

Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko

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

**RAZISKAVE S PODROČJA
GEODEZIJE IN GEOFIZIKE
2011**

zbornik predavanj

17. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko

Ljubljana, 26. januar 2012

ORGANIZACIJSKI ODBOR

Miran Kuhar
Bojan Stegenšek
Janez Goršič

UREDNIŠKI ODBOR

Miran Kuhar

LEKTORIRANJE

mag. Brigita Lipovšek

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

(17 ; 2012 ; Ljubljana)

Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011 : zbornik predavanj / 17. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 26. januar 2012 ; [organizator Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo ; uredniški odbor Miran Kuhar]. - Ljubljana : Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2012

ISBN 978-961-6884-00-6

1. Gl. stv. nasl. 2. Kuhar, Miran 3. Fakulteta za gradbeništvo in

geodezijo (Ljubljana)

259579904

Predgovor

Spet imamo vsakoletni Zbornik predavanj s strokovnega srečanja Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko SZGG. In spet je vsebinsko tako bogat, da lepo opiše, kaj se je na področju geodezije in geofizike pri nas dogajalo v preteklem letu – pa čeprav seveda marsikaj, kar smo v okviru našega združenja naredili v preteklem letu. Dobra tretjina vsebine se tako ali drugače ukvarja z geodezijo – z motnjami sistema za globalno pozicioniranje zaradi povečane Sončeva aktivnosti, z osnovami geodetskih sistemov in z morfologijo – ali le majhnega območja (ledenik) ali pa površja celega planeta (na primeru Marsa). Seizmologija se ukvarja s potresi, kot ji zazna državna mreža opazovalnic. Trije prispevki s področja hidrologije predstavljajo model za napovedovanje hidroloških razmer, vpliv podlage na površinski tok pretakanje vode skozi kraške vodonosnike. Sledijo prispevki o snoveh, ki jih je v zraku le malo: meteorologija se tokrat v povezavi s fotokemijo posveča modelom za napovedovanje onesnaženosti zraka z ozonom in delci, klimatologija podzemnih prostorov pa vsebnosti ogljikovega dioksida in radona v podzemni jami. S prispevkom o geomagnetnem observatoriju se krog zaključí, saj močna Sončeva aktivnost vpliva tudi na geomagnetno polje.

Ta pregled seveda ne pokrije vse dejavnosti SZGG: veliko je odmevnih objav v mednarodnih in domačih znanstvenih in strokovnih časopisih, veliko poročil na konferencah. Naši člani so dejavni tudi glede poljudnega obveščanja javnosti, dosegli pa so tudi marsikatero javno priznanje. Tako lahko kar ponovim zadnji stavek iz Predgovora v lanskem zborniku: "Bera je kar lepa in kaže nam pot naprej!"

predsednik SZGG

Prof .dr. Jože Rakovec

Vsebina

Predgovor	3
M. Čekada Triglav - Geodetske in fotogrametrične meritve Triglavskega ledenika	7
T. Podobnikar, B Székely - Geomorfometrične analize Marsa pri uporabi DMR-ja.....	19
M. Prelovšek, S. Šebela, J. Turk - Spremljanje temperature zraka in CO ₂ v Postojnskem jamskem sistemu ob povečanem številu obiskovalcev	31
S. Berk, K. Bajec, D. Fajdiga, D. Radovan, Ž. Komadina, K. Medved, T. Ambrožič, B. Koler, M. Kuhar, P. Pavlovčič Prešeren, S. Savšek, O. Sterle in B. Stopar - Idejni projekt za kombinirano geodetsko mrežo ničtega reda.....	37
R. Žabkar, M. Rus, J. Rakovec - Modeliranje ozona in delcev za območje Slovenije z modelskim sistemom ALADIN-CAMx	45
R. Čop, D. Deželjin - Prvo leto delovanja geomagnetnega observatorija pod Sinjim vrhom nad Ajdovščino.....	57
A. Gregorič, J. Vaupotič, S. Šebela - Vpliv zunanje temperature na koncentracijo radona v Postojnski jami	63
J. Kogovšek - Raziskave pretakanja padavin skozi vadozno cono kraških vodonosnikov ..	69
O. Sterle, P. Pavlovčič-Prešeren, B. Stopar - Vplivi dogajanj na Soncu na določitev položaja z enofrekvenčnimi kodnimi GNSS-instrumenti: priprava na vrh 24. Sončevega cikla	79
B. Koler, T. Urbančič, K. Medved, N. Vardjan, S. Berk, O. C. D. Omang, D. Solheim, M. Kuhar - Novi višinski sistem Slovenije in testni model geoida.....	91
S. Petan, N. Pogačnik, M. Sušnik, J. Polajnar, G. Jørgensen - Razvoj sistema za napovedovanje hidroloških razmer na porečjih Save in Soče.....	103
M. Koprivšek - Vpliv različnih vrst substrata na strukturo hitrosti vodnega toka na primeru potoka Glinščica *	111
J. Bajc, Ž. Zaplotnik, M. Živčič, M. Čarman - Izračun lokalnih magnitud potresov iz podatkov Državne mreže potresnih opazovalnic *	127

* nelektorirano

Geodetske in fotogrametrične meritve Triglavskega ledenika

Mihaela Triglav Čekada*

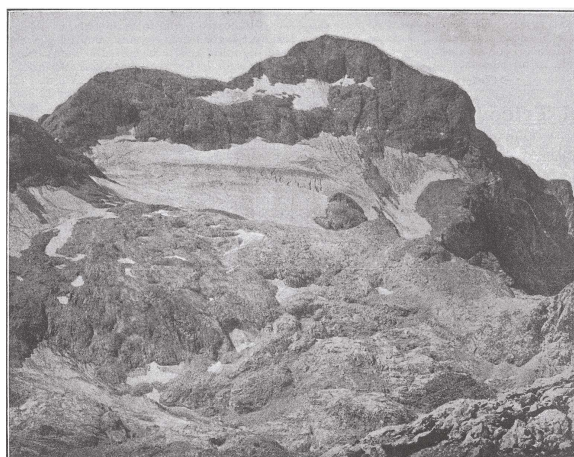
Povzetek

Članek prinaša popis izvedbe in rezultatov različnih izmer Triglavskega ledenika od leta 1952 do 2011. Obseg Triglavskega ledenika sicer je z ročnimi meritvami merjen že od leta 1946 naprej. V letu 1952 so prvič izvedli prave geodetske tahimetrične meritve ledenika. Naslednje tahimetrične meritve so sledile v letu 1995. Z letom 1999 smo pričeli izvajati geodetske meritve oslonilnih točk za potrebe fotogrametričnih snemanj Triglavskega ledenika, ki smo jih do leta 2007 izvajali na vsaki dve leti. Po letu 2007 se tahimetrične in dopolnilne fotogrametrične meritve izvajajo vsako leto.

Uvod

Triglavski ledenik leži na severni strani našega najvišjega vrha na nadmorski višini 2390 do 2560 m (Šifrer, Košir, 1976). Ledenik je nastal v obdobju tako imenovane male ledene dobe, katere zadnji ledeniški sunek naj bi bil leta 1850 ali nekaj desetletij kasneje. Takrat naj bi bil ledenik tako debel, da naj bi segal skoraj do vrha Glave (Meze, 1955).

Različnih zgodovinskih virov, ki prikazujejo obseg Triglavskega ledenika, je zelo veliko. Tako so nam na voljo prvi slikovni viri že iz sredine 19. stoletja. V Narodnem muzeju v Ljubljani je na ogled slika M. Pernharta iz leta 1849, ki prikazuje panoramo Triglava. Na njej ledenik sega vse do roba Triglavske severne stene. Boljšo primerjavo z novjšimi fotografijami omogoča fotografija R. Convizcka narejena leta 1897 ob odpravi tržaških planincev na Triglav (Slika 1) (Gabrovec, Peršolja, 2004).



Slika 1: Triglavski ledenik leta 1897 (foto: R. Convizcka)

Od leta 1946 pa je Triglavski ledenik deležen stalnih opazovanj in raziskav s strani Geografskega inštituta Antona Melika ZRC SAZU. Sprva so vsakoletne jesenske meritve ob koncu talilne dobe obsegale merjenje odmika ledu oz. snega od merilnih točk zarisanih po grbinah okoli ledenika. Te točke so bile večinoma zarisane že v letu 1946. Ta metoda je bila zelo uporabna samo prvih nekaj let meritev, ko je bil ledenik še precej debel in se je sklenjeno umikal. Ko pa se je ledenik pričel hitreje tanjšati, je začel na spodnjem koncu

* dr., Geodetski inštitut Slovenije, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

razpadati na manjše kose. Takrat se je prej omenjeni metodi izmere pridružila še metoda zarisovanja črt robu ledenika, torej do kam je ledenik v posameznem letu segal. Več črt so zarisali tam, kjer so grbine razkosale ledenik na manjše jezike. Tudi te črte so v prihodnjih letih služile za izmero odmika ledenika (Šifrer, Košir, 1976). Da pa bi krčenje ledenika čim bolj nazorno beležili, so ga tudi fotografirali. Najprej so določili stalne točke za fotografiranje: za ujetje celotnega ledenika – Begunjski vrh nad Staničevo kočo, za ujetje zgornjega robu ledenika – stalna točka blizu nekdanjega totalizatorja na vzhodni strani ledenika, z Glave in izpod doma na Kredarici (Šifrer, Košir, 1976).

Poleg prej omenjenih preprostih metod izmere oddaljenosti ledenika s pomočjo kompasa in vrvi ali metra je bil ledenik deležen tudi nekaj geodetskih meritev s teodolitom. Prva geodetska meritev s teodolitom je bila opravljena v letu 1952, naslednja v letu 1995. Z letom 1999 pa so se pričele geodetske meritve ledenika ali oslonilnih točk okoli ledenika za potrebe fotogrametrične izmere ledenika.

Leta 1976 so pričeli ledenik redno, približno enkrat mesečno, fotografirati s panoramskim nemetričnim fotoaparatom Horizont z dveh stalnih stojišč v okolici Triglavskega doma na Kredarici (Triglav Čekada et al., 2011).

Ledenik je bil v letih 1999 in 2000 deležen tudi georadarskih meritev, s katerimi so izmerili debelino ledenika (Verbič, Gabrovec, 2002).

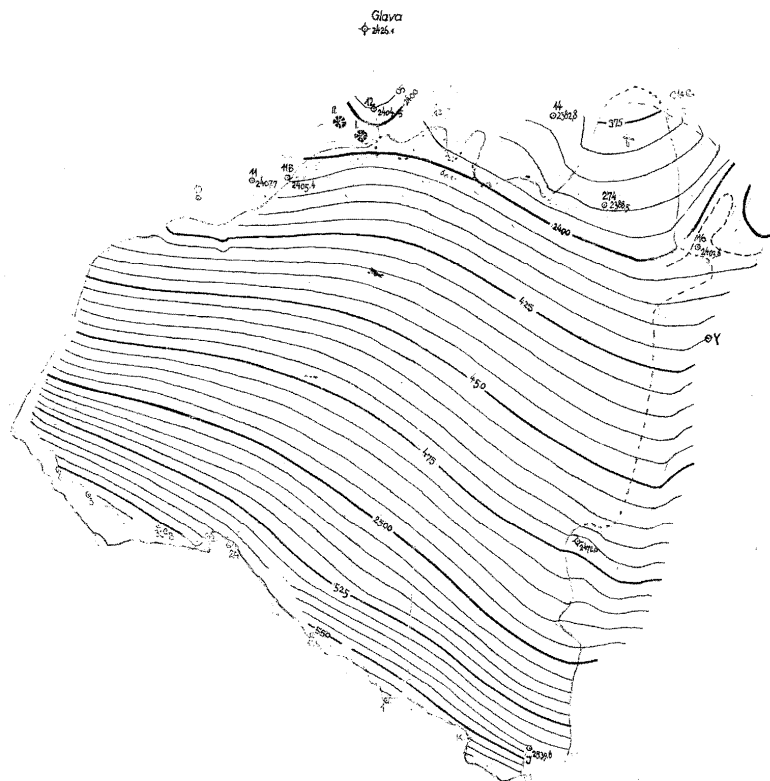
Klasične geodetske meritve

Leto 1952

Še v času svojega študija, leta 1952, je Marjan Jenko skupaj z Ivanom Gamsom in Dušanom Koširjem izvedel prve evidentirane geodetske tahimetrične meritve Triglavskega ledenika. Podatki o izmeri so povzeti po Jenko (2002).

Izmero ledenika in merilnih točk zarisanih po grbinah okoli ledenika so izvedli med 1. in 4. oktobrom 1952. Pri izmeri so uporabili teodolit Wild T1 s centezimalno razdelbo in direktnim odčitavanjem 0,01 grada ter zložljivo trimetrsko tahimetrično lato in nekaj trasirk. Merili so smeri, dolžine in višinske razlike med petimi stojišči. Višinske razlike med stojišči so merili obojestransko z natančnostjo $\pm 5\text{--}20$ cm na 100 m razdalje (odvisno od naklona). Dolžine so merili optično, z natančnostjo $\pm 20\text{--}30$ cm na 100 m (odvisno od naklona). Začetno stojišče je bilo poleg stare kočice na Kredarici, tri stojišča so bila ob robu ledenika in eno stojišče na samem ledeniku. Stojiščne točke niso bile stabilizirane. Izmera je bila izvedena v lokalnem koordinatnem sistemu, saj takrat navezava na državni koordinatni sistem preko državne triangulacijske mreže še ni bila mogoča. Državna triangulacijska mreža je tedaj obstajala le v nižinskih predelih Gorenjske. Višinsko se je izmera navezovala na vznožje južnega vogala takratnega Doma na Kredarici s koto 2515,0 m, ki je bila povzeta s predvojne topografske karte VGI (1 : 25000). Izmera je bila orientirana tudi glede na krajevni meridian, saj je Jenko zvečer opazoval tudi orientacijski priklop na Severnico (z ocenjeno natančnostjo $\pm 0,005$ gradov = 16").

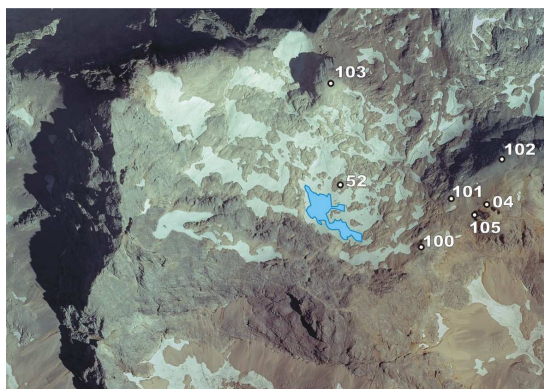
Izmero so uporabili za kartiranje ledenika in njegove bližnje okolice v merilu 1 : 2500. Na načrt je bil dodan še greben Triglava, ki pa ni bil izmerjen, ampak le prenesen s predvojne topografske karte VGI (1 : 25000). Površina ledenika v tem letu je bila 13 ha.



Slika 2: Načrt Triglavskega ledenika iz leta 1952
(izmera, preračuni in kartiranje: Marjan Jenko)

Izmera v letu 1995

Naslednje geodetske tahimetrične meritve ledenika so opravili 27. septembra 1995 sodelavci Geografskega inštituta Antona Melika ZRC SAZU in Inštituta za raziskovanje krasa ZRC SAZU. Tega leta so ledenik izmerili s teodolitom z elektrooptičnim razdaljemerom Leica TCR 307. Določili so koordinate 104 točk na obodu ledenika, s pomočjo katerih je bila izračunana njegova površina. Pomerili so tudi koordinate vseh merilnih točk zarisanih po skalah okoli ledenika od leta 1946 naprej. Ob tedanjem spodnjem robu ledenika so določili tudi štiri nove merilne točke za ročne meritve, oštevilčene s številkami 51 do 54 in stabilizirane z obstojno barvo. Tahimetrične meritve so izvajali v lokalnem koordinatnem sistemu s približno navezavo na državni koordinatni sistem preko grafičnih koordinat vogala novega Doma na Kredarici odčitanih s karte merila 1 : 5000. Za potrebe izmere so stabilizirali 5 merilnih točk, ki so bile leta 2001 še enkrat pomerjene v državnem koordinatnem sistemu v okviru merske kampanje 1999 (Slika 3). Točke 100–104 so stabilizirane z geodetskim vijakom, na katerem piše "Izmera jame": ena leži na pobočju Glave, dve v bližini stabiliziranih stojišč fotoaparata Horizont in ena na vogalu Doma na Kredarici. Točka 102 leži v središču znaka Zavarovalnice Triglav sredi stabilnega granitnega kamna, ki kaže smeri hribov. Ta točka ni stabilizirana z vijakom.



Slika 3: Razporeditev poligonskih točk 100–105 v okolici Triglavskega ledenika, ki so bile stabilizirane že leta 1995. Na ortofotografiji je označen tudi obseg ledenika v leta 2007.

Fotogrametrične in tahimetrične meritve

Geodetska uprava Republike Slovenije že od začetka 70 let prejšnjega stoletja izvaja ciklično aerosnemanje (CAS) celotnega območja Slovenije z mersko aerokamero velikega formata v merilu snemanja 1 : 17500. Snemanje se izvaja v aerofotogrametričnih blokih, s katerimi posnamejo celotno območje Slovenije v ciklu 3 do 4 let. Na posnetkih CAS tako najdemo tudi Triglavski ledenik, vendar ker so snemanja izvedena v različnih delih leta, le redko naletimo na stereopar, posnet v obdobju od septembra do oktobra, ki bi prikazoval ledenik konec njegove talilne dobe. Uporabni stereoposnetki za fotogrametrično obdelavo so iz let 1975, 1992, 1994 in 1998. Poleg posnetkov CAS pa ledenik lahko najdemo tudi na posebnem snemanju Posočja iz leta 1998 (Triglav, 2001).

Ker pa se je ledenik do konca 20. stoletja zelo skrčil po obsegu in volumnu, smo v letu 1999 pričeli s posebnimi fotogrametričnimi snemanji, ki zajamejo veliko manjše območje kot stereopar CAS.

Leto 1999

Na ledeniku so bile prvič izvedene klasične tahimetrične geodetske meritve za potrebe izmere oslonilnih točk za fotogrametrično snemanje ledenika med 13.–15. septembrom leta 1999, ko je bil ledenik popolnoma razkrit. Uporabljeni so bili elektronski teodolit z laserskim razdaljemerom Leica TC 403L ter merilne prizme. Poleg izmere oslonilnih in poligonskih točk je bil tahimetrično izmerjen tudi sam obseg ledenika in trije profili na njem. Geodetska izmera je bila narejena in izravnana v lokalnem koordinatnem sistemu. Oslonilne točke so bile zarisane na kamen z vijoličasto barvo v obliki krogov premera približno 0,8 m z dodatnimi stranskimi označbami. Oslonilne točke niso bile stabilizirane. Poleg Geografskega inštituta Antona Melika ZRC SAZU in Geodetskega inštituta Slovenije so v izmeri leta 1999 sodelovali še sodelavci Inštituta za raziskovanje krasa ZRC SAZU in DFG Consultinga d.o.o.

V jutranjih urah, še preden je vrh Triglava začel metati senco na ledenik, dne 15. septembra 1999 smo s pomočjo helikopterske enote Slovenske vojske izvedli aerosnemanje ledenika z merskim fotoaparatom srednjega formata Rolleiflex 6006. Snemalec je snemanje izvedel iz roke tako, da je bil v helikopter pripet z varovalnimi pasovi in se je med snemanjem nagibal skozi odprta vrata helikopterja (Slika 5). Posneti so bili trije pasovi na treh različnih oddaljenostih od ledenika. Fotogrametrično snemanje se je

izvedlo tudi s tal, s podobnega stojišča, kot je uporabljeno za panoramski fotoaparater Horizont. Rezultat fotogrametrične izmere je bil načrt ledenika v merilu 1 : 1000.

Leto 2001

V letu 2001 smo v okolici Triglavskega ledenika izvedli prve GPS-meritve oslonilnih točk. Ker so označbe oslonilnih točk iz leta 1999 med tem že izginile, je bilo stabiliziranih 9 novih oslonilnih točk (Slika 4). Točke so stabilizirane z vijakom privitim v skalo in zaščitene z matico. Točko signaliziramo tako, da na vijak privijemo 0,5 m dolg drog, naj pa privijemo še okrogel signal premera 0,6 m, ki je obarvan z rožnato barvo. Signali so shranjeni v Triglavskem domu na Kredarici. Poleg sodelavcev Geografskega inštituta Antona Melika ZRC SAZU in Geodetskega inštituta Slovenije so v izmeri leta 2001 sodelovali še 2B d. o. o. in Planinska zveza Slovenije. Signale so izdelali in darovali sodelavci 2B d. o. o.



Slika 4: Stabilizirana oslonilna točka iz leta 2001, posneta ob fotogrametričnem snemanju 2003 (foto: Miha Pavšek)

Hitre statične GPS-meritve oslonilnih točk smo izvedli 16. in 17. oktobra 2001. Na poligonski točki 04 smo postavili referenčno GPS-postajo, statična izmera na vsaki oslonilni točki je trajala 20 minut. Oslonilne točke smo izmerili na stiku vsake točke s terenom. Na točkah pod steno vrha Triglava se je ta interval raztegnil, saj ves čas intervala meritev ni bilo vidno zadostno število satelitov. Poligonska točka 04 je bila stabilizirana v 70-ih letih, zato je bila težko določljiva s pomočjo topografije iz tistega časa, saj so vmes na novo postavili vetrnico v bližini točke, eno navezovalno poligonsko točko so prekrili s heliodromom in izginil je čep točke 04. Zato je bila lega poligonske točke 04 – naše referenčne točke – še enkrat izmerjena s pomočjo vektorja med njo in točko z znanimi koordinatami v dolini (Kosmatin-Fras et al., 2001).

Fotogrametrično snemaje smo ponovno izvedli iz roke s pomočjo helikopterja Slovenske vojske z merskim fotoaparatom Rolleiflex 6006 (Slika 5). Zaradi slabe vidljivosti skoraj polovice oslonilnih točk smo absolutno orientacijo helikopterskih posnetkov izvedli z minimalnim številom oslonilnih točk (4 točke). Zaradi slabe razporeditve uporabljenih oslonilnih točk in velikega območja zajema, ki sega tudi izven območja oslonilnih točk, lahko pričakujemo večja odstopanja v strmejših delih modela in na robovih modela. Ker pa nas je v tem letu prehitel že prvi sneg, smo lahko s pomočjo stereoposnetkov izmerili samo območja prekrita s snegom, samega ledenika pa ne.



Slika 5: Pogled na ledenik 2001 skozi helikopterjeva vrata med fotogrametričnim snemanjem. V desnem vogalu je fotograf Stane Tršan s fotoaparatom Rolleiflex v naročju (foto: Mihaela Triglav Čekada).

Ker pa je bil stereomodel iz leta 2001 izmerjen in izračunan v globalnem koordinatnem sistemu WGS84 ter naknadno transformiran v Gauss-Krugerjev koordinatni sistem, je bil nanj pretvorjen tudi model iz leta 1999, ki je bil izmerjen v lokalnem koordinatnem sistemu ter geodetske meritve iz leta 1995, ki so bile prav tako izmerjene v lokalnem koordinatnem sistemu. Pretvorba je bila izvedena s pomočjo sedemparametrične prostorske transformacije preko devetih veznih točk vidnih na obeh modelih zajetih na analitičnem fotogrametričnem instrumentu Adam Promap. Rezultat fotogrametrične izmere je bil načrt v merilu 1 : 1000.

Leto 2003

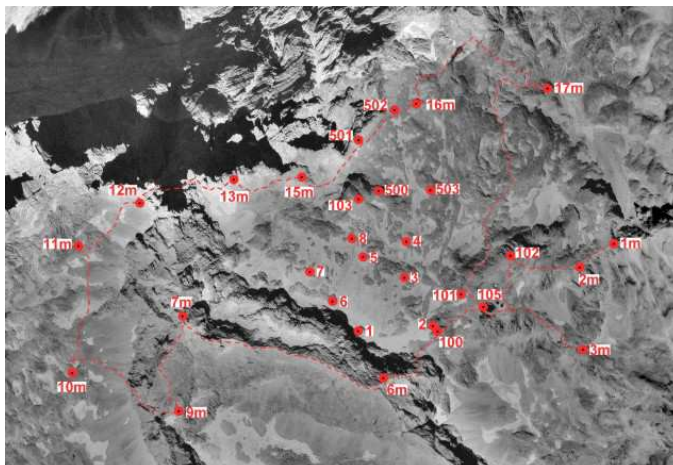
Da bi se izognili novemu jesenskem snegu, ki nam bi prekril ledenik, smo se na fotogrametrično snemanje ledenika v letu 2003 odpravili že 26. avgusta. Načrtovali smo tudi stabilizacijo večjega števila začasnih oslonilnih točk. Geodetske tahimetrične meritve smo izvedli z elektronskim teodolitom z razdaljemerom Leica TC 403L. Geodetske meritve smo izvedli v globalnem koordinatnem sistemu, saj smo se navezali na oslonilne točke izmerjene z GPS-meritvami v letu 2001. Poleg novih oslonilnih točk (6 novih točk) smo še enkrat pomerili poligonske točke (9 točk) merjene v lokalnem koordinatnem sistemu leta 1999 in nekatere merilne točke (12 točk), od katerih so v preteklosti izvajali ročne meritve odmika ledenika sodelavci Geografskega inštituta Antona Melika.

28. avgusta smo ponovno izvedli helikoptersko fotogrametrično snemanje iz roke s fotoaparatom Rolleiflex 6006. Na treh različnih višinah nad ledenikom smo posneli tri snemalne pasove. Za stereorestitucijo smo uporabili posnetke narejene na najmanjši višini nad ledenikom. Oslonilne točke iz leta 2001 smo signalizirali s signali (Slika 4), nove pa smo stabilizirali z vijakom in pobarvali z neobstojnimi barvami. Izdelek meritev in fotogrametričnega snemanja je bil ponovno 3D-načrt ledenika in terena v njegovi okolici v merilu 1 : 1000.

Leto 2005

Ker smo želeli pravilno umestiti v prostor tudi starejše podatke in posnetke ledenika, smo se za razliko od prejšnjih fotogrametričnih snemanj, ko smo snemali ožje območje ledenika, odločili, da v letu 2005 posnamemo celotno območje med robom Triglavске severne stene in vrhom Triglava. Ker je to širše območje veliko približno 1,5 km², smo se

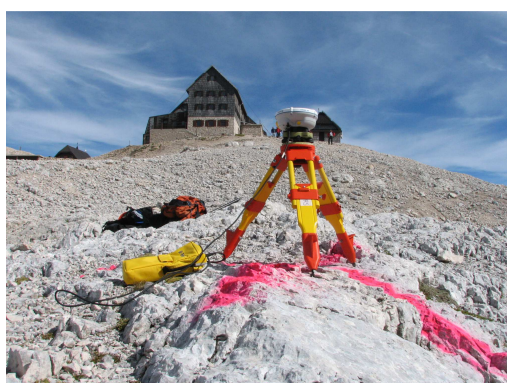
odločili za klasično aerosnemanje s fotogrametrično kamero velikega formata Leica RC 30 v barvni tehniki. Aerosnemanje z dveh višin (različnih meril snemanja) so izvedli sodelavci Geodetskega zavoda Slovenije v jutranjih urah 25. avgusta 2005. Že dan prej smo stabilizirali in izmerili nove (13 na novo stabiliziranih točk) in stare oslonilne točke (Slika 6) na širšem območju snemanja.



Slika 6: Razporeditev oslonilnih točk signaliziranih leta 2005 na izseku ortofota. Označena je tudi pot dostopa do novih oslonilnih točk (izris: Matija Klanjšček).

Sama geodetska izmera oslonilnih točk je potekala na dva načina: izmera novih in starih oslonilnih točk na ožjem območju ledenika s tahimetrično izmero in izmera novih oslonilnih točk na širšem območju s hitro statično izmero (20-30 minut) ali izmero VRS RTK GPS, odvisno od dosegljivosti-GSM signala (Kozmus in Stopar, 2003). GPS-izmera se je vršila v koordinatnem sistemu ETR89, naknadno pa je bila transformirana v Gauss-Krugerjev koordinatni sistem na osnovi lokalnih transformacijskih parametrov. Pri tahimetrični izmeri je bil uporabljen elektronski teodolit Leica TCR 403, pri GPS-izmeri pa GPS-sprejemnik Trimble R8. Nove oslonilne točke so bile stabilizirane z vijakom in signalizirane z narisanimi kraki križa rožnate neobstoje barve. Kraki križa so bili široki 20 cm in dolgi 1,5 m (Slika 7).

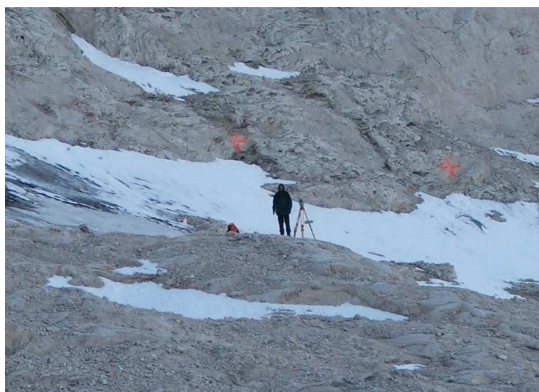
Žal pa se ves novi sneg iz pretekle zime v času naših meritev še ni stalil in je zato tudi izmerjeni obseg ledenika večji kot v letu 2003.



Slika 7: Signalizacija oslonilne točk in njena GPS-izmera v letu 2005 (foto: Matija Klanjšček in Blaž Barborič)

Obdobje 2007–2011

V letu 2007 nas je pred meritvami prehitel novi sneg v avgustu in začetku septembra. Zato smo se na ledenik odpravili 13. in 14. septembra, ko se je novi sneg deloma že stalil. Namen geodetske izmere in fotogrametričnega snemanja je bila dokumentacija ožjega območja trenutnega stanja ledenika. Zaradi majhnega obsega ledenika in njegovega robu, ki je bil deloma prekrit še z novim snegom, smo se odločili za detajlno tahimetrično izmero njegovega oboda in točk na sami površini ledenika. Sodelavci Geografskega inštituta Antona Melika so tako ob sami izmeri določili, kje je meja ledenika in kje je novi sneg. To je tudi poenostavilo fotointerpretacijo posnetkov v pisarni.



Slika 8: Začasna signalizacija oslonilnih točk okoli ledenika v letu 2007
(foto: Mihaela Triglav Čekada)

Tahimetrična izmera se je izvajala s stojišča 52 – merilna točka geografov, ki je bila zarisana s trajno barvo in prvič izmerjena leta 1995. Sedaj smo jo navezali na poligonske točke okoli Triglavskega doma na Kredarici in na Glavi (Slika 3). Poligonske točke na obodu in profilih ledenika smo izmerili na vsakih 5 metrov razdalje. Tako smo že na samem terenu izmerili digitalni model višin ledenika, ki smo ga s pomočjo stereorestitucije fotogrametričnih posnetkov v pisarni samo še zgostili. Skupno smo v dveh dneh tahimetrične izmere izmerili 531 detajlnih točk.



Slika 9: Začasna signalizacija oslonilnih točk na ledeniku v letu 2007
(foto: Mihaela Triglav Čekada)

Pred terestričnim fotogrametričnim snemanjem so bile na novo signalizirane in izmerjene nove oslonilne točke, ki so se ležale neposredno ob robu ledenika in tudi na samem ledeniku. Oslonilne točke na obodu ledenika so bile signalizirane z neobstojno barvo (Slika 8), točke na ledeniku pa z začasnimi oslonilnimi točkami (Slika 9). Nove

oslonilne točke na skalah so bile stabilizirane s trajno označbo. Terestrično fotogrametrično snemanje z merskim fotoaparatom Rolleiflex 6006 smo izvedli iz neposredne bližine ledenika (zraven merilne točke geografov 52) in s pobočja poleg Triglavskega doma na Kredarici (zraven poligonske točke 101).

Ker se je kombinacija tahimetrične in terestrične fotogrametrične izmere v letu 2007 izkazala za logistično enostavno, smo se 27. in 28. avgusta 2008 ponovno lotili enake izmere. Ledenik je bil tudi tedaj deloma zakrit s starim snegom, zato smo rob ledenika določili na samih terenskih meritvah. Za terestrično fotogrametrično izmero smo ponovno uporabili začasne oslonilne točke na ledeniku in merski fotoaparater Rolleiflex 6006.

Kombinacijo terestrične fotogrametrije in tahimetrične izmere smo ponovili tudi 22. in 23. septembra 2009. Ledenik je bil v času meritev še popolnoma zakrit s snegom iz pretekle zime, zato smo obod ledenika določili na terenu in ga izmerili tahimetrično. Spet smo uporabili začasne oslonilne točke ter merski fotoaparater Rolleiflex 6006.



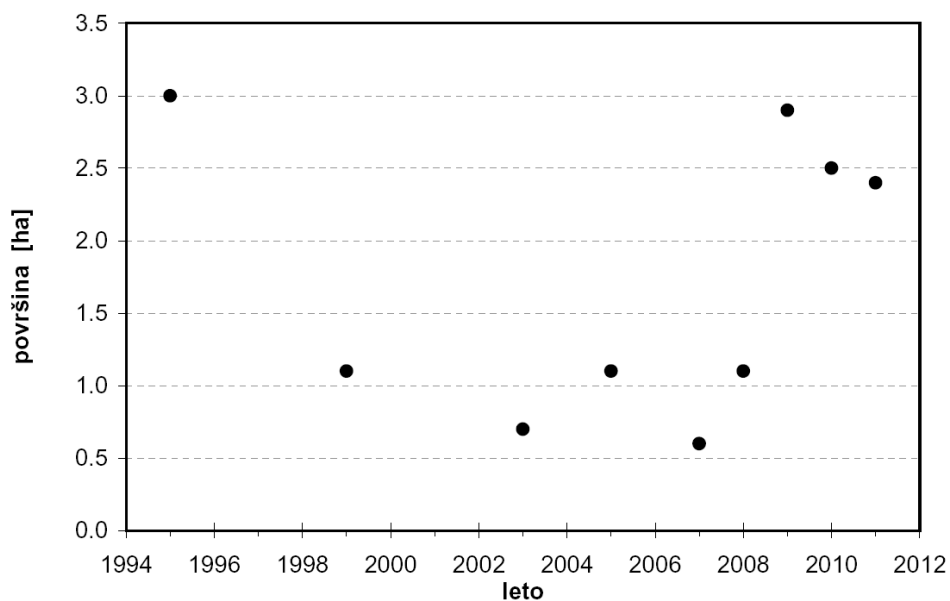
Slika 10: Ledenik 2011 (foto: Miha Pavšek)

Po še eni obilni zimi smo tahimetrične in terestrične fotogrametrične meritve ledenika ponovili 14. in 15. septembra 2010. Ponovno smo signalizirali in izmerili začasne oslonilne točke ter uporabili merski fotoaparater Rolleiflex 6006.

V letu 2011 smo ledenik merili 13. in 14. septembra prav tako tahimetrično in s terestrično fotogrametrijo (Slika 10).

Sklep

V članku so opisane preproste in geodetske metode izmere umikanja ledenika. Skozi dolgo zgodovino meritev Triglavskega ledenika, od leta 1946 naprej, se je zvrstilo kar nekaj različnih metod kontaktne izmere: od ročnih meritev, klasičnih geodetskih tahimetričnih meritev do GPS-izmere po dveh metodah. Geodetske meritve so osnova na katero se navezujejo tudi brezkontaktne metode izmere, kot so fotogrametrične in georadarske meritve. Poleg različnih uporabljenih tehnik klasične geodetske izmere smo na ledeniku preizkusili tudi različne postavitve fotogrametričnih snemanj: od terestričnega, aerosnemanja iz helikopterja z merskim fotoaparatom srednjega formata do klasičnega posebnega aerosnemanja z letalom z merskim fotoaparatom velikega formata.



Slika 11: Površine ledenika od 1995- 2011

Rezultat geodetskih meritev je obod ledenika, ki je osnova za izračun obsega. Če imamo izmerjene še točke na površini ledenika, lahko tudi podajamo ocene o prostornini ledenika. Leta 1952 je ledenik obsegal 13 ha, leta 2007, ko je imel najmanjšo površino, pa samo še 0,6 ha. Med leti 2008 in 2011 pa je ledenik ohranjal svojo površino, predvsem zaradi obilnih zim. V teh letih ledenik v času meritev nikoli ni bil popolnoma razkrit in zato na terenu nismo mogli ločiti meje med snegom in ledom, zato je bila njegova površina zopet podobna površini iz 90-ih let prejšnjega stoletja.

Geodetske metode izmere ledenika so dobra osnova za navezavo in kontrolo nemerskih podatkov. Med take lahko štejemo obdelavo arhivskih nemerskih posnetkov, ki so vir neprecenljivih zgodovinskih podatkov o podrobnih spremembah površine ledenika še pred pričetkom klasičnih geodetskih izmer.

Zahvala

Za opis geodetske izmere in kartografske obdelave podatkov iz leta 1952 se zahvaljujemo g. Marjanu Jenku. Za detajle o geodetski izmeri iz leta 1995 se zahvaljujemo g. Franju Droletu. Zahvaljujemo se tudi oskrbnikom Doma na Kredarici, ki so v vseh letih bili pripravljeni sodelovati z merskimi ekipami, med drugim so pomagali pri prevozih in skladiščenju opreme na Kredarici. Izmere je finančno omogočil Geografski inštitut ZRC SAZU (GIAM), deloma tudi v okviru ARRS-projekta Triglavski ledenik kot pokazatelj podnebnih sprememb, Projekt ARRS L6-7136. Sodelavcem GIAM se zahvaljujemo za možnost strokovnega sodelovanja na tako zanimivem delovišču, kot je Triglavski ledenik.

Literatura

- Šifrer, M., Košir, D. 1976. Nova dognanja na Triglavskem ledeniku in ledeniku pod Skuto 1963-1973, Geografski zbornik XV/3, Ljubljana.
 Šifrer, M. 1986. Triglavski ledenik v letih 1974-1985, Geografski zbornik XXVI/3, Ljubljana.
 Gabrovec, M. 1998. Triglavski ledenik v letih 1986-1998, Geografski zbornik XXVIII, Ljubljana.

- Gabrovec, M., Peršolja, B. 2004. Triglavski ledenik izginja, Geografski obzornik, str.18-23.
- Gabrovec, M. et al. 2005. Triglavski ledenik kot pokazatelj podnebnih sprememb, Projekt ARRS L6-7136, prvo vmesno poročilo, november 2005, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU in Geodetski inštitut Slovenije.
- Gabrovec, M. et al. 2006. Triglavski ledenik kot pokazatelj podnebnih sprememb, Projekt ARRS L6-7136, drugo vmesno poročilo, maj 2006, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU in Geodetski inštitut Slovenije.
- Gabrovec, M. et al. 2007. Triglavski ledenik kot pokazatelj podnebnih sprememb, Projekt ARRS L6-7136, tretje vmesno poročilo, november 2007, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU in Geodetski inštitut Slovenije.
- Jenko, M. 2002. O geodetski izmeri Triglavskega ledenika leta 1952, osebni zapiski, hrani jih arhiv Geografskega inštituta Antona Melika, ZRC SAZU.
- Kosmatin-Fras, M. et al. 2001. Elaborat izdelave topografskih načrtov Triglavskega ledenika v letih 1999 in 2001, Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana.
- Kozmus, K., Stopar, B., 2003. Način določanja položaja s satelitskimi tehnikami, Geodetski vestnik 47:4, pp. 404-413.
- Meze, D. 1955. Ledenik na Triglavu in kuti, Geografski zbornik 3, Ljubljana.
- Verbič, T., Gabrovec, M. 2002. Georadarske meritve na Triglavskem ledeniku, Geografski vestnik, 74-1, str. 25-42.
- Triglav, M. 2001. Določitev sprememb površja Triglavskega ledenika s fotogrametrijo, diplomsko delo, FGG, Ljubljana.
- Triglav-Čekada et al. 2011. Acquisition of the 3D boundary of the Triglav glacier from archived non-metric panoramic images, Photogrammetric Record, 26 (133), str. 111-129.

Geomorfometrične analize Marsa pri uporabi DMR-ja

Tomaž Podobnikar^{*}, Balázs Székely^{**}

Povzetek

Prispevek obravnava izbrane možnosti uporabe geomorfometričnih analiz pri uporabi digitalnega modela reliefa (DMR) planetov, konkretno Marsa. Primerjali smo geomorfološke značilnosti Marsa s tistimi na Zemlji ter ugotavljali možnosti za primerljivost ter parametrizacijo. Testirali smo štiri različne metode za iskanje geomorfoloških oblik na Marsu, s poudarkom na iskanju vršajev, in sicer: (1) metodo vizualizacije z različnimi tehnikami ter vizualno analizo v različnih merilih, (2) izdelavo naprednih spremenljivk na osnovi geomorfometričnih analiz DMR-ja ter klasifikacijo na z metodo ISOcluster, (3) uporabo več naprednih spremenljivk na osnovi geomorfometričnih analiz DMR-ja pri izdelavi odločitvenega modela vršajev in (4) robustno polkvantitativno klasifikacijo na osnovi segmentacije. Vse metode dajejo medsebojno primerljive rezultate. Nalogo smo izvajali na DMR-ju ločljivosti 50 m, ki je bil izdelan s pomočjo posnetkov kamere HRSC na satelitu Mars Express istoimenske misije Evropske vesoljske agencije (ESA).

Uvod

Pri geomorfoloških analizah si lahko pomagamo tako s kvalitativnimi pristopi kot tudi s kvantitativnimi, med katere spada geomorfometrija. Čeprav je bilo veliko geomorfometričnih metod razvitih že pred stoletji, se je geomorfometrija kot veja znanosti začela razvijati šele s praktično izvedbo digitalnega modela reliefa (DMR) (Miller in Laflamme, 1958).

Ena zanimivejših vej uporab DMR-ja so analize zemeljskega površja. Razvitih je večje število metod za klasifikacijo celotnega površja ali identifikacijo in opis izbranih značilnosti površja na podlagi analiz oblik, tekstur, različnih vrst kontekstov, v več merilih, na podlagi analiz izvedenih spremenljivk reliefa ipd. (Podobnikar, 2012). Raziskovalci se danes ukvarjajo predvsem z metodami za obdelavo viskoločljivostnih lidarskih podatkov, ki neposredno uporabljajo oblak zajetih točk (in ne DMR) ter temeljijo na integraciji podatkov in metod, na adaptivnih pristopih ipd. (Podobnikar, 2005, Podobnikar in Vrečko, 2012).

Z analizo površja lahko pri izključni uporabi DMR-ja (ali lidarskega oblaka točk) nadalje sklepamo na lastnosti in pojave, ki nimajo neposredne zveze s površjem. Sklepamo lahko npr. na izbrane lastnosti geološke sestave, geofizikalnih procesov in še na marsikatero naravne (in tudi družbeno-ekonomske) značilnosti. To dejstvo še posebej pripomore pri preučevanju planetov, lun (naravnih satelitov) ali asteroidov, ki jih zaenkrat dejansko ne moremo preučevati in situ, ampak le z metodami daljinskega zaznavanja.

Metodološko je pri tem pomembna zmožnost primerjave značilnosti površja, ki jih poznamo na Zemlji, s tistimi, ki jih preučujemo na izbranem planetu. Ne glede na to, da so fizične oz. geomorfološke lastnosti planetov različne zaradi različnih procesov pri njihovem razvoju, lahko v praksi najdemo veliko relativno podobnih značilnosti, ki pa se zagotovo razlikujejo v nekaterih podrobnostih. Geomorfološke/geomorfometrične analize

^{*} ZRC SAZU, Novi trg 2, SI-1000 Ljubljana in UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

^{**} Oddelek za geofiziko in vesoljske znanosti, Univerza Eötvös, Pázmány P. sétány 1/C, H-1117 Budimpešta, Madžarska in TU Dunaj, Inštitut za fotogrametrijo in daljinsko zaznavanje, Gußhausstraße 27–29, A-1040 Dunaj, Avstrija

planetov so torej raziskovalni izziv. Primer je preučevanje lastnosti planetov, s čimer bolje razumemo procese na posameznem planetu in obratno: razumevanje določenih značilnosti planetov lahko pomaga pri preučevanju pojavov na Zemlji.

