da se snežna odeja tali počasi. Pri tem je infiltracija vode v tla stabilnejša in učinkovitejša, zaradi česar pride do večjega obnavljanja zaloga podzemne vode kot v primeru hitrega površinskega odtoka. Natančna bilanca snega je pomembna tudi za ugotavljanje napajalnega zaledja in zadrževalnih časov različnih komponent vodnega kroga. Tako v hidroloških modelih vodna bilanca snega na visokogorskih območjih predstavlja ključ za razumevanje sistema in je pomembna za varovanje alpskih vodnih virov in ugotavljanje njihove stabilnosti.

Za sledenje kroženja vode lahko uporabljamo naravne izotope kisika in vodika, ki predstavljajo uporabno naravno sledilo in se danes vse pogosteje uporabljajo na področju hidroloških raziskav (Vreča in Brenčič, 2009). Če določimo izotopsko sestavo padavin, podzemnih vod, izvirov in površinskih vodotokov, nam to omogoča sledenje njihove poti skozi vodni krog. V visokogorju nam izotopi lahko pomagajo določiti tudi procese preobrazbe snežne odeje in taljenja, ki spremenijo začetno izotopsko sestavo snega. Poleg območja napajanja lahko s pomočjo izotopov določimo tudi sezonsko odvisnost napajanja

¹ Odsek za znanosti o okolju, Institut »Jožef Stefan«, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana; polona.vreca@ijs.si

² Oddelek za geologijo, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva cesta 12, 1000 Ljubljana

³ Oddelek za hidrogeologijo, Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana

⁴ Gozdarski inštitut Slovenije; Večna pot 2, 1000 Ljubljana

⁵ Urad za meteorologijo, Agencija Republike Slovenije za okolje; Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

⁶ Geografski inštitut Antona Melika, Gosposka ulica 13, 1000 Ljubljana

vodonosnikov, zadrževalne čase, velikost vodonosnika, hitrost mešanja in kroženje vode kot tudi starost vod.

Kljub veliki uporabnosti naravnih izotopov v raziskavah kroženja vode so bile tovrstne tehnike v Sloveniji na območju visokogorja uporabljene le redko. Dosedanje raziskave izotopske sestave padavin, površinskih in podzemnih vod v Sloveniji (npr. Brenčič in Poltnig, 2008, Ogrinc et al., 2008, Vreča et al. 2006, 2007, 2008) so pokazale, da izotopske raziskave omogočajo boljše razumevanje kroženja vode, vendar se je potrebno v prihodnosti osredotočiti na podrobnejše raziskave, predvsem območij s pomembnimi vodonosniki. Zato smo leta 2010 pričeli s podrobnejšimi raziskavami kroženja vode na območju Julijskih Alp in Karavank. Njihov glavni namen je poglobiti znanje o vplivu talečega snega na infiltracijo in napajanje kraških vodonosnikov in na dinamiko izvirov, ki se iz teh vodonosnikov napajajo. V članku predstavljamo prve rezultate izotopskih raziskav padavin in snega na območju Julijskih Alp in Karavank.

Območje raziskav in metode dela

Raziskave potekajo na območju SZ Slovenije, na območju Julijskih Alp ter v Karavankah. Podnebne značilnosti območja raziskav so povzete po Dolinar (2010) in podatkih Meteorološkega arhiva Agencije RS za okolje (v nadaljevanju ARSO).

Podnebje slovenskih Alp je ostro, s svežimi poletji in mrzlimi zimami ter pogostimi padavinami. V visokogorju je običajno najhladnejši mesec februar, najtoplejša pa meseca julij in avgust. Na Kredarici je v obdobju 1981-2010 povprečna februarska temperatura znašala $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ in v najtoplejših dveh poletnih mesecih $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$. V slabo prevetrenih alpskih dolinah s pogostim temperaturnim obratom je zima le malo hladnejša kakor v visokogorju, zato pa so poletja tudi za $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ toplejša. Poleg splošnega padca temperature zraka z višino, na temperaturno sliko močno vpliva reliefna razgibanost površja. V jasnih in mirnih nočeh se na planotah, še bolj pa v kotanjah, prizemna plast zraka močno ohladi. V mraziščih, kjer je ta pojav najbolj izrazit, lahko temperatura zraka preko noči pade za več kot $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Vertačnik et al., 2007). Ta krajevna temperaturna raznolikost pomembno vpliva tudi na preobrazbo snežne odeje.

Padavin je poleti, še bolj pa jeseni, veliko, pozimi pa jih je precej manj. Obilne padavine so najpogostejše posledica jugozahodnega vetra, ki običajno prinaša vlažno in toplo zračno maso. Ob prisilnem dvigu prek gorskih pregrad se presežek vodne pare izloča v obliki bolj ali manj intenzivnih padavin. Ta proces je najbolj izrazit v južnih in zahodnih Julijskih Alpah, precej manj pa v ostalem delu Alp. V najbolj namočenih predelih Posočja pade tudi prek 4000 mm padavin letno, v Zgornjesavski dolini pa le še okoli 1500 mm. V poletnem času za izdatne padavine skrbi konvekcija.

Glede na nadmorsko višino se spreminja časovna porazdelitev sneženja in snežne odeje. V visokogorju je sneženje možno vse mesece v letu, v dolinah pa prvi sneg običajno zapade oktobra ali novembra. Najobilnejše je sneženje od decembra do marca, v visokogorju tudi aprila. Povprečna mesečna vsota dnevnih višin novozapadlega snega je v zimskih mesecih v Ratečah okoli pol metra, na Voglu blizu enega metra in na Kredarici od metra do metra in pol. Na Kredarici je višek snežne odeje najpogostejše v aprilu in doseže okoli 4 metre. Med posameznimi leti so velike razlike, v skrajnih primerih je največja sezonska debelina snežne odeje manj kot dva metra ali več kot šest metrov. Na 1500 m je snega bistveno manj, v Julijskih Alpah je sezonski višek okoli dva metra, v Karavankah pa nekoliko manj. V alpskih dolinah se vrednost večinoma že spusti pod en meter višine. Letno trajanje snežne odeje hitro upada z nadmorsko višino: na Kredarici sneg prekriva tla okoli 260 dni na leto, na Voglu okoli 170 dni in v Ratečah 120 dni. Trajanje ni odvisno

zgolj od nadmorske višine, temveč tudi od nagnjenosti površja in morebitnega prispevka plazov.

Podnebje slovenskih Alp se je v zadnjih desetletjih znatno segrelo, povprečno za okoli 0,3 °C na desetletje. Ogreli so se vsi letni časi, le v jeseni sprememba še ni statistično značilna. Debelina in trajanje snežne odeje sta se zaradi višjih temperatur zmanjšali.

Na območju raziskav smo v sodelovanju z ARSO v letu 2010 vzpostavili vzorčenje mesečnega kompozita padavin za izotopske analize vode in sicer na petih različnih lokacijah:

- Kredarica (46°23' N, 13°51' E, 2514 m) – glavna meteorološka postaja;
- Rateče (46°30' N, 13°43' E, 864 m) – glavna meteorološka postaja;
- Bohinjska Čేశnjica (46°18' N, 13°57' E, 592 m) – klimatološka postaja;
- Podljubelj (46°24' N, 14°17' E, 650 m) – padavinska postaja;
- Zgornja Radovna (46°26' N, 13°57' E, 750 m) – padavinska postaja.

Na meteoroloških postajah Kredarica, Rateče, Bohinjska Čేశnjica in Podljubelj smo pričeli meriti izotopsko sestavo padavin marca 2010, v Zgornji Radovni pa aprila 2010.

Z raziskavami snega smo pričeli januarja 2011, ko smo izvedli prva vzorčenja v snežnih izkopih na Planini Javornik na Pokljuki in v mrzišču Mrzla Komna na Lepi Komni. Na Pokljuki smo na Planini Javornik in v bližnjem gozdu izvedli dodatna vzorčenja v februarju in aprilu 2011 (Vreča et al., 2011, 2012). V letu 2012 smo izvedli vzorčenja snega januarja v mrzišču Luknja na Komni, februarja na Planini Javornik ter marca v gozdu ob Planini Javornik in na Kredarici v bližini meteorološke postaje. V marcu smo opravili tudi nekaj vzorčenj snežnih izkopov v Karavankah na Zelenici in v mrzišču Sklede. Vzorčenje na Kredarici in Zelenici je bilo izvedeno na pobočjih. Globina izkopa na Kredarici je znašala 200 cm, kar je 80 cm več kot višina snežne odeje izmerjene na meteorološki postaji 1. 3. 2012 (Cegnar, 2012 a). Dejanska globina snežne odeje na Zelenici je znašala 265 cm, vzorčenje pa smo izvedli zgolj v zgornjih 185 cm izkopa. Vzorčenje snega za izotopske analize kisika, za katere zadošča zelo majhna količina vzorca (nekaj mL), je potekalo na vseh lokacijah po globini snežnih izkopov. Za določitev tritija potrebujemo mnogo več vzorca (približno 0,5 L), zato smo vzorčili kompozitne vzorce snega le na Planini Javornik pozimi 2011.

Pri vzorčenju snega se pojavljajo določene težave, ki so povezane z nehomogenostjo snežne odeje, ledenimi plastmi znotraj snežne odeje, veliko spremenljivostjo višine snežne odeje, sekundarnimi tvorbami na površini in dostopnostjo vzorčnih mest.

V zbranih vzorcih je bila na Institutu »Jožef Stefan« določena izotopska sestava kisika in tritija. Izotopska sestava kisika ($\delta^{18}\text{O}$) je bila merjena na masnem spektrometru s kontinuirnim pretokom IsoPrime (GV Instruments) s preparativnim nastavkom MultiFlow Bio po uravnoveženju sistema voda-CO₂. Pri meritvah se uporabljajo laboratorijski standardi, ki so periodično kalibrirani z mednarodnimi standardi priporočenimi s strani IAEA. Izotopsko sestavo oziroma razmerje med težjim in lažjim stabilnim izotopom podajamo v obliki vrednosti δ (delta), ki jih izrazimo v tisočinkah (‰), relativno glede na mednarodni standard V-SMOW (Vienna - Standard Mean Ocean Water). Vrednosti δ izračunamo s pomočjo enačbe:

$$\delta^Y Z [\text{v ‰}] = (R_x / R_s - 1) \cdot 1000$$

kjer $^Y Z$ predstavlja ^{18}O , R razmerje med težkim (manj pogostim) in lažjim (bolj pogostim) izotopom (npr. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), simboli R_x in R_s pa predstavljajo razmerja v vzorcu (x) in standardu (s). Pozitivna vrednost δ pomeni, da je izotopsko razmerje R v vzorcu višje od razmerja v standardu, iz česar sledi, da je vzorec "težji" ali obogaten glede na standard.

Negativna vrednost δ pomeni, da je izotopsko razmerje vzorca nižje od izotopskega razmerja v standardu, vzorec je "lažji" ali osiromašen.

Specifična aktivnost tritija je bila merjena na tekočinskem scintilacijskem števcu (TriCarb 3170 TR/SL, Canberra Packard) po predhodni predkoncentraciji tritija z uporabo elektrolizne obogatitve. Metoda je akreditirana pri Slovenski akreditaciji v obsegu podanem v akreditacijski listini LP-090. V prispevku so rezultati podani v tritijevih enotah ($1 \text{ TU} = 0,118 \text{ BqL}^{-1}$), ki se običajno uporabljajo v izotopski hidrologiji.

Rezultati

Rezultati izotopskih raziskav padavin in snega (minimalne, maksimalne in povprečne vrednosti) so zbrani v Preglednicah 1 in 2. Spreminjanje izotopske sestave kisika in tritija v padavinah za obdobje od marca 2010 do julija 2012 je grafično prikazano na Slikah 1 in 2, na Sliki 3 pa je prikazano spreminjanje količine padavin in temperature zraka. V letu 2011 in 2012 so bile občasno količine padavin tako majhne, da analiz tritija nismo opravili. Tako manjkajo v Ratečah, Bohinjski Češnjici, Podljubelju in Zgornji Radovni podatki za november 2011 in marec 2012, na zadnjih treh postajah pa tudi za februar 2012.

Preglednica 1. Izotopska sestava padavin v obdobju od aprila 2010 do julija 2012

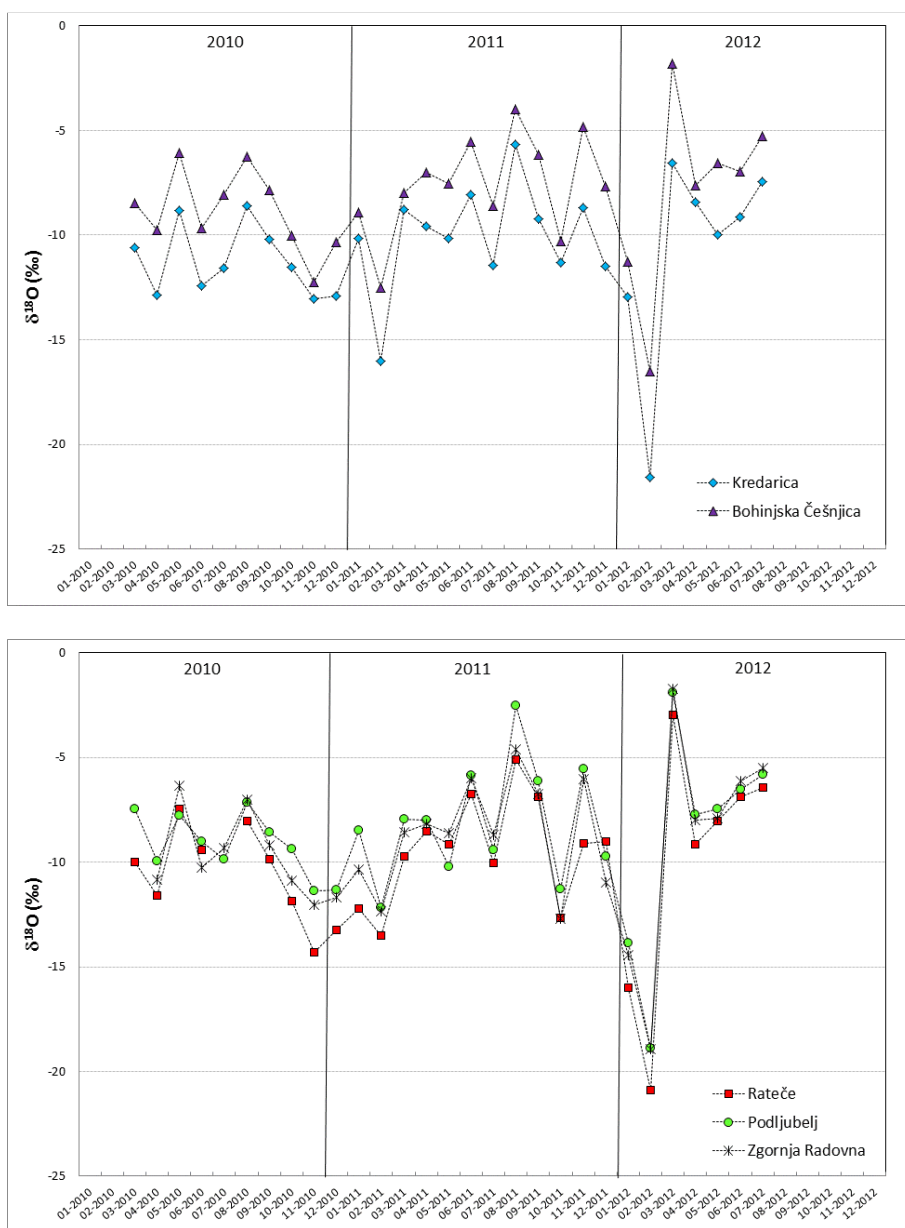
Lokacija	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)			^3H (TU)		
	minimum	maksimum	povprečje	minimum	Maksimum	povprečje
Kredarica	-21,6	-5,7	-10,7	4,1	16,3	8,8
Rateče	-20,9	-3,0	-10,0	3,3	15,7	8,5
Bohinjska Češnjica	-16,5	-1,8	-8,1	3,3	15,5	8,4
Podljubelj	-18,9	-1,9	-8,7	3,4	16,4	8,9
Zgornja Radovna	-18,9	-1,7	-9,1	3,8	16,2	8,6

Preglednica 2. Izotopska sestava snega vzorčenega leta 2011 in 2012

Lokacija	Datum vzorčenja	Globina izkopa (cm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)		
			minimum	maksimum	povprečje
Planina Javornik	14. 1. 2011	48	-16,8	-8,9	-13,2
Planina Javornik – gozd	15. 1. 2011	56	-18,5	-9,6	-13,9
Mrzla Komna	15. 1. 2011	118	-17,2	-10,7	-13,8
Planina Javornik	18. 2. 2011	83	-19,0	-8,5	-13,3
Planina Javornik – gozd	10. 4. 2011	19	-11,5	-9,1	-10,7
Mrazišče Luknja	21. 1. 2012	55	-16,3	-7,4	-10,8
Planina Javornik	8. 2. 2012	35	-25,4	-13,7	-19,2
Planina Javornik	19. 2. 2012	20	-17,0	-10,9	-14,4
Kredarica	2. 3. 2012	200	-15,7	-9,2	-11,8
Planina Javornik – gozd	3. 3. 2012	8,5	-13,3	-12,1	-12,6
Zelenica	7. 3. 2012	185	-22,6	-13,1	-18,5
Mrazišče Sklede 1	8. 3. 2012	70	-18,4	-10,0	-13,8
Mrazišče Sklede 2	8. 3. 2012	46	-19,0	-8,5	-12,5

Izotopska sestava kisika v padavinah se spreminja od -21,6 do -1,7 ‰ (Preglednica 1). Najnižje vrednosti so značilne za Kredarico, najvišje vrednosti pa so bile izmerjene v

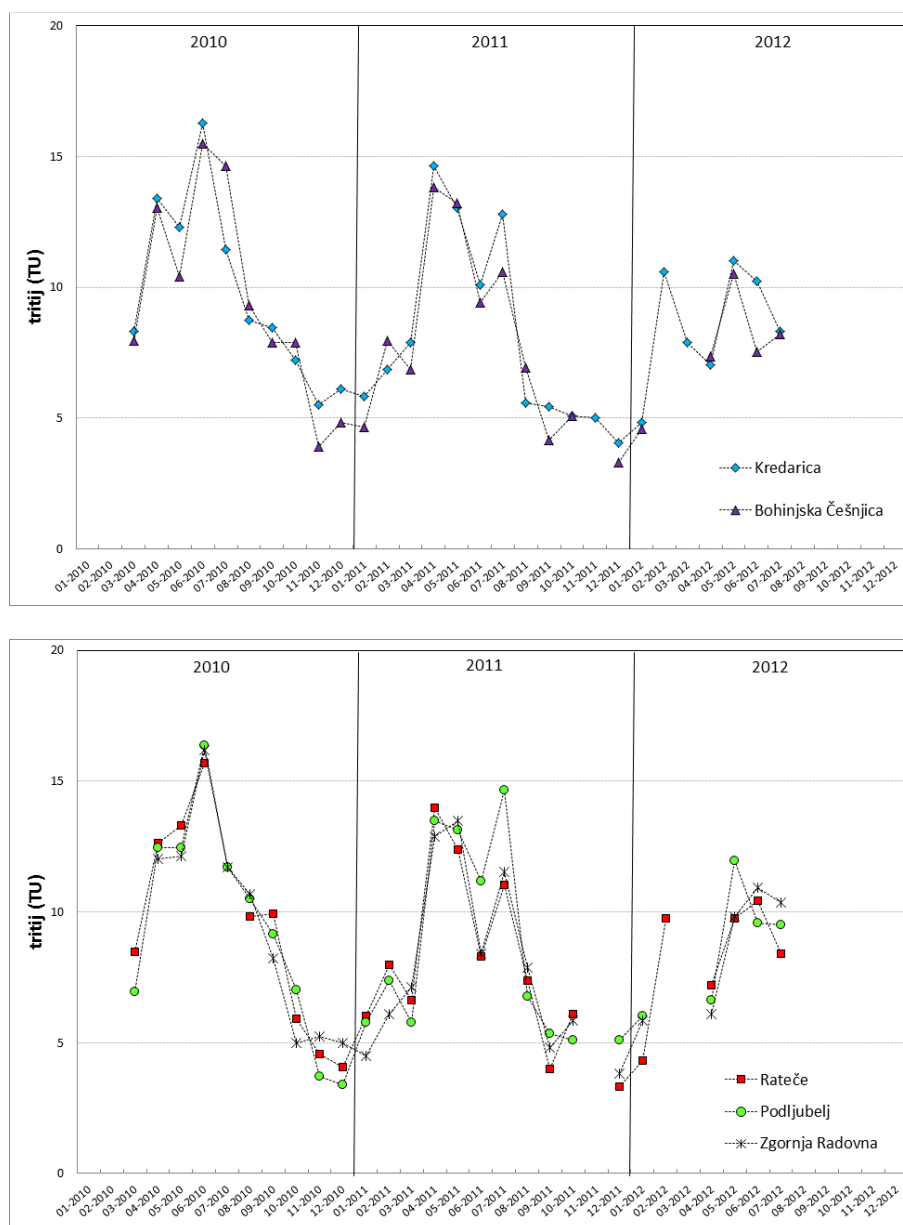
Zgornji Radovni, vendar so razlike med postajami, ki ležijo pod nadmorsko višino 600 m, relativno majhne. Izotopska sestava kisika je v padavinah najvišja poleti in najnižja pozimi, kar je povezano predvsem s sezonskim spreminjanjem temperature zraka, količine padavin in zračne vlage. Dosedanji rezultati kažejo na znatne razlike med posameznimi leti (Slika 1). Te so povezane s temperaturo zraka in tudi količino padavin, ki je bila v opazovanem obdobju zelo raznolika (Slika 3). Leto 2011 je bilo v primerjavi z letom 2010 mnogo bolj suho, suša pa se je nadaljevala vse do aprila 2012 (Cegnar, 2012 a, b). Velike spremembe v izotopski sestavi padavin opazimo v prvih treh mesecih leta 2012 (Slika 1), ko je bilo padavin izredno malo (Slika 3). Dodatno so na izotopsko sestavo padavin vplivale vremenske razmere v februarju, ki je bil zelo hladen in vetroven, in v marcu, ki je bil nadpovprečno tople. V teh dveh mesecih smo zabeležili tudi najnižjo in najvišjo izotopsko sestavo kisika v padavinah (Preglednica 1).



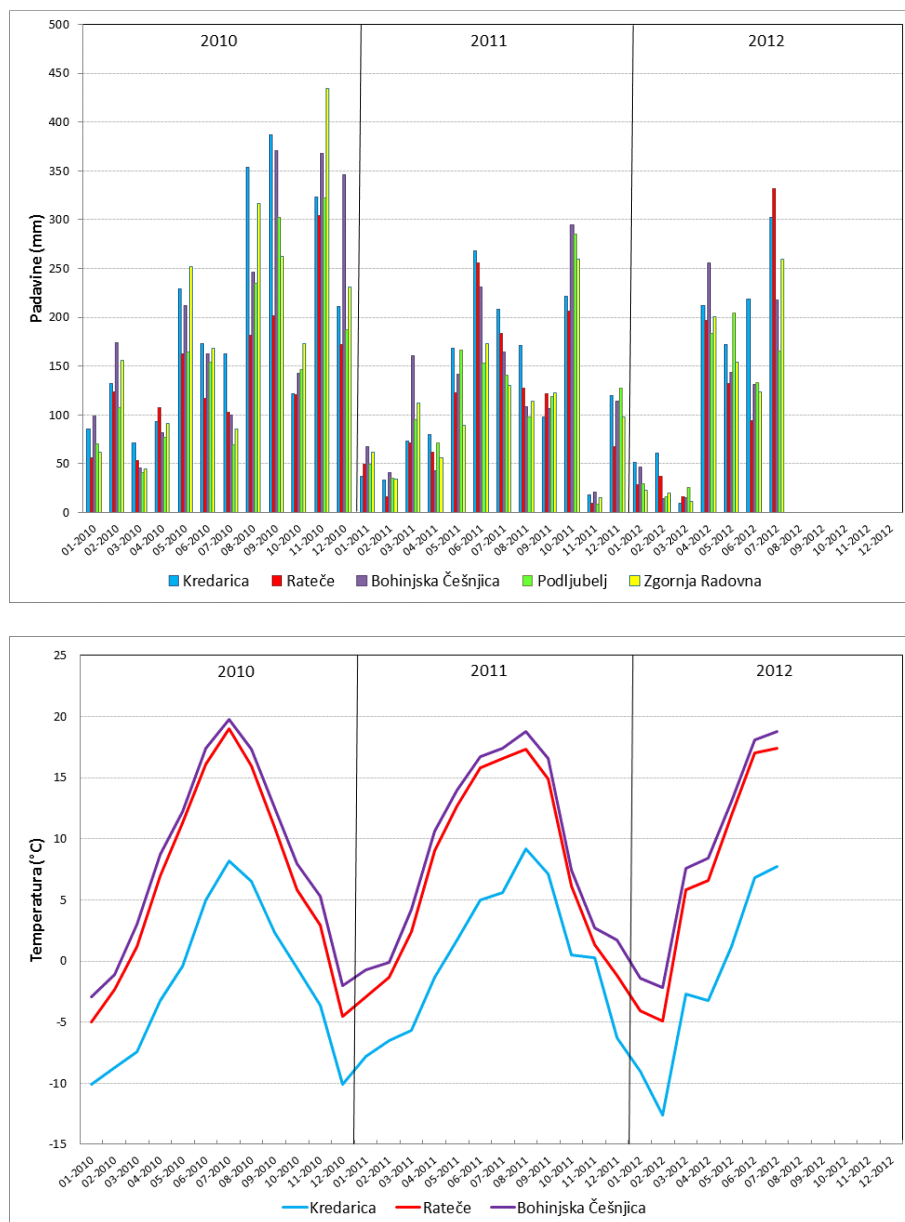
Slika 1. Izotopska sestava kisika v padavinah

Poleg temperature in količine padavin vplivajo na izotopsko sestavo padavin zračne mase različnega izvora (Araguas-Araguas et al., 2000). Ker prihaja na območju Alp do mešanja zračnih mas, bo boljša interpretacija možna, ko bomo določili tudi izotopsko sestavo vodika in devterijev presežek (Vreča in Brenčič, 2009) ter podrobneje analizirali posamezne padavinske dogodke.

Sezonsko spreminjanje aktivnosti tritija v padavinah je prikazano na Sliki 2 in ustreza spremembam značilnim za severno poloblo z najvišjimi aktivnostmi poleti (Rozanski et al., 1991). Najnižje vrednosti smo izmerili na Kredarici, v Ratečah, Bohinjski Češnjici in Zgornji Radovni decembra 2011, v Podljubelju pa decembra 2010. Najvišje vrednosti smo na vseh postajah izmerili junija 2010. Povprečne aktivnosti tritija se gibljejo med 8,4 in 8,9 TU (Preglednica 1) in so nekoliko nižje kot dolgoletno povprečje za Ljubljano (Vreča et al., 2008).



Slika 2. Izotopska sestava tritija v padavinah



Slika 3. Mesečna količina padavin in temperatura zraka

Rezultati raziskav snežnih izkopov so zbrani v Preglednici 2, kjer so prikazane minimalne, maksimalne in povprečne vrednosti izotopske sestave kisika. V letu 2010 smo sneg vzorčili v petih izkopih. Spremenljivost izotopske sestave kisika z globino profilov je velika in lahko znaša tudi več kot 10 ‰, razponi pa so večji kot razponi vrednosti izotopske sestave padavin (Slika 1). Razlika je posledica tega, da se v snežni odeji zabeležijo posamezni padavinski dogodki, rezultati izotopske sestave padavin pa predstavljajo mesečne kompozite in s tem mešanico različnih dogodkov. Povprečne vrednosti v izkopih, ki smo jih vzorčili januarja in februarja na Pokljuki in Komni, so zelo podobne, vrednosti izmerjene aprila na Pokljuki pa so višje in so posledica preobrazbe in taljenje snega (Preglednica 2). Aktivnosti tritija so se gibale med 4 in 6 TU in se ujemajo z izotopsko sestavo zimskih padavin (Slika 2). Podrobnejših raziskav tritija v snegu nismo izvajali.

V letu 2012 smo opravili raziskave osmih snežnih izkopih na območju Julijskih Alp in Karavank. Tudi v teh izkopih smo opazili znatne spremembe izotopske sestave kisika z

globino, ki pa so bile drugačne kot v letu 2011. Vrednosti $\delta^{18}\text{O}$ v vseh analiziranih vzorcih se gibljejo med $-25,4$ in $-7,4$ ‰ (Preglednica 2). Glavni razlog za razlike so bili drugačni podnebni pogoji. Nizke vrednosti izotopske sestave kisika so povezane predvsem z zelo nizkimi temperaturami zraka februarja 2012. Poleg tega je bilo padavin zelo malo, snežna odeja pa je bila večinoma zelo skromna (Cegnar, 2012a) in slabo preobražena, na kar je vplival februarja tudi močan veter, ki je delal zamete. Podrobnejše analize zbranih podatkov so v teku.

Zaključek

Prvi rezultati raziskav izotopske sestave padavin in snega na območju Julijskih Alp in Karavank kažejo na veliko časovno in prostorsko spremenljivost, ki jo je potrebno podrobneje raziskati. Načrtujemo nadaljevanje raziskav izotopske sestave padavin in podrobnejše raziskave snega v letu 2013, pri čemer se bomo osredotočili predvsem na raziskave snežnih profilov na širšem območju Planine Javornik na Pokljuki ter na območju Zgornje Radovne. V kolikor bo možno, bodo vzorčenja snežnih profilov izvedena tudi drugod (npr. Komna, Kredarica, Zelenica itd.). Poleg vzorčenja debelejših snežnih plasti je izredno pomembno podrobno vzorčenje, ki omogoča boljšo opredelitev procesov v snežni odeji in s tem opredelitev bilance snega ter njenega vpliva na odtok.

Zahvala

Avtorji se zahvaljujemo za dragoceno pomoč pri izvedbi vzorčenja padavin sodelavcem ARSO in osebju meteoroloških postaj Kredarica, Rateče, Bohinjska Česnjica, Podljubelj in Zgornja Radovna. Sergeyu A. Sokratovu iz Državne univerze M. V. Lomonosov v Moskvi se zahvaljujemo za številne koristne napotke v zvezi z izotopskimi raziskavami snega, Andreju Rekarju in Zvonetu Sinkoviču za opravljeno vzorčenje snežnega izkopa na Kredarici, Stojanu Žigonu in Barbari Svetek pa za dragoceno pomoč pri izotopskih analizah. Raziskave potekajo v okviru nacionalnih raziskovalnih programov (P1-0143, P1-0020), v okviru slovensko – ruske bilateralne sodelave (BI-RU/12-13-024) in IAEA projekta 16199/R0.

Literatura

- Araguas-Araguas, L., Fröhlich, K., Rozanski, K. (2000). Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. *Hydrol. Process.* 14: 1341-1355.
- Brenčič, M., Poltnig, W. (2008). Podzemne vode Karavank: skrito bogastvo = Grundwasser der Karawanken: Versteckter Schatz. Ljubljana: Geološki zavod Slovenije; Graz: Joanneum Research Forschungsgesellschaft, 144 p.
- Cegnar, T. (2012 a). Naše okolje, Bilten Agencije RS za okolje, letnik XIX, št. 3.
- Cegnar, T. (2012 b). Naše okolje, Bilten Agencije RS za okolje, letnik XIX, št. 4.
- Dolinar, M., Frantar, P., Kurnik, B. (2008). Značilnosti vodne bilance Slovenije v obdobju 1971-2000. *Mišičev vodarski dan 2008*, 19-25.
- Dolinar, M. (2010). Spremenljivost podnebja v Sloveniji. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, 12 p.
- Frantar, P., Nadbath, M., Ulaga, F. (2008). Vplivni dejavniki na vodno bilanco. In Frantar P., Ed., *Vodna bilanca Slovenije 1971-2000*. Ljubljana. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, 15-27.

- Meteorološki arhiv Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) in <http://meteo.si>
- Ogrinc, N., Kanduč, T., Stichler, W., Vreča, P. (2008). Spatial and seasonal variations in $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values in the river Sava in Slovenia. *Journal of Hydrology* 359: 303-312.
- Rozanski, K., Gonfiantini, R., Araguas-Araguas, L. (1991). Tritium in the global atmosphere: distribution patterns and recent trends. *Journal of Physics G* 17: S523-S536.
- Vertačnik, G., Sinjur, I., Ogrin, M. (2007). Temperature comparison between some Alpine dolines in winter time. 29th International Conference on Alpine Meteorology. Chambéry, France. http://www.cnr-meteo.fr/icam2007/ICAM2007/extended/manuscript_95.pdf
- Vreča, P., Krajcar Bronić, I., Horvatinčić, N., Barešić, J. (2006). Isotopic characteristics of precipitation in Slovenia and Croatia: Comparison of continental and maritime stations. *Journal of Hydrology* 330: 457-469.
- Vreča, P., Brenčič, M., Leis, A. (2007). Comparison of monthly and daily isotopic composition of precipitation in the coastal area of Slovenia. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 43: 307-321.
- Vreča, P., Krajcar Bronić, I., Leis, A., Brenčič, M. (2008). Isotopic composition of precipitation in Ljubljana (Slovenia). *Geologija* 52: 169-180.
- Vreča, P., Brenčič, M. (2009). Izotopska sestava padavin v Sloveniji in njen pomen za raziskave kroženja vode. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008, Ljubljana, 7-18.
- Vreča, P., Brenčič, M., Sinjur, I., Vertačnik, G. (2011). Stratigrafija snežnih profilov na Planini Javornik in Mrzli Komni. *Geološki zbornik* 21, Ljubljana, str. 154.
- Vreča, P., Brenčič, M., Sinjur, I., Sokratov, S.A. (2012). Detail isotopic stratigraphy of snowpack - case study from Julian Alps (Slovenia). *Geophysical Research Abstracts*, Vienna, vol. 14, str. 5893.

Modeliranje možnih nezgodnih izpustov iz NE Krško z Lagrangeevim modelom delcev

Borut Breznik^{*}, Primož Mlakar^{**}, Marija Zlata Božnar^{**}, Boštjan Grašič^{**}

Povzetek

V tem članku je podrobno predstavljena programska oprema »DOZE« za izračun doz ob nezgodnem dogodku, ki so jo avtorji tega članka razvili z uporabo naprednega modela razširjanja onesnaženja v ozračju družbe Arianet. Programska oprema »DOZE« uporablja vhodne podatke iz informacijskega sistema jedrske elektrarne in okoljskega informacijskega sistema ter uporabniku omogoča izračun vseh faz, ki so potrebne za oceno doze radioaktivnega sevanja, ki jo lahko prejme prebivalstvo. Glavni moduli programske opreme »DOZE« ocenjujejo sestavo radionuklidov pred sprostitvijo na osnovi meritev delovanja reaktorja in relevantnih meritev v nuklearni elektrarni; moduli na vsake pol ure obdelajo lokalne meteorološke parametre in nato z uporabo Lagrangeevega modela razširjanja onesnaženja v ozračju ocenijo količino radioaktivnega sevanja, ki jo prejme prebivalstvo v okolici jedrske elektrarne. Z modelom ponazorimo poti izpusta radioaktivnih snovi in parametre izpusta glede na dejansko zasnovo elektrarne. Za izračun doze se pripravi optimizirana sestava radionuklidov. Program se lahko uporablja v dveh načinih: neposredno povezano s parametri stanja v jedrski elektrarni, ki so pomembni za izpust, ali brez povezave z ročnim spremljanjem vhodnih podatkov. Predhodno izbrani scenariji jedrske nesreče na podlagi verjetnostnih izračunov ocene varnosti so prav tako na voljo za uporabo brez povezave ali za vajo. Model območja obsega 25×25 km in poteka po razgibanem terenu z uporabo validiranega numeričnega modela razširjanja onesnaženja na osnovi Lagrangeevega modela delcev.

Ključne besede: prognoza doz, radioaktivno sevanje, Lagrangeev model delcev razširjanja onesnaženja v ozračju

Key words: dose projection, radioactivity, Lagrangian particle air pollution dispersion model

Uvod

NEK že več kot desetletje uporablja programski paket »DOZE« za izračun doz zaradi radioaktivnega sevanja na področju spremljanja delovanja jedrske elektrarne in pri izračunih razširjanja onesnaženja v ozračju. Enako programsko opremo uporabljajo tako NEK kot tudi ekipe Uprave za jedrsko varnost Republike Slovenije, ki delujejo v izrednih razmerah. Končna posodobitev programske opreme je bila predvidena za leto 2012.

Modul uporablja oceno sestave radionuklidov na podlagi izračunov dejavnosti reaktorja skupaj s temperaturo jedra in ukrepi za zadrževanje radionuklidov. Lokalni diagnostični parametri in meteorološki model se uporabljajo rutinsko vsake pol ure. Z modelom ponazorimo poti sproščanja radioaktivnih snovi in parametre sproščanja glede na dejansko zasnovane poti v jedrski elektrarni. Radionuklidi so izbrani na podlagi njihovega pomena za stopnjo zadržane količine radioaktivnega sevanja in na podlagi izračunov koncentracije radionuklidov v okolju [1]. Program se lahko uporablja v dveh načinih: z neposredno povezavo s parametri stanja v jedrski elektrarni, ali brez povezave, z ročnim spremljanjem

^{*} Nuklearna elektrarna Krško, d.o.o., Vrbina 12, SI-8270, Krško, Slovenija

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

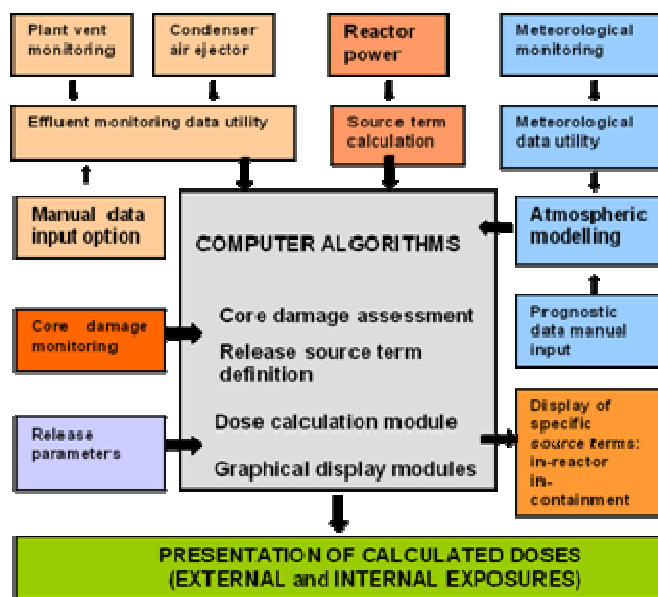
vhodnih podatkov. Predhodno izbrani scenariji jedrske nesreče na podlagi verjetnostnih rezultatov ocene varnosti so prav tako na voljo za uporabo brez povezave ali za vajo.

Posodobljena programska oprema zagotavlja uporabnikom prijazno navigacijo, izboljšano grafiko zemljevida za model območja v izmeri 25×25 km, povezavo do informacijskega sistema za procese v jedrski elektrarni za primarni sistem reaktorja in do podatkov o zadrževanju in filtriranju, izboljšan in validiran izračun količine radioaktivnega sevanja zaradi dvignjenega radioaktivnega oblaka nad kompleksnim terenom z uporabo validiranega numeričnega Lagrangeevega modela delcev ter novo aplikacijo za simulacijo nesreč. Statistika razredčitvenih koeficientov se lahko uporablja za redni mesečni izračun doz radioaktivnega sevanja ob običajnem delovanju. V programsko opremo za izračun doz radioaktivnega sevanja je mogoče preprosto vključiti nadgradnjo za varnost jedrske elektrarne v prihodnosti in poti sproščanja s pasivnim filtrom za zadrževanje.

Moduli za izračun doz radioaktivnega sevanja

Glavni moduli programa so zasnovani tako, da določajo naslednje parametre: sestavo radionuklidov, poškodbe sredice reaktorja, sestavo sproščenih radionuklidov, kritične poti sproščanja, meteorološke razmere in model razširjanja onesnaženja v ozračju.

Količina radioaktivnega sevanja se izračuna za poti, ki so zelo izpostavljene pri zgodnji fazi sproščanja, vključno z vdihavanjem, zunanjim sevanjem iz oblaka in zunanjim sevanjem zaradi usedanja. Namen modulov je zagotoviti hitro projekcijo količine radioaktivnega sevanja za predvidevanje stanja v okolju. Rezultate je mogoče predstaviti v različnih oblikah, prav tako pa je mogoče predstaviti tudi izogibno dozo.



Slika 1 - Diagram poteka modulov

Sestava radionuklidov v sredici reaktorja

Aktivnost radionuklidov je bila izračunana s pomočjo kode računalniškega programa SCALE za tristopenjski gorivni cikel zgorevanja (Kadivnik, 2012). Ta se uporablja kot vrednost stacionarnega stanja v modulu za izračun doze radioaktivnega sevanja, ki

upoštevata tudi prehodne pojave pri moči reaktorja in ves čas izračunava radioaktivnost niza pomembnih radionuklidov.

Za izračun aktivnosti v realnem času smo pripravili splošne algoritme (Breznik, 2012), pri čemer smo upoštevali tudi razpad verige nekaterih pomembnih nuklidov. Kot primer je izračunana takojšnja radioaktivnost izotopa I-132 ali Xe-133, kot je opisana v spodnji (1) formuli:

$$A_2(t) = A_0 \exp(-\lambda_2 t) + P A_1 (1 - \exp(-\lambda_2 t)) + (\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)) (A_0 - P A_1) (\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)) \quad (1)$$

V formuli (1) se indeks 1 uporablja za starševski nuklid in indeks 2 za hčerinski nuklid, A_0 predstavlja začetno aktivnost pred spremembo moči, P relativno moč in A_1 aktivnost stacionarnega stanja pri polni moči.

Bolj zapleten je samo algoritem za Xe-135, ki upošteva tudi zgorevanje pri višji moči.

Natančno spremljanje radioaktivnosti v jedru je pomembno pri izotopih joda, poleg tega pa zmanjšuje negotovost pri določanju celotne sestave radionuklidov pri sproščanju.

Sestava radionuklidov pri sproščanju in poti sproščanja

Programska oprema omogoča hitro in grobo določitev sestave radionuklidov, pri čemer uporablja tudi postopke NEK, ki temeljijo na enakem pristopu, kot je opisan v standardnih industrijskih smernicah za ocenjevanje škode v sredici (Lutz, 1999).

Če računalniški sistem, ki spremlja delovanje elektrarne, in vnosi za spremljanje radioaktivnega sevanja delujejo, je večina relevantnih podatkov v programski opremi na voljo sproti. Sestavo radionuklidov je mogoče določiti z uporabo oken za še natančnejše meritve vzorcev, vendar te zahtevajo ročen vnos.

Osnovni podatki so na voljo prek termočlenov na izhodu sredice in monitorjev, ki spremljajo zajeto sevanje. Računalniški sistem jedrske elektrarne nudi uporabnikom programa dodatne informacije o stanju jedrske elektrarne.

Poti sproščanja se izberejo ročno s pomočjo ocen na osnovi meritev in indikacij v elektrarni ali v okolju. V primeru projektnega izpuščanja je mogoče izbrati tudi faktorje učinkovitosti filtra.

Deleže sproščanja pri zadrževanju je mogoče določiti na podlagi ocene poškodbe reaktorja s pomočjo meritev termočlenov in/ali meritev v zadrževalnem hramu s pomočjo dveh monitorjev sevanja (Breznik, 2012).

Model razširjanja onesnaževanja v ozračju

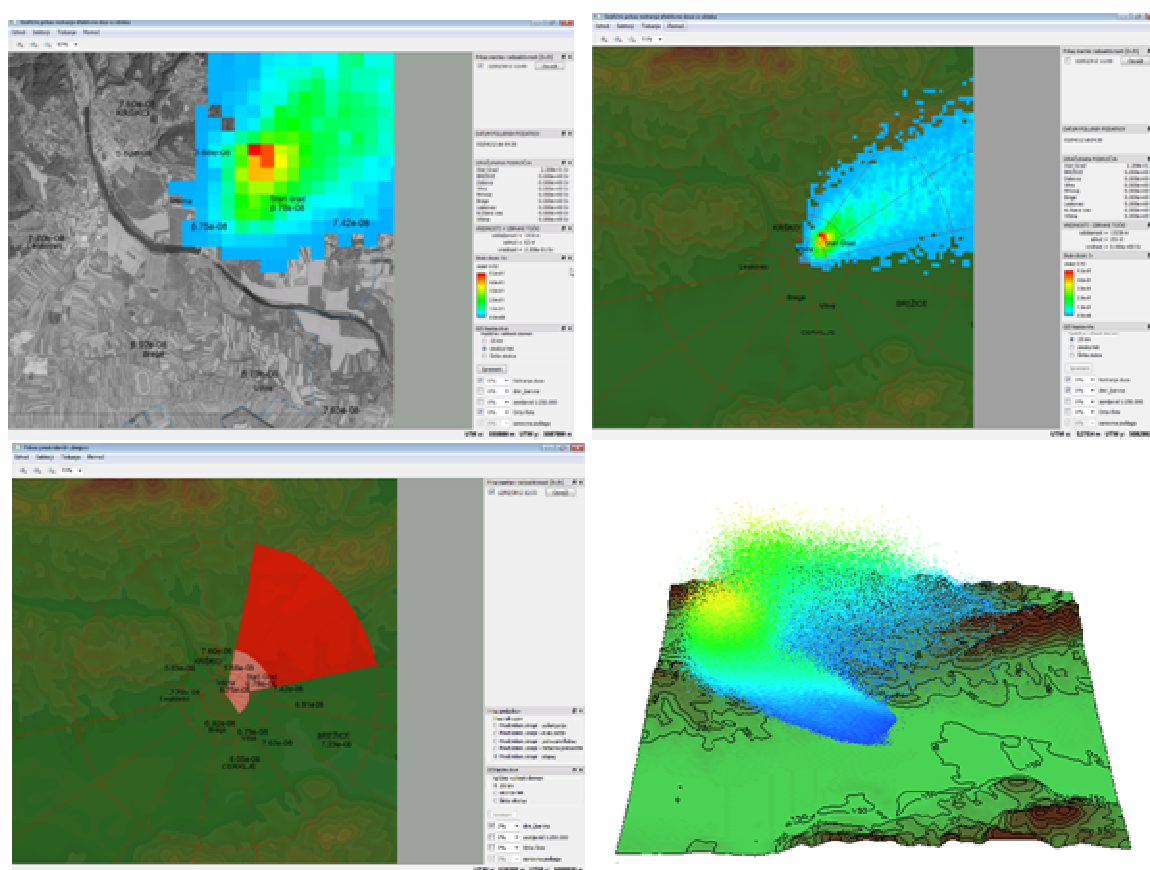
Model razširjanja radioaktivnih snovi v ozračju je eden od ključnih korakov za realistični izračun doze radioaktivnega sevanja v primeru jedrske nevarnosti. NEK je postavljena v delno zaprto kotlino, obdana s kompleksnimi hribovitimi značilnostmi. Zaradi razgibanega terena in zaradi tega zahtevnih meteoroloških značilnosti je to modeliranje zelo zahtevna naloga.

Od leta 2002 se za območje okrog Krškega v izmeri 25×25 km uporablja sodoben numerični Lagrangeov model delcev razširjanja radionuklidov v ozračju Spray (podjetja Arianet, Milano), ki deluje 24 ur na dan, 365 dni v letu (Mlakar et. al., 1997, Božnar et al., 2006, Breznik et al., 2004). Model uporablja diagnostični meteorološki opis območja izdelan z uporabo modela SWIFT s predprocesorjem (prav tako izdelek podjetja Arianet).

Modeliranje meteorologije temelji na več različnih meritvah. Te vključujejo meteorološki stolp v bližini jedrske elektrarne (meri veter, temperaturo in relativno vlažnost zraka do 70 m ter globalno sončno sevanje) in merilnik vertikalnega profila vetra SODAR (do 500 m nad tlemi). Postaje v Krškem, Brežicah in Cerkljah beležijo meteorološke meritve na tleh z merjenjem hitrosti vetra na višini 10 metrov.

Model deluje samodejno in izračunava razredčitvene koeficiente redčenja (na podlagi enote emisije) vsake pol ure na podlagi novih meteoroloških podatkov. Rezultati so na voljo v 2D in 3D predstavitvi in so na voljo pooblaščenim uporabnikom v jedrski elektrarni. V izrednih razmerah so koeficienti redčenja samodejno na voljo kot podatki za drugo fazo izračuna količine radioaktivnega sevanja – pomnoženi s sestavo radionuklidov pri sproščanju predstavljajo osnovo za izračun količine radioaktivnega sevanja.

Nadzor kakovosti vhodnih podatkov je v največji možni meri del samodejnega režima. Najprej se vsi dinamični meteorološki podatki primerjajo s številnimi nadzornimi sistemi kakovosti fizikalnih in drugih matematičnih količin. Na koncu pa se zanesljivost rezultatov modela ocenjuje na podlagi števila meteoroloških vnosov. V primeru okvare merilnika SODAR so rezultati, pridobljeni zgolj z ostalimi meritvami, manj zanesljivi.



Slika 2 - Predstavitve rezultatov na osnovi sistema GIS: efektivna doza iz sevanja oblaka (2x), intervencijski ukrepi in predstavitev oblaka v obliki 3D

Posodobitev programske opreme

Eden od razlogov za naročanje posodobitev programske opreme so bile dodatne, uporabnikom prijazne funkcije. Tehtnejši razlogi pa so bili potreba po bolj razvitih geografskih informacijskih zaslonih, izboljšanjem izračunu količine radioaktivnega sevanja iz radioaktivnega oblaka (daleč od prejemnika sevanja), povezava do dodatnih sprotnih

meritev znotraj zadrževalnega hrama ter nekateri drugi. Upoštevali smo tudi izračun izogibne doze na celotno telo in ščitnico z možnimi protiukrepi.

Validacija modela razširjanja onesnaženja v ozračju

Zaradi razgibanega terena je izjemno pomembno, da se izbere model razširjanja onesnaževanja v ozračju, ki bo dokazano posredoval realne rezultate za takšne pogoje v določenem prostoru in času. Modelirni sistem za Krško je bil izbran, ker je bil validiran tudi na drugih področjih Slovenije še pred namestitvijo v NEK (Božnar et al., 1994a, Božnar et al., 2012). Validacija je potekala na osnovi SO₂ kot »sledilniku« blizu Termoelektrarne Šoštanj. Validacije so pred kratkim potekale tudi čez kanjon reke Save v zasavski regiji, ki meji na krško regijo (Božnar et al., 2012, Mlakar et al., 2012). Uspešne validacije so bile objavljene v več znanstvenih člankih v revijah in na konferencah (Božnar et al., 2004b, Grašič et al., 2008b, Grašič et al., 2011, Božnar et al., 2008, Grašič et al., 2008a, Božnar et al., 2010). Vsi rezultati validacije kažejo dobro ujemanje z realnim stanjem. Za diagnostično uporabo je bilo ugotovljeno ujemanje v prostoru in času v »oknu« ene mrežne celice z napako v lokaciji (navadno od 100 do 250 m) in enim ali dvema časovnima korakoma (pol ure ali eno uro).

Zaključki

Modul za izračun doz radioaktivnega sevanja in izračun doz prebivalstva, kot je opisan tem članku, je praktično orodje za odločanje v primeru radioaktivnega izpusta. Modul je bil zasnovan na osnovi vhodnih podatkov in smernic v NEK in je povezan z najsodobnejšim modelom razširjanja radionuklidov v ozračju. Prednost tega sistema je neposredna povezava do podatkov o delovanju elektrarne, pomembnih za prognozo radioaktivnega izpusta in oceno doz. Te lastnosti omogočajo lažje izračune doz radioaktivnega sevanja v primeru jedrske nevarnosti in večjo varnost elektrarne.

Zahvala

Avtorji se za pripravo podatkov o delovanju sredice reaktorja zahvaljujejo M. Božič, D. Kadivnik in B. Kurinčič iz oddelka za gorivo v NEK, D. Vehovarju iz računalniškega oddelka pa za pomoč pri namestitvi programske opreme.

Raziskavo je delno financirala ARRS – Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, projekta št. L1-2082 in L1-4154 (A).

Literatura

Božnar, M. Z., Brusasca, G., Cavicchioli, C., Faggian, P., Finardi, S., Minella, M., Mlakar, P., Morselli, M. G., Sozzi, R. (1994a). Model evaluation and application of advanced and traditional gaussian models on the experimental Šoštanj (Slovenia, 1991) campaign. V: CUVELIER, C. (ur.). Intercomparison of Advances Practical Short-Range Atmospheric Dispersion Models: Proceedings of the Workshop: August 30 - September 3, 1993, Manno-Switzerland, (Joint Research centre, EUR 15603 EN). Brussels: ECSC-EEC-EAEC, 1994, pages 112-121.

- Božnar, M. Z., Brusasca, G., Cavicchioli, C., Faggian, P., Finardi, S., Mlakar, P., Morselli, M. G., Sozzi, R., Tinarelli, G. (1994b). Application of advanced and traditional diffusion models to an experimental campaign in complex terrain. V: BALDASANO, J... M. (ur.). Second International Conference on Air Pollution, Barcelona, Spain, 1994. Air Pollution II. Volume 1, Computer simulation. Southampton; Boston: Computational Mechanics Publications, cop. 1994, pages 159-166.
- Božnar, M. Z., Grašič, B., Mlakar, P. (2010) Air pollution dispersion modelling around thermal power plant Šoštanj in complex terrain: model verification and regulatory planning. V: 31st NATO/SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, September 27 - October 1, 2010 Torino Italy. Conference abstracts. [S. l.: s. n.], 4 pages
- Božnar, M. Z., Mlakar, P., Breznik, B., Tinarelli, G. (2006). Use of Lagrangean particle model for air pollution dispersion for radioactive risk assessment in complex terrain. V: Sixth Annual Meeting of the European Meteorological Society (EMS)[and] Sixth European Conference on Applied Climatology (ECAC): Ljubljana, Slovenia, 4-8 September 2006, (EMS annual meeting abstracts, volume 3). Ljubljana: European Meteorological Society: Agencija RS za okolje.
- Božnar, M. Z., Mlakar, P., Grašič, B. (2008). Air pollution dispersion modelling around Thermal power plant Trbovlje in complex terrain: model verification and regulatory planning. V: BORREGO, C. (ur.), MIRANDA, Ana Isabel (ur.). Air pollution modeling and its application XIX: [proceedings of the 29th NATO/OCCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, Aveiro, Portugal, 24-28 September 2007], (NATO science for peace and security series, Series C, Environmental security). Dordrecht: Springer, cop. 2008, pages 695-696.
- Božnar, M. Z., Mlakar, P., Grašič, B. (2012). Short-term fine resolution WRF forecast data validation in complex terrain in Slovenia. International journal of Environment and Pollution, accepted for publication.
- Breznik, B. (1997). Postopek za hitro napovedovanje radioloških doz, Magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, FMF, Ljubljana.
- Breznik, B. (2012). Activity calculation for DOZE Computer Programme, Internal document NEK, DCM-RP-093, NEK Vrbina 12, Krško.
- Breznik, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P., Tinarelli, G. (2004). Dose projection using dispersion models: [presented at 8th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 14-17 october 2002, Sofia, Bulgaria]. Int. j. environ. pollut., vol. 20, p. 278-285.
- Grašič, B., Mlakar, P., Božnar, M. Z., Tinarelli, G. (2008a) Enhanced evaluation of a Lagrangian-particle air pollution model based on a Šaleška region field data set. V: BREBBIA, Carlos Alberto (ur.), LONGHURST, James W. S. (ur.). Air pollution XVI: [reviewed papers accepted for the Sixteenth International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution held in Skiathos, Greece, September 2008], (WIT transactions on ecology and the environment, vol. 116). Southampton: WIT, cop. 2008, pages 39-48.
- Grašič, B., Božnar, M. Z., Mlakar, P., Tinarelli, G. (2008b). Re-evaluation of the Lagrangian particle modelling system on an experimental campaign in complex terrain. Nuovo cimento Soc. ital. fis., C Geophys. space phys., 2008, vol. 30, no. 6, pages 557-575, doi: 10.1393/ncc/i2007-10257-3.
- Grašič, B., Mlakar, P., Božnar, M. Z. (2011). Method for validation of Lagrangian particle air pollution dispersion model based on experimental field data set from complex terrain. Air Pollution / Book 1, ISBN 978-953-307-511-2, Book edited by: Dr. Farhad Nejadkoorki, InTech Open Access Publisher, 2011. <http://www.intechopen.com/books/advanced-air-pollution/method-for-validation-of-lagrangian-particle-air-pollution-dispersion-model-based-on-experimental-fi>
- Kadivnik, D. (2012). Določitev aktivnosti sredice na BOC, MOC in EOC za izračun "Source Term" (NUID), CNA12005, Internal document NEK, NEK Vrbina 12, Krško.
- KOOREG (2012). <http://www.kvalitetazraka.si/zasavje/> (23.8.2012)
- Lutz, R.J. (1999). Westinghouse Owners Group Core Damage Assessment Guidance", WCAP-14696-A, Rev. 1, Westinghouse EC, P.O. Box 355, Pittsburgh, November 1999.

- Mlakar, P., Božnar, M. Z., Breznik, B., Kovač, A. (1997). Modelling of air pollutants releases from the Krško Nuclear Power Plant. V: 4th Regional Meeting Nuclear Energy in Central Europe, 7-10 September 1997, Bled, Slovenia. Book of abstracts. Ljubljana: Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije = Nuclear Society of Slovenia: Jožef Stefan Institute, 1997, pages 16.
- Mlakar, P., Božnar, M. Z., Grašič, B. (2012a). Zasavje canyon regional online air pollution modelling system in highly complex terrain – description and validation. International journal of Environment and Pollution, accepted for publication.
- Mlakar, P., Grašič, B., Božnar, M. (2012b). Validation of small scale prognostic air pollution modeling system in highly complex terrain. V: 32st NATO/SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, 7-11 May, 2012, Utrecht, The Netherlands. ITM 2012. [S. l.: s. n.], 2012, 4 pages

Izdelava Huffovih krivulj in njihova analiza za izbrane padavinske postaje v Sloveniji

Domen Dolšak, Mojca Šraj*

Povzetek

Prispevek predstavlja izdelavo, rezultate in analizo Huffovih krivulj za izbrane meteorološke postaje: Ljubljana, Murska Sobota, Novo Mesto in Portorož. Za meteorološko postajo Ljubljana smo obdelali podatke od leta 1948 do 2010 in za ostale meteorološke postaje od leta 1970 do 2011. Pri primerjavi rezultatov smo ugotovili razlike v obliki Huffovih krivulj in tudi v številu neviht, ki so ustrezale definiciji neodvisnega padavinskega dogodka. Razlike med postajami so bile dovolj velike, da lahko zaključimo, da ne moremo predpostaviti ene same oblike Huffovih krivulj za celotno Slovenijo, kar narekuje izdelavo Huffovih krivulj tudi za ostale meteorološke postaje.

Ključne besede : Huffove krivulje, padavine, statistična analiza padavin, normirane brezdimenzijske krivulje padavin, čas med padavinskimi dogodki

Key words : Huff curves, precipitation, statistical analysis of precipitation, dimensionless mass curves, time between storms

Uvod

Za izračun površinskih odtokov in za določanje projektnega pretoka potrebujemo sintetične histograme padavin z določeno povratno dobo. Za izdelavo sintetičnih histogramov je potrebno vedeti, v katerem delu padavinskega dogodka se tipično zgodi največja intenziteta padavin oz. v kateri četrtini trajanja padavin se nahaja največji delež padlih padavin za neko porečje. Ta podatek lahko razberemo iz brezdimenzijskih Huffovih krivulj, ki temeljijo na padavinskih podatkih, pridobljenih na mreži ombrografov.

Huff (1967) je te krivulje prvič izdelal za zvezno državo Illinois v ZDA. Njegova analiza je temeljila na 15-minutnih padavinskih podatkih za obdobje 12 let. V tem času je zajel 261 neviht in iz njih izdelal kumulativne brezdimenzijske krivulje, s katerimi je lahko primerjal posamezne nevihte in njihove intenzitete.

S pomočjo teh krivulj je Huff (1967, 1990) ugotovil, da se največji odstotek količine padlih padavin znotraj posameznega neodvisnega padavinskega dogodka razlikuje med posameznimi kvartili. Ugotovil je namreč, da v prvem kvartilu pade največ padavin v prvi četrtini časa, v četrtem pa v zadnji četrtini časa. Ugotovil je tudi, da se dve tretjini neodvisnih padavinskih dogodkov nahajata v prvem in drugem kvartilu.

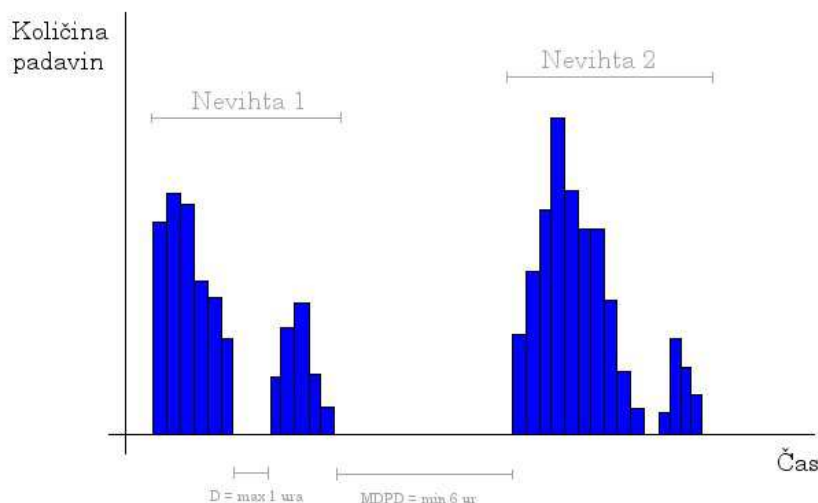
Ker Huffove krivulje za Slovenijo še niso izdelane, smo se odločili za njihovo izdelavo in analizo. Zanimalo nas je, v katerem delu nevihte se tipično zgodi največja intenziteta padavin in kako nanjo vpliva čas trajanja posamezne nevihte. Dodatno so nas zanimale tudi razlike med posameznimi meteorološkimi postajami in možnost predpostavitev ene oblike Huffovih krivulj za celotno Slovenijo. Tako smo izdelali Huffove krivulje za meteorološke postaje Ljubljana, Murska Sobota, Novo Mesto in Portorož. Za meteorološko postajo Ljubljana smo obdelali podatke od leta 1948 do 2010 in za ostale meteorološke postaje od leta 1970 do 2011.

* UL FGG, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

Metodologija in podatki

Podatke za izdelavo Huffovih krivulj smo pridobili na Agenciji Republike Slovenije za okolje (ARSO, 2012). Osnovni podatki so bili 5-minutni zapisi pluviografa. Za lažjo obdelavo podatkov smo združili 5-minutne intervale v 15-minutne. Tudi Huff (1990) je namreč uporabljal 15-minutne intervale, podobno tudi ostali avtorji (Gonzales Nieves, 2005).

Nato smo se odločili za izbiro kriterijev, ki definirajo neodvisen padavinski dogodek oziroma posamezno nevihto. Kriterije smo izbrali na podlagi natančnih analiz podatkov za postajo Ljubljana in na podlagi ugotovitev in priporočil drugih raziskovalcev (Huff, 1967; Huff, 1990, Azli in Rao, 2010). Minimalni čas pred oz. po nevihti, ko ni dežja (MDPD), smo izbrali 6 ur, minimalno količino padavin 12,7 mm, minimalno trajanje posamezne nevihte vsaj 3 ure, čas znotraj nevihte, ko ni dežja, eno uro (slika 1). V primeru Ljubljane smo tako dobili za obdobje od 1948 do 2010 179 neviht, ki ustrezajo pogojem neodvisnega padavinskega dogodka.



Slika 1 - Shematični prikaz časov, ki definirajo določen neodvisni padavinski dogodek



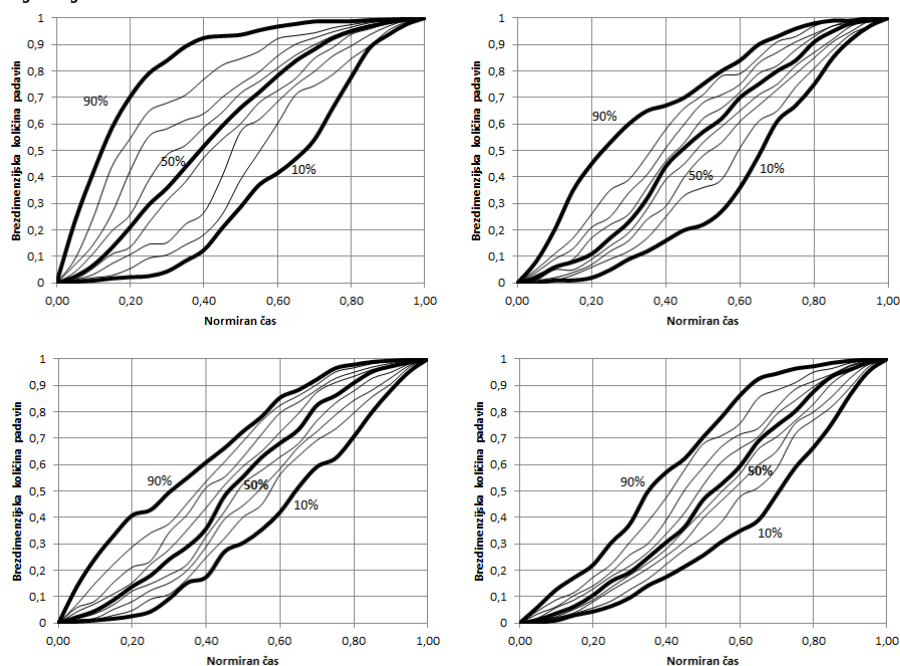
Slika 2 - Mreža padavinskih postaj z označenimi izbranimi postajami (Mreža postaj z registracijo padavin, 2007)

Vse nevihte, ki so ustrezale tem pogojem, smo shranili v posamezne datoteke, ki so vsebovale zaporedne 15-minutne količine padavin. Podatkom smo dodali časovno dimenzijo in normirali čas ter količino padavin. Nato smo padavine umestili v ustrezen kvartil glede na čas trajanja. Po Huffu (1967) v prvi kvartil sodijo padavine ki so krajše od 6 ur, v drugi kvartil sodijo padavine, ki trajajo od 6-12 ur, v tretjem kvartilu so padavine ki trajajo 12-18 ur in v četrtem kvartilu so padavine, ki so daljše od 18 ur. Za razdelitev na kvartile se je Huff odločil, ker se je izkazalo, da se časovna razporeditev količine padavin s trajanjem padavinskega dogodka spreminja.

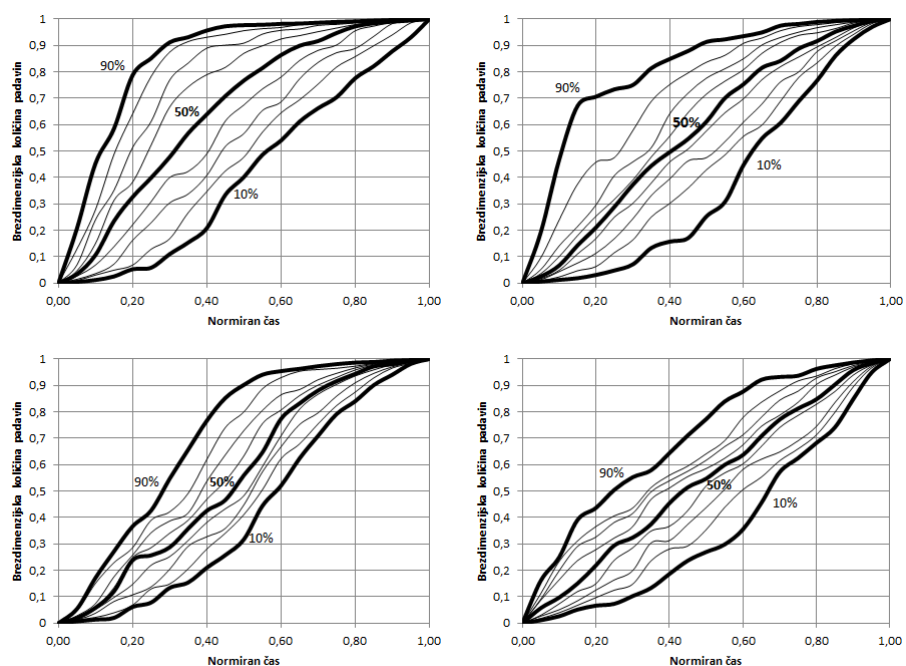
Huffove krivulje predstavljajo družino krivulj, ki so razdeljene glede na verjetnost in kvartil, v katerem se nahajajo. Poleg uvrstitve v posamezni kvartil, smo za vsak kvartil izdelali še percentilne krivulje in sicer 9 percentilnih krivulj na kvartil. Tako smo za posamezno meteorološko postajo dobili 4 družine brezdimenzijskih krivulj, ki predstavljajo posamezne kvartile, znotraj enega kvartila pa 10 do 90 percentilne krivulje. Končen rezultat za posamezno meteorološko postajo je 36 brezdimenzijskih krivulj, ki predstavljajo časovno razdelitev količine padavin.

Rezultati in analiza

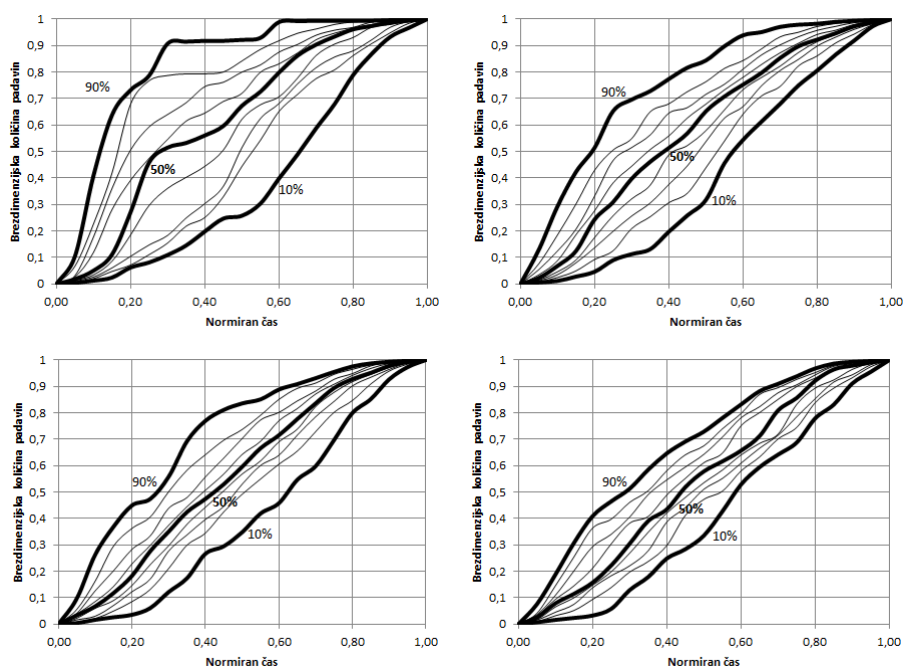
Število neviht, ki smo jih po izbranih kriterijih izločili, je za meteorološko postajo Ljubljana 179, za Mursko Soboto 125, za Novo mesto 155 in za Portorož 158 neviht. Pri podatkih za Ljubljano smo pričakovano dobili največ neviht, saj je bilo obdobje zajema podatkov najdaljše.



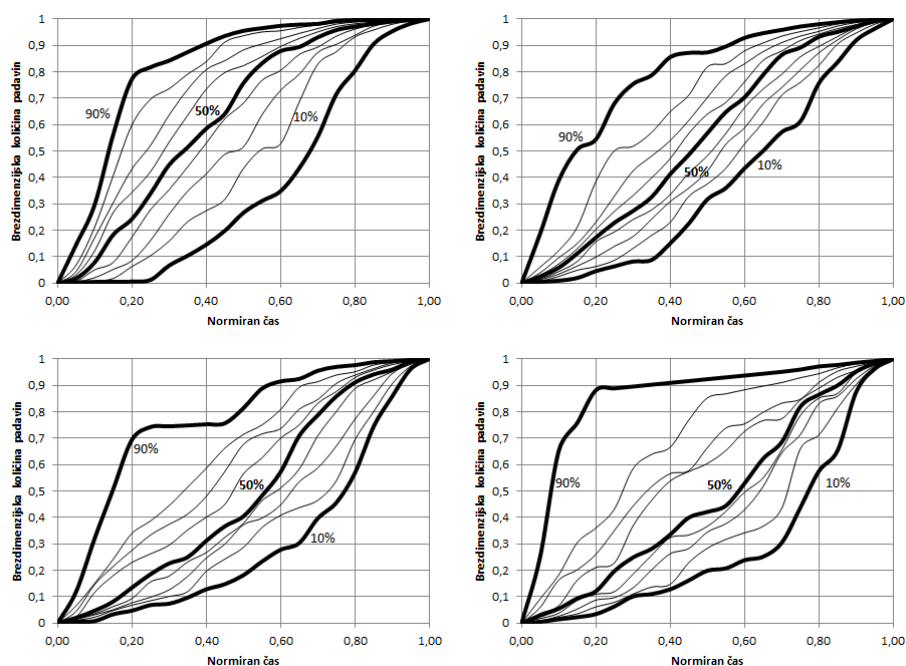
Slika 3 - Huffove krivulje za Ljubljano – levo zgoraj so krivulje za prvi kvartil, desno zgoraj za drugi kvartil, levo spodaj za tretji kvartil in desno spodaj so krivulje za četrti kvartil



Slika 4 - Huffove krivulje za Mursko Soboto - levo zgoraj so krivulje za prvi kvartil, desno zgoraj za drugi kvartil, levo spodaj za tretji kvartil in desno spodaj so krivulje za četrti kvartil.



Slika 5 - Huffove krivulje za Novo mesto - levo zgoraj so krivulje za prvi kvartil, desno zgoraj za drugi kvartil, levo spodaj za tretji kvartil in desno spodaj so krivulje za četrti kvartil.



Slika 6 - Huffove krivulje za Portorož - levo zgoraj so krivulje za prvi kvartil, desno zgoraj za drugi kvartil, levo spodaj za tretji kvartil in desno spodaj so krivulje za četrti kvartil.

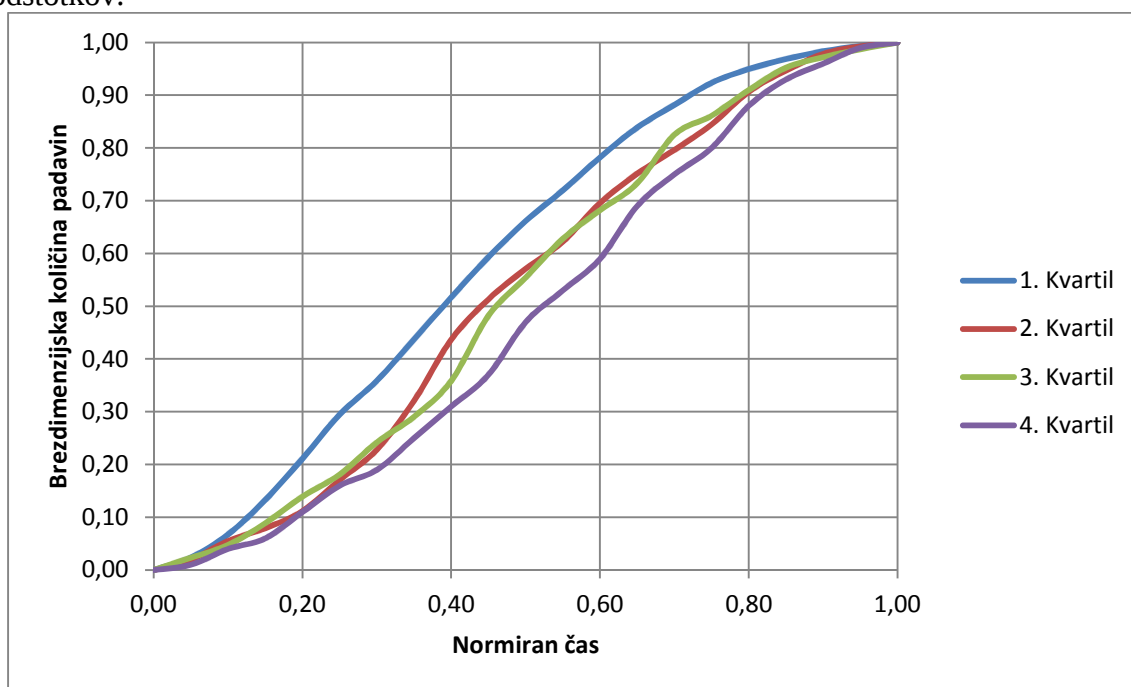
Pri izdelavi končnih Huffovih krivulj nas je zanimalo, kakšna je časovna razporeditev padavin znotraj padavinskega dogodka. S končnih krivulj je namreč razvidno, da je razporeditev zelo odvisna od kvartila, se pravi od časa trajanja nevihte in od lokacije meteorološke postaje. Izkaže se, da pri padavinah prvega kvartila pade največ padavin v prvi polovici trajanja. Tako v prvem kvartilu za Ljubljano in Novo mesto pade v prvi polovici časa 65 odstotkov padavin, v Murski Soboti 75 odstotkov, v Portorožu pa 80 odstotkov padavin (preglednica 1).

Preglednica 1 - Razporeditev neviht po kvartilih za izbrane meteorološke postaje

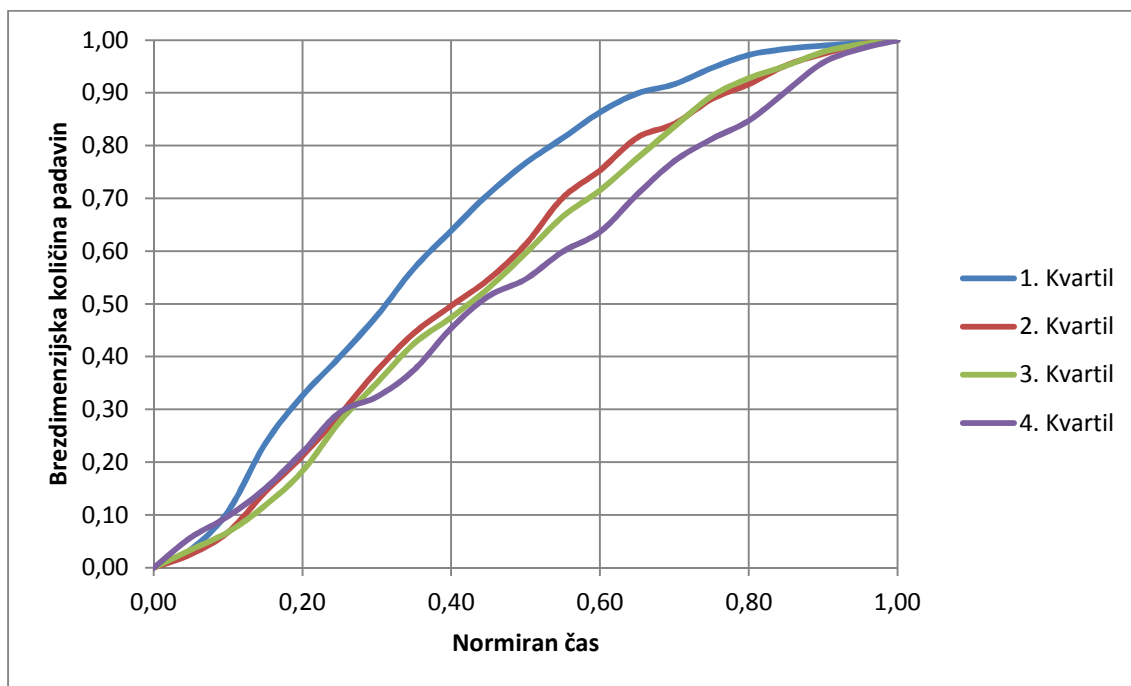
	1. kvartil	2. kvartil	3. kvartil	4. kvartil
Ljubljana	27%	31%	23%	19%
Murska Sobota	26%	45%	17%	13%
Novo mesto	18%	40%	26%	15%
Portorož	27%	41%	20%	12%

Opazimo lahko, da se z daljšanjem trajanja posamezne nevihte 50-percentilna krivulja pomika navzdol, kar pomeni, da se večja intenziteta premika proti drugemu delu trajanja nevihte (slika 7, 8,9 in 10). Razlika v padli količini padavin med 1. in 4. kvartilom ob normiranem času 0.5 znaša 20 odstotkov. Za meteorološko postajo Murska Sobota razlika še večja (slika 8). Razlika med 1. in 4. kvartilom je ob normiranem času 0.5 enaka 22 odstotkov. Zanimivo za Mursko Soboto pa je tudi to, da so si krivulje za 2., 3. in 4. kvartil zelo podobne in se ne razlikujejo med seboj za več kot 10 odstotkov. Pri 50-percentilnih krivuljah za Portorož, pa je mogoče opaziti največje razlike med kvartili. Skoraj vse krivulje se ob vsakem času razlikujejo med seboj za vsaj 5 odstotkov (slika 10). Razlika v

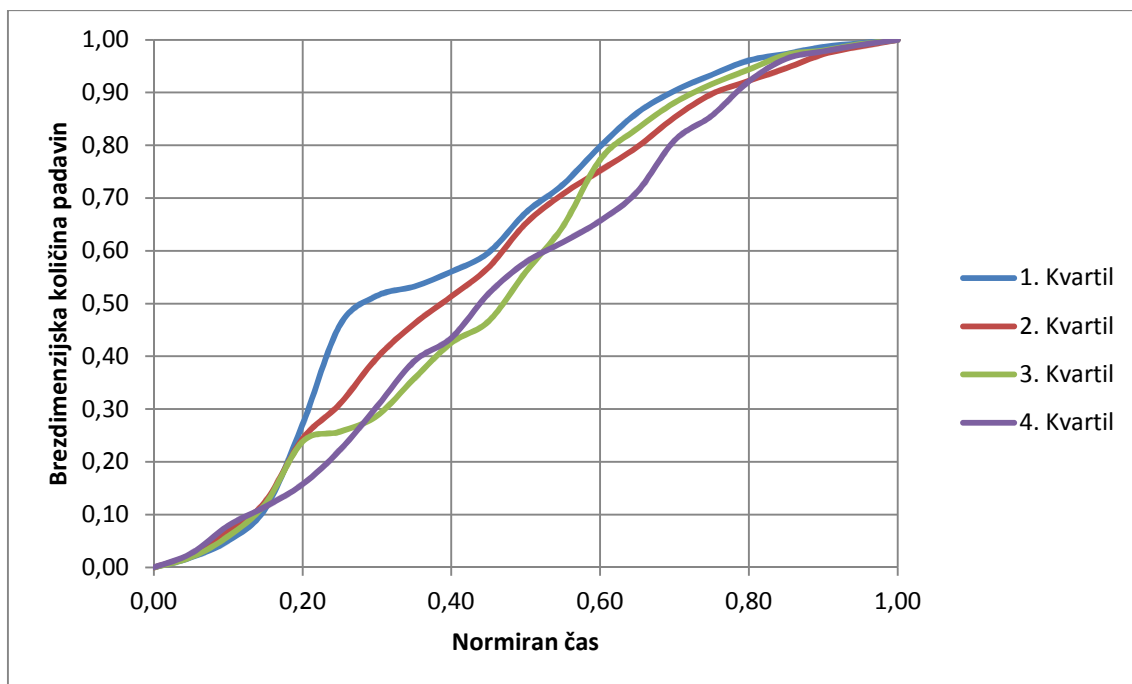
padli količini padavin med 1. in 4. kvartilom je ob normiranem času 0.5 enaka kar 34 odstotkov.