V članku se osredotočamo na planet Mars. Razprava se začne s primerjavo geomorfoloških značilnosti Zemlje in Marsa. Nadaljuje se s predstavitvijo projekta Mars Express, v okviru katerega se izdeluje natančen DMR celotnega planeta. Razprava se zaključi s predstavitvijo raziskave iskanja vršajev pri uporabi DMR Marsa za izbrana testna območja.

Primerjava geomorfoloških značilnosti Zemlje in Marsa

V tem poglavju prikazujemo izbrane značilnosti, predvsem (areo)morfološke (Mars = Ares, Zemlja = Gea), tako na Zemlji kot na planetu Marsu. Slika 1 (a) prikazuje del največje doline v našem osončju, Valles Marineris na Marsu, z vršaji. Pokrajino, ki je zelo podobna tisti na Marsu, najdemo v puščavi Atacama. V prikazanem primeru (b) se dolina z vršaji zajeda v puščavsko pokrajino. Razlike v prikazanih primerih so predvsem v značilnostih primerljivih vršajev fine mivke, saj so tisti na Marsu praviloma položnejši.



a) b)
Slika 1 – Pokrajina z dolino: (a) območje v Vzhodni Candor Chasmi, Valles Marineris, Mars ($6^{\circ} 18' J$, $69^{\circ} 10' Z$) (HiRISE, NASA, 21.1.2008, Google Mars) in (b) podobna pokrajina v Atacami: dolina reke Lluta ($18^{\circ} 25' J$, $70^{\circ} 00' Z$) (fotografija: Podobnikar, 13. 11. 2009)

Naslednji primer prikazuje vulkanizem (Slika 2). Prikazan je največji vulkan v našem osončju, Olympus Mons (a), ki je visok 22 km, kaldera je velikosti 60 krat 80 km in globoka do 3,2 km. Celotna površina vulkana je bistveno večja od Slovenije. Povprečni naklon vulkana je le 5° . Glede na velikost planeta in dimenzije vulkana, z roba kaldere ne bi videli podnožja. Na Marsu je sicer še nekaj zelo velikih vulkanov, hkrati pa tudi mikro vulkanov dimenzij v rangu nekaj 100 m. Zemeljski vulkani so v primerjavi z vulkani istega tipa na Marsu precej manjši (b) ter drugih proporcev.

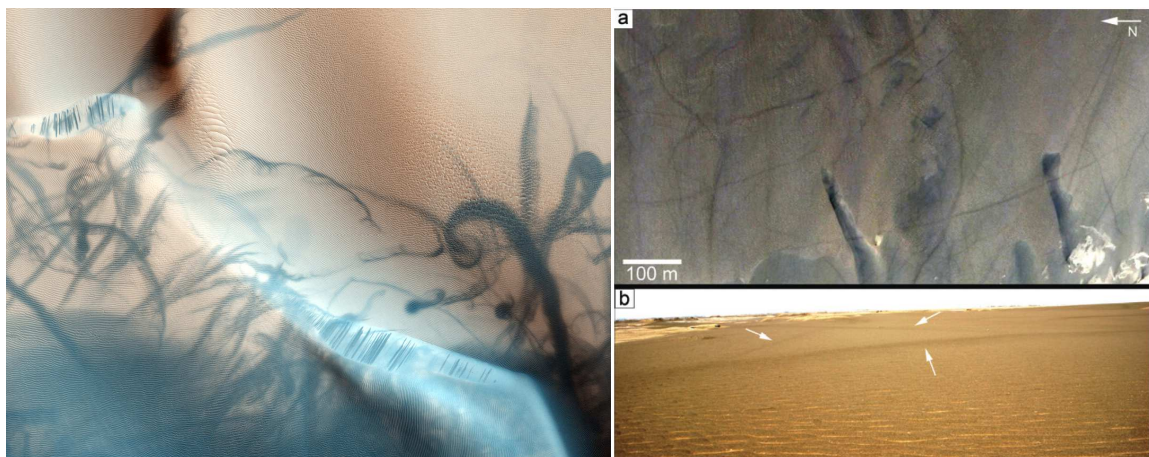


a)

b)

Slika 2 – Vulkani: (a) Olympus Mons, Mars ($18^{\circ} 15' S$, $133^{\circ} 15' Z$) (analitično senčen relief na osnovi vira: MOLA, NASA), (b) Pomerape in Cerro Prinacota, Atacama ($18^{\circ} 10' J$, $69^{\circ} 9' Z$) (fotografija: Podobnikar, 13. 11. 2009)

Naslednji primer (Slika 3) obravnava sledi, ki jih za sabo puščajo vrtinci puščavskega peska. Od daleč izgledajo kot dim, ki se lijakasto širi v višino. Nastajajo zaradi lokalnih anomalij temperature oz. zračnega tlaka pri segrevanju sonca. Taki vrtinci nastajajo na večjem delu Zemlje in tudi Marsa. Največji in najvidnejši so v peščenih puščavah na obeh planetih. Na Marsu že nekaj časa opažajo temne (redko tudi svetle) sledi, ki ostanejo za takimi vrtinci (a). Do pred kratkim je bil vzrok za nastanek sledi za vrtinci neznanka, poleg tega pa podobnega pojava niso opazili na Zemlji. Uganko je razrešila skupina z Reissom (b), ki je v puščavi Turpan, Kitajska (Grossman, 2011), ugotovila, da vrtinec odstrani zelo fino mivko, katere zrna so manjša od približno $60 \mu m$. Sledi vrtincev so našli tako na satelitskem posnetku kot pri terenskem pregledu. Te sledi so sicer precej manj izrazite kot tiste na Marsu. V opisanem primeru podobnega pojava na Zemlji verjetno še dolgo časa ne bi odkrili, če ne bi imeli očitnega zgleда na Marsu.



a)

b)

Slika 3 – Vrtinci puščavskega peska: (a) Mars ($26^{\circ} 40' S$, $62^{\circ} 50' V$) (HiRISE, NASA, 24. 8. 2009), (b) puščava Turpan, Kitajska ($42^{\circ} 40' S$, $89^{\circ} 50' V$) (Reiss et al. 2011, Quickbird 3. 4. 2005)

Primer pokrajine, za katero še niso našli odgovarjajoče na Zemlji, je t. i. geomorfološka oblika »švicarski sir«. Vzorci te pokrajine se spreminjajo (območja vboklin »rastejo« 1 do 3 m letno) in jih najdemo na južnem polu Marsa (Slika 4). Predvidevajo, da gre za sloje

zmrznjenega ogljikovega dioksida (CO₂) v debelini okoli 8 m in dimenzij nekaj sto metrov, ki ležijo na ledu vode (H₂O) (Byrne, 2002).



Slika 4 – Pokrajine na Marsu, za katere še niso odkrili primerljivih na Zemlji: primer za obliko z imenom »švicarski sir« v bližini južnega pola (HiRISE, 28. 8. 2007, NASA)

Poleg obravnavanih primerov je na planetu Mars še veliko drugih primerov geomorfoloških oblik in površinskih procesov, ki so relativno enostavno primerljivi s tistimi na Zemlji. Primeri tistih, ki so relativno dobro raziskani, so proženje plazov in nastajanje vršajev (v daljni preteklosti so jih oblikovale tudi reke), meteoritski kraterji (teh je na Zemlji vidnih le 182; Earth Impact Database, 2011), okamneli tokovi lave, klifi, puščavske eolsko oblikovane sipine ipd. Manj raziskani so gejzirji, črne črte (drug material pod plazovi prahu (?), voda (?), organizmi (?)) itd.

Pri raziskavah planeta Marsa s pomočjo senzorjev (tipal) daljinskega zaznavanja se soočamo z naslednjimi pomembnejšimi razlikami v primerjavi z opazovanji na Zemlji:

- atmosferski vplivi so na Marsu manjši kot na Zemlji [prednost]
- na Marsu ni vegetacije in (še zelo malo) antropogenih vplivov [prednost]
- površje Marsa je precej manj razgibano kot zemeljsko ter puščavsko [problem slikovnega ujemanja in s tem položajne natančnosti prostorskih podatkov]
- površje Marsa je precej starejše od zemeljskega (predvsem posledica neizrazite tektonike, manj izrazite erozije, vulkanizma, procesov poledenitve ipd.), kar se odraža npr. tudi v tem, da je na Marsu vidnih veliko meteoritskih kraterjev [proces spreminjanja površja lahko spremljamo dlje v preteklost]

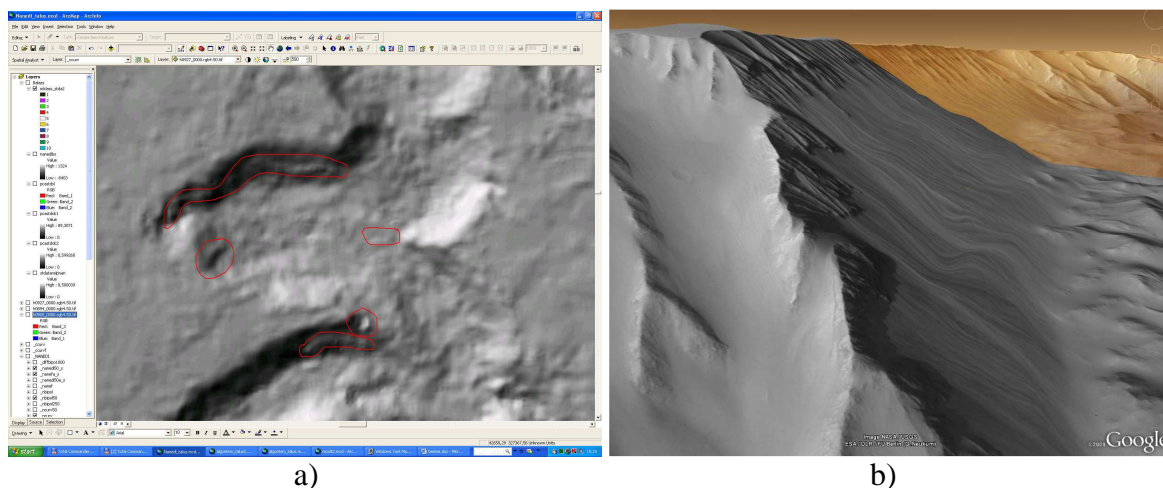
Projekt Mars Express in DMR planeta

Misija oz. odprava Evropske vesoljske agencije (ESA) Mars Express (2011) je dobila ime po umetnem satelitu, ki so ga izstrelili z Zemlje 2. 6. 2003. Satelit je v orbiti Marsa od 25. 12. 2003. Naziv »express« je misija dobila zato, ker je bila cenejša od primerljivih, poleg tega pa je bila njena izvedba relativno hitra. Misijo še vedno podaljšujejo, trenutno predvidevajo, da jo bodo zaključili leta 2014. Satelit ima maso 1120 kg in je opremljen z velikim številom instrumentov.

Za izdelavo DMR-ja je najpomembnejši instrument »High Resolution Stereo Camera« (HRSC) (Jaumann et al., 2007). Gre za kamero (fotografski aparat) dimenzij 515 x 300 x 260 mm, mase 20,4 kg, porabe 48,7 W, s 5 pankromatskimi in 4 barvnimi kanali (modri, zeleni, rdeči in NIR) t. i. »full colour«, s poljem vidnosti 11,9°, s senzorjem CDD 9 x 5272 pikslov (stereo kot $\pm 18,9^\circ$), z ločljivostjo 10 m/piksel (maksimalno 2 m), s širino signala 52,2 km (vsi podatki so izračunani glede na orbito 250 km višine). Kamera vsebuje tudi »Super Resolution Channel« (SRC). Izdelali so jo skupaj na DLR, FU Berlin in ESA. Gre torej za projekt Evropske vesoljske agencije s 43 raziskovalnimi skupinami iz 10 držav (brez Slovenije).

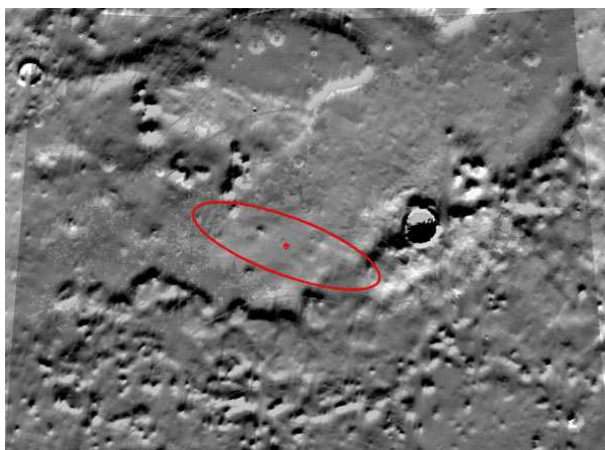
Izdelan je bil DMR z ločljivostjo 50 m in natančnostjo okoli 10 m (Heipke et al., 2007), ki je bil dodatno izboljševan (predvsem zaradi napak slikovnega ujemanja na geomorfološko neizraziti pokrajini, slabih kontrastov na večjih osvetljenih ali osenčenih površinah, ujemanja pasov in interpolacije ter s tem pojavljanja grobih napak, Slika 5). Problem je tudi različna ločljivost originalnih posnetkov, kar je posledica izrazito eliptične orbite satelita Mars Express. DMR je izdelan na osnovi stereoparov ter slikovnega ujemanja. Mars je v večjem delu pokrit z DMR-jem te ločljivosti, kar pomeni, da imamo za Mars kot celoto na voljo DMR večje ločljivosti kot za Zemljo.

Ob tem velja omeniti tudi druge DMR-je planeta Marsa. Trenutno najboljši DMR za celoten planet je bil izdelan s pomočjo instrumenta Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) (laserski višinomer) na satelitu Mars Global Surveyor (MGS), NASA (MOLA, 2007). MGS je bil izstreljen 7. 11. 1996, deloval je do leta 2001. Šlo je za misijo kartiranja Marsa v treh letih, ki pa je dejansko trajala štiri leta in pol. Prvi podatki so na voljo od leta 2000, končna različica pa od 7. 5. 2003. Ločljivost DMR-ja je 128 pikslov na kotno stopinjo ali pribl. 500 m na ekvatorju. Izboljšan DMR je izdelan na osnovi misije MOLA Mission Experiment Gridded Data Record (MEGDR) in je na voljo od leta 2003.



Slika 5 – (a) DMR HRSC in napake zaradi problemov slikovnega ujemanja na neizrazitem površju Nanedi Valles (7° S, 48° Z), (b) problem natančnosti DMR-ja MOLA na pobočju Zahodne Candor Chasme, Valles Marineris (6° J, 77° Z) – valovitost reliefa (Google Mars)

Najstarejši digitalni model celotnega Marsa je bil izdelan z digitalizacijo izohips topografskih kart Marsa v merilu 1 : 2.000.000 in interpolacijo v ločljivost 64 pikslov na kotno stopinjo. Najnatančnejši modeli Marsa so izdelani s pomočjo instrumenta »High Resolution Imaging Science Experiment« (HiRISE), NASA, na satelitu Mars Reconnaissance Orbiter, ki pa so le lokalni in so še posebej uporabni za natančen posnetek območij pristajanja satelitov (primer za Phoenix, Slika 6).



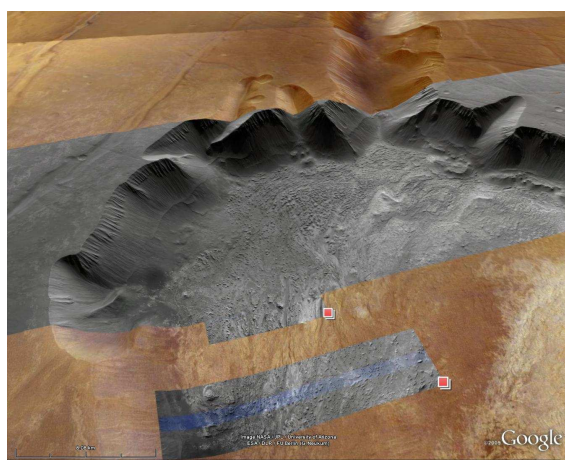
Slika 6 – DMR na osnovi HiRISE (68° S, 126° Z) (NASA, 24. 5. 2008)

Predstavitev raziskave iskanja vršajev pri uporabi DMR-ja Marsa

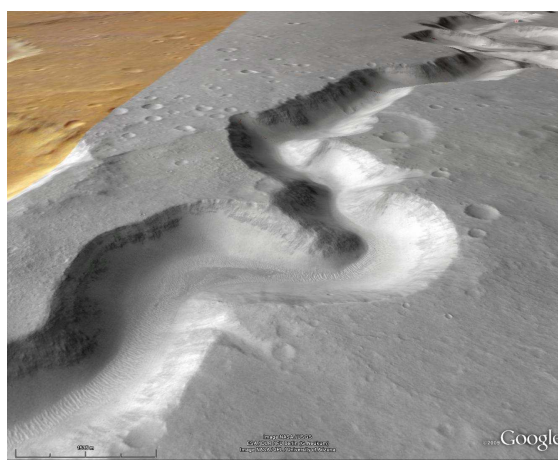
Nestabilna pobočja dolin so pogosto pokrita z vršaji (z grušči ali s podžlebnimi melišči) (Podobnikar in Székely, 2008). Geomorfološka oblika različnih tipov vršajev je določena z materialom (gradivom), ki ga sestavlja (pogosto gre za slabo razvrščen material). Oblika vršajev na Marsu je pogojena glede na Zemlji različne okoljske pogoje: manjša gravitacija (pribl. 38 % zemeljske), (danes) pomanjkanje fluvialne erozije, več prostega materiala (pogosto vetrnih nanosov), in značilna velika območja pobočij – kar pomeni, da so vršaji pomembne morfološke značilnosti na Marsu.

Cilj raziskave je izključna uporaba DMR-ja. Prednosti uporabe DMR-ja v primerjavi s posnetki daljinskega zaznavanja so (Székely in Podobnikar, 2009): (i) popolna kontrola procesiranja, saj zanemarimo položaj sonca, vremenske in atmosferske pogoje, (ii) možnost relativno enostavnega spreminjanja merila in (iii) možnost kombiniranja različnih metod. Pomanjkljivosti so: nizka stopnja določanja detajlov (predvsem za Mars) in možnost pojavljanja grobih napak na DMR-ju.

Izvedli smo raziskavo iskanja vršajev na različnih območjih planeta Marsa. Uporabljali smo omenjeni DMR HRSC ločljivosti 50 m. Slika 7 prikazuje pomembnejši testni območji (a) Zahodna Candor Chasma in (b) Nanedi Valles.



a)



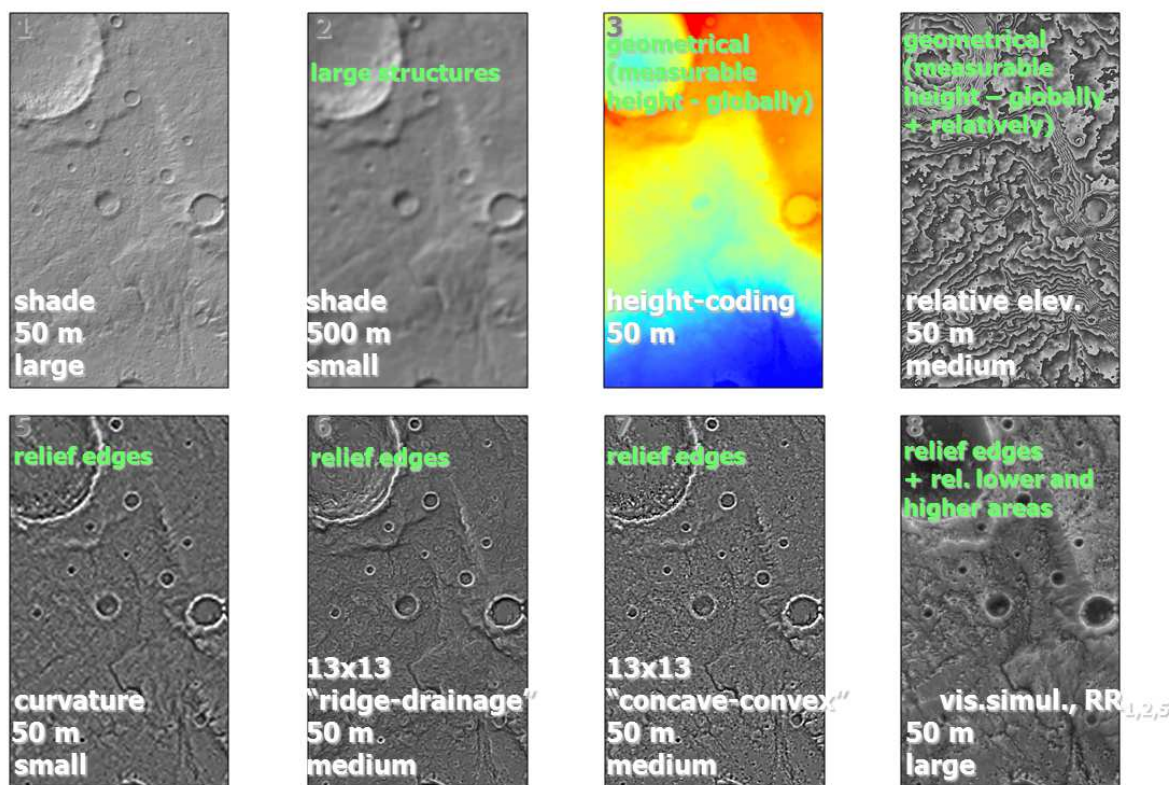
b)

Slika 7 – Testni območji za identifikacijo vršajev: (a) Zahodna Candor Chasma (6° J, 77° Z), (b) Nanedi Valles (7° S, 48° Z). Območja potencialnih vršajev so vidna kot gladke površine na pobočjih.

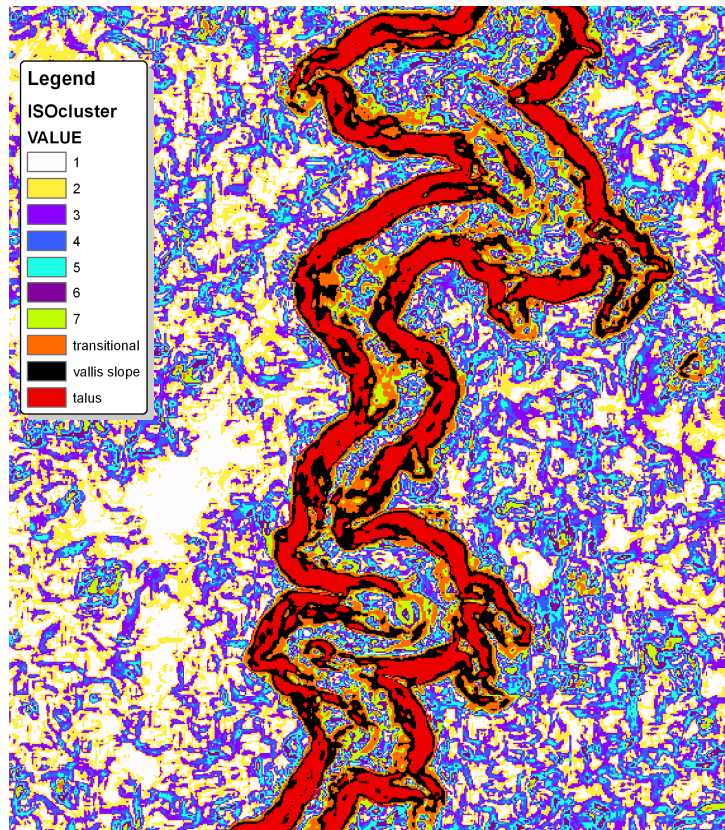
V vseh primerih smo delali vzporedne analize s primerljivimi območji na Zemlji, predvsem na območju Slovenije in Avstrije (Székely in Podobnikar, 2008). Analize so predvsem primerjale podobne geomorfološke oblike, podatke ter posledično parametre analiz. Pri analizah smo testirali tudi različno programsko opremo. V nadaljevanju navajamo štiri napredne tehnike ter rezultate, in sicer:

- metoda vizualizacije z različnimi tehnikami ter vizualna analiza (v različnih merilih) (Podobnikar in Dorninger, 2007, Slika 8),
- izdelava naprednih spremenljivk na osnovi geomorfometričnih analiz DMR-ja ter klasifikacija na osnovi ISOcluster (Székely et al., 2002; Székely in Podobnikar, 2009, Slika 9),
- uporaba več naprednih spremenljivk na osnovi geomorfometričnih analiz DMR-ja pri izdelavi odločitvenega modela vršajev (Székely in Podobnikar, 2009, Slika 10),
- robustna polkvantitativna klasifikacija na osnovi segmentacije (Székely et al., 2011, Slika 11).

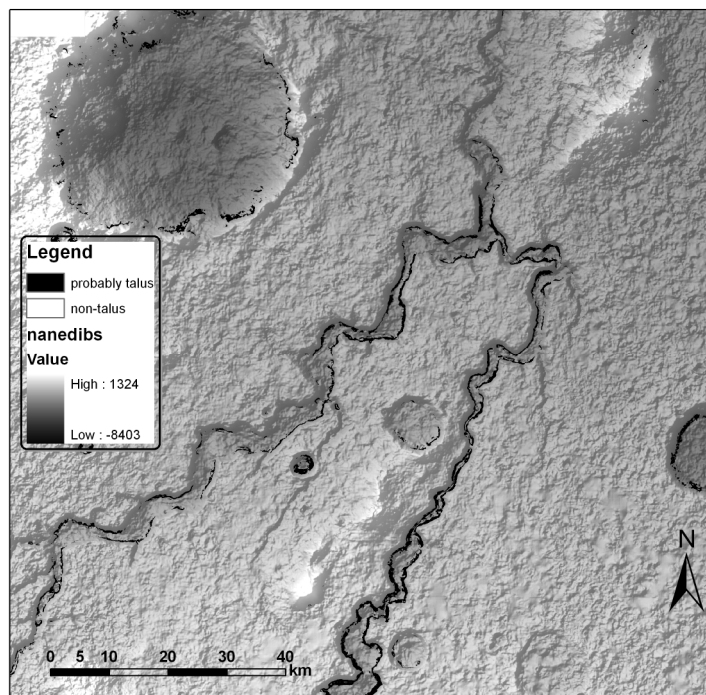
Vse tehnike so podrobneje opisane v navedenih publikacijah, v tej predstavitvi pa so rezultati prikazani le s slikami rezultatov. Navedene tehnike upoštevajo tako kvalitativne kot kvantitativne pristope.



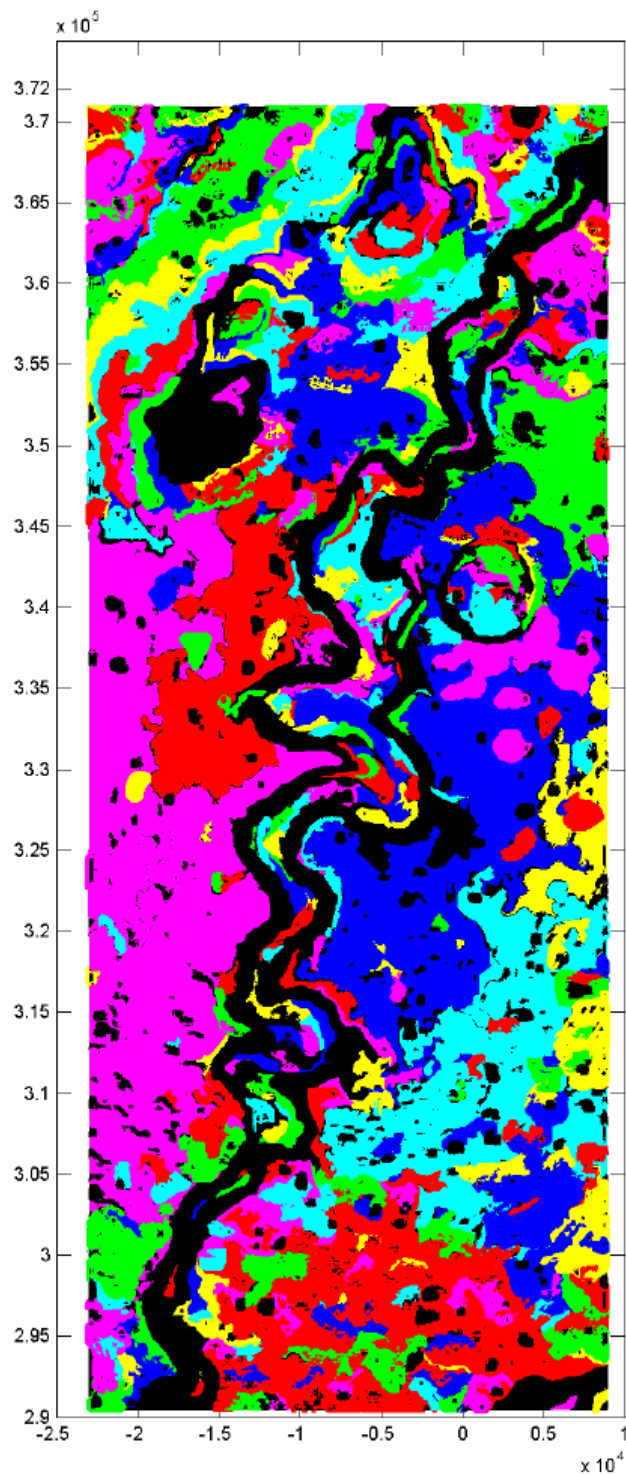
Slika 8 – Vizualizacija geomorfoloških oblik ter vizualna analiza (Thaumasia Fossae, DMR HRSC, orbita 266, 43° J, 95° Z)



Slika 9 – Klasifikacija na osnovi metode ISOcluster. Površina vršajev je označena z rdečo. Na območju med rdečima pasovoma je dolina (vallis), Nanedi Valles (DMR HRSC, orbita 1235, 7° S, 48° Z).



Slika 10 – Izdelava potencialne ploskve vršajev na osnovi odločitvenega modela. Temnejši odtonek pomeni večji potencial za pojavljanje vršajev, Nanedi Valles (DMR HRSC, orbita 1235, 7° S, 48° Z).



Slika 11 – Robustna polkvantitativna klasifikacija na osnovi segmentacije. Črna barva predstavlja potencialna območja vršajev, Nanedi Valles (DMR HRSC, orbita 1235, 7° S, 48° Z).

Zaključki

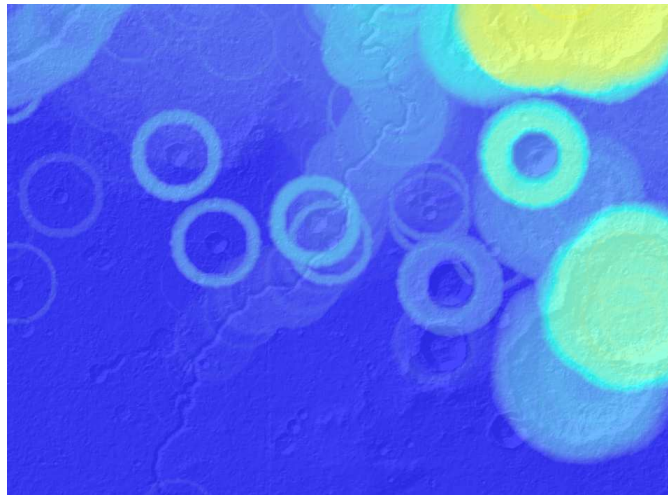
V razpravi smo primerjali izbrane geomorfološke značilnosti Marsa s tistimi na Zemlji ter ugotavljali možnosti za primerljivost ter parametrizacijo. Osredotočili smo se na sloj

DMR-ja, in sicer izdelanega na osnovi satelitskih posnetkov kamere HRSC, ki deluje v projektu Mars Express.

Primerjalno smo uvedli štiri različne razvite metode za iskanje geomorfoloških oblik na Marsu, s poudarkom na iskanju vršajev. Vse metode dajejo primerljive rezultate, in sicer na podlagi rezultatov medsebojne primerjave in primerjave s podatki Google Mars. Dosedanja primerjava je temeljila na enostavnem prekrivanju rezultatov in osnovni statistični primerjavi ter na metodah vizualne primerjave (Podobnikar, 2009).

Metode in rezultate kvalitativnih in kvantitativnih analiz bo možno v naslednji fazi raziskav na več načinov analizirati in jih integrirati v natančnejše rezultate, npr. Podobnikar (2005), Podobnikar in Vrečko (2012). Nadalje je možno delati na metodah, ki že v osnovi sinergijsko kombinirajo možnost kvantitativnega in kvalitativnega pristopa analiz. Primer je analiza kraterjev na Marsu z izdelavo slojev, ki hkrati omogočajo vizualno ovrednotenje dimenzij kraterjev ter numerično ovrednotenje rezultatov (premer in globina kraterja) – geomorfometrični način (Slika 12).

Rezultati študije se lahko npr. posredno uporabljajo za izboljšavo kakovosti DMR-ja ali pa za izdelavo kart Marsa.



Slika 12 – Spremenljivka za vizualno identifikacijo in merjenje kraterjev

Zahvala: Raziskovalno nalogo je omogočila Avstrijska agencija za promocijo znanosti (FFG) v sestavu Programa avstrijskih vesoljskih aplikacij (ALR-OEWP-CO-413/07) in njihovih raziskovalnih projektov TMIS, TMIS+ in TMIS-morph (TMIS = Topographic Mars Information System) v okviru programa ASAP.

Literatura

- Byrne, S., Ingersoll, A. P., 2002. A Sublimation Model for the Formation of the Martian Polar Swiss-cheese Features. *American Astronomical Society (American Astronomical Society) 34*, 837.
- Earth Impact Database, 2011. University of New Brunswick, <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase>.
- Grossman, L., 2011. Mars Dust-Devil Mystery Solved on Earth. *Wired Science*.
- HiRISE, NASA/JPL/University of Arizona.
- Heipke, C., Oberst, J., Albertz, J., Attwenger, M., Dorninger, P., Dorrer, E., Ewe, M., Gehrke, S., Gwinner, K., Hirschmüller, H., Kim, J. R., Kirk, R. L., Mayer, H., Muller, J.-P., Rengarajan, R., Rentsch, M., Schmidt, R., Scholten, F., Shan, J., Spiegel, M., Wählisch, M., Neukum, G. in

- HRSC Co-Investigator Team, 2007. Evaluating planetary digital terrain models — The HRSC DTM test. *Planetary and Space Science* 55(14), 2173-2191.
- Jaumann, R., Neukum, G., Behnke, T., Flohrer, J., van Gasselt, S., Giese, B., Gwinner, K., Hauber, E., Hoffmann, H., Köhler, U., Matz, K.-D., Mertens, V., Pischel, R., Roatsch, T., Reiss, D., Scholten, F., Stephan, K., Oberst, J., Saiger, P., Schwarz, G., Wählisch, M., 2007. The High Resolution Stereo Camera (HRSC) experiment on Mars Express: instrument aspects from interplanetary cruise through nominal mission. *Planetary and Space Science*, 55(7-8), 928-952.
- Miller, C. L. Laflamme, R. A., 1958. *The Digital Terrain Model-Theory & Application*. MIT Photogrammetry Laboratory.
- Mars Express, 2011. ESA Mars Express, http://www.esa.int/esaMI/Mars_Express/
- MOLA, 2007. Mars Orbiter Laser Altimeter, or MOLA, <http://mola.gsfc.nasa.gov/>
- Podobnikar, T., 2005. Production of integrated digital terrain model from multiple datasets of different quality. *International journal of geographical information science*, 19(1), 69-89.
- Podobnikar, T., Dorninger, P., 2007. Enhanced visualisation of Mars surface features from HRSC DTM. V: European Mars Science & Exploration Conference, Mars Express and ExoMars, 12.-16. 11. 2007, Noordwijk: ESTEC.
- Podobnikar, T., Székely, B., 2008. Poskus analize potencialno nevarnih vršajev z DMR-jem. V: Perko, D., Zorn, M., Razpotnik Visković, N., Čeh, M., Hladnik, D., Krevs, M., Podobnikar, T., Repe, B., Šumrada, R. (ur.). *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008*, (GIS v Sloveniji, 9). Ljubljana: Založba ZRC, 73-81.
- Podobnikar, T., 2009. Methods for visual quality assessment of a digital terrain model. *S.A.P.I.E.N.S. Special Issue 2* (2), 15-24. <http://sapiens.revues.org/index738.html>.
- Podobnikar, T., 2012. Detecting Mountain Peaks and Delineating their Shapes using Digital Elevation Models, Remote Sensing, and Geographic Information Systems using Autometric Methodological Procedures. *Remote Sensing* (sprejeto).
- Podobnikar, T., Vrečko, A., 2012. Processing of a point cloud for a geomorphologically high quality DEM. *Transactions in GIS* (sprejeto).
- Reiss, D., Raack, J., Rossi, A. P., 2011. Formation of dark dust devil tracks in the Turpan Desert (China): comparison with Mars, 42nd Lunar and Planetary Science Conference, Texas, ZDA.
- Székely, B., Reinecker, J., Dunkl, I., Frisch, W., Kuhleemann, J., 2002. Neotectonic movements and their geomorphic response as reflected in surface parameters and stress patterns in the Eastern Alps. *EGU Stephan Mueller Special Publication Series*, 3, 149-166.
- Székely, B., Podobnikar, T., 2008. An attempt for automatic detection and visualization of talus cones from digital elevation data. V: Konečný, M., Bandrova, T. (ur.), *Second International Conference on Cartography & GIS, Proceedings 2*, Borovec, Bolgarija, 151-159.
- Székely, B., Podobnikar, T., 2009. A method for automated extraction of Martian talus slopes – case studies of Nandedi Valles and West Candor Chasma, Mars. V: Purves, R., Gruber, S., Straumann, R., Hengl, T. (ur.). *Geomorphometry*. Zürich: Department of Geography, University of Zürich, str. 202-207.
- Székely, B., Dorninger, P., Jansa, J., Podobnikar, T., Koma, Z., Trosits, D., Verebéli-Dósa, M., 2011. Martian and Terrestrial debris slopes: Automated recognition attempts using a multi-method approach. *Geophys. res. abstr.*, EGU2011-13467-1.

Spremljanje temperature zraka in CO₂ v Postojnskem jamskem sistemu ob povečanem številu obiskovalcev

Mitja Prelovšek*, Stanka Šebela* in Janez Turk**

Povzetek

Ob povečanem številu obiskovalcev v Postojnski jami smo poleg rednega letnega klimatskega monitoringa opravili še dodatno študijo spremljanja temperature zraka in CO₂ na izbranih mestih. Večje število obiskovalcev v času praznikov ali prireditve dvigne temperaturo zraka tudi za 0,55 °C, kot je primer iz Koncertne dvorane. Tudi povišane vrednosti CO₂ za 800 – 1100 ppm je potrebno pripisati antropogenemu vnosu CO₂ ob povečanih obiskih. Ker je Postojnska jama naravna vrednota državnega pomena, je glede na aktualno letno število obiskovalcev (500.000) potrebno redno spremljanje in preverjanje trajnostne rabe jame kot naravne vrednote.

Uvod

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 2009 izvajamo redni monitoring jamske klime na izbranih lokacijah.

V zimskem režimu Postojnske jame mrzel zrak prodira v jamo skozi večje vhode. Zrak se v jami segreje, postane lažji in se dviga proti površju skozi višje vhode ali številne razpoke. V poletnem režimu je zračna cirkulacija obrnjena, hladnejši zrak izstopa iz Postojnskega jamskega sistema skozi spodnje vhode (Gabrovšek in Mihevc, 2009).

Analiza (10 in 15 min) podatkov temperature zraka (od 12. 8. 2009 do 12. 8. 2010) na treh izbranih lokacijah v Postojnskem jamskem sistemu je pokazala, da je temperatura zraka najvišja na Veliki gori, ki od treh merilnih mest leži na najvišji nadmorski višini. Povprečna letna temperatura tu znaša 11,10 °C. V Lepih jamah, kjer je merilna točka 37 m nižje od Velike gore, se temperatura zraka močno razlikuje od razmer na Veliki gori. Tu je povprečna letna temperatura 10,30 °C, sezonsko gibanje temperature zraka je tu obratno kot na Veliki gori, kjer opazimo značilno sezonsko temperaturno gibanje. Zrak na Veliki gori se jeseni in pozimi počasi ohlaja, spomladi in poleti pa lahko opazujemo počasno segrevanje. Temperaturna nihanja v Lepih jamah so povezana z dotokom vetra iz neznanega ozadja (bodisi dihalnikov v povezavi s površjem ali iz neznanih jamskih rovov) ter z mešanjem različnih zračnih gnot, predvsem v zimskem času (Šebela in Turk, 2011).

Najbolj obiskano kraško jamo v Sloveniji obiše letno okrog 500.000 obiskovalcev. Zato smo v obdobjih povečanih obiskov opravili analizo primerjave koncentracije CO₂ in temperature zraka na različnih lokacijah (Velika gora, Lepe jame in Koncertna dvorana). Analize so osnova za razumevanje vpliva rabe naravne vrednote in za njeno trajnostno rabo (Gabrovšek et al., 2011; Šebela, 2011).

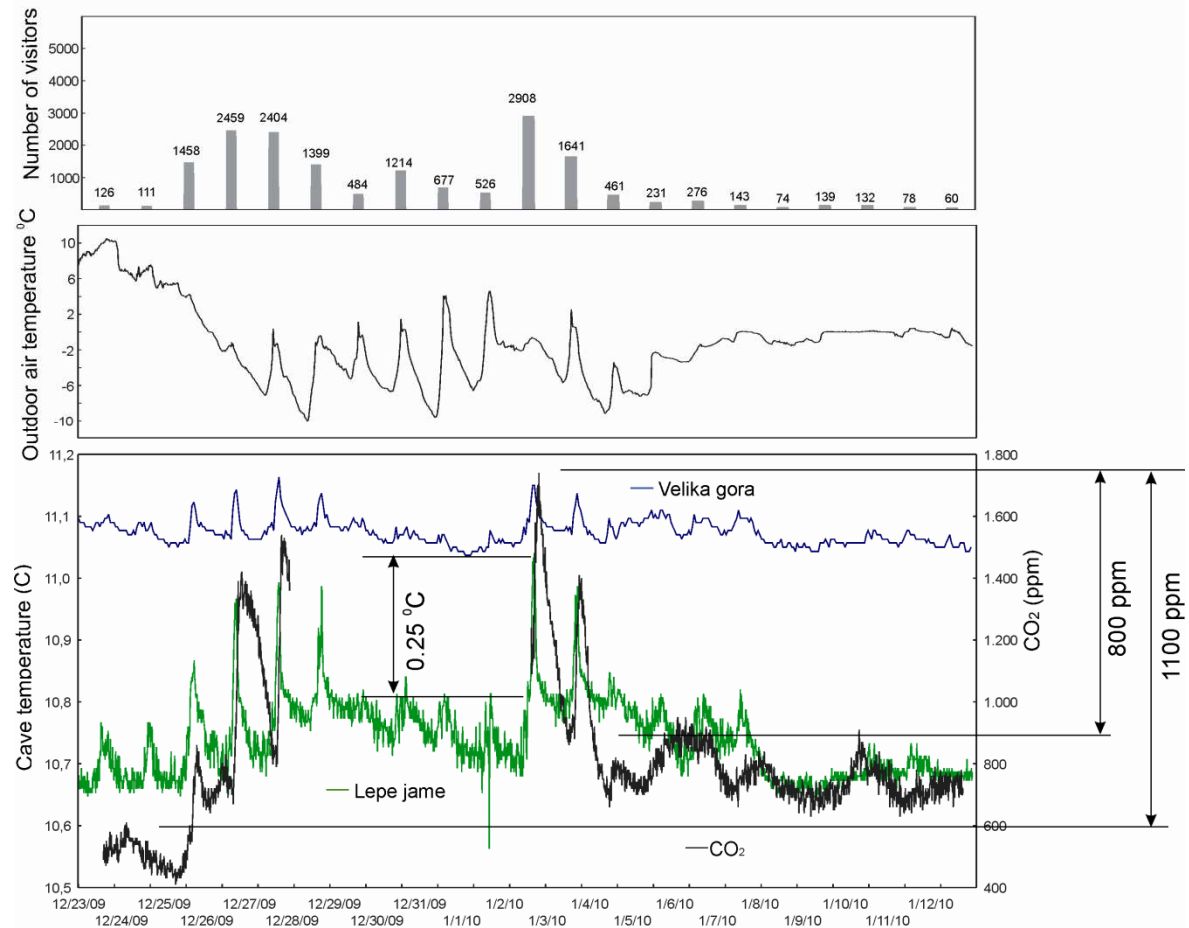
Ob povečanih obiskih smo v jami zaznali povečanje temperature zraka in povišane vrednosti CO₂ v zraku (Šebela et al., 2011).