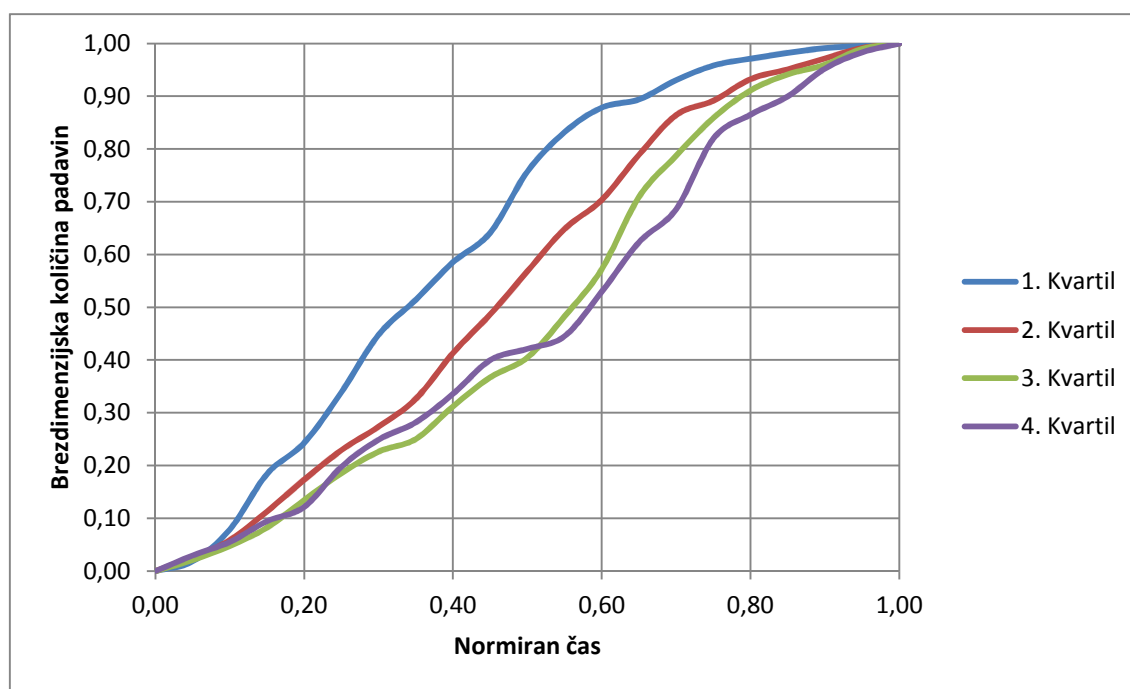
Slika 7 - 50-percentilne Huffove krivulje za Ljubljano za vse štiri kvartile



Slika 8 - 50-percentilne Huffove krivulje za Mursko Soboto za vse štiri kvartile



Slika 9 - 50-percentilne Huffove krivulje za Novo mesto za vse štiri kvartile



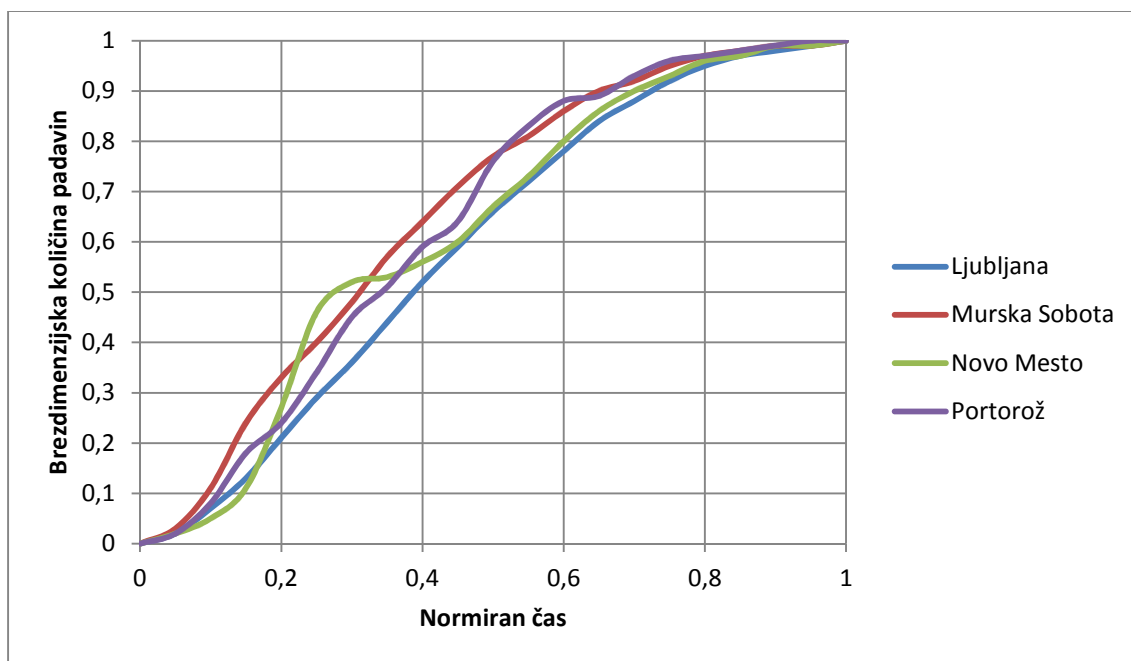
Slika 10 - 50-percentilne Huffove krivulje za Portorož za vse štiri kvartile

Zanimiva je tudi razporeditev neviht po samih kvartilih. Največ neviht se namreč nahaja v drugem kvartilu, ki predstavlja nevihte s trajanjem od 6 do 12 ur. Najmanj neviht se nahaja v četrtem kvartilu, ki predstavlja nevihte s trajanjem nad 18 ur. Zaradi robustnosti samih Huffovih krivulj (Bonta, 2004, Yen et al., 1980), lahko kvartile definiramo tudi drugače in s tem dobimo bolj enakomerno porazdelitev po kvartilih.

Primerjava 50-percentilnih krivulj za izbrane meteorološke postaje v prvem kvartilu pokaže očitne razlike v časovni razporeditvi količine padavin (slika 11). Za vse štiri kvartile se je izkazalo, da je krivulja za Mursko Soboto najvišje, za Ljubljano pa najnižje.

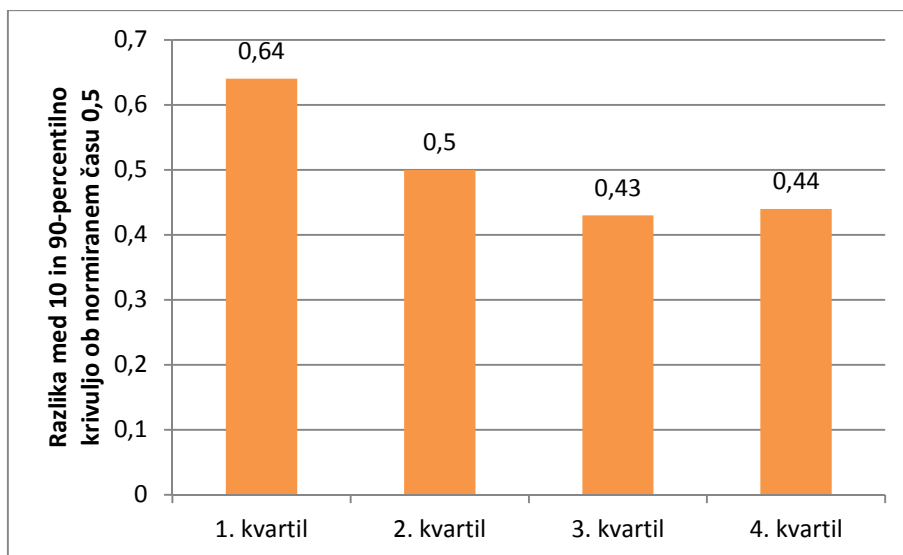
Krivulji za Novo mesto in Portorož pa se v vseh kvartilih v večini časa nahajata med omenjenima krivuljama in se prepletata.

Največje razlike med postajami smo opazili v tretjem kvartilu. Pri krivulji za Portorož je namreč opaziti, da je med normiranim časom 0.3 in 0.65 od ostalih krivulj nižja za povprečno 10 odstotkov.



Slika 11 - 50-percentilne Huffove krivulje za izbrane meteorološke postaje v prvem kvartilu

Pri analizi Huffovih krivulj za Ljubljano in Novo mesto smo opazili, da so razlike med 10- in 90-percentilno krivuljo v prvem kvartilu zelo velike. Razlika pa se s kvartili manjša, kar je razvidno na primeru Ljubljane (slika 12). Pri podatkih za Portorož je razlika največja v četrtem in prvem kvartilu, v ostalih dveh pa je za 10 odstotkov manjša. Pri meteorološki postaji Murska Sobota je največja razlika v drugem kvartilu, najmanjša pa v tretjem in četrtem. Razlike med 10- in 90-percentilno krivuljo ne sledijo v vseh primerih razporeditvi neviht po kvartilih, ki jih prikazuje preglednica 1.



Slika 12 - Razlika med 10- in 90-percentilno krivuljo ob normiranem času 0,5 za meteorološko postajo Ljubljana-Bežigrad

Zaključki

Huffove krivulje predstavljajo statistično povprečno odvisnost količine padavin od časa. Izdelava Huffovih krivulj za izbrane meteorološke postaje je pokazala dovolj velike razlike med njimi, da ne moremo predpostaviti ene oblike Huffovih krivulj za celotno Slovenijo ali kak večji del. Iz rezultatov lahko vidimo, da je smiselno izdelati Huffove krivulje še za ostale meteorološke postaje in njihove krivulje med seboj primerjati. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi Burke (1980) in Bonta (2008).

Razlike med samimi kvartili, se pravi med različnimi časi trajanja nevihte, so nam pokazale bistvene razlike v razporeditvi padavin in poziciji konice intenzitete. To dejstvo smo ugotovili pri vseh meteoroloških postajah. Z izbiro drugačnih mej kvartilov, se lahko izdela Huffove krivulje za specifične čase.

Poleg samih razlik med kvartili in meteorološkimi postajami, pa smo opazili tudi nekaj podobnosti in sicer opazen premik 50-percentilne krivulje navzdol od prvega do četrtega kvartila ter spreminjajoče razlike med 10 in 90-percentilno krivuljo glede na kvartil. Pomembna ugotovitev je tudi, da se večina neviht nahaja v drugem kvartilu. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi avtorji drugih podobnih študij (Huff, 1967; Huff, 1990; Azli in Rao, 2010; Gonzales Nieves, 2005).

Literatura

- ARSO (2012). Padavinski podatki. Message to: Zupančič, B., 30.3.2012. Osebna komunikacija.
- Azli, M., Rao, A.R. (2010). Development of Huff curves for Peninsular Malaysia. *Journal of Hydrology*, Vol 388: str. 77-84.
- Bonta, J., V. (2004). Development and utility of Huff curves for disaggregating precipitation amounts. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol 20: str. 641–653.
- Bonta, J., V. (2004). Stochastic simulation of storm occurrence, depth, duration, and within-storm intensities. *American Society of Agricultural Engineers*, Vol 47: str. 1573–1584.
- Dolšak, D. 2012.

- Bonta, J., V., Nayak, A. (2008). Characterizing Times Between Storms in Mountainous Areas. Transactions of the ASABE. 51(6): str. 1-16.
- Burke, C., B., Rao, A., R., Gray, D., D. (1980). Duration and temporal distribution of storms in urban drainage design. International Symposium on Urban Storm Runoff, str. 71–79.
- Huff, F. (1967). Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms. Water Resources Research, 3: 1007–1019.
- Huff, F. (1990). Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois. Illinois State Water Survey, Champaign, Circular 173: 18 str.
- Gonzales Nieves, V. (2005). Temporal rainfall distributions in Puerto Rico
- Mreža postaj z registracijo padavin. (2007).
- http://www.arso.gov.si/vreme/o%20meritvah/mreza_ombrografi.html (24. 6. 2012.)
- Yen, C., Chow, T. (1980). Design Hyetographs for Small Drainage Structures, Journal of the Hydraulics Division, ASCE 106: 1055–1076.

Izbira metode pri verjetnostnih analizah visokovodnih konic

Nejc Bezak^{*}, Mitja Brilly^{*} in Mojca Šraj^{*}

Povzetek

Kvalitetno izvedena verjetnostna analiza visokovodnih konic je pogoj za določitev povezave med ocenjeno vrednostjo pretoka in pripadajočo povratno dobo oziroma verjetnostjo. Analizirali smo 58 let podatkov dnevnih vrednosti pretokov z vključenimi maksimalnimi konicami z vodomerne postaje Litija 1 na reki Savi. Verjetnostno analizo smo naredili z metodo letnih maksimumov (AM metoda) in z metodo vrednosti nad izbranim pragom (POT metoda). Pri tem smo uporabili najpogostejše uporabljene porazdelitvene funkcije in tri načine ocenjevanja parametrov. S pomočjo statističnih in grafičnih testov smo primerjali rezultate analiz in določili razlike med obema metodama. Metoda vrednosti nad izbranim pragom je dala boljše rezultate statističnih testov kot metoda letnih maksimumov. Med uporabljenimi porazdelitvami je najboljše rezultate dala logaritemsko Pearsonova porazdelitev tipa 3 (LP3). Za oceno parametrov porazdelitev pa je metoda L-momentov izkazala boljše rezultate kot metoda momentov in metoda največjega verjetja.

Ključne besede: Metoda letnih maksimumov; Metoda vrednosti nad izbranim pragom; Metoda momentov; Metoda L-momentov.

Keywords: Annual maximum series; Peaks over threshold series; Method of moments; Method of L-moments.

Uvod

Poplave so izredno dinamičen, naraven pojav, ki lahko povzročijo veliko gmotno škodo ali celo ogrozijo človeška življenja. V Sloveniji pogosto prihaja do manjših poplav, vse pogostejše pa tudi do večjih. Visoke vode ogrožajo več kot 3000 kvadratnih metrov slovenskega ozemlja (ARSO, 2012a). Za zmanjšanje poplavne ogroženosti lahko uporabimo aktivne in pasivne ukrepe. Verjetnostne analize visokovodnih konic so potrebne tako pri aktivnih kot pri nekaterih pasivnih ukrepih. Poleg tega so verjetnostne analize potrebne tudi pri vsakodnevnem obratovanju hidrotehničnih objektov in pri razumevanju ekstremnih hidroloških pojavov.

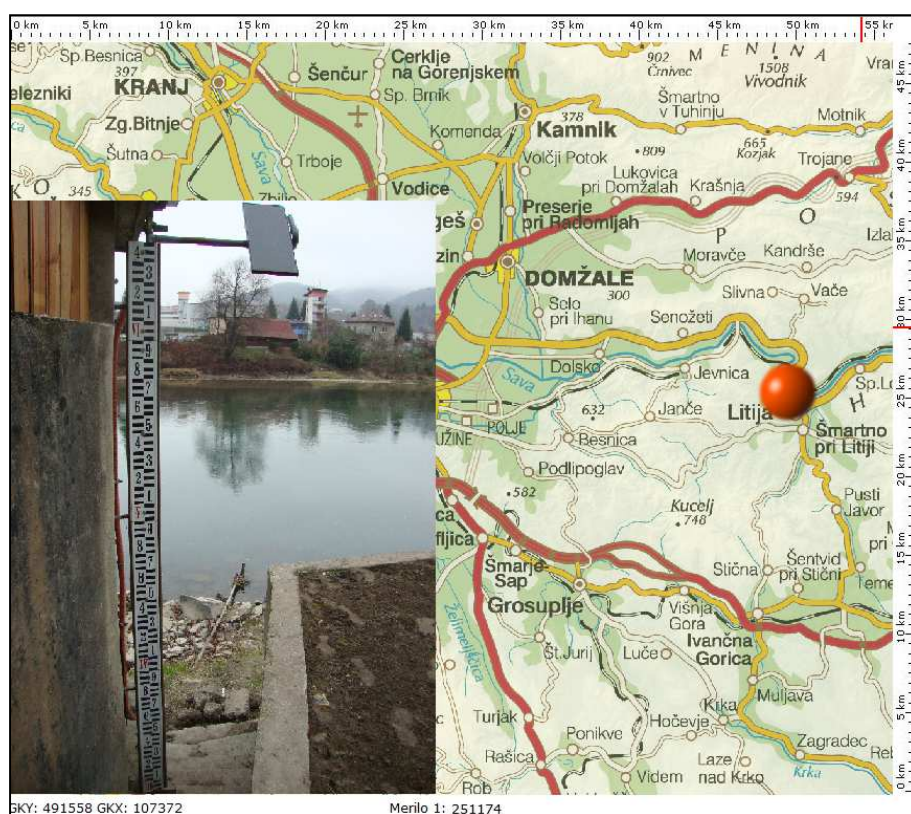
Verjetnostna analiza visokovodnih konic se najpogostejše dela z metodo letnih maksimumov (angl. *annual maximum series method*). Najpreprosteje je za oceno parametrov porazdelitve uporabiti enostavno metodo momentov (MOM). Metoda L-momentov (Hosking & Wallis, 1997) in metoda največjega verjetja (MLE) sta dve možni alternativni računsko preproste metode momentov. Turk (2011) je predstavil nekatere osnovne značilnosti MLE metode. Velikokrat se verjetnostno analizo izvede le z nekaterimi oziroma celo le z eno porazdelitveno funkcijo. V praksi se pogosto uporablja logaritemsko Pearsonova porazdelitev tipa 3 (Kučič, 2007). Bolj smiselno je uporabiti več porazdelitvenih funkcij in nato primerjati rezultate analiz. Metoda vrednosti nad izbranim pragom (angl. *peaks over threshold method*) oziroma krajše POT metoda je bila v hidroloških krogih prvič omenjena pred več kot pol stoletja (Langbein, 1949; Shane & Lynn, 1964), vendar vse do danes ni izrinila iz praktične uporabe računsko enostavnejše metode letnih maksimumov. Veliko raziskovalcev je ugotovilo, da je POT metoda izkazala

^{*} Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

boljše ujemanje s podatki kot metoda letnih maksimumov (Cunnane, 1973; Madsen, 1996; Tavares & da Silva, 1983). Pri uporabi metode vrednosti nad izbranim pragom se sicer srečamo z nekaterimi ne povsem natančno definiranimi koraki, kot sta upoštevanje pogojev neodvisnosti konic in izbira vrednosti praga. Pomanjkanje splošno priznanih navodil za izvedbo analize je glavna slabost POT metode.

Namen raziskave je prikaz prednosti in slabosti obeh metod, ki se uporabljata pri verjetnostnih analizah visokovodnih konic. V prispevku so prikazane nekatere alternative metodi letnih maksimumov in ocenjevanju parametrov z metodo momentov. Poleg tega smo poskušali natančneje definirati nekatere korake POT metode. Primerjali smo rezultate analiz in s pomočjo statističnih testov ugotavljali, katera metoda se bolje prilega podatkom s hidrološke postaje Litija na reki Savi.

Podatki



Slika 1: Vodomerna postaja Litija 1 na reki Savi (ARSO, 2012b)

Hidrološka postaja Litija na reki Savi (Slika 1) je najstarejša postaja Agencije RS za okolje (Frantar & Hrvatin, 2008). Meritve so se začele leta 1893, leta 1953 pa je bila postaja prestavljena. Meritve se izvajajo z limnigrafom Seba Omega. Verjetnostna analiza visokovodnih konic je bila narejena s podatki, ki so bili izmerjeni na vodomerni postaji Litija 1 na reki Savi in nam jih je posredovala Agencija RS za okolje (2011). Uporabili smo 58 let podatkov dnevnih vrednosti pretokov z vključenimi maksimalnimi konicami (1953-2010). Primerjali smo dnevne in urne serije vrednosti pretokov z vključenimi največjimi konicami. Ugotovili smo, da je razlika v volumnu visokovodnega vala pri uporabi dnevnih vrednosti z vključenimi absolutnimi konicami in pri upoštevanju urnih vrednosti manjša od 5 %. Primerjavo smo izvedli na 13 naključno izbranih visokovodnih valovih z uporabo preproste tro-točkovne grafične metode za izločanje baznega odtoka. Do

podobnih rezultatov je prišla tudi Pugelj (2012), ki je analizirala podatke z vodomerne postaje Šentjakob na Savi.

Površina vodozbirnega zaledja vodomerne postaje Litija znaša 4821 km². Za hidrološko postajo je značilen alpski dežno-snežni režim z dvema viškoma v spomladanskem in jesenskem obdobju. Slednji je v primeru obravnavane postaje izrazitejši (Frantar & Hrvatin, 2008). Poletno in spomladansko obdobje je čas nizkih pretokov, čeprav so spomladanske vrednosti pretokov precej izenačene z zimskimi.

Metoda letnih maksimumov

Pri metodi letnih maksimumov vzorec oblikujemo tako, da ta vsebuje maksimalni pretok posameznega leta. Vzorec je torej sestavljen iz toliko elementov kolikor let podatkov imamo na voljo za analize. Zaradi tako oblikovanega vzorca lahko pride do neupoštevanja pomembnih dogodkov, ki sicer niso bili največji v posameznem letu, so pa večji od nekega letnega maksimuma, ki se je zgodil v nekoliko bolj sušnem letu. Po drugi strani pa lahko v analizah upoštevamo tudi nekatere dogodke, ki bi sicer ležali pod določeno vrednostjo praga pri POT metodi. Oblikovanje vzorca pri metodi letnih maksimumov je sicer zelo enostavno, vendar je ravno ta preprostost ena izmed glavnih pomanjkljivosti metode letnih maksimumov. Ta slabost postane še izrazitejša v primeru krajših serij podatkov, ko imamo za analize na razpolago le eno ali dve desetletji podatkov. V takih primerih je priporočljiva uporaba metode vrednosti nad izbranim pragom ali upoštevanje več vodomernih postaj s podobnimi karakteristikami (Robson & Reed, 1999). Pojem povratne dobe T_{AM} , ki pripada metodi letnih maksimumov, predstavlja povprečni interval med leti, v katerih se je zgodil eden ali več dogodkov, ki presegajo vrednost pretoka Q . Ko se v hidrologiji srečamo s pojmom povratne dobe, se ta v večini primerov nanaša na prejšnjo definicijo.

Metoda letnih maksimumov je sestavljena iz naslednjih korakov:

- oblikovanje vzorca,
- ocenjevanje parametrov porazdelitve,
- določitev odvisnosti med ocenjeno vrednostjo pretoka in pripadajočo povratno dobo oziroma verjetnostjo.

Za ocenjevanje parametrov porazdelitev lahko med drugim uporabimo metodo momentov, metodo L-momentov in metodo največjega verjetja. Pri najenostavnejši metodi momentov parametre porazdelitev ocenimo s pomočjo karakterističnih števil oziroma momentov vzorca. Metoda momentov da dobre rezultate v primeru simetričnih vzorcev, pri podatkih z veliko asimetrijo pa se njena učinkovitost zmanjša (Hosking & Wallis, 1997). Metoda L-momentov je računsko le nekoliko bolj zapletena kot metoda momentov. Izhaja iz verjetnostno obteženih momentov (angl. *probability weighted moments*) in ocene parametrov temeljijo na L-momentih namesto na navadnih momentih. Vse potrebne enačbe za izračun ocene parametrov porazdelitev z metodo L-momentov sta zapisala Hosking & Wallis (1997). Ena izmed možnih alternativ pri ocenjevanju parametrov je tudi metoda največjega verjetja. Ta je glede na metodo momentov in tudi glede na metodo L-momentov računsko bolj zahtevna. Pri metodi največjega verjetja parametre porazdelitve ocenimo tako, da je verjetnost, da se je zgodil naš vzorec največja (Takara, 2009). Iščemo torej take ocene parametrov, kjer ima funkcija verjetja oziroma logaritmirana funkcija verjetja maksimum. Le pri redkih porazdelitvenih funkcijah dobimo kot rezultat analitične izraze za ocene parametrov (n.pr. normalna in logaritemsko normalna porazdelitev), pri večini porazdelitev pa dobimo sistem nelinearnih enačb, ki analitično ni rešljiv in se

moramo zato problema lotiti s pomočjo računalniških programov, ki omogočajo numerično reševanje enačb. Pri analizah podatkov z vodomerne postaje Litija smo uporabili naslednje porazdelitvene funkcije: normalno (N), logaritemsko normalno (LN), Pearsonovo 3 (P3), logaritemsko Pearsonovo 3 (LP3), Gumbelovo, porazdelitev ekstremnih vrednosti (GEV) in generalizirano logistično porazdelitev (GL). Ker se v praksi pogosto uporablja logaritemsko Pearsonova porazdelitev tipa 3, podajamo enačbe za oceno parametrov po metodi momentov in metodi L-momentov:

- Metoda momentov:

$$\alpha = \frac{4}{c_s^2}; \beta = \frac{\sigma_x c_s}{2}; c = \mu_x - \alpha\beta. \quad (1)$$

- Metoda L-momentov:

$$\begin{aligned} \text{Za } t_3 < 1/3: z &= 3\pi t_3^2; \alpha = \frac{1+0,2906z}{z+0,1882z^2+0,0442z^3} \cdot \\ \text{Za } 1/3 < t_3 < 1: z &= 1 - t_3; \alpha = \frac{0,36067z-0,59567z^2+0,25361z^3}{1-2,78861z+2,56096z^2-0,77045z^3} \cdot \\ \text{Za vse vrednosti } t_3: \beta &= \text{sign}(t_3)\sqrt{\pi}l_2 \frac{\Gamma(a)}{\Gamma(a+0,5)}; c = l_1 - \alpha\beta. \end{aligned} \quad (2)$$

Enačbe 1 in 2 lahko uporabimo tudi pri Pearsonovi porazdelitvi tipa 3. Razlika med porazdelitvenima funkcijama je v tem, da pri log-Pearsonovi 3 porazdelitvi karakteristična števila in L-momente izračunamo na logaritmiranih vrednostih pretokov. V enačbah 1 in 2 t_3 predstavlja koeficient asimetrije L (Hosking & Wallis, 1997), α , β in c so parametri Pearsonove 3 oziroma log-Pearsonove 3 porazdelitve, ostale spremenljivke pa predstavljajo momente in L-momente, ki so izračunani s pomočjo vzorca. Enačbe, s katerimi lahko ocenimo parametre ostalih porazdelitev, logaritmirane funkcije verjetja, ki omogočajo izračun ocene parametrov po MLE metodi, ter enačbe, s katerimi lahko določimo ocenjene vrednosti pretokov v odvisnosti od povratne dobe oziroma verjetnosti, je na podlagi različnih avtorjev zbral Bezak (2012).

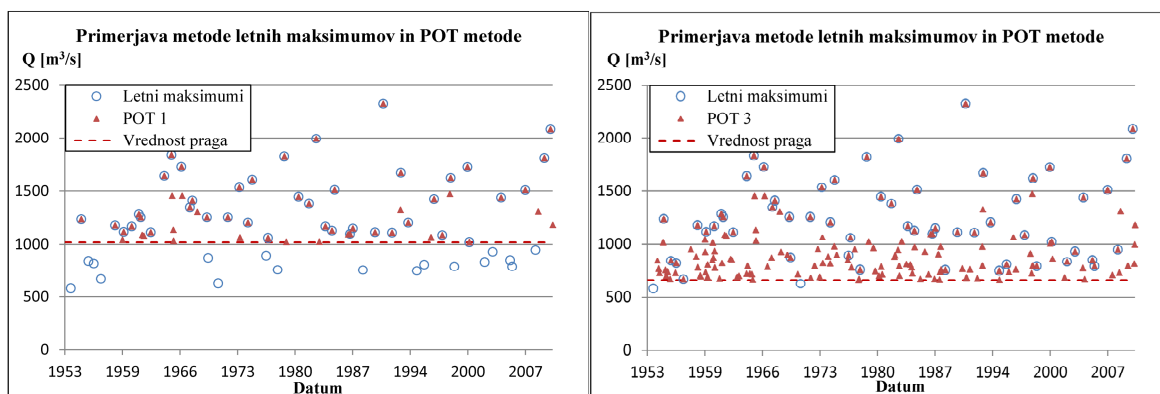
Metoda vrednosti nad izbranim pragom

Pri metodi vrednosti nad izbranim pragom lahko vzorec oblikujemo tako, da ta vsebuje povprečno več kot eno konico na leto. Vzorec je sestavljen iz največjih pretokov v celotnem obravnavanem obdobju. Pri določitvi vzorca nismo vezani na časovno enoto leta, vendar moramo paziti, da ne upoštevamo več odvisnih konic, ki so del istega poplavnega vala. Pred izvedbo verjetnostne analize zato upoštevamo pogoje neodvisnosti konic, ki nam pomagajo izločiti konice, ki so odvisne od maksimalne in jih v analizah ni smiselno upoštevati. Iz razlike med oblikovanjem vzorca po metodi letnih maksimumov in POT metodi sledi tudi razlika med dvema pojmom povratnih dob, ki se uporabljata v hidrologiji. Povratna doba T_{POT} , ki pripada metodi vrednosti nad izbranim pragom, predstavlja povprečni interval med visokimi vodami, ki presegajo vrednost pretoka Q . Za bolj nazoren prikaz razlike med povratnima dobama lahko uporabimo zanimiv primer, ki sta ga podala Cunnane & Lynn (1975). Predpostavimo, da je neka vrednost pretoka Q presežena 25-krat v 50-ih letih. Iz prejšnje definicije povratne dobe T_{POT} lahko izračunamo, da je povratna doba predpostavljenega dogodka enaka 2 leti. Vendar vrednost pretoka Q ne nastopa kot letni maksimum v vseh primerih. Recimo, da se vrednost Q pojavi kot letni maksimum 20-krat. To pomeni, da je vrednost povratne dobe T_{AM} enaka 2,5 let. Obravnavan pretok je pri AM metodi presežen manj pogosto kot v resnici, ocena povratne dobe pa je zato nekoliko prevelika. Razlika med obema pojmom povratnih dob se z večanjem ponovitvenega intervala zmanjšuje in je za velike vrednosti povratnih dob

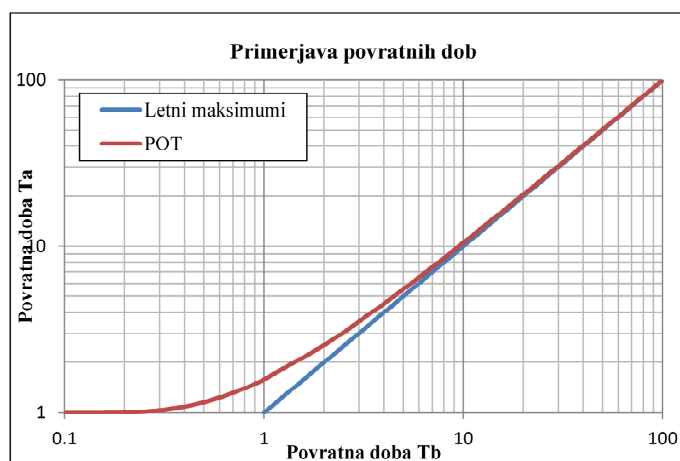
praktično zanemarljiva. V primeru, da obravnavamo manjše vrednosti povratnih dob pa moramo T_{AM} korigirati s pomočjo naslednje enačbe (Langbein, 1949):

$$T_{AM}^{-1} = 1 - e^{\left(-\frac{1}{T_{POT}}\right)}. \quad (3)$$

Na slikah 2 je prikazana razlika med vzorcema, ki pripadata metodi letnih maksimumov in metodi vrednosti nad izbranim pragom. Poleg AM vzorca sta prikazana POT vzorca, ki vsebujeta povprečno 1 in povprečno 3 konice nad vrednostjo praga na leto. Opazimo lahko precejšnjo razliko med vzorcem letnih maksimumov in POT 1 vzorcem. Vidimo lahko, da več kot 15 letnih maksimumov pade pod vrednost praga pri POT metodi. Tudi v primeru POT 3 vzorca sta še vedno dva letna maksimuma, ki ležita pod mejno vrednostjo, velika pa je tudi razlika v količini uporabljenih informacij. Pri POT 3 vzorcu tako upoštevamo trikrat več dogodkov kot pri metodi letnih maksimumov. Na sliki 3 je prikazana primerjava obeh povratnih dob, ki se uporabljata v hidrologiji. Opazimo lahko, da je razlika med obema pojmom za večje vrednosti povratnih dob zanemarljivo majhna.



Slika 2: Primerjava vzorca letnih maksimumov ter POT 1 in POT 3 vzorca



Slika 3: Primerjava med povratnima dobama T_{AM} in T_{POT}

Metoda vrednosti nad izbranim pragom oziroma POT metoda je sestavljena iz naslednjih korakov:

- upoštevanje pogojev neodvisnosti konic,
- izbira praga oziroma mejne vrednosti x_0 ,
- določitev vzorca in izbira ustreznih porazdelitvenih funkcij za modeliranje velikosti konic nad mejno vrednostjo in opis števila konic v letu,

- določitev povezave med ocenjeno vrednostjo pretoka in pripadajočo povratno dobo oziroma verjetnostjo.

Prvi korak POT metode je torej upoštevanje pogojev neodvisnosti konic. Pri analizi podatkov s hidrološke postaje Litija smo uporabili naslednja pogoja (USWRC, 1981):

$$\theta < 5 \text{ dni} + \log(A) \text{ ali } x_{MIN} > (3/4) \min [x_{S1}, x_{S2}]. \quad (4)$$

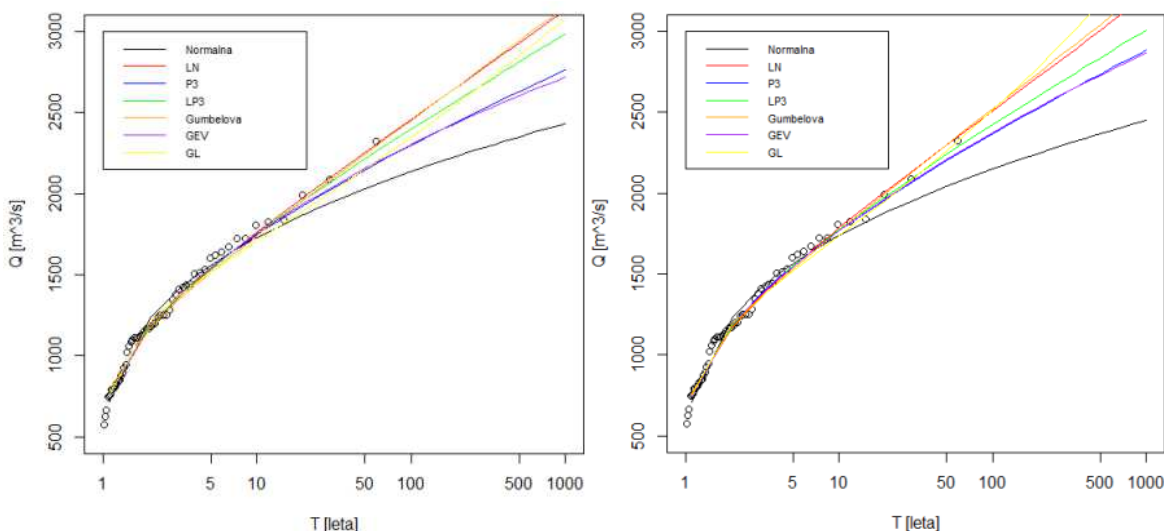
V enačbi 4 je A površina porečja v kvadratnih miljah, x_{S1} in x_{S2} sta dve zaporedni konici, θ pa označuje razdaljo med dvema zaporednima konicama. V primeru, da velja eden izmed pogojev iz enačbe 4, manjše izmed konic v POT vzorcu ne upoštevamo. Slabost prvega pogoja iz enačbe 4 se pojavi v primeru velikih prispevnih površin. Za upoštevanje pogojev neodvisnosti konic se lahko uporabi tudi program Hydrospect (Radziejewski, 2012). S pomočjo omenjenega programa lahko vzorec določimo hitro in zanesljivo, slabost programa pa je, da omogoča upoštevanje le prvega izmed pogojev iz enačbe 4. V večini primerov je sicer ta pogoj tisti, ki nam že izloči odvisne konice. Naslednji korak je izbira ustrezne mejne vrednosti. Gre za subjektiven proces, zato se raziskovalci poslužujejo različnih izbir vrednosti praga. Mejno vrednost lahko izberemo na podlagi fizikalnih kriterijev in sicer kot vrednost vodostaja, ko začne reka poplavljeni. Bezak (2012) je zbral nekatere pogoje, ki ne temeljijo na fizikalnih osnovah in so jih v svojih raziskavah uporabili različni raziskovalci. Najbolj pogosto je uporabljen pogoj, ki je zapisan v priročniku Flood Estimation Handbook (Robson & Reed, 1999). Ta predlaga določitev vzorca tako, da ta vsebuje povprečno 1, 3 oziroma 5 konic nad mejno vrednostjo nad pragom na leto. Za pomoč pri izbiri ustrezne mejne vrednosti je Lang s sodelavci (Lang et al., 1999) predlagal tudi nekatere grafične teste s katerimi lahko določimo interval možnih vrednosti praga. Pri izbiri praga pa je smiselno upoštevati nasvet, ki sta ga zapisala Tavares & da Silva (1983): za vrednost praga naj se izbere čim nižja vrednost, ob pogoju, da s tem ne kršimo predpostavk modela. Metoda vrednosti nad izbranim pragom je sestavljena iz porazdelitve velikosti konic nad mejno vrednostjo in porazdelitve števila konic v letu. Za opis števila konic v letu m lahko uporabimo Poissonovo, binomsko ali negativno binomsko porazdelitev. Za pomoč pri izbiri ustrezne porazdelitve lahko uporabimo indeks disperzije d , ki določa razmerje med varianco in srednjo vrednostjo spremenljivke m . V primeru, da je indeks disperzije enak (oz. približno enak) 1 lahko uporabimo Poissonovo porazdelitev (konice se pojavljajo povsem slučajno), v primeru, da je $d > 1$ uporabimo negativno binomsko porazdelitev (prihaja do pojavljanja dogodkov v skupinah) in če je $d < 1$ je priporočena uporaba binomske porazdelitve (konice se dogajajo v enakomernih časovnih intervalih). Za modeliranje velikosti konic nad mejno vrednostjo ($y = x - x_0$) lahko uporabimo eksponentno ali Pareto porazdelitev. V primeru, da za opis števila konic v letu izberemo Poissonovo porazdelitev in za modeliranje velikosti konic nad vrednostjo praga uporabimo eksponentno porazdelitev, lahko povezavo med ocenjeno vrednostjo pretoka in pripadajočo povratno dobo določimo s pomočjo naslednje enačbe (Önöz & Bayazit, 2001):

$$x_T = x_0 + \beta \ln \mu - \beta (-\ln F_X). \quad (5)$$

V enačbi 5 x_0 predstavlja vrednost praga, β ter μ pa označujeta momenta prvega reda spremenljivk y in m . Pri metodi vrednosti nad izbranim pragom torej za oceno parametrov uporabimo metodo momentov, saj izenačimo karakteristična števila s teoretičnimi momenti posameznih porazdelitvenih funkcij.

Rezultati

Verjetnostno analizo visokovodnih konic smo najprej naredili z metodo letnih maksimumov. Kot že rečeno, smo uporabili sedem različnih porazdelitvenih funkcij in tri načine ocenjevanja parametrov porazdelitev. Ker smo želeli ugotoviti katera porazdelitvena funkcija se najbolje prilega vzorcu letnih maksimumov, smo uporabili nekatere statistične in grafične teste. Uporabili smo teste Kolmogorov-Smirnov (K-S), Anderson-Darling (A-D), PPCC (angl. *Probability plot correlation coefficient*), RMSE (angl. *Root mean square error*), MAE (angl. *Mean absolute error*), RMAE (angl. *Root mean square error*), AIC (angl. *Akaike information criterion*) ter 5 testov, ki primerjajo empirične in teoretične verjetnosti (Ricci, 2005). Za izračun verjetnosti posameznega podatka smo uporabili Weibullovo enačbo ($F_i=i/(n+1)$). Rezultati testov so pokazali, da se podatkom najbolje prilega logaritemsko Pearsonova porazdelitev tipa 3 (ocenjevanje parametrov po metodi L-momentov). Le nekoliko slabši rezultati so bili pri večini testov izračunani pri logaritemsko normalni porazdelitvi, Pearsonovi 3 porazdelitvi in porazdelitvi ekstremnih vrednosti. Slabše sta se s podatki ujemali normalna in generalizirana logistična porazdelitev. Ugotovili smo, da je metoda L-momentov izkazala boljše rezultate testov kot metoda momentov in metoda največjega verjetja. Medtem, ko pri primerjavi metode momentov in MLE metode nobeden od načinov ocenjevanja parametrov ni izstopal. Testi K-S, A-D in PPCC se lahko uporabijo tudi za testiranje hipotez. Testirali smo ničelno domnevo (H_0 : podatki sledijo testirani porazdelitveni funkciji) in ugotovili, da nobene izmed testiranih porazdelitvenih funkcij pri nobenem izmed uporabljenih statističnih testov pri vseh treh načinih ocenjevanja parametrov, nismo mogli zavrniti z izbrano stopnjo značilnosti 0,05. Najvišje vrednosti testnih statistik (najslabše ujemanje s podatki) je pri večini testov izkazala normalna porazdelitev.

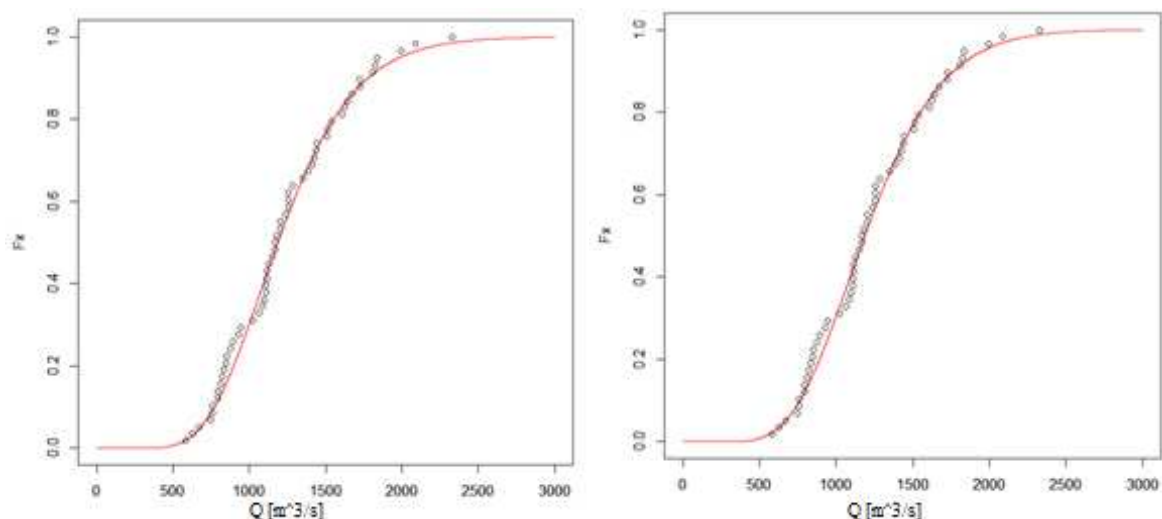


Slika 4: Q-T krivulje za vse obravnavane porazdelitvene funkcije pri metodi letnih maksimumov za metodo momentov (levo) in metodo L-momentov (desno)

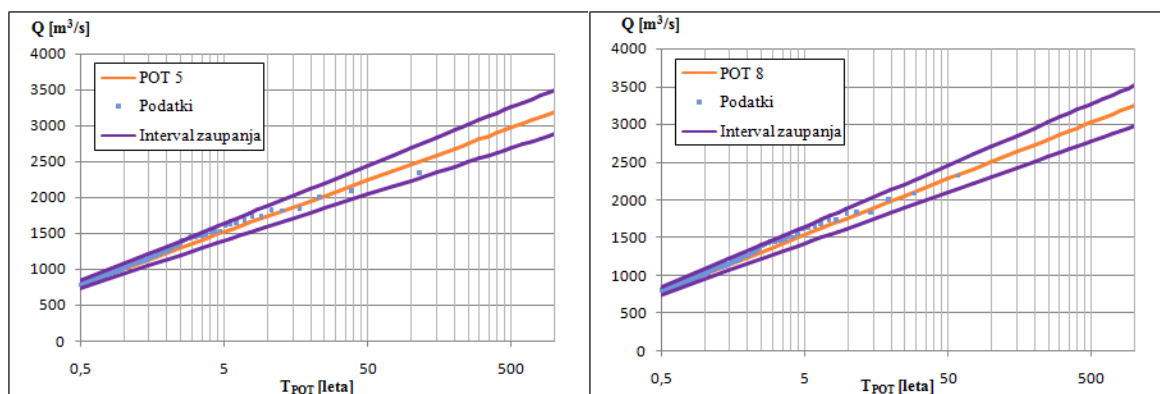
Na sliki 4 so prikazane krivulje, ki prikazujejo ocenjene vrednosti pretokov s pripadajočimi povratnimi dobami oziroma verjetnostimi za vseh sedem uporabljenih porazdelitev (metoda momentov in metoda L-momentov). Tudi iz slik 4 lahko vidimo, da se s podatki najslabše ujema normalna porazdelitev, ki precej odstopa od ostalih porazdelitvenih funkcij. Rezultati testov so pokazali, da je v našem primeru metoda L-momentov pri vseh prikazanih primerih dala boljše rezultate kot metoda momentov. Najboljši rezultati so bili izvrednoteni pri uporabi logaritemsko Pearsonove porazdelitve

tipa 3 (LP3). Na sliki 5 je prikazana primerjava med empirično in teoretično porazdelitveno funkcijo za logaritemsko Pearsonovo porazdelitev tipa 3 in Pearsonovo porazdelitev tipa 3. Za grafični prikaz podatkov je bila ponovno uporabljena Weibullova enačba. Iz slik 5 lahko opazimo, da se tako log-Pearsonova 3 kot Pearsonova 3 porazdelitev dobro ujemata z vzorcem letnih maksimumov. Vidimo lahko tudi, da sta oba prikaza porazdelitvene funkcije in podatkov zelo podobna (slika 5).