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

** Lunačka 4, SI-1000, Ljubljana

Rezultati meritev temperature zraka in CO₂

Temperaturo zraka smo v obdobju 2009 – 2011 v 10 in 15-minutnih intervalih redno merili na dveh točkah v Postojnski jami (Velika gora in Lepe jame). Dodatno mesto opazovanja smo v analize vključili v februarju 2011, in sicer v Koncertni dvorani.



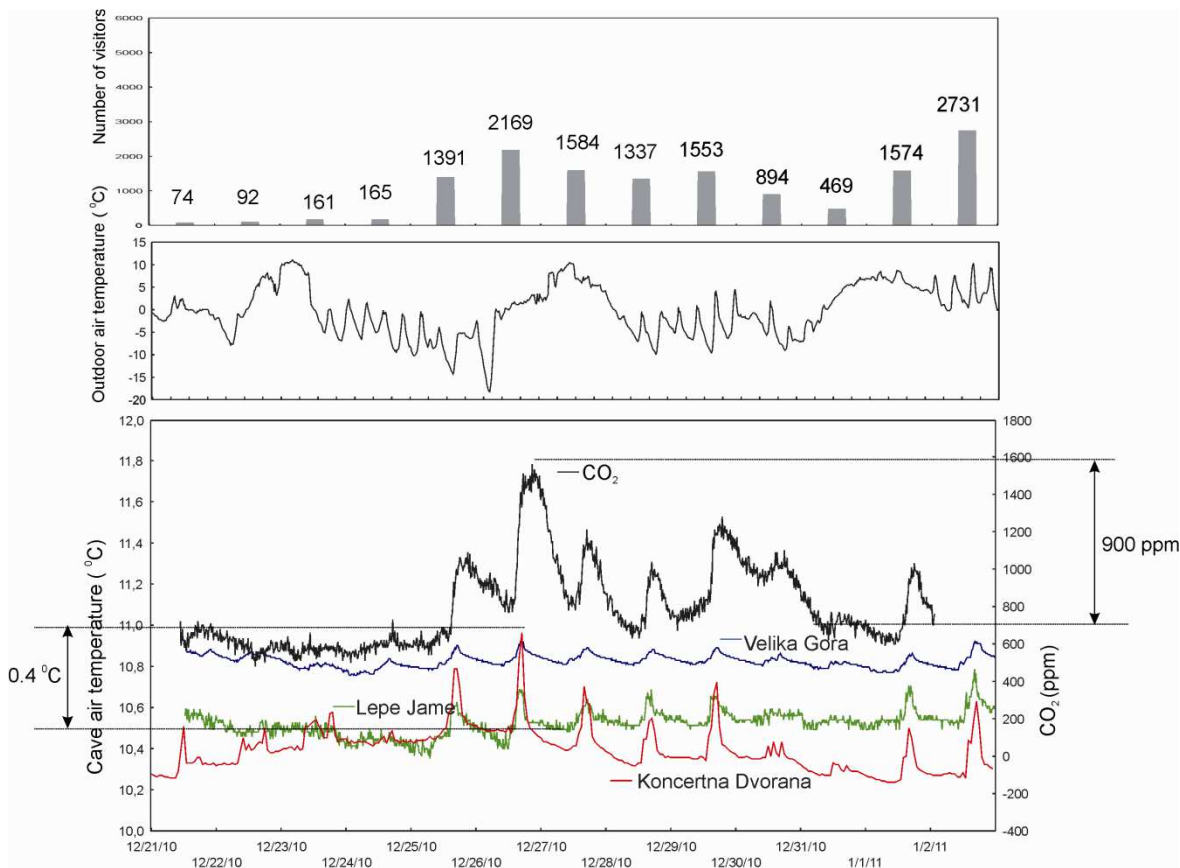
Slika 1 - Temperatura zraka v Postojnski jami na dveh točkah (Velika gora in Lepe jame), koncentracija CO₂ v Lepih jamah, zunanja temperatura v °C in dnevno število obiskovalcev v obdobju od 23. 12. 2009 do 13. 1. 2010

Petnajstminutno koncentracijo CO₂ smo merili na eni lokaciji, in sicer v Lepih jamah. Opazovana točka na Veliki gori je od turistične poti oddaljena okrog 50 m in leži na nadmorski višini 561 m. V Lepih jamah so instrumenti postavljeni na nadmorski višini 524 m in so od turistične poti oddaljeni okrog 4 m. V Koncertni dvorani je opazovano mesto na nadmorski višini 527 m in je od turistične poti oddaljeno le 1 m.

Kot najbolj značilne primere dviga temperature zraka in vsebnosti CO₂ smo izbrali tri obdobja (Božič–Novo leto 2009–2010; Božič–Novo leto 2010–2011; Kulturni praznik – 8. 2. 2011). To so tudi obdobja, ko se število obiskovalcev najbolj dvigne glede na sicer slabo – zimsko-turistično obdobje leta.

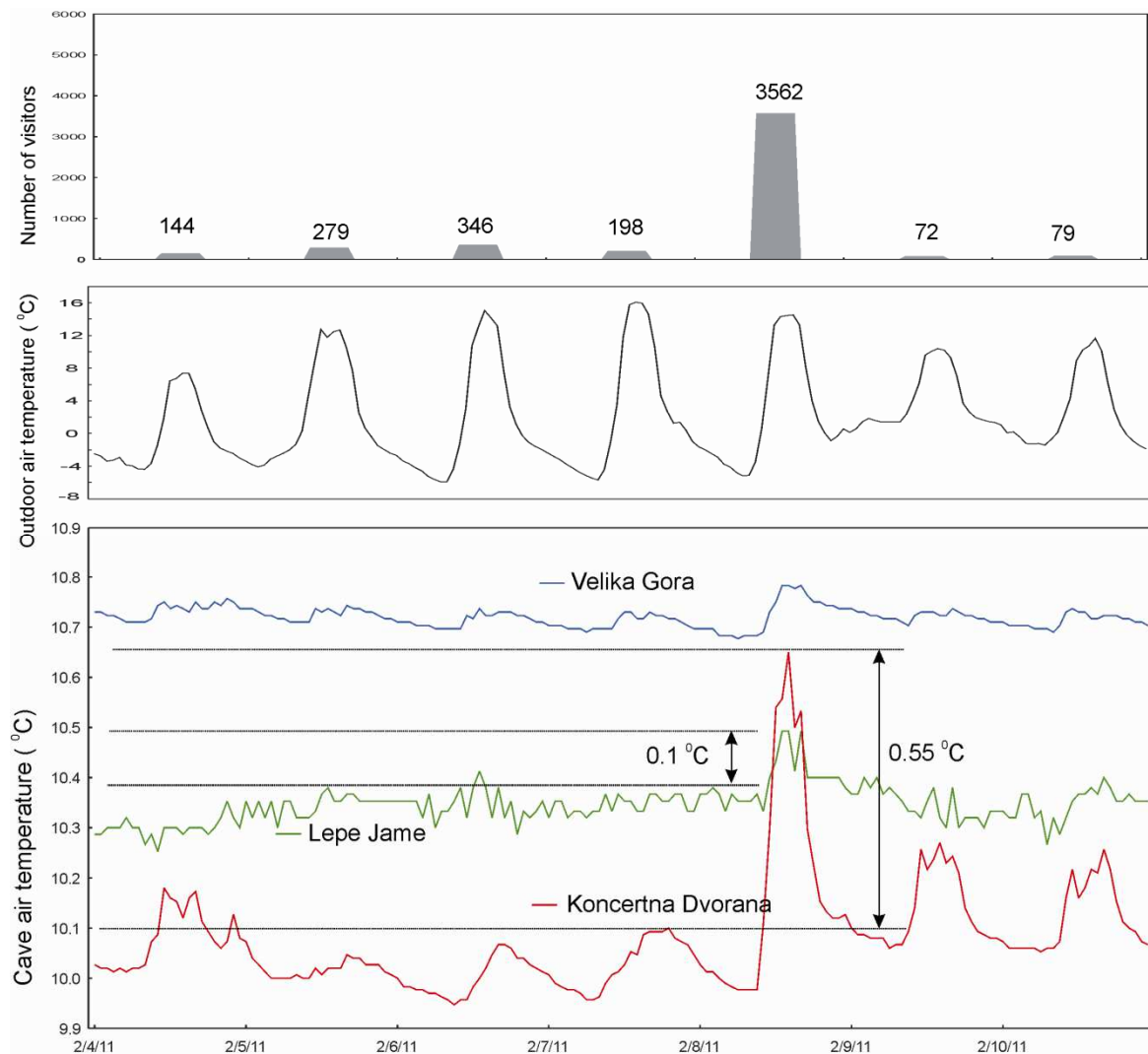
Na Veliki gori, ki je največja (240.000 m³) podorna dvorana v tem jamskem sistemu, so temperaturna nihanja ob povečanih obiskih minimalna (Slike 1, 2 in 3). Opaznejše

spremembe so v Lepih jamah, kjer je instrument za merjenje temperature bližje turistični poti kot npr. na Veliki gori. Dvig temperature zaradi povečanega obiska se najbolj opazi v Koncertni dvorani (Sliki 2 in 3). Čeprav je tudi Koncertna dvorana večja podorna dvorana (150.000 m³), pa je treba poudariti, da instrument leži v bolj izoliranem robu dvorane v neposredni bližini vstopa obiskovalcev na podzemeljski turistični vlak, torej na mestu, kjer se obiskovalci zadržijo v skupini nekaj minut, ker čakajo na vkrcanje na vlak. Ob upoštevanju teh dejstev je tudi najvišji temperaturni dvig bolj razumljiv.



Slika 2 - Temperatura zraka v Postojnski jami na treh točkah (Velika gora, Lepe jame in Koncertna dvorana), koncentracija CO₂ v Lepih jamah, zunanja temperatura v °C in dnevno število obiskovalcev v obdobju od 21. 12. 2010 do 3. 1. 2011

V obdobju Božič–Novo leto 2009–2010 se je v Lepih jamah temperatura zraka dvignila za 0,25 °C, ko je število obiskovalcev naraslo s 526 na 2908 na dan (Slika 1). Koncentracija CO₂ v Lepih jamah je v obdobju od 25. 12. 2009 do 3. 1. 2010 narasla za 1100 ppm (od 600 do 1700 ppm). Po maksimalnem številu obiskovalcev na dan (2908) so se vrednosti CO₂ v dveh dneh spustile za 800 ppm (od 1700 do 900 ppm), tako kot se je znižalo tudi število obiskovalcev, in sicer na okrog 200–400 na dan. Vrednosti CO₂ so po prvih dneh januarja 2010 ostale za okrog 150–200 ppm višje kot pred 25. 12. 2009, temperatura zraka pa se je vrnila na stanje pred Božičem 2009. Povišane vrednosti CO₂ in temperature zraka je potrebno pripisati antropogenemu vplivu na jamsko klimo.



Slika 3 - Temperatura zraka v Postojnski jami na treh točkah (Velika gora, Lepe jame in Koncertna dvorana), zunanja temperatura v °C in dnevno število obiskovalcev v obdobju od 4. 2. 2011 do 11. 2. 2011

Čez eno leto (Božič– Novo leto 2010–2011) smo dodali tudi meritve temperature zraka v Koncertni dvorani (Slika 2). Pokazalo se je, da se je temperatura v tej dvorani dvignila kar za 0,4 °C. Število obiskovalcev je naraslo z okrog 160 na 2100 na dan.

CO₂ je kazal podobno gibanje kot v obdobju 2009–2010. V decembru 2010 so bile vrednosti CO₂ pred povečanimi obiski v jami okrog 700 ppm. Najvišje vrednosti so bile 27. 12. 2010, ko so dosegle 1600 ppm, kar ustreza številu 2169 obiskovalcev na dan. Z upadom števila obiskovalcev so se znižale tudi vrednosti CO₂.

Tretji primer je slovenski kulturni praznik 8. 2. 2011 (Slika 3). V enem dnevu se je število obiskovalcev s 198 povzpelo na 3562 in se nato znižalo na 72 obiskovalcev na dan. V Lepih jamah smo zaznali dvig temperature za 0,1 °C, v Koncertni dvorani pa za 0,55 °C, kar je maksimalni dvig temperature, ki smo ga zaznali zaradi močno povečanega obiska.

Zaključek

Postojnski jamski sistem je najdaljša (20.570 m) in najbolj obiskana (približno 500.000 obiskovalcev na leto) kraška jama v Sloveniji. Gre za naravno vrednoto državnega pomena, zato je potrebno zagotavljati trajnostni razvoj rabe jame kot naravne vrednote.

V letu 2011 je Postojnska jama sprejela 34. milijontega obiskovalca od začetka modernega turizma leta 1818. Največ obiskovalcev je jamo obiskalo leta 1985, in sicer 940.000.

Spremljanje temperature zraka in vrednosti CO₂ v obdobju povečanih obiskov v jami je pokazalo naslednje rezultate:

- Dvig temperature zraka in vrednosti CO₂ je povezan s povečanim številom obiskovalcev.
- Oba parametra (T in CO₂) se po upadu števila obiskovalcev povrneta na prvotno stanje. Dvig vrednosti CO₂ za 150–200 ppm pa smo tudi po znižanju števila obiskovalcev opazili pozimi 2009–2010 (Slika 1). Postojnska jama je izpostavljena vplivom zunanjih klimatskih razmer, saj je glavni vhod v jamo umetno odkopan od leta 1866 in je dovolj velika odprtina za izmenjavo zunanjih in jamskih zračnih gnot daleč v notranjost jame. Jama je dobro prezračena, zato se tudi povišane vrednosti (T in CO₂) hitro povrnejo v vrednosti pred povečanimi obiski.
- Vpliv turizma na jamsko mikroklimo je večji pozimi kot poleti.
- Dvig temperature zraka zaradi povečanega števila obiskovalcev na Veliki gori in v Lepih jamah je nižji, kot so letna nihanja temperature na teh dveh lokacijah.

Poleg spremljanja temperature zraka in CO₂ je raziskavo potrebno usmeriti tudi v razumevanje vpliva rasti lampenflore zaradi povečanja števila obiskovalcev, v ogroženost jamske favne, v določitev stopnje raztapljanja/izločanja sige glede na povišan vnos antropogenega CO₂ v jamo, v analizo kvalitete zraka zaradi povečanega obiska, v mikrobiološko analizo vnosa delcev, ki prihajajo v jamo z obiskovalci itd. Le tako bo možno zanesljivo ovrednotiti mejne vrednosti števila obiskovalcev, ki jih Postojnska jama lahko sprejme, ne da bi ogrozili trajnostno rabo jame kot naravne vrednote.

Literatura

- Gabrovšek, F. in Mihevc, A. 2009. Cave climate. 17th international karstological school "Classical Karst", 15-20th June 2009, Guide book & Abstracts, 15-17, Postojna.
- Gabrovšek, F., Knez, M., Kogovšek, J., Mihevc, A., Mulec, J., Perne, M., Petrič, M., Pipan, T., Prelovšek, M., Slabe, T., Šebela, S. in Ravbar, N. 2011. Development challenges in karst regions: sustainable land use planning in the karst of Slovenia. Carbonates and Evaporites 26, 365-380, Wien, New York.
- Šebela, S. 2011. Expert control and recommendations for management of Postojnska jama, climatic and biological monitoring. V: Prelovšek, M. in Zupan Hajna, N. (ur) Pressures and Protection of the Underground Karst – Cases from Slovenia and Croatia, ZRC SAZU, 74-82, Postojna.
- Šebela, S. in Turk, J. 2011. Local characteristics of Postojna Cave climate, air temperature, and pressure monitoring. Theoretical and Applied Climatology 105/3-4, 371-386, Wien, New York.
- Šebela, S., Turk, J. in Prelovšek, M. 2011. The influence of tourist visits on microclimate in the Postojnska jama cave system. V: Gostinčar, P., Häuselmann, P., Prelovšek, M. in Zupan Hajna, N. (ur) 19. Mednarodna krasoslovna šola »Klasični Kras«, Varovanje podzemnega krasa, Splošne informacije, program, ekskurzije, povzetki predstavitev, Postojna, 20.-25. junij 2011, ZRC SAZU, 72-73, Postojna.

Idejni projekt za kombinirano geodetsko mrežo ničtega reda

Sandi Berk¹, Katja Bajec², Dominik Fajdiga³, Dalibor Radovan⁴,
Žarko Komadina⁵, Klemen Medved⁶, Tomaž Ambrožič⁷, Božo Koler⁸, Miran Kuhar⁹,
Polona Pavlovčič Prešeren¹⁰, Simona Savšek¹¹, Oskar Sterle¹² in Bojan Stopar¹³

Povzetek

Predstavljen je idejni projekt kombinirane geodetske mreže Slovenije. Kombinirana geodetska mreža omogoča združitev treh stebrov geodezije, ki obsegajo geokinematiko, težnost in rotacijo Zemlje. Na državnem nivoju bo pomenila kakovostni temelj sodobne geoinformacijske infrastrukture. Namenjena bo povezavi in zavarovanju obstoječih državnih geodetskih referenčnih ogrodij, ki se zaradi specifičnih zahtev različnih geodetskih merskih tehnik delijo na klasične terestrične, nivelmanske, gravimetrične in GNSS-mreže. Te med seboj niso fizično povezane. Permanentne in ponavljajoče se meritve na točkah kombinirane geodetske mreže omogočajo modeliranje časovno odvisnih sprememb, kar je nujno za vzdrževanje kakovosti državnega geodetskega referenčnega sistema na dolgi rok. Takšno omrežje ponuja tudi dodatne možnosti interdisciplinarnih raziskav.

Uvod

V zadnjih dveh desetletjih se geodetska znanost in stroka soočata z dramatičnim izboljšanjem kakovosti in operativnosti geometrične določitve položaja, zahvaljujoč predvsem satelitskim tehnologijam. GNSS nadomešča klasične merske tehnologije določitve položaja v znanstvenih in praktičnih aplikacijah. V nasprotju s tem pa ni bilo podobnega napredka pri nalogah določitve in modeliranja težnostnega polja Zemlje vse do pojava novih satelitskih misij v zadnjih petih letih.

Podatki, pridobljeni iz satelitskih misij, namenjeni raziskovanju težnostnega polja Zemlje, kot so CHAMP, GRACE in GOCE, glej npr. (Rummel, 2011), v kombinaciji s ponovljenimi absolutnimi meritvami težnega pospeška omogočajo, da se ta razkorak med horizontalno in višinsko komponento položaja zmanjša. Nivelmanske meritve, ki še vedno omogočajo najnatančnejšo določitev višin oz. višinskih razlik, skupaj s podatki težnosti zagotavljajo kakovostno višinsko komponento koordinatnega sistema ter dajejo vpogled v njene časovne spremembe.

¹ Sandi Berk, univ. dipl. inž. geod.

² Katja Bajec, univ. dipl. inž. geod.

³ Dominik Fajdiga, univ. dipl. inž. geod.

⁴ viš. pred. dr. Dalibor Radovan, univ. dipl. inž. geod.

(vsi Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana)

⁵ Žarko Komadina, univ. dipl. inž. geod.

⁶ mag. Klemen Medved, univ. dipl. inž. geod.

(oba Geodetska uprava Republike Slovenije, Zemljemerska ulica 12, 1000 Ljubljana)

⁷ izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič, univ. dipl. inž. geod., univ. dipl. inž. rud.

⁸ doc. dr. Božo Koler, univ. dipl. inž. geod.

⁹ doc. dr. Miran Kuhar, univ. dipl. inž. geod.

¹⁰ asist. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.

¹¹ doc. dr. Simona Savšek, univ. dipl. inž. geod.

¹² asist. mag. Oskar Sterle, univ. dipl. inž. geod.

¹³ prof. dr. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.

(vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana)

Kombinacijo klasičnih geodetskih merskih postopkov (nivelman, gravimetrija) in satelitske tehnologije (GNSS in satelitske misije za spremljanje težnostnega polja Zemlje) je možno doseči samo prek mreže skupnih točk, kar imenujemo **kombinirana geodetska mreža**. Gre za združitev treh stebrov geodezije, ki obsegajo geokinematiko, težnost in rotacijo Zemlje, glej npr. (Plag in sod., 2009). Permanentne in ponavljajoče se meritve na točkah kombinirane geodetske mreže omogočajo modeliranje časovno odvisnih sprememb zemeljskega površja, težnostnega polja Zemlje ter njene atmosfere in hidrosfere.

Idejni projekt kombinirane geodetske mreže Slovenije, ki je predstavljen v nadaljevanju, je bil pripravljen kot CRP-projekt z naslovom Zasnova temeljne večnamenske državne geoinformacijske infrastrukture. Snovanje kombinirane geodetske mreže Slovenije se zgleduje po nekaterih že vzpostavljenih državnih in regionalnih kombiniranih geodetskih mrežah, npr. v Švici (Brockmann in sod., 2006) in v Skandinaviji (Poutanen in sod., 2007), s težnjo po vključitvi v Evropsko kombinirano geodetsko mrežo – ECGN, glej npr. (Ihde in sod., 2005) in (Ihde in sod., 2006).

Izhodišča za vzpostavitev kombinirane geodetske mreže 0. reda

Slovenija ima nekaj geodetskih referenčnih omrežij: državno omrežje stalnih GNSS-postaj SIGNAL, astrogeodetsko mrežo, trigonometrično mrežo, gravimetrično mrežo in nivelmansko mrežo. Točke teh mrež in omrežij so stabilizirane na različne načine. Vsak poseg (zaradi gradnje, uničenja) v katerikoli točko kateregakoli omrežja pomeni poseg v referenčno geodetsko osnovo države. Prostorsko-časovna stabilnost referenčne osnove je neposredno povezana s časovno stabilnostjo vseh geodetskih (referenčnih) točk. Izhodišče za kombinirano geodetsko mrežo, ki bi zajela čim več merskih tehnik na vsaki točki oz. postaji, je, da bo vsaka postaja omrežja tudi ustrezno geodetsko in pravno zavarovana. Tako bi lahko vzpostavili robustno omrežje, kjer kakršenkoli poseg v določeno geodetsko točko ne bi pomenil posega v realizacijo državnega geodetskega referenčnega sistema.

Kombinirana geodetska mreža bo zagotavljala kakovostno:

- referenčno ogrodje državnega omrežja stalnih GNSS-postaj,
- referenčno ogrodje državnega horizontalnega/terestričnega referenčnega sistema,
- referenčno ogrodje državnega višinskega referenčnega sistema,
- referenčno ogrodje državnega gravimetričnega referenčnega sistema ter
- večnamensko kalibracijsko mrežo tako za preverjanje kakovosti in ustreznosti merilnih instrumentov kot tudi metod in postopkov geodetske izmere.

Zaradi navedenih vlog smo jo poimenovali kar **kombinirana geodetska mreža 0. reda**, saj so mreže 1. redov za posamezne referenčne sisteme že vzpostavljene, mreža 0. reda pa jih bo na kakovosten način povezala v celoto.

Namen vzpostavitve kombinirane geodetske mreže 0. reda je kontinuirano (neprekinjeno ali periodično) izvajanje vseh možnih geodetskih opazovanj najvišje kakovosti za potrebe realizacije državnega geodetskega referenčnega sistema. Kot vemo, je treba za praktično uporabnost koordinatni sistem fizično vzpostaviti oziroma materializirati. V geodeziji praktično realizacijo referenčnega sistema izvedemo s fizično postavitvijo točk oz. postaj, na katerih in med katerimi izvajamo ustrezne geodetske meritve z namenom določitve koordinat teh točk v referenčnem sistemu. Praktično realizacijo referenčnega sistema imenujemo referenčni sestav.

Kakovostna geoinformacijska infrastruktura v obliki kombinirane geodetske mreže 0. reda bo ponudila tudi vrsto sekundarnih možnosti uporabe. Pomembna sta znanstveno-raziskovalni in aplikativni vidik, npr. pri geodinamičnih raziskavah, spremljanju vplivov globalnih sprememb ipd. Prav tako je takšna mreža zelo pomembna pri izvajanju različnih inženirskih nalog, kot so spremljanje morebitnih horizontalnih in vertikalnih pomikov naravnega in grajenega okolja, in s tem pri zaščiti pred naravnimi nesrečami.

Zasnova kombinirane geodetske mreže 0. reda

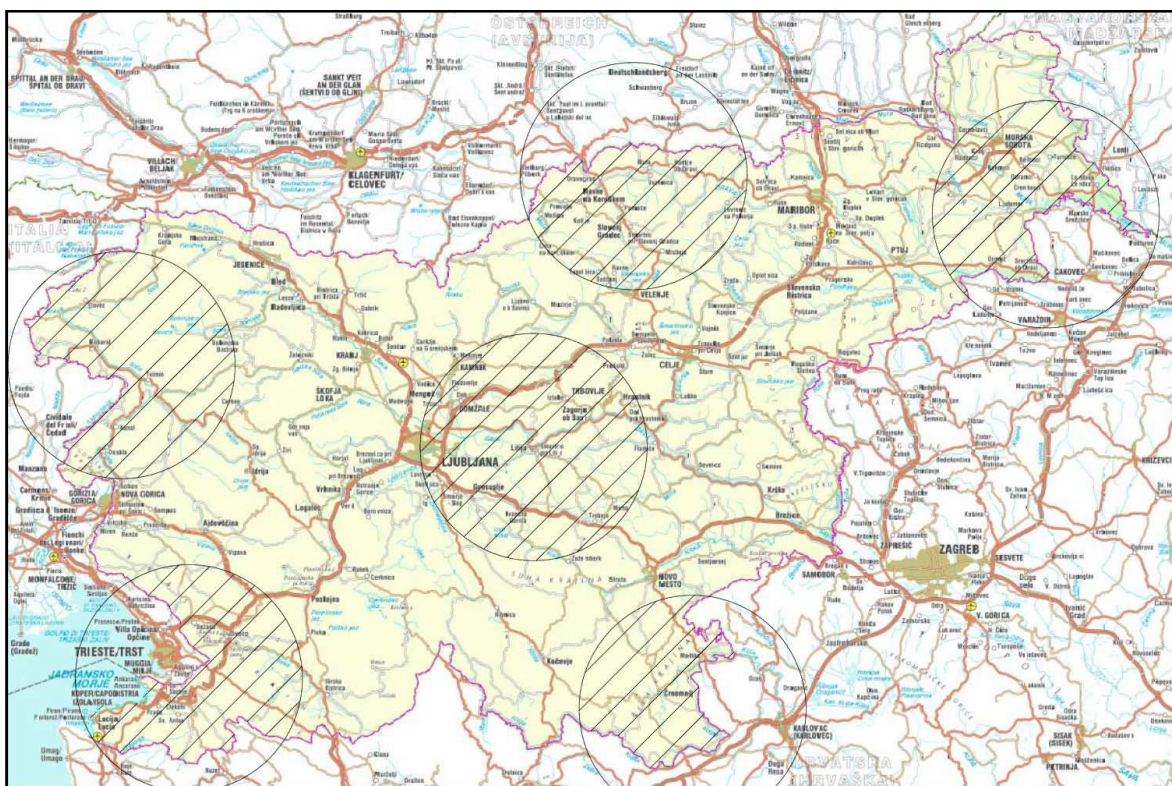
Idejni projekt kombinirane geodetske mreže 0. reda obsega:

- analizo potreb za njeno vzpostavitev, in sicer za državno omrežje stalnih GNSS-postaj, za državni terestrični referenčni sistem, za državni višinski referenčni sistem, za državni gravimetrični sistem in za ostale predvidene funkcije mreže, ter
- analizo možnosti za njeno vzpostavitev, ki se nanaša na možnost umestitve mreže, in sicer glede na obliko in velikost države, glede na reliefne danosti, glede na klimatske danosti in vegetacijo, glede na geološke, hidrološke in tektonske danosti ter glede na druge vplivne dejavnike.

Na podlagi pripravljenih izhodišč in analiz sta bila izdelana:

- predlog optimalnega števila točk mreže in
- predlog optimalne razporeditve točk mreže.

Predlaganih je 6 točk kombinirane geodetske mreže 0. reda, njihove makrolokacije pa so določene s središči krogov polmera 25 km (Slika 1).



Slika 1: Makrolokacije šestih točk kombinirane geodetske mreže 0. reda

Število točk je bilo izbrano tako, da:

- dobimo mrežo petih (Delaunayjevih) trikotnikov, ki vsebuje eno centralno in pet obodnih točk, in
- je povprečna dolžina stranic teh trikotnikov okoli 100 km.

Makrolokacije so bile določene na podlagi kombiniranega predloga razporeditve šestih točk mreže, ki je kompromis med dvema uporabljenima in delno nasprotujočima si geometrijskima kriterijema, in sicer:

- da naj si bodo točke mreže čim bolj vsaksebi (tj. na kar največjih medsebojnih oddaljenostih) in
- da naj točke mreže čim bolj enakomerno pokrivajo celotno državno ozemlje, torej da naj bo poljubna točka državnega ozemlja čim manj oddaljena od najbližje točke mreže.

Prvi kriterij izhaja iz vloge mreže kot referenčnega ogrodja (za realizacijo državnega geodetskega datuma), drugi kriterij pa je pomemben s stališča zagotavljanja lokacijskih storitev za celotno državno ozemlje, kar nekoliko ublaži težnjo po postavitvi točk na sami državni meji.

Točka mreže	Naselje v središču 25 km kroga	Mesta znotraj 25 km kroga
severozahodna	<i>Kamno, Občina Tolmin</i>	<i>Bovec, Tolmin</i>
jugozahodna	<i>Socerb, Občina Koper</i>	<i>Izola, Koper, Piran, Sežana</i>
osrednja	<i>Litija, Občina Litija</i>	<i>Domžale, Grosuplje, Hrastnik, Kamnik, Litija, Ljubljana (vzhodni del), Mengeš, Trbovlje, Trebnje, Višnja Gora, Zagorje ob Savi</i>
jugovzhodna	<i>Bedenj, Občina Črnomelj</i>	<i>Črnomelj, Metlika</i>
osrednja severna	<i>Trbonje, Občina Dravograd</i>	<i>Dravograd, Mežica, Prevalje, Ravne na Koroškem, Slovenj Gradec, Šoštanj</i>
severovzhodna	<i>Gibina, Občina Razkrižje</i>	<i>Lendava, Ljutomer, Murska Sobota, Ormož</i>

Preglednica 1: Naselja znotraj krogov, ki opredeljujejo makrolokacije točk mreže; krepko so označena mesta, ki so najbližje središču kroga predvidene makrolokacije.

Izvedena je bila analiza primernosti lokacij obstoječih geodetskih točk znotraj krogov, ki opredeljujejo makrolokacije točk kombinirane geodetske mreže 0. reda, in sicer:

- trigonometričnih točk (astrogeodetske) mreže 1. reda,
- stalnih GNSS-postaj omrežja SIGNAL,
- reperjev nivelmanskih mrež visoke natančnosti in 1. reda ter
- točk absolutne gravimetrične mreže.

Poleg geodetskih pa so vsekakor zanimiva tudi nekatera sorodna omrežja, povezana z opazovanji dogajanj in pojavov na Zemlji kot planetu, njenem površju, notranjosti in atmosferi. Tako so bile v analizo vključene tudi:

- točke mreže potresnih opazovalnic ARSO,
- točke mreže vremenskih opazovalnic ARSO,
- astronomske opazovalnice in observatoriji ter
- nekatere druge točke (npr. GEOSS – geometrično središče Slovenije).

Morebitna delitev oz. združitve lokacij s točkami teh omrežij bi lahko prinesla dodatne obojestranske koristi in možnosti interdisciplinarnega povezovanja.

Primernost predlaganih obstoječih lokacij je bila ovrednotena po najbolj osnovnih kriterijih, ki so:

- **lastništvo:** v primeru odkupljenih parcel v lasti države, ministrstev, javnih agencij ipd.;
- **dostopnost:** v primeru neproblematičnega dostopa do točke z osebnim vozilom in relativno majhne oddaljenosti od večjega naselja/mesta, zahtevana je možnost niveliranja – tj. priključitve na nivelmansko mrežo;
- **infrastruktura:** v primeru razpoložljivosti priključitve na električno in telefonsko omrežje oz. internetne povezave (pomembno za prenos podatkov);
- **geološka primernost:** v primeru lokalne geološke stabilnosti, torej da ni posedan, ni na plazovitem območju, ni na območju z večjimi nihanji podtalnice, ni v bližini večjih prometnic (tresljaji), ni na strehi stavbe ipd.;
- **možnost izvajanja meritev:** v primeru lokacije z odprtim obzorjem (predvsem proti jugu), npr. na vrhu vzpetine ali prostrane ravnine, planote (brez visoke vegetacije), da v bližini ni ovir in virov elektromagnetnega sevanja ipd.

Vse ocene so preliminarne, pridobljene brez terenskih ogledov in podrobnejših preverjanj. Dokončni izbor mikrolokacij bo odvisen od kriterijev idejnega projekta, hkrati pa bo zahteval podrobno preučitev primernosti lokacij s terenskimi ogledi, testnimi meritvami (npr. kakovosti sprejema GNSS-signalov), geološkimi mnenji ipd.

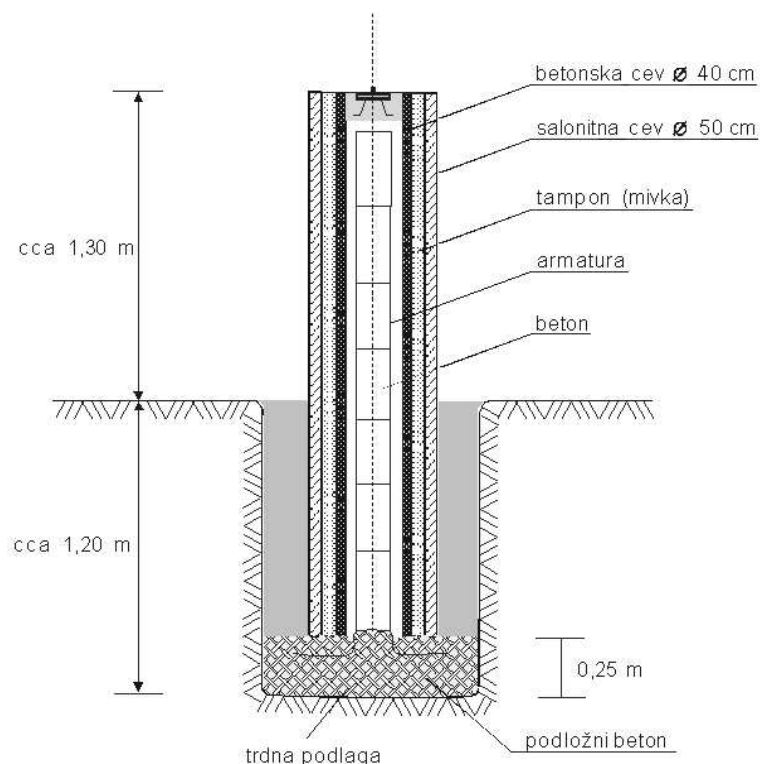
Stabilizacija točk kombinirane geodetske mreže 0. reda

Kombinirana geodetska mreža 0. reda mora izpolnjevati ustrezne mednarodne standarde, če se bomo želeli vključiti v mrežo ECGN in sodelovati v projektih za globalno spremljanje težnostnega polja Zemlje in modeliranje časovno odvisnih sprememb v Zemljini skorji. Vsaka točka kombinirane mreže 0. reda je tako sestavljena iz naslednjih točk (vsaka od teh točk je namenjena različnim geodetskim opazovanjem):

- primarne točke,
- referenčne GNSS-točke,
- referenčnega reperja za niveliranje,
- referenčne gravimetrične točke,
- po možnosti referenčne točke za mareografska opazovanja ter
- točk zavarovalne terestrične in nivelmanske mreže.

Način stabilizacije mora omogočati tudi izvedbo astronomskih in geomagnetnih opazovanj. Različne referenčne točke se lahko tudi združijo v eni sami točki (fizično), izjema pa so seveda točke zavarovalne mreže. Primer enega izmed predlogov za stabilizacijo primarne točke je na Sliki 2. Možne so tudi drugačne izvedbe, ki so pogojene predvsem z naravnimi danostmi (zaželeno je stabilizacija na živi skali) pa tudi dodatnimi zahtevami na morebitni obstoječi opazovalnici.

Točke zavarovalne mikromreže so razporejene v neposredni okolici primarne točke in so namenjene zavarovanju primarne in drugih referenčnih točk (primer poškodbe, uničenja) ter spremljanju/ugotavljanju horizontalne in višinske stabilnosti primarne in referenčnih točk na območju zavarovalne mreže. Zavarovalno mrežo naj bi sestavljale štiri točke, stabilizirane s talno stabilizacijo in ležeče na oddaljenosti do 100 m od primarne točke. Točke zavarovalne mreže bodo stabilizirane z ustrezno temeljenim betonskim kvadrom velikosti vsaj 50 cm × 50 cm × 50 cm in z možnostjo prisilnega centriranja merilnih instrumentov. Poleg opisane zavarovalne mreže za spremljanje stabilnosti v horizontalnem smislu mora biti vzpostavljena tudi zavarovalna nivelmanska mikromreža. Sestavljajo jo štirje zavarovalni reperji, ki so lahko vgrajeni v istem betonskem temelju kot zavarovalne točke horizontalne mikromreže.



Slika 2: Stabilizacija referenčne točke z masivnim betonskim stebrom (Kogoj et al., 2009)

Osnovne zahteve pri postavitvi točke kombinirane geodetske mreže 0. reda so: pridobitev lastninske pravice na območju stabiliziranih referenčnih točk (vsaj okoli 5 m × 5 m) in služnosti za točke zavarovalnih mrež v neposredni okolici, saj gre za trajne objekte državnega pomena. Točka mora biti dostopna z osebnim vozilom, zagotovljena mora biti možnost niveliranja. Na voljo mora biti ustrezna infrastruktura, kot je priklop na električno omrežje in ustrezna telekomunikacijska povezava (za prenos podatkov). Lokacija mora biti geološko primerna. Pogoj pa je seveda tudi nemoteno izvajanje vseh predvidenih meritev, kar je povezano z ustrezno odprtim obzorjem brez motečih ovir, odsotnostjo motečih izvorov elektromagnetnega valovanja, motečih vibracij terena ipd. Poleg stebrov z referenčnimi točkami je na lokaciji vsake točke predvidena tudi manjša uta z merilnim instrumentarijem in komunikacijsko opremo.

Zaključek

Idejni projekt kombinirane geodetske mreže 0. reda podaja izhodišča ter na podlagi izvedenih analiz potreb in možnosti za izvedbo projekta podaja tudi predlog optimalnega števila in razporeditve točk kombinirane geodetske mreže 0. reda. Predlaganih je šest točk, njihove makrolokacije pa so določene z območji znotraj krogov polmera 25 km.

Kombinirana geodetska mreža 0. reda bo eden izmed temeljev sodobne državne geoinformacijske infrastrukture. Povezala in zavarovala bo referenčna ogrodja državnega omrežja stalnih GNSS-postaj, horizontalnega/terestričnega referenčnega sistema, višinskega referenčnega sistema ter gravimetričnega referenčnega sistema. Zaradi specifičnih zahtev posameznih omrežij bo iskanje ustreznih mikrolokacij zahtevno delo, ki bo vključevalo podrobno analizo s terenskimi ogledi, testnimi meritvami, geološkimi mnenji in podobnim.

Vsekakor bodo pri iskanju ustreznih mikrolokacij najprej preverjene točke obstoječih geodetskih mrež. Možna in s strani geodezije zaželena bi bila tudi delitev oz. združitev lokacij s točkami sorodnih omrežij (npr. mrež potresnih ali vremenskih opazovalnic). Slednje bi lahko prineslo dodatne obojestranske koristi in možnosti združevanja različnih prostorskih in okoljskih podatkov.

Zahvala

Naročnik predstavljenega CRP-projekta (V2-1096) je Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS, sofinancer pa Geodetska uprava Republike Slovenije – GURS.

Literatura in viri

- Berk, S., Bajec, K., Fajdiga, D., Bitenc, M., Radovan, D., Ambrožič, T., Koler, B., Kuhar, M., Pavlovčič Prešeren, P., Savšek, S., Sterle, O., in Stopar, B. (2012). Zasnova temeljne večnamenske državne geoinformacijske infrastrukture. Končno poročilo. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana (v pripravi).
- Brockmann, E., Becker, M., Bürki, B., Gurtner, W., Haefele, P., Hirt, C., Marti, U., Müller, A., Richard, P., Schlatter, A., Schneider, D., in Wiget, A. (2006). Realization of a Swiss Combined Geodetic Network (CH-CGN). Report on the Symposium of the IAG Subcommission 1.3a Europe (EUREF). Bratislava, Slovaška, 2.–5. junij 2004. *Reports of the EUREF Technical Working Group (TWG) – EUREF publication*, št. 14. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt na Majni, 2006, 8 str.
- Ihde, J., Baker, T., Bruyninx, C., Francis, O., Amalvict, M., Kenyeres, A., Mäkinen, J., Shipman, S., Šimek, J., in Wilmes, H. (2005). Development of a European Combined Geodetic Network (ECGN). *Journal of Geodynamics*, letn. 40, št. 4–5, 2005, str. 450–460.
- Ihde, J., Baker, T., Bruyninx, C., Francis, O., Amalvict, M., Luthardt, J., Liebsch, G., Kenyeres, A., Mäkinen, J., Shipman, S., Šimek, J., in Wilmes, H. (2006). The implementation of the ECGN Stations – Status of the 1st Call for Participation. Report on the Symposium of the IAG Subcommission 1.3a Europe (EUREF). Bratislava, Slovaška, 2.–5. junij 2004. *Reports of the EUREF Technical Working Group (TWG) – EUREF publication*, št. 14. Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt na Majni, 2006, str. 49–58.
- Kogoj D., Marjetič A., Ambrožič T., Stegenšek B., Trlep D. (2009). Geodetske meritve stabilnosti odlagališča rudniške jalovine Jazbec, ničelna meritv. UL FGG, Katedra za geodezijo, Ljubljana.

- Plag, H.-P., Rothacher, M., Pearlman, M., Neilan, R., in Ma, C. (2009). The Global Geodetic Observing System. Solid Earth. *Advances in Geosciences*, letn. 13, 2009, str. 105–127.
- Poutanen, M., Knudsen, P., Lilje, M., Nørbech, T., Plag, H.-P., in Scherneck, H.-G. (2007). The Nordic Geodetic Observing System (NGOS). Dynamic Planet. Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools. IAG Symposium, Cairns, Avstralija, 22.–26. avgust 2005. *International Association of Geodesy Symposia*, letn. 130, zv. VI, 2007, str. 749–756.
- Rummel, R. (2011). Preface (GOCE – The Gravity and Steady-State Ocean Circulation Explorer). *Journal of Geodesy*, letn. 85, št. 11, 2011, str. 747.