Nato pa smo verjetnostno analizo izvedli še z metodo vrednosti nad izbranim pragom. Najprej smo na podatkih z vodomerne postaje Litija 1 na reki Savi upoštevali pogoje neodvisnosti konic. Iz enačbe 4 smo izračunali, da morata biti dve neodvisni konici oddaljeni vsaj 8,3 dneva. Upoštevanje pogojev neodvisnosti konic smo izvedli tako ročno kot s pomočjo programa Hydrospect. Ugotovili smo, da je program Hydrospect kljub upoštevanju le enega izmed pogojev iz enačbe 4, določil podobne vzorce, kot smo jih določili z ročnim upoštevanjem pogojev neodvisnosti konic. Na podlagi izbranih vrednosti praga smo določili POT vzorec, s pomočjo karakterističnih števil spremenljivk m in y smo določili parametre enačbe 5, s pomočjo Hi-kvadrat testa ter testa indeksa disperzije (Cunnane, 1979) smo preverjali ustreznost Poissonove porazdelitve za opis števila konic v letu in s pomočjo dveh testov, ki sta jih predlagala Van Montfort & Witter (1985), smo preverili ustreznost eksponentne porazdelitve za modeliranje velikosti konic nad mejno vrednostjo. Nobena izmed porazdelitvenih funkcij pri nobenem izmed testov ni bila zavrnjena s stopnjo značilnosti 0,05. POT metodo smo izvedli za vrednosti praga 1021 m³/s, 662 m³/s, 508 m³/s in 347 m³/s (povprečno 1, 3, 5 in 8 konic nad mejno vrednostjo na leto). Tudi pri metodi vrednosti nad izbranim pragom smo uporabili teste RMSE, MAE, RMAE in PPCC. Izkazalo se je, da se rezultati testov izboljšujejo z nižanjem vrednosti praga. Do podobnih ugotovitev sta v svojem članku prišla tudi Tavares & da Silva (1983). Na sliki 6 so prikazane krivulje, ki povezujejo ocenjene vrednosti pretokov s pripadajočimi povratnimi dobami oziroma verjetnostimi za primera POT 5 in POT 8. Opazimo lahko, da se Q - T krivulje lepo ujemajo s podatki, ki so prikazani z Weibullovo enačbo. Na slikah 6 so izrisani tudi 95 % intervali zaupanja, ki so tudi ena izmed oblik za izražanje natančnosti ocenjene vrednosti pretoka. Tudi statistični testi so ena izmed oblik za izražanje natančnosti ocenjene vrednosti pretoka.



Slika 5: Primerjava med empirično in teoretično porazdelitveno funkcijo za logaritemsko Pearsonovo 3 (levo) in Pearsonovo 3 porazdelitev (desno) z oceno parametrov po metodi L-momentov



Slika 6: Q-T krivulje za POT vzorca, ki vsebujeta povprečno 5 oziroma 8 dogodkov nad pragom na leto

Na podlagi analiz in testov (RMSE, MAE, RMAE in PPCC) smo ugotovili, da je metoda vrednosti nad izbranim pragom dala boljše rezultate kot metoda letnih maksimumov. Že vzorec, ki vsebuje povprečno 1 dogodek nad pragom na leto (POT 1) je dal nižje vrednosti testnih statistik kot kombinacija metode L-momentov in logaritemsko Pearsonove porazdelitve tipa 3, ki se je izkazala kot najprimernejša za izvedbo analize po AM metodi na podatkih s hidrološke postaje Litija 1 na reki Savi. Z nižanjem vrednosti praga pa so se rezultati testov RMSE in MAE, glede na metodo letnih maksimumov, še izboljševali. Tako so bili najboljši rezultati izvedeni pri POT vzorcu, ki vsebuje povprečno 8 dogodkov nad pragom na leto. POT 5 vzorec je dal le nekoliko slabše rezultate statističnih in grafičnih testov, poleg tega pa je bil v tuji literaturi (Robson & Reed, 1999) večkrat predlagan za uporabo kot POT 8 vzorec. Tudi pri tem primeru smo preverili ali sta eksponentna in Poissonova porazdelitev primerni izbiri za modeliranje velikosti konic nad mejno vrednostjo in opis števila konic nad pragom na leto. V preglednici 1 so prikazane ocenjene vrednosti pretokov za nekatere izbrane primere. Opazimo lahko, da je metoda vrednosti nad izbranim pragom dala višje ocenjene vrednosti pretokov kot metoda letnih maksimumov (logaritemsko Pearsonova porazdelitev tipa 3 in ocenjevanje parametrov po metodi L-momentov) pri večjih vrednostih ponovitvenega intervala.

Preglednica 1: Primerjava ocenjenih vrednosti pretokov pri metodi letnih maksimumov in metodi vrednosti nad izbranim pragom

Primer/Vrednost pretoka	Q 2 [m³/s]	Q 10 [m³/s]	Q 100 [m³/s]	Q 500 [m³/s]
LP3 (MOM)	1181	1758	2368	2812
LP3(L-momenti)	1184	1775	2423	2836
POT 1	1142	1758	2527	3055
POT 3	1131	1734	2486	3003
POT 5	1130	1723	2463	2971
POT 8	1137	1746	2504	3026

Zaključki

Analizirali smo 58 let podatkov dnevnih vrednosti pretokov z vključenimi maksimalnimi konicami. Za izvedbo verjetnostne analize smo uporabili tako metodo letnih maksimumov (AM metoda) kot metodo vrednosti nad izbranim pragom (POT metoda). Uporabili smo različne porazdelitvene funkcije in različne načine ocenjevanja parametrov

porazdelitev. S pomočjo statističnih testov pa smo posamezne metode in načine izračunov ovrednotili.

Metoda L-momentov je izkazala boljše rezultate kot metoda momentov in metoda največjega verjetja, tako po statističnih kot tudi po grafičnih testih. Uporabo metode L-momentov predlagajo tudi drugi avtorji (Hosking & Wallis, 1997). Ocenjevanje parametrov po metodi L-momentov je računsko le malce bolj zahtevno kot uporaba metode momentov, zato bi bilo v nekaterih praktičnih primerih smiselno uporabiti obe metodi ocenjevanja parametrov. Metoda največjega verjetja pa je računsko precej zahtevnejša in tudi rezultati statističnih testov so bili v našem primeru slabši kot pri uporabi metode L-momentov. Najboljši rezultati so bili izračunani pri uporabi logaritemsko Pearsonove porazdelitve tipa 3 (LP3), ki se na našem geografskem območju najpogosteje uporablja (Kučič, 2007). Ugotovili smo torej, da je uporaba te porazdelitvene funkcije smiselna. Tudi nekatere druge porazdelitvene funkcije so izkazale dobre rezultate statističnih in grafičnih testov (logaritemsko normalna porazdelitev, Pearsonova 3 porazdelitev in porazdelitev ekstremnih vrednosti), medtem ko sta normalna porazdelitev in generalizirana logistična porazdelitev dali slabše rezultate. Ugotovili smo, da je POT metoda po statističnih testih dala boljše rezultate kot metoda letnih maksimumov. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi nekateri drugi avtorji (Cunnane, 1973; Madsen, 1996; Tavares & da Silva, 1983). Že POT 1 vzorec je dal boljše rezultate testov kot metoda letnih maksimumov. Z nižanjem vrednosti praga pa so se rezultati metode vrednosti nad izbranim pragom še izboljševali. V primeru podatkov z vodomorne postaje Litija 1 je POT metoda dala višje ocenjene vrednosti pretokov kot metoda letnih maksimumov, ni pa to pravilo, saj so nekateri drugi raziskovalci prišli do drugačnih ugotovitev (Bačova-Mitkova & Onderka, 2010).

O bolj zanesljivih zaključkih smiselnosti uporabe posameznih metod bi bilo potrebno podobne analize izvesti na več vodomernih postajah na območju Slovenije. Kljub temu pa lahko zaključimo, da je metoda vrednosti nad izbranim pragom dobra alternativa metodi letnih maksimumov.

Zahvala

Zahvaljujemo se Agenciji RS za okolje za posredovane podatke z vodomorne postaje Litija na reki Savi. Del rezultatov raziskave je nastal v okviru temeljnega raziskovalnega projekta J2-4096, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Literatura

- Agencija RS za okolje. (2011). Hidrološki podatki. Message to: Kobold, M. 2011. Osebna komunikacija.
- Agencija RS za okolje. (2012a). Vreme, Poročila in projekti.
<http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20projekti/> (3.10.2012)
- Agencija RS za okolje. (2012b). Atlas okolja.
http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso (3.10.2012)
- Bačova-Mitkova, V., Onderka, M. (2010). Analysis of extreme hydrological events on the Danube using the peak over threshold method, *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 58(2), 88-101.
- Bezák, N. (2012): Verjetnostna analiza visokovodnih konic z metodo vrednosti nad izbranim pragom in z metodo letnih maksimumov (Flood frequency analysis with peaks over threshold

- method and annual maximum series method). Unpublished Diploma, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 106 p. (in Slovenian).
- Cunnane, C. (1973). A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction, *Journal of Hydrology* 18(3-4), 257-271.
- Cunnane, C., Lynn, M. A. (1975). Flood estimation following the Flood studies report. Meeting of the Civil Division, Engineering school U. C. D., 9. 2. 1975: 39 p.
<http://www.opw.ie/en/media/Flood%20Estimation%20FSR%20Cunnane-Lynn%20-%201975.pdf> (3.10.2012)
- Cunnane, C. (1979). A note on the Poisson assumption in partial duration series models, *Water Resources Research* 15(2), 489-494.
- Frantar, P., Hrvatin, M. (2008). Pretočni režimi. P. Frantar (ur.), *Vodna bilanca Slovenije 1971–2000*. MOP ARSO, Ljubljana, 43–50.
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge, Cambridge University Press, 224 p.
- Kučič, K. (2007). Metoda momentov L pri verjetnostni analizi visokih vod (Method of L-moments for flood frequency analysis). Unpublished Diploma, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 85 p. (in Slovenian).
- Lang, M., Ouarda, T.B.M.J., Bobee, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modelling, *Journal of Hydrology* 225(3-4), 103-117.
- Langbein, W.B. (1949). Annual floods and the partial-duration flood series, *Transactions, American Geophysical Union* 30(6), 879-881.
- Madsen, H. (1996). At-site and regional modelling of extreme hydrologic events. A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Lyngby, Technical University of Denmark, Department of Hydrodynamics and Water Resources, 45 p.
- Önöz, B., Bayazit, M. (2001). Effect of the occurrence process of the peaks over threshold on the flood estimates, *Journal of Hydrology* 244(1-2), 86-96.
- Pugelj, A. (2012). Analiza visokovodnih valov Save v Šentjakobu (Water wave analysis of Sava in Šentjakob). Unpublished Diploma, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 98 p. (in Slovenian).
- Radziejewski, M. (2012). Program Hydrospect.
<http://www.staff.amu.edu.pl/~maciejr/hydrospect/> (3.10.2012)
- Ricci, V. (2005). Fitting distributions with R (21. 2. 2005).
<http://cran.r-project.org/doc/contrib/Ricci-distributions-en.pdf> (3.10.2012)
- Robson, A. J., Reed, D. W. (1999). Statistical procedures for flood frequency estimation. Volume 3 of the Flood Estimation Handbook. Center for Ecology & Hydrology, 338 p.
- Shane, R. M., Lynn, W. R. (1964). Mathematical model for flood risk evaluation, *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 90(HY6), 1-20.
- USWRC. (1981). Guidelines for determining flood flow frequency. United States Water Resources Council, Bulletin 17B, Hydrology Subcommittee. Washington, DC, 185 p.
http://water.usgs.gov/osw/bulletin17b/dl_flow.pdf (3.10.2012)
- Takara, K. (2009). Frequency analysis of hydrological extreme events and how to consider climate change. The Nineteenth IHP training course (International Hydrological Program), 29. 11. 2009 – 12. 12. 2009. Nagoyomo and Kyoto, Japan.
<http://ihpnagoyaforum.org/textbooks/TakaraLecture.pdf> (3.10.2012)
- Tavares, L. V., Da Silva, J. E. (1983). Partial duration series method revisited, *Journal of Hydrology* 64(1-4), 1-14.
- Turk, G. (2011). Verjetnostni račun in statistika, 246 p.
<http://km.fgg.uni-lj.si/PREDMETI/sei/vrs.pdf> (3.10.2012)
- Van Montfort, M. A. J., Witter, J. V. (1985). Testing exponentiality against generalised Pareto distribution, *Journal of Hydrology* 78(3-4), 305-315.

Analiza trajektorij območij s točo in modelskih indikatorjev toče na območju Slovenije

Gregor Skok^{*}, Jože Rakovec^{*}, Benedikt Strajnar^{**}

Povzetek

Z uporabo daljinskega zaznavanja radarske odbojnosti z meteorološkim radarjem je bila izvedena analiza trajektorij območij s točo, ki je pokazala, da največ dogodkov s točo traja le kratek čas, obstajajo pa tudi več ur dolgi dogodki, ki lahko v svojem življenjskem ciklu prepotujejo dolge razdalje – tudi več kot sto kilometrov. Območja s točo se gibajo v vseh smereh, vendar prevladuje gibanje proti vzhodu. Izvedena je bila tudi analiza modelskih indikatorjev toče, z namenom preveriti ali se ob situacijah, ko je bila toča zabeležena pri tleh, vrednosti indikatorjev močne konvekcije bistveno razlikujejo od konvektivnih situacij, pri katerih se toča ni pojavila. Ugotovljeno je bilo, da ni statistično značilnih razlik med indikatorji ob dogodkih z močno konvekcijo s točo in brez nje ni. Pri interpretaciji in uporabi rezultatov je potrebno paziti na inherentno negotovost pri identifikaciji območij s točo in močne konvekcije.

Ključne besede: toča, detekcija toče, sledenje toče, močna konvekcija, meteorološki radar
Keywords: hail, hail detection, hail tracking, strong convection, meteorological radar

Uvod

Toča so ledena zrna, ki nastajajo v razvitih konvektivnih oblakih z dovolj močnim vzgornikom in ki včasih padajo na tla (Divjak s sod., 2004). Meritve toče se v meteorologiji klasično izvajajo na meteoroloških postajah s človeškim opazovalcem ali samodejno s pomočjo točemerov – množice preprostih stiropornih plošč, v katerega zrna toče odtisnejo vdolbine.

Alternativo tem relativno dragim meritvam v zadnjem desetletju predstavlja meteorološki radar, ki s precejšnjo časovno in prostorsko ločljivostjo določa odbojnost iz atmosfere v mikrovalovnem delu spektra elektor-magnetnega valovanja ter s tem prisotnost in količino oziroma velikost padavinskih elementov v zraku.

Na podlagi radarske odbojnosti je že bila izdelana karta pogostosti toče nad Slovenijo (Klemenčič s sod., 2008, 2009, 2012). Analiza je zajemala časovno obdobje devetih let (2002-2010), od maja do avgusta. Pri identifikaciji področij s točo iz radarskih podatkov je bila uporabljena kombinacija dveh metod, t.i. »Waldvoglove« metode (Waldvogel s sod., 1979) in metode, ki jo je razvila avstrijska meteorološka služba (ZAMG, 2007). Obe metodi detekcije temeljita na iskanju močnih radarskih odbojev nad izotermo 0°C. Višje nad lediščem se pojavijo izraziti odboji, večja je verjetnost za prisotnost velikih ledenih zrn – toče.

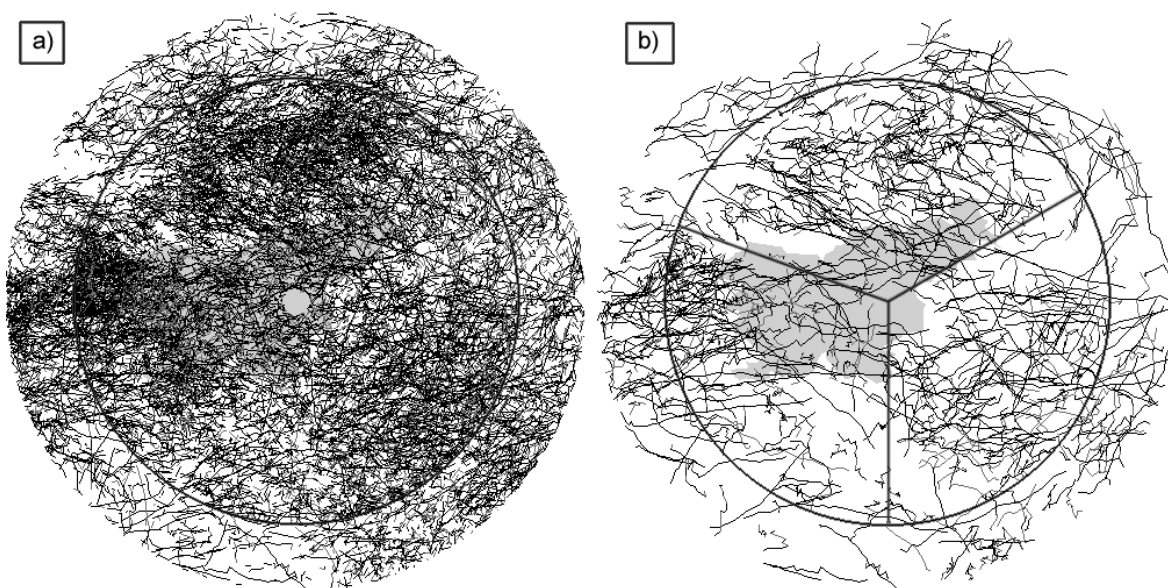
Navedeni metodi detekcije toče in rezultati analize pogostosti toče so podrobneje predstavljeni v Klemenčič s sod. (2012). V tem prispevku pa so predstavljeni rezultati dveh dodatnih analiz, povezanih z navedeno raziskavo. V prvem poglavju je predstavljena analiza trajektorij točenosnih oblakov, v drugem poglavju pa analiza modelskih indikatorjev toče.

^{*} Fakulteta za Matematiko in Fiziko, Univerza v Ljubljani, Center odličnosti Vesolje-SI

^{**} Agencija RS za okolje, Ministrstvo za kmetijstvo in okolje

Analiza trajektorij toče

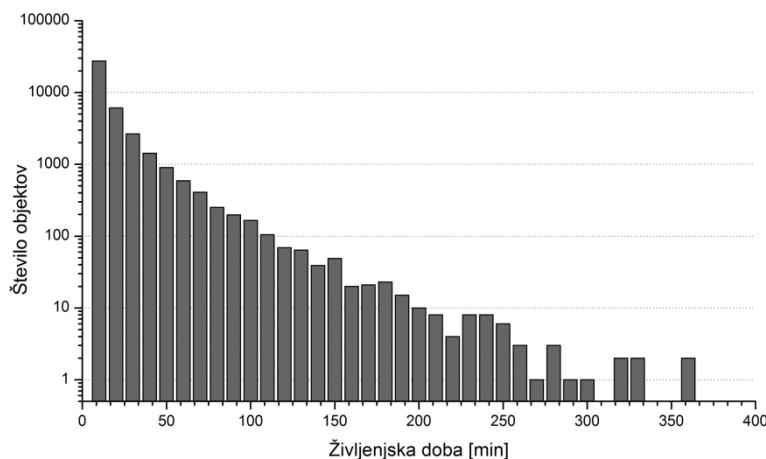
Meteorološki radar na Lisci vsakih 10 minut premeri ozračje v svoji okolici. Na podlagi teh podatkov je z uporabo Waldvoglove in ZAMG metode mogoče določiti območja, kjer v tem 10-minutnem obdobju na tleh najverjetneje pada toča. Če se enak postopek ponovi tudi za naslednje 10-minutne časovne intervale, dobimo zaporedje “slik”, na katerih so označena območja s točo. Vsaka “slika” je geolocirano dvodimenzionalno polje z binarnimi vrednostmi – npr. vrednost 0, če na lokaciji v tem 10-minutnem časovnem intervalu ni padala toča, in 1, če je toča padala. Območja z vrednostmi 1 si je možno predstavljati kot področja s točo, ki se s časom premikajo in spreminjajo. Za sledenje področjem s točo je bila uporabljena modificirana metoda, predstavljena v Skok s sod. (2009, 2010), ki temelji na definiranju in sledenju objektov v zaporedju dvodimenzionalnih polj. Originalna metoda je bila prilagojena analizi območij s točo, ki so specifičen problem – predvsem ker so razmeroma majhna in se hitro gibljejo. Problem je bil rešen tako, da so bila območja s točo umetno povečana za 2 km. S tem se je prekrivanje območij s točo v zaporednih časovnih intervalih izboljšalo, kar je omogočilo sledenje področjem s točo.



Slika 1: Trajektorije območij s točo v obdobju maj-avgust 2002-2010. Črna barva trajektorij pomeni premik proti vzhodu, siva pa premik proti zahodu. a) Vse trajektorije, b) trajektorije, ki so daljše od 150 minut. Črni krog in ravne črte prikazujejo meje med tremi območji analize.

Slika 1 prikazuje trajektorije območij s točo. Območje zunaj kroga predstavlja oddaljenost od radarja pri kateri je negotovost pri identifikaciji toče zelo velika. Glavni razlogi za povečano negotovost so trije: slabša horizontalna ločljivost, razmeroma visok najnižji radarski snop ter zmanjšana vertikalna ločljivost (zgornji radarski snopi so pri veliki oddaljenosti že nad troposfero in tako se je treba zanašati le na podatke iz nižjih snopov, ki pa so tam že precej široki). V samem središču območja je videti manjše prazno območje brez trajektorij, ki se pojavi zaradi tega, ker radar dela ozračja nad seboj ne premeri in tam ni mogoče zaznavati toče.

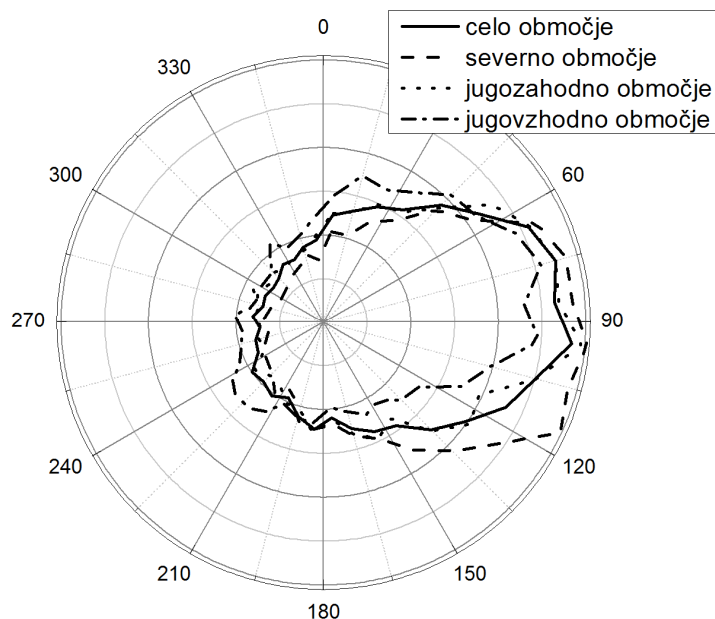
Trajektorije se pojavljajo na celotnem območju, njihova gostota pa se s krajem spreminja. Glede na subjektivno vizualno analizo je videti tudi, da je črnih trajektorij več kot sivih. To pomeni, da se območja s točo bolj pogosto premikajo proti vzhodu kot proti zahodu. Na desni strani slike 1, kjer so prikazane samo trajektorije s trajanjem vsaj 150 minut, se vidi, da lahko v tem času prepotujejo velike razdalje, nekatere tudi več kot polovico analiziranega območja.



Slika 2: Število trajektorij glede na njihovo življenjsko dobo.

Slika 2 prikazuje porazdelitev števila trajektorij glede na njihovo življenjsko dobo. Največ je kratkih trajektorij dolžine 10 minut (okoli 30000), z daljšo življenjsko dobo pa njihovo število pada. Zelo dolgih trajektorij je malo. Trajektorij daljših od 300 minut je šest.

Slika 3 prikazuje porazdelitev območij s točo glede na smer njihovega gibanja. Sicer prihaja do gibanja v vseh smereh, vendar je gibanje proti vzhodu najbolj pogosto. Do nekaterih razlik prihaja tudi v gibanju v različnih območjih, predstavljenih na desni strani slike 1. Tako v jugovzhodnem območju (ki zavzema predvsem del Hrvaške in Bosne in Hercegovine) prevladuje gibanje proti vzhodu, ki pa je nekoliko odklonjeno proti severu, medtem ko v severnem območju (ki zavzema severno Slovenijo in del Avstrije) prevladuje gibanje proti vzhodu, ki je nekoliko odklonjeno proti jugu. V zahodnem območju (ki vsebuje zahodno in južno Slovenijo, del Italije in zahodni del Hrvaške) prevladuje gibanje proti vzhodu, ki je prav tako nekoliko odklonjeno proti severu, vendar manj kot v jugovzhodnem območju.



Slika 3: Relativna pogostost smeri gibanja (azimut) območij s točo na različnih območjih. Razsežnosti območij so označene na Sliki 1 desno.

Analiza modelskih indikatorjev toče

Napovedovanje močne konvekcije je za numerične meteorološke modele, ki se danes uporabljajo pri operativnem napovedovanju vremena, še vedno zelo velik izziv. Pri njihovi tvorbi ter življenjskem ciklu sodelujejo kompleksni dinamično-fizikalni procesi, ki v modelu ponavadi niso dovolj natančno opisani. Poleg tega je konvekcija pogosto manjše dimenzije od efektivne ločljivosti modelske računske mreže in je njen vpliv na meteorološke spremenljivke v modelskih točkah potrebno opisati s pomočjo parametrizacij. Pravilna napoved časa in kraja nastanka konvekcije je pogojena še z natančnostjo začetnih pogojev - stanja ozračja ob začetku modelske napovedi. Zaradi zgoraj naštetih omejitev je na možnost za nastanek izrazitih konvektivnih procesov in njihove pričakovane lastnosti pogosto lažje sklepati posredno s pomočjo indikatorjev konvekcije. Ti opisujejo značilnosti ozračja nad širšim območjem, njegovo statično nestabilnost, vlažnost, vetrovne karakteristike in podobno.

Močne konvektivne padavinske tvorbe pogosto spremlja tudi toča. Osnovni namen tega dela raziskave je preveriti, če se ob situacijah, ko je bila toča zabeležena pri tleh, vrednosti indikatorjev močne konvekcije bistveno razlikujejo od konvektivnih situacij, kjer se toča ni pojavila. Za analizo smo izbrali 28 dni med leti 2007 in 2010. V teh dnevih se je na radarskih slikah meteorološkega radarja na Lisci pojavilo veliko število močnih radarskih odbojev. V mrežnih celicah velikosti 1 krat 1 km je bilo v posameznem dnevu zaznanih 250-700 odbojev nad 51 dBZ. Uporabljene so bile maksimalne vrednosti radarskega odboja v vertikalnem stolpcu nad določeno točko.

Za tako izbrane datume je bila izdelana numerična vremenska napoved z meteorološkim modelom ALADIN-SI, s horizontalno ločljivostjo 4,4 km in s 43 vertikalnimi nivoji, ki se za operativno prognozo vremena uporablja na Agenciji RS za okolje. Ker se je večina konvektivnih dogodkov zgodila v popoldanskem času, je bila modelska napoved pognana na podlagi analize vremena prejšnjega dne ob 12 UTC. To pomeni, da je bila napoved v

poprečju malo več kot 24-urna. Na ta način se lahko preiskuje možnost napovedovanja toče s pomočjo indikatorjev močne konvekcije en dan vnaprej.

Na podlagi modelskih napovedi so bile nad območji z najmočnejšimi radarskimi odboji izračunane vrednosti različnih indikatorjev konvekcije. Uporabljene konvektivne indekse, njihov pomen in tipične vrednosti iz literature zelo na kratko predstavlja tabela 1. V tabeli 2 so zbrani rezultati analize za izbrane dneve. Označeno je tudi, ali je bil zabeležen pojav toče. Pri ugotavljanju, ali se je toča pojavila, smo uporabili podatke mreže meteoroloških postaj ARSO in dnevne biltene o izrednih dogodkih Centra za obveščanje Republike Slovenije (CORS), kjer so opisane tudi intervencije zaradi vremenskih nevšečnosti. Izmed 28 obravnavanih situacij je bila toča 23-krat zabeležena, 5-krat pa se toča ni pojavila.

V skoraj vseh obravnavanih situacijah so vrednosti indeksov takšne (v primerjavi z mejnimi vrednostmi iz literature), da je mogoče predvideti močno konvekcijo. V tabeli 2 so spodaj navedena tudi povprečja indikatorjev konvekcije posebej za dogodke z in brez toče. Vidimo lahko da je pri dogodkih s točo v povprečju na voljo nekaj več potencialne energije (CAPE je večji za okoli 400 J/kgK). Nekaj manjši je tudi Showalterjev indeks (za 1 K), ki je tudi mera za nestabilnost ozračja. Razliko je možno opaziti tudi pri vertikalnem striženju vetra z višino, ki je pri dogodkih brez toče za okoli 4 m/s večje. To nakazuje, da ob prevelikem vetrovnem striženju (in s tem večinoma hitrejšem potovanju neviht) do pogojev za točo prihaja manjkrat. Vendar pa se primeri brez zabeležene toče od ostalih ne razlikujejo bistveno. Iz pregleda lahko zaključimo, da na podlagi izračunanih indikatorjev učinkovito ločevanje med konvektivnimi dogodki s točo in brez nje ni mogoče, oziroma, drugače povedano, izrazite konvektivne dogodke z močnimi radarskimi odboji vedno lahko spremlja tudi pojav toče.

Preglednica 1: Kratka predstavitev uporabljenih indikatorjev konvekcije in tipičnih vrednosti ob močnih nevihtah.

konvektivni indeks	enota	kaj opisuje	okvirne vrednosti ob močnih nevihtah
CAPE (most unstable)	J/kg	energija, ki je na razpolago za konvekcijo	več kot 1000
850 hPa ekvivalentna potencialna temperatura	K	temperatura in vlažnost zraka	nad 330
vertikalna gibanja na 700 hPa	m/s	sinoptična dviganja in razločena konvekcija	majhne ali negativne vrednosti
striženje vetra med 1 in 6 km	m/s	ločevanje območij vzgornikov in vzdolžnikov	več kot 10
striženje vetra med 0 in 1 km	m/s	striženje pri tleh, (pomembno za nastanek tornadov)	več kot 5
padec temperature med 2 in 4 km	K/km	statična (ne)stabilnost ozračja	več kot 7
razlika ekvivalentne potencialne temperature: tla minus minimum srednje troposfere	K	indikacija močnosti močnih vzdolžnikov, nevihtnega piša (downburst)	več kot 20
Showalterjev indeks	K	statična stabilnost atmosfere pri 850 hPa	manj kot -1

razlika ekviv.											
850 hPa ekvivalentna potencialna temperatura	vertikalna gibanja na 700 hPa	striženje vetra med 1 in 6 km	striženje vetra med 0 in 1 km	padec temperature med 2 in 4 km	pot.		Showalterjev indeks	kraj, regija	toča		
					temperature pri tleh in v srednji troposferi	temperature pri tleh in v srednji troposferi					
2006-06-29	15:00:00	2500	334	-0,8	20,8	6,6	5,8	7,6	-0,6	Kranj, Litija, Celje, Sentjur, Maribor	da
2007-05-23	15:00:00	1600	327	1,4	8,4	8,7	6,6	7,0	-1,3	Velenje, Krško, Brežice	da
2007-05-27	15:00:00	2100	330	1,0	15,0	7,6	7,3	11,9	-0,7	Krško polje	da
2007-06-23	3:00:00	1500	329	0,0	46,0	8,7	6,3	10,0	0,4	Gorenjska	ne
2007-07-24	18:00:00	1500	333	-0,2	16,0	8,0	7,7	16,0	-3,0	Jesenice, Novo mesto, Suha krajina	da
2007-08-17	00:00:00	1800	338	0,3	16,8	4,9	6,3	16,2	-2,3	Šenčur, Kamnik, Braslovče	da
2007-08-23	15:00:00	1000	333	-0,3	29,0	8,4	5,8	5,7	1,0	osrednja Slovenija	ne
2008-06-17	15:00:00	1500	325	-0,8	18,0	11,0	6,0	4,3	0,6	Krško, Brežice, Središče ob Dravi	da
2008-06-24	18:00:00	3070	342	0,2	18,7	3,5	6,6	18,1	-2,0	Goričko	da
2008-06-27	18:00:00	2100	332	1,0	14,0	3,7	5,9	7,7	-0,9	Ljubljana	da
2008-07-04	15:00:00	2600	334	0,0	19,0	4,0	5,6	8,4	0,5	Brežice, Ljutomer	da
2008-07-06	18:00:00	1800	337	0,1	14,0	7,0	6,0	12,0	-0,6	Goriška, Gorenjska	ne
2008-07-07	18:00:00	1900	332	0,3	23,0	10,0	6,1	7,3	-1,0	Koper, Komen, Krško	da
2008-07-13	15:00:00	2600	338	1,3	16,0	7,4	6,5	20,0	-4,0	Kamnik, Savinjska, Mariborska	da
2008-07-14	00:00:00	980	329	2,2	26,0	6,0	6,4	7,8	-0,5	Koroška	da
2008-08-02	14:00:00	2400	337	0,2	9,2	1,8	6,0	13,0	-0,7	Žužemberk	da
2008-08-08	16:00:00	1800	336	0,8	13,0	8,2	4,7	15,0	-0,5	Ljubljana, Ilirska Bistrica, Sevnica	da
2008-08-15	21:00:00	1800	333	-0,3	29,0	3,0	6,0	7,1	-2,6	Dolenjska, Ptuj	da
2008-08-23	15:00:00	1000	328	-0,7	19,0	6,3	6,5	8,8	-0,4	Ljubno ob Savinji	da
2009-05-22	16:00:00	2100	344	0,2	20,0	4,0	6,0	30,0	-3,5	Podravje	da
2009-05-24	18:00:00	1500	345	0,6	11,8	5,9	7,9	25,7	0,0	Ljubljana	ne
2009-05-26	18:00:00	3200	339	0,3	11,0	4,0	7,0	21,0	-1,4	Koroška,Podravje	da
2009-07-15	21:00:00	2200	346	-0,1	7,1	1,1	6,2	20,7	-3,0	Goričko	ne
2009-08-03	18:00:00	2600	336	-1,9	17,0	4,0	6,5	17,0	-1,9	Ljubljana, Koroška	da
2009-08-03	15:00:00	1400	343	0,0	13,1	5,0	6,5	31,0	0,0	Krško	da
2009-08-10	22:00:00	1300	330	0,4	7,4	5,9	6,3	10,4	-1,0	Sežana	da
2009-08-29	12:00:00	1800	331	-0,2	16,6	2,4	5,6	8,5	-1,7	Žužemberk	da
2010-07-13	15:00:00	3000	346	-0,2	7,0	4,0	6,0	16,9	-1,0	Podravje, Koroška	da
povprečje toča											
povprečje brez toče											
335											
1600											
2028											
13,5											
6,2											
14,8											
-1,3											
da											
-0,4											
ne											

Zaključki

Radarske meritve atmosfere predstavljajo alternativni vir podatkov o pojavljanju toče. Njihova prednost je predvsem dobra prostorska in časovna ločljivost. Na podlagi radarskih meritev je že bila izdelana karta pogostosti toče nad Slovenijo (Klemenčič in sod., 2009). Prispevek opisuje še dve analizi povezani z omenjeno raziskavo: analizo trajektorij območij s točo in analizo modelskih indikatorjev za pojav močnih neviht s točo.

Analiza trajektorij območij s točo je pokazala, da največ dogodkov s točo traja le kratek čas, obstajajo pa tudi več ur dolgi dogodki, ki lahko v svojem življenjskem ciklu prepotujejo dolge razdalje – tudi več kot sto kilometrov. Analiza gibanja območij s točo je pokazala, da pride do gibanja v vseh smereh, vendar je gibanje proti vzhodu najbolj pogosto, do nekaterih razlik pa prihaja tudi v gibanju nad različnimi geografskimi območji.

V drugem delu je predstavljena analiza modelskih indikatorjev toče, s čimer smo želeli preveriti, ali se ob situacijah, ko je bila toča zabeležena pri tleh, vrednosti indikatorjev močne konvekcije bistveno razlikujejo od konvektivnih situacij, pri katerih se toča ni pojavila. Uporabljeni so bili nekateri pogosto uporabljeni indikatorji konvekcije. Analiza 28 situacij z močno konvekcijo (23 s točo in 5 brez toče) z meteorološkim modelom ALADIN-SI, ločljivosti 4,4 km, je pokazala, da v 24-urni napovedi ni statistično značilnih razlik med primeri močne konvekcije s točo in brez nje.

Pri interpretaciji in uporabi rezultatov obeh analiz je potrebno paziti na inherentno negotovost pri identifikaciji območij s točo (ali močne konvekcije) z uporabo radarskih podatkov. V neposredni bližini radarja identifikacija toče ni možna, na veliki oddaljenosti od radarja pa je negotovost pri identifikaciji precejšnja. Analize so tudi omejene na poletne mesece, ko se pojavi največ dogodkov s točo, kar pomeni, da niso zajeti vsi dogodki.

Literatura

- DIVJAK, Marjan, ROŠKAR, Jožef, CEGNAR, Tanja, GREGORČIČ, Branko, RAKOVEC, Jože, KAJFEŽ-BOGATAJ, Lučka. Toča in obramba pred njo = Hail and hail protection. Meseč. bilt. (Agencija Rep. Slov. okolje, Tisk. izd.). [Tiskana izd.], maj 2004, let. 11, št. 5, str. 38-45.
- KLEMENČIČ, Stane, ROZMAN, Črtomir, STRAJNAR, Benedikt, ŽAGAR, Mark, KLEMENČIČ KOSI, Stanislava. Upravljanje s tveganjem zaradi toče v SV Sloveniji = Hail risk management in North East Slovenia. V: ČEH, Tatjana (ur.), KAPUN, Stanko (ur.), VERBIČ, Jože (ur.), KRAMBERGER, Branko (ur.), STEINGASS, Herbert (ur.), STEINWIDDER, Andreas (ur.), ŠPUR, Marjan (ur.). Zbornik predavanj - 17. mednarodno znanstveno posvetovanje o prehrani domačih živali : [tudi] Zdravčevi-Erjavčevi dnevi = Zdravec-Erjavec Days, Radenci, 13. in 14. november 2008. Murska Sobota: Kmetijsko gozdarska zbornica Slovenije, Kmetijsko gozdarski zavod, 2008, str. 219-231
- KLEMENČIČ, Stane, ŽAGAR, Mark, ROZMAN, Črtomir, KLEMENČIČ KOSI, Stanislava, STRAJNAR, Benedikt. *Analiza upravljanja s tveganjem zaradi toče z uporabo atmosferskih modelov in dreves odločanja*. Maribor: Kmetijsko gozdarski zavod, 2009. 84 str., ilustr. ISBN 978-961-6488-14-3.
- KLEMENČIČ, Stane, RAKOVEC, Jože, ROZMAN, Črtomir, SKOK, Gregor, KLEMENČIČ KOSI, Stanislava. Upravljanje s tveganjem zaradi toče v Sloveniji = Hail risk management in Slovenia. V: ČEH, Tatjana (ur.). Zbornik predavanj : [being] Zdravec-Erjavec Days 2012, Radenci, November 8th and 9th, 2012. Murska Sobota: Kmetijsko gozdarska zbornica Slovenije, Kmetijsko gozdarski zavod, 2012, str. 163-168.
- SKOK, Gregor, TRIBBIA, Joe, RAKOVEC, Jože, BROWN, Barbara. Object-based analysis of satellite-derived precipitation systems over the low-and midlatitude Pacific Ocean. *Mon. weather rev.*, 2009, vol. 137, str. 3196-3218, doi: 10.1175/2009MWR2900.1

- SKOK, Gregor, TRIBBIA, Joe, RAKOVEC, Jože. Object-based analysis and verification of WRF model precipitation in the low- and Midlatitude Pacific Ocean. *Mon. weather rev.*, 2010, vol. 138, no. 12, str. 4561-4575, doi: 10.1175/2010MWR3472.1.
- ZAMG. Automatic radar nowcasting at ZAMG. Presentation at ICEED nowcasting workshop, 19 - 20 February 2007, Vienna, Austria.
- Waldvogel A., B. Federer and P. Grimm, 1979: Criteria for the detection of hail cells. *J. Appl. Meteorol.*, 18(12), 1521–1525.

Značilnosti temperature zraka v Predjamskem jamskem sistemu

Stanka Šebela*, Janez Turk*

Povzetek

Od Avgusta 2009 se v Predjamskem jamskem sistemu opravljajo zvezne meritve temperature zraka ter primerjava z zunanjimi temperaturnimi razmerami. Vhodni rov imenovan Konjski hlev je močno podvržen zunanjim vplivom, v Veliki dvorani globlje v notranjosti jame pa so ta nihanja manjša. Temperatura zraka je v poletnem obdobju v Veliki dvorani zelo stabilna, v zimskem obdobju pa bolj odvisna od nihanja zunanje temperature. Predjamski jamski sistem je zaradi zapletene geometrije rogov in več vhodov na različnih višinah v smislu gibanja zračnih mas zelo dinamičen sistem.

Ključne besede: jamska meteorologija, Predjama, Slovenija

Keywords: cave meteorology, Predjama Cave, Slovenia

Uvod

Predjamski (13.092 m) jamski sistem je četrti najdaljši kraški sistem v Sloveniji. V okviru projektov Strokovni nadzor in svetovanje pri upravljanju z jamskimi sistemi, Klimatski in biološki monitoring jamskih sistemov (financer Postojnska jama d.d.) ter Meritve in analiza izbranih klimatskih parametrov v kraških jamah: primer sistema Postojnskih jam (sofinancer Javna agencija za raziskovalno dejavnost RS) od leta 2009 izvajamo redni monitoring jamske mikroklimе na izbranih lokacijah.

V prispevku podajamo osnovne značilnosti jamske mikroklimе na podlagi urnih oziroma deset minutnih meritev. Glede na občasne meritve smeri in hitrosti vetra v jami predstavljamo tudi značilnosti gibanja zraka v poletnem in zimskem režimu.

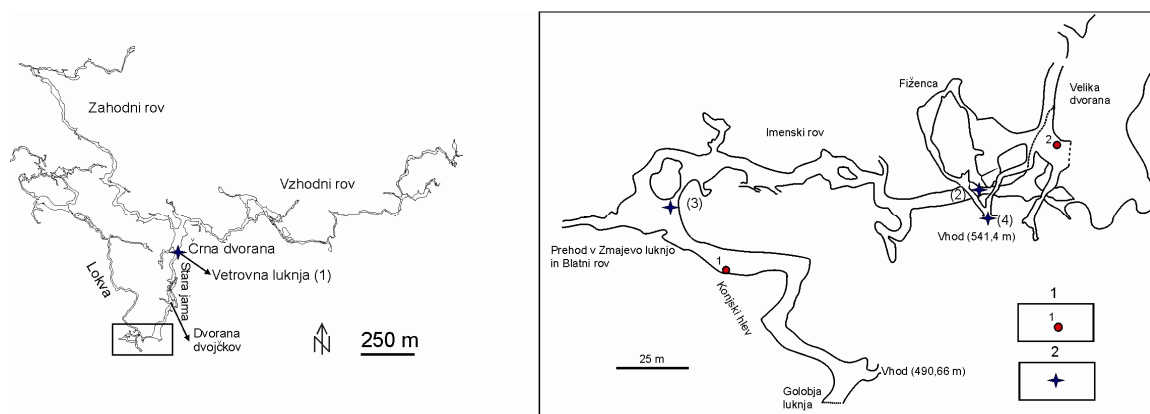
Predjamski jamski sistem je zaradi zapletene geometrije rogov in več vhodov na različnih nadmorskih višinah zanimiv za študij jamske meteorologije. Prva meteorološka opazovanja iz Predjame je zabeležil Schmidl (1854). Anelli je v obdobju 1941–44 predstavil meteorološka opazovanja v Predjamskem jamskem sistemu z gibanjem zraka in merjenjem temperature. Opisoval je princip zračne vreče, ki je značilen za Konjski hlev (Slika 1). Gre za dva zračna tokova različnih temperatur, ko eden vstopa v jamo in drugi iz nje odhaja. Ob nizkih zimskih temperaturah, kot je bilo januarja 1943, je iz Fižence izhajal topel jamski zrak, kar je v prvih jutranjih urah povzročilo oblak na vhodu v višje ležečo Fiženco (Anelli 1941–44).