Modeliranje ozona in delcev za območje Slovenije z modelskim sistemom ALADIN-CAMx

Marko Rus^{*}, Rahela Žabkar^{*}, Jože Rakovec^{*}

Povzetek

Za potrebe modeliranja ozona in delcev na območju Slovenije je bil sestavljen modelski sistem, v katerem smo disperzijsko-fotokemični model CAMx povezali z meteorološkim modelom ALADIN. V modelski sistem so bili vključeni tudi podroben opis antropogenih emisij na območju Slovenije in Evrope ter podatki o koncentracijah onesnaževal na stranskih robovih območja modeliranja iz globalnega fotokemijskega modela. V prispevku sta predstavljena opis modelskega sistema ter validacija modelskih rezultatov na dveh izbranih epizodah: v zimski epizodi so bile izmerjene povišane koncentracije delcev v zraku, v poletni epizodi pa povišane koncentracije ozona.

Uvod

Pri modeliranju onesnaženosti zraka moramo najprej dobro poznati vremensko stanje, v katerem računamo koncentracije onesnaževal. Z vetrovnim poljem določimo advekcijo oz. transport primesi v zraku, razredčevanje teh primesi v zraku pa računamo s pomočjo enačb, ki opisujejo turbulentno difuzivnost. Nekatere lastnosti ozračja (npr. temperatura, vlažnost, optična debelina) dodatno vplivajo tudi na kemijske in fotokemijske pretvorbe snovi ali pa na bolj ali manj učinkovito izločanje snovi iz ozračja (npr. ob padavinah).

Poleg dobrega opisa meteoroloških spremenljivk je potrebno dobro poznati emisije (točkovne in ploskovne) posameznih onesnaževal ter kemijske začetne in robne pogoje (koncentracije onesnaževal na začetku zagona oziroma na robu računskega območja).

Modeliranje onesnaženosti zraka je torej izračunavanje časovnih sprememb količine posameznih primesi v zraku v prostoru, ki nas zanima. V eulerskem načinu je v vsakem volumskem elementu ozračja sprememba količine snovi rezultat vseh prej omenjenih dogajanj: od emisije, preko transporta in disperzije, do izločanja snovi iz ozračja. Osnovna enačba za vsako snov " I " v zraku je torej kontinuitetna enačba in ob predpostavki o brezdivergentnem gibanju zraka izračun koncentracije te snovi temelji na enačbi o ohranitvi te snovi c . Ker ni mogoče obravnavati dogajanj, ki so manjša od prostorske ločljivosti modela, se v enačbi za povprečne koncentracije snovi c_I pojavi dodaten člen $\nabla(K\nabla c_I)$:

$$\frac{\partial c_I}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{v}c_I) + \nabla(K\nabla c_I) + \frac{dc_I}{dt}_{viri} + \frac{dc_I}{dt}_{kem} - \frac{dc_I}{dt}_{izpad} \quad (1)$$

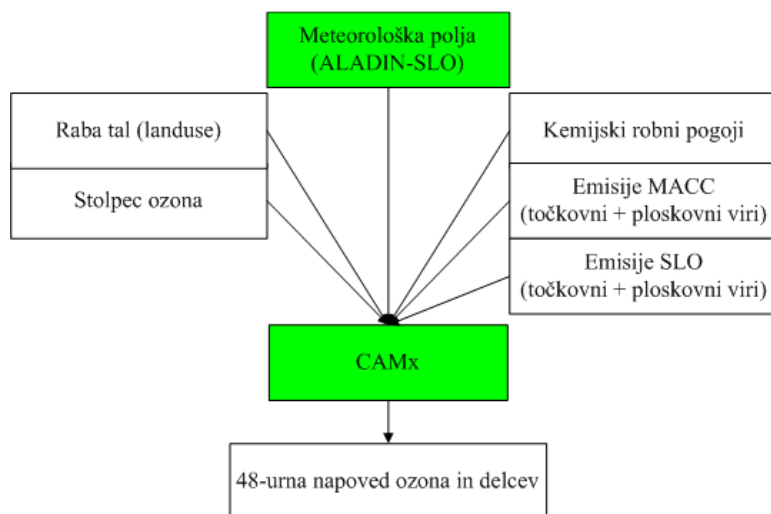
V gornji enačbi \vec{v} in K predstavljata hitrost vetra in turbulentno difuzivnost; oba se iz kraja v kraj in v času lahko tudi močno spreminjata glede na vremenske pogoje. Torej je za to, da lahko povemo, kako se bo v nekem delu ozračja spreminjala koncentracija primesi v zraku $\partial c_I/\partial t$, potrebno poznati emisije (vire) in izpad (suho in mokro depozicijo) te snovi ter kemijske procese v zvezi z njo (nastajanje ali pretvorba v druge snovi). Kam bo veter zanašal snovi in kako se bodo razredčevale, pa je odvisno od vremenskih spremenljivk \vec{v} in K . Ker na kemijske pretvorbe vplivajo lahko tudi temperatura zraka, količina kemijsko

^{*} vsi trije: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ulica 19, 1000 Ljubljana

aktivnega sevanja (predvsem sončnega, delno tudi IR), vlažnost zraka itd., se nabor vremensko odvisnih spremenljivk, ki jih je treba upoštevati, lahko tudi precej poveča.

Modelski sistem ALADIN-CAMx

Za modeliranje ozona in delcev v atmosferi potrebujemo kompleksen model, ki vsebuje matematičen opis vseh procesov, ki pomembno vplivajo na koncentracije onesnaževal v ozračju. Eden takšnih modelov v svetu je model CAMx (Comprehensive Air quality Model with extensions; ENVIRON, 2011), ki je bil s strani US EPA (US Environmental Protection Agency) odobren za modeliranje ozona in delcev v različnih časovnih in krajevnih skalah. Model CAMx je disperzijsko-fotokemični model, ki računa prenos z vetrom, turbulentno difuzivnost, kemijske in fotokemijske pretvorbe snovi v ozračju ter izločanje snovi iz ozračja. Za te izračune potrebuje meteorološka polja, ki jih je potrebno simulirati ločeno z meteorološkim modelom, ter različna druga vhodna polja (podatke o emisijah, geografske spremenljivke, podatke o skupni količini ozona v ozračju). V prispevku opisujemo modelski sistem ALADIN-CAMx, v katerem smo model CAMx povezali z operativnim meteorološkim modelom ALADIN in obenem vključili tudi podroben opis antropogenih emisij na območju Slovenije in sosednjih držav, ter opis koncentracij onesnaževal na robovih območij modeliranja iz globalnega fotokemijskega modela. Na ta način smo pripravili orodje, s katerim je mogoče modelirati ozon in delce na območju Slovenije in sosednjih držav. Poenostavljeno shemo modelskega sistema prikazuje Slika 1.



Slika 1 – Poenostavljena shema modelskega sistema ALADIN-CAMx

Vhodna meteorološka polja

Model CAMx za simuliranje zgoraj opisanih procesov potrebuje različna polja meteoroloških spremenljivk: zračni tlak, temperaturo, veter, specifično vlago, oblačno vodo, padavinsko vodo, snežno vodo, padajoče ledene kristale, optično debelino oblakov, koeficient vertikalne turbulentne difuzivnosti, temperaturo tal. Večina od teh meteoroloških polj so neposredni izhodi meteorološkega modela ALADIN in jih je

preprosto vključiti v model CAMx, nekatera polja (oblačna voda, optična debelina oblaka, koeficient turbulentne difuzivnosti) pa je potrebno parametrizirati iz polj meteoroloških spremenljivk, ki so na voljo v modelu ALADIN. Pri parametrizaciji spremenljivk »oblačna voda« in »optična debelina oblaka« so bila dodatno diagnosticirana oblačna polja na podlagi konvektivnih padavin in višine planetarne mejne plasti. Koeficient vertikalne turbulentne difuzivnosti pa je bil izračunan po metodi (O'Brien, 1970), pri čemer je bilo kot vhodni podatek potrebno uporabiti tudi oceno višine planetarne mejne plasti. Maso padajočih ledenih kristalov smo na vseh modelskih nivojih nastavili na vrednost 0. Ta predpostavka je glede na to, da imamo zelo malo primerov, v katerih bi bilo dlje časa v zraku veliko padajočih ledenih delcev oziroma bi njihova količina znatno vplivala na izračun kemije, večinoma upravičena.

Dodatna vhodna polja potrebna za izračun (foto)kemijskih reakcij

Za izračun fotokemijskih pretvorb in razmerij so bila v model CAMx vključena nekatera dodatna polja, prikazana v Tabeli 1. V našem primeru smo kot izvirne podatke o rabi tal uporabili podatke USGS s 24 razredi rabe tal, kar je bilo potrebno prekodirati v klasifikacijo z 11 razredi, ki jih uporablja model CAMx. Za oceno celotne količine ozona v stolpcu ozračja v model sproti vključujemo satelitske meritve, delež listne površine je privzet kot v modelu ALADIN, medtem ko je za motnost ozračja zaenkrat izbrana konstantna vrednost.

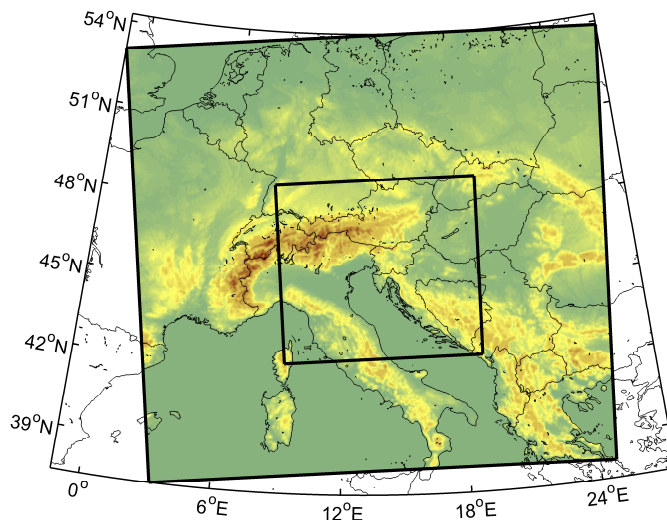
Tabela 1: Vir dodatnih vhodnih polj, potrebnih za izračun fotokemičnih procesov v modelu CAMx.

Dodatna vhodna polja za model CAMx	Vir
raba tal	podatki o »landuse« USGS
UV-albedo	iz vrednosti rabe tal
motnost	privzeta konstantna vrednost
količina ozona v celotnem stolpcu ozračja	http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone.html
delež listne površine (LAI)	model ALADIN

Območje modeliranja

V sedanji konfiguraciji modelskega sistema ALADIN-CAMx je območje modeliranja prilagojeno obstoječi konfiguraciji modela ALADIN/SI na Agenciji RS za okolje (v nadaljevanju ARSO). Zaradi časovne zahtevnosti modela CAMx je bil uporabljen postopek gnezdenja, v katerem imamo dve računski območji (Slika 2). Horizontalna ločljivost notranjega (gnezdenega) računskega območja s 185 x 167 računskimi točkami je enaka ločljivosti operativne konfiguracije modela ALADIN/SI (4,4 km), horizontalna ločljivost zunanjega računskega območja s 145 x 135 računskimi točkami pa je trikrat manjša (13,2 km). Modelske točke v notranjem računskem območju modela CAMx sovpadajo z modelskimi točkami sedanje operativne konfiguracije modela ALADIN, medtem ko v zunanjem računskem območju modela CAMx točke sovpadajo z vsako tretjo točko modela ALADIN. Notranje računsko območje med drugim vključuje tudi industrializirano Padsko nižino, ki s svojimi emisijami ob določenih vremenskih razmerah lahko vpliva na povečano koncentracijo nekaterih pomembnih onesnaževal tudi v Sloveniji.

Vertikalni modelski nivoji v sedanji konfiguraciji se ujemajo z vertikalnimi nivoji v modelu ALADIN, le da imamo v modelu CAMx vključenih le spodnjih 34 nivojev (od skupno 43 nivojev v modelu ALADIN). Računanje disperzije onesnaževal in fotokemijskih pretvorb na zgornjih 9 nivojih namreč zaradi velike nadmorske višine teh nivojev za potrebe napovedovanja kvalitete zraka v plasti zraka blizu tal ni potrebno.

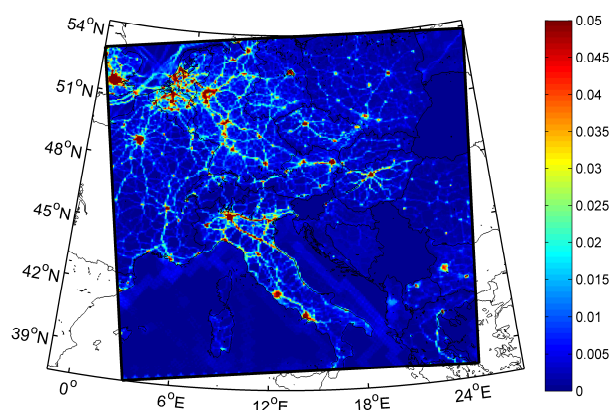


Slika 2 – Območje modeliranja v sedanji konfiguraciji modelskega sistema ALADIN-CAMx. Prikazano je tudi gnezdeno računsko območje.

Antropogene emisije

Polja antropogenih emisij so bila pripravljena ločeno za območje Slovenije in za druge evropske države. Za območje Slovenije so bili pri teh preračunih uporabljeni podatki, ki so jih pripravili na Agenciji RS za okolje (ARSO), za območje izven Slovenije pa podatki pridobljeni v projektu MACC (Monitoring Atmospheric Composition and Climate, MACC a). V obeh primerih so bile urne vrednosti točkovnih in ploskovnih virov emisij NO_x, CO, NMVOC, NH₃, SO₂, CH₄, PM₁₀ in PM_{2.5} preračunane iz letnih emisijskih vrednosti. Za območje Slovenije je bila uporabljena emisijska baza za leto 2009, za druge evropske države pa za leto 2007. Pri izračunu urnih vrednosti iz letnih emisij smo uporabili ocenjene letne, tedenske in dnevne časovne poteke emisij. Poleg tega je bilo za potrebe modeliranja potrebno iz skupnih emisij NMVOC in delcev s pomočjo pretvorbenih tabel ločeno po različnih emisijskih virih pripraviti razdelitev emisij v posamezne podskupine med seboj podobnih organskih spojin oziroma delcev v skladu z zahtevami modela CAMx. Skupno količino emisij NMVOC smo tako za 24 različnih tipov emisijskih virov razdelili med 49 osnovnih skupin spojin, skupne emisije delcev pa za 96 različnih tipov emisijskih virov med 15 različnih vrst delcev. Vsa emisijska polja so bila pripravljena v prostorski ločljivosti 4,4 km, kar je izbrana ločljivost izgrajenega modelskega sistema ALADIN-CAMx, medtem ko je prostorska ločljivost originalnih letnih emisij za območje Slovenije 100 m x 100 m, za območja izven Slovenije pa 1/8° x 1/16°.

Primer vhodnega polja antropogenih emisij za območja izven Slovenije v 4,4 km ločljivosti je prikazan na Sliki 3. V modelski sistem zaenkrat še niso vključena polja biogenih emisij, zaradi česar pričakujemo predvsem podcenjene vrednosti ozona v modelskih rezultatih.



Slika 3 – Polje ploskovnih emisij NO_x v tonah/h v prostorski ločljivosti 4,4 km na območju modeliranja (izvzeta je Slovenija) na nedeljo v mesecu avgustu ob 6^h zjutraj.

Stranski kemijski robni pogoji

Začetna polja koncentracij onesnaževal v zraku modelski sistem prebere iz prejšnje simulacije, oziroma jih nastavi na ničelne vrednosti, če je simulacija začetna; tedaj mora od začetnega zagona modela preteči dovolj časa, da lahko vpliv začetnega stanja na rezultate simulacij zanemarimo. Koncentracije onesnaževal na stranskih robovih modelskega območja pa pridobivamo iz operativnega globalnega fotokemijskega modela MOZART (Model for OZone And Related chemical Tracers) v okviru MACC (MACC b). Horizontalna ločljivost teh modelskih polj je 1,875° geografske dolžine in približno 1,93° geografske širine. Potreben pa je tudi preračun koncentracij spojin modela MOZART v skupine spojin, ki jih obravnava model CAMx.

Izbor kemijskega mehanizma

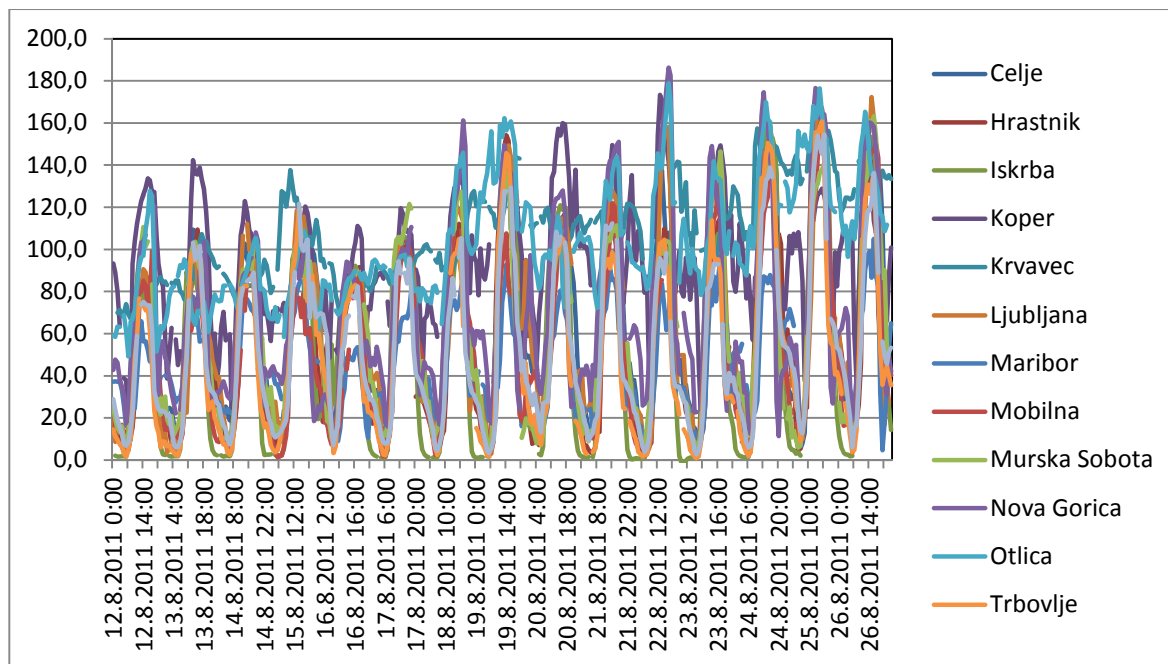
Med kemijskimi mehanizmi, ki so na voljo v modelu CAMx (CB04, CB05, SAPRC99), smo izbrali mehanizem SAPRAC99 (Carter, 2000), ki vključuje 114 različnih kemijskih spojin oziroma skupin spojin, od tega 16 radikalov, 22 skupin delcev in 217 kemijskih reakcij.

Rezultati simulacij

Za osnovno validacijo modelskega sistema smo izbrali dve epizodi, eno zimsko in eno poletno. Med poletno epizodo so bile izmerjene povišane koncentracije ozona v plasti zraka pri tleh na nekaterih merilnih postajah po Sloveniji, med zimsko pa povišane koncentracije delcev.

Simulacija v primeru povišanih koncentracij ozona (12. 8. 2011 – 24. 8. 2011)

V drugi polovici avgusta 2011 so bile temperature zraka visoke, dovolj je bilo sončnega sevanja, dinamika v ozračju pa je bila šibka, zato so bili vremenski pogoji ugodni za tvorbo troposferskega ozona. Meritve ozona po Sloveniji so pokazale (Slika 4), da so dnevni maksimumi predvsem na primorskih merilnih postajah (Nova Gorica, Koper, Otlica) dosegali vrednosti tudi do okrog $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (dne 22. 8.), medtem ko so bile drugod po Sloveniji maksimalne izmerjene gostote ozona praviloma (z nekaterimi izjemami, npr. v Ljubljani dne 27. 8.) nekoliko nižje.

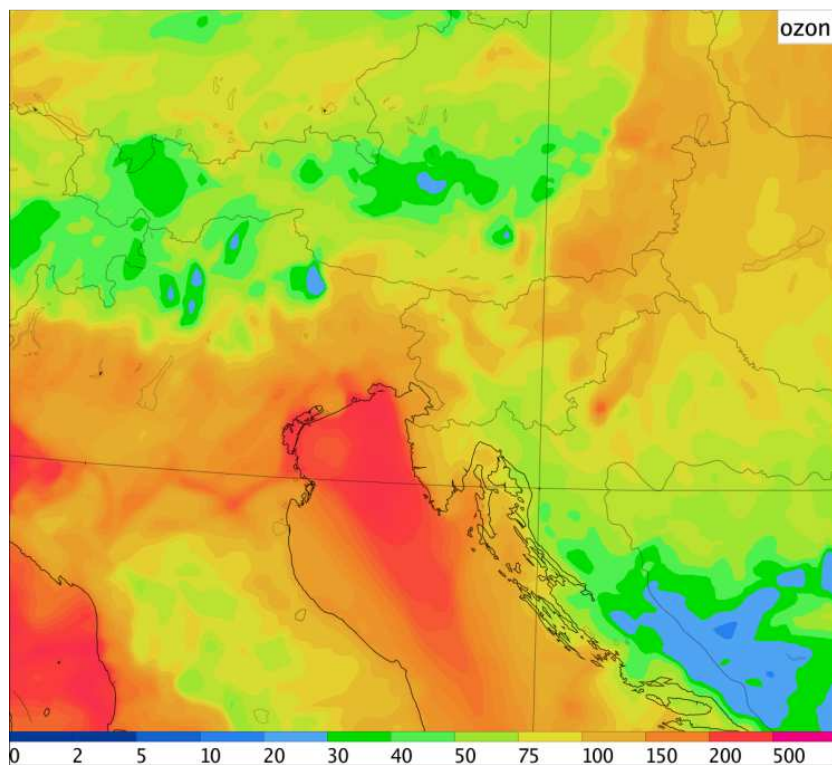


Slika 4 – Izmerjene urne gostote ozona (v $\mu\text{g}/\text{m}^3$) na merilnih postajah po Sloveniji v obdobju od 12. 8. do 27. 8. 2011

Primeri rezultatov simulacij na notranjem računskem območju ločljivosti 4,4 km so za ozon prikazani na Sliki 5. Pri rezultatih za ozon je potrebno opozoriti, da so zaradi manjkajočih podatkov o biogenih emisijah simulirane vrednosti ozona podcenjene.

Rezultati simulacij (Slika 5) kažejo, da je v obravnavanem obdobju nad območjem severnega Jadrana, nad nekaterimi območji severne Italije, pa tudi nad Ligurskim morjem zahodno od Italije prišlo do akumulacije onesnažil v zračnih masah. Obenem so bile meteorološke razmere ugodne za pospešeno fotokemijsko aktivnost onesnažil (visoke temperature, šibka dinamika v večjih skalah, dovolj sončnega sevanja pri tleh), kar je nad temi območji vodilo v visoke koncentracije ozona. Vpliv na Slovenijo je imel v tem obdobju severnojadranski bazen onesnaženih zračnih mas, kjer so bile najvišje simulirane vrednosti ozona v dneh 22. 8. in 23. 8. 2011. Zaradi značilnih obalnih zračnih gibanj, ko vetrovi ponoči nosijo zrak s kopnega proti morju, se lahko emisije iz obalnih virov akumulirajo v zračnih masah, ki sicer bolj ali manj stagnirajo nad morjem. Po drugi strani pa podnevi vetrovi nosijo onesnažene zračne mase z morja proti kopnemu. V obravnavanem obdobju je do takšnega vpliva fotokemijskega onesnaženja iznad morja nad kopno prišlo dne 22. 8., ko so bile na vseh treh primorskih merilnih postajah (Koper, Nova Gorica, Iskrba, Slika 4) izmerjene gostote ozona okrog $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Občasno so bile v

obravnovanem obdobju nekoliko višje gostote ozona simulirane tudi lokalno na nekaterih območjih po Sloveniji, vendar so bile vedno bistveno nižje od dovoljenih vrednosti (maksimumi običajno nekje do $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$). V splošnem so bile simulirane vrednosti ozona po Sloveniji podcenjene, kar je med drugim vsaj deloma posledica že omenjenega problema z manjkajočimi biogenimi emisijami.



Slika 5 – Z modelskim sistemom ALADIN-CAMx simulirana onesnaženost zraka pri tleh z ozonom (v $\mu\text{g}/\text{m}^3$) na notranjem modelskem območju z ločljivostjo 4,4 km. Prikazano je polje za 22. 8. 2011 ob 15 UTC.

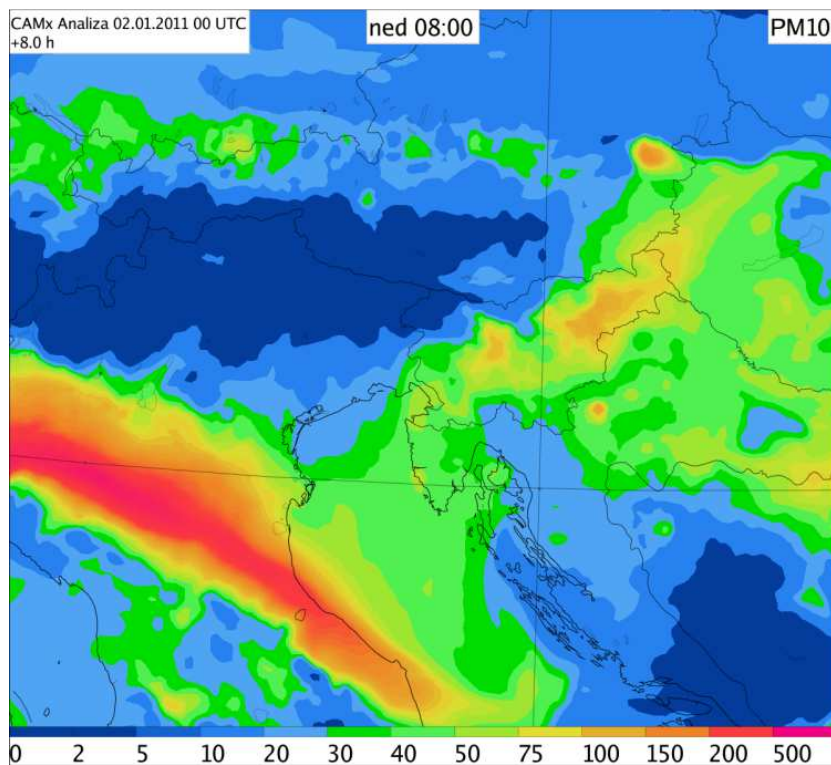
Simulacija v primeru povišanih koncentracij delcev (18. 12. 2010 – 4. 1. 2011)

V tem obravnovanem obdobju so bile izmerjene povišane koncentracije delcev v zraku. Najvišje urne koncentracije delcev so v Sloveniji večinoma izmerjene v zimskih mesecih v zgodnjih jutranjih urah, ko je temperaturna inverzija najizrazitejša. Običajno so preseganja izmerjena v večjih mestih.

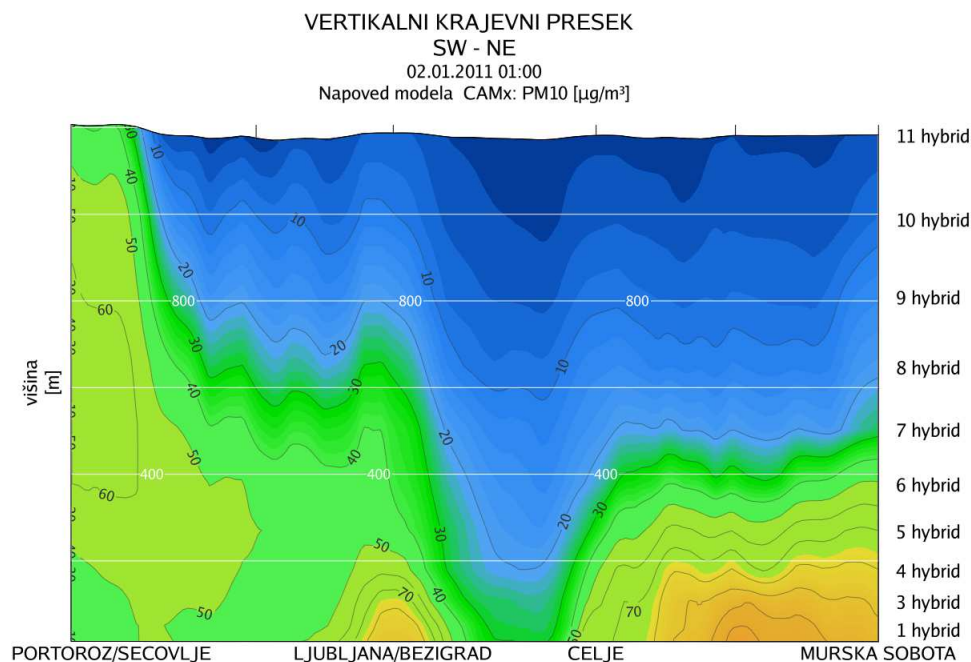
Zaradi nepoznavanja začetnih koncentracij onesnaževal v ozračju (začetni ničelni kemijski pogoji) smo modelirali dalj časa, podrobneje pa analizirali modelske rezultate za zadnje dni obravnavega obdobja. Na Sliki 6 so vidna obsežna območja povečanih koncentracij delcev, ki se v obliki širokega pasu razprostirajo po Padski nižini od severozahoda proti jugovzhodu. V Sloveniji so koncentracije delcev povečane v okolici večjih mest, kot so Ljubljana, Celje, Maribor pa tudi Murska Sobota. Z višino se onesnaženost hitro zmanjšuje, nad višino temperaturne inverzije je mešanje zraka v vertikalni smeri dosti bolj učinkovito, zato so tudi razlike koncentracij po višini bistveno manjše. Zanimivo sliko dobimo tudi, ko pogledamo vertikalni časovni presek koncentracij v določeni modelski točki, v našem primeru na območju Ljubljane (Slika 7). Lepo se namreč vidi, da so koncentracije delcev največje v zgodnjih jutranjih urah, najmanjše pa

popoldne (ob dveh in treh), ko je ozračje zaradi povečanega sončnega sevanja bolj labilno, posledično vertikalno mešanje izrazitejše, ter višina planetarne mejne plasti zraka višja (Sliki 7 in 8).

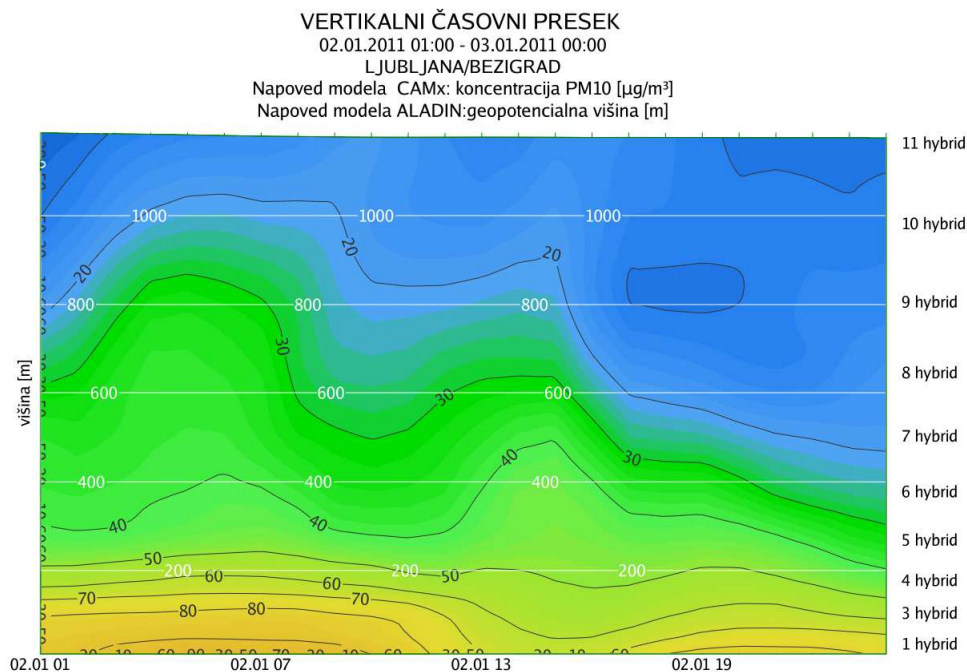
Primerjava modelskih rezultatov z meritvami pokaže, da model CAMx v povprečju sicer sledi urnim izmerjenim koncentracijam delcev, so pa modelske koncentracije v primerjavi z izmerjenimi podcenjene (Slika 9). Vzroki razhajanj so lahko v napaki primerjave med meritvijo v točki in modelsko vrednostjo, ki predstavlja povprečno koncentracijo cele modelske celice (4,4 km x 4,4 km x debelina spodnje modelske plasti), ali v drugih virih modelskih napak (npr. negotovosti v emisijah). Poleg tega pa je tudi merilna negotovost urnih meritev koncentracij delcev velika, z zakonodajo predpisane največje še dopustne merilne negotovosti koncentracij delcev so za povprečne dnevne vrednosti namreč kar 50 % (mi pa primerjamo urne koncentracije).



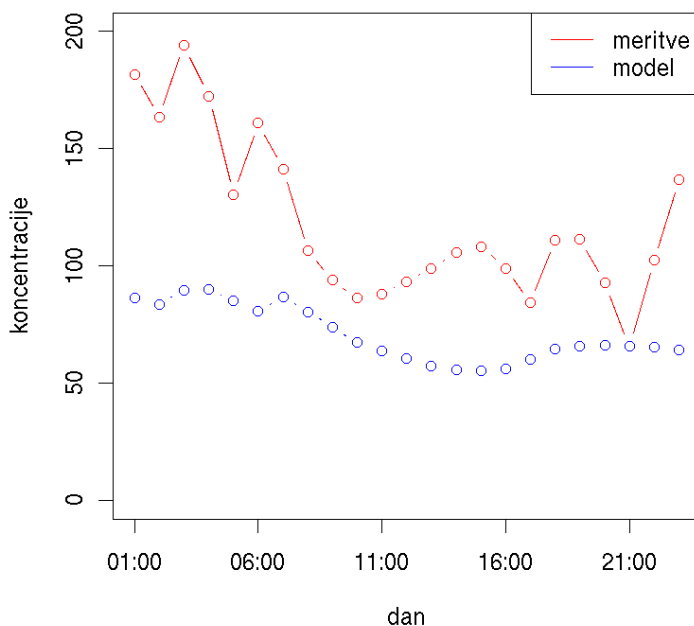
Slika 6 – Z modelskim sistemom ALADIN-CAMx simulirana onesnaženost zraka pri tleh z delci (v $\mu\text{g}/\text{m}^3$) na notranjem modelskem območju z ločljivostjo 4,4 km. Prikazano je polje za 2. 1. 2011 ob 8. uri po lokalnem času.



Slika 7 – Vertikalni krajevni presek onesnaženosti zraka z delci iz smeri Postojna proti Murski Soboti preko Ljubljane, Celja in Maribora. Potek je prikazan za 2. 1. 2011 ob 8. uri po lokalnem času.



Slika 8 – Časovni potek onesnaženosti zraka z delci nad modelsko točko, ki je najbližje Ljubljani. Potek je prikazan za čas od 2. 1. 2011 ob 00 do 3. 1. 2011 ob 00.



Slika 9 – Primerjava izmerjenih vrednosti (rdeča) in modelskih vrednosti (modra) količine delcev v zraku pri tleh (v $\mu\text{g}/\text{m}^3$) za Ljubljano, pri čemer modelske vrednosti veljajo v modelski točki, ki je najbližje Ljubljani. Časovni potek je prikazan za obdobje od 2. 1. 2011 ob 00 do 3. 1. 2011 ob 00.

Zaključki

Napovedovanje onesnaženosti zraka z ozonom in z delci z modelskim sistemom ALADIN/CAMx lahko ocenimo za dokaj uspešno. Pri tem je treba upoštevati prostorsko in časovno kvalitativno in kvantitativno ujemanje z resničnimi razmerami v ozračju. Pri tem je del težave ta, da modelska vrednost predstavlja povprečje za celotni modelski volumen okrog vsake modelske točke, medtem ko je meritev reprezentativna za neko točko v prostoru in zgolj njeno bližnjo okolico. Pri delcih je del težave tudi časovno zelo spremenljiva onesnaženost zraka z delci, zato so meritve onesnaženosti z delci za krajša obdobja tudi manj reprezentativne.

Napoved za poletni primer, ko je bila marsikje po Sloveniji zabeležena povečana onesnaženost zraka z ozonom, je bila kvalitativno uspešna, kvantitativno pa so modelske vrednosti nekoliko prenizke glede na izmerjene. To delno lahko razložimo s tem, da zaenkrat še niso vključene biogene emisije predhodnikov ozona, katerih delež je lahko znaten. Za zimski primer povečane onesnaženosti zraka z delci se napoved kvantitativno in kvalitativno dokaj dobro ujema z izmerjeno onesnaženostjo.

Literatura

Agencija RS za okolje (ARSO): model ALADIN in podatki o emisijah za Slovenijo
 Carter, W. P. L., 2000: Documentation of the SAPRC-99 Chemical Mechanism for VOC Reactivity Assessment. Final Report to California Air Resources Board Contract No. 92-329, and 95-308. <http://www.cert.ucr.edu/~carter/absts.htm#saprc99>

ENVIRON, 2011: CAMx User's Guide, Comprehensive Air Quality Model With Extensions
Version 5.40, ENVIRON International Corporation, Novato, California.
MACC a: emisije za področje Evrope, [fp://macclient@neptunus.tno.nl/projects/TNO/beno/macc/](mailto:macclient@neptunus.tno.nl)
MACC b: kemijski robni pogoji, <http://macc.icg.kfa-juelich.de:50080/access>
MOZART: kemijski robni pogoji: http://www.gmes-atmosphere.eu/d/services/gac/nrt/nrt_fields
O'Brien, J. J., 1970: A Note on the vertical structure of the eddy exchange coefficient in the
planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 27, 1213–1215.
TOMS: <http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone.html>
USGS: raba tal iz podatkov modela WRF

Preizkusno obratovanje geomagnetnega observatorija Sinji vrh

Rudi Čop, Damir Deželjin¹

Povzetek

Pri preizkusnem obratovanju geomagnetnega observatorija Sinji vrh je bilo na začetku največ časa posvečenega magnetometrom, nato pa daljinskemu prenosu merilnih podatkov in njihovi grafični predstavitvi. Sprotno spremljanje sprememb zemeljskega magnetnega polja na observatoriju je omogočilo postopno odkrivanje njihovih izvorov in povečevanje zanesljivosti delovanja tako merilnega sistema kot tudi telemetrije. Preizkusno obratovanje observatorija bo zaključeno z organizacijo rednih absolutnih meritev in s postavitvijo vzporednega merilnega sistema za variabilne meritve (zaradi stalnega nadzora meritev) in vzporednega sistema za telemetrijo (zaradi povečane zanesljivosti prenosa merilnih podatkov). Podatke bo potrebno shranjevati na dveh popolnoma ločenih strežnikih.

Preizkusno obratovanje

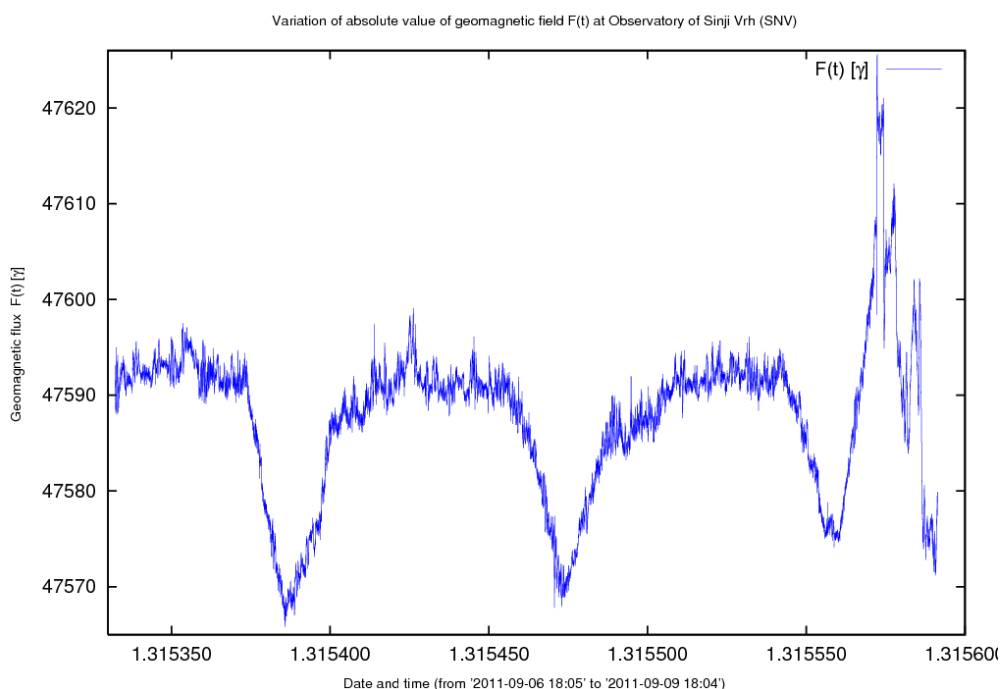
Gradnja geomagnetnega observatorija Sinji vrh pod Sinjim vrhom nad Ajdovščino (v nadaljevanju observatorij) se je zaradi formalnih razlogov že na začetku razdelila v dve fazi. Njegovo preizkusno obratovanje se je lahko začelo potem, ko je bil dokončan prvi del prve faze: ko je bil zgrajen instalacijski kolektor od začetnega do glavnega jaška s povezavo do jaška ob baraki za meritve in ko je bila postavljena baraka za meritve skupaj z začasnim mestom za senzor variometra. Ta gradbena in instalacijska dela so bila zaključena decembra 2010 s podpisom dokumenta o začasnem priklopu observatorija na javno nizkonapetostno mrežo.

V obdobju pred začetkom in med samo gradnjo observatorija je bilo potrebno poiskati primerno mesto za postavitev observatorija, izdelati in predelati idejne zasnove in gradbene načrte ter pridobiti dovoljenja za ureditev dostopne poti. Po izbiri izvajalcev del in po zaključku prvega dela prve faze gradnje observatorija pa se je nadaljevalo urejanje razmerij s sosedi na Gori. Na samem observatoriju smo postopoma izboljševali delovanje posameznih sestavnih delov in dopolnjevali merilni sistem in njegovo telemetrijo. Sistematično se je povečevala zanesljivost delovanja tako merilnih instrumentov kot tudi ostalih naprav za prenos, shranjevanje in obdelavo merilnih rezultatov (Slika 1). Začetek gradbenih del drugega dela prve faze se je zavlekel vse do sredine avgusta 2011. Glede na ugodne vremenske razmere je bila večina gradbenih del skupaj s polaganjem energetskih kablov končana še v decembru istega leta.

Nad glavnim jaškom je bila za naprave za zajemanje in prenos merilnih podatkov zgrajena ločena baraka za telemetrijo, zato da se je zmanjšal njen vpliv na magnetometre. Poleg glavnega jaška in jaška pri baraki za meritve sta bila izdelana dodatna ločena jaška za akumulatorski bateriji. Zaradi galvanske ločitve posameznih delov merilnega sistema so se merilni podatki iz barake za meritve do barake za telemetrijo začeli prenašati preko optičnih vlaken. Merilni rezultati so se začeli dodatno obdelovati tako, da se izločajo rezultati nepravilnih meritev (Čop et al., 2011). Zaradi zagotovitve energetske avtonomije observatorija se vsi merilni instrumenti in celotna telemetrija na observatoriju napajajo iz

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

enosmernega omrežja napetosti 12 V. Zato je bil na to napajalno napetost dodatno predelan tudi triosni magnetometer fluxgate, model FGE verzije K.