Habe (1970) je predstavil nekatere podatke o jamski meteorologiji s temperaturnim grafom od februarja 1956 do februarja 1957 za Lokvo, Staro jamo, Fiženco, Blatni rov, Veliko dvorano, Črno dvorano in Vzhodni rov. Meril je veter, vlažnost in temperaturo zraka ter skale. Habe (1970) je opisoval poletni in zimski režim ter vmesno dobo, ko prihaja do menjavanja zimske in letne smeri vetra. V poletnem zračnem gibanju teče zračni tok iz Zahodnega in Vzhodnega rova skozi Vetrovno luknjo do Velike dvorane, kjer se mu pridruži ohlajeni hladnejši zrak iz Fižence (Slika 2). Hladnejši jamski zrak tako uhaja iz vseh odprtih Lokve in Zmajeve luknje. Pozimi zračni tok vdira skozi Vetrovno luknjo v

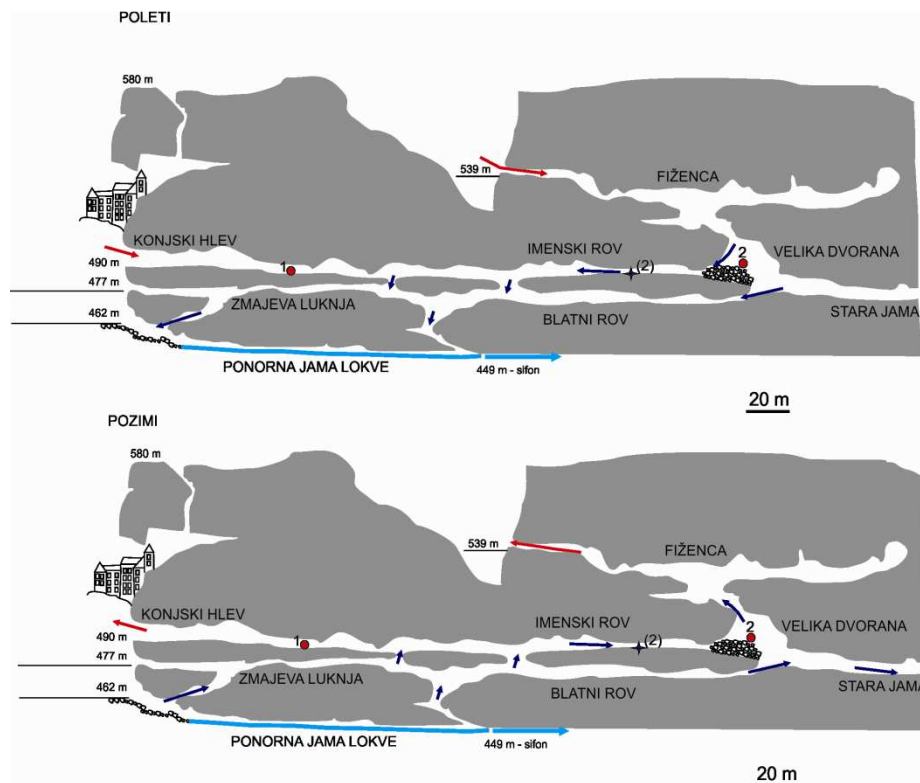
* ZRC SAZU, Inštitut za raziskovanje krasa, Titov trg 2, SI-6230 Postojna

Črno dvorano. Največja hitrost vetra v Vetrovni luknji je bila februarja leta 1956 izmerjena na 8,3 m/s. Ob nizkih zunanjih temperaturah pa segajo ledeni kapniki vse do Dvorane dvojčkov (Habe 1970), kar kaže na vdor hladnega zraka globoko v notranjost jame.

Kranjc (1983) je opisal vpliv zmrzali na odlaganje sige v vhodnih delih Predjamskega jamskega sistema. Največ sige je odpadlo v pozni jeseni, najmanj pa poleti in zgodaj jeseni. V obdobju od 9.1.1980 do 31.3.1981 je opravljal redne meritve temperature zraka in vlage v Golobji luknji in Vetrovni luknji. Največja izmerjena hitrost vetra v Vetrovni luknji je bila dne 9.1.1981, in sicer 9 m/s.



Slika 1 – Predjamski jamski sistem in položaj merilnih mest jamske mikroklimе. 1 – merjenje temperature zraka (1=Konjski hlev, 2=Velika dvorana), 2 – merjenje smeri in hitrosti vetra (1=Vetrovna luknja, 2=prelaz v Imenskem rovu, 3=prehod iz Imenskega rova v Zmajevo luknjo in Blatni rov, 4=vhod v Fiženco).



Slika 2 – Poletni in zimski režim smeri vetra v vhodnih delih Predjamskega jamskega sistema. $T_{\text{zun}} > T_{\text{jama}}$ = poletni režim (iz Velike dvorane v Imenski rov; iz Črne dvorane skozi

Vetrovno luknjo v Staro jamo), $T_{\text{zun}} < T_{\text{jama}}$ = zimski režim (iz Imenskega rova v Veliko dvorano; skozi Vetrovno luknjo v Črno dvorano in Staro jamo).

V zadnjih letih se sistematične raziskave jamske mikroklimе opravljajo v Postojnskem jamskem sistemu (Gabrovšek in Mihevc 2009, Šebela in Turk 2011a, Gregorič *et al.* 2012, Šebela *et al.* 2012), Škocjanskih jamah (Debevec Gerjevič in Jovanovič 2012), Županovi jami (Ravbar in Košutnik 2012) ter v Predjamskem jamskem sistemu (Gabrovšek *et al.* 2011, Šebela in Turk 2011b).

Opis merilnih mest in metodologija

Temperaturo zraka smo merili z avtomatskimi inštrumenti (t.i. *diver*) proizvajalca Van Essen. Z meritvami smo pričeli 6. avgusta 2009. V jami smo vzpostavili dve meritveni mesti. Prvo je v vhodnem delu, to je v Konjskem hlevu na nadmorski višini 488 m, drugo pa v Veliki dvorani (492,5 m) (Slika 1).

Poleg merilnih mest v jami pa smo od 7.10.2009 vzpostavili tudi merilno mesto izven jame, in sicer na površju v gozdu nad Otoško jamo na nadmorski višini 545 m, ki je od Predjame oddaljena približno 9 km.

Temperaturna natančnost znaša $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. V Predjamskem jamskem sistemu so temperaturne meritve potekale zvezno na obeh merilnih mestih, časovni interval med dvema meritvama je znašal 10 minut ali 1 uro.

Za primerjavo z jamskimi meritvami so prikazani tudi podatki zunanje temperature, in sicer za Postojno (podatke smo pridobili na ARSO) ter za površje nad Otoško jamo. Menimo, da se temperature zraka na površju pri Predjami in nad Otoško jamo bistveno ne razlikujejo.

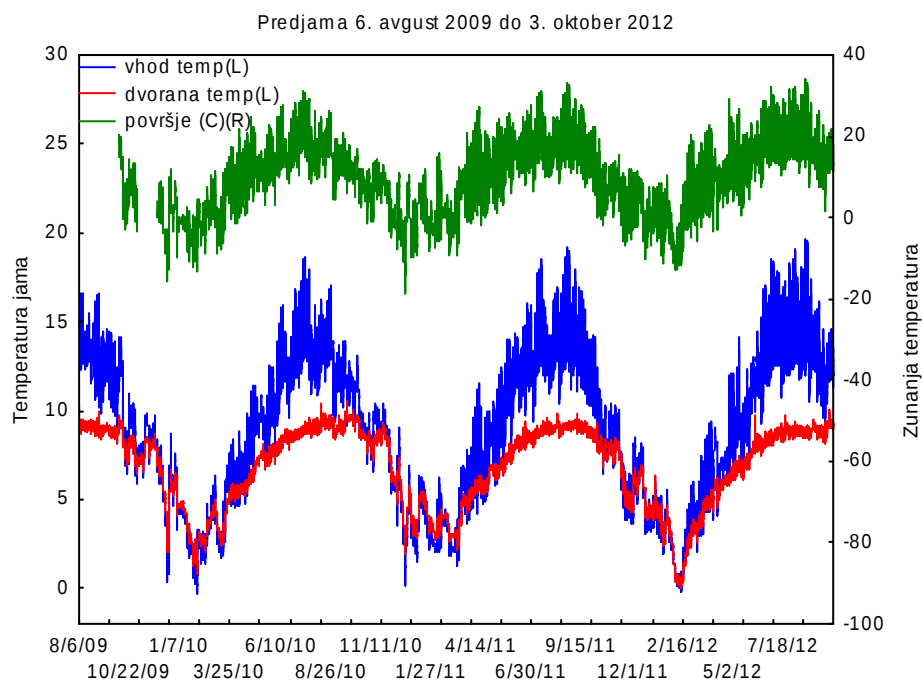
Občasno smo izvajali tudi meritve smeri in hitrosti vetra na štirih lokacijah (Slika 1).

Rezultati in razprava

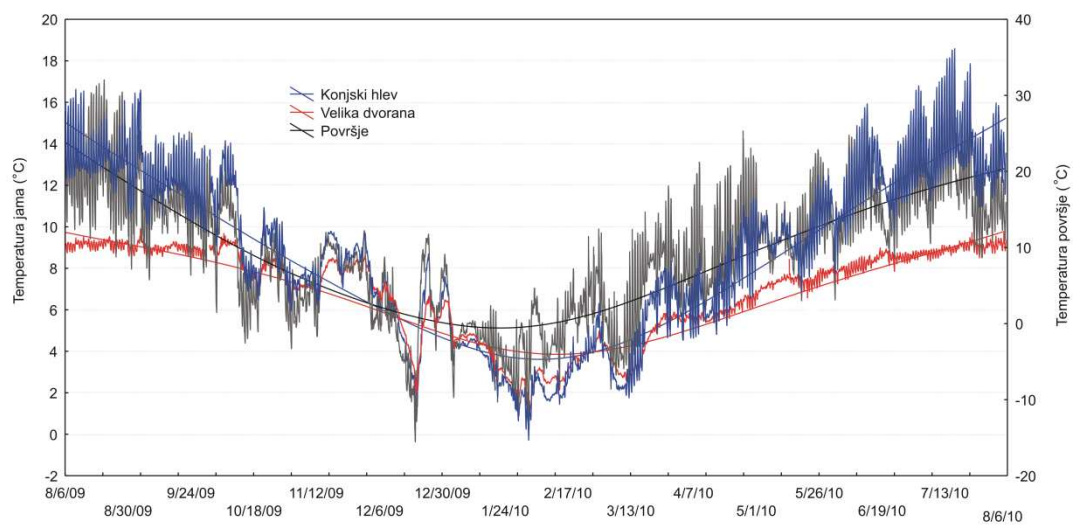
Temperatura zraka je predstavljena za obdobje od 6. avgusta 2009 do 3. oktobra 2012 (Slika 3).

Nihanje temperature zraka v Konjskem hlevu je zelo podobno razmeram na površju. V Veliki dvorani pa je zimski vpliv močnejši kot poletni. V obdobju od leta 2009 do konca leta 2012 je opazen rahel trend naraščanja temperature zraka v Konjskem hlevu in na površju. V Veliki dvorani pa trend naraščanja ni opazen in je temperatura zraka povprečno bolj stabilna.

Povprečna letna temperatura zraka (od 6.8.2009 do 6.8.2010, Slika 4) na merilnem mestu v Konjskem hlevu znaša $8,67^{\circ}\text{C}$. V istem primerjalnem obdobju je bila povprečna letna temperatura zraka v gozdu nad Otoško jamo pri Postojni $9,25^{\circ}\text{C}$ (Preglednica 1). Izmerjena povprečna temperatura v Konjskem hlevu pa je zelo podobna dolgoletni povprečni temperaturi Postojne (1960-1990), ki znaša $8,4^{\circ}\text{C}$ (vir: ARSO). Zanimiva je razmeroma nizka povprečna letna temperatura zraka v Veliki dvorani, ki znaša zgolj $6,80^{\circ}\text{C}$, kar je celo za $2,45^{\circ}\text{C}$ manj od temperature na površju – merjena v gozdu nad Otoško jamo (Preglednica 1).



Slika 3 – Zvezne meritve temperature zraka za Konjski Hlev (vhod), Veliko dvorano (dvorana) in površje v °C.



Slika 4 – Temperatura zraka za obdobje 6.8.2009 – 6.8.2010.

Preglednica 1 - Osnovni statistični podatki merjenja temperature zraka v °C za Predjamski jamski sistem (6.8.2009 do 6.8.2010).

	Konjski hlev (°C)*	Velika dvorana (°C) ¹	Površje (°C) ²
POVPREČJE	8,67	6,80	9,25
STANDARDNA DEVIACIJA	4,00	2,176	8,79
ŠTEVILO MERITEV	52399	52424	8756
NAJNIŽJA VREDNOST	-0,35	0,81	-15,61
NAJVIŠJA VREDNOST	18,67	10,25	32,10

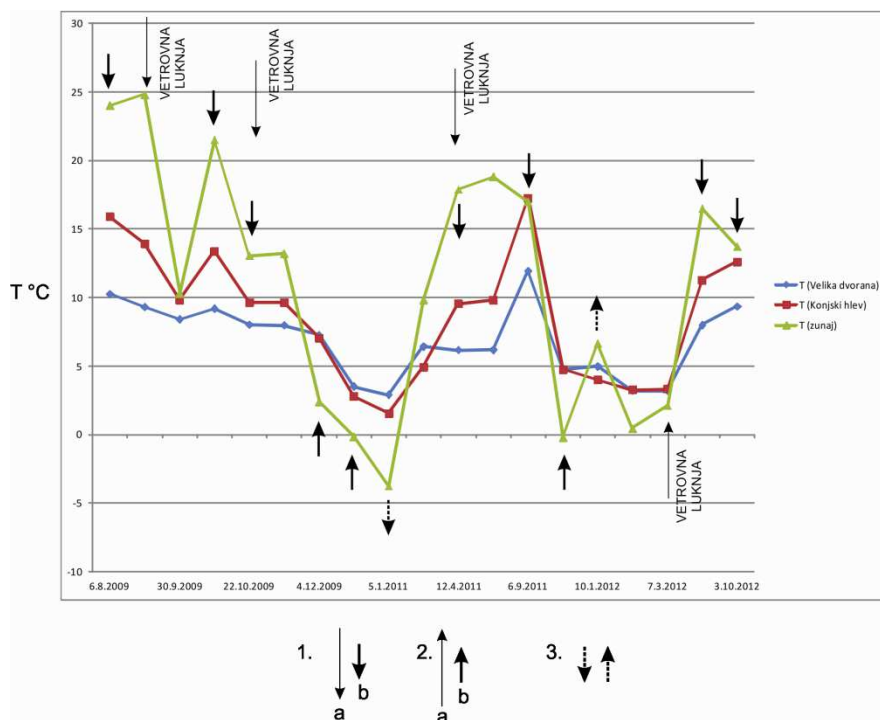
Temperaturna nihanja v Konjskem hlevu imajo enak trend kot temperaturna nihanja na površju. Merilno mesto v Konjskem hlevu je dovolj blizu vhoda, da ima površinski zrak zelo jasen in izrazit vpliv na jamsko temperaturo (Sliki 3 in 4).

Podatki kažejo, da temperatura na merilnem mestu v Konjskem hlevu niha za več kot 18°C v letnem ciklu. Glede na podatke za obdobje 6.8.2009 – 6.8.2010, se temperatura pozimi spusti za nekaj desetink stopinj Celzija pod ničlo, poleti pa naraste tudi do 18,67°C (Preglednica 1). Tudi v dnevnem ciklu temperatura niha za skoraj 6°C. Takšna velika dnevna temperaturna nihanja so značilna za toplejšo polovico leta, predvsem za poletje.

Habe (1970) je poročal, da se v Konjskem hlevu ustvarja lokalni zračni tok. Zračni tok je zaključen, del zraka se vrača in odhaja iz jame po istih jamskih rovih kot vanjo priteka. Takšen zračni tok lahko pojasni izrazit vpliv zunanjih temperaturnih razmer v Konjskem hlevu, kjer beležimo zelo jasna dnevna nihanja (s periodo 12 ur). Ta nastanejo zaradi temperaturnih razlik med dnevom in nočjo.

Drugo merilno mesto predstavlja Velika dvorana (Slika 1) v kateri so zunanji vplivi manjši, kot v Konjskem hlevu. V Veliki dvorani so dnevna nihanja sicer še opazna, vendar je njihova amplituda neprimerno manjša kot na merilnem mestu v Konjskem hlevu. Temperatura nihanja zraka v Veliki dvorani v letnem ciklu znaša skoraj 10,5°C, v dnevnem ciklu pa temperatura niha za okoli 1°C ali manj (Sliki 3 in 4).

¹ Statistika na podlagi podatkov zabeleženih na vsakih 10 minut in
² urnih podatkov.



Slika 5 – Smer vetra, temperatura zraka na dveh mestih v Predjamskem jamskem sistemu ter zunanja temperatura za obdobje od 2009 do 2013. 1 – $T_{zun} > T_{jama}$ = poletni režim (a- Vetrovna luknja, b-Imenski rov, smer vetra je iz Velike dvorane v Imenski rov ter iz Črne dvorane skozi Vetrovno luknjo v Staro jamo), 2 – $T_{zun} < T_{jama}$ = zimski režim (a-Vetrovna luknja, b-Imenski rov, smer vetra je iz Imenskega rova v Veliko dvorano ter skozi Staro jamo in Vetrovno luknjo v Črno dvorano), 3 – izjemni dogodki.

Zanimivo je, da v toplejši polovici leta temperatura zraka v Veliki dvorani niha le v dnevnem ciklu. Nenadne spremembe v zunanjih temperaturnih trendih, pa se v Veliki dvorani ne odražajo, seveda v kolikor se ne spremeni smer zračne cirkulacije v jami. Temperatura zraka je bila v topli polovici merilnega obdobja uravnotežena na približno 9,5°C. Takoj spomladi, ko zunanje temperature narastejo in ne padajo več pod povprečno letno temperaturo zraka na površju (okoli 9 °C), se prične zrak v Veliki dvorani počasi segrevati. Ta proces je postopen in traja do vrhunca poletja, ko se temperatura ustali na približno 9°C.

Občasne meritve smeri in hitrosti vetra na štirih mestih (Slika 1) so potrdile poletni in zimski režim (Slika 2). Poleti potuje zrak od zgornjih proti spodnjim vodom, saj je hladen jamski zrak relativno gostejši od toplega zunanjega. Pozimi pa je pot zraka od spodnjih vodom skozi jamo proti zgornjim vodom. Hitrost vetra narašča s padanjem zunanje temperature. Tok zraka se ustavi, ko se zunanja temperatura približa 8°C (Gabrovšek *et al.* 2011). V Vetrovni luknji smo hitrost vetra izmerili od 1 do 5,5 m/s, v Imenskem rovu pa od komaj zaznavne hitrosti do max. 2 m/s.

Naleteli pa smo tudi na izjemne situacije, ki niso v skladu s poletnim ali zimskim režimom. Tak je primer 5 januarja 2011 in 10 januarja 2012 (Slika 5) na merilni točki v Imenskem rovu. Glede na nizke zunanje temperature in višje jamske temperature bi 5 januarja 2011 veter moral pihati iz Imenskega rova proti Veliki dvorani, pihal pa je ravno obratno s hitrostjo 1 m/s. V drugem primeru (10.1.2012) so bile zunanje temperature nekoliko višje kot jamske, veter pa je pihal s hitrostjo 0,5 m/s iz Imenskega rova proti Veliki dvorani.

Do mešanja med zimskim in poletnim režimom torej ne prihaja le spomladi in jeseni ampak tudi pozimi in verjetno tudi na dnevnem nivoju. Tudi Kranjc (1983) opisuje, da se v Vetrovni luknji pojavlja ponavljajoče se spreminjanje smeri vetra, kar je opazil 20.3.1981 ob hitrosti vetra okoli 0,5 m/s.

Sklep

Predjamski jamski sistem ima številne vhode, nanizane na različnih nadmorskih višinah. Gre za dinamičen in zapleten klimatski sistem, kjer se zunanji temperaturni vplivi čutijo daleč v notranjost. Zasledimo zimski in poletni režim zračne cirkulacije.

Na dveh merilnih mestih v Predjamskem jamskem sistemu opravljamo zvezne meritve temperature zraka od leta 2009. Izbrane podatke za obdobje od 6.8.2009 do 6.8.2010 smo analizirali z osnovnimi statističnimi metodami. Povprečna letna temperatura zraka v Konjskem hlevu znaša 8,67°C, v Veliki dvorani pa le 6,80°C. V istem obdobju je bila povprečna letna temperatura zraka v gozdu nad Otoško jamo pri Postojni 9,25°C (Preglednica 1). Temperaturna nihanja v Konjskem hlevu imajo enak trend kot temperaturna nihanja na površju. V Veliki dvorani so zunanji vplivi manjši, kot v Konjskem hlevu (Sliki 3 in 4). Temperatura nihanja zraka v Veliki dvorani v letnem ciklu znaša skoraj 10,5°C, medtem ko je ta podatek za Konjski hlev 19 °C. V Konjskem hlevu pozimi temperatura pade tudi pod 0 °C. Temperatura zraka je v poletnem obdobju v Veliki dvorani zelo stabilna.

Vertikalna razlika med merilnim mestom v Veliki dvorani in vhodom v Fiženco (541 m) znaša 49 m ter 35 m na horizontalni dolžini. Med ponorom Lokve (462 m) in Fiženco pa je 79 m vertikalne razdalje. Razporeditev večjih vhodov na različnih višinah omogoča dober dostop zunanjega zraka in dinamičnost Predjamskega jamskega sistema globoko v notranjost, to je vsaj do Vetrovne luknje.

Letno število obiskovalcev Predjamskega jamskega sistema je okrog 6.000. Obiski so organizirani od maja do konca septembra. Vpliv turizma na jamsko mikroklimo je zanemarljiv.

Literatura

- Anelli, F. 1941–44. Osservazioni di meteorologia ipogea nelle Grotte di Castel Lueghi presso Postumia. *Le Grotte d'Italia* serie 2a vol. V, 5-34, Trieste.
- Debevec Gerjevič, V. in Jovanovič, P. 2012. Environmental monitoring and radiation protection in Škocjan caves, Slovenia. "Scientific research in show caves", 13 – 15 September 2012, Guide book and abstracts, 22-23, Škocjan – Borgo Grotta Gigante/Brišički – Postojna.
- Gabrovšek, F., in Mihevc, A. 2009. Cave climate. 17th international karstological school "Classical Karst", 15-20th June 2009, Guide book & Abstracts. 1-92, Postojna.
- Gabrovšek, F., Mihevc, A., Mulec, J., Pipan, T., Prelovšek, M., Šebela, S. in Turk, J. 2011. Poročilo skrbnika (IZRK ZRC SAZU) o opravljanju koncesije v Postojnskem in Predjamskem jamskem sistemu – v letu 2010. 1-54, Postojna.
- Gregorič, A., Bezek, M. in Vaupotič, J., 2012. Radon as a tracer of cave ventilation and health hazard – the case of the Postojna Cave. "Scientific research in show caves", 13 – 15 September 2012, Guide book and abstracts, 26, Škocjan – Borgo Grotta Gigante/Brišički – Postojna.
- Habe, F. 1970. Predjamski podzemeljski svet. *Acta Carsologica* 5/1, 7-94, Ljubljana.
- Kranjc, A. 1983. Dinamika odpadanja sige v Golobji luknji, Predjama. *Acta Carsologica* 11, 99-116, Ljubljana.
- Ravbar, N. in Košutnik, J. 2012. Monitoring and analysis of cave air temperature variations in Županova Jama show cave, Central Slovenia. "Scientific research in show caves", 13 – 15

- September 2012, Guide book and abstracts, 25, Škocjan – Borgo Grotta Gigante/Briščiki – Postojna.
- Schmidl, A. 1854. Die Grotten un Höhlen von Adelsberg, Lueg, Planina und Laas, 1-316, Wien.
- Šebela, S. in Turk, J. 2011a. Local characteristics of Postojna Cave climate, air temperature, and pressure monitoring. *Theor. appl. climatol.* 105/3-4, 371-386, Wien, New York. doi: [10.1007/s00704-011-0397-9](https://doi.org/10.1007/s00704-011-0397-9).
- Šebela, S. in Turk, J. 2011b. Air temperature characteristics of the Postojna and Predjama cave systems. *Acta geogr. Slov.* 51/1, 43-64, Ljubljana. doi: [10.3986/AGS51102](https://doi.org/10.3986/AGS51102).
- Šebela, S., Prelovšek, M. in Turk, J. 2012. Impact of peak period visits on the Postojna Cave (Slovenia) microclimate. *Theor. appl. climatol.*, <http://www.springerlink.com/content/kt122v61708p7784/fulltext.pdf>, doi: [10.1007/s00704-012-0644-8](https://doi.org/10.1007/s00704-012-0644-8).
- <http://www.arso.gov.si/vreme/napovedi%20in%20podatki/postojna.html>. (15.7. 2012)

Preučevanje poplav novembra 2012 na podlagi nemerskih posnetkov z vključevanjem javnosti

dr. Mihaela Triglav Čekada*, Matija Klanjšček*, dr. Matija Zorn**

Povzetek

Med 4. in 6. novembrom 2012 so Slovenijo prizadele obsežne padavine in posledične poplave, ki so prizadele predvsem severozahodni in severovzhodni del države. Najbolj prizadeta so bila porečja Drave, Soče, Savinje in Meže. V prispevku predstavljamo možnost pridobivanja nemerskih posnetkov za potrebe določanja obsega poplav ob sodelovanju javnosti na prizadetih območjih. Na tej podlagi smo deloma preučili obseg poplav pri Tolminu, Mostu na Soči, Šoštanju, ter v spodnjem delu porečja Meže ter porečja Drave.

Ključne besede: nemerske fotografije, poplave 2012, vključevanje javnosti.

Key words: non-metrical photographs, floods in Slovenia 2012, collaborative data

Uvod

Poplave so pomemben sestavni del pokrajine, zato jih je treba upoštevati pri načrtovanju rabe prostora. V preteklosti so se naselja in infrastruktura izogibala nevarnim območjem. Še pred 2. svetovno vojno so na poplavnih območjih stali mlini, žage in podobni objekti ter peščica ogroženih naselij, kasneje pa so, predvsem zaradi interesa kapitala in lokalnih skupnosti, na poplavno ogroženih območjih zrasle cele stanovanjske soseske (na poplavno ogroženem južnem robu Ljubljane se je npr. število prebivalcev povečalo z nekaj tisoč na več kot 30.000; Komac in Zorn, 2011). Na nevarnih območjih je bilo zgrajene veliko javne infrastrukture ter industrijskih objektov, za katere zdaj zahtevamo zaščito (Komac, Natek in Zorn, 2008a; 2008b). S takšnim neodgovornim poseganjem v poplavni svet in s tem v naravno dinamiko tekočih voda, postajajo poplave vse večja grožnja, kar se je pokazalo tudi ob tokratnih poplavih. Tretjič v zadnjih šestih letih bo tako škoda zaradi poplav presegla 200 milijonov evrov (Škoda ..., 2012) (leta 2007 je bila okrog 233 milijonov evrov in leta 2010 prek 240 milijonov evrov; Komac in Zorn, 2011).

Poplave novembra 2012 so prizadele prek polovice slovenskih občin (109). Poškodovanih je bilo okrog 3600 stanovanjskih objektov, okrog 650 gospodarskih in upravnih objektov ter deset šol. Sprožilo se je tudi prek petsto zemeljskih plazov (Medmrežje 1; 2).

Poplave so bile posledica obilnega deževja med 4. in 6. novembrom 2012, ter predhodno namočenih tal (padavine med 26. in 28. oktobrom). V treh dneh je na zahodu Slovenije padlo do 280 mm padavin, v osrednji Sloveniji med 30 in 100 mm, na Pohorju do 100 mm, v vzhodni Sloveniji okrog 40 mm, v južni Sloveniji pa med 20 in 50 mm padavin. Pretoki rek so dosegli stoletne povratne dobe na Dravi (Drava je imela zaradi pospešenega praznjenja akumulacijskih jezer na avstrijskem Koroškem največji izmerjen pretok do sedaj), na Soči pri Solkanu, na Suhodolnici pri Slovenj Gradcu, na Meži v Črni na Koroškem ter na Radoljni v Rutii. Med petdeset- in stoletno povratno dobo so dosegle reke Sava (v zgornjem in spodnjem toku), Savinja (v zgornjem toku) ter Poljanska Sora,

* Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, 1000 Ljubljana

** Geografski inštitut Antona Melika, Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Gosposka ulica 13, 1000 Ljubljana

številni drugi vodotoki pa so imeli deset- do dvajsetletne povratne dobe (Hidrološko ..., 2012).

Z namenom čim učinkovitejše preventive v prihodnosti ter v luči odpravljanja posledic, skušamo tovrstne dogodke tudi ustrezno prostorsko oz. mersko ovrednotiti. Večinoma se pri nas obsege poplav določa s pomočjo posebnih fotogrametričnih snemanj, satelitskih optičnih visokoločljivostnih podob ali satelitskih radarskih podob (Oštir in drugi, 2011; Veljanovski in drugi, 2011; Veljanovski in Kokalj, 2012). Nekaj primerov uporabe amaterskih nemerskih fotografij za potrebe določitve obsega poplav v letu 2010 pa smo izvedli avtorji tega prispevka (Triglav Čekada in Zorn, 2012a; 2012b).

V času poplav novembra 2012 smo na *Geodetskem inštitutu Slovenije* objavili poziv širši javnosti, za zbiranje slikovnega gradiva, ki prikazuje poplave (GIS, 2012a). V prispevku predstavljamo potek akcije, količino prispelega gradiva, delež uporabljenega gradiva ter prve rezultate.

Metoda dela

Na spletni strani ter *Facebook* časovnici *Geodetskega inštituta Slovenije* smo še v času poplav 6. novembra 2012 objavili poziv (GIS, 2012a), v katerem je bilo opredeljeno kakšno slikovno gradivo potrebujemo in kam ga avtorji lahko pošljejo:

»Če imate fotografijo, ki pokriva čim širše področje, ki ga je zalila voda in je posneto z dvignjenega stojišča (fotografija je bila narejena iz višjih nadstropij bloka ali s hriba, vidne so oz. se da slutiti vsaj dve do tri različne prometnice, del kakšnega pobočja), nam jo prosim posredujte na poplave@gis.si.

V e-pošti prosimo navedite, kaj prikazuje fotografija:

- npr. poplave Ljubljanskega barja, fotografirane s Sv. Ane v smeri severovzhoda,
- datum in približna ura fotografiranja,
- stojišče fotografiranja – lahko je skica na karti ali opis (npr. ob cerkvi Sv. Ane),
- avtor fotografije«.

S pomočjo spletnih mreženj smo poskrbeli, da je poziv prišel do kar največjega števila spletnih uporabnikov še v času, ko so bile poplave še aktualne. Kot zelo učinkovit medij se je izkazal *Facebook*, s pomočjo katerega smo v relativno kratkem času dosegli hitro razširitev objave med uporabnike; sledili so številni ogledi, delitve ter komentarji.

Vzporedno s širjenjem informacij o našem pozivu prek spleta, smo pregledali številne spletne strani na katerih je bilo objavljeno slikovno gradivo s poplavljenih območij. Tako smo tudi sami iskali uporabne posnetke, ter vzpostavljali stike z avtorji, če so pripravljeni odstopiti svoje posnetke v raziskovalne namene.

22. novembra 2012 smo na spletnih straneh inštituta objavili prve rezultate, ob tem pa javnost ponovno pozvali k sodelovanju (GIS, 2012b). Naš ponoven poziv so med drugim povzeli na javni radioteleviziji, ki je ta dan imela akcijo zbiranja prostovoljnih prispevkov za prizadete ob poplavah.

Nabor pridobljenih posnetkov obsega posnetke narejene z različnimi fotoaparati ali video kamerami, shranjene v različnih ločljivostih (nekateri pridobljeni posnetki so shranjeni le v ločljivosti primerni za spletno objavo), ki so bili posneti terestrično ali iz zraka. Pri nekaterih posnetkih so nam avtorji posredovali podatke o približnem stojišču snemanja, kot smo prosili v pozivu, a vedno teh podatkov nismo prejeli. Težava je tudi v tem, da pri prejetih posnetkih parametrov kalibracije ne poznamo. Pri zračnih posnetkih se je izkazalo, da imajo videoposnetki narejeni iz zraka (slika 1) slabšo ločljivost in večje distorzije, kot fotografski posnetki.



Slika 1 – Poplavljanje reke Meže (5. november 2012) - del video posnetka z veliko distorzijo. Fotografa: Dominik Cehner (snemalec) in Damijan Cehner (pilot) AVIOFUN d.o.o.

Za orientacijo posnetkov smo uporabili interaktivno metodo orientacije posnetka na podlagi digitalnega modela reliefa (DMR). Metoda je enoslikovna in omogoča zajem trirazsežnostnih (3R) podatkov že iz le enega posnetka. Metoda temelji na iskanju najbolj ujemajoče se projekcije točk DMR-ja glede na stanje na posnetku, pri čimer iščemo parametre zunanje orientacije posnetka. Za orientacijo in izmero robu poplav smo uporabili DMR 5 m × 5 m izdelan v okviru cikličnega aerofotografiranja Slovenije - CAS2006 (Triglav Čekada in Zorn, 2012a; 2012b). Triglav Čekada in Zorn (2012b) sta na primeru poplav septembra 2010 na Ljubljanskem barju ovrednotila natančnost te metode, ob uporabi fotogrametričnega DMR 5 m × 5 m ter lidarskega DMR 1 m × 1m.

Sodelovanje javnosti

Preglednica 1 – Pridobljeno slikovno gradivo (fotografije in video posnetki) v okviru poziva zbiranja posnetkov (stanje 26. novembra 2012).

	posredovanje avtorskega gradiva	posredovanje neavtorskega gradiva	poizvedba po spletnih virih
število odzivov	9	5	6
brez dovoljenja za uporabo	–	5	1

Skupno je posredovalo svoje ali tuje fotografije 14 posameznikov (preglednica 1). Pet jih je poslalo neavtorske posnetke, ki jih zaradi varstva avtorskih pravic nismo uporabili, saj nismo uspeli ugotoviti avtorstva.

Vzporedno smo vzpostavili stik z avtorji potencialno uporabnih posnetkov že objavljenih na spletu. Na ta način smo pridobili pet dovoljen za uporabo virov na spletu. Le en potencialni avtor je sodelovanje odklonil.

Kot rečeno smo skupno pridobili 14 posameznikov, ki so dovolili uporabo njihovih posnetkov za raziskovalne namene. Skupaj so posredovali 77 fotografij in en video posnetek. Od tega je 61 % fotografij uporabnih za takojšnje ovrednotenje obsega poplav s pomočjo interaktivne metode orientacije na podlagi DMR $5\text{ m} \times 5\text{ m}$, saj so na posnetkih vidne prometnice, ki se uporabljajo za detajlno orientacijo. Preostalih 39 % fotografij lahko trenutno uporabimo le v dokumentacijske namene, oz. za prikaz detajlov poplavljenih območij (slika 2). Če bi tudi te posnetke hoteli uporabiti, bi za ovrednotenje s pomočjo interaktivne metode orientacije potrebovali bolj podroben lidarski digitalni model površja (DMP) ter digitalni model reliefa (DMR). Teh pa vsaj v prvi fazi raziskav za poplavljen območja nimamo na razpolago.

Delež posnetkov uporabnih za naše potrebe, ki so jih avtorji posredovali sami, brez našega podrobnega povpraševanja oz. kontaktiranja, je 44 %.



Slika 2 – Poplava Soče pri Tolminu (5. november 2012). Fotograf: Radovan Lipušček

V času zbiranja slikovnega gradiva se je občutno povečal ogled spletnih strani Geodetskega inštituta Slovenije. Razlog je v uporabnikih, ki so prek objave poziva na *Facebook* časovnici inštituta neposredno dostopali do podrobnejših vsebin na inštitutskih spletnih straneh (www.gis.si). Teden dni po objavi poziva je število dnevniških ogledov, tako spletnih strani inštituta, kakor tudi *Facebook* časovnice, naraslo za prek 200 % glede na običajne vrednosti.

Obseg poplav

V okviru poziva smo pridobili slikovno gradivo poplav za: Tolmin, Most na Soči, Šoštanj, spodnji tok Meže ter spodnji tok Drave.

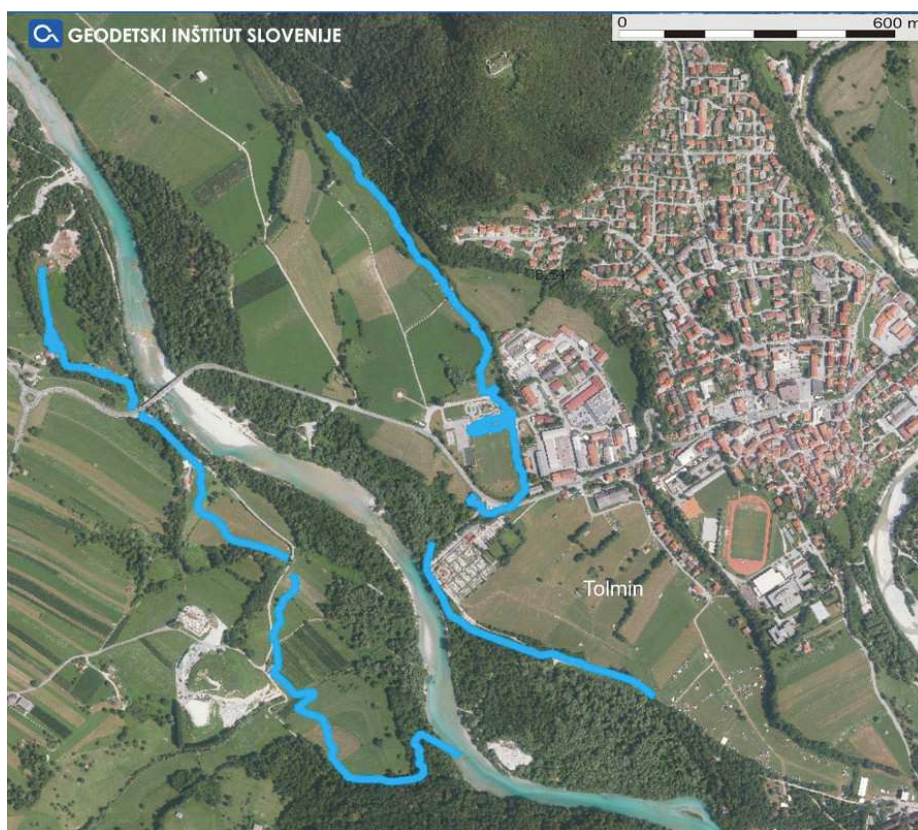
Slike 4, 6, 8 prikazujejo prve določitve robov poplavljenih območij pri Tolminu in Mostu na Soči (porečje Soče) ter v bližini gradu Borl (porečje Drave). Prikazani robovi poplav so zajeti s 3R-koordinatami v državnem koordinatnem sistemu.

Robove poplav, ki jih zakriva rastje in jih na posnetkih ne vidimo, v fazi zajema ne moremo interpolirati, zato prikazani robovi na ortofotografijah niso zvezne črte in niso povezane v sklenjeno ploskev, s pomočjo katere bi vizualno lažje predstavili obseg poplav.

To pomankljivost lahko delno odpravimo z uporabo fotografij, posnetih z drugih stojišč. Tako je na sliki 8 prikazan združen rezultat robov poplave, ki je bil izdelan na podlagi treh fotografij prikazanih na sliki 7. Prikazi na slikah 4 in 6 so pridobljeni na podlagi posameznih fotografij (sliki 3 in 5). Na sliki 3 tako vidimo projiciran DMR na fotografijo po izvedenem postopku interaktivne orientacije ter vektorje robov poplavljenega območja (modra črta).



Slika 3 – Poplava Soče pri Tolminu (5. november 2012 okrog 10:00).
Fotograf: Blaž Močnik



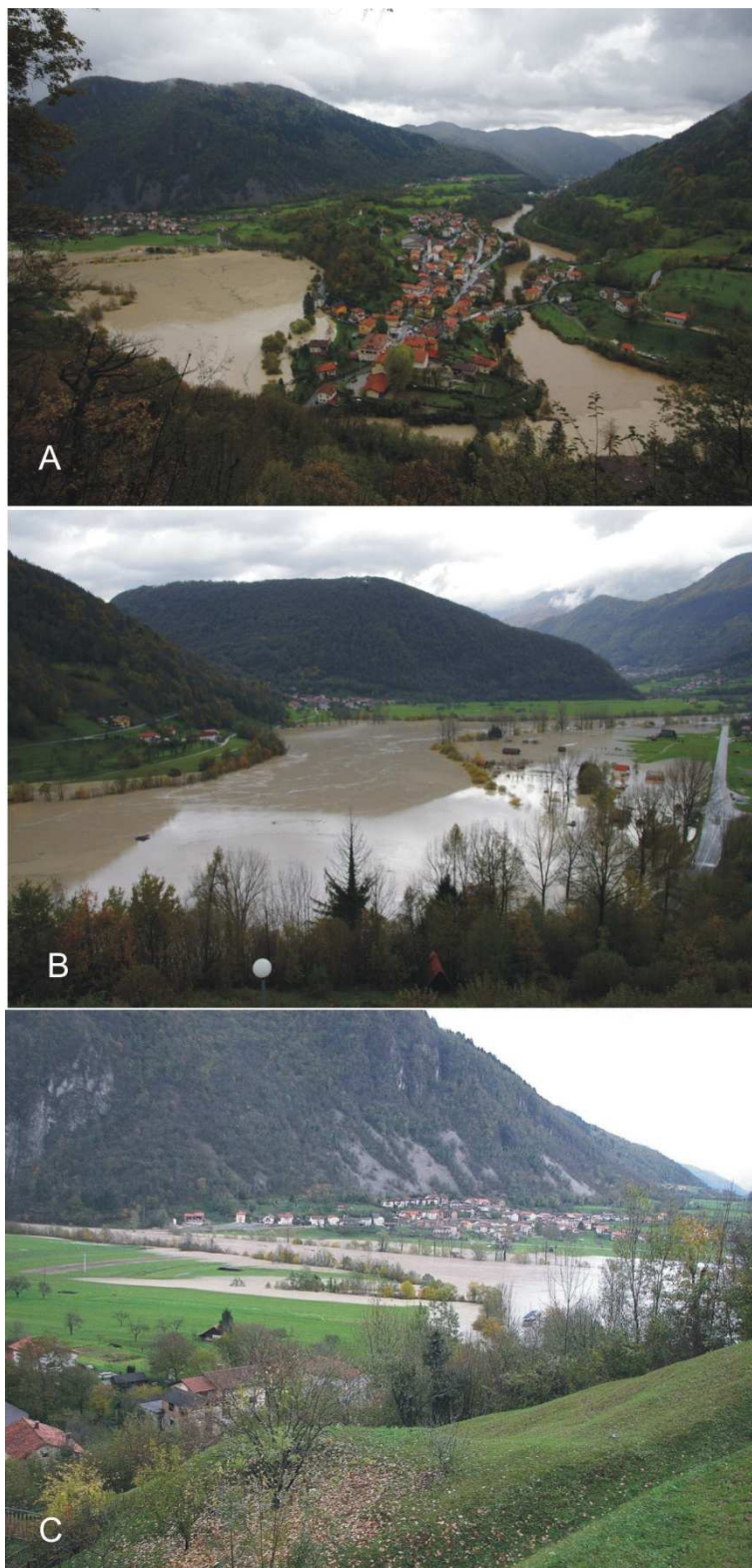
Slika 4 – Robovi poplave Soče pri Tolminu na ortofotografiji.
Robovi poplave so bili zajeti na podlagi slike 3.