Slika1: Meritve spremembe vrednosti zemeljskega magnetnega polja $F(t)$ [nT] v zadnjih treh dneh pred začetkom geomagnetne nevihte 9. septembra 2011

Geomagnetne lastnosti področja, kjer je sedaj zgrajen observatorij, je potrebno še enkrat preveriti. S primerjalno meritvijo se bo potrdila pravilnost izbire kraja za observatorij ter primernost izbranih merilnih instrumentov. Pred zaključkom vseh del na drugem delu gradnje observatorija od glavnega jaška do novih merilnic v vrtači na parceli števil. 310/1 k.o. Kovk (Slika 2) je poleg tega potrebno še enkrat preveriti obstoječi sistem napajanja, izmeriti upornost ozemljil, potencialne razlike posameznih točk v sistemu napajanja in preveriti vpliv galvansko ločenega sistema na rezultate meritev.

Preizkusna faza bo zaključena potem, ko bodo vzpostavljene redne absolutne meritve na observatoriju in postavljen vzporeden sistem variabilnih meritev in vzporeden sistem prenosa merilnih podatkov. Sedanjim meritvam absolutne vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja F s protonskim magnetometrom in meritvam sprememb komponent zemeljskega magnetnega polja dX , dY , dZ z variometrom FGE bo predvidoma v marcu 2012 dodan še magnetometer fluxgate FLV1/A LAMA. Ta bo omogočil meritev sprememb komponent dF , dD in dI in stalno primerjavo sedanjih variabilnih meritev.

Napajalni sistem

Observatorij je edinstvene oblike, ker je postavljen v območju Nature 2000 in v ožjem okoljevarstvenem območju Gore (Čop, 2010, 2011). Ker je bilo v prvi fazi njegove gradnje pridobljeno dovoljenje za gradnjo kot pomožni objekt za spremljanje stanja okolja, je observatorij raztresen po širšem območju parcel števil. 310/1 in 310/2 k.o. Kovk. Edini

možni izvor električne energije za napajanje observatorija je javna prostozračna nizkonapetostna električna mreža, ki se konča na bližnji kmetiji. Dobavitelj električne energije je predlagal, da naj si za observatorij zagotovimo vsaj tridnevno avtonomijo. Priključna moč merilnega in telemetrijskega sistema je bila ocenjena na 70 W.



Slika 2: Merilnica za variabilne meritve tlorisne površine 5 m² na robu vrtače pred ureditvijo njene okolice

Električna priključna omarica za observatorij je nameščena na novem betonskem stebri, tretjem po vrsti od priključka na vzhodni strani bližnje domačije. Poleg stebra je začetni jašek instalacijskega kolektorja, ki je vkopan v zemljo. Celoten instalacijski kolektor je od začetnega do končnega jaška dolg preko 190 metrov. Glavni jašek ga deli približno v razmerju 3 : 7, pri čemer je krajša razdalja od njega do začetnega jaška. V glavnem jašku se odcepi še stranska veja dolžine 36 metrov do jaška poleg barake za meritve.

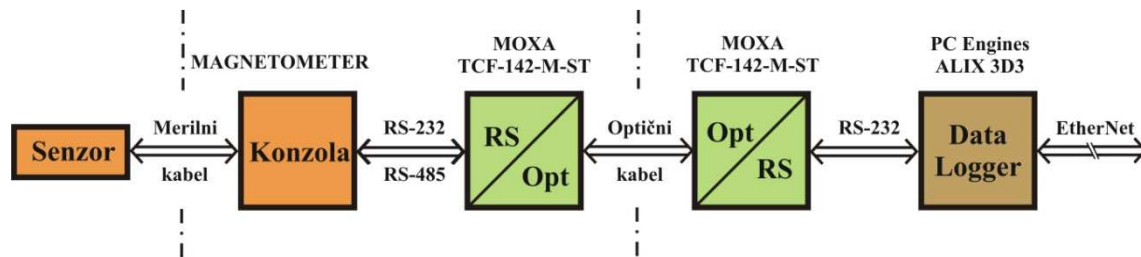
Ozemljitev observatorija je dvojna. Za del, ki je neposredno priključen na javno omrežje, je namenjeno tračno ozemljilo iz pocinkanega valjanca, na katerega so pritrjeni priključki ob vznožju betonskega stebra. Za galvansko ločen del je kot ozemljilo položena bakrena vrv preseka 75 mm² in dolžine 160 m, na katerega se lahko priključuje v začetnem in glavnem jašku.

Za napajanje merilnih instrumentov in telemetrije je zgrajen dvojni galvansko ločen sistem. Prvi sega od priključne omarice do glavnega jaška, drugi pa od glavnega do končnega jaška. Vsak on njiju je zgrajen iz dveh ločilnih transformatorjev nazivne moči 350 VA vezana v kaskado. Magnetometri, komunikacijski pretvorniki, dataloggerji in usmerjevalnik z modemom 2G so napajani iz enosmernega sistema napetosti 12 V. V ta namen so nameščeni akumulatorji 110 Ah v dodatnih jaških poleg glavnega jaška, pri baraki za meritve in poleg končnega jaška.

Telemetrija

Skupaj z razvojem zamisli o postavitvi geomagnetnega observatorija na ozemlju Slovenije se je začela razvijati tudi zasnova sedanje telemetrije na observatoriju (Kraker et

al., 2008). Pred nadaljevanjem njenega razvoja je bilo potrebno določiti osnovno obliko merilnega in ostalega informacijskega sistema, ki se ponovi za vsak magnetometer na observatoriju (Slika 3). Vse te elemente v sistemu za meritve in telemetrijo je med seboj uskladila ustrezno razvita programska oprema. Šele po tej uspešni uskladitvi je lahko sledila njena nadgradnja v več zaporednih fazah.



Slika 3: Blokovna shema magnetometra vključena v sistem merjenja, zajemanje, shranjevanje in pošiljanje merilnih podatkov na Geomagnetnem observatoriju Sinji vrh

Zaradi enostavnejše uporabe in modularne zasnove sistema je bilo odločeno, da bo za zajem meritev vsakega instrumenta skrbel namenski računalnik. Izbran je bil namenski računalnik ALIX.3D3 proizvajalca PC Engines GmbH iz Švice (v nadaljevanju: data logger). Računalnik je zasnovan na kompatibilni arhitekturi i386, ima en vmesnik RS-232 (Recommended Standard 232) za priklop merilnega instrumenta in en mrežni vmesnik Ethernet ter druge standardne vmesnike. Je lahek in majhen, dimenzij 113 x 163 x 30 mm. Data logger poganja prilagojen operacijski sistem Linux, operacijski sistem pa poganja program za zajem izmerjenih podatkov iz vhoda RS-232. Zajeti podatki se najprej shranijo na lokalni polprevodniški pomnilniški disk, ob vzpostavitvi internetne povezave pa se prenesejo na oddaljen centralni strežnik.

Za daljinsko spremljanje geomagnetnih meritev in njihov vpis v centralno relacijsko podatkovno zbirko je bil zasnovan in zgrajen robusten sistem prenosa merilnih podatkov na centralni strežnik. Omenjeni sistem sestavljajo:

- komunikacijski kanal, ki temelji na internetnih tehnologijah,
- programska oprema za prenos podatkov iz data loggerjev na centralni podatkovni strežnik,
- in podatkovna zbirka ter pripadajoča programska oprema za vpis in naknadno obdelavo (post processing) izmerjenih podatkov.

Komunikacijski kanal med data loggerji in centralnim strežnikom temelji na internetnih tehnologijah. Zato je v observatoriju nameščen mrežni usmerjevalnik Digi ConnectPort WAN VPN. Ta uporablja Telekomov paketni prenos podatkov GSM 2G / GPRS (Global System for Mobile Communications, second generation / General Packet Radio services) za povezavo na internet. Sam prenos podatkov pa poteka po protokolu SCP (Security Copy), ki poskrbi za preverjanje integritete in potrjevanje prenosa podatkov.

Rezultati daljinskega prenosa merilnih podatkov

Sistem za zajemanje, prenos in prikaz merilnih podatkov v realnem času je omogočil sprotno spremljanje, analizo in razlago sprememb zemeljskega magnetnega polja na

observatoriju. Pri tem so pomembni viri dodatnih informacij tako internet kot tudi poročila sosedov na Gori.

S primerjanjem podatkov iz satelitov, ki delujejo kot solarni observatoriji (SOHO, 2011, SDO, 2011), je mogoče napovedati nastanek geomagnetne nevihte v naslednjih 72 urah. Te napovedi je mogoče točneje potrditi nekaj ur vnaprej s pomočjo meritev na satelitih vrste GEOS, večnamenskih geostacionarnih satelitih za raziskavo magnetosfere. Podatki o planetarnem geomagnetnem indeksu Kp, ki jih sproti objavljajo na spletnih straneh za spremljanje in napoved vremena v vesolju (Philips, 2011, CSWC, 2011), pa služijo za prvo preverjanje meritev iz observatorija. Minutne rezultate meritev na njem se preverja s pomočjo objav na spletnih straneh posameznih geomagnetnih observatorijev (Belsk, 2011). Najprimernejša oblika za primerjavo in izmenjavomerilnih rezultatov sosednih geomagnetnih observatorijev pa bi bila šele lokalna informacijska mreža za primerjavo sekundnih merilnih podatkov. V to mrežo bi bili poleg našega observatorija vključeni lahko še: Tihany (THY) in Nagycenk (NCK) na Madžarskem, L'Aquila (AQU) v Italiji in Grocka (GCK) v Srbiji. V njej bi lahko sodelovali tudi raziskovalci iz Avstrije (geomagnetni observatorij Wien Kobenzl, WIK, vključen v Geomagnetic Data Master Catalogue), Hrvaške in Makedonije.

Sprememba vremena je naslednji pomemben izvor izjemnih sprememb zemeljskega magnetnega polja na observatoriju. Nanj izrazito močno vplivajo prehodi vremenskih front in sprememba vlažnosti zraka. Za podrobnejšo analizo in za nadaljnjo korelacijo med ostalimi vremenoslovnimi podatki bi bilo potrebno na observatoriju ali v njegovi neposredni bližini postaviti avtomatsko vremenoslovno postajo. Prav tako bi bila potrebna primerjava med seizmološkimi meritvami in spremembami zemeljskega magnetnega polja.

Nadaljnji razvoj

Poleg boljše razlage merilnih podatkov je v naslednjem kratkoročnem obdobju potrebno poskrbeti za samodejno obdelavo podatkov po priporočilih mednarodnih organizacij IAGA (Belsk, 2011) in INTERMAGNET (Jankowski & Suckdorff, 1996) ter za sekundarno shranjevanje merilnih podatkov. Pri tem bi želeli uporabiti že izdelano in preizkušeno programsko opremo, ki bi jo vključili v naš sistem meritev, zajemanja merilnih podatkov, njihovega prenosa, shranjevanja in obdelave.

Za zanesljivo obratovanje geomagnetnega observatorija Sinji vrh je potrebno do konca razviti postopke za redno testiranje vseh naprav na observatoriju in za njihovo redno vzdrževanje. Razviti je potrebno tudi najprimernejše načine odstranjevanja napak ob izpadih posameznih merilnih sistemov, napajalnega sistema ali telemetrije.

Literatura

- ČOP, Rudi. ed al. Začetne meritve variacij geomagnetnega polja v Sloveniji. *Elektrotehniški vestnik*, 2011, vol. 78, n.3, p. 96-101. ISSN: 0013-5852 (Slovenska izdaja), 2232-3228 (English Edition), 2232-3236 (EV Online).
- ČOP, Rudi. *Predlog načina gradnje Geomagnetnega observatorija Sinji vrh*. Interno poročilo. Sežana: Visokošolsko Središče Sežana; Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo, 25. julija 2010.
- ČOP, Rudi. Gradnja geomagnetnega observatorija pod Sinjim vrhom nad Ajdovščino. Urednik Miran Kuhar. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2010 : zbornik predavanj*. V Ljubljani: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2011, str. 59-64.

- KRAKER, Peter. et al. Telematic System for Geomagnetic Field Monitoring. International Scientific Conference on Magnetism – Geomagnetism –Biomagnetism MGB-2008. Abstract booklet. Sežana (SLO): Higher Education Centre Sežana; Laboratory for Geomagnetism and Aeronomy, 7th and 8th November 2008. ISBN: 9879619195512.
- Solar and Heliospheric Observatory SOHO* [online]. SOHO is a projekt of international cooperetion between ESA and NASA. Last modification 18 November 2011 [cited 19-11-2011]. Available from: <<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>>.
- Solar Dynamics Observatory SDO [online]. Goddard Space Flight Center [cited 19-11-2011]. Available from: <<http://sdo.gsfc.nasa.gov/>>.
- PHILIPS, Tony. *Spaceweather.com* [online]. News and information about the SUN-Earth anvironment. Spaceweather.com, 2010 [cited 19-11-2011g. Available from: <<http://www.spaceweather.com/>>.
- Current Space Weather Conditions* [online]. NOAA / National Weather Service Boulder (CO; US): NOAA/ National Weather Service; National Centers for Environmental Prediction; Space Weather Prediction Center, last modified: November 5, 2007 [cited 19-11-2011]. Available from: <<http://www.swpc.noaa.gov/index.html>>.
- Research group for geomegnetic observations* [online]. Belsk (BEL). Belsk (P): Polish Academy of Science; Institute of Geophysics [cited 20-11-2011]. Available from: <http://www.igf.edu.pl/en/obserwatoria/cog_belsk/zespol_obserwacji_geomagnetycznych>.
- JANKOWSKI, Jerzy. SUCKSDORFF, Christian . *Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice*. Boulder (CO, US): International Association of Geomagnetism and Aeronomy; NOAA Space Environment Center, 1996. ISBN: 0965068625.
- INTERMAGNET Technical Reference Manual*. Version 4.5. Edited by: Douglas F. Trigg, Richard L. Coles. Prepared by: Diane Regimbald. Edinburgh (UK): British Geological Survey, 2011.

Vpliv zunanje temperature na koncentracijo radona v Postojnski jami

Asta Gregorič*, Janja Vaupotič* in Stanka Šebela**

Povzetek

Kontinuirne meritve koncentracije radona na dveh merilnih mestih, v Lepih jamah in na najnižji točki, kažejo v grobem na enoten letni cikel z višjimi poletnimi (med okrog 4 in 6 kBq m⁻³) in nižjimi zimskimi koncentracijami radona (med 1 in 2 kBq m⁻³). Obe merilni mesti se razlikujeta po geomorfoloških značilnostih rovov, kar vpliva na lokalno gibanje zračnih mas v različnih letnih obdobjih. Največji vpliv na kroženje zraka v jami ima spreminjanje temperature zunanjega zraka.

Uvod

V Postojnski jami, ki je najdaljša in najbolj obiskana kraška jama v Sloveniji, potekajo meritve naravnega radioaktivnega plina radona (²²²Rn) že od leta 1995 (Vaupotič et al., 2001). Znano je namreč, da se radon zaradi slabe prezračenosti kopiči v rudnikih in kraških jamah in je lahko potencialno zdravstveno tveganje predvsem za vodiče, ki se v jami zadržujejo največ časa. Od leta 2005 merimo koncentracijo radona s kontinuirnimi merilniki na Veliki gori (P1) in v Lepih jamah (P2), od 2010 v Pisanem rovu in dodatno od začetka leta 2011 na najnižji točki turističnega dela jame (NT) (Gregorič in Vaupotič, 2011; Gregorič et al., 2011). Vzporedno z meritvami radona potekajo od leta 2008 tudi kontinuirne meritve temperature na merilnih mestih P1 in P2 (Šebela in Turk, 2011a).

Zaradi velike dolžine rovov, velikih vhodov na različnih višinah, ponora reke Pivke ter velikih nihanj zunanje temperature in padavin med letom, je Postojnski jamski sistem precej zapleten klimatski sistem (Slika 1, prikaz a). Kljub temu za vse točke v jami velja enoten letni cikel z visokimi koncentracijami radona poleti in nizkimi koncentracijami tega plina v zimskem času. Pozimi je zrak v jami toplejši od zunanjega, zato je lažji in se dviga. S tem se sproži tako imenovani »efekt dimnika«. Topel zrak izhaja skozi vertikalne razpoke in manjše višje ležeče odprtine, kar omogoči vdor hladnega zunanjega zraka z nizkimi koncentracijami radona v jamski sistem skozi večje nižje ležeče vhode (Slika 1, prikaz b). V poletnem času je ventilacija zraka obrnjena in šibkejša (Slika 1, prikaz c), zato se koncentracije radona v jami povišajo (Gregorič in Vaupotič, 2011). V pomladanskem in jesenskem času, ko se režim menja, pa lahko opazimo tudi dnevna nihanja koncentracije radona, ki so predvsem izrazita na merilnih mestih v Lepih jamah in na Najnižji točki. Razlike v letnem ciklu nihanja koncentracije radona opazamo lokalno zaradi geomorfoloških posebnosti, ki vplivajo na gibanje zraka.

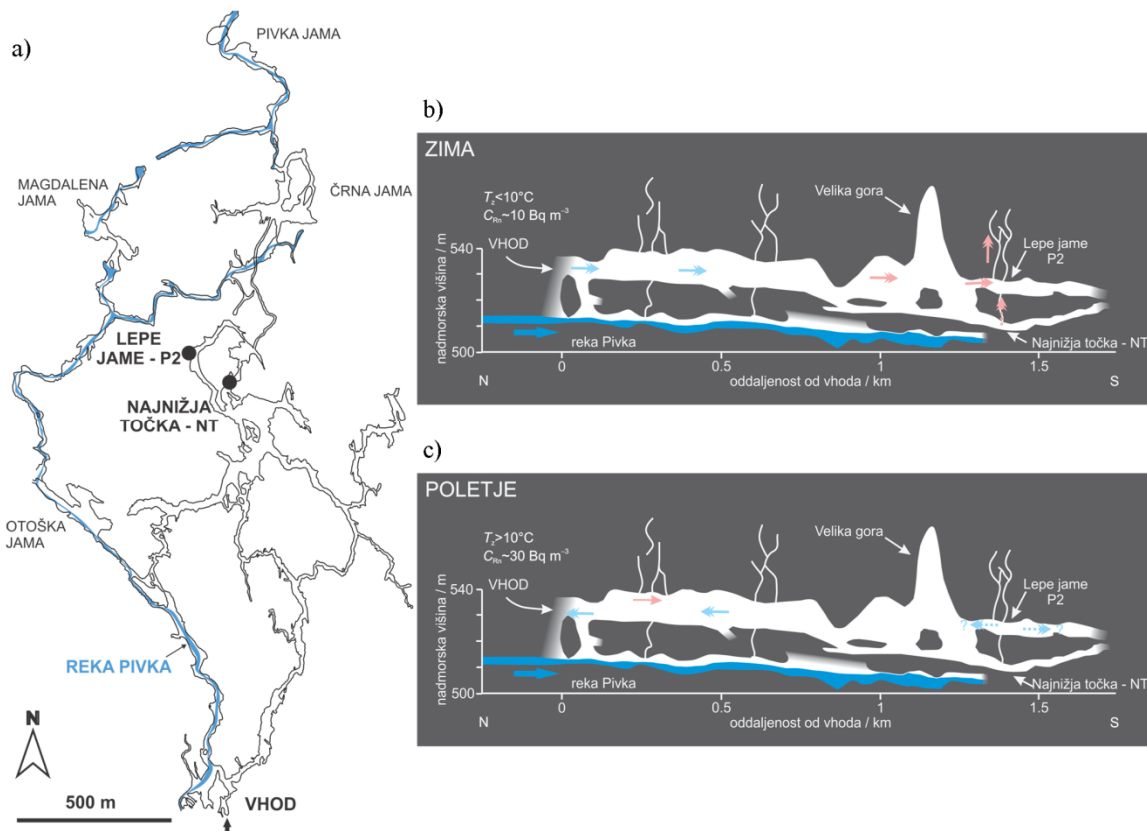
V prispevku primerjamo in analiziramo nihanje koncentracije radona na merilnih mestih P2 in NT v letih 2010 in 2011 in odvisnost le-te od gibanja zraka v različnih obdobjih. Za razumevanje in interpretacijo gibanja zraka na merilnem mestu P2 so zelo pomembni tudi urni podatki temperature zraka na tej lokaciji.

Opis meritev

* Institut "Jožef Stefan", Jamova cesta 39, SI-1000 Ljubljana

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

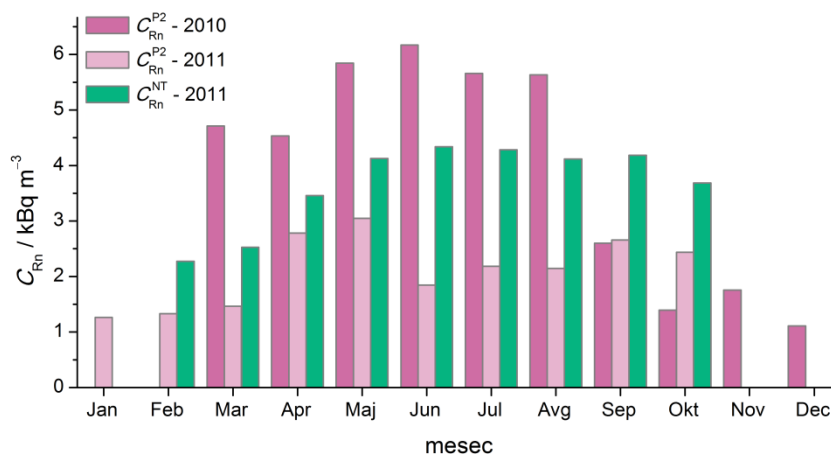
Koncentracijo radona na merilnem mestu P2 merimo s kontinuirnim merilnikom Radim 5 WP (SMM Company, Češka republika) (občutljivost 50 Bq m^{-3}), na merilnem mestu NT pa z merilnikom Barasol (MC-450, ALGADE, Francija), ki je namenjen predvsem meritvam v okoljih z višjimi koncentracijami radona in ima zato višjo spodnjo mejo detekcije in nekoliko manjšo natančnost. Merilnika shranjujeta podatke s frekvenco 1 h^{-1} . Poleg radona na merilnem mestu P2 beležimo temperaturo zraka z avtomatskim instrumentom proizvajalca Van Essen (t. i. *diver*, temperaturna natančnost $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$). Merilno mesto P2 leži v umetno povečanem stranskem rovu v Lepih jamah, merilno mesto NT pa na najnižji točki turističnega dela jame.



Slika 1 – a) tloris Postojnskega jamskega sistema z označenima merilnima mestoma P2 in NT; b) skica vzdolžnega preseka Postojnske jame, s puščicami je nakazana smer gibanja zraka v zimskem času; c) skica vzdolžnega preseka Postojnske jame, s puščicami je nakazana smer gibanja zraka v poletnem času

Rezultati meritev

Skladno z znanim zimskim in poletnim režimom ventilacije v jami so koncentracije radona višje v poletnem kot v zimskem času na obeh merilnih mestih (Slika 2). Povprečna poletna koncentracija radona se na P2 v letih 2010 in 2011 izrazito razlikuje in je bila leta 2010 $5080 \pm 1800 \text{ Bq m}^{-3}$, leta 2011 pa le $2480 \pm 970 \text{ Bq m}^{-3}$. Pozimi so koncentracije na P2 primerljive, v povprečju okrog 2000 Bq m^{-3} (Tabela 1). Povprečna koncentracija radona na merilnem mestu NT je $4090 \pm 720 \text{ Bq m}^{-3}$ v toplem in $2910 \pm 1230 \text{ Bq m}^{-3}$ v hladnem delu leta.



Slika 2 – mesečna povprečja koncentracij radona na merilnem mestu P2 (C_{Rn}^{P2}) v letu 2010 in 2011 in na merilnem mestu NT (C_{Rn}^{NT}) v letu 2011

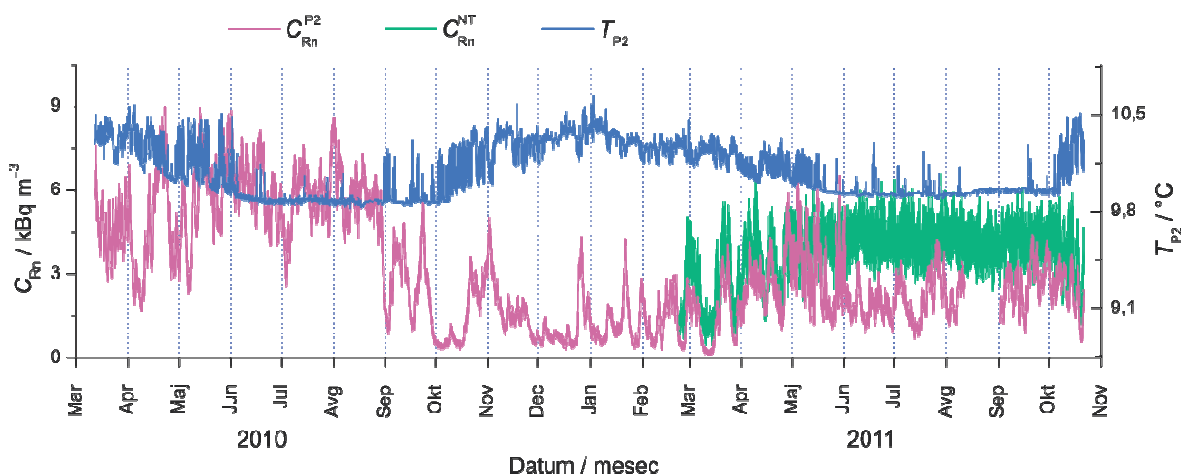
Sezonsko nihanje temperature na merilnem mestu P2 je obratno kot nihanje temperature zunanjega zraka. Temperatura je najnižja in skoraj konstantna poleti (okoli 9,9–10 °C), v preostalih treh letnih časih, ko zunanje temperature (vsaj del dneva) padejo pod jamsko temperaturo 10–11 °C, se prične temperatura zraka na P2 zelo spreminjati in je v povprečju izrazito višja kot poleti. Velika temperaturna nihanja v dnevnem ciklu, do katerih prihaja predvsem v prehodnih obdobjih spomladi in jeseni, so v glavnem posledica spreminjanja smeri gibanja lokalnih zračnih mas v jami (Šebela in Turk, 2011b).

Tabela 1 – srednja vrednost in standardni odklon koncentracije radona na merilnih mestih P2 in NT in temperature na merilnem mestu P2 za tople in hladne dele leta 2010 in 2011

	$\bar{x} \pm \sigma$			
	april–september		januar–marec, oktober–december	
	2010	2011	2010	2011
$C_{Rn}^{P2} / Bq m^{-3}$	5080 ± 1800	2480 ± 970	2010 ± 1580	1560 ± 920
$C_{Rn}^{NT} / Bq m^{-3}$	/	4090 ± 720	/	2910 ± 1230
$T_{P2} / ^\circ C$	10,0 ± 0,2	10,0 ± 0,1	10,3 ± 0,1	10,2 ± 0,1

Nizke koncentracije radona v zimskem času (ko so zunanje temperature nižje od temperatur zraka v jami) so predvsem posledica vdorov svežega zunanjega zraka z nižjo koncentracijo radona skozi večje nižje ležeče vhode (Slika 1, prikaz b). Toplejši jamski zrak je lažji in se zato dviguje in izhaja iz jame skozi razpoke in manjše odprtine. Na merilnem mestu P2 prihaja zrak iz glavnega rova Lepih jam in nižjih delov jame. Zato v obdobju z zimskim režimom ventilacije opazamo visoko korelacijo med koncentracijami radona na merilnih mestih P2 in NT (Slika 3), obenem pa tudi višje temperature zraka z večjimi nihanji na P2.

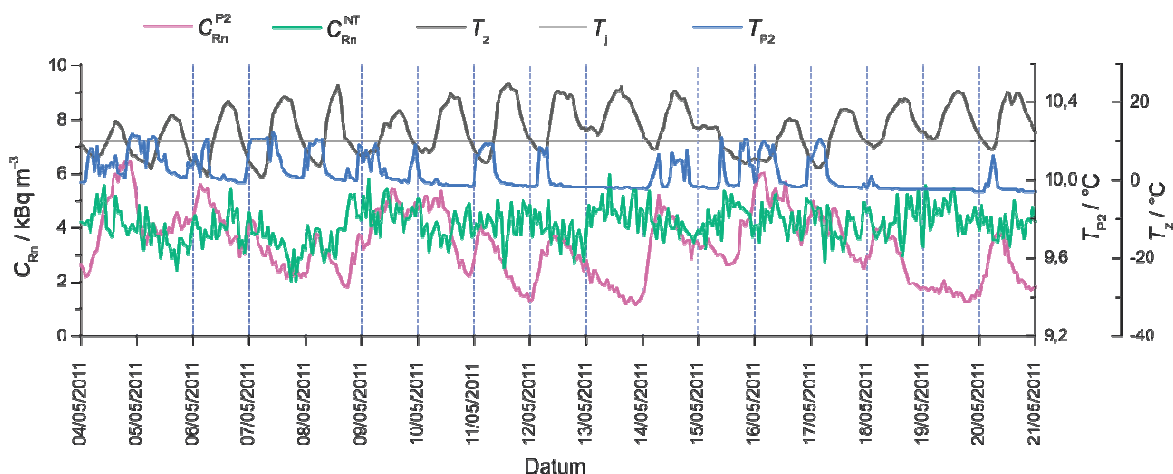
Poleti, ko so temperature zunanjega zraka višje od temperatur v jami, je gibanje zraka počasnejše, kar povzroči kopičenje radona v jamskem zraku in zato višje koncentracije. Ta vzorec lahko opazimo na merilnem mestu na najnižji točki (NT) poleti, ko so koncentracije radona konstantno visoke, brez izrazitih nihanj.



Slika 3 – primerjava časovnih nizov koncentracije radona na P2 (C_{Rn}^{P2}) in NT (C_{Rn}^{NT}) in temperature na P2 (T_{P2}) od marca 2010 do oktobra 2011

Drugačen ciklus gibanja zraka pa opazamo na merilnem mestu P2, kjer so večja nihanja v koncentraciji radona značilna tudi za poletno obdobje (Slika 3). Na tem merilnem mestu se poleti temperatura izrazito razlikuje od temperature v drugih treh letnih časih (Slika 3), kar kaže na lokalno spremembo gibanja zračnih mas v tem delu jame.

Opazamo pa tudi, da so se koncentracije radona na P2 od obsežnejših poplav septembra 2010 znižale na najnižjo raven, kljub jesenskim temperaturam, ki so podobne jamskim. Od takrat dalje so koncentracije radona na P2 v vsem letu občutno nižje kot v preteklih letih. Zaznati je tudi občutno znižanje koncentracije radona vsakokrat, ko se vzpostavi poletni režim ventilacije in je opazno znižanje temperature na P2 na poletni nivo (9,89 °C) (Slika 4).



Slika 4 – izsek časovnega niza koncentracije radona na merilnem mestu P2 (C_{Rn}^{P2}) in NT (C_{Rn}^{NT}), temperature na merilnem mestu P2 (T_{P2}), temperature zunanjega zraka (T_z) in povprečne temperature v jami (T_j)

Zaključek

Za Postojnski jamski sistem sta značilna izrazit zimski in poletni režim ventilacije, kar se odraža na visokih poletnih in nizkih zimskih koncentracijah radona. Največji vpliv na ventilacijo ima temperatura zunanjega zraka. V zimskem obdobju, ko prevladuje »efekt dimnika«, so koncentracije radona na obeh merilnih mestih, v Lepih jamah in na najnižji točki, primerljive, medtem ko opažamo izrazito nižjo korelacijo koncentracije radona med obema merilnima mestoma poleti. Takrat je prezračevanje precej počasnejše in so koncentracije radona na najnižji točki konstantno višje, brez izrazitih nihanj. Nasprotno pa so koncentracije radona v Lepih jamah poleti odvisne od dotoka zraka iz neznanega ozadja, kar hkrati vpliva tudi na znižanje temperature na najnižji nivo. Izrazito spremembo v koncentracijah radona lahko opazimo v Lepih jamah po poplavih septembra 2010, saj so od takrat dalje koncentracije na tem merilnem mestu izrazito nižje kot v prejšnjih letih. Možna razlaga bi bila, da se je v času poplav jeseni 2010 v delu jame, od koder doteka zrak med poletnim režimom ventilacije, odprl dodaten »prehod«, skozi katerega vdira zrak z nižjo koncentracijo radona.

Literatura

- Gregorič, A., Vaupotič, J. 2011. Radon concentration and ventilation in two different passages in the Postojna Cave. European Geoscience Union, General Assembly 2011, Vienna, Austria, 03-08 April 2011.
- Gregorič, A., Zidanšek, A., Vaupotič, J. 2011. Dependence of radon levels in Postojna Cave on outside air temperature. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 1523–1528.
- Šebela, S., Turk, J. 2011a. Local characteristics of Postojna Cave climate, air temperature, and pressure monitoring. *Theor. and Appl. Climatol.*, 1–16.
- Šebela, S., Turk, J. 2011b. Klimatske značilnosti Postojnskega jamskega sistema, v: Kuhar, M. (Ur.), *Raziskave s področja geofizike in geodezije, 2010: zbornik predavan.* Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 7–11.
- Vaupotič, J., Csige, I., Radolič, V., Hunyadi, I., Planinič, J., Kobal, I. 2001. Methodology of radon monitoring and dose estimates in Postojna Cave, Slovenia. *Health Phys.* 80, 142–147.

Raziskave pretakanja padavin skozi vadozno cono Kraških vodonosnikov

Janja Kogovšek*

Povzetek

Kraški vodonosniki dajejo v Sloveniji velik del pitne vode. Zato je zelo pomembna kakovost njihove vode. Dolgoročno varovanje teh vodnih virov je možno le na osnovi dobrega poznavanja njihovega delovanja. Pogosto so kraški vodonosniki zelo kompleksni sistemi, ki se napajajo z infiltracijo padavin in s površinskimi vodnimi tokovi. Dinamika napajanja z vodnimi tokovi je že razmeroma dokaj dobro poznan proces, pretakanje infiltriranih padavin in z njimi prenos snovi neposredno s kraškega površja, pa je še slabo raziskano. Prispevek podaja raziskave pretakanja padavin skozi 100 m debelo vadozno cono Postojnske jame. Obsega rezultate zveznih meritev padavin na površju in pretokov curkov v jami v času štirih zaporednih hidroloških let, ki so pokazale dinamiko pretakanja padavin skozi vadozno cono ob različnih kombinacijah pogojev na površju in v vadozni coni. Ugotovljeno je bilo, da prihaja v deževnih obdobjih ob dobro namočeni prsti in relativno zapolnjeni vadozni coni do zveznega pretakanja po celotni hierarhiji razpok, medtem ko prihaja v sušnih obdobjih do pomembnih procesov shranjevanja vode v vadozni coni. Na dinamiko pretakanja vode pa je neposredno vezan tudi prenos kontaminantov.

Uvod

Okoli 12 % kontinentalnega dela našega planeta gradijo karbonatne kamnine, v Evropi 35 % in v Sloveniji okoli 44 %, in kar četrtnina svetovnega oz. polovica slovenskega prebivalstva se oskrbuje z vodo iz kraških vodonosnikov. Ti so pogosto obsežni in zelo heterogeni vodni sistemi, saj se poleg napajanja z infiltracijo padavin napajajo tudi z rekami ponikalnicami, vanje pa lahko zatekajo tudi vode z nekraškega sveta. Vsi ti viri napajanja pa pomenijo tudi možnost vnosa onesnaženja v vodonosnik. Vodni tokovi pomenijo hiter prenos onesnaženja, pomemben pa je tudi neposreden prenos onesnaženja s površja skozi vadozno cono vodonosnika, ki je bil do sedaj podcenjen.

Raziskave vadozne cone v preteklosti so nakazovale, da se padavine, ki se sorazmerno hitro infiltrirajo v vadozno cono, lahko v tem delu vodonosnika zadržijo tudi daljši čas (Mangin, 1973, Bakalowicz et al., 1974, Kogovšek in Habič, 1981, Williams, 1983, Kogovšek, 1982, 1983, 1984, 1990, 1994b, 1994a, 2000, Pezdič et al., 1984, Smart in Friedrich 1986, Klimchouk 1995, Stichler et al., 1997, Jeannin in Grasso 1995, Maloszewski et al., 2002, Perrin et al., 2003a, Trček 2003). To znanje je bilo pridobljeno z opazovanjem izvirov, z opazovanji v vadozni coni le krajši čas, ali pa dolgotrajnejše raziskave niso zajele curkov z bistveno različno prepustnostjo zaledja, ki bi bili reprezentativni za celotno vadozno cono. Zato sem zasnovala lastne raziskave na območju Postojnske jame. V okviru večparametrskih raziskav, ki so temeljile na zveznih meritvah in analizah prek več zaporednih hidroloških let, sem spoznala tudi dinamiko pretakanja infiltriranih padavin in se posebej posvetila dogajanju v vodnih valovih po padavinskih dogodkih.

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

Območje raziskav in metode dela

Raziskave pretakanja padavin skozi vadozno cono krasa so potekale v Postojnski jami z debelino vadozne cone 100 m. Debelina jamskega stropa oz. debelina vadozne cone je bila določena na osnovi stabiliziranega poligona v jami in prenosa poligonskih točk na površje. Izmera elementov poligona je bila napravljena z elektronskim razdaljemerom NIKON DTM-A10 LG (Drole, 1992). Na površju nad raziskovalnim poligonom v jami so potekale meritve padavin z dežemerom s shranjevalnikom podatkov HOBO Event Logger RG2-M, podjetja ONSET, ki zabeleži vsakih 0,2 mm padavin (slika 2). Podatki padavin so bili osnova za izračun efektivne infiltracije. Izračun je bil narejen po metodologiji, ki jo je opisala M. Petrič (2001, 2002). Sočasno so v jamskem rovu potekale meritve pretoka in fizikalnih parametrov več curkov. Za dolgotrajno zvezno spremljanje sem izbrala tri reprezentativne curke: večji nestalen curek I s pretokom do 4000 ml/min, stalni curek J s pretokom do 130 ml/min (Slika 3) in stalni curek L s pretokom do 10 ml/min.

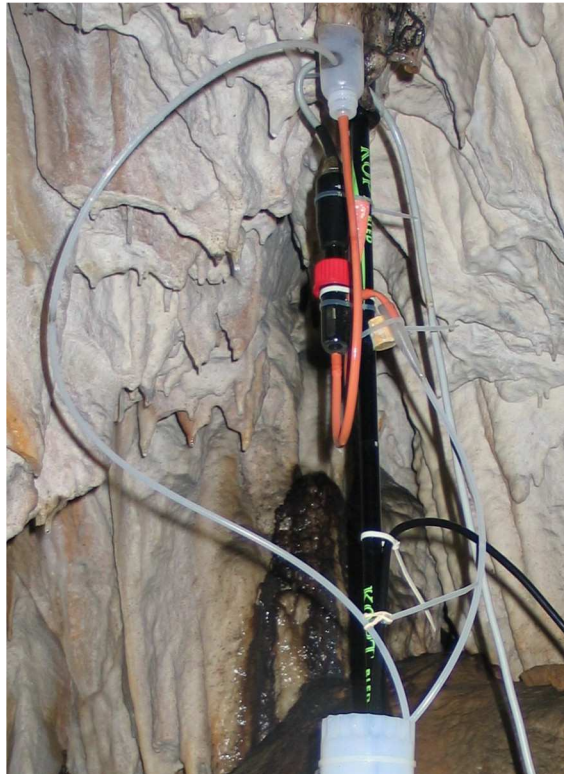
Curek I doteka vrh kope, kjer smo naredili manjšo zaježitev z vgrajenim prelivom. Ob njem smo pritrdili sondo za merjenje nivoja za izračun pretokov (Gealog S podjetja Logotronic). V neposredni bližini smo pritrdili še kombinirano sondo (YSI) za meritve temperature, specifične električne prevodnosti - EC. Vodo curka J smo speljali v posodo z majhnim iztokom, v kateri smo s sondo merili višino vode in EC vsakih 15 minut (Gealog S). Enako kot za curek I sem z občasnimi vzporednimi ročnimi meritvami pretoka izdelala umeritveno krivuljo in izračunala funkcijsko odvisnost pretoka od nivoja za izračun pretokov. Pretok curka L oz. kapljanja sem merila najprej s prirejenim evaporimetrom z mehansko uro, kasneje pa z dežemerom s shranjevalnikom podatkov HOBO Event Logger RG2-M.



Slika 1: Območje raziskav (bela polna puščica), padavinska postaja (črtkana bela puščica) in za orientacijo vhod v Postojnsko jamo (črtkana siva puščica)



Slika 2: Meritve padavin na površju nad raziskovalnim poligonom v Postojnski jami



Slika 3: Meritve pretoka, temperature in električne prevodnosti curka J v Postojnski jami, 100 m pod površjem

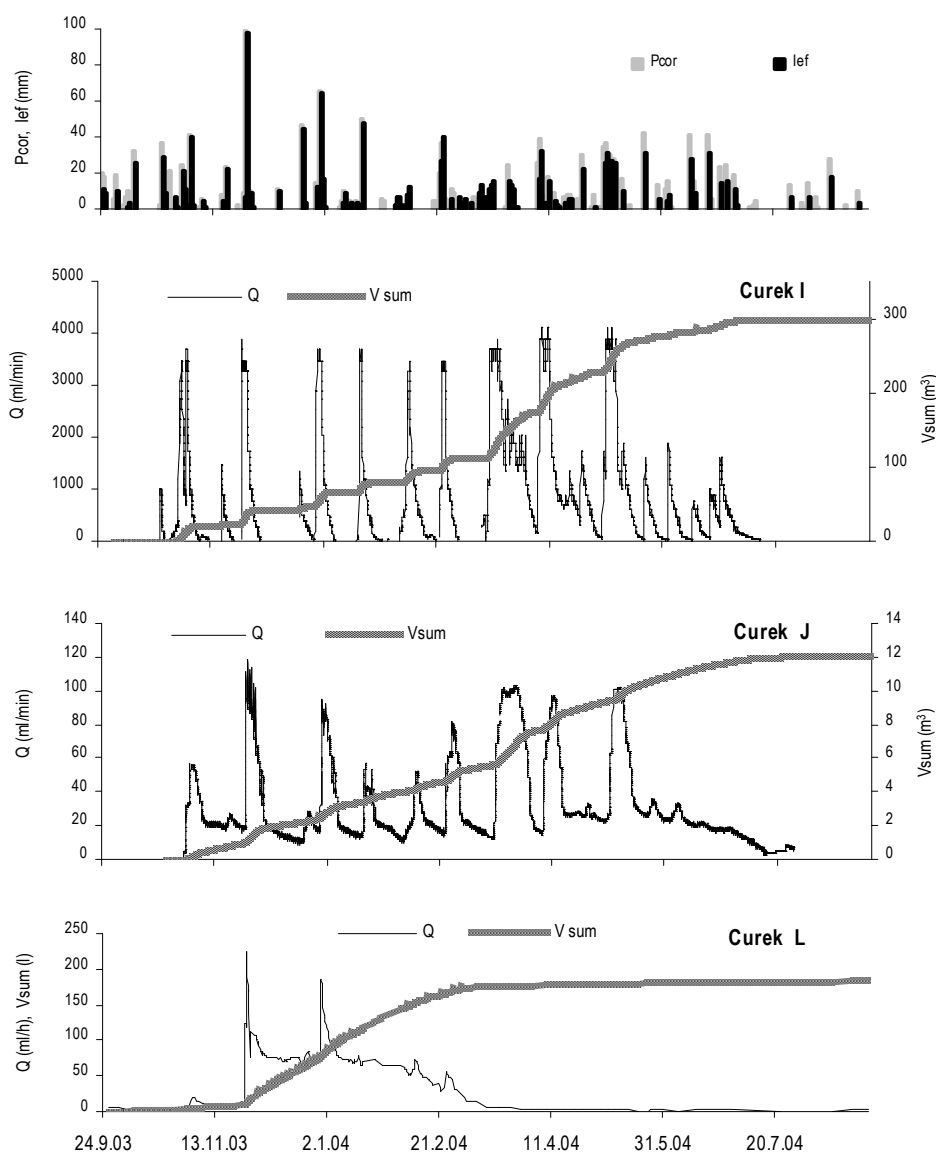
Rezultati

Letna količina padavin v hidrološkem letu 2003-04 je bila 1618,3 mm, letna količina efektivno infiltriranih padavin pa 1225,9 mm (75,8 %). Pozno jesenske in zgodnje zimske padavine dokaj dobro sovpadajo s količino efektivno infiltriranih padavin (I_{ef}). Večja

odstopanja nastopajo v času snežnih padavin in nizkih temperatur, spomladi v času prebujajoče se vegetacije s povečano transpiracijo in v toplih poletnih mesecih s povečano evapotranspiracijo (Slika 4).

Občasni curek I s pretokom do 4000 ml/min na dovolj izdatne padavine reagira najhitreje. V namočenih obdobjih oblikuje vodne valove s hitrim naraščanjem pretoka, ko doseže pretok maksimalno vrednost v 6 do 60 urah, ob izostanku padavin pa hitro presahne. V jesensko-zimskem obdobju hidrološkega leta 2003-04 je 5-krat presahnil za 3 do 15 dni (Slika 4).

V manjšem stalnem curku J s pretokom do 130 ml/min, kjer je letna iztekla količina več kot 20-krat manjša od curka I, prihaja do močnega dušenja infiltriranih padavin. Curek prek leta nikoli ne presahne, na padavine pa reagira z večjimi časovnimi zamiki v primerjavi s curkom I. Za njegove vodne valove je značilno počasno naraščanje in upadanje pretoka.

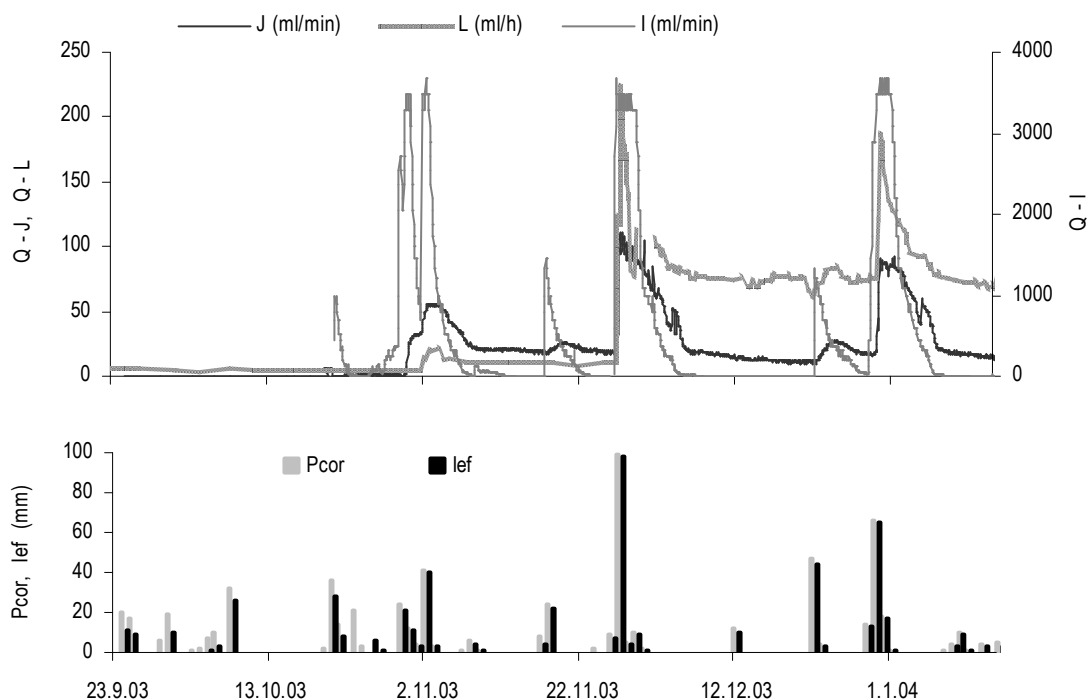


Slika 4: Padavine (P_{cor}), efektivna infiltracija (I_{ef}) ter hidrogrami s kumulativno krivuljo (V_{sum}) opazovanih curkov I, J in L za hidrološko leto 2003-04

Po daljšem poletnem sušnem obdobju je konec oktobra 2003 na padavine reagiral 2,5 dni za curkom I (slika 5), v dobro namočenih obdobjih pa je ta časovni zamik opazno manjši. Hidrograma curkov I in J sta si v pojavljanju zaporednih vodnih valov dokaj podobna. Le ko curek I presahne za krajša obdobja, je pretok curka J v počasnem upadanju in ne upade pod 10 ml/min, razen konec hidrološkega leta, ko dosega minimalne vrednosti.

Največji vodni valovi SO nastopaLI pri curkih I in J v spomladanskem obdobju od srede marca dalje, čeprav je bila tedaj povprečna dnevna efektivna infiltracija celo nekoliko manjša (4,3 mm/dan) kot v jesensko-zimskem obdobju (4,5 mm/dan). V spomladanskem obdobju je izteklo skozi curek I 1,6-krat več, skozi curek J pa 1,1-krat več vode kot v jesensko-zimskem obdobju, kar se vidi tudi iz kumulativnih krivulj iztekle prenikle vode. Primerjava kumulativnih krivulj obeh curkov nakazuje bolj enakomerno iztekanja infiltriranih padavin skozi curek J, kar pomeni večjo homogenizacijo v vadozni coni. To so potrdile tudi meritve drugih parametrov.

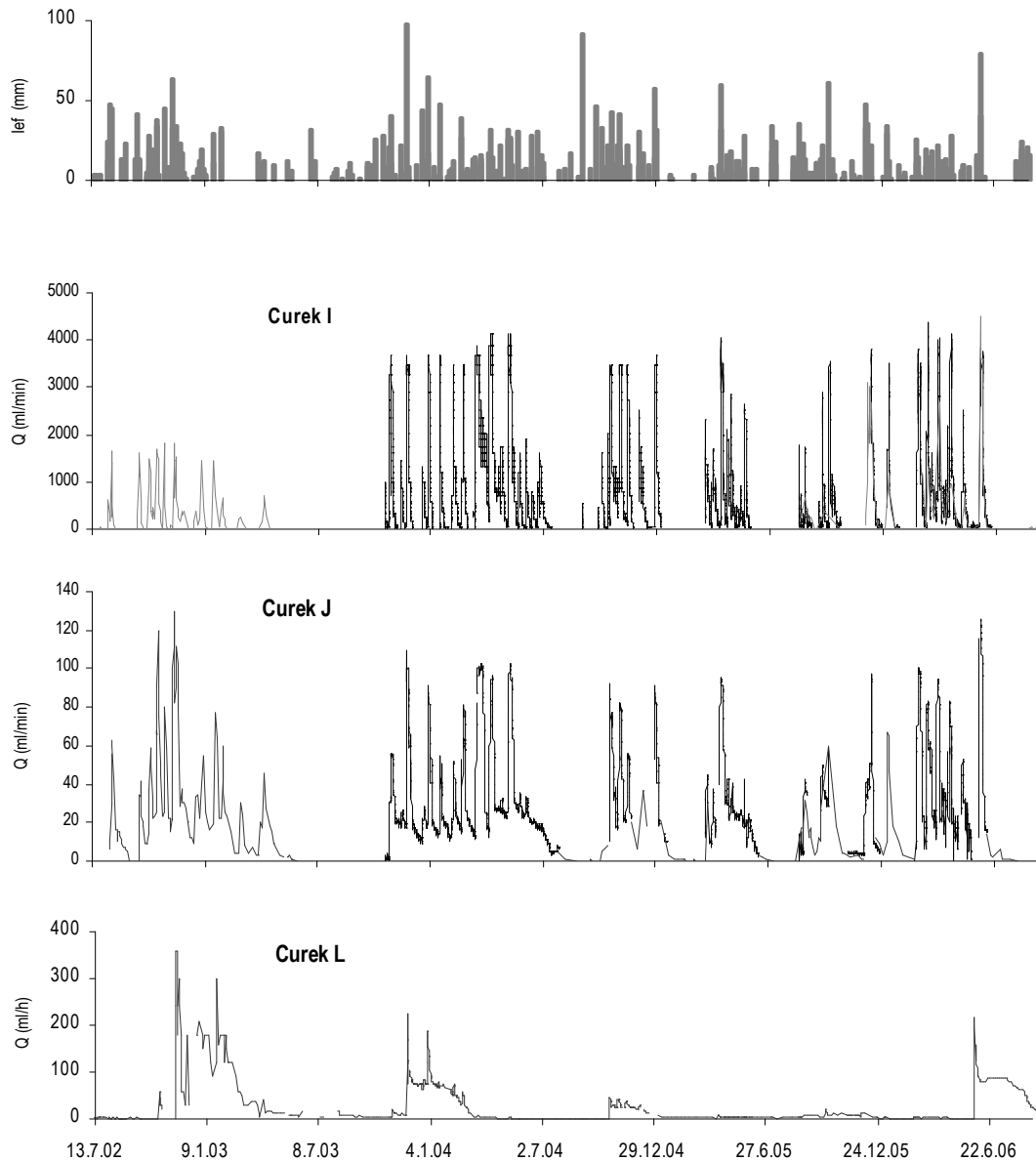
Bistveno drugačen je hidrogram curka L (Slika 4). Na padavine po poletnem sušnem obdobju oktobra 2003 je minimalno reagiral, skoraj 3 dni za curkom J in 5 dni za curkom I. Izrazita reakcija je sledila šele konec novembra po naknadnih izdatnih padavinah (slika 5). V obdobju treh in pol mesecev je nato prišlo do povečanega zveznega iztekanja vode z dvema izrazitima viškoma po najizdatnejših padavinah. Kasnejše večje padavine so se le minimalno odrazile v pretoku, ki je stalno počasi upadal. To nakazuje, da je v danih razmerah prihajalo predvsem do shranjevanja vode v dokaj spraznjenem zaledju curka L. Le-to se zaradi slabe prepustnosti počasneje zapolnjuje kot zaledje curkov z bolj prepustnimi prevodniki, ki se hitreje zapolni in tudi hitreje sprazni.



Slika 5: Reakcija pretokov značilnih curkov I, J in L na padavine po daljšem sušnem poletnem obdobju.

V sledečih dveh hidroloških letih so upadali letna količina padavin, količina efektivno infiltriranih padavin in delež infiltracije. V hidrološkem letu 2004-05 in v začetku

hidrološkega leta 2005-06 smo tako beležili skromnejše vodne valove pri curkih v jami, šele nato pa so se zopet oblikovali izdatnejši (Slika 6). Tudi potek EC je bil vzporedno bistveno drugačen. Vse to nakazuje drugačen način infiltracije, pomembne procese shranjevanja in posledično drugačno iztekanje vode iz zaledja.



Slika 6: Dnevna efektivna infiltracija in hidrogrami opazovanih curkov 100 m pod površjem v obdobju štirih zaporednih hidroloških let

Posamezni tipi curkov v vadozni coni so prispevali v globlje dele kraškega vodonosnika v zaporednih hidroloških letih različne količine vode. Po letni količinski izdatnosti, ob upoštevanju treh hidroloških let, so curki, kot je curek I, v povprečju 23-krat izdatnejši od curkov, kot je curek J, in curki, kot je curek J, kar 80-krat izdatnejši, kot so curki, ki jih predstavlja curek L. Pri tem je potrebno upoštevati tudi pogostost posameznih tipov pretakanja. Če so curki tipa L 80-krat pogostejši kot curki tipa J, bi pomenilo, da v sušnih obdobjih, ko so curki, kot je curek I, običajno suhi, prispevajo v kraški vodonosnik vsaj

enako pomemben del vode kot curki tipa J, občasno pa je prispevek curka L lahko večji, kot je bilo poleti 2006 (Slika 6).

Razmerje med količino vode, ki sta jo v zaporednih hidroloških letih prispevala curka I in J, kaže na vse večji delež stalnega, manjšega curka J. To pomeni, da v bolj sušnih letih z manj padavinami, ko je posledično tudi količina infiltriranih padavin vse manjša, pomembnejši prispevek vode v vodonosnike dajejo manjši stalni curki (kot je curek J) oz. se vodonosniki napajajo predvsem z dotokom vode po mreži manj prepustnih razpok.

Sklepi

Na osnovi rezultatov zveznih meritev padavin na površju ter pretokov v jami smo prišli do pomembnih spoznanj.

Dinamika iztekanja vode iz vadozne cone krasa je neposredno vezana na dotok sveže vode, a ni odvisna le od intenzivnosti in količine učinkovito infiltriranih padavin, temveč tudi od vsakokratne namočenosti prsti ter zapolnjenosti vadozne cone. Le ob dobri namočenosti prsti in ustrezni zapolnjenosti vadozne cone prihaja do zveznega iztekanja po celotni hierarhiji različno prepustnih razpok v vadozni coni. Ob slabi namočenosti prsti, predvsem v sušnih obdobjih, se padavine infiltrirajo le po bolj prepustnih prevodnikih skozi prst in vstopajo po prepustnejših razpokah v vadozno cono, kjer se pretežno shranjujejo.

Primerjava dnevne učinkovite infiltracije na obravnavanem poligonu in hidrogramov opazovanih curkov v štirih zaporednih hidroloških letih je pokazala na bistveno različno pretakanje po različno prepustnih razpokah v vadozni coni (Slika 6). Največji, nestalni curek I (maksimalni pretok okoli 4 l/min) po padavinah hitro odvajava v zaledju shranjeno vodo, s katero se v začetnem delu vodnih valov ob največjih pretokih mešajo tudi sveže infiltrirane padavine. Vendar pa je delež teh v vodnih valovih dosegal le do največ 18 % (meritve električne prevodnosti). Manj izdatni curki, ki so stalni, kot je curek J (maksimalni pretok 130 ml/min), reagirajo na padavine z določenim časovnim zamikom za večjim curkom I (od 1/2 do 2 dni). Njihova zgradba zaledja omogoča dobro homogenizacijo infiltriranih padavin, kar se je odrazilo tako v pretoku kot v drugih merjenih parametrih. Izotopske analize baznega toka curka J so pokazale, da je povprečni zadrževalni čas več kot eno leto, medtem ko je za curek I le 2,5 meseca. Stalno kapljanje L, z maksimalnim pretokom le nekaj ml/min, ima popolnoma svoj vzorec iztekanja. Do zveznega izdatnega praznjenja njegovega pretežno slabo prepustnega zaledja in oblikovanja obsežnega vodnega vala, ki traja do več mesecev, prihaja občasno (ne vsako leto), šele ko je njegovo zaledje dovolj zapolnjeno in prst namočena, da izdatne in intenzivne padavine potisnejo shranjeno vodo iz njegovega zaledja. Tudi ta tip prevodnikov, čeprav je količinsko zelo skromen, je pa pogost, lahko poleg curkov, kot jih predstavlja curek J, pomembno prispeva vodo v kraške izvire v sušnih obdobjih, ko so bolj prepustni prevodniki suhi (kot je curek I). Vendar pa taki dobro prepustni prevodniki v deževnih obdobjih hitro odvajajo velike količine vode, ko prihaja do učinkovitega spiranja širših zaledij kraških izvirov, saj omogočajo tudi hiter prenos morebitnih kontaminantov ob večjih razredčitvah.

V poletnih sušnih obdobjih, ki trajajo od 2,5 do 6 mesecev, se tudi večja količina manj intenzivnih padavin (do 390 mm padavin oz. do 180 mm učinkovito infiltriranih padavin) pretežno shranjuje v zaledje curkov in prihaja le do minimalnega iztoka iz vadozne cone ali pa ta celo izostane. Tako iz vadozne cone minimalno izteka le že predhodno shranjena voda.

Na osnovi izračunov celoletnih količin infiltriranih padavin in iztekle vode skozi opazovane curke v vadozni coni v treh zaporednih hidroloških letih sledi, da prihaja zaradi razlik v infiltraciji (različna razporeditev, intenzivnost in količina padavin) ter zaradi različnih razmer na površju, v prsti in v vadozni coni, do bistveno različnega razmerja med letno količino vode, ki se infiltrira v zaledje, in tisto, ki izteka skozi vadozno cono in napaja globlje dele vodonosnika. Zvezne in intenzivnejše padavine v času hidrološkega leta pogojujejo dobro namočeno prst in dobro zapolnjenost vadozne cone ter zvezno iztekanje vode iz celotne hierarhije povezanih razpok. Pri tem prihaja do iztekanja tudi iz najslabše prepustnih delov vadozne cone, ki se sicer prazni le občasno ob ustreznih pogojih (hidrološko leto 2003-04). Zato pa se padavine, ki sledijo takemu obdobju, v večji meri porabljajo za zapolnjevanje dokaj spraznjenega zaledja in je posledično iztok predhodno shranjene vode iz vadozne cone šibkejši (celo hidrološko leto 2004-05 in vse do februarja 2006). To potrjujejo tudi meritve EC z bistveno drugačnim potekom, ki nakazuje iztekanje pretežno shranjene vode.

Zahvala

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

Literatura

- Bakalowicz, M., Blavoux, B., Mangin, A. 1974. Apport du traçage isotopique naturel à la connaissance du fonctionnement d'un système karstique – teneurs en oxygène-18 de trois systèmes des Pyrénées, France. *Journal of Hydrology*, 23, 1-2: 141-158.
- Drole, F. 1992: Poročilo o prenosu koordinat jamskega poligona Pisanega rova Postojnske jame na površje.- Arhiv IZRK, 2 str. + 3 priloge, Postojna.
- Jeannin, P.-Y., Grasso, A.D. 1995. Recharge respective des volumes de roche peu perméable et des conduits karstiques, rôle de l'épikarst. *Bulletin d'Hydrologie*, 14, 95-111.
- Klimchouk, A. 1995. Karst Morphogenesis in the epikarstic zone. Inter. Symp. on changing karst environments, Oxford and Huddersfield. *Cave and karst science*, 21, 2: 45-50.
- Kogovšek, J., Habič, P. 1981. Preučevanje vertikalnega prenikanja vode na primerih Planinske in Postojnske jame. *Acta carsologica*. 9: 129-148.
- Williams, P.W. 1983: The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61: 45-67.
- Kogovšek, J. 1982. Vertikalno prenikanje v Planinski jami v obdobju 1980/81. *Acta carsologica*, 10: 110-125.
- Kogovšek, J. 1983. Prenikanje vode in izločanje sige v Pisanem rovu Postojnske jame. *Acta carsologica*, 11: 63-76.
- Kogovšek, J. 1984. Vertikalno prenikanje v Škocjanskih jamah in Dimnicah. *Acta carsologica*.12: 49-65.
- Kogovšek, J. 1990. Značilnosti pretakanja padavin skozi strop Taborske jame. *Acta carsologica*, 19: 139-156.
- Kogovšek, J. 1994a. Kombinirano sledenje skozi strop Pivke jame. *Naše jame*, 36: 58-66.
- Kogovšek, J. 1994b. Prenikajoča voda v jamah primorskega krasa. *Annales*, 4, 4: 149-154.
- Kogovšek, J. 2000. Ugotavljanje načina pretakanja in prenosa snovi s sledilnim poskusom v naravnih razmerah. *Annales*, 10, 1=19: 133-142.
- Mangin, A., 1973: Sur la dynamique des transferts en aquifère karstique. *Proc. of the 6th Inter. Cong. of Speleology*, Olomuc, 4: 157-162.
- Perrin, J, Jeannin, P.-Y., Zwahlen, F. 2003a: Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. *Journal of Hydrology*, 279, 1: 106-124.

- Pezdič, J., Leskovšek-Šefman, H., Dolenc, T., Urbanc, J. 1984. Isotopic study of karst water. Final Report on IAEA Research Contract No.2845/RB. J.Stefan Institute, 47p, Ljubljana.
- Petrič, M. 2001. The role of accurate recharge estimation in the hydrodynamic analysis of karst aquifers. *Acta carsologica*, 30, 1:69-84.
- Petrič, M. 2002. Characteristics of recharge-discharge relations in Karst aquifer. (Zbirka *Carsologica*). Založba ZRC SAZU, 154 p, Postojna-Ljubljana,
- Smart, P.L., Friedrich, H. 1986: Water movement and storage in the unsaturated zone of a maturely karstified carbonate aquifer, Mendip Hills, England, In: Proceedings of the Conference on environmental problems of karst terranes and their solutions, National Water Well Association, 59-87, Dublin.
- Stichler, W., Trimborn, P., Maloszewski, P., Rank, D., Papesch, W., Reichert, B. 1997. Isotopic investigations. *Acta carsologica* 26,1. In: Kranjc A.(Ed) *Karst Hydrogeological Investigations in South-Western Slovenia*, 213-235, Ljubljana.
- Trček, B. 2003. Epikarst zone and the karst aquifer behaviour. A case study of the Hubelj catchment, Slovenia. *Geološki zavod Slovenije*, 100 p, Ljubljana.

Vplivi dogajanj na Soncu na določitev položaja z enofrekvenčnimi kodnimi GNSS-instrumenti: priprava na vrh 24. Sončevega cikla

Oskar Sterle¹, Bojan Stopar² in Polona Pavlovčič Prešeren³

Povzetek

V prispevku posredno način predstavljamo dogajanja na Soncu v času večje in manjše intenzitete prejšnjega 23. in trenutnega 24. Sončevega cikla. Sončeva aktivnost sledi periodi enajstih let, intenzivnost dogajanj pa med drugim opišemo s številom Sončevih peg in s številom različnih izbruhov na Soncu. Dogajanja na Soncu vplivajo tudi na spremembo števila prostih elektronov v plasti ionosfere, kar naprej vpliva na spremembo razširjanja radijskih valov, to je tudi GNSS-opazovanj. V obdelavi GNSS-opazovanj moramo vpliv upoštevati in ga odstraniti ali zmanjšati z uporabo ustreznih modelov. Vpliv plasti ionosfere na razširjanje GNSS-opazovanj je različen za različne tipe opazovanj. Poznamo različne pristope modeliranja in upoštevanja vpliva ionosferske refrakcije na GNSS-opazovanja. V prispevku je opisan način uporabe GNSS-tehnologije za spremljanje dogajanj v ionosferi, saj nam konkretno izvedena GNSS-opazovanja lahko služijo za modeliranje dogajanj v ionosferi. Tako pridobljen potek dogajanj v ionosferi lahko primerjamo s podatki o Sončevih pegah, ki so pridobljeni z drugimi metodami. Glavni namen prispevka je pokazati, kako neupoštevanje ali pomanjkljivo upoštevanje vpliva ionosfere na razširjanje GNSS-opazovanj vpliva na točnost in natančnost določitve položaja na Zemlji. Predstavljene so prednosti in slabosti modeliranja ionosferske refrakcije. Iz podatkov opazovanj iz prejšnjega Sončevega cikla so prikazane situacije, ko večja nenadna aktivnost na Soncu lahko povzroči večmetersko spremembo določitve položaja, če le-ta temelji na obdelavi enofrekvenčnih kodnih opazovanj.

Uvod

V decembru 2008 smo prešli v 24. Sončev cikel, katerega vrh pričakujemo v maju 2013. V tem času bo povečana intenzivnost dogajanja na Soncu. Dogajanje na Soncu merimo s številom Sončevih peg in pojavom večjih izbruhov različnih tipov (izbruhi X, F, ...). Sončeva aktivnost ima cikel (periodo) enajstih let, zato nam študija dogajanj v prejšnjih ciklih lahko služi kot pomoč pri razumevanju dogajanj v trenutnem ciklu. Pojavi na Soncu vplivajo na spremembe v plasti ionosfere, kar vpliva na razširjanje radijskih signalov v okviru GNSS (angl. Global Navigation Satellite System) in posledično na določitev položaja na Zemlji ali v njeni bližini. Uporabnik GNSS-tehnologije dogajanj na Soncu direktno ne zazna oziroma jih zazna šele v primeru izgube GNSS-signala in posledično v nezmožnosti določitve položaja. To pomeni, da tudi v primeru večjih nenadnih sprememb v ionosferi položaj na Zemlji še vedno lahko določimo, vendar je le-ta slabše kakovosti. Podatka o kakovosti določitve položaja pa uporabnik enofrekvenčnih GNSS-instrumentov nima na razpolago.

V prispevku podrobneje obravnavamo dogajanja na Soncu v prejšnjem 23. Sončevem ciklu in ugotavljamo, kako nenadne spremembe v ionosferi vplivajo na določitev položaja pri uporabi enostavnih navigacijskih GNSS-sprejemnikov. To je tistih GNSS-sprejemnikov, ki temeljijo izključno na določitvi absolutnega položaja iz kodnih opazovanj ene frekvence. Za študijo dejanskih opazovanj v zadnjem obdobju povečane Sončeve

¹ asist. mag. Oskar Sterle, univ.dipl. inž. geod

² prof. dr. Bojan Stopar, univ. dipl. inž. geod.,

³ asist. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.,

(vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana)

aktivnosti smo kot osnovo privzeli parametre modelov ionosferske refrakcije, ki so bili na voljo v realnem času ali pridobljeni iz že opravljenih opazovanj, in jih nadalje primerjali z dejansko opravljenimi opazovanji. Na ta način lahko pokažemo, da vpliv ionosferske refrakcije na opazovanja lahko zmanjšamo tudi v času intenzivnejšega dogajanja v ionosferi. Iz konkretno izvedenih GNSS-opazovanj pa lahko pokažemo, kako ionosferska refrakcija vpliva na končno določitev položaja v različnih obdobjih Sončevega cikla.

Iz konkretnih opazovanj lahko zaključimo, da določanje položaja z GNSS-tehnologijo v primeru intenzivnega dogajanja v ionosferi, ki ima daljšo periodo, ni tako problematično kot situacije, ko se zgodijo hitre in nenadne spremembe v ionosferi, katerih rezultat je izguba satelitskega signala za določeno časovno obdobje. V prispevku nato pokažemo, da lahko določitev položaja z enofrekvenčnimi kodnimi instrumenti izboljšamo z metodo diferencialnega GPS-a.

Vpliv ionosfere na razširjanje signala

Po odstranitvi t. i. motnje omejene dostopnosti (angl. Selective Availability) v okviru GPS (angl. Global Positioning System) v letu 2000 ima ionosferska refrakcija največji vpliv na kakovost določitve položaja na Zemlji. Velikost vpliva je odvisna od števila prostih elektronov v plasti ionosfere kot tudi od frekvence valovanja; višja kot je frekvenca, manjši je ionosferski vpliv. Znano je, da v primeru opazovanj GPS ionosfera povzroči prehitevanje faze nosilnega valovanja in zakasnitev moduliranega signala (PRN-kode in navigacijskega sporočila). Ionosferski refrakcijski koeficient predstavimo z vrsto (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001):

$$n = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots$$

kjer so koeficienti c_i odvisni od števila elektronov vzdolž poti razširjanja signala N_e . N_e predstavlja gostoto oz. število elektronov vzdolž poti razširjanja signala (enota: elektroni/m³).

Drugi člen v gornjem izrazu ($\frac{c_2}{f^2}$) podaja največji delež vpliva ionosferske refrakcije, tretji člen pa opisuje nekajcentimetrski vpliv na podaljšanje/skrajšanje poti razširjanja signalov iz smeri zenita. Če upoštevamo le največji del vpliva ionosferske refrakcije, lahko pokažemo, da je vpliv ionosfere na fazna (n_{ph}) in modulirana opazovanja (n_{gr}) enak po velikosti, vendar nasprotnega predznaka:

$$n_{ph} = 1 - \frac{40,3 \cdot N_e}{f^2}, n_{gr} = 1 + \frac{40,3 \cdot N_e}{f^2}$$

Število prostih elektronov (angl. Total Electron Content - TEC) vzdolž poti razširjanja signala s izračunamo kot:

$$TEC = \int N_e ds$$

Za predstavitev količine prostih elektronov največkrat uporabljamo število prostih elektronov nad točko v navpičnem stolpcu, katerega površina znaša 1 m². TECU (angl. TEC unit) predstavlja 10¹⁶ elektronov/m². Sprememba vrednosti za eno enoto TECU povzroči podaljšanje/skrajšanje poti razširjanja signala za 0,163 m za opazovanja na frekvenci L1 (1575,42 MHz) in 0,267 m spremembo poti za opazovanja na frekvenci L2 (1227,60 MHz), če signal prihaja iz zenita. Če tako primerjamo opazovanja na različnih frekvencah, lahko dogajanje v ionosferi, to je vrednost TEC, določimo iz GNSS-kodnih opazovanj (Dyrud *et al.*, 2006):

$$\text{TEC}_{gr} = \frac{\rho_{L2} - \rho_{L1}}{0,104 \text{ m} \cdot \text{TECU}^{-1}}$$

kjer sta ρ_{L1} and ρ_{L2} opazovani psevdorazdalji na frekvencah L1 in L2. Enako lahko določimo vrednost TEC iz faznih opazovanj na dveh frekvencah (ϕ_{L1} and ϕ_{L2}) (Dyrud *et al.*, 2006):

$$\text{TEC}_{ph} = \frac{-\phi_{L2} + \phi_{L1}}{0,104 \text{ m} \cdot \text{TECU}^{-1}}$$

Modeliranje ionosferske refrakcije

Ker večina enostavnih GNSS-sprejemnikov omogoča sprejem signalov le na eni frekvenci, vpliva ionosferske refrakcije ne moremo modelirati na način, kot je opisan zgoraj, ampak moramo v obdelavo GNSS-opazovanj do končne določitve položaja privzeti modeliran vpliv ionosferske refrakcije. Taki modeli/algoritmi so npr. Klobuchar, Bent, IRI, ICED, FAIM, NEQUICK (slednji je model, katerega koeficiente bo vključevalo navigacijsko sporočilo tehnologije GALILEO).

Klobucharjev model

V praksi najbolj uporabljen model ionosferske refrakcije je Klobucharjev model. Uporaben je zaradi preproste strukture (predstavljen je z osmimi spreminjajočimi se koeficienti: α_n in β_n , kjer je $n = 1, 2, 3, 4$), enostavnosti algoritma, predvsem pa zato, ker ga lahko v primeru tehnologije GPS uporabimo v realnem času. Klobucharjev model temelji na predpostavkah (Klobuchar, 1987):

- da so prosti elektroni skoncentrirani v plasti, ki se nahaja na višini 350 km in katere debelina je enaka 0;
- najvišjo vrednost TEC doseže ob 14.00 uri po lokalnem času;
- vrednost TEC je konstantna med 22.00 in 6.00 uro in znaša 9,24 enot TECU.

GPS-navigacijsko sporočilo vsebuje koeficiente Klobucharjevega modela, tako da je uporabniku enofrekvenčnih instrumentov omogočeno upoštevati vpliv ionosferske refrakcije v realnem času. Znano pa je, da s pomočjo uporabe Klobucharjevega modela in koeficientov iz navigacijskega sporočila lahko odpravimo le 50 do 60 % vpliva (Komjathy, 1997), kar je odvisno od stopnje Sončeve aktivnosti kot tudi od položaja opazovališča ter letnega in dnevnega časa opazovanj. Klobucharjev model namreč vključuje geomagnetno širino točke, kjer naj bi se pričela plast ionosfere. Ker je le-ta odvisna tako od letnih časov in geomagnetnega polja kot tudi od Sončeve aktivnosti, se v času spreminjajo tudi vrednosti koeficientov Klobucharjevega modela.

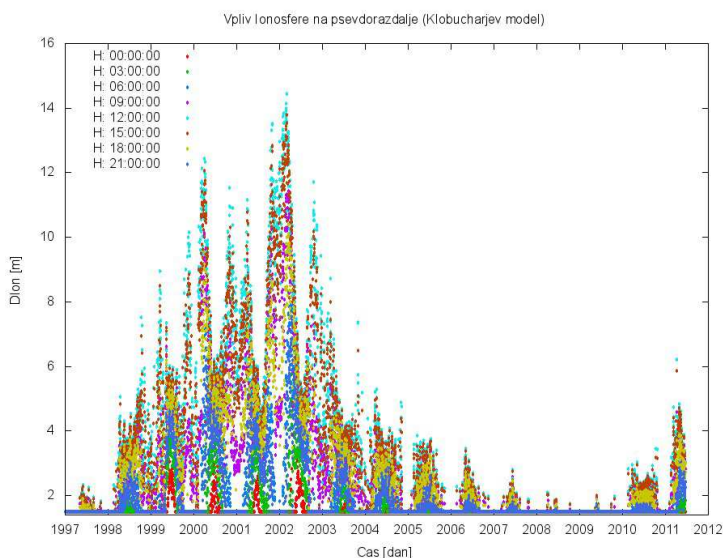
V okviru sistema GPS so koeficienti Klobucharjevega modela določeni na podlagi dveh kriterijev, in sicer (Ovstedal, 2002):

- časa opazovanj: v glavni kontrolni postaji eno leto razdelijo na 37 intervalov, vsakemu izmed teh pa priredijo niz koeficientov Klobucharjevega modela;
- srednje vrednosti aktivnosti Sonca, izračunane iz vrste zaporednih petih dni, vključujoč tudi zadnji dan. Trenutno Sončevo aktivnost uvrstijo v tabelo z 10

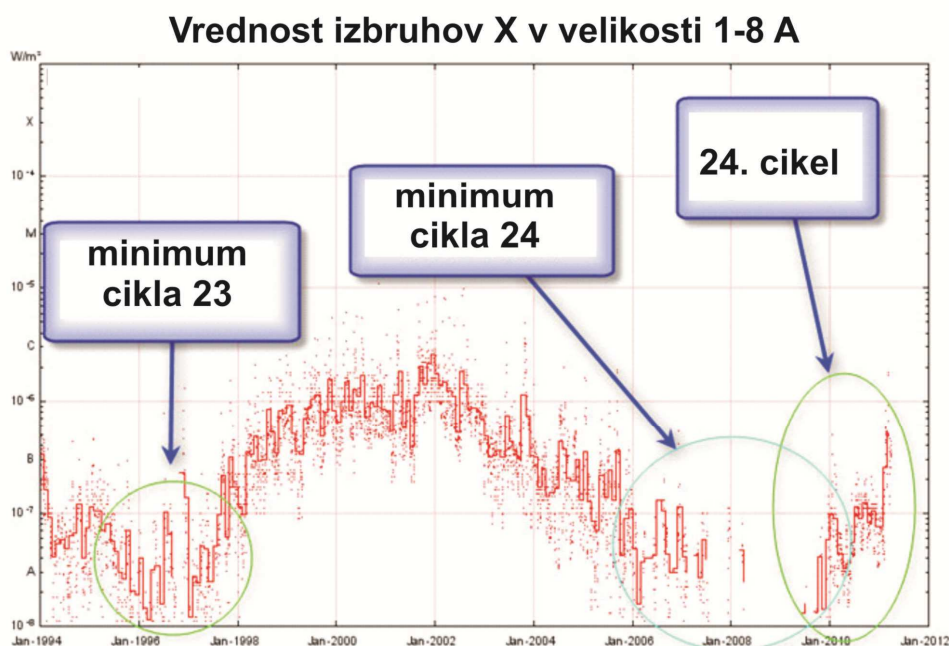
stopnjami, nadalje koeficiente Klobucharjevega modela določijo glede na uvrstitev Sončeve aktivnosti v tabeli.

Koeficienti Klobucharjevega modela so posredovani GPS-satelitom, le-ti pa podatke preko navigacijskega sporočila posredujejo uporabnikom. Odvisni so od uvrstitve časa opazovanj v enega izmed 37-ih intervalov in nadalje popravljeni glede na jakost Sončeve aktivnosti (določena z 10 stopnjami), ne vključujejo pa nenadnih sprememb v ionosferi, čeprav se le-te v času povečane aktivnosti Sonca pogosto dogajajo. Koeficienti Klobucharjevega modela v navigacijskem sporočilu vključujejo netočnosti, katerih perioda trajanja lahko znaša tudi 10 dni (Weiss *et al.*, 2002). Četudi uporabljamo podatke preciznih efemerid in natančne podatke satelitovih ur, je končna določitev položaja z uporabo koeficientov Klobucharjevega modela iz navigacijskega sporočila vezana na natančnost določitve položaja velikosti nekaj metrov (Ovstedal, 2002).

Boljša možnost zmanjšanja vpliva ionosfere je uporaba podatkov, posredovanih uporabniku v okviru t. i. SBAS (angl. Satellite Based Augmentation System) satelitov. Takšna sistema sta npr.: WAAS (angl. Wide Area Augmentation System) ali EGNOS (angl. European Geostationary Navigation Overlay Service), katerih navigacijsko sporočilo vsebuje izboljšane vrednosti koeficientov Klobucharjevega modela. V tem primeru mora imeti instrument možnost sprejema signalov WAAS oziroma EGNOS. Alternativa temu je uporaba koeficientov Klobucharjevega modela, ki jih posreduje služba CODE (angl. Center for Orbit Determination in Europe). Ta od julija 2000 preko spleta ponuja koeficiente Klobucharjevega modela, izračunane na podlagi GPS-opazovanj na postajah IGS, ki so razporejene po celotni Zemlji. Modeliranje ionosferske refrakcije so precej izboljšali, saj so za osnovo naknadne določitve privzeli tudi podatke iz datotek IONEX, vendar je bilo sprva koeficiente mogoče pridobiti šele z zakasnitvijo nekaj dni. Problem časovne zakasnitve pridobitve parametrov so v službi CODE rešili in tako je danes mogoče pridobiti tudi vnaprej napovedane vrednosti koeficientov Klobucharjevega modela, vendar njihova kakovost ne dosega kakovosti naknadno pridobljenih.



Slika 1: Časovna vrsta velikosti vpliva ionosferske refrakcije na GNSS-opazovanja, izračunana s Klobucharjevim modelom.



Slika 2: Časovna vrsta izbruhov X na Soncu (SunSpotWatch.com)

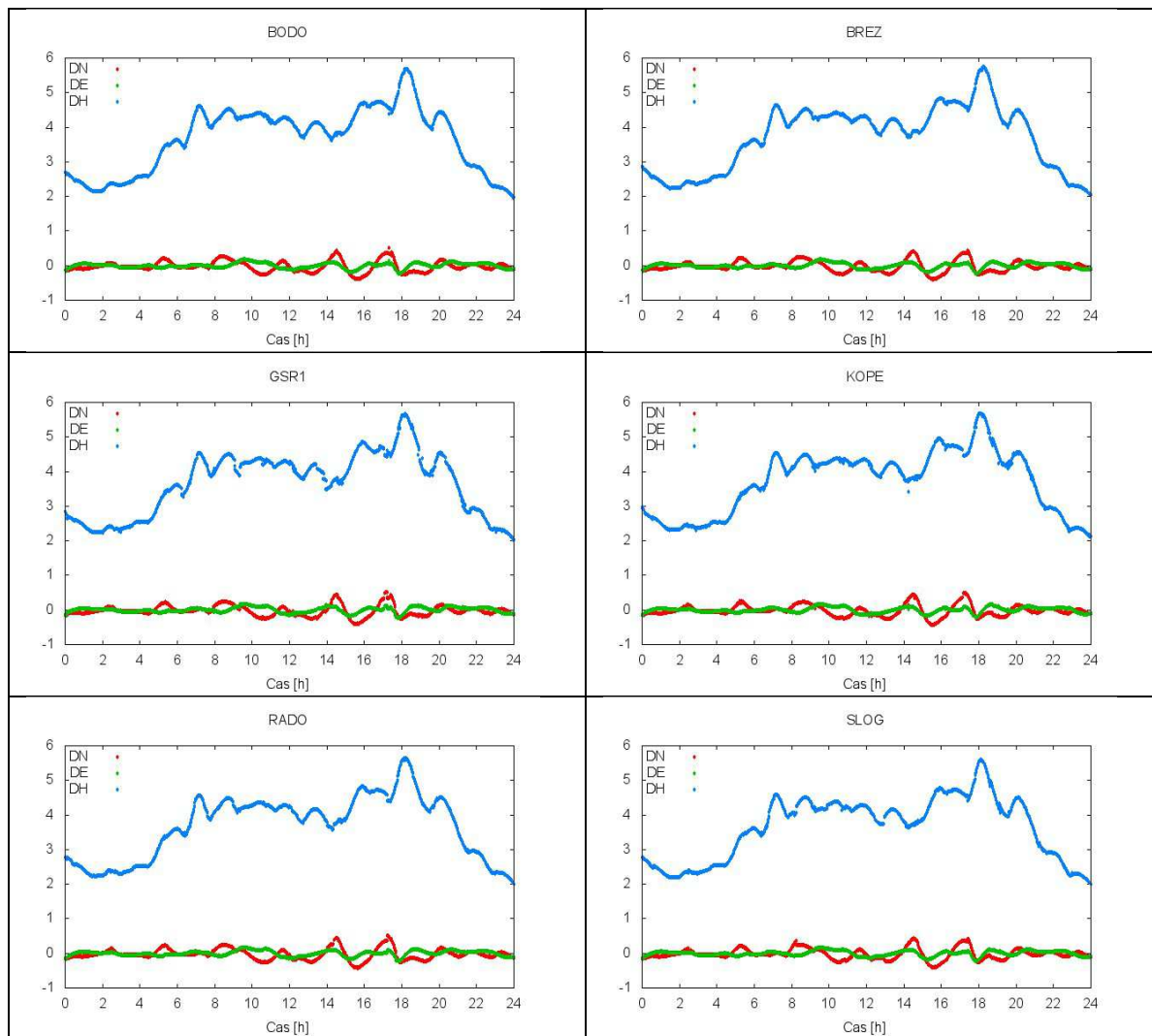
Med časovno vrsto vpliva ionosferske refrakcije, predstavljene s Klobucharjevim modelom (uporaba koeficientov iz navigacijskega sporočila) za obdobje 1997 do sredine 2011 (Slika 1), in Sončevo aktivnostjo, ki so jo spremljali z drugimi metodami (Slika 2), obstaja funkcijska odvisnost. Tako lahko iz izračunane časovne vrste vidimo, da je bil vrh 23. Sončevega cikla vezan na začetek leta 2002.

Model IONEX

Različne GNSS-službe podajajo podatke o stanju v atmosferi v obliki IONEX (angl. IONosphere Map Exchange) (Schaer *et al.*, 1997). Podatki so določeni na osnovi več postaj, razporejenih po celotni Zemlji (primer službe CODE: podatke določijo na podlagi 200 postaj GPS/GLONASS). Drugače kot pri Klobucharjevem modelu, kjer je ionosferska refrakcija predstavljena v obliki funkcije, gre v primeru IONEX za način modeliranja v pravilni mreži. Podatki o stanju v ionosferi so podani s sfernimi harmoničnimi koeficienti ter s časovno ločljivostjo 2 uri in s prostorsko ločljivostjo 5° (geografska širina) in 2,5° (geografska dolžina).

Služba CODE končne vrednosti podatkov posreduje z zakasnitvijo treh dni; hitrejše, vendar manj natančne podatke pa z zakasnitvijo 12 ur. Dodatno nudijo tudi predvidene podatke za en oziroma dva dni vnaprej. Služba IGS (angl. International GNSS Service) končne podatke v obliki datotek IONEX podaja s časovno zakasnitvijo 11 dni.

Ionosferska refrakcija vpliva na kodna opazovanja tako, da izmerjene psevdorazdalje med satelitom in sprejemnikom podaljša. Vpliv na položaj (t. j. na koordinate točke) je določen z razliko med izmerjeno vrednostjo razdalje satelit–sprejemnik in izračunano vrednostjo razdalje satelit–sprejemnik iz koordinat. Spodnja slika prikazuje velikost vpliva ionosferske refrakcije na koordinate točk v omrežju SIGNAL, če vpliv modeliramo s podatki IONEX.