Slika 5 – Poplava v bližini gradu Borl (6. november 2012 okrog 10:00).
Fotograf: Suzana Arnečič Zamuda



Slika 6 – Robovi poplave Drave v bližini gradu Borl.
Robovi poplave so bili zajeti na podlagi slike 5.



Slika 7 – Poplave pri Mostu na Soči (5. november 2012). Fotografa: Miljko Lesjak (sliki A in B; 5. november 2012 ob 11:20 in 13:00), Borut Klanjšček (slika C; 5. november 2012).



Slika 8 – Robovi poplave Soče pri Mostu na Soči. Robovi poplave so bili zajeti na podlagi treh slik prikazanih na sliki 7.

Sklep

Prispevek prikazuje možnost sodelovanja javnosti pri določanju obsega poplav. Z metodo interaktivne orientacije na podlagi DMR 5 m × 5 m, ki pokriva celotno Slovenijo, lahko relativno hitro ovrednotimo robove poplav; uporaba je mogoča tudi pri drugih naravnih nesrečah. Na ta način smo že dva tedna po poplavih na spletnih straneh inštituta objavili prve rezultate obsega (robov) poplav za izbrana območja.

Zahvala

Zahvaljujemo se vsem, ki so se odzvali na naš poziv zbiranja slikovnega gradiva o poplavih, ter so nam z dovoljenjem za objavo posredovali svoje slikovno gradivo. Delo je bilo delno financirano v okviru podoktorskega projekta Z2-4182 (B) Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS) ter aplikativnega projekta ARRS L6–

4048. Zahvaljujemo se tudi Geodetski upravi Republike Slovenije za dovoljenje za uporabo digitalnega modela reliefa 5 m × 5 m.

Literatura

- GIS, 2012a. Poplave 2012 – zbirka fotografskega gradiva. Medmrežje: <http://www.gis.si/sl/poplave-2012/> (6. 11. 2012).
- GIS, 2012b. Poplave 2012 – prvi rezultati. Medmrežje: <http://www.gis.si/poplave-2012#rezultati> (22. 11. 2012).
- Hidrološko poročilo o poplavih v dneh med 4. in 6. novembrom 2012. Agencija Republike Slovenije za okolje, 13. 11. 2012. Medmrežje: <http://www.arso.gov.si/vode/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Poplave%205.%20-%206.%20november%202012.pdf> (2. 12. 2012).
- Komac, B., Natek, K., Zorn, M., 2008a. Geografski vidiki poplav v Sloveniji. Geografija Slovenije, 20. Ljubljana.
- Komac, B., Natek, K., Zorn, M., 2008b. Širjenje urbanizacije na poplavna območja. Geografski vestnik, 80:1, 33–43.
- Komac, B., Zorn, M., 2011. Geografija poplav v Sloveniji septembra 2010. Neodgovorna odgovornost, Naravne nesreče, 2, 59–80.
- Medmrežje 1: <http://www.sos112.si/slo/clanek.php?catid=27&id=5878#5> (3. 12. 2012).
- Medmrežje 2: <http://www.sos112.si/slo/clanek.php?catid=27&id=5870> (3. 12. 2012).
- Oštir, K., Kokalj, Ž., Veljanovski, T., Rakovec, J., Žagar, N., 2011. Uporaba satelitskega daljinskega zaznavanja za napovedovanje in opazovanje poplav. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2010, zbornik predavanj. Ljubljana, 87–93.
- Triglav Čekada, M., Zorn, M., 2012a. Uporabnost nemerskih fotografij za preučevanje poplav – primer poplav na Dobropolju septembra 2010. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012. Ljubljana, 55–62.
- Triglav Čekada, M., Zorn, M., 2012b. Poplave septembra 2010 – obdelava nemerskih fotografij s pomočjo fotogrametričnega DMR-ja in lidarskih podatkov. Geodetski vestnik, 56:4, 799–810.
- Škoda po poplavih celo višja od 209 milijonov: Slovenija bi lahko prosila za pomoč EU. Reporter, 8. 11. 2012. Medmrežje: <http://www.times.si/slovenija/skoda-po-poplavih-celo-visja-od-209-milijonov-slovenija-bi-lahko-prosila-za-pomoc-eu--81d9573123-eadc8844d7.html> (3. 12. 2012).
- Veljanovski, T., Kokalj, Ž., 2012. Objektivno usmerjeno kartiranje poplav in njihova vloga v poselitvi osrednjega dela Ljubljanskega barja. Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2011–2012. Ljubljana, 63–72.
- Veljanovski, T., Pehani, P., Kokalj, Ž., Oštir, K., 2011. Zaznavanje poplav s časovno vrsto radarskih satelitskih posnetkov ENVISAT in RADARSAT-2. Neodgovorna odgovornost, Naravne nesreče, 2. Ljubljana, 81–89.

Zračno lasersko skeniranje zasneženega površja

dr. Mihaela Triglav Čekada*, mag. Vasja Bric*, Matija Klanjšček*,
Blaž Barborič*, mag. Miha Pavšek**

Povzetek

V okviru čezmejnega projekta SI-AT: NH-WF smo izvedli prvo analizo uporabnosti zračnega laserskega skeniranja za preučevanje debeline snežne odeje. Podatek o višini snežne odeje nam lahko služi za modeliranje nevarnosti pred snežnimi plazovi, ugotavljanje območij z napihanim snegom (zameti) ter za preučevanje vodnega ekvivalenta snega. Analiza je bila narejena na treh visokogorskih testnih območjih: Zelenica, Skuta in Triglav. Zaradi zelo majhne višine snežne odeje v zimi 2011/12 se večina ugotovitev nanaša na zadnji dve območji. Ugotovili smo, da lahko v laserskih podatkih ločimo med sabo moker in suh sneg glede na gostoto vrnjenih laserskih točk. Na treh manjših testnih območjih smo določili še podrobno višino snežne odeje.

Ključne besede: Lidar, sneg, višina snežne odeje, digitalni modeli višin (DMV)

Key words: LiDAR, snow, snow depth, digital elevation model (DEM)

Uvod

Preučevanje višine snežne odeje in izračun volumna snega je pomemben za preučevanje nastanka in dinamike snežnih plazov ter vpliva snega na hidrološke razmere. Snežni plazovi so sestavni del snežne erozije ter so močno odvisni od lokalnih topografskih in meteoroloških dejavnikov (strmina/naklon, odsotnost in višina vegetacije, reliefne oblike, zglaženost površja, temperatura snega, višina snežne odeje), ki vplivajo na akumulacijo in transport snega na določena območja (Pavšek, 2002). Debelina snega in dinamika njegovega taljenja močno vplivata tudi na količino in dinamiko odtekanja vode, ta pa na dinamiko rasti vegetacije ter količino pitne vode (Grünwald in drugi, 2010). Preučevanje spreminjanja vsakoletnih vzorcev debeline snežne odeje in dinamika taljenja snega v talilni sezoni v visokogorju nam dajo pomembne informacije o teh naravnih zbiralnikih vode.

Za preučevanje dinamike spreminjanja snežne odeje na širših območjih in ne samo točkovno, kot v primeru meteoroloških meritev, moramo uporabiti moderne metode daljinskega zaznavanja. Fotogrametrične metode pri preučevanju zasneženih območij velikokrat naletijo na težavo, saj ima površina snežne odeje ponavadi zelo malo ali nič teksture, ki bi jo lahko uporabili za stereo-zajem podrobnosti na snegu ali avtomatsko slikovno ujemanje. Danes se za manjše snežne plazove uporablja predvsem terestrično lasersko skeniranje, za obsežnejša območja npr. pri preučevanju visokogorskih zbiralnikov vode, pa zračno lasersko skeniranje (ZLS) (Prokop, 2008; Prokop in drugi, 2008; Prokop in Panholzer, 2009; Grünwald in drugi, 2010).

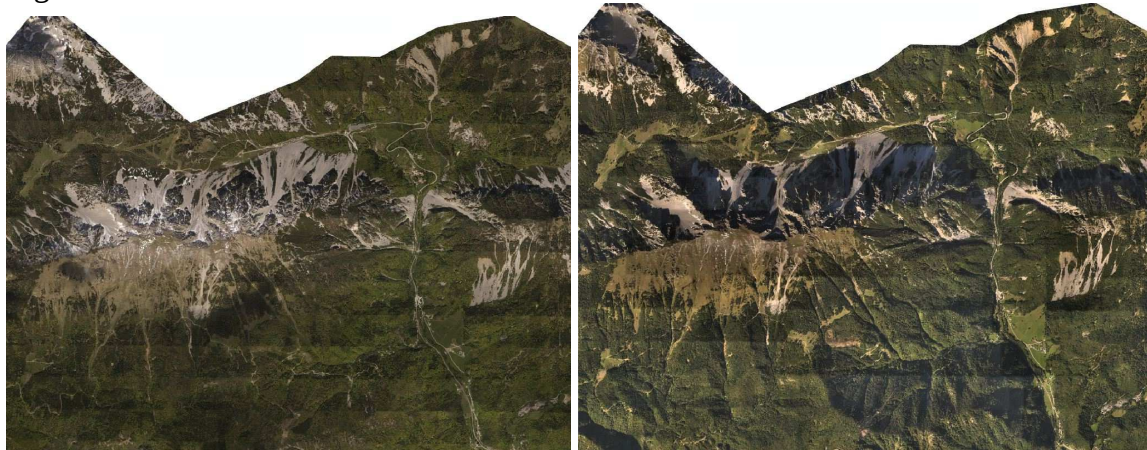
V sestavku predstavljamo prve rezultate izmere višine snežne odeje, ki smo jo opravili v okviru čezmejnega projekta Naravne nesreče brez meja (NH-WF, OP SI-AT 2007–2013) s pomočjo podatkov dveh zračnih laserskih skeniranj (lidar).

* Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, 1000 Ljubljana

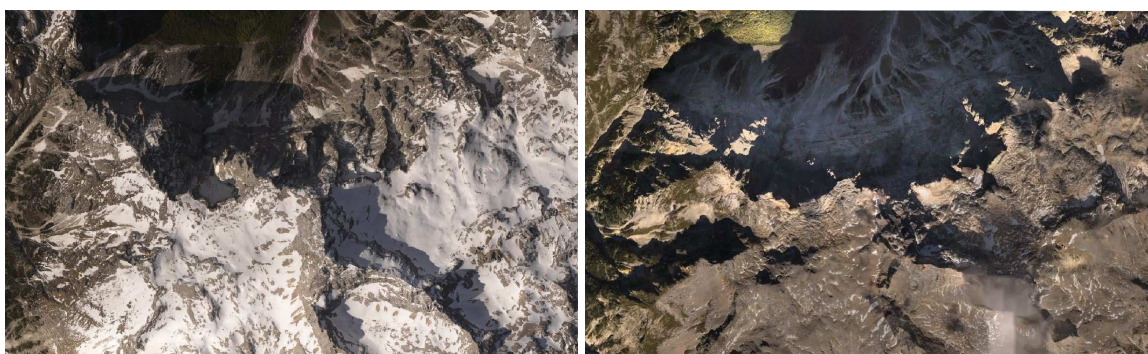
** Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU, Gosposka ulica 13, 1000 Ljubljana

Testna območja in podatki

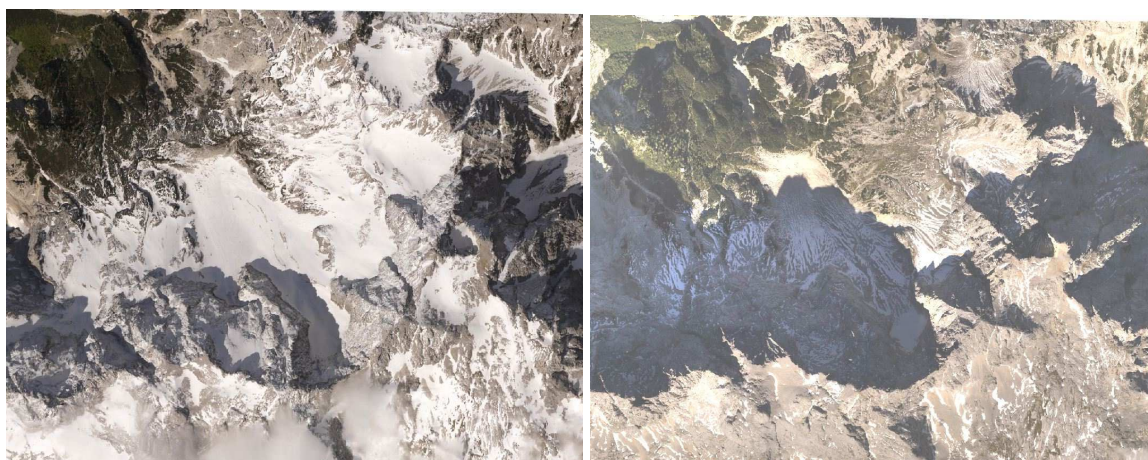
Ker je bila zima 2011/12 zelo sušna in z majhno količino padavin, tudi v visokogorju ni bilo veliko snega. Prvo resnejše sneženje v visokogorju smo dočakali šele v aprilu, ki je sicer znan kot mesec, v katerem lahko pričakujemo največjo višino snežne odeje (Cegnar in Rožkar, 2004). Zato smo prvo zračno lasersko skeniranje z aerofotografiranjem (spomladansko snemanje) izvedli šele 15. 5. 2012 na Zelenici in Skuti in 18. 5. 2012 na Triglavu.



Območje Zelenica



Območje Triglavski podi



Območje Skute

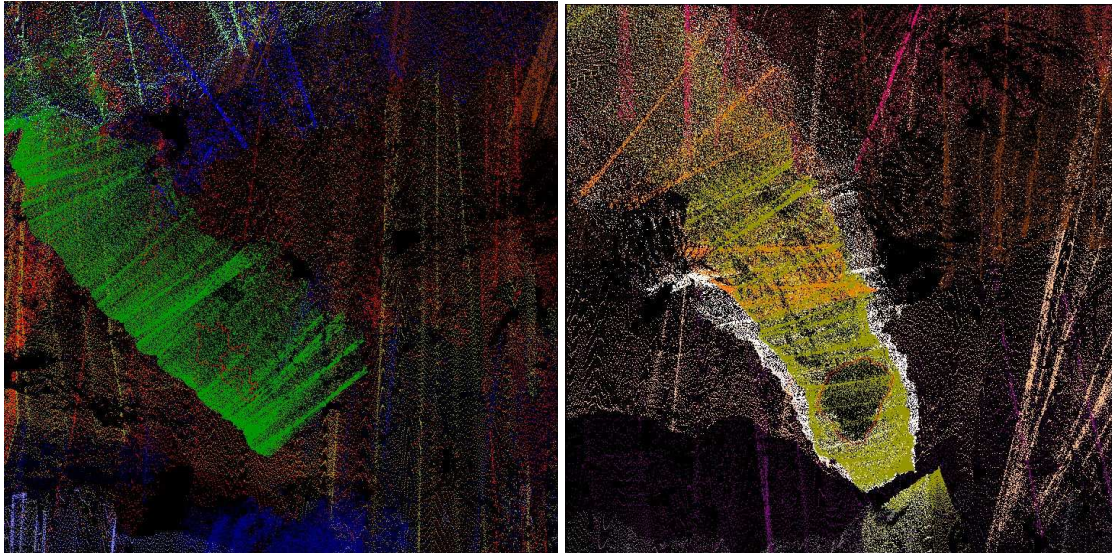
Slika 1 – Ortofotografije testnih območij maj (levo) in september (desno).

Drugo zračno lasersko skeniranje z aerofotografiranjem (jesensko snemanje), ki nam je služilo kot referenčni sloj brez snežne odeje, smo izvedli 18. 9. 2012. Žal nas je nekaj dni pred tem snemanjem že presenetil prvi sneg v visokogorju, ki je na dan snemanja še ostal v osojnih legah na testnih območjih Skute in Triglavskega ledenika (slika 1). V času obeh snemanj smo s terena izvedli tudi terensko fotografiranje detajlov zasneženih področij. Na obeh ledenikih pa smo v času drugega snemanja postavili tudi kontrolne točke v obliki pravokotnikov velikosti 1 m × 0,6 m (slika 2). Na testnem območju Triglavskih podov smo ob drugem snemanju izvedli še kontrolne GNSS-meritve, ki so nam služile za kasnejšo oceno natančnosti georeferenciranja laserskih podatkov.



Slika 2 – Namestitev kontrolnih točk na ledenik pod Skuto, 18. 9. 2012.
Foto: Blaž Barborič.

Pri obeh snemanjih je bil uporabljen zračni laserski sistem Riegl LM5600 ter srednjeformatni kalibriran fotoaparater Hasselblad H39. Povprečna gostota laserskih točk na enoto površine je bila v obeh primerih 8 točk/m². Samo snemanje je bilo izvedeno v obeh primerih na višini 700 m nad tlemi. Pri drugem snemanju, se je nad samima ledenikoma pod Skuto in Triglavom, izvedlo še en nižji snemalni pas na višini okoli 200 m, ki je nad ledenikoma občutno zgostil gostoto laserskih točk in povečal intenziteto odbitih laserskih točk na snegu (Šolar, 2012a, 2012b) (Slika 3).



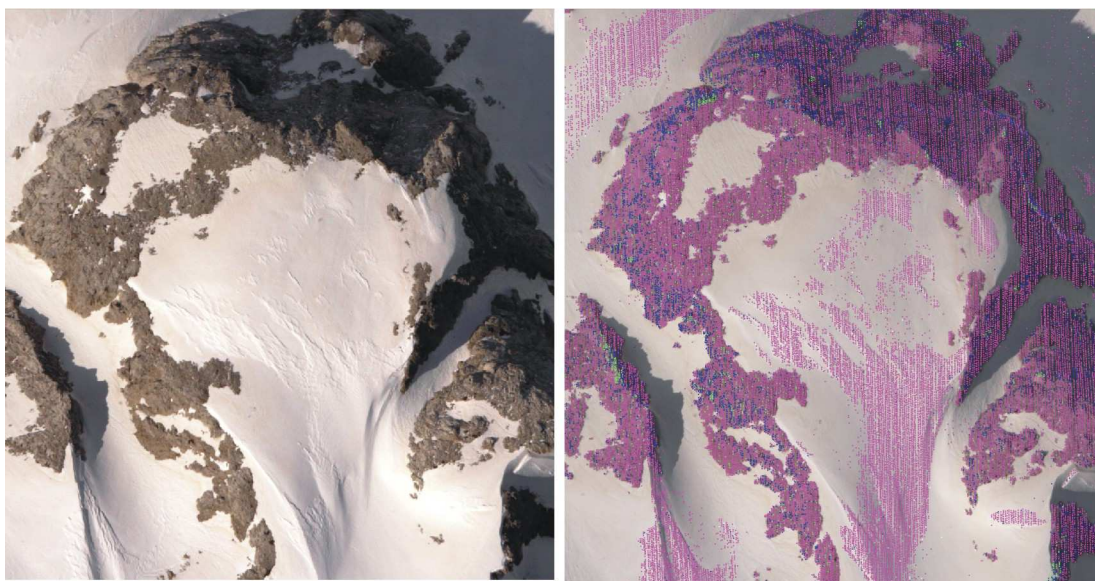
Slika 3 – Pasova z večjo gostoto laserskih točk (zeleno) na Triglavskih podih (levo) in pod Skuto (desno).

Območje Zelenice smo zaradi pomanjkanja snega ob prvem snemanju, izključili iz nadaljnje obravnave določanja debeline snežne odeje. Bomo pa podatke testnega območja Zelenice uporabili za preučevanje premikov prodišč, melišč in skalnih odlomov.

Pri preučevanju debeline snežne odeje smo med seboj primerjali dva digitalna modela višin (DMV), kjer predstavljajo laserske točke, posnete v maju, digitalni model površja (DMP), ki prikazuje sneg in laserske točke, posnete v septembru predstavljajo digitalni model reliefa brez snega (DMR). Georeferenciran oblak točk smo najprej filtrirali in klasificirali v oblak točk terena/snega in iz njega izdelali DMP/DMR z mrežo celic $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Na območjih s slabo odbojnostjo, kjer je bilo sorazmerno malo laserskih odbojev, predvsem v podatkih prvega laserskega skeniranja, smo DMP snega interpolirali.

Odbojnost laserske svetlobe na različnih tipih snega

Če podrobno pogledamo ortofotografije in laserske podatke testnih območji na Skuti in Triglavu, v času prvega zasneženega snemanja, hitro ugotovimo, da sta bila v času snemanja prisotna vsaj dva tipa snega: moker in suh sneg. Moker sneg je bil v bistvu novi sneg, ki je zapadel nekaj dni pred snemanjem, suh sneg, pa je bil starejši sneg oz. napihan sneg (slika 4), večinoma v obliki trdih klož.

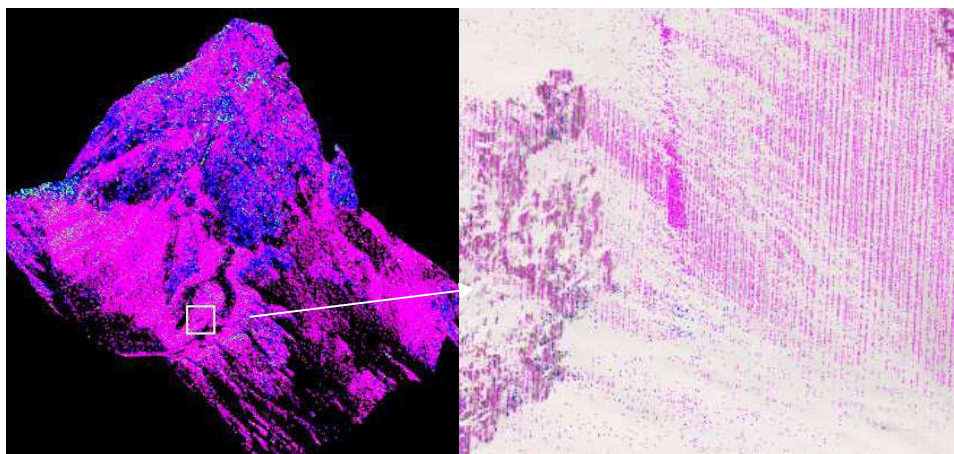


Slika 4 – Primer mokrega/novega in suhega/starega snega na Triglavskih podih: (levo) ortofoto, (desno) ortofoto podložen pod oblak laserskih točk.

Ugotovili smo, da je pri višini snemanja 700 m nad tlemi in v valovni dolžini 1550 nm, delež odboja laserskih točk od snega odvisen od vodnega ekvivalenta snega. Tako se od mokrega snega odbija zelo malo točk, od suhega snega pa več. Tudi, če spustimo višino snemanja na 200 m nad terenom še vedno opazimo zmanjšanje gostote laserskih točk na zasneženih oz. ledeniških površinah. Tako je na desni sliki 3 prikazan ledenik pod Skuto v rdečem zaprtem poligonu, kjer kljub nižji višini in višji gostoti laserskih točk opazimo manjšo gostoto laserskih točk na snegu v primerjavi s točkami odbitimi od skal.

Razlika v deležu vrnjenih odbojev na različnih vrstah snega glede na vsebnost vode nam omogoča tudi samodejno razvrstitev območij pokritih z različnimi vrstami snega. Zelo moker sneg je zelo slab odbojnik, saj se obnaša kot voda, ki ne omogoča sipanja laserske svetlobe nazaj k sprejemniku in je zato s topografskimi laserskimi sistemi ne moremo meriti. Kot voda se je obnašal tudi sneg na testnem območju Zelenice, ki se je v času snemanja ohranil samo v senčnih grapah in ga zato v laserskih podatkih hitro najdemo, saj gre za območja brez odboja.

Kako moker je sneg, je odvisno tudi od vertikalnega temperaturnega gradienta ter osončenosti. Sneg se prej in hitreje tali na nižji nadmorski višini in v prisojeh, zato je tam sneg hitreje in bolj moker kot višje in v osojah. Tako lahko laserske podatke uporabimo tudi za preučevanje spreminjanja strukture snega zaradi nadmorske višine in osončenosti (slika 5). Na podrobnem prikazu slike 5 vidimo zmanjševanje gostote laserskih točk v navpični smeri, ki je deloma odvisno od zniževanja nadmorske višine (višje temperature ozračja), na desni strani pa tudi na račun večje osončenosti.



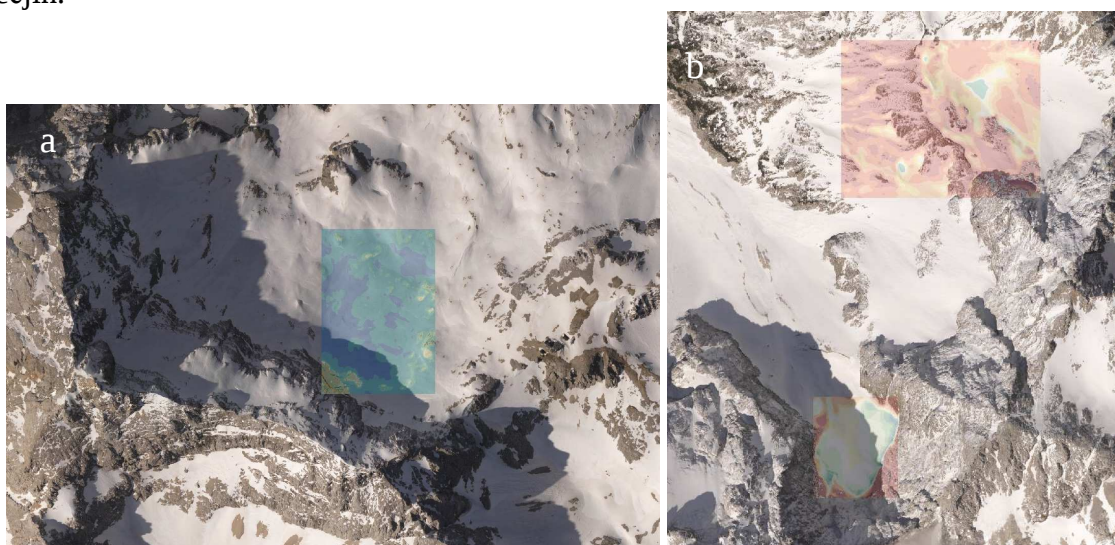
Slika 5 – Spreminjanje vodnatosti snega v odvisnosti od nadmorske višine in osončenosti.

Višina snežne odeje

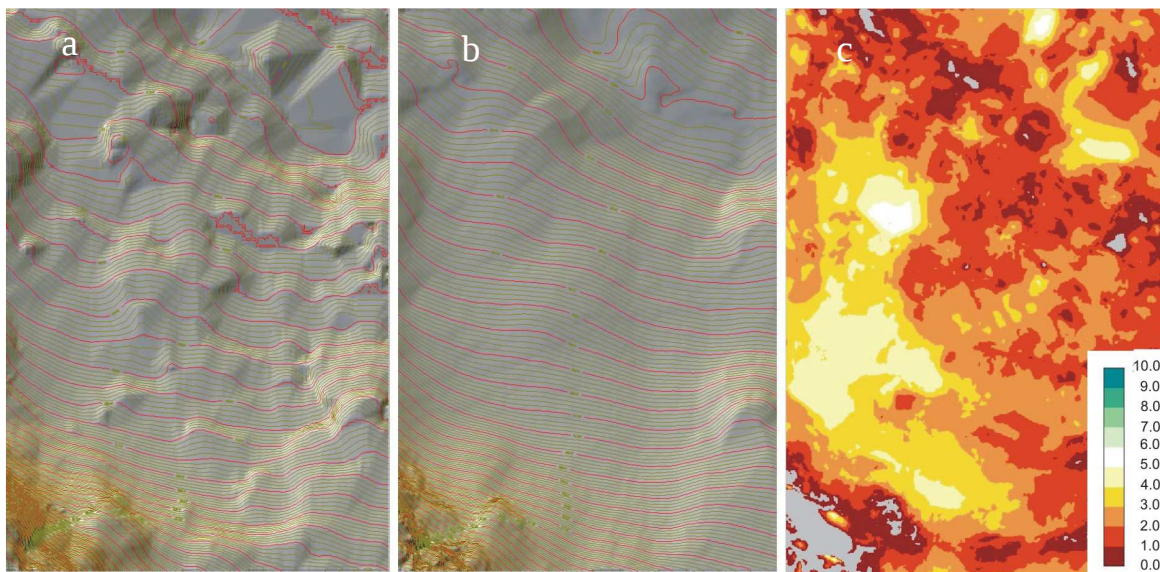
Da bi lahko preučevali samo razlike v višini snežne odeje, smo znotraj območij Triglava in Skute izbrali tri manjša območja, ki so bila v času zimskega snemanja skoraj v celoti pokrita s snegom (slika 6):

- območje Triglav vključuje Triglavski ledenik,
- območje Skuta 1 vključuje ledenik pod Skuto ter
- območje Skuta 2 vključuje snežišče ob markirani planinski poti proti Jezerskemu sedlu.

Na območju Triglava smo naredili dve primerjavi. Najprej smo primerjali spomladanski lidarski DMP snega $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ s fotogrametričnim DMR $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ izdelan na osnovi posebnega fotogrametričnega snemanja izdelanega v letu 2005 za potrebe preučevanja Triglavskega ledenika (Triglav in drugi, 2012). Na širšem območju Triglavskega ledenika prikazanem na sliki 7, je 62 % višinskih razlik med DMP snega in DMR v razredu med 2 in 6 m. Obarvanost višinskih razlik na sliki 6c je razponu od 0 do 10 m enako kot na sliki 8. V razredu od 0 do 8 m višinske razlike je 93 % meritev. Le 8 % višinskih razlik je večjih.



Slika 6 – Izbrana testna območja za določevanje debeline snega:
a) Triglav, b) Skuta 1 (spodaj) in Skuta 2 (zgoraj).



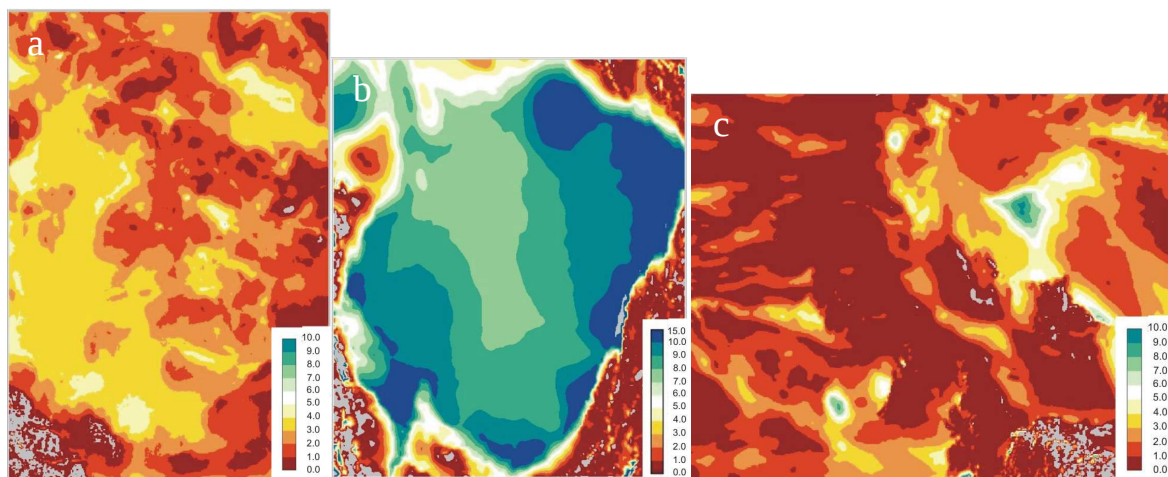
Slika 7 – Višinska ekvidistanca 1 m: a) fotogrametrični DMR 2 m×2 m 2005, b) lidarski DMP snega 1 m×1 m 2012, c) višinska razlika med lidarskim DMP in fotogrametričnim DMR.

Drugo primerjavo smo izvedli skupaj za vsa tri manjša testna območja med spomladanskim in jesenskim lidarskim snemanjem 2012, ugotavljali smo razliko med DMP snega 1 m ×1 m in DMR 1 m×1 m. Višinska razlika se je določala na vsaki celici DMR. Statistična primerjava med lidarskima DMP snega in DMR je prikazana v preglednici 1.

Preglednica 1 – Statistični podatki razlike med lidarskim DMP in DMR

območja	maks. in min. viš. razlika	povprečna vrednost	interval večine viš. razlik in delež točk v njem	št. točk preseka DMR
Triglavski podi	10,3 m -8,6 m	2,3 m	0 - 6 m 98,2 %	78200
Skuta 1	41,7 m -8,3 m	6,8 m	0 – 12 m 95,0 %	27000
Skuta 2	14,8 m -8,6 m	1,5 m	0 – 6 m 96,7 %	98000

Največje vrednosti, tako v pozitivne kot negativne, kažejo na postopek izdelave DMP in DMR in so nastale na strmih stenah, ki niso bila izločena iz območja testiranja. Vrednost vsake celice DMP/DMR oz. njena višina se izračunana na osnovi več laserskih točk, ki se nahajajo v celici. Povprečna vrednost kaže na povprečno višino snežne odeje, medtem, ko so razporeditve prikazane na sliki 8.



Slika 8 – Del območja Triglav a) in območji pod Skuto 1 b) in 2 c).

Obarvanost višinskih razlik na Triglavskih podih in na območju Skuta 2 je v razponu od 0 do 10 m, na območju Skuta 1 pa od 0 do 15 m. Sivo so obarvana območja, kjer so vrednosti negativne ali presegajo maksimalne višinske razlike, ki so običajno posledica napak na zelo strmih območjih, kjer že rahel zamik lokacije točk DMP pomeni grobo napako.

Na Triglavskih podih prevladuje sprememba višine snežne odeje od 1 do 4 m, na območju Skuta 1 od 7 do 15 m in na območju Skuta 2 od 0 do 2 m. Večje višine snežne odeje se, kot je pričakovano, pojavljajo po kotanjah in ob zelo strmih pobočjih ter v zatrepu krnic, kar je še posebej lepo vidno na območju Skuta 2, kjer leži ledenik pod Skuto. Tik ob stenah krnice ledenika pod Skuto smo izmerili višino snežne odeje kar od 10 do 15 m.

Razprava in zaključki

Kot že omenjeno, nam lahko podatek o višini snežne odeje služi posredno tudi za ocenjevanje nevarnosti za proženje snežnih plazov kot tudi za vodnatost snežne odeje ob njenem spomladanskem taljenju in postopnem izginjevanju. Če ta podatek dopolnimo še z informacijami o zgradbi in vodnatosti snežne odeje ter o geomorfoloških in vegetacijskih značilnostih površja na širšem območju (naklon snežišča, geološka zgradba in poraščenost podlage, zbirno območje posameznega snežnega plazov ali plazovitega območja – stene, krnice, kotanje, grape, žlebovi...), potem na temelju enkratnega zajema z eno tehnologijo razpolagamo z že dokaj kakovostnimi vhodnimi podatki, ki omogočajo natančnejše modeliranje nevarnosti proženja snežnih plazov. Čeprav so snežni plazovi pojav, ki se pojavlja v snežni sezoni v goratem svetu redno (seveda v odvisnosti od snežnih padavin in vremenskih vplivov ipd.) in so največkrat vezani predvsem na znana plazovita območja, pa ta pojav še vedno spremljata velika časovna in prostorska nepredvidljivost. Ta pa neposredno ali posredno pomeni tudi ogrožanje človeških življenj (zimske športne aktivnosti v gorskem svetu) in infrastrukturnih objektov (planinska, turistična dejavnost, visokogorske prometnice...). Vsak kamenček v mozaiku preprečevanja in boljšega poznavanja tovrstnih masnih oz. erozijskih pojavov je zato dobrodošel in opisana tehnika izmere višine snežne odeje z zračnim laserskim skeniranjem je pri tem lahko zelo koristno in uporabno dopolnilo v preventivnih dejavnostih. Slednje bomo lahko preverili že v

naslednjih snežnih sezonah v okviru priprave poskusnega lavinskega biltena za območje Srednjih Karavank.

V prihodnosti lahko pričakujemo prodor metode zračnega laserskega skeniranja tudi na področje kurative, torej njeno uporabo v obliki brezpilotnih zračnih plovil, ki bodo uporabljena v času velike ogroženosti pred snežnimi plazovi. V času velike ogroženosti pred snežnimi plazovi v tujini že sedaj uporabljajo za oceno ogroženosti helikopterske ogleda, ki jih opravijo člani lavinskih komisij.

Zahvala

Analiza je bila narejena v okviru čezmejnega projekta Slovenija-Avstrija: Naravne nesreče brez meja (NH-WF). Za izvedbo laserskega skeniranja v oteženih vremenskih razmerah v visokogorju se zahvaljujemo izvajalcu snemanja Flycom d.o.o.

Literatura

- Cegnar, T., Roškar, J. 2004. Meteorološka postaja Kredarica 1954-2004, Agencija Republike Slovenije za okolje, Ljubljana.
- Grünwald, T., Schirmer, M., Mott, R., Lehning, M. 2010. Spatial and temporal variability of snow depth and ablation rates in small mountain catchment, *The Cryosphere*, 4.
- Pavšek, M. 2002. Snežni plazovi v Sloveniji (geografske značilnosti in preventiva), Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU, Ljubljana.
- Prokop, A. 2008. Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for spatial snow depth measurements, *Cold Region science and Technology*, doi: 10.1016/j.coldregions.2008.07.002.
- Prokop, A. Schirmer, M., Rub, M., Lehning, M., Stocker, M. 2008. A comparison of measurement methods: terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes, *Annals of Glaciology*, 49.
- Prokop, A., Panholzer, H. 2009. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9.
- Šolar, L. 2012a. Lidarski georeferenciran oblak točk in aerofotografije, Tehnično poročilo, FlyCom d.o.o., 20. 7. 2012.
- Šolar, L. 2012b. Lidarski georeferenciran oblak točk in aerofotografije, Tehnično poročilo, FlyCom d.o.o., 26. 11. 2012.
- Triglav Čekada, M., Zorn, M., Kaufmann, V., Lieb, G.K., 2012. Merjenje malih alpskih ledenikov: primeri iz Slovenije in Avstrije, *Geodetski vestnik*, 56:3.

Spremljanje ionosferskih motenj nad Slovenijo s pomočjo omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL

Sandi Berk^{*}, Katja Bajec^{*} in Dalibor Radovan^{*}

Povzetek

V prispevku je predstavljeno spremljanje ionosferskih motenj nad ozemljem Slovenije, ki so predvsem posledica povečane Sončeve aktivnosti ob približevanju vrhu 24. Sončevega cikla. Uporabljeni so podatki omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL. Obravnavani so vplivi ionosferskih motenj na določanje položaja z GNSS in načini spremljanja le-teh s pomočjo samih GNSS in spremljajoče infrastrukture. Kot kazalnik ionosferskih motenj je uporabljen ionosferski indeks I95, ki temelji na modeliranju popravkov položaja, določenega z GNSS. Namen analize je bil oceniti stopnjo ogroženosti lokacijskih storitev na območju Slovenije v obdobjih povečane Sončeve aktivnosti

Ključne besede: GNSS, indeks I95, ionosfera, lokacijska storitev, Sončeve pege
Key words: GNSS, I95 index, ionosphere, location-based service, sunspots

Uvod

Približuje se vrh 24. Sončevega cikla – cikla, ki se ponovi vsakih enajst let. Za študije vplivov povečane Sončeve aktivnosti na lokacijske storitve, ki temeljijo na satelitski tehnologiji, je to idealno obdobje. Povečana Sončeva aktivnost se med drugim kaže v povečanju števila in velikosti Sončevih peg. Spremljajoče dogodke lahko razdelimo v Sončeve blišče (angl. solar flare), Sončeve radijske izbruhe (angl. solar radio burst), koronarne masne izbruhe (angl. coronal mass ejection), protonske nevihte (angl. proton storm) in Sončev veter (angl. solar wind). Učinki teh dogodkov na Zemljo so različni – verjetnost, da se nek pojav širi ravno v njeni smeri je namreč relativno majhna (Štern in Bešter, 2012). Ena izmed posledic povečane Sončeve aktivnosti na Zemlji je pojav magnetnih neviht (Čop in sod., 2008).

Globalni navigacijski satelitski sistemi (v nadaljevanju: GNSS) – osnova za množico lokacijskih storitev – temeljijo na radijskih signalih, ki jih sateliti pošiljajo sprejemnikom na Zemlji. Vplivi povečane Sončeve aktivnosti na kakovost lokacijskih storitev se odražajo predvsem kot (Skone, 2001):

- motnje v ionosferi, ki so posledica magnetnih neviht in ki vplivajo na širjenje GNSS-signalov (tj. na njihovo hitrost in pot), ter
- motnje zaradi radijskih izbruhov in njihovih vplivov na kakovost GNSS-signalov v obliki razmerja signal/šum (angl. signal-to-noise ratio – SNR).

Motnje v ionosferi otežujejo njeno kakovostno modeliranje, kar se odraža predvsem v slabši natančnosti in zanesljivosti določanja položaja, povečani šum pa povzroča slabši sprejem signalov in prav tako tako zmanjšuje zanesljivost lokacijskih storitev ali celo onemogoča njihovo delovanje. Medtem ko so motnje zaradi radijskih izbruhov časovno usklajene z dogodki na Soncu (z zamikom 8,3 minute), nastopijo motnje v ionosferi z zamiki, ki so odvisni od tipa dogodka na Soncu: od 15 minut do 6 ur za protonske nevihte,

^{*} Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

pa tudi 3 do 4 dni za koronarne masne izbruhe in Sončev veter (Štern in Bešter, 2012). Dogodki različnih tipov so večkrat tudi sočasni, njihovi vplivi na Zemlji pa torej zaznani z različnimi zakasnitvami.