Slika 3: Modeliran vpliv ionosferske refrakcije (iz datotek IONEX) na koordinate 6-ih stalnih postaj omrežja SIGNAL na dan 31. 7. 2011

Zgornje slike prikazujejo 6 točk omrežja SIGNAL (Bodonci (BODO), Brežice (BREZ), Ljubljana (GSR1), Koper (KOPE), RADO (Radovljica) in Slovenj Gradec (SLOG)) in odstopanje izračunanega od pravega položaja. Izračunani položaj je bil določen brez upoštevanja vpliva ionosferske refrakcije (212. dan leta 2011). Vidi se, da ionosferska refrakcija vpliva predvsem na višinsko komponento položaja (DH: višinska komponenta), vpliv na horizontalni položaj (DN: smer sever–jug in DE: smer vzhod–zahod) je bistveno manjši. Vidno je tudi, da je vpliv ionosferske refrakcije za vse prikazane točke zelo podoben, kar kaže na to, da je vpliv ionosfere močno prostorsko koreliran (ionosfera se lokalno bistveno ne spreminja). Iz narave vpliva ionosferske refrakcije (podaljšanje in/ali skrajšanje razdalj satelit–sprejemnik) sledi, da je največji vpliv ionosferske refrakcije pri relativni določitvi položaja povezan z merilom baznega vektorja ali geodetske mreže. Pri kodnih opazovanjih ionosferska refrakcija povzroči povečanje merila, pri faznih opazovanjih pa zmanjšanje merila baznega vektorja oziroma geodetske mreže. Del vpliva se sicer prelije tudi na popravek ure sprejemnika, vendar ta ne vpliva na popravke koordinat, zato problema v tem prispevku ne obravnavamo. Vpliv ionosferske refrakcije je

tako vezan samo na spremembo merila geodetske mreže. Kot že omenjeno, pa se največji vpliv ionosfere pri absolutni dločitvi položaja odraža v višinski določitvi položaja.

Modeliranje ionosferske refrakcije z linearno kombinacijo P3

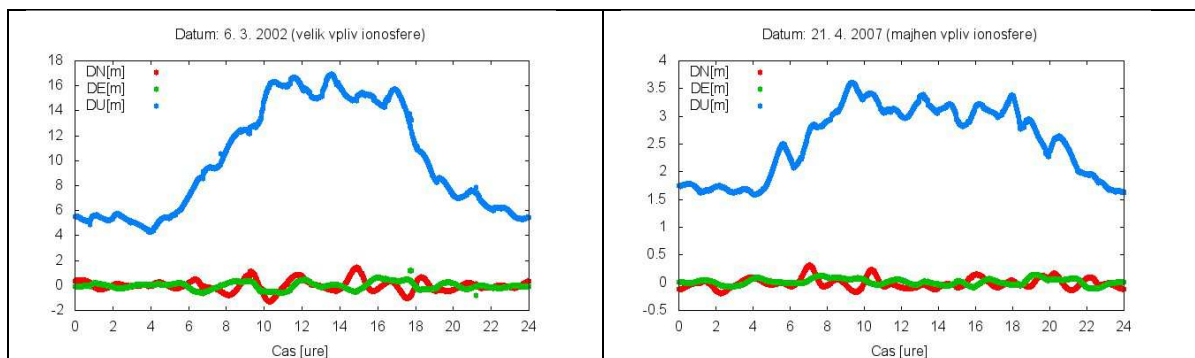
Pri obdelavi GNSS-kodnih opazovanj na dveh frekvencah lahko sami modeliramo vpliv ionosferske refrakcije in sicer z linearno kombinacijo kodnih opazovanj na nosilnih valovanjih L1 in L2, ki je (skoraj) neobčutljiva na vpliv ionosfere:

$$P_{i,3}^j = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot P_{i,1}^j - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot P_{i,2}^j \approx 2.5457 \cdot P_{i,1}^j - 1.5457 \cdot P_{i,2}^j$$

V zgornji enačbi sta f_1 in f_2 frekvenci nosilnih valovanj L1 in L2 v okviru GPS. Oznaki $P_{i,1}^j$ in $P_{i,2}^j$ predstavljata kodna opazovanja med satelitom j in stojiščem i ; oznaki 1 oziroma 2 pa določata, da gre za opazovanja na nosilnem valovanju L1 oziroma L2. $P_{i,3}^j$ označuje linearno kombinacijo P3. S sestavo linearne kombinacije P3 odstranimo vpliv ionosferske refrakcije 2. reda (člen $\frac{c_2}{f^2}$), ostali vplivi na opazovanja, tudi vplivi ostalih nadaljnjih členov (3., 4. ...) v vrsti za ionosferski refrakcijski koeficient v linearni kombinaciji, ostanejo, vendar so velikostnega reda cm, tako da jih pri obdelavi kodnih opazovanj lahko zanemarimo.

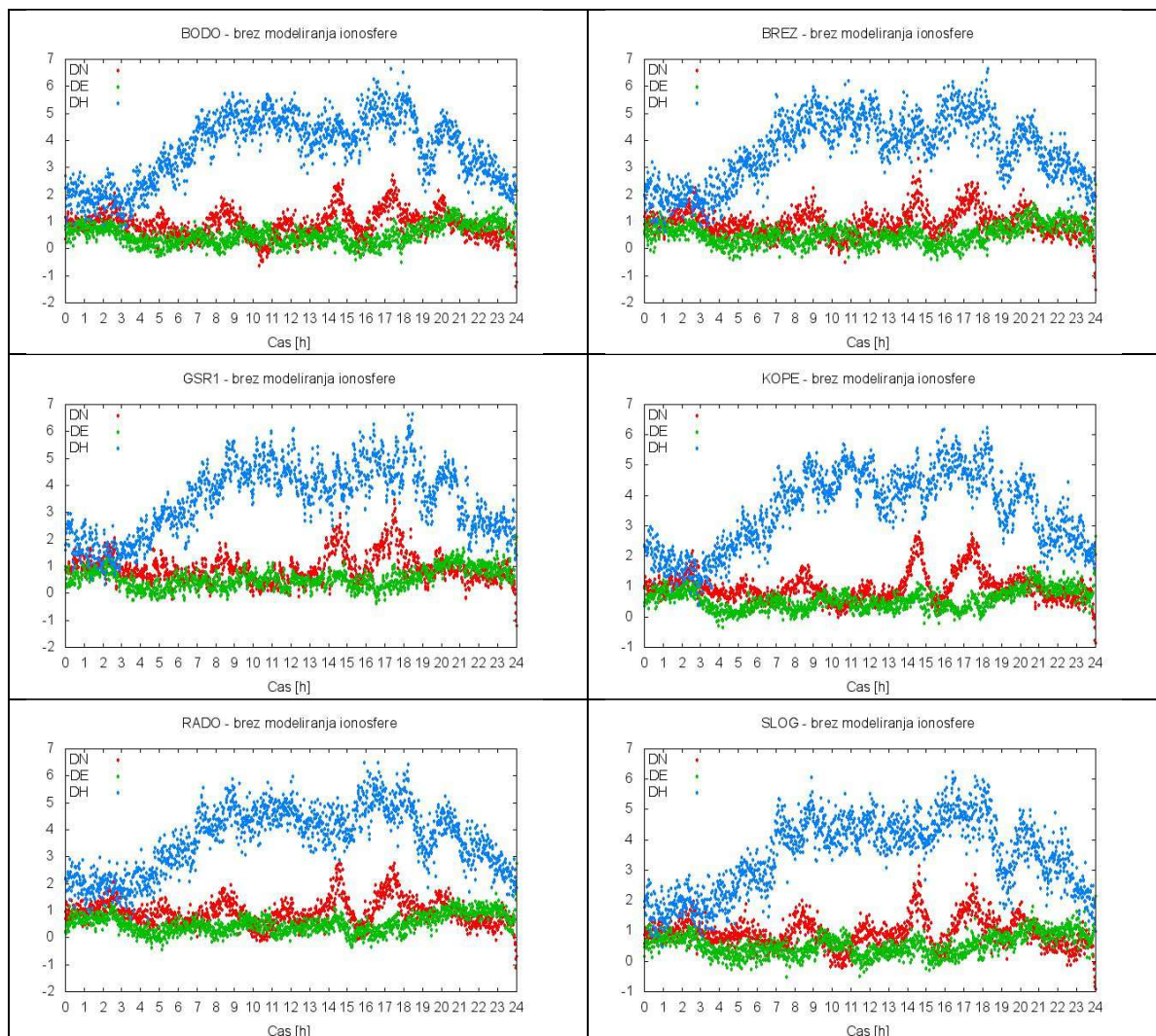
Vpliv upoštevanja ionosferske refrakcije na določitev položaja

Ionosferska refrakcija v času manjše Sončeve aktivnosti precej manj vpliva na končno določitev položaja kot v času povečane Sončeve aktivnosti. V času največje aktivnosti Sonca je vpliv ionosferske refrakcije na določitev položaja 4-krat večji kot v času manjše intenzivnosti dogajanj (v t. i. »tihih obdobjih«). Ionosferska refrakcija najbolj vpliva na višinsko komponento položaja; v času največje intenzivnosti dogajanj na Soncu vpliv na višinsko komponento lahko znaša več deset metrov (v našem primeru 18 m), medtem ko v času manjše intenzivnosti precej manj (v našem primeru do 4 m), če ionosferske refrakcije v obdelavi GNSS-opazovanj ne upoštevamo oziroma modeliramo. Rezultati izračuna veljajo za stalno postajo v Gradcu (GRAZ ($\varphi = 47^\circ 04' 01,56'' S$, $\lambda = 15^\circ 29' 36,60'' V$)) (Slika 4).



Slika 4: Odstopanje položaja od pravega za stalno postajo v Gradcu (oznaka GRAZ) zaradi nemodeliranega vpliva ionosferske refrakcije (65. dan leta 2002 (velik vpliv) in za 111. dan leta 2007 (majhen vpliv))

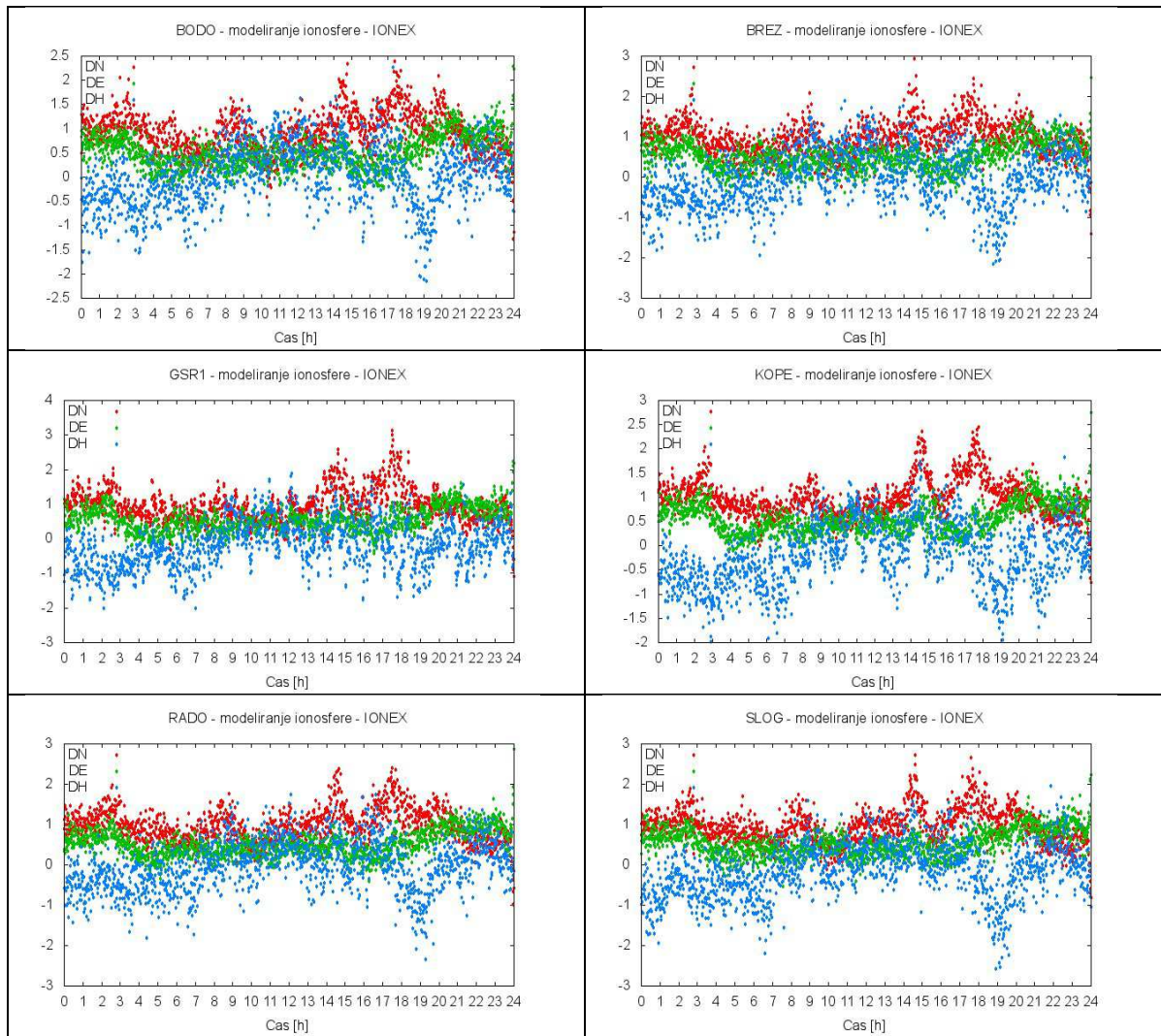
Spodnja slika prikazuje odstopanje položajev (v koordinatnih komponentah) za šest stalnih postaj omrežja SIGNAL in za primer, ko v obdelavi nismo upoštevali vpliva ionosferske refrakcije:



Slika 5: Odstopanje položajev točk zaradi neodstranjenega vpliva ionosferske refrakcije na GNSS-opazovanja: izračun za 6 stalnih postaj omrežja SIGNAL na dan 31. 7. 2011.

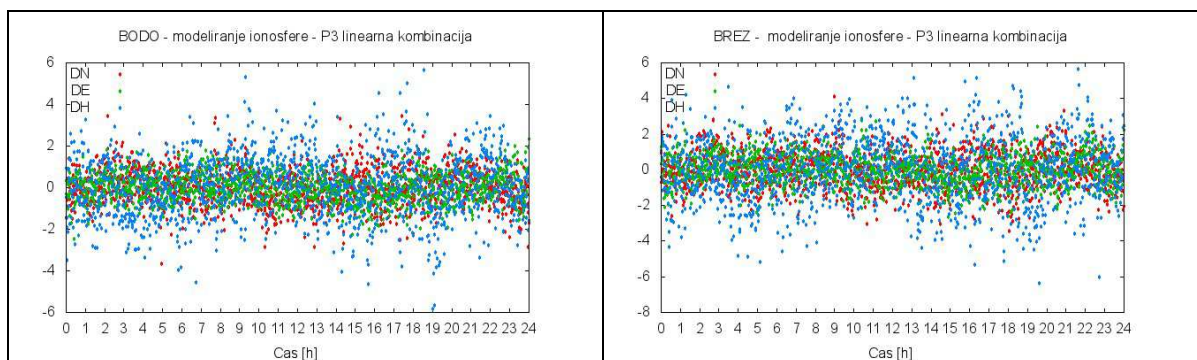
Vidi se, da so slike izredno podobne Slikam 3, kjer smo s pomočjo podatkov IONEX modelirali vpliv ionosferske refrakcije na točke omrežja SIGNAL. Ionosferska refrakcija najbolj vpliva na višinsko komponento položaja; v danem primeru so odstopanja do 7 m.

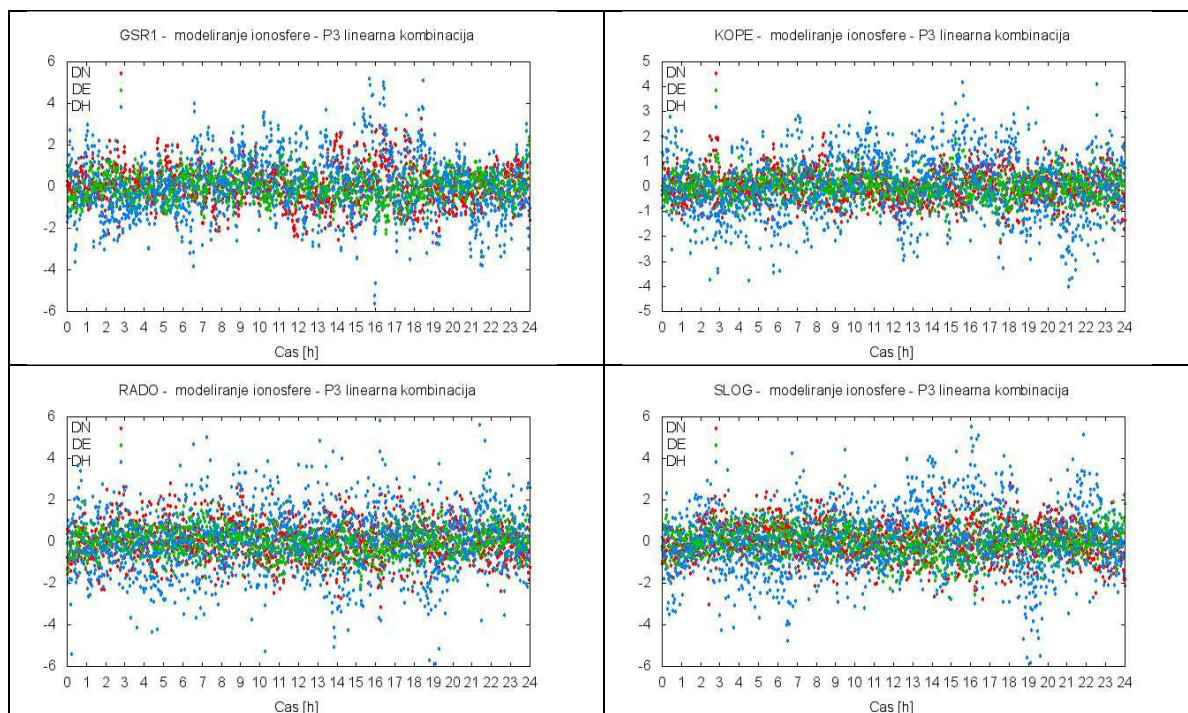
Če v obdelavo vključimo upoštevanje vpliva ionosferske refrakcije (model IONEX), končno določitev položaja precej izboljšamo; odstopanja v višinski komponenti položaja znašajo največ 3 m (Slike 6). Iz slik se vidi, da z uporabo podatkov IONEX odpravimo vpliv ionosferske refrakcije na opazovanja, vendar ne v celoti. S sestavo linearne kombinacije kodnih opazovanj P3 pa vpliv v večji meri odstranimo.



Slika 6: Ocenjeni popravki koordinat stalnih postaj omrežja SIGNAL, če ionosfersko refrakcijo modeliramo s podatki iz datotek IONEX.

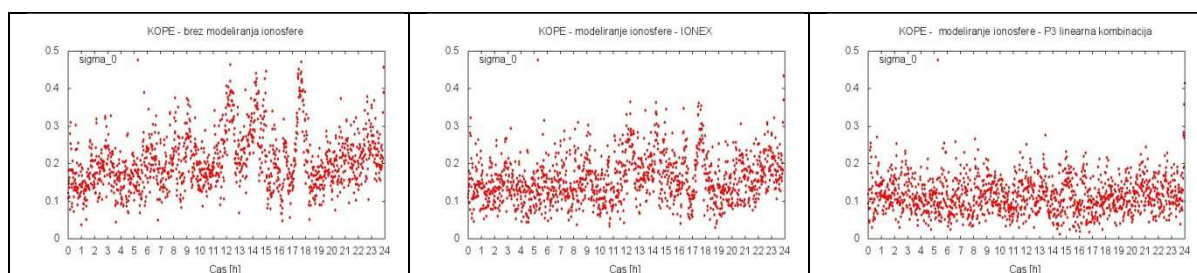
Slike 7 prikazujejo popravke koordinat točk omrežja SIGNAL, ki so dobljene na osnovi obdelave opazovanj z linearno kombinacijo P3. Razpršenost posameznih koordinat okoli njihove srednje vrednosti ima zelo naključen videz, kar kaže na dejstvo, da so iz opazovanj odstranjeni vsi sistematični vplivi (do reda velikosti 0,3 m) in so prisotni samo še slučajni vplivi (odboja signala od objekta tu nismo upoštevali).





Slika 7: Ocenjeni popravki koordinat stalnih postaj omrežja SIGNAL, če vpliv ionosferske refrakcije odstranimo z linearno kombinacijo P3.

Vpliv ionosferske refrakcije se v večini preljuje v ocenjene neznanke, to so koordinate točk, in popravke ure sprejemnika, manj pa na popravke psevdorazdalj po izravnavi. Slika 8 prikazuje ocenjene vrednosti standardnega odklona aposteriori (računanega iz popravkov psevdopazovanj) za stalno postajo v Kopru (oznaka KOPE) in za različne načine upoštevanja ionosferske refrakcije. Leva slika prikazuje vrednosti standardnega odklona aposteriori, če ionosferske refrakcije ne upoštevamo v obdelavi, srednja slika prikazuje vrednosti standardnega odklona aposteriori, če ionosfersko refrakcijo modeliramo z modelom IONEX, in zadnja, desna slika, vrednosti standardnega odklona aposteriori, če ionosfersko refrakcijo odstranimo z linearno kombinacijo P3.



Slika 8: Ocenjene vrednosti referenčnega standardnega odklona aposteriori za posamezne ocenjene položaje, če ne modeliramo ionosferske refrakcije (levo), če ionosfersko refrakcijo modeliramo z modelom IONEX (sredina) in če modeliramo ionosfersko refrakcijo z linearno kombinacijo P3 (desno).

Vidi se, da se vrednosti standardnega odklona a-posteriori ne zmanjšajo bistveno z odpravljanjem vpliva ionosferske refrakcije iz opazovanj. Iz največje vrednosti okoli 0,5 m

preidemo na okoli 0,2 m. Iz tega je razvidno, da je vpliv ionosferske refrakcije sistematičen in vpliva na točnost veliko bolj kot na natančnost ocenjenih koordinat in popravkov ure sprejemnika.

Zaključek

Iz študije lahko zaključimo, da je v procesu obdelave GNSS-opazovanj eden najpomembnejših faktorjev, ki vpliva na končno določitev položaja, korektno upoštevanje vpliva ionosferske refrakcije na GNSS-signal, in sicer za vsa obdobja v Sončevem ciklu. Pristopi k modeliranju ionosferske refrakcije so različni, vendar se ti pri uporabi enofrekvenčnih kodnih GNSS-instrumentov pri absolutni določitvi položaja in brez možnosti komunikacije z drugim instrumentom (metoda diferencialnega GPS-a) omejujejo zgolj na uporabo modelov ionosferske refrakcije in koeficientov, ki so sestavni del navigacijskega sporočila (ali pa so pridobljeni preko interneta). Glede na to, da so študije pokazale, da se vpliv ionosferske refrakcije lokalno ne spreminja v veliki meri, bi lahko stalne GNSS-postaje uporabniku nudile dodatne podatke za izboljšanje določitve položaja tudi v času večjih in nenadnih sprememb v ionosferi. Stalno delujoče GNSS-postaje imajo namreč možnost izvajanja kodnih in faznih opazovanj na dveh nosilnih valovanjih L1 in L2, zato je v tem primeru mogoče vrednotiti vpliv ionosfere v realnem času. Obstajata dve možnosti, kako bi stalne GNSS-postaje lahko uporabniku nudile podatke v realnem času: prva možnost, to je določitev izboljšanega niza koeficientov modela ionosferske refrakcije (npr. Klobucharjevega), bi bila primerna za uporabnike tistih GNSS-instrumentov, katerih programska oprema omogoča spreminjanje koeficientov modela. Če je programska koda v GNSS-instrumentu zaprtega tipa, bi uporabili drugo možnost, kjer bi uporabnik GNSS-instrumentov spremembe v ionosferi upošteval na indirektn način tako, da bi stalna GNSS-postaja nudila podatke o popravkih posamezne komponente določitve položaja zaradi dogajanj v ionosferi. Uporabnik GNSS-tehnologije bi te podatke vključil v končno določitev položaja tako, da bi koordinatne komponente popravil za velikost posredovane vrednosti. Učinek upoštevanja popravkov koordinat referenčne točke na položaj sprejemnika uporabnika bi bilo izboljšanje točnosti in natančnosti položaja sprejemnika uporabnika.

Zahvala

Študija je nastala v okviru temeljnega raziskovalnega projekta “*Določitev in ocena vplivov izrednih Sončevih aktivnosti na satelitsko določanje lokacije*”, katerega naročnik je Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS.

Literatura

- CODE: <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/#cgim>
- Dyrud, L., Bhatia, N., Ganguly, S. in Jovancevic (2006), Performance analysis of software based GPS receiver using a generic scintillation model, *19th International Technical meeting*, Satellite Division of the Institute of Navigation, Fort Worth, Texas, ZDA.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger H., in Collins J. (2001). *GPS Theory and Practice*, Springer Verlag, 370 str.
- IGS: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>
- Klobuchar, J.A. (1987), Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-23, No.3, str. 325-331.

- Komjathy, A. (1997), Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System, doktorska disertacija, *Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report NO. 188*, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Kanada, 248 str.
- Ovstedal O. (2002), Absolute positioning with single-frequency GPS receivers, *GPS Solutions*, 5, str. 33-44.
- Schaer, S., Gurtner, W. in Feltens, J. (1997), IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1, February 25, 1998, in *Proceedings of the 1998 IGS Analysis Centers Workshop*, ESOC, Darmstadt, Nemčija, str. 233-247.
- SunSpotWach.com: Radio Propagation: Space Weather: Sunspot Cycle Information: <http://prop.hfradio.org/>
- Weiss, M., Zhang, V., Jensen, M., Powers, E., Klepczynski, W. in Lewandowski, W. (2002) , Ionospheric models and measurements for common-view time transfer. *IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition*.

Novi višinski sistem Slovenije in testni izračun geoida

Božo Koler^{*}, Tilen Urbančič^{*}, Klemen Medved^{**}, Nuša Vardjan^{**}, Sandi Berk^{***},
Ove Christian Dahl Omang^{****}, Dag Solheim^{****}, Miran Kuhar^{*}

Povzetek

V okviru projekta "Vzpostavljanje evropskega prostorskega referenčnega sistema v Sloveniji" je bil izdelan tudi projekt novega višinskega sistema v Sloveniji. Del tega projekta sta je zasnova nove nivelmanske mreže Slovenije, ki je delno že izmerjena, in testni izračun novega modela geoida. V prispevku sta predstavljeni analiza opravljene nivelmanske izmere in primerjava določitve geoidnih višin iz uradnega modela geoida iz leta 2000 in testnega modela geoida iz leta 2010. Z izračunom ploskve testnega geoida smo pridobili možnost predhodne analize kvalitete bodočega geoida, ki je zelo pomembna za izvajanje GNSS-višinomerstva v geodetski praksi.

Uvod

Kakovost geodetskih in prostorskih podatkov je odvisna tudi od natančnosti določitve nadmorskih višin točk. S sodobnimi geodetskimi merskimi tehnikami, kot so GNSS in LIDAR, dobimo geometrične oz. elipsoidne višine posnetih točk. Običajno višinam točk določimo t. i. nadmorske oz. fizikalne višine, ki so določene v različnih višinskih sistemih (normalne, ortometrične, normalne ortometrične višine) in so vezane na težnostno polje Zemlje. Za kvaliteten prehod iz elipsoidnih višin v nadmorske višine oziroma za uporabo GNSS-višinomerstva v praksi, pa sta nujna dobro določen sodoben višinski sistem in kvaliteten model geoida. Sodoben višinski sistem temelji na nivelmanski in gravimetrični izmeri reperjev, ki so povezani v nivelmanske mreže. Višine točk obstoječe temeljne geodetske višinske mreže Republike Slovenije niso določene na osnovi gravimetrične izmere, saj so podane v normalnem ortometričnem sistemu višin, ki je zastarel in se je uveljavil v 19. stoletju, ko so se na območju Evrope izvajale prve obsežne izmere nivelmanskih mrež.

Temeljijo na določenih predpostavkah brez dejanskih meritev težnostnega polja Zemlje. Višine tako niso določene glede na geoid, kot je to v primeru ortometričnih višin, ali kvazigeoid, ki je izhodiščna ploskev za normalne višine. Strategija vzpostavitve novega višinskega sistema Slovenije predvideva uvedbo normalnih višin, ki so definirane kot količnik geopotencialne kote in srednje vrednosti normalnega težnega pospeška vzdolž normale (normalne težiščnice).

Za uporabo GNSS-višinomerstva v praksi potrebujemo tudi kvalitetno določeno in vpeto ploskev geoida v višinski sistem. Kvalitetno določena geoidna višin je osnova, ki povezuje ploskev elipsoida z geoidom, oziroma povezuje geometričnih višin, ki so rezultat izmere GNSS, s fizikalnimi višinami, ki so rezultat nivelmanske in gravimetrične izmere.

* UL FGG, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

** Geodetska uprava R Slovenije, Zemljemerska 12, 1000 Ljubljana

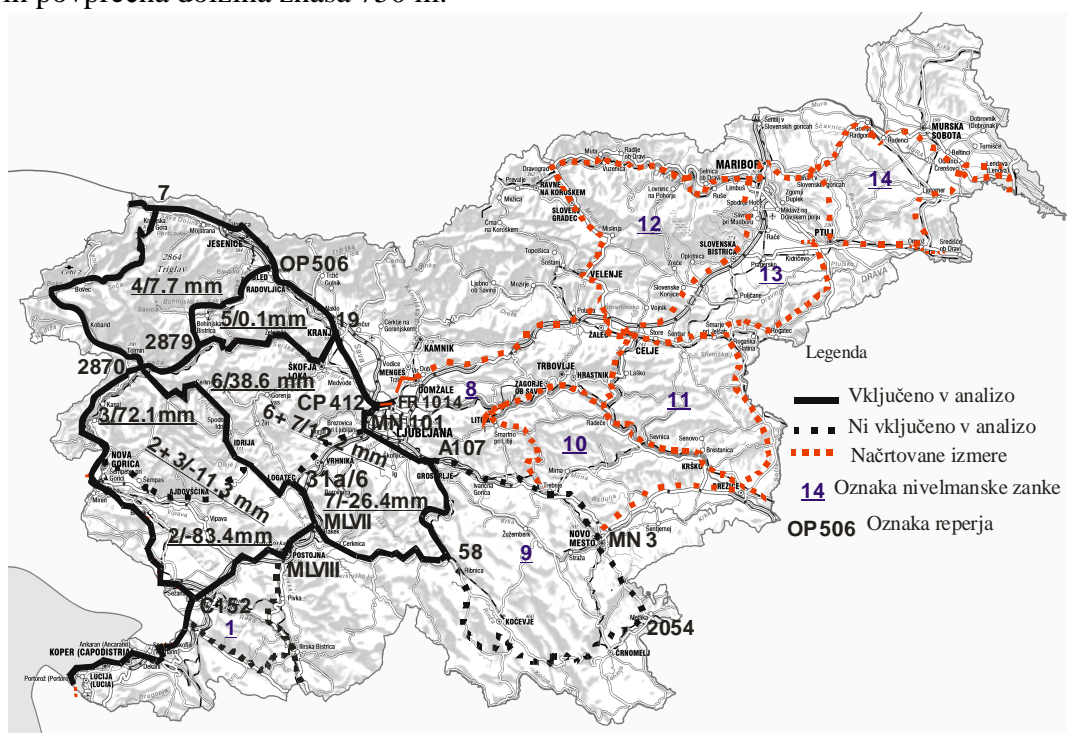
*** Geodetski inštitut Slovenije, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana

**** Statens kartverk, Kartverksveien 21, NO-3507 Hønefoss, Norveška

Analiza in ocena natančnosti merjenih višinskih razlik

Na osnovi zasnove nove nivelmanske mreže, ki je rezultat projekta "Vzpostavljanje evropskega prostorskega referenčnega sistema v Sloveniji", je bilo do konca leta 2011 izmerjeno približno 45 % nivelmanskih linij, ki so vključene v 8 nivelmanskih zank. Zanki 1 in 9 nista vključeni v analizo nivelmanske izmere (Slika 1), saj je merjene višinske razlike potrebno še obdelati (upoštevati moramo temperaturni popravek, srednjo vrednost popravka dolžine para nivelmanskih lat in razliko petih nivelmanskih lat).

Na Sliki 1 je predstavljena nova nivelmanska mreža Slovenije. Dolžine nivelmanskih zank, ki so vključene v analizo, znašajo od 134 km do 213 km. Povprečna dolžina izmerjene nivelmanske zanke znaša 176 km. Izmerjenih in obdelanih je bilo 751 nivelmanskih linij, katerih povprečna dolžina znaša 750 m.



Slika 1 – Odstopanja pri zapiranju nivelmanskih zank

Pri izmeri preciznega nivelmana se višinske razlike merijo obojestransko (naprej in nazaj) in se običajno razlikujejo. Dovoljeno odstopanje (razlika naprej in nazaj) je predpisano s Pravilnikom o tehničnih normativih za mreže temeljnih geodetskih točk (RGU, 1981). Dovoljeno odstopanje je preseženo v 12 nivelmanskih linijah, kar znaša 1.6 % vseh, ki so vključene v analizo.

V Preglednici 1 so zbrani podatki o primerjavi odstopanja obojestransko merjenih višinskih razlik (Δ) z dovoljenim odstopanjem (Δ_{dov}). Iz Preglednice 1 vidimo, da je 76 % odstopanj manjših od 50 % dovoljenega odstopanja in 44 % odstopanj manjših oziroma enakih 25 % predpisanega dovoljenega odstopanja. Le 8 % nivelmanskih linij ima odstopanje, ki se uvrsti v zadnjo četrtino dovoljenega odstopanja. Opravljena analiza kaže, da je izmera opravljena kvalitetno.

Δ/Δ_{dov} (%)	Odstotek nivelmanskih linij
do 25	44 %
25 do 50	32 %
50 do 75	16 %
75 do 100	8 %

Preglednica 1 – Primerjava velikosti dejanskega odstopanja z dopustnim odstopanjem za posamezne nivelmanske linije

Če želimo med seboj primerjati odstopanja posameznih nivelmanskih linij, ki so različne dolžine, jih moramo preračunati na utežno enoto oziroma na 1 km (Lyszkowicz in Bernatowicz, 2010). Preračunana odstopanja na km nivelmanske linije smo nanegli na Diagram 1. Iz Diagrama 1 lahko vidimo, da se preračunana odstopanja na km izmerjene nivelmanske linije normalno porazdelijo. Srednja vrednost odstopanja znaša 0,64 mm/km in standardni odklon 1,07 mm/km.

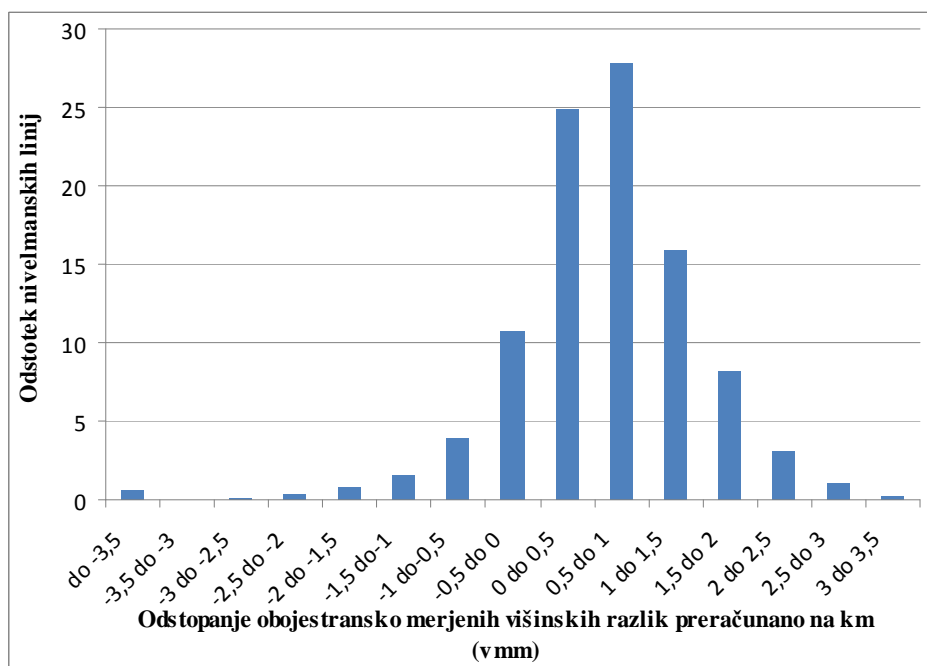


Diagram 1 - Odstopanje obojestransko merjene višinske razlike preračunano na km nivelmanske linije

Na osnovi odstopanj obojestransko merjenih nivelmanskih linij in odstopanj pri zapiranju nivelmanskih zank lahko naredimo analizo natančnosti merjenih višinskih razlik. V analizo je bilo vključenih 739 nivelmanskih linij, ki so vključene v 16 nivelmanskih poligonov (izmera med vozliščnimi reperji nivelmanske mreže) dolžine od 6 km do 129 km, s povprečno dolžino 38 km. Standardni odklon niveliranja 1 km nivelmanske linije v obe smeri znaša od 0,23 mm do 0,61 mm in povprečna vrednost 0,42 mm.

Z analizo odstopanj pri zapiranju nivelmanskih zank smo ugotovili, da je odstopanje v nivelmanski zanki 2 in 3 bistveno večje od dovoljenega odstopanja (glej Sliko 1 in Preglednico 2), ki je določeno po enačbi za zapiranje nivelmanskih zank nivelmana visoke natančnosti (RGU, 1981). Razlog za tako veliko odstopanje je najverjetneje v nivelmanskem

poligonu od Godoviča do Ajdovščine, ki je bil problematičen že pri prejšnjih preračunih nivelmanske mreže in se ni ponovno izmeril. Če združimo nivelmanski zanki 2 in 3, je odstopanje v združeni nivelmanski zanki manjše od dovoljenega. Odstopanje je na meji dovoljenega tudi v zanki 6 in dokaj veliko v zanki 7 (glej Sliko 1 in Preglednico 2), zato je tudi ocena natančnosti niveliranja na osnovi zapiranja nivelmanskih zank slaba (1,66 mm). Najverjetneje je napaka v nivelmanskem poligonu MN101 – 31a/6 (Ljubljana–Kalce), ki ga bo potrebno podrobneje analizirati. Za nadaljnjo analizo smo zanki 6 in 7 združili. Tako se je bistveno povečala tudi natančnost ocenjena na osnovi odstopanj pri zapiranju nivelmanskih zank (0,61 mm).

Številka zanke	d (km)	f (mm)	Δ_{Dov} (mm)	$\frac{f^2}{d}$
2	154,486	-83,35	33,30	/
3	168,081	72,09	36,03	/
2+3	200,037	-11,27	42,43	0,6347
4	213,050	7,71	45,04	0,2787
5	134,067	0,12	29,21	0,0001
6	186,529	38,59	39,73	7,9849
7	145,359	-26,43	44,25	4,8072
			$\left[\frac{f^2}{d}\right]$	13,7056
			σ_z	1,66 mm
6+7	265,652	12,16	55,57	0,5565
			$\left[\frac{f^2}{d}\right]$	1,4700
			σ_z	0,61 mm

Preglednica 2 - Statistični podatki in analiza natančnosti izmerjenih nivelmanskih zank

Analizo natančnosti lahko naredimo tudi na osnovi popravkov merjenih višinskih razlik, ki jih dobimo po izravnavi nivelmanskih zank in poligonov. Poleg tega dobimo še oceno natančnosti določitve višine reperjev. Merjene višinske razlike smo izravnali z računalniškim programom VimWin v. 4.1, ki smo ga razvili na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (Ambrožič in Turk, 2004). Izravnana so vozlišča nivelmanskih zank z navezavo na fundamentalni reper FR 1014, ki je stabiliziran v Črnučah. Standardni odklon utežne enote znaša 0,852 mm. V Preglednici 3 so zbrani podatki o izravnanih nadmorskih višinah vozliščnih reperjev in a posteriori ocena natančnosti določitve nadmorske višine reperjev.

Reper	H (m)	σ_H (mm)	Reper	H (m)	σ_H (mm)
7	800,59492	6,97	MLVII	464,14315	6,44
OP506	461,09780	6,12	MLVIII	536,22846	6,79
19	357,32095	4,09	C152	440,36085	7,33
CP412	302,29423	0,99	2870	182,45429	5,99
MN101	298,00659	2,27	2879	509,50123	5,76
A107	346,30284	4,48	31a_6	495,10007	6,61
58	509,73419	5,79			

Preglednica 3 - Nadmorske višine vozliščnih reperjev z oceno natančnosti

Zaključimo lahko, da so odstopanja pri zapiranju nivelmanske zanke in izračunane natančnosti opravljenih izmer v pričakovanih mejah, glede na uporabljen instrumentarij in metodo izmere.

Po izravnavi nivelmanskih zank smo izravnali še posamezne nivelmanske poligone. Standardni odkloni po izravnavi višinskih razlik znašajo od 0.025 mm (Rakek–Kalce) do 0.795 mm (Most na Soči–Kranjska gora) in povprečna vrednost 0,35 mm. Ocena natančnosti določitve nadmorske višine posameznih reperjev znaša od 0,02 do 3,81 mm.

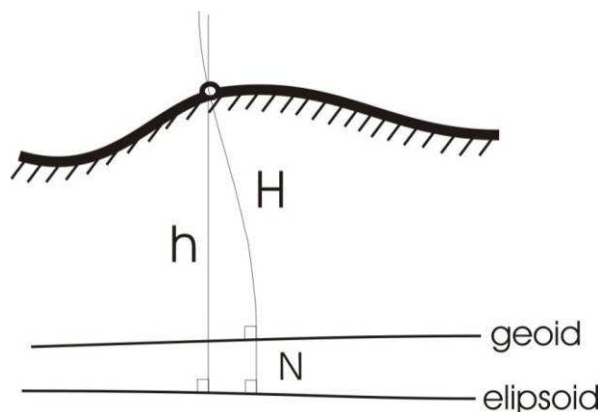
Povezava elipsoida, (kvazi)geoida z višinsko referenčno ploskvijo

Z GNSS-višinomerstvom določamo nadmorske višine točk na osnovi izmerjenih elipsoidnih/geometrijskih višin in interpoliranih geoidnih višin iz ustreznega modela geoida. Elipsoidne višine se nanašajo na ploskev elipsoida in jih ni možno uporabiti v geodetski praksi niti v vsakdanjem življenju, ker niso določene v težnostnem polju Zemlje. Elipsoidne (h) in nadmorske višine – ortometrične (H) ali normalne višine (H^N) – povezuje znana enačba (Slika 2):

$$h = H + N$$

$$h = H^N + \zeta$$

pri čemer je N geoidna višina in ζ kvazigeoidna višina. Za kakovostno GNSS-višinomerstvo potrebujemo model geoida (kvazigeoida), ki je enakovredne natančnosti, kot je natančnost določitve elipsoidnih višin.



Slika 2 - Elipsoidna višina h , nadmorska višina H in geoidna višina N

V geodeziji ločimo fizično in teoretično površino Zemlje. Prvo določajo lastnosti Zemljine zunanje površine (reliefa), to je prostora, v katerem živimo. Druga je podana z obliko, ki jo približno ponazarjata umirjena površina morske gladine ter navpična smer težiščnice, to pa je geoid. Geoid je po Gaußu ekvipotencialna ploskev zemeljskega telesa ponazorjena s srednjo gladino svetovnih morij in v mislih podaljšana pod celinami, ki pa ni v nobenem primeru analitična ploskev, saj se ukrivljenost geoida neprestano spreminja s spremembo reliefa in gostote zemeljske notranjosti.