RTK-storitve temeljijo na tehnologiji, ki odpravi večji del napak zaradi motenj v ionosferi, in sicer z njenim kakovostnim modeliranjem nad območjem, na katerem se nahaja uporabnik storitev. Vendar pa lahko ionosferske motnje povzročijo težave pri navezavi na posamezno referenčno postajo, kot tudi pri omrežnih storitvah (Wanninger, 2004). Še večja težava pa so ionosferske motnje – posebej nenadne – za enofrekvenčne kodne GNSS-sprejemnike, kjer modeliranje ionosfere temelji na parametrih iz navigacijskega sporočila (npr. za Klobucharjev model). Ocenjeno je, da lahko s takim modelom odpravimo zgolj med 50 % in 60 % vplivov (Sterle in sod., 2012).

V prispevku je predstavljena analiza ionosferskih motenj za območje Slovenije, ki temelji na podatkih državnega omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL, in sicer za preteklo poldrugo leto. Namen analize je bil oceniti stopnjo ogroženosti na GNSS temelječih lokacijskih storitev na območju Slovenije v obdobjih povečane Sončeve aktivnosti. Cilj raziskovalnega projekta, v okviru katerega je bila analiza izvedena, je zasnova opozorilnega sistema za uporabnike lokacijskih storitev (Štern in Bešter, 2012).

Spremljanje vplivov Sončevih aktivnosti na/z GNSS

Ionosfera je danes največji vir napak pri določitvi položaja z GNSS. Vpliv ionosfere na GNSS-signal je sorazmeren s številom prostih elektronov vzdolž poti širjenja signala (angl. total electron content – **TEC**). Običajno se upošteva stolpec s prerezom površine 1 m^2 ; v rabi je enota TECU – 1 TECU pomeni 10^{16} elektronov na m^2 . Vpliv ionosfere na GNSS-signal se kaže v njegovi zakasnitvi, in sicer zaradi sprememb njegove hitrosti in poti. Po drugi strani se sami GNSS uvrščajo med najbolj pomembne sisteme zaznavanja in spremljanja posledic dogodkov na Soncu – t. i. vesoljskega vremena. Karte VTEC (angl. vertical TEC), torej vrednosti TEC za navpične stolpce nad točkami na Zemlji, so klasični proizvodi, ki jih nudi GNSS-tehnologija za globalno modeliranje ionosfere (Coster in Komjathy, 2008).

Lokalno spremljanje ionosferskih motenj (angl. ionospheric disturbance) omogočajo lokalni GBAS – omrežja stalnih GNSS-postaj na Zemlji, ki v realnem času zagotavljajo popravke dobljenega položaja. Najbolj uporabljan kazalnik ionosferskih motenj je danes **ionosferski indeks I95**, ki temelji na modeliranju popravkov položaja, določenega z GNSS. Uveden je bil leta 1998 in se je uveljavil posebej v aktivnih GNSS-omrežjih v Srednji Evropi (Wanninger, 2004). Z njim torej ne merimo samih fizikalnih parametrov ionosfere, ampak gre za indeks povprečne ionosferske aktivnosti na določenem zemljepisnem območju, določen za krajše časovne intervale. Osnova za določitev indeksa I95 so koeficienti modela, ki predstavljajo geometrijske popravke zaradi vpliva ionosfere, – po dva za vsak GNSS-signal za vsak satelit, in sicer v smereh jug-sever (ΔI_{LAT}) in zahod-vzhod (ΔI_{LON}). Ti koeficienti se določajo s kratkim časovnim intervalom, tako da jih dobimo po nekaj sto na vsako uro. Ionosferski indeks temelji na teh koeficientih, pri čemer so informacije vsakega posameznega para združene v skalarno mero:

$$\Delta I = \sqrt{\Delta I_{LAT}^2 + \Delta I_{LON}^2}.$$

Ionosferski indeks I95 je določen kot vrednost, ki je 95-odstotkov ocenjenih ΔI ne presega (angl. 95 % margin) – seveda znotraj izbranega (običajno urnega) časovnega intervala

(Wanninger, 2004). Ionosferski indeks I95 sicer ni odvisen zgolj od razmer v ionosferi. Nanj vplivajo npr. tudi:

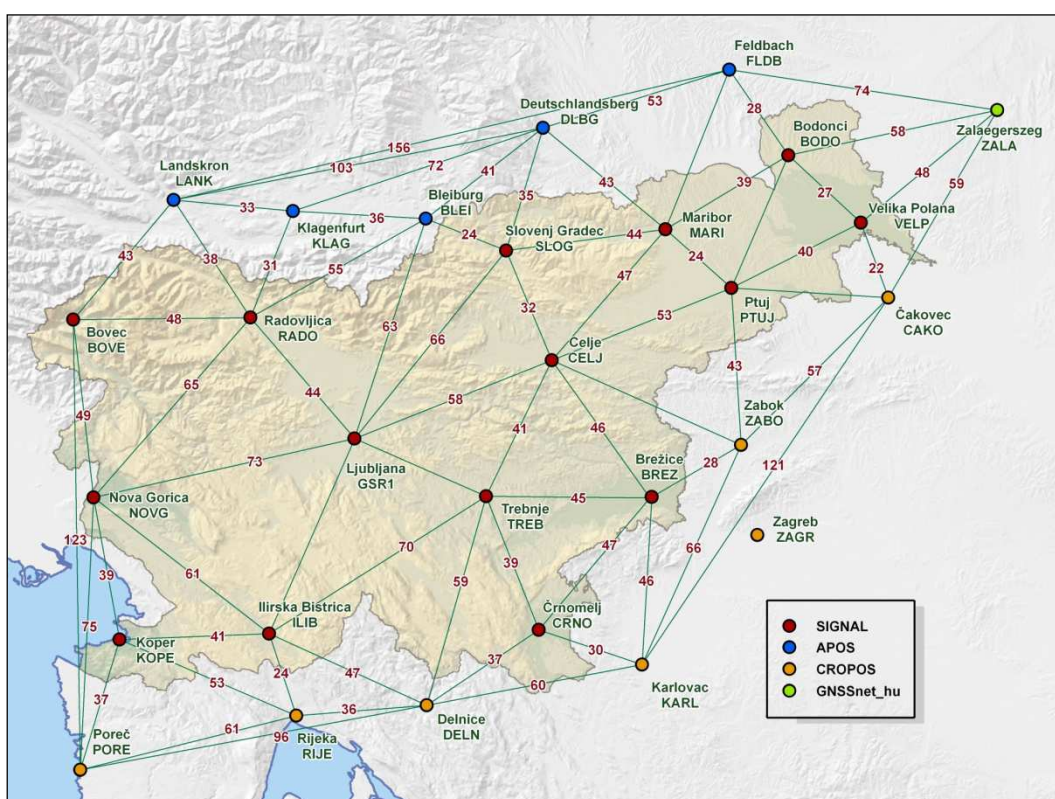
- razdalje med referenčnimi GNSS-postajami v omrežju in
- omejitev najmanjšega višinskega kota spremljanja satelitov (angl. elevation mask).

Za običajno konfiguracijo omrežja z medsebojnimi razdaljami referenčnih GNSS-postaj med 50 in 80 km in za najmanjši višinski kot spremljanja satelitov, omejen na 10 ločnih stopinj, so tipične vrednosti ionosferskega indeksa (v [ppm] za L1) na območju Srednje Evrope (Wanninger, 2004):

- 2 ali manj v času nizkih vrednosti VTEC in za normalne razmere,
- 5 ali manj v času povečanih vrednosti VTEC, vendar brez večjih ionosferskih motenj,
- 10 in več v času intenzivnejših ionosferskih motenj.

Spremljanje ionosferskega indeksa I95 za območje Slovenije

Za spremljanje ionosferskih motenj nad ozemljem Slovenije, ki so predvsem posledica povečane Sončeve aktivnosti ob približevanju vrhu 24. Sončevega cikla, je bila uporabljena infrastruktura državnega omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL (GURS, 2012).



Slika 1: Omrežje stalnih GNSS-postaj SIGNAL.

Omrežje SIGNAL je postavila Geodetska uprava Republike Slovenije kot del temeljne državne geoinformacijske infrastrukture. Prva postaja omrežja (v Ljubljani) deluje od leta 2000, v sedanjem obsegu (15 postaj) pa deluje omrežje od leta 2006. Dodatnih 12 postaj je

v omrežje vključenih z dogovori o sodelovanju s sosednjimi državami (slika 1). Z omrežjem upravlja Služba za GPS, ki deluje na Geodetskem inštitutu Slovenije. V zadnjem času je med lokacijskimi storitvami v realnem času, ki so na voljo le registriranim uporabnikom, največ povpraševanja po omrežnih RTK-storitvah, sledijo RTK-storitve z navezavo na posamezno referenčno postajo ter DGPS-storitve (Berk in sod., 2011).

Od sredine leta 2011 deluje omrežje s podporo programske opreme Trimble VRS³Net, ki med drugim omogoča tudi spremljanje ionosferske aktivnosti nad ozemljem Slovenije. Prvotno je bil indeks I95 mera za napovedovanje ionosferskih vplivov na določanje položaja z navezavo na uporabniku najbližjo postajo omrežja (angl. single-baseline RTK). Kasneje je bila ista mera uvedena tudi za omrežne lokacijske storitve (kot so VRS, FKP, Mac), in sicer z uporabo:

- IRIM (ionospheric residual integrity monitoring) ter
- IRIU (ionospheric residual interpolation uncertainty).

Prvi pristop temelji na neupoštevanju posamezne referenčne postaje pri modeliranju ionosfere in primerjavi rezultatov interpolacije za njeno lokacijo z dejanskimi merjenji. Drugi pristop temelji na določitvi negotovosti v omrežju modeliranih parametrov ionosfere – torej standardnih odklonov interpoliranih vrednosti. Oba pristopa sta bila uvedena tudi v programske rešitve Trimble Terrasat (Chen in sod., 2003). Glede na to, da sta v omrežju stalnih GNSS-postaj pri modeliranju popravkov ključna dva vpliva:

- vpliv geometrijske razporeditve satelitov in
- vpliv ionosfere,

sta v primeru programske opreme Trimble VRS³Net uporabljeni rešitvi (Trimble, 2010):

- GRIM (geometric residual integrity monitoring) in že omenjeni
- IRIM (ionospheric residual integrity monitoring).

Ločeno ocenjena deleža obeh ključnih vplivov omogočata določitev vrednosti indeksa I95 ob eliminaciji vpliva geometrijske razporeditve satelitov. Referenčne vrednosti indeksa I95, ki so označene na grafičnih prikazih programskega modula, so:

- 2 ... nizka vrednost (zelena barva),
- 4 ... srednja vrednost (rumena barva) in
- 8 ... visoka vrednost (rdeča barva).

V nadaljevanju je predstavljena analiza arhiviranih urnih vrednosti ionosferskega indeksa I95 za Slovenijo, in sicer za obdobje od julija 2011 do decembra 2012.

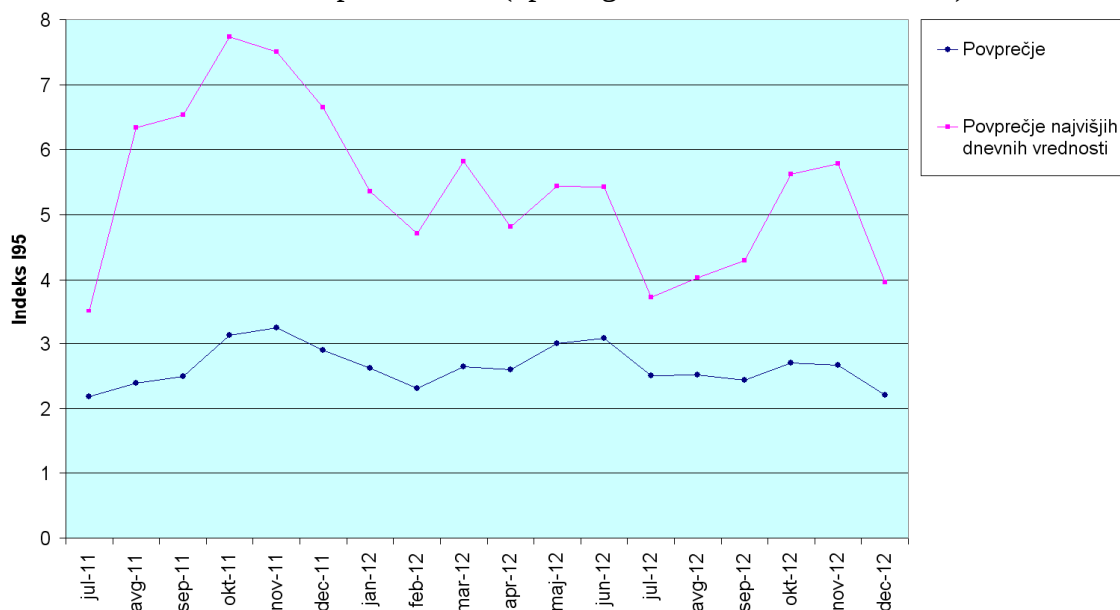
Rezultati analize ionosferskega indeksa I95 (julij 2011 – december 2012)

Absolutni urni maksimum – vrednost 21,8 – doseže indeks I95 v analiziranem obdobju na 16. november 2011. Vrednost 20 sicer preseže le trikrat; poleg že omenjenega datuma še na 18. avgust 2011 in 7. oktober 2011.

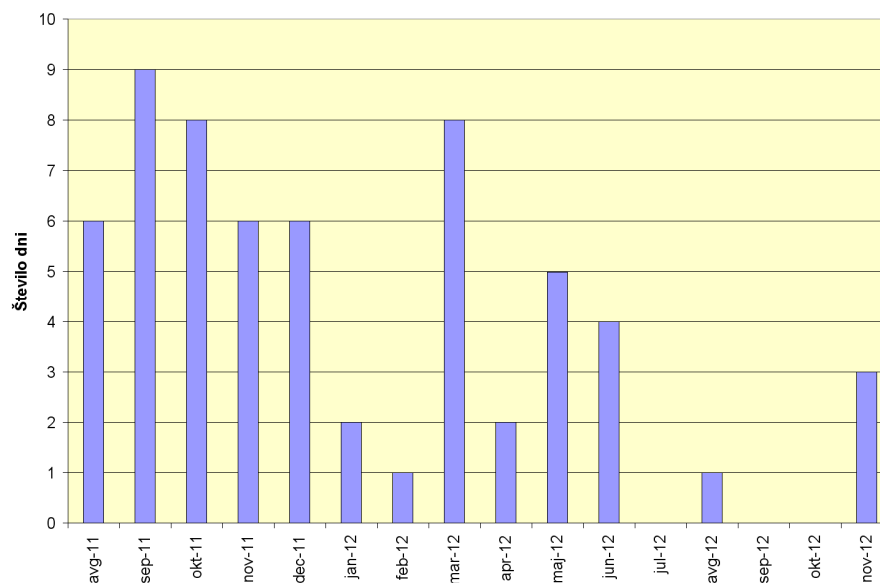
Iz prikaza najvišjih zabeleženih urnih vrednosti indeksa I95 po dnevih (slika 2) je videti, da so vplivi povečane Sončeve aktivnosti najbolj zaznavni med avgustom 2011 in decembrom 2011. Samo v tem obdobju so mesečna povprečja najvišjih zabeleženih dnevnih vrednosti indeksa I95 višja od 6 (slika 3). Podobno sledi iz ugotavljanja števila dni v mesecu, ko je bila najvišja zabeležena urna vrednost indeksa I95 višja od 8 (tj. visoka vrednost); v obdobju od avgusta 2011 do decembra 2011 je takšnih dni vsakič po več kot

pet na mesec, med ostalimi meseci analiziranega obdobja pa to velja le še za marec 2012 (slika 4).

Zanimivo je, da analiza mesečnih povprečij indeksa I95 (ne zgolj največjih dnevnih vrednosti, ampak vseh 24-ih urnih vrednosti na dan) ne pove praktično ničesar (slika 3). Praviloma so namreč izrazito povečane vrednosti kratkotrajne – običajno uro do dve na dan. Iz prikaza dnevnih nihanj (urnih) vrednosti indeksa I95 po mesecih (slika 5) lahko vidimo, da se (če sploh) pojavljajo povišane vrednosti indeksa I95 zgolj podnevi – najvišje nekje sredi dneva. Ugotovljeni splošni trend povečanja vrednosti indeksa I95 v zimskih mesecih, z najvišjimi vrednostmi okoli 12. ure po lokalnem času (slika 5), se ujema z že objavljenimi rezultati raziskav za območje Srednje Evrope (Wanninger, 2004). Vendar pa splošni trend povečanja vrednosti indeksa ne sovпада s povečanjem števila posameznih res ekstremnih urnih vrednosti preko dneva (npr. avgust 2011 – december 2011).

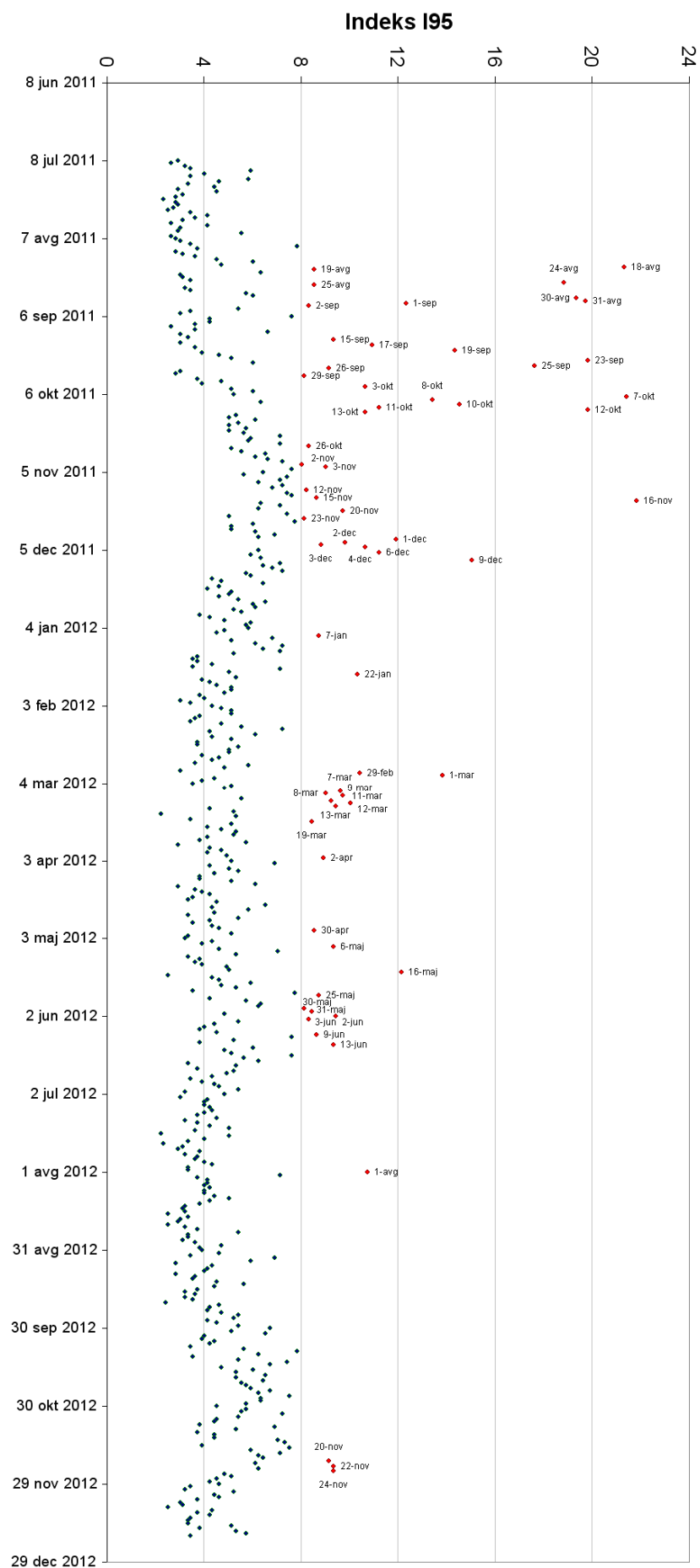


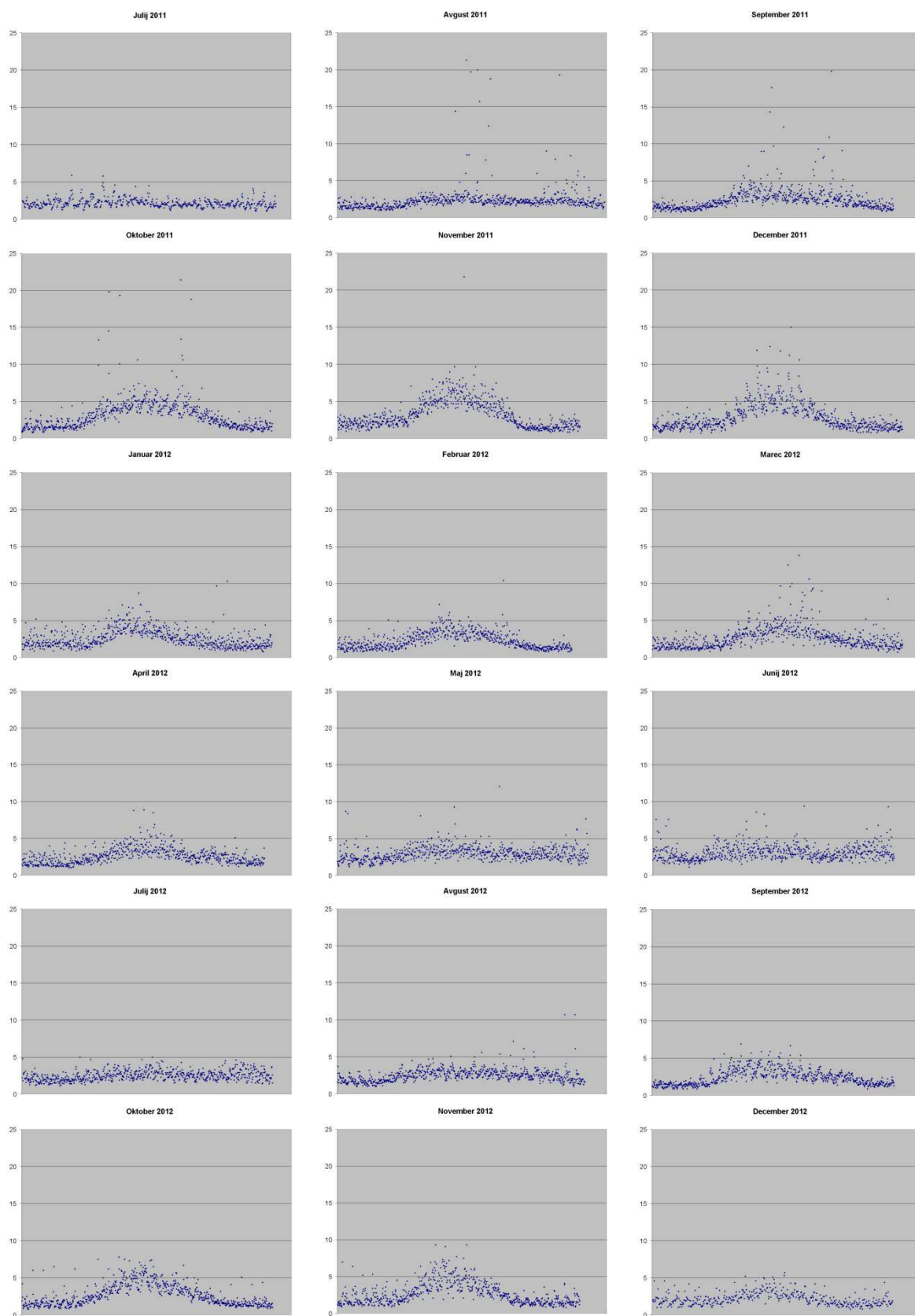
Slika 3: Mesečna povprečja vrednosti indeksa I95 in mesečna povprečja najvišjih zabeleženih dnevnih vrednosti indeksa I95.



Slika 4: Števila dni v mesecu, ko je bila najvišja zabeležena urna vrednost indeksa I95 višja od 8.

Slika 2: Najvišje zabeležene urne vrednosti indeksa I95 za Slovenijo po dnevih.





Slika 5: Dnevna nihanja urnih vrednosti indeksa I95, prikazana po mesecih.

V obravnavanih 16-ih mesecih (tj. 488 dneh), za katere so podatki o indeksu I95 popolni (slika 4), je bila za 61 dni najvišja zabeležena urna vrednost indeksa višja od 8. Težave pri lokacijskih storitvah zaradi visoke vrednosti indeksa I95 bi torej lahko (vsaj glede na merila proizvajalca programske opreme) v krajših časovnih intervalih nastopile v 12,5 % dni oziroma v povprečju vsak osmi dan. V najbolj aktivnem mesecu (tj. september 2011) je bilo takšnih dni 9, kar je 30 % vseh dni v mesecu.

Zaključek

Predstavljena je analiza ionosferskih motenj nad ozemljem Slovenije, ki so predvsem posledica povečane Sončeve aktivnosti ob približevanju vrhu 24. Sončevega cikla. Analizirani so podatki državnega omrežja stalnih GNSS-postaj SIGNAL, in sicer za drugo polovico leta 2011 in skoraj celotno leto 2012. Kot kazalnik ionosferskih motenj je uporabljen ionosferski indeks I95, ki temelji na modeliranju popravkov položaja, določenega z GNSS. Namen analize je bil oceniti stopnjo ogroženosti lokacijskih storitev na območju Slovenije v obdobjih povečane Sončeve aktivnosti.

V obravnavanem obdobju so visoke vrednosti indeksa I95 (vrednosti nad 8) v krajših časovnih intervalih zabeležene v 12,5 % vseh dni oziroma v povprečju vsak osmi dan. Najbolj aktiven mesec je bil september 2011, ko je bilo takšnih dni kar 30 %. Največ dni z zabeleženimi visokimi urnimi vrednostmi indeksa I95 je bilo v obdobju od avgusta 2011 do decembra 2011.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru temeljnega raziskovalnega projekta Določitev in ocena vplivov izrednih Sončevih aktivnosti na satelitsko določanje lokacije (J2-3625), katerega naročnik je Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

Literatura

- Berk, S., Bajec, K., Kozmus Trajkovski, K., Stopar, B. (2011). Status of the SIGNAL Positioning Service and Transformation between the Local and ETRS89 Coordinates in Slovenia. 2. CROPOS konferencija. Zagreb, Hrvaška, 8. april 2011. Zbornik radova, str. 73–82. Državna geodetska uprava, Zagreb.
- Chen, X., Landau, H., Vollath, U. (2003). New Tools for Network RTK Integrity Monitoring. 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Portland, Oregon, 9.–12. september 2003. Proceedings of ION GPS/GNSS 2003, str. 1355–1360. The Institute of Navigation, Manassas, Virginija.
- Coster, A., Komjathy, A. (2008). Space Weather and the Global Positioning System. Space Weather, 6, S06D04. DOI: 10.1029/2008SW000400.
- Čop, R., Bilc, A., Beguš, S., Fefer, D., Radovan, D. (2008). Magnetne nevihte in njihov vpliv na navigacijo. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2007. 13. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana, 17. januar 2008. Zbornik predavanj, str. 71–80. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- GURS (2012). Omrežje SIGNAL. Služba za GPS. Geodetska uprava Republike Slovenije, Ljubljana. <http://www.gu-signal.si/> (dostop 28. 12. 2012).
- Skone, S. H. (2001). The Impact of Magnetic Storms on GPS Receiver Performance. Journal of Geodesy, 75 (9–10), 457–468. DOI: 10.1007/S001900100198.

- Sterle, O., Pavlovčič Prešeren, P., Stopar, B. (2012). Vplivi dogajanj na Soncu na določitev položaja z enofrekvenčnimi kodnimi GNSS-instrumenti: priprava na vrh 24. Sončevega cikla. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011. 17. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko. Ljubljana, 26. januar 2012. Zbornik predavanj, str. 79–90. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Štern, A., Bešter, J. (2012). Zasnova opozorilnega sistema na odstopanje storitev GNSS. 21. mednarodna Elektrotehniška in računalniška konferenca ERK 2012. Portorož, 17.–19. september 2012. Zbornik IEEE, reg. 8, zv. A, str. 57–60. Slovenska sekcija IEEE, Ljubljana.
- Trimble (2010). Trimble VRS³Net App. Technical Notes. Trimble Navigation Ltd.
- Wanninger, L. (2004). Ionospheric Disturbance Indices for RTK and Network RTK Positioning. 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Long Beach, Kalifornija, 21.–24. september 2004. Proceedings of ION GNSS 2004, str. 2849–2854. The Institute of Navigation, Manassas, Virginija.

Vpliv neviht na geomagnetne meritve na Gori nad Ajdovščino

Rudi Čop¹, Goran Milev², Damir Deželjin³

Povzetek

Geomagnetni observatorij Sinji vrh je bil aprila 2012 preizkusno vključen v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET preko vozlišča GIN Edinburg. Julija 2012 je investitor prevzel observatorij od izvajalca gradbenih del. Ta leži na robu Gore, na območju najpogostejših udarov strel v Evropi. Ko vlažne zračne mase nevihtne fronte z juga zadenejo rob Gore, se morajo zelo naglo dvigniti za več kot 600 m, kar povzroči dodatno naelektritev nevihtnih oblakov. Razumevanje nastanka strel v nevihtnem oblaku, analiza merilnih rezultatov in uporaba že preizkušenih metod zavarovanja pred udari strel in njihovimi sekundarnimi vplivi omogočajo povečanje zanesljivosti delovanja observatorija. Za doseg tega cilja pa je nujno sodelovanje tako izvedencev s področja zaščite pred strelami, konstruktorjev in proizvajalcev merilnih instrumentov kot tudi upravljavcev tega observatorija.

Ključne besede: magnetometri, strele, zaščita

Key words: magnetometers, lightning, protection

Udari strel

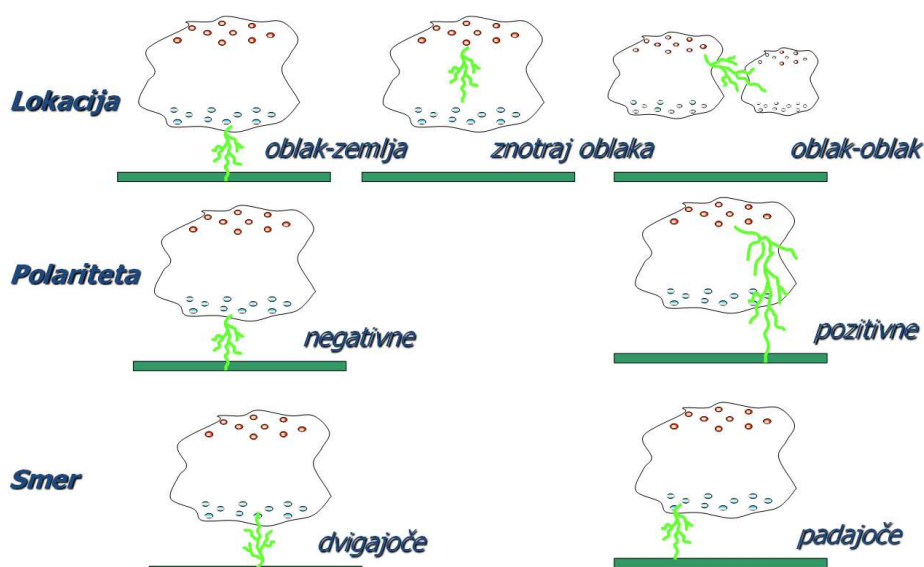
Ioni v atmosferi na višini nad 100 km nastajajo v glavnem zaradi ultravijoličnega sevanja in žarkov X iz Sonca. Na višinah pod 50 km pa so glavni povzročitelji naelektrenosti ozračja kozmični žarki. Največja gostota ionov v višinah pod 50 km je na okoli 15 km nad tlemi (Handbook of Geophysics and the Space Environment, 1985). Atmosfera v nižjih plasteh se ionizira ne samo zaradi radiacije kozmičnih žarkov, temveč tudi zaradi termodinamičnih pojavov v njej. Za krajši čas pa se ionizira ozračje v obliki kanalov ob udarih strel in drugih pojavih razelektritve v nevihtnih oblakih. V teh oblakih se nabirajo majhni ledeni kristali, nastali iz vodne pare, ki se mešajo z večjimi poroznimi in krhkimi ledenimi oblikami (babje pšeno). Te so nastale zaradi nagle podhladitve, podobno kot nastane ivje. Trdi ledeni kristali so nosilci pozitivnega naboja, krhke ledene oblike pa negativnega. Konvekcijski zračni toki v nevihtnem oblaku odnašajo snežne kristale na vrh oblaka, težje krhke ledene oblike pa ostanejo na dnu. Ta proces se odvija pri temperaturi od -10°C do -20°C in preneha pri temperaturi -40°C . V nevihtnem oblaku zato nastane potencialna razlika med 10^8 in 10^{10} V, ki lahko pripelje do udara strele. Sam mehanizem naelektritve pa je v tem prispevku opisan zelo poenostavljeno (Ziegler et al., 1991; Saunders, 2008).

Da nastane udar strele, se mora oblak prej naelektriti. Zato mora vsebovati zadosti vlage, kondenzacijska jedra in vertikalne zračne tokove, ki so najpogostejše konvekcijski, nastali zaradi segrevanja tal. Poleg močnega elektrostaticnega polja so potrebne še molekule zraka z zadostno medsebojno oddaljenostjo. Ta razdalja mora biti tolikšna, da se prosti elektroni pospešijo na zadostno hitrost in pri tem pridobijo tolikšno kinetično energijo, da ta ob trku zadostuje za ionizacijo plinskih molekul.

¹ Visokošolsko središče Sežana, Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo, Kraška ulica 2, 6210 Sežana

² Elektroinštitut Milan Vidmar, Hajdrihova 2, 1000 Ljubljana

³ Visokošolsko središče Sežana, Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo, Kraška ulica 2, 6210 Sežana



Slika 1: Vrste udarov strel glede na mesto udara,

Začetna električna praznitev ali ionizirani kanal v zraku se začne pri negativno naelektreni mešanici vodne pare in krhkih ledenih delcev v nevihtnem oblaku. Ta začetna praznitev negativnega naboja se v skokih dolžine tudi do 50 m približuje zemeljski površini, pri čemer pa se običajno razvije v več vzporednih kanalov. Te začetne praznitve trajajo relativno dolgo, do nekaj sto milisekund, in so slabo vidne. Ko začetna praznitev doseže tla, se v izpostavljenih objektih na zemeljski površini inducira električni naboj nasprotnega predznaka, ki močno ojača začetno elektrostatično polje. Če je to polje zadosti močno, se iz tal začne nova razelektritev. Ko je med tlemi in nevihtnim oblakom vzpostavljen kanal ioniziranega zraka, skozenj steče močan električni tok. Ta povratni udar spremlja močan svetlobni blisk (Staszewski, 2009). Poleg že opisane oblike električne praznitve med nevihtnim oblakom in zemeljsko površino obstajajo še praznitve znotraj nevihtnega oblaka in praznitev med nevihtnimi oblaki (slika 1).

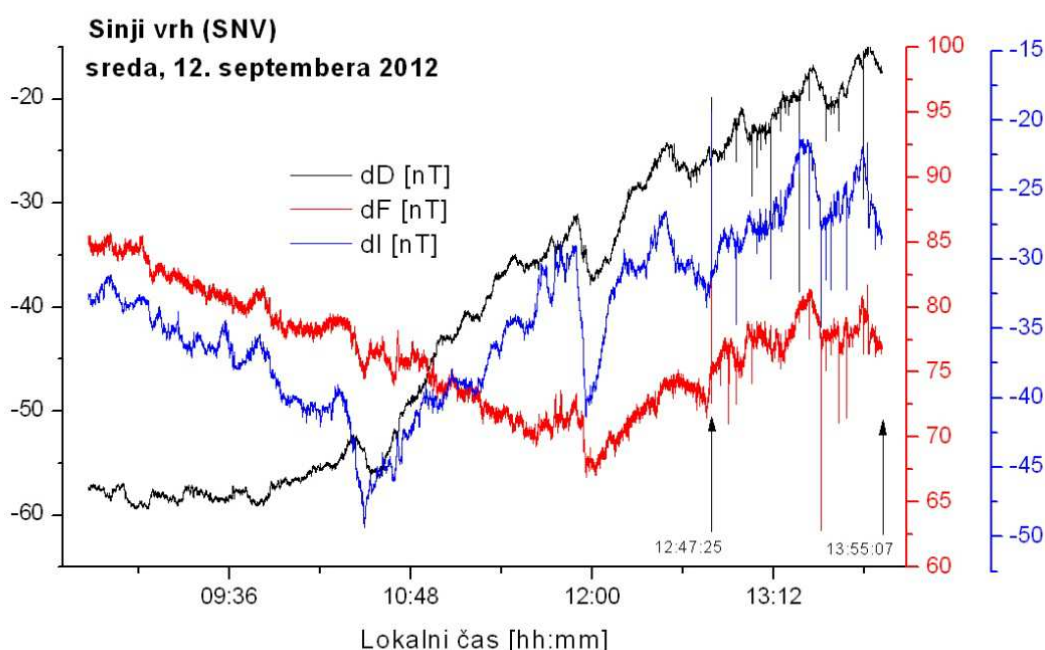
Preglednica 1: Podatki o strelah v Sloveniji

Območje	Največja amplituda [kA]	Mediana amplitude [kA]	p = 98 % [kA]
Slovenija	416,28	10,82	58
Primorska	385,73	11,15	60
Osrednja	416,28	11,09	60

Polariteto strele določa vrsta naboja v oblaku, ki se ob razelektritvi nevtralizira. Ker je oblak običajno v spodnjem delu negativen, je več kot 90 % vseh strel negativnih. Pozitivne strele so praviloma večjih amplitud in se pogosteje pojavljajo pred razpadom nevihtnega oblaka. Približno 80 % vseh udarov strel ima dva povratna udara ali več. Povprečni začetni negativni udar strele ima električni tok 30 kA, strela negativnih nosilcev tok do 120 kA in pozitivnih nosilcev več kot 300 kA. V posamezni strelji je moč 10^{12} W in traja v povprečju 30 milisekund. Raziskovalni satelit Fermi, ki kroži okoli Zemlje od leta 2008, spremlja tudi razelektritve v zemeljski atmosferi. Ob udaru strele nastane v smeri proti vesolju sevanje

žarkov gama, ki ustrezajo energiji pozitronov, antimaterije po masi enaki elektronom, vendar nosilcev pozitivnega električnega naboja (Reddy, 2012).

Vsaka začetna razelektritev nevihtnega oblaka inducira tudi električni naboj v objektih in na zemeljski površini pod oblakom. Inducirani električni naboj ostane toliko čas, dokler ostane oblak v bližini in dokler se naboj v oblaku ne sprostí v obliki strele. Takrat inducirani električni naboj ni več vezan na oblak in se zato skoraj s hitrostjo svetlobe širi po zemeljski površini v obliki napetostnega vala v vse smeri od kraja udara strele: $e_i = q/C$ [As/F]. Ta potencial zaradi sekundarnega udara strele je torej odvisen od razdalje od kraja, kamor je strela udarila v objekt na zemeljski površini, do kraja, kjer se zazna sekundarni udar strele (Punekar & Kandasamy, 2011; West).



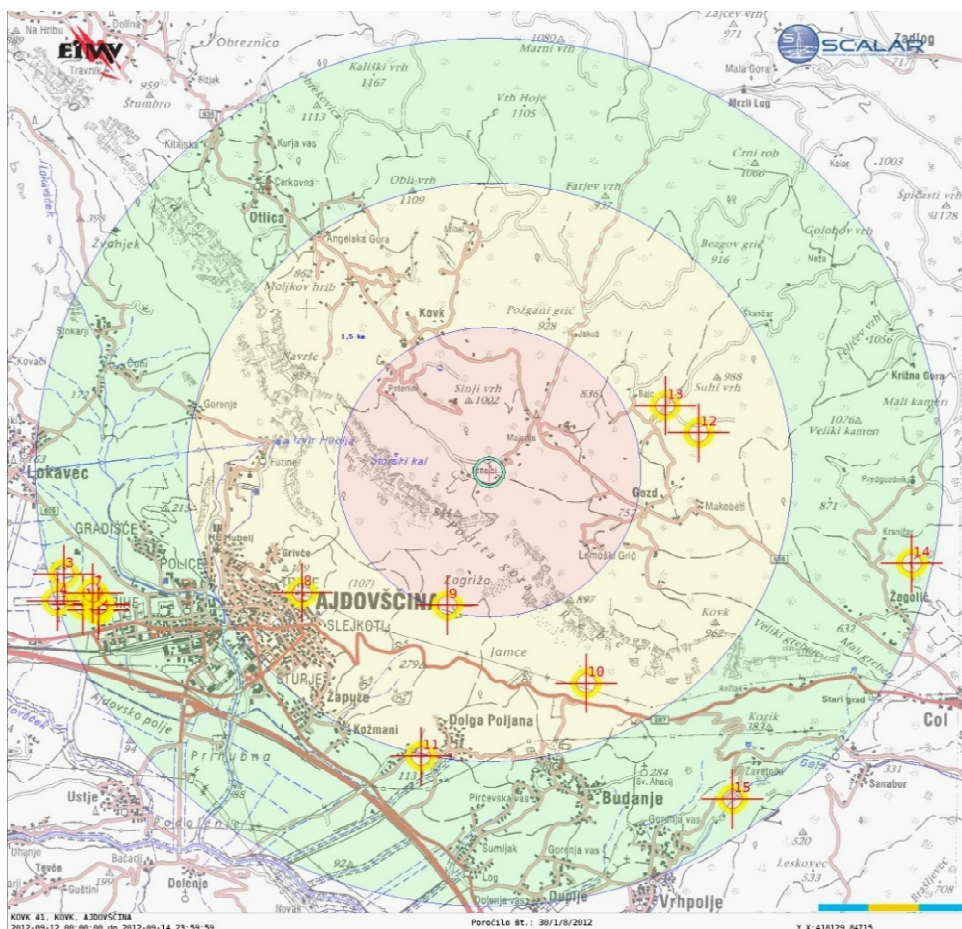
Slika 2: Udari strel dne 12. 9. 2012 registrirani z uporabo triosnega magnetometra

Zaradi udara strele nastale prenapetosti so lahko zelo nevarne in povzročijo škodo na elektroenergetskih napravah, instalacijah in porabnikih. Strela povzroča tudi požare zaradi visoke temperature do 25.000 K v ioniziranem kanalu zraka. V energetskih in signalnih vodih pa lahko nastane visoka inducirana napetost zaradi elektromagnetnih valov, ki nastanejo pri atmosferskih praznjenjih.

Nevihta na področju Gore

Na Geomagnetnem observatoriju Sinji vrh je bil v četrtek, 12. aprila 2012, postavljen še zadnji magnetometer, ki meri spremembo zemeljskega magnetnega polja. V sredo, 12. septembra, istega leta je bila nevihta s strelami na območju Gore. To je bila prva nevihta

potem, ko so bile na observatoriju vpeljene vse do takrat predlagane zaščite pred udarom strel (slika 2).



Slika 3: Udari strel v okolici observatorija dne 12. 9. 2012

Sistem SCALAR (Slovenski center za avtomatsko lokalizacijo atmosferskih razelektritev) deluje od leta 1998 in je namenjen določanju kraja udara strel med oblakom in zemljo ter posredovanju podatkov o njih končnim uporabnikom. Sistem meri elektromagnetne vale, ki jih povzročijo toki strel. Senzorji izmerjene podatke pošiljajo na Dunaj, kjer se v sklopu evropskega omrežja EUCLID izračuna lokacija posamezne strele in vsi drugi podatki o njej. V tem evropskem omrežju danes deluje več kot 147 senzorjev in pokrivajo območje od Sicilije do Nordkappa. Uporabniški strežnik v Ljubljani te podatke shranjuje:

- čas udara,
- zemljepisno širino in dolžino mesta udara,
- amplituda toka strele v kA in število povratnih udarov,
- polosi in naklon elipse napake,
- natančnost izračunanih parametrov izmerjene strele.

V tabeli (tabela 1) so zbrani statistični podatki o strelah v Sloveniji, shranjeni v sistemu SCALAR (SCALAR, 2012). Na podlagi podatkov iz tega sistema je bilo izdano tudi Poročilo o atmosferskih razelektritvah št. 30/1/8/2012 o udarih strel za obdobje od 12. 9.

2012 ob 00:00:00 do 14. 9.2012 ob 23:59:59 na območju Geomagnetnega observatorija Sinji vrh. V izbranem obdobju je v krogu 4,5 km od observatorija sistem zaznal 15 strel.

Dne 12. 9. 2012 je bil najmočnejši udar strele pozitivnih nosilcev električnega toka velikosti 178 kA ali 46,2 % najmočnejšega do zdaj registriranega udara strele na območju Primorske (tabela 1). Strela je udarila na razdalji 3,92 km od senzorjev magnetometrov (slika 3). Sekundarni vpliv te strele na triosne magnetometre fluxgate je presegel zgornjo mejo prenapetosti, za katero so bili instrumenti zgrajeni. Nastala prenapetost očitno ni posledica širjenja inducirane električnega naboja v obliki napetostnega vala, temveč zaradi magnetnih vplivov impulza toka strele na navitja v senzorjih instrumentov.

Izpostavljenost observatorija pred udarom strel je bila določena po karti največjih vrednosti gostote strel za Republiko Slovenijo (Karta maksimalnih vrednosti gostote strel, 2007). Iz nje je razvidno, da je največja vrednost gostote strel na območju Sinjega vrha 7,8 strele/km²/leto. Predvsem zahodni del Slovenije je glede udarov strel najbolj izpostavljeni del evropskega kontinenta.

Zaščita observatorija pred udari strel

Prvi udari strel na območju, kjer danes stoji geomagnetni observatorij Sinji vrh, so bili registrirani v času testnih meritev sprememb zemeljskega magnetnega polja poleti 2009. Te registracije so vplivale na izbiro načina napajanja observatorija z električno energijo. Razmestitev objektov so sicer v prvi vrsti narekovali pogoji naravovarstvenikov in pa zavarovanje dotedanje kmetijske dejavnosti na tem območju (Čop & Deželjin, 2012). Pri končnem umeščanju teh objektov v prostor pa je bila prisotna tudi želja po zmanjšanju verjetnosti neposrednega udara strel kot tudi njihovih sekundarnih vplivov (Rupke, E., 2002; Protection against lightning effects, 2009).

Na observatoriju se je dobro izkazala zaščita pred strelami iz nizkonapetostnega elektroenergetskega omrežja z dvema ločilnima transformatorjema v kaskadi. Pri izločanju medsebojnih vplivov merilnih instrumentov in drugih naprav med seboj, ki potrebujejo čim večjo medsebojno oddaljenost, in pri zmanjševanju vpliva sekundarnega udara strel, ki zahteva čim krajše električne tokokroge, se je dosegla optimalna rešitev. Merilni podatki se dodatno prenašajo po optičnih vlaknih in ne po dolgih žičnih komunikacijskih vodih. Uporabljeni komunikacijski pretvorniki, dostopni na prostem trgu, so industrijske izvedbe in delujejo brez okvar. Po istih parametrih kot komunikacijski pretvorniki so bili že prej izbrani sestavni deli telemetrije, analogno-digitalni pretvorniki in polnilci akumulatorjev. Slednji napajajo stacionarne akumulatorske baterije, ki observatoriju zagotavljajo avtonomijo za najmanj en teden. V razdelilce vseh treh sistemov enosmernega napajanja 12 V so bili dodatno vgrajeni hitri elementi za prenapetostno zaščito skupaj s taljivimi varovalkami (Protection by TRANSIL, 2004). Enosmerno napajanje vseh magnetometrov je bilo pred vhodom v njihove elektronske dele dodatno galvansko ločeno s pretvorniki DC-DC. Prav tako so bili v komunikacijske povezave RS-232 na izhodih iz merilnih instrumentov dodatno vgrajeni optični vmesniki (IMPT, 2012).

Leta 2011 so bile na observatoriju že uvedene stalne meritve sprememb zemeljskega magnetnega polja, vendar so vplivi posrednih udarov strel presegli dovoljeno mejo šele v letu 2012. V program nadaljnjega dela na observatoriju, ki je v prvi vrsti namenjen povečevanju zanesljivosti njegovega delovanja, je bilo zato vključeno tudi zmanjšanje vplivov sekundarnih udarov strel. Treba je dodatno zaščititi vhode v elektroniko teh instrumentov pred prenapetostjo iz strani senzorjev in vpeljati pravi časovni režim njihovega delovanja, da se instrumenti ne bi poškodovali zaradi strel.

Literatura

- Čop, R. Deželjin, D. (2012). Preizkusno obratovanje geomagnetnega observatorija Sinji vrh. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011. Zbornik predavanj. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo; Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 57-62.
- Handbook of Geophysics and the Space Environment (1985). Scientific editor Adolph S. Jursa. United States Air Force; Air Force Systems Command; Air Force Geophysics Laboratory, Springfield (ZDA).
- IMPT - Izolirani večprotokolni serijski sprejemnik/oddajnik (2012). Ditel, Koper.
<http://ditel.si/index.php/sl/impt.html> (10-12-2012).
- Karta maksimalnih vrednosti gostote strel (2007). Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije; Elektroeinstitut Milan Vidmar – EiMV, Ljubljana.
- Protection against lightning effects (2009). Power Guide 2009/Book 07. Limoges (France).
- Protection by TRANSIL - How to Ensure Absolute Safety (2004). AN317 Application Note. STMicroelectronics group of companies.
- Punekar, S. G. Kandasamy, C. (2011). Indirect Effects of Lightning Discharges. Serbian Journal of Electrical Engineering, 8/3, 245-262.
- Reddy, F. (2012). *Fermi Improves its Vision for Thunderstorm Gamma-Ray Flashes*. National Aeronautics and Space Administration; Goodard Space Flight Center, Greenbelt (ZDA).
http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/vision-improve.html (08-12-2012).
- Rupke, E. (2002). *Lightning Direct Effects Handbook*. Report Reference Number: AGATE-WP3.1-031027-043-Design Guideline. Lightning Technologies, Pittsfield (ZDA).
- Saunders, C. (2008). Charge Separation Mechanisms in Clouds. *Space Science Reviews*, 137/1-4, 335-353.
- SCALAR – Slovenski center za avtomatsko lokalizacijo atmosferskih razelektritev (2012). Elektroeinstitut Milan Vidmar – EiMV, Ljubljana.
<http://observer.eimv.si/> (08-12-2012).
- Staszewski, Ł. (2009). Lightning Phenomenon – Introduction and Basic Information to Understand the Power of Nature. 8 *EEEIC International Conference on Environment and Electrical Engineering*. Karpacz (Poland): 10-13 May 2009, 208-211.
- Ziegler, L. C. et al. (1991). A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm. *Journal of Geophysical Research*, 96/D7, 12,833-12,855.
- West, L. Allocating Indirect Lightning to Cables & Boxes at Program Inception. Note 617. University of New Mexico; SUMMA Foundation, Houston (ZDA).

Vpliv sušnih razmer na kakovost kraških vodnih virov (primer izvira Malenščice)

Janja Kogovšek*

Povzetek

Kraški vodonosniki so v Sloveniji pomemben vir pitne vode. Načrtovanje dolgoročnega varovanja kakovosti teh vodnih virov je možno le na osnovi dobrega poznavanja njihovega zaledja in njihovega delovanja. Pogosto so kraški vodonosniki zelo kompleksni sistemi, ki se napajajo z infiltracijo padavin in s površinskimi vodnimi tokovi. Na dinamiko pretakanja vode je vezan prenos snovi, kontaminantov, vendar pa ima dinamika tega prenosa svoje značilnosti. V kraških vodonosnikih, predvsem v vadozni coni lahko prihaja v sušnih obdobjih do daljšega shranjevanja onesnaženja, ki pa se po dovolj izdatnih in intenzivnih padavinah spira, in kakovost kraških izvirov se lahko močno poslabša, čeprav poslabšanja pogosto prekrivajo velike razredčitve. Sočasno spremljanje fizikalnih parametrov (pretok, temperatura, električna prevodnost) in kemijskih parametrov (vsebnost kalcija, magnezija, kloridov, nitratov, sulfatov, fosfatov..) smo v zadnjih dveh letih dopolnjevali še z bakteriološkimi analizami. Le-te so se pokazale pomemben parameter pri prepoznavanju prenosa onesnaženja s poseljenih območij. Tako smo pozimi 2011 po padavinah, ki so sledile zelo sušnemu letu, zabeležili onesaženje v številnih kraških izviroh, tudi dolgotrajno in močno bakteriološko onesnaženje kraškega izvira Malenščice. Tudi v sledečem, zopet sušnem letu 2012 je prihajalo po intenzivnih padavinah vedno znova do izrazitih poslabšanj. To je resno opozorilo, da so obremenitve vodonosnika prevelike, saj se je zmanjšano spiranje vodonosnika v dveh zaporednih letih odrazilo v poslabšani kakovosti po vsakih dovolj izdatnih padavinah in se ni vzpostavilo dobro izhodno stanje, kot v letih z veliko količino padavin.

Ključne besede: Kras, vodonosnik, hitrost pretakanja, prenos onesnaženja, bakteriološka kakovost

Kay words: Karst, aquifer, flow velocity, pollution transfer, bacteriological quality

Uvod

Kraške vode so v svetu in v Sloveniji pomemben vir pitne vode. Kar četrtna svetovnega (Forti, 2002) oz. polovica slovenskega prebivalstva se oskrbuje z vodo iz kraških vodonosnikov. Ti so pogosto obsežni in zelo heterogeni vodni sistemi, ki se napajanje tako z infiltracijo padavin kot tudi s površinskimi vodnimi tokovi, v katere odteka v Sloveniji pretežno še vedno neочиščene odpadne vode naselij z različnimi dejavnostmi. Ti viri napajanja omogočajo tudi vnos onesnaženja v vodonosnik vse do kraških izvirov. Tako imamo na eni strani hiter in zvezen prenos onesnaženja po sklenjenih kanalih ter počasnejši in dolgotrajnejši prenos s površja skozi vadozno cono vodonosnika, kjer prihaja do pomembnih učinkov zadrževanja in shranjevanja.

Raziskave načina pretakanja vode in prenosa onesnaženja skozi kraško vadozno cono (Kogovšek, 1997; Kogovšek 2010) so pokazale, da so te hitrosti pretakanja v splošnem

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

manjše kot hitrosti pretakanja po sklenjenih podzemnih kanalih. Hitrost pretakanja in nanj vezen prenos onesnaženja sta zelo odvisna od hidroloških razmer. V sušnih obdobjih v vadozni coni kraških vodonosnikov prevladuje shranjevanje občasnih manjših padavin in tudi morebitnega onesnaženja. Reke ponikalnice, ki pogosto tudi napajajo kraške vodonosnike, so v takih razmerah suhe ali pa dosegajo minimalne pretoke in se pretakajo z zelo majhnimi hitrostmi. Za Rak v Rakovem Škocjanu, ki zateka v vodonosnik Malenščice, je bilo s sledilnimi poskusi ugotovljeno, da se ob minimalnih pretokih pretaka le s 7 m/h (Ravbar et al., 2012), medtem, ko je pretakanje ob visokem vodostaju več kot 10-krat hitrejše (Preglednica 1). V sušnih razmerah je zadrževanje vode v podzemlju znatno daljše, prenos onesnaženja pa je slab in posledično v takih razmerah ugotavljamo relativno dobro kakovost kraških izvirov.

Iz preglednic 1 in 2 so razvidne hitrosti pretakanja po sklenjenih kraških podzemnih kanalih ob različnih hidroloških pogojih, ki so bile ugotovljene s sledilnimi poskusi.

Preglednica 1: Hitrosti pretakanja ponorne vode s Cerkniškega polja (M. in V.Karlovica) prek Rakovega Škocjana do izvira Malenščice.

Datum	Q(l/s)	v _{dom} (m/h) Cerk.polje-Kotliči	v _{dom} (m/h) Cerk.polje-Malenščica	v _{dom} (m/h) Rak-Malenšč.
20.5.2008	srednji	108	102	101
2.6.2009		min.		7
11.11.1967	2000	250	215	
20.4. 1964	3540	145	180	
7.1.1939	4500	650	215	190

Preglednica 2: Hitrosti pretakanja Pivke s ponora v Postojnsko jamo do Pivke jame in naprej do Planinske jame.

Datum	Q (l/s)	v _{dom} (m/h) Ponor Pivke - Pivka j.	v _{dom} (m/h) Ponor Pivke – Planinska j.
6. 5.1928	nižji visok	1300	112
31.5.1974	100	86	
19.4.1977	10000	1760	
20.5.2008	srednji	390	145
18.11.2008	srednji	176	
2.6.2009	nizek	22	7

Do največjega prenosa onesnaženja skozi kraške vodonosnike pa prihaja po izdatnejših padavinah, ki sledijo daljšim sušnim obdobjem, ko prihaja do največjih sprememb kakovosti vode. Tedaj padavine intenzivno spirajo shranjeno onesnaženje iz vadozne cone kot tudi iz strug ponikalnic. Onesnaženje potuje v smeri kraških izvirov, od katerih so številni zajeti za pitno vodo. Običajno se v takih razmerah pretoki močno povečajo in prihaja do velikih razredčitev. V kolikor je to onesnaženje veliko, ga tudi sorazmerno velike razredčitve ne morejo prikriti, in ga, v kolikor opravljamo dovolj pogoste meritve, zaznamo v kraških izviroh.

Po intenzivnejših in izdatnejših padavinah novembra in decembra 2011, ki so sledile izredno sušnemu delu leta, se je kakovost številnih kraških izvirov, ki so zajeti za vodooskrbo, poslabšala in potrebni so bili posebni ukrepi. V Postojni je bilo tako potrebno

vodo Malenščice (slika 1) prekuhavati daljše obdobje. Na osnovi poznavanja sistema pa lahko sklepam, da je v preteklosti že večkrat prišlo do podobnih onesnaženj, ki pa so verjetno trajala krajši čas in jih redke, občasne meritve niso zaznale.



Slika 1. Kraški izvir Malenščice na Planinskem polju ob nizkem vodostaju.

Območje raziskav in metode dela

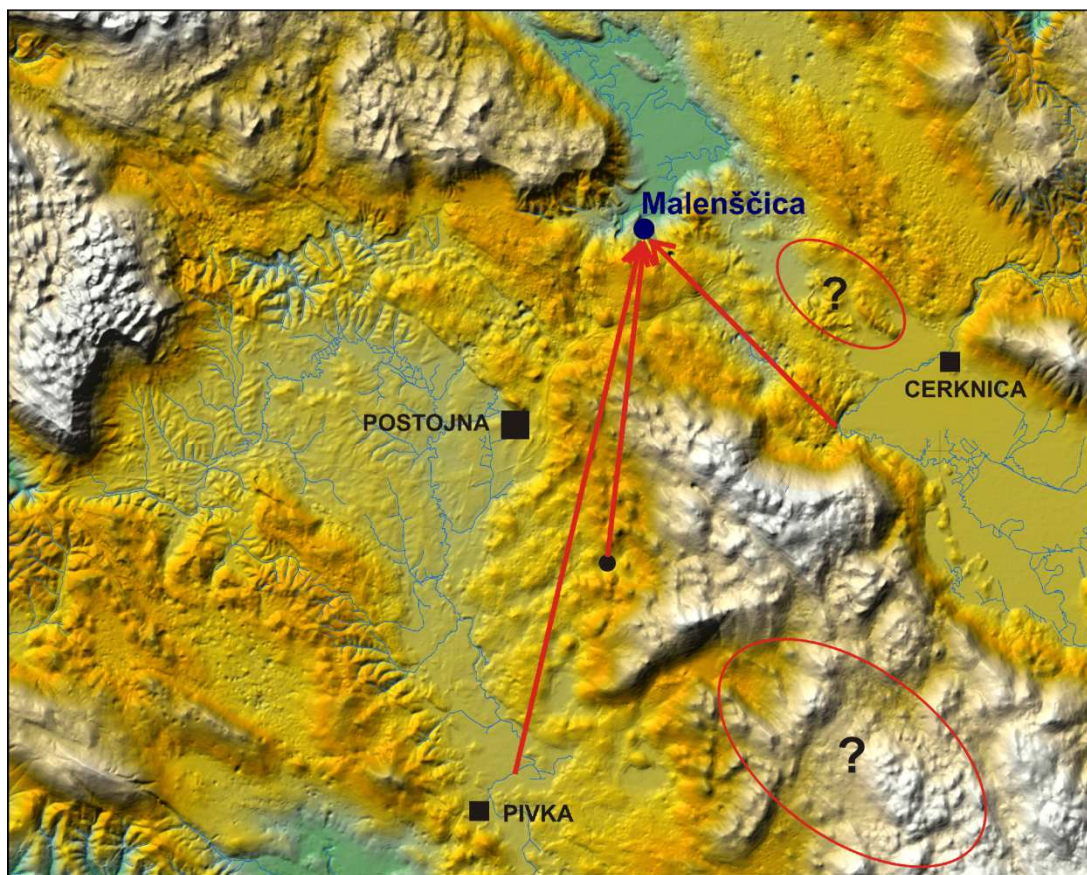
Kraški izvir Malenščice (slika 1) na Planinskem polju je zajet za oskrbo s pitno vodo za več kot 20.000 prebivalcev dveh občin. Njen pretok niha med 1,1 in 9,9 m³/s, s srednjim pretokom 6,7 m³/s.

Na osnovi vrste sledilnih poskusov z umetnimi sledili od leta 1939 do danes sklepamo, da zaledje Malenščice (slika 2). obsega širše območje Javornikov (Kogovšek, 1999), izvir pa se napaja tudi z vodnima tokovoma Cerknishčice in Stržena, ki ponikata na SZ obrobju Cerknishkega polja, tako, da zaledje Malenščice obsega tudi Cerknishko, Loško in Babno polje, vse do meje s Hrvaško. Leta 1988 (Habič 1989) je bila dokazana tudi vodna povezava s Pivko med naseljema Pivka in Trnje, kjer Pivka ob nizkem vodostaju v celoti ponika. Tja, v Pivko oz. v njeno strugo, je speljana kanalizacija odpadnih voda naselja Pivka. Tudi na območju Javornikov, ki so pretežno porasli z gozdom in tako vir kakovostne vode, sta dva vira onesnaženja, vojaški poligon Poček in postojnsko odlagališče odpadkov (Petrič in Šebela, 2005).

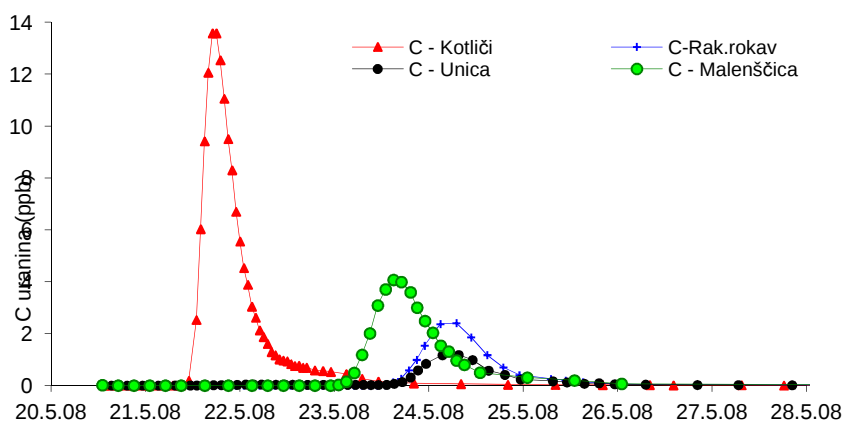
Izdatnost izvira Malenščica je velika in zagotavlja dovolj vode tudi ob najnižjih pretokih, vendar pa je zaledje izvira zelo kompleksno in obsežno, s številnimi viri onesnaženja, saj so Cerknishko polje in višje ležeča kraška polja ter dolina Pivke poseljeni. Danes še ne vemo, do kje na jugu sega prispevno območje na področju Javornikov, saj v tem delu še ni bilo raziskav.

Najnovejše raziskave so pokazale, da vode s Cerknishkega polja, ki ob visokih vodostajih pritekajo skozi Kotličice in Rak v Rakovem Škocjanu, ob nižjih vodostajih iztekajo le skozi Kotličice. Tedaj izvir Raka dobiva vodo še z neznanega območja. Ker je v takih razmerah

njegova kakovost slaba (povišana vsebnost kloridov in fosfatov (do 10 mgCl⁻/l do 0,5 mg PO₄³⁻/l), bi bilo potrebno njegovo ožje zaledje preučiti, posebno še, ker vemo, da odteka naprej neposredno v Malenščico.



Slika 2. Kraški izvir Malenščice ima zelo kompleksno zaledje. Napaja se z infiltracijo padavin z območja z gozdom poraslih Javornikov, s Cerkniškega polja priteka prek Rakovega Škocjana Cerkniščica, ob višjih vodostajih pa tudi Stržen, medtem ko je bila iz doline Pivke dokazana povezava iz požiralnika pri Trnju.



Slika 3: Sledilo, ki je bilo maja 2008 injicirano na ponoru v Malo Karlovico, se je pojavilo najprej v Kotličih v Rakovem Škocjanu, nato v pa Malenščici in v Rakovem rokavu v

Planinski jami ter v Unici. Oblika krivulj prehoda sledila nakazuje zvezno pretakanje po dobro razvitih kanalih.

Sledilni poskus z injiciranjem sledila v ponor v Malo Karlovico maja 2008 (Gabrovšek et al., 2010), ko je pretok Malenščice upadal ($5,4 \text{ m}^3/\text{s}$), padavine, ki so sledile, pa so pospešile prenos sledila, je pokazal na zvezan prenos sledila po dobro prepustnih kanalih (Slika 3).

Do izvira Malenščice se torej voda z onesnaženjem v primerljivih hidroloških razmerah pretaka s hitrostjo 100 m/h . Sočasne meritve pretakanja skozi vadozno cono so pokazale minimalno povečanje iztekanja le po najprepustnejših razpokah, iz česar sklepamo, da ob takih hidroloških razmerah v vadozni coni že prevladuje shranjevanje infiltriranih padavin in je Malenščica v poplavnem valu po omenjenih padavinah dobivala pomemben del vode s Cerkniškega polja.

Ob zelo nizkem vodostaju junija 2009 je bila hitrost pretakanja Raka s ponora do Malenščice (Ravbar et al., 2012) le 7 m/h (Preglednica 1), kar nakazuje zelo velike razlike prenosa možnega onesnaženja v odvisnosti od hidroloških razmer.

Dinamika različnih dotokov se s časom v odvisnosti od padavinskih in hidroloških razmer zelo spreminja, kar pa bo mogoče spoznati le s sočasnimi podrobnimi raziskavami v celem sistemu, kar je zelo obsežna in zahtevna naloga.

V letu 2012 smo začeli poskusno spremljati še bakteriološko kakovost Malenščice. Uporabljali smo testne ploščice RIDA®COUNT (R-biopharm, Nemčija) za določanje celokupnega števila mezofilnih aerobnih bakterij, diferencialno gojišče za določanje celokupnega števila koliformnih bakterij in specifično za določanje bakterije *Escherichia coli* (www.r-biopharm.com) ter gojišče za določanje enterobakterij (Mulec et al., 2012). Ker se za analizo uporabi 1 ml vzorca, so rezultati podani v številu kolonij v 1 ml (CFU/ml). Za pitno vodo se celokupne žive bakterije podaja v številu v 1 ml , medtem ko se koliformne, *E. Coli* in enterobakterije podaja v številu v 100 ml vzorca.

Ob nizkem vodostaju smo ugotavljali zelo nizke vrednosti omenjenih bakterij oz. smo zaključili, da metoda ni dovolj občutljiva. Po padavinah decembra, ko smo pričakovali povečanje kemijskega onesnaženja, pa smo ob naraščanju pretoka zabeležili velika povečanja vseh živih in koliformnih bakterij ter enterobakterij. Ta metoda se je v danih razmerah pokazala kot dovolj občutljiva, zato smo jo uporabljali še v sledečih poplavnih valovih.

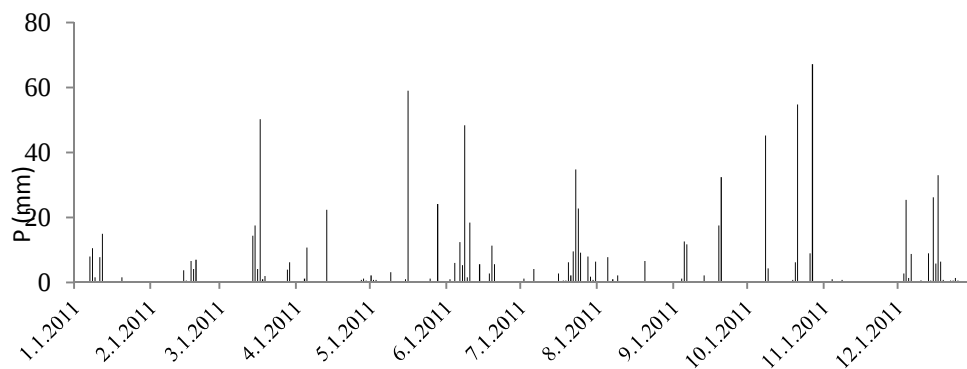
Poslabšanje kakovosti izvira Malenščice decembra 2011 in v letu 2012

V Postojni je v letu 2011 (naše meritve pri vojašnici v Postojni z RG2-M, ONSET) padlo le 945 mm dežja, do vključno septembra pa le 627 mm dežja. Oktobra, novembra in decembra je v šestih padavinskih dogodkih padlo skupno še 318 mm dežja (Slika 4). Prve padavine so se v veliki meri porabljele za zapolnjevanje močno spraznjenega zaledja.

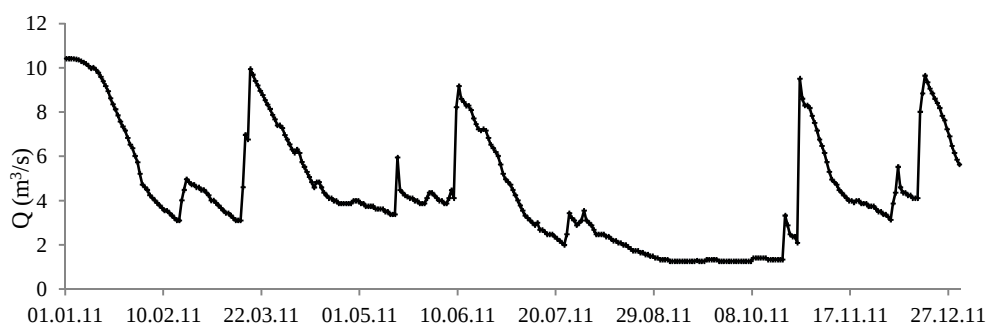
Dne 10. Junija 2011 je poplavni val dosegel maksimalni pretok, nato pa upadal in od začetka septembra vse do 20.10.2011, ko se je začel oblikovati prvi jesenski poplavni val (maksimalni pretok $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$), dosegal minimalni pretok $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Slika 5). Pretok je hitro upadal, po ponovnih padavinah pa se je sredi decembra oblikoval nov poplavni val. Pogosto vzorčenje tega poplavnega vala, ko je pretok dosegel maksimalno vrednost $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$, je pokazalo poslabšanje bakteriološke kakovosti Malenščice (Slika 6). Najprej smo zabeležili izrazito povečanje števila vseh živih bakterij, nekoliko z zamikom povečanje

števila enterobakterij, medtem ko je število koliformnih bakterij postopno naraščalo in v upadajočem delu poplavnega vala doseglo največjo vrednost.

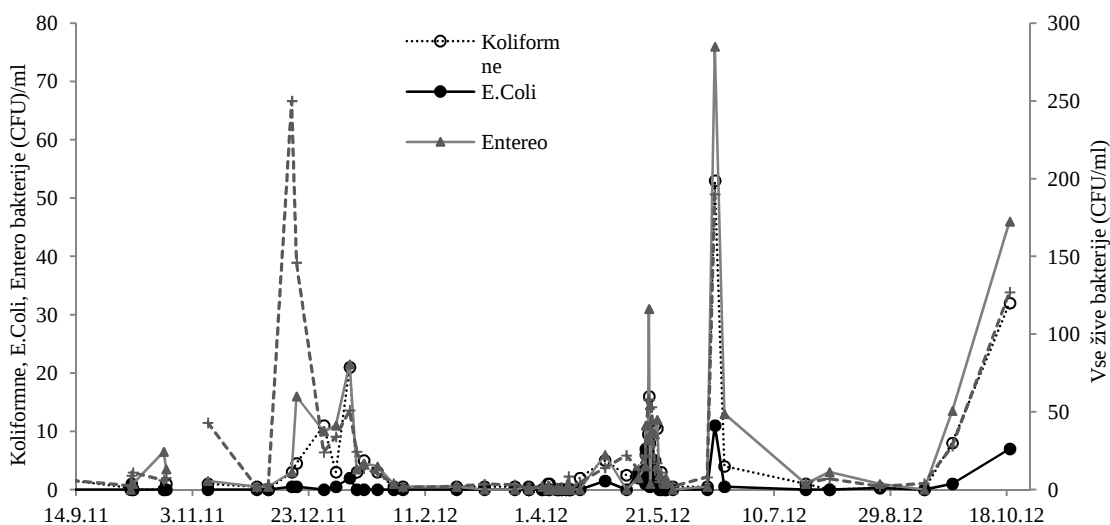
Zelo verjetno je prišlo do določenega prenosa onesnaženja in poslabšanja kakovosti že po oktobrskih intenzivnih padavinskih dogodkih, v prvem jesenskem poplavnem valu, vendar so bile naše analize tedaj še premalo pogoste. Glede na postopno slabšanje bakteriološkega stanja v sledečih poplavnih valovih, pa morda ta prenos le ni bil izdaten.



Slika 4: Padavine v letu 2011.



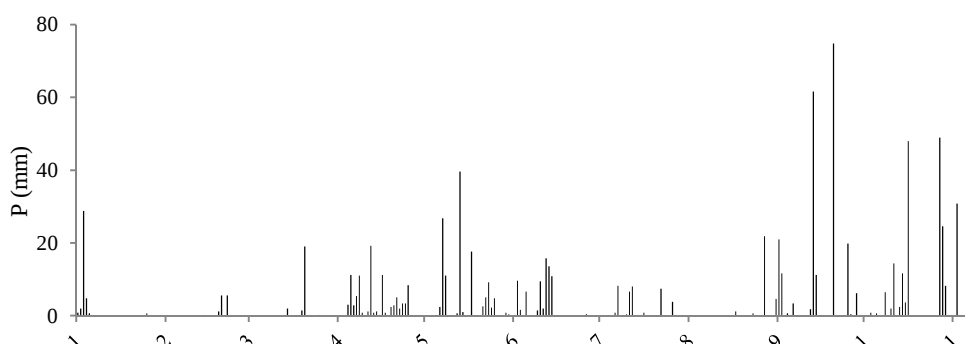
Slika 5: Hidrogram izvira Malenščica za leto 2011



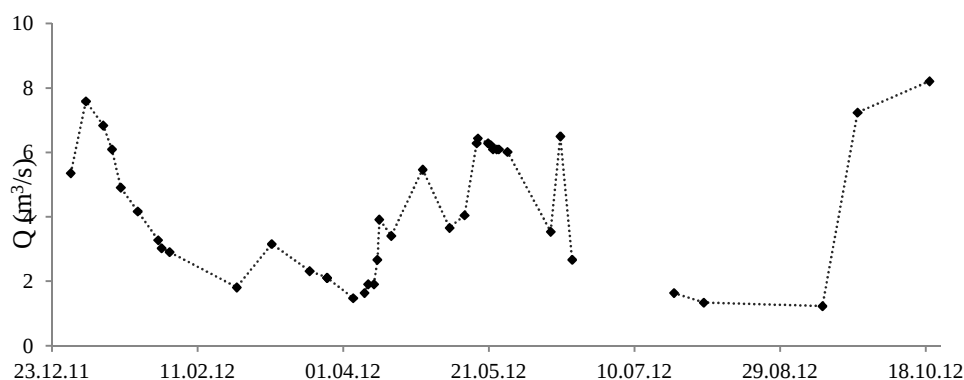
Slika 6: Rezultati bakterioloških analiz Malenščice v času poplavnih valov, ko smo beležili visoke vrednosti (vse žive in koliformne bakterije, enterobakterije in *E.Coli*). V sušnih obdobjih z uporabljenimi testi nismo zabeležili njihove prisotnosti z izjemo vseh živih bakterij.

Na približno 180 mm dežja, ki so padel septembra in oktobra pretok Malenščice ni reagiral. Šele intenzivne in izdatne padavine konec oktobra so povzročile oblikovanje prvega jesenskega poplavnega vala (Slika 5).

Tudi v letu 2012 (Slika 7) je do vključno septembra padlo malo padavin (642 mm). Manjše padavine v začetku januarja 2012 (40 mm) so oblikovale manjši poplavni val. V tem valu smo zaznali še večje število koliformnih bakterij in enterobakterij kot v poplavnem valu sredi decembra 2011, prisotne pa so bile tudi *E.Coli*.



Slika 7: Padavine v letu 2012 (meritve pri vojašnici v Postojni).



Slika 8: Ocenjeni pretoki Malenščice v času spremljanja bakterioloških parametrov.

Pretok Malenščice je nato pa upadal in vztrajal na sorazmerno nizkih vrednostih do 10.4.2012, ko je začel zložno naraščati (Slika 8) kot posledica manjših, dalj časa trajajočih padavin. Ves ta čas do konca aprila 2012 naše analize niso pokazale ne prisotnosti koliformnih bakterij, niti enterobakterij in *E.Coli*, število vseh živih bakterij pa je bilo nizko. Naj ponovno poudarim, da so rezultati podani v CFU v 1 ml vzorca.

Po izdatnejših padavinah sredi maja pa je pretok Malenščice porasel in 16.5.2012 že presegal 6 m³/s. Zabeležili smo sočasen porast vseh merjenih vrst bakterij (Slika 6), pri *E. Coli* pa smo zabeležili celo največje vrednosti v okviru opazovanj od aprila 2011 dalje. Podobne vrednosti smo zabeležili v sledečem poplavnem valu, le da je bilo število enterobakterij in koliformnih bakterij še znatno višje.

Junija, avgusta in polovico septembra je bil pretok Malenščice nizek in nismo beležili prisotnosti bakterij ali pa v zelo nizkem številu.

Sredi septembra pa so padavine pogojevale hitro naraščanje pretoka. Analize 24.9. ob pretoku prek $7 \text{ m}^3/\text{s}$ so pokazale naraščanje števila vseh vrst bakterij, 19.10.2012 ob pretoku prek $8 \text{ m}^3/\text{s}$ pa še večje vrednosti. Iz tega sklepam, da je prišlo do ponovnega intenzivnejšega spiranja onesnaženja.

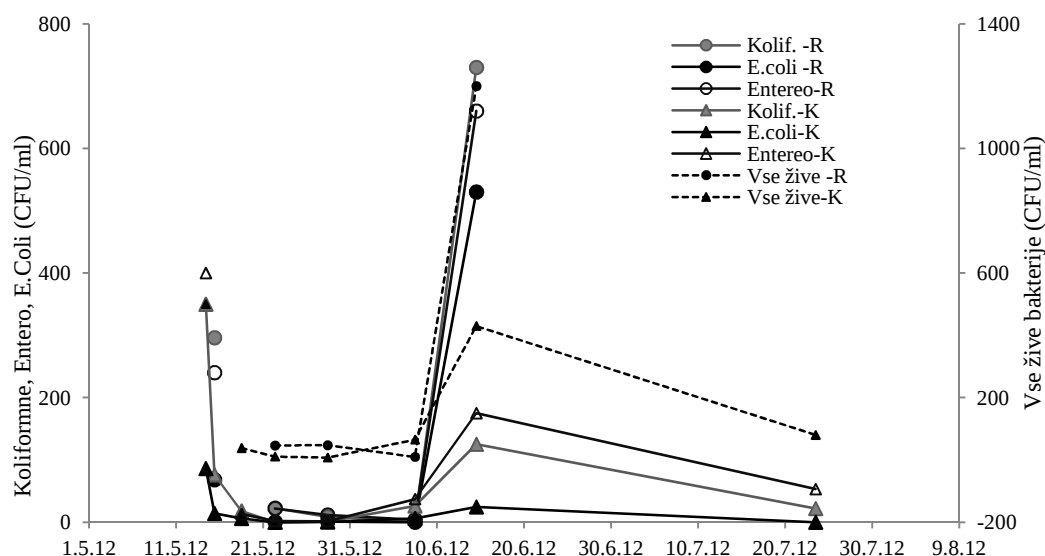
Možni viri onesnaženja Malenščice

Možni viri onesnaženja so Rak, ki ponika v Rakovem Škocjanu, in Pivka z odplakami, ki ob nižjih vodostajih vsa ponika pri naselju Pivka.

Ker je znana povezava ponikalnic na Cerkniškem polju z izviri v Rakovem Škocjanu, smo preverili tudi bakteriološko stanje Kotličev in Raka v času poplavnega vala junija 2012, ko je bilo število enterobakterij, koliformnih bakterij in *E.Coli* v Malenščici visoko (Slika 6). Rezultati meritev Raka in Kotličev so razvidni iz slike 9.

V danih hidroloških razmerah je v Kotliču pritekala voda s Cerkniškega polja, medtem ko v Rak pritekala pretežno voda iz še neznanega zaledja oz. je bil dotok s Cerkniškega polja minimalen. Število entero bakterij je bilo v Kotličih več kot 2-krat večje, v Raku pa kar 9-krat večje kot v Malenščici. Tudi število koliformnih bakterij je bilo v Kotličih več kot 2-krat večje, v Raku pa kar 14-krat večje. *E.Coli* je dosegala v Kotličih 2-krat večjo, v Raku pa skoraj 50-krat večjo vrednost.

Ti rezultati jasno kažejo na večji prispevek onesnaženja, ki priteka z Rakom na izviru, podobno kot so to pokazale kemijske analize. Onesnaženje, ki priteka s Cerkniškega polja, je manjše, čeprav tudi preveliko. Zato bi bilo nujno raziskati zaledje Raka, ki le ob višjih vodostajih dobiva vodo tudi s Cerkniškega polja. Seveda pa bo potrebno preučiti tudi dotok Pivke z odpadnimi vodami iz ponora pri naselju Pivka.



Slika 9: Rezultati bakterioloških preiskav Raka (R) na izviru pod Malim naravnim mostom in Kotličev (K) v Rakovem Škocjanu.

Sklepi

Dinamika iztekanja shranjenega onesnaženja iz vadozne cone krasa je neposredno vezana na dotok sveže vode, a ni odvisna le od intenzivnosti in količine efektivno infiltriranih padavin, temveč tudi od vsakokratne namočenosti prsti ter zapolnjenosti vadozne cone. Le ob dobri namočenosti prsti in ustrezni zapolnjenosti vadozne cone izdatne padavine pogojujejo zvezno spiranje onesnaženja iz celotne hierarhije različno prepustnih razpok v vadozni coni ter vzpostavitev boljšega kakovostnega stanja.

V poletnih sušnih obdobjih prevladuje shranjevanje padavin in onesnaženja. Tedaj iz vadozne cone minimalno izteka le že predhodno shranjena voda po tistih najbolj spranih razpokah, zato je njena kakovost sorazmerno dobra. V takih razmerah imajo reke ponikalnice, ki napajajo vodonosnik, minimalne pretoke, ali pa so suhe in zato se dotoki onesnaženih voda v njihovih koritih akumulira.

Padavine, ki sledijo, najprej zapolnjujejo celotno zaledje vodonosnika in šele dovolj izdatne in intenzivne pogojujejo tudi intenziven prenos onesnaženja, ki se v primeru, da ne pride do dovolj velikih razredčitvev, odrazi v močno poslabšani bakteriološki in v manjši meri kemijski kakovosti kraških izvirov.

Rezultati bakterioloških preiskav izvira Malenščice v poplavnih valovih v sorazmerno sušnih letih 2011 in 2012 nakazujejo, da je onesnaževanje v njegovem zaledju doseglo že to mejo, ko ga razredčitve ne morejo več prikriti.

Ker v kraških vodonosnikih prihaja do največjega prenosa v poplavnih valovih, lahko spoznamo dejansko kakovostno stanje kraških izvirov le, če opazovanja opravljamo tudi v takih razmerah, ko se moramo osredotočiti na najbolj indikativne parametre. Občasne analize, čeprav zelo obsežne, ki pa so opravljene ne glede na hidrološke razmere, ne morejo podati pravega kakovostnega stanja izvira.

Zahvala

Raziskave so potekale v okviru programa Raziskovanje krasa (ARRS) in ob podpori Slovenske nacionalne komisije za UNESCO - IHP program.

Literatura

- Forti, P. 2002. Speleology in the Third Millennium: Achievements and Challenges. *Theoretical and Applied Karstology*, 15, 7–26.
- Gabrovšek, F., Kogovšek, J., Kovačič, G., Petrič, M., Ravbar, N., Turk, J. 2010. Recent results of tracer tests in the catchment of the Unica River (SW Slovenia) = Novejši rezultati sledilnih poskusov v zaledju reke Unice (JZ Slovenija). *Acta carsologica*, 39, 1: 27-37.
- Kogovšek, J. 1997. Pollution transport in the vadose zone. V: Günay G., Johnson A. I., Tezcan L., Atilla A.Ö. (Eds.). *Karst waters & environmental impacts : proceedings*. A.A. Balkema, 161–165, Rotterdam.
- Kogovšek, J. 1999. Nova spoznanja o podzemnem pretakanju vode v severnem delu Javornikov (Visoki kras). *Acta carsologica*, 28, 1:161–200.
- Kogovšek, J. 2010. Characteristics of percolation through the karst vadose zone. *Carsologica* 10, 168 p, Postojna–Ljubljana.
- Habič, P. 1989. Kraška bifurkacija Pivke na jadransko črnemorskem razvodju. *Acta carsologica*, 18, 233–264.
- Mulec, J., Krištufek, V., Chroňáková, A. 2012. Comparative microbial sampling from eutrophic caves in Slovenia and Slovakia using RIDACOUNT test kits. *Int. J. Speleol. (Ed. ital.)*, 41, 1: 1–8.

- Petrič, M., Šebela, S. 2005. Hidrogeološke raziskave kot osnova za izdelavo načrta monitoringa onesnaženosti podzemnih vod : primer odlagališča Stara vas pri Postojni (JZ Slovenija). *Acta carsologica*, 34, 2:489–505.
- Ravbar, N., Barberá, J. A., Petrič, M., Kogovšek, J., Andreo Navarro, B. 2012. The study of hydrodynamic behaviour of a complex karst system under low-flow conditions using natural and artificial tracers (the catchment of the Unica River, SW Slovenia). *Environmental earth sciences*, 65, 8: 2259-2272.