Določanje geoida pomeni določanje oblike Zemlje oz. določitev ene izmed nivojskih ploskev Zemljinega težnostnega polja. Geoid, kot ekvipotencialna ploskev, poteka deloma zunaj, deloma znotraj Zemlje, zato je njegova določitev brez poznavanja razporeditve gostote v notranjosti Zemlje izjemno težka naloga. Določitev geoida je možna samo posredno, z

redukcijo merjenih vrednosti težnosti na geoid in uvedbo predpostavk o gostoti zemeljskih mas v njeni notranjosti.

Večina današnjih "rešitev" so kvazigeoidi, saj podatkov, ki jih uporabljamo za izračun (merjene vrednosti težnosti in odklonov navpičnic), ne reduciramo v notranjost Zemlje na ničelno nivojsko ploskev (geoid), temveč jih uporabljamo v obliki, v kakšni so določene, tj. na površini Zemlje (Solheim, 2000). Vendar, če želimo tako ploskev, ki je rezultat nekega numeričnega postopka, uporabiti praktično, to je v povezavi z GNSS-določenimi elipsoidnimi višinami, je nujen preračun (transformacija) v lokalni/državni višinski sistem. Tako "preračunana" ploskev ni več (kvazi)geoid temveč "višinska referenčna ploskev", ki pa vsebuje vpliv nezanesljivega izračuna (kvazi)geoida (pogreški metode, vhodnih podatkov), pogreške določitve elipsoidnih višin in tektonske vertikalne premike na območju izračuna. Ne glede na to lahko omenjeno ploskev uspešno uporabimo za izračun višin (predvsem v manj dostopnih krajih) z metodo t. i. GNSS-višinomerstva. Preračun (transformacijo) je potrebno izpeljati s čim večjim številom točk, enakomerno razporejenih na celotnem območju, ki imajo znane elipsoidne (GNSS) in nadmorske višine. Takšne točke v geodetski terminologiji običajno imenujemo GNSS/nivelmanske točke.

Trenutno se v Sloveniji uporablja geoidna ploskev iz leta 2000, ki jo je v okviru doktorske disertacije izračunal profesor Boško Pribičević z Geodetske fakultete v Zagrebu (Pribičević, 2000). Ploskev je bila izračunana s tehniko kolokacije po metodi najmanjših kvadratov. Za izračun je bilo uporabljenih 99 točk z merjenimi odkloni navpičnice, od tega 51 v Sloveniji, 23 na Hrvaškem, 20 v Avstriji in 5 na Madžarskem. Uporabljenih je bilo tudi 4.605 točkastih vrednosti anomalij težnosti. Izračunana ploskev je bila vpeta na 163 GNSS/nivelmanskih točk, ki so dokaj enakomerno razporejene po celotnem ozemlju Slovenije, vendar je bila višina večine točk določena s trigonometričnim višinomerstvom, ki po kakovosti ne dosega geometričnega nivelmana. Nekatero točke ležijo na ozemlju Hrvaške in so bile tudi vključene v izračun, saj naj bi se nanašale na isti višinski datum. Razpon geoidnih višin na območju Slovenije je med 44,140 m in 48,724 m, pri čemer je povprečna geoidna višina 46,453 m.

V okviru projekta "Vzpostavljanje evropskega prostorskega referenčnega sistema v Sloveniji" je bil oktobra leta 2010 opravljen izračun novega, testnega modela geoida za območje Slovenije. Tokrat je rešitev gravimetrična, kar pomeni, da so uporabljene izključno vrednosti težnega pospeška, ki je bil izmerjen na skoraj 12.000 točkah. Ploskev je bila izračunana z numerično integracijo Stokesove enačbe po metodi hitre Fourierjeve transformacije (Omang, 2000).

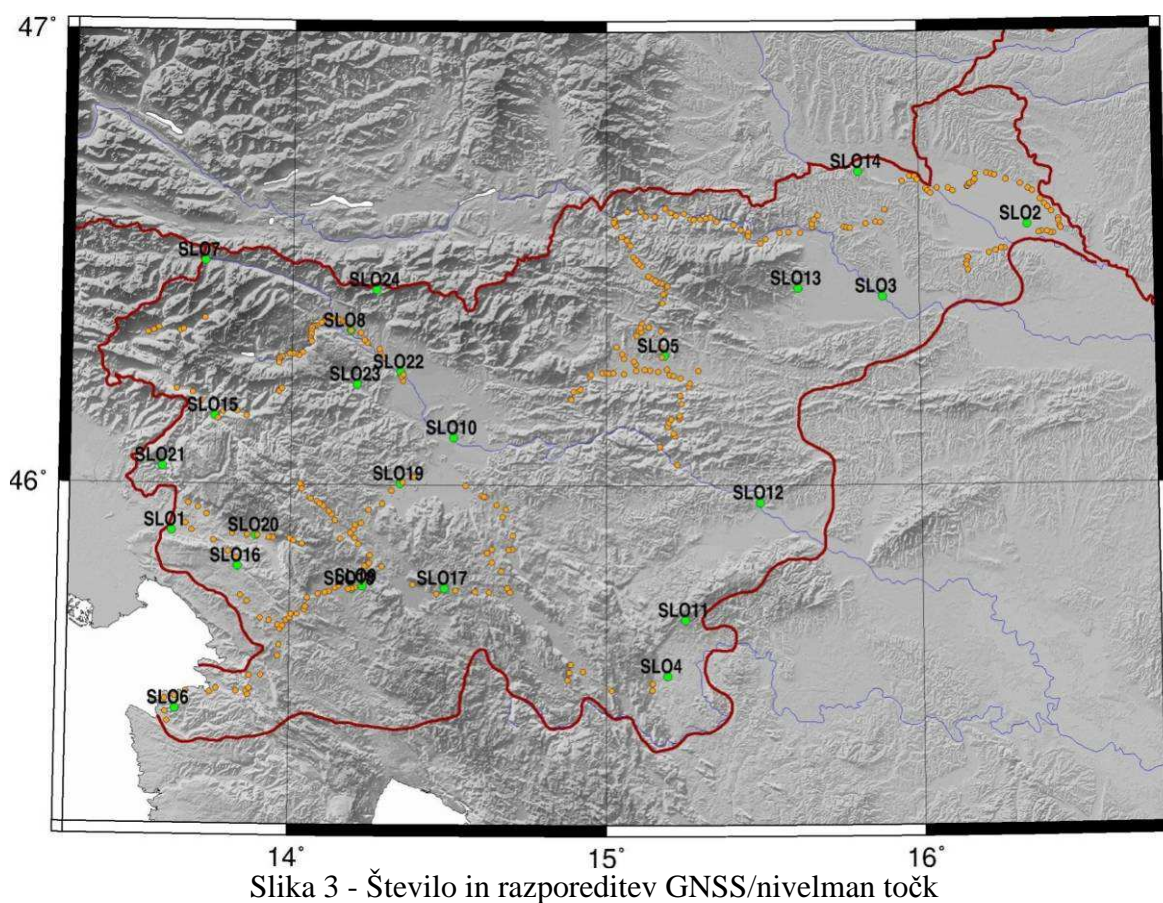
Višinska referenčna ploskev je bila izračunana z vpetjem geoidne ploskve na 24 GNSS/nivelmanskih točk, na katerih sta obe višini določeni z najvišjo možno natančnostjo. Na vseh teh točkah so se GNSS-opazovanja (elipsoidna višina) izvajala neprekinjeno vsaj 36 ur s statično metodo. Z geometričnim nivelmanom so te točke navezane tudi na nivelmanske poligone višjega reda (nadmorska višina). Razpon geoidnih višin na območju Slovenije je med 41,972 m in 49,837 m, pri čemer je povprečna geoidna višina 45,930 m. Glede na obstoječo rešitev iz leta 2000 so pri novem, testnem modelu uporabljeni novejši in izboljšani vhodni podatki. Uporabljena sta dva nova digitalna modela višin za območje izračuna, kjer se položaji točk nanašajo na koordinatni sistem ETRS89 (Berk in sod., 2009; Oven in sod., 2010).

Poleg obstoječih gravimetričnih podatkov na ozemlju Slovenije je bilo v izračun vključenih nekaj čez 700 merjenih vrednosti težnega pospeška, ki jih je Geodetska uprava Republike Slovenije (GURS) določila v zadnjih treh letih. GURS je v okviru izmenjave podatkov z Avstrijo pridobil podatke, ki pokrivajo mejno območje držav južno od 47° vzporednika. Gre za skoraj 4000 merjenih vrednosti težnega pospeška. V izračunu so bile izločene točke iz Italije, saj je analiza teh podatkov pokazala preveliko odstopanje od pričakovanih vrednosti.

Analiza natančnosti modelov geoida

Analiza natančnosti ploskev geoida Slovenije je opravljena s primerjavo geoidnih višin, ki jih dobimo kot razlike merjenih elipsoidnih in nadmorskih višin ("merjene geoidne višine"), in tistih, ki jih interpoliramo iz modelov. GURS je v zadnjih letih sistematično opravljala GNSS-meritve na reperjih višjih redov državne nivelmanske mreže. Na reperjih se je izvajala RTK-metoda izmere z 2 ponovljenima meritvama in vsaj 200 sekundnim intervalom merjenja. Tako je nastala obsežna baza GNSS/nivelmanskih točk, ki trenutno obsega več kot štiristo točk in je bila uporabljena za analizo natančnosti obeh modelov geoida.

Analiza natančnosti je bila opravljena na 345 GNSS/nivelman kontrolnih točkah (rumeni krogi na Sliki 3). Na sliki je z zelenimi krogi označeno 24 točk, ki so uporabljene za vpetje testnega geoida iz leta 2010.



Slika 3 - Število in razporeditev GNSS/nivelman točk

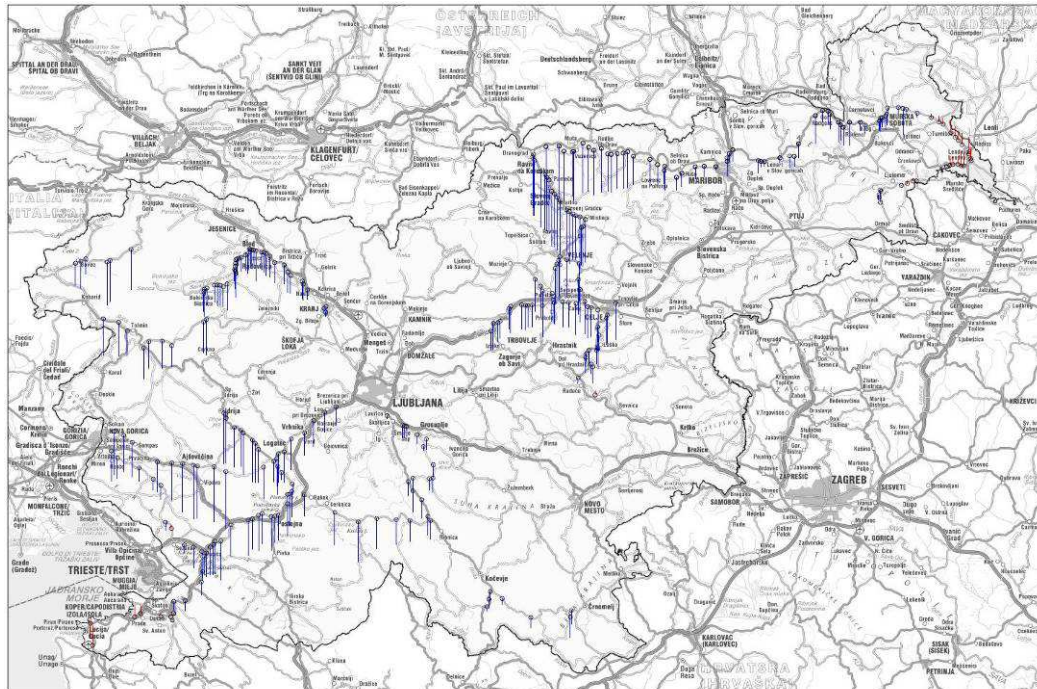
V Preglednici 4 so podani statistični kazalci izračunani na podlagi analize odstopanj na 345 kontrolnih točkah.

Preglednica 4 - Izračunani statistični kazalci

model geoida	sredina [m]	maks. odstopanje [m]	min. odstopanje [m]	std. odklon [m]
rešitev 2000	-0,108	0,099	-0,290	0,082
rešitev 2010	-0,002	0,094	-0,100	0,035

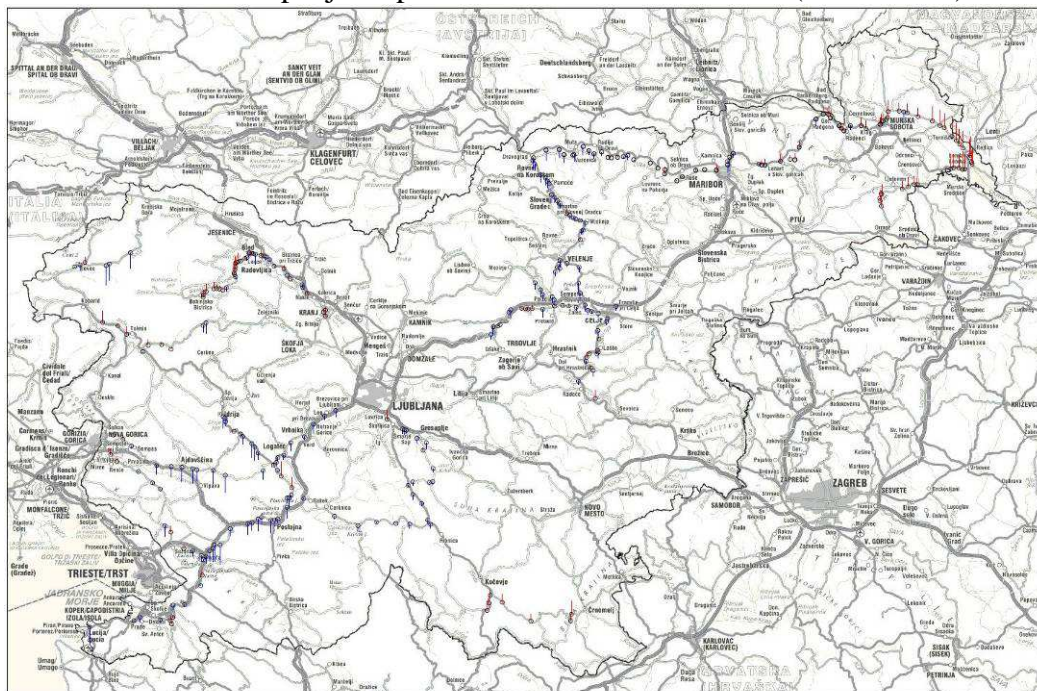
Pri obeh modelih so odstopanja normalno porazdeljena, pri rešitvi iz leta 2000 je sredina odstopanj $-0,108$ m, pri modelu iz leta 2010 pa $-0,002$ m. Rezultati analize kažejo na medsebojni zamik modelov za okoli 10 cm v višinskem smislu.

Odstopanja na posameznih kontrolnih točkah v obeh modelih so prikazana na Slikah 4 in 5. Iz preglednice in slik vidimo, da so odstopanja za model geoida iz leta 2010 bistveno manjša kot za model geoida iz leta 2000. Rezultati so izpolnili pričakovanja, saj so bili za vklop ploskve geoida 2010 uporabljeni kvalitetnejši podatki.



10 cm odstopanje

Slika 4 - Odstopanja na posameznih kontrolnih točkah (model 2000)



10 cm odstopanje

Slika 5 - Odstopanja na posameznih kontrolnih točkah (model 2010)

Histograma frekvenc odstopanj za obe rešitvi sta prikazana na Diagramih 2 in 3.

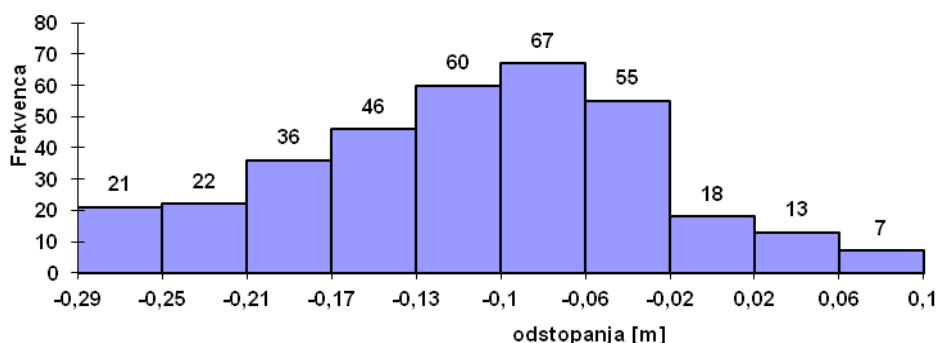


Diagram 2 - Histogram frekvenc odstopanj za rešitev iz leta 2000

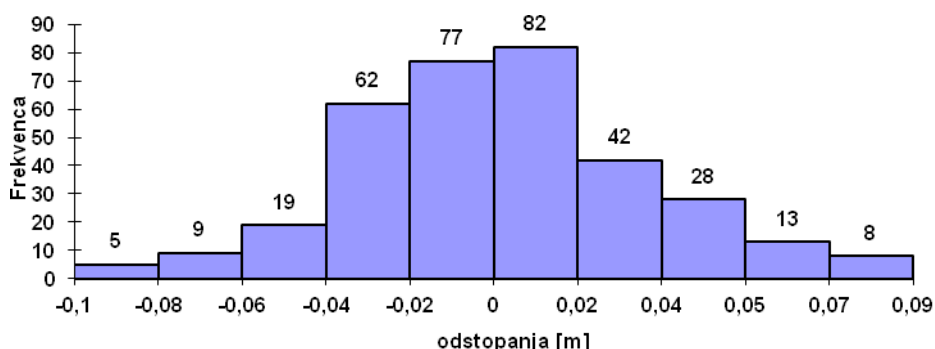


Diagram 3 - Histogram frekvenc odstopanj za rešitev iz leta 2010

Prav tako smo opravili primerjavo gridov obeh rešitev. Izračunali smo razlike v gridnih točkah. Histogram frekvenc razlik je prikazan na Diagramu 4. Ker so razlike podane v pravilni mreži smo lahko tudi izrisali plastnice (Slika 6). Največja odstopanja so na mejah Slovenije, moramo pa poudariti, da so vrednosti v gridu modela iz leta 2000 podane samo na ozemlju Slovenije. Razpon razlik je relativno velik (med -0,741 m in 0,283 m), ni pa opaziti sistematičnih odstopanj.

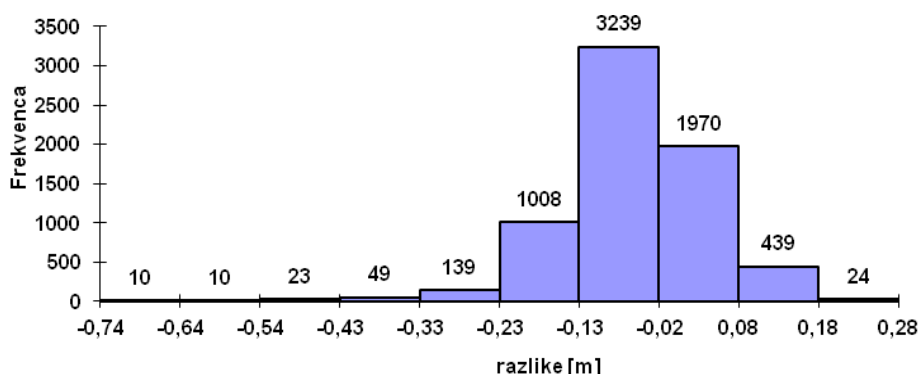
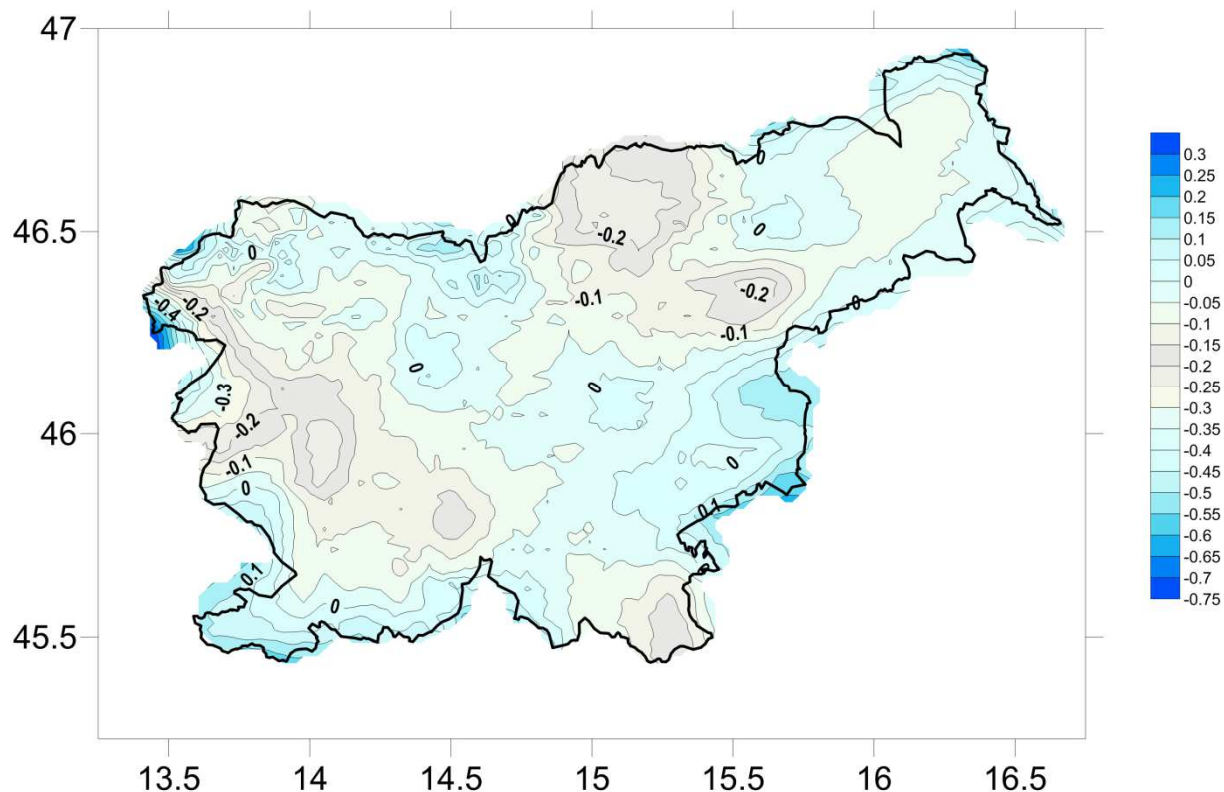


Diagram 4 - Histogram frekvenc razlik v gridnih točkah



Slika 6 - Prikaz odstopanj v gridnih točkah

Zaključek

Trenutni rezultati pri uvajanju sodobnega višinskega sistema v Sloveniji, skupaj s preračunom ploskve geoida in vklopom ploskve geoida v višinski sistem Slovenije, kažejo, da bomo dobili višinski sistem, ki bo omogočal bolj kvalitetno, natančno in zanesljivo uporabo GNSS-višinomerstva v praksi. V okviru projekta "Vzpostavljanje evropskega prostorskega referenčnega sistema v Sloveniji" je bil izdelan projekt nove nivelmanske mreže Slovenije, ki je v 45 % izmerjenih nivelmanskih poligonov že realiziran. Glede na dejstvo, da je bil izmerjen zahodni hriboviti/gorski del Slovenije, za katerega so značilne velike višinske razlike med vozliščnimi reperji, lahko ugotovimo, da so trenutni rezultati odlični. Tako je okoli 76 % odstopanj obojestransko merjenih višinskih razlik manjših od polovice predpisanega dovoljenega odstopanja. Ocena natančnosti niveliranja 1 km nivelmanske linije v obe smeri, ki smo jo izračunali na osnovi zapiranja nivelmanskih zank, znaša 0,61 mm in na osnovi popravkov merjenih višinskih razlik po izravnavi 0,85 mm. Podobno velja tudi za doseženo natančnost po izravnavi nivelmanskih poligonov, saj je pri 87 % (13) nivelmanskih poligonov ocena natančnosti boljša od 0,5 mm. Dobre rezultate dobimo tudi pri oceni natančnosti določitve nadmorskih višin reperjev. Tako so nadmorske višine vozliščnih reperjev določene z natančnostjo od 0,99 mm do 7,33 mm. Pričakovano so boljši rezultati doseženi pri oceni natančnosti določitve nadmorskih višin reperjev v nivelmanskih poligonih, kjer so nadmorske višine določene z natančnostjo do 3,81 mm.

Z izračunom testnega modela geoida in njegovo analizo smo korak bližje k novemu slovenskemu geoidu, ki bo z ustrezno kakovostjo zadovoljil potrebe uporabnikov. Analiza je pokazala, da imamo probleme predvsem na mejnem območju z Italijo, ki so rešljivi s pridobitvijo bolj kakovostnih podatkov iz Italije. V nadaljnjih letih bo zgoščena tudi mreža

kvalitetnih GNSS/nivelmanskih točk, ki bodo služile za vpetje geoida v nov višinski sistem Slovenije. Prav tako bo povečana tudi baza t. i. GNSS/nivelmanskih točk, ki bodo kontrolne točke za oceno natančnosti nove višinske referenčne ploskve.

Zahvala

Članek je nastal na podlagi rezultatov projekta "Vzpostavljanje evropskega prostorskega referenčnega sistema v Sloveniji". Projekt je bil podprt z donacijo Norveške na podlagi Norveškega finančnega mehanizma – Sporazum o dodelitvi nepovratnih sredstev SI0004-SGN-00085-E-V3-NFM.

Literatura

- Ambrožič, T., Turk, G. (2004). Navodila za uporabo programa Win ViM. Ljubljana, UL FGG, Oddelek za geodezijo.
- Berk, S., Bajec, K., Triglav Čekada, M., Fajdiga, D., Mesner, N., Arh, I., Žagar, T., Janežič, M., Fabiani, N., Radovan, D., Stopar, B., Koler, B., Kuhar, M., Sterle, O., Pavlovčič Prešeren, P., Ambrožič, T., Kogoj, D., Savšek, S. (2009). Razvoj DGS 2009. Prehod na nov koordinatni sistem. Končno poročilo projekta. Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana.
- Lyszkowicz, A., Bernatowicz, A. (2010). Accuracy evaluation of the successive campaigns of the precise levelling in Poland. Technical Sciences, no. 13.
- Omang, O. C. D. (2000). The challenge of precise geoid determination – applied to Norwegian extremities: glaciers, fjords and mountains. Doktorska disertacija. Institutt for kartfag, Norges Landbrukshøgskole, Scientific report, št. 4, Ås, Norveška.
- Oven, K., Berk, S., Bajec, K., Pegan Žvokelj, D., Klanjšček, M., Demšar, J., Vrabič, R., Droščák, B., Zore, M., Fabiani, N., Janežič, M., Radovan, D., Stopar, B., Koler, B., Kuhar, M., Sterle, O., Pavlovčič Prešeren, P., Ambrožič, T., Kogoj, D., Savšek, S. (2010). Razvoj DGS 2010. Prehod na nov koordinatni sistem. Končno poročilo projekta, Geodetski inštitut Slovenije, Ljubljana.
- Pravilnik o tehničnih normativih za mreže temeljnih geodetskih točk (1981). Ljubljana. Republiška geodetska uprava.
- Pribičević, B. (2000). Uporaba geološko-geofizičnih in geodetskih baz podatkov za računanje ploskve geoida Republike Slovenije. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.
- Solheim, D. (2000). New height reference surfaces for Norway. V: J. A. Torres in H. Hornik (ur.). Report on the Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), Tromsø, 22.–24. junij 2000. Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung, Astronomisch-Geodätische Arbeiten, zv. 61, str. 154–158. Bayerische Akademie der Wissenschaften, München.

Razvoj sistema za napovedovanje hidroloških razmer na porečjih Save in Soče

Sašo Petan^{*}, Nejc Pogačnik^{*}, Mojca Sušnik^{*}, Janez Polajnar^{*}, Gregers Jørgensen^{**}

Povzetek

Agencija Republike Slovenije za okolje je v okviru projekta Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja izvedla nadgradnjo in širitev sistema za napovedovanje hidroloških razmer, ki je bil leta 2006 vzpostavljen za porečje Mure v okviru regijskega sodelovanja s hidrološko službo avstrijske Štajerske. V prispevku so opisani zasnova in zgradba prognostičnega hidrološkega sistema na porečjih Save in Soče, kalibracija hidrološkega in hidrodinamičnega modela, operativno delovanje sistema in prikaz njegovih rezultatov, trenutne omejitve sistema in predviden razvoj v prihodnosti.

Uvod

V okviru projekta River Basin Agenda Alpine Space, ki ga je podprla iniciativa EU INTERREG IIIB, je bil leta 2006 izdelan sistem za napovedovanje hidroloških razmer na reki Muri. To je bil prvi konceptualni hidrološki prognostični sistem, ki sta ga hidrološki službi Slovenije in avstrijske Štajerske vpeljali v svoje operativno delo. Ker se je takšno operativno orodje izkazalo kot zelo koristno in nepogrešljivo pri opravljanju vsakodnevnih nalog prognostičnih služb, so se prav kmalu pojavile tudi potrebe po širitvi prognostičnega sistema na druga porečja in tudi njegovi nadgradnji, kar bi še dodatno povečalo operativno učinkovitost hidrološke prognostične službe v Sloveniji. Tako je Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) že leta 2006 pričela s pripravo projekta Nadgradnja sistema za spremljanje in analiziranje stanja vodnega okolja ali BOBER (Boljše opazovanje za boljše ekološke rešitve), s katerim je kandidirala na razpisu Evropskega kohezijskega sklada - Operativni program razvoja okoljske in prometne infrastrukture za obdobje 2007–2013 in pozneje tudi pridobila sredstva za njegovo izvedbo. V okviru projekta BOBER je bila pripravljena naloga širitve in nadgradnje obstoječega prognostičnega sistema za porečji Save in povodje Soče. S to nalogo je bil načrtan razvoj Oddelka za hidrološko prognozo na Agenciji RS za okolje med letoma 2010 in 2015.

Širitev in nadgradnja sistema za napovedovanje hidroloških razmer

Sistem za napovedovanje hidroloških razmer se je v okviru projekta BOBER razširil na porečje reke Save do zadnje vodomerne postaje na slovenskem ozemlju – Jesenice na Dolenjskem, in celotno povodje reke Soče, skupaj z italijanskimi pritoki, do izliva v Jadransko morje. Nadgradnja prognostičnega sistema je poleg razvoja kontrolnega orodja in izboljšane uporabniške izkušnje obsegala še naslednje tri bistvene sklope:

- vključitev dodatnih meteoroloških modelov, katerih napovedi služijo kot vhodni podatek za simulacije hidroloških modelov prognostičnega sistema,

^{*} Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, SI-1000 Ljubljana

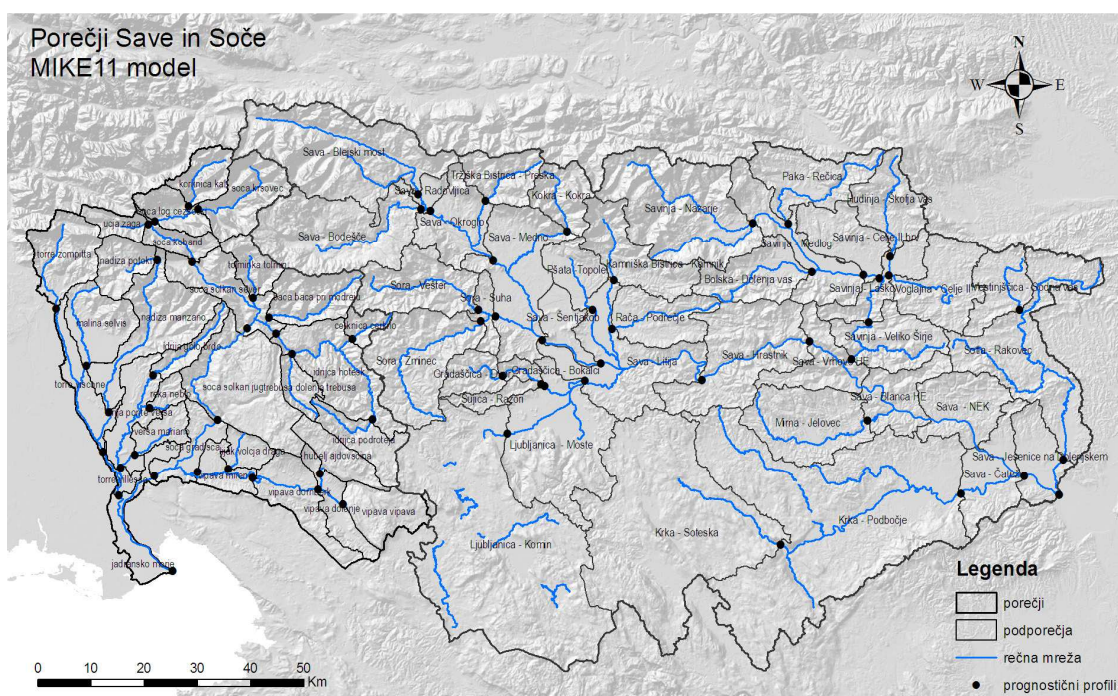
^{**} DHI, Agern Allé 5, DK-2970 Hørsholm, Danska.

- navezavo sistema na sistem za opozarjanje širše javnosti pred poplavno nevarnostjo Hidroalarm,
- izdelavo spletne strani, ki je namenjena prikazu modelskih rezultatov hidrološkega prognostičnega sistema zainteresiranim uporabnikom.

Modelski območji porečij Save in Soče zajemata 53 % oz. 11 % površine Slovenije. Tako lahko Oddelek za hidrološko prognozo pri napovedovanju hidroloških razmer v Sloveniji sedaj uporablja rezultate hidrološkega prognostičnega sistema, ki obsega cca 70 % slovenskega ozemlja na porečjih Mure, Save in Soče.

Zasnova hidrološkega prognostičnega sistema

Osnovna ideja pri izgradnji hidrološkega prognostičnega sistema je bila zasnovati tak sistem, ki bo omogočal enoten, enostaven in hiter pregled hidrološkega stanja in napovedi v izbranih prognostičnih profilih na porečjih Save, Soče in Mure. Zato smo se odločili za ohranitev modelskega jedra sistema – programskega paketa MIKE11 skupine DHI, ki je že bilo uporabljeno na porečju Mure. Hidrološki prognostični sistem smo želeli v največji meri zgraditi okoli že obstoječih hidroloških, meteoroloških in prostorsko-informacijskih baz podatkov na ARSO. Izgradnja sistema se je tako usmerila k pridobivanju podatkovnih virov oz. pregledu njihovega stanja, pripravi potrebnih vhodnih podatkov in parametrov za potrebe modeliranja, zasnovi kontrolnega orodja sistema in pregledovalnika modelskih rezultatov ter njihovega shranjevanja za potrebe poznejših analiz.



Slika 1: Delitev porečij Save in Soče na podporečja glede na izbrane prognostične profile hidrološkega prognostičnega sistema

Na porečju Save (10 843 km²) smo izbrali 40, na povodju Soče (3 426 km²) pa 31 vodomernih postaj za prognostične profile znotraj sistema (Slika 1). Območji obeh porečij smo razdelili na prispevna območja izbranih prognostičnih profilov. Tako smo določili

izhodišča za hidrološka modela Save in Soče, ki smo ju zastavili v osnovni komponenti paketa MIKE11 – NAM. Gre za determinističen in konceptualen hidrološki model, ki s semi-empiričnimi matematičnimi izrazi poenostavljeno opisuje komponente hidrološkega kroga pri tleh. NAM določa površinskih odtok iz prispevnih območij prognostičnih profilov, ki so znotraj modela obravnavana kot posamezne računske enote. Z vključitvijo enostavnega snežnega modula pa model upošteva tudi akumulirano vodo v snegu na različnih višinskih conah prispevnih območij.

Za izgradnjo enodimenzijskega hidrodinamičnega modela, ki služi kinematični propagaciji valov površinskega odtoka vzdolž poenostavljene hidrografske mreže, smo zbrali razpoložljive prečne profile vodotokov in informacije o večjih hidrotehničnih objektih na vodotokih (pregrade in akumulacije hidroelektrarn, jezovi in talni pragovi). Pri operativnem delovanju je sistemu dodan še modul za korekcijo napovedanih pretokov in vodostajev. Ta modul znotraj hidrodinamičnega modela popravi modelirane pretoke in vodostaje z izmerjenimi vrednostmi ob upoštevanju eksponentne funkcije približevanja k napovedanim vrednostim.

Kalibracija hidrološkega in hidrodinamičnega modela

Po opravljeni delitvi porečij Save in Soče na podporečja oz. računske enote hidrološkega modela so bili pripravljene vsi potrebni podatki za kalibracijo: 10-letni nizi (1998–2007) urnih podatkov o temperaturah in padavinah iz meteorološke mreže merilnih postaj, pretokih in vodostajih na vodomernih postajah hidrološke merilne mreže in potencialne evapotranspiracije na računskih enotah (dnevni podatki). Hidrološki model je bil pripravljen za kalibracijo po izračunu uteži za določitev srednje vrednosti padavin in temperature na posamezno računsko enoto, določitvi površin 100-metrskih višinskih pasov znotraj računskih enot in izbiri temperaturnih in padavinskih gradientov po višini. Glavni kriteriji pri kalibraciji hidrološkega modela so bili naslednji: ujemanje vodne bilance, visokovodnih konic, padajočih delov hidrogramov in baznega odtoka znotraj 10-letnega obdobja kalibracije. Kalibracija parametrov hidrološkega modela je bila opravljena predvsem ročno z občasnimi zagoni modula za avtokalibracijo. Pri tem smo ponekod naleteli na težave predvsem zaradi slabše raziskanih ali določenih razvodnic na kraških območjih. Končni rezultat kalibracije je bil zelo odvisen od kakovosti podatkov o padavinah in pretokih.

Kalibriran hidrološki model je bil nato povezan s hidrodinamičnim modelom. Zaradi preredke mreže znanih prečnih prerezov na vodotokih je bila kalibracija hidrodinamičnega modela opravljena predvsem v izbranih prognostičnih profilih tako, da so bili dodani bistveni elementi, ki opredeljujejo hidrodinamične razmere na obravnavanih odsekih. Tako smo pri različnih vodnih stanjih dosegli odstopanje simuliranega vodostaja od izmerjenega znotraj intervala ± 20 cm. V model so vstavljeni tudi glavni hidrotehnični objekti s pravili obratovanja regulacijskih naprav.

Operativna postavitve sistema za napovedovanje hidroloških razmer

Hidrološki model znotraj operativnega hidrološkega prognostičnega sistema vzame kot vhodne podatke izmerjene količine padavin in temperature na avtomatskih meteoroloških postajah, ki so vključene v mreže hidroloških in meteoroloških opazovanj Slovenije in tudi sosednjih držav, ter napovedane količine padavin in temperature z različnimi meteorološkimi modeli. Hidrološki prognostični sistem izdelava napoved pretokov in

vodostajev v izbranih prognoističnih profilih za 72 in 144 ur vnaprej glede na kombinacijo merjenih in z različnimi meteorološkimi modeli napovedanih količin padavin in temperatur. Tako znotraj sistema obratujejo štiri različne postavitve hidroloških modelov, ki jih prikazuje Preglednica 1. Posebnost druge postavitve je ta, da meteorološki model INCA-CE za zelo kratkoročno napovedovanje, ki izdeluje napovedi v polurnih intervalih, vsebuje tudi analizo meteoroloških razmer za pretekle pol ure glede na meritve avtomatskih meteoroloških postaj in vremenskega radarja. Ob tem se vhodni časovni nizi meteoroloških spremenljivk kreirajo vsako uro tako, da se analize predhodnih napovedi INCA-CE ohranjajo. Četrta postavitev hidrološkega modela je eksperimentalne narave, saj služi testiranju določenih rešitev zaradi slabšega poznavanja dejanske porazdelitve merjenih padavin v prostoru ali pravil obratovanja hidrotehničnih objektov, ki so vključeni v hidrodinamični model.

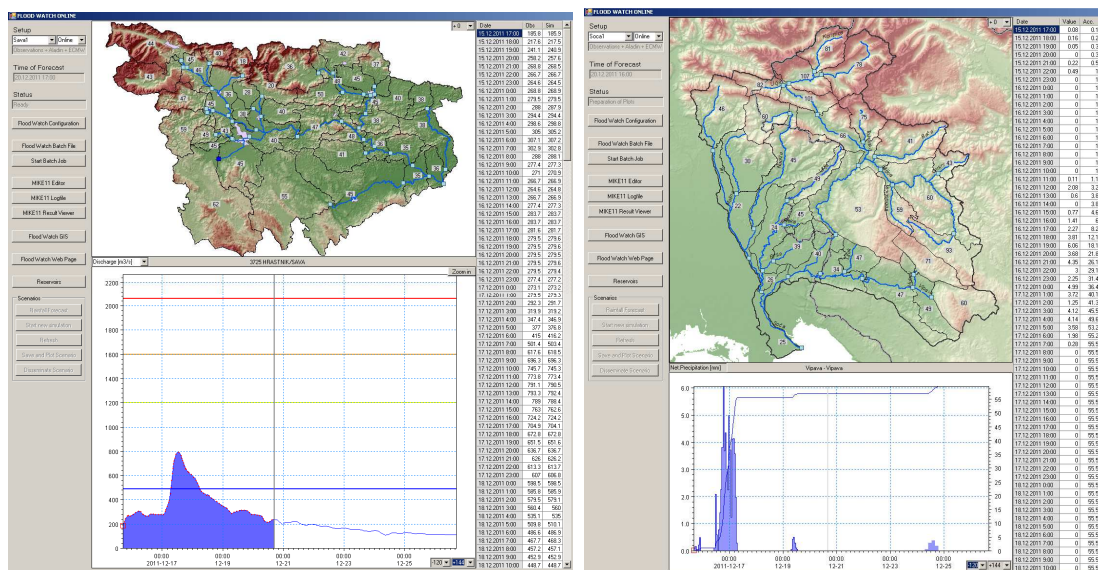
Preglednica 1: Različne postavitve hidroloških modelov znotraj sistema za napovedovanje hidroloških razmer na porečjih Save in Soče

postavitev hidrološkega modela	meritve avtomatskih merilnih postaj zadnjih 120 ur	napovedi meteorološkega modela			
		INCA-CE za prihodnjih 12 ur	NMM za prihodnjih 72 ur	ALADIN/SI za prihodnjih 72 ur	ECMWF za prihodnjih 144 ur
SAVA1/SOČA1	●			●	●
SAVA2/SOČA2	○	●		●	
SAVA3/SOČA3	●		●		
SAVA4/SOČA4*	●			●	

* eksperimentalna postavitev

Hidrološki prognoistični sistem se avtomatično zažene vsako uro in izdelava napovedi pretokov in vodostajev, ki jih korigira glede na izmerjeno hidrološko stanje na avtomatskih vodomernih postajah v zadnji uri. Ob začetku simulacije hidrološkega in hidrodinamičnega modela sistem razbere robne pogoje oz. njihovo začetno stanje iz predhodne simulacije. Napredno pregledovanje rezultatov in krmiljenje hidrološkega prognoističnega sistema omogoča orodje Flood Watch Online (Slika 2), ki ga je izdelal, nadgradil in dopolnil izvajalec naloge glede na zahteve in potrebe hidrološke prognoistične službe ARSO. V sistemu so na prognoističnih profilih prikazane tudi opozorilne vrednosti pretokov in vodostajev, ki so usklajene s sistemom za opozarjanje pred visokimi vodami Hidroalarm. Tako je omogočeno tudi povezovanje obeh sistemov in delne avtomatizacije procesov opozarjanja pred visokimi vodami.

Orodje Flood Watch Online omogoča tudi vpogled v pretekle simulacije hidrološkega prognoističnega sistema in simulacijo scenarijev hidroloških dogodkov, ki jih merilni instrumenti niso zaznali ali pa jih meteorološki modeli niso predvideli: po opravljenem posvetovanju med dežurnim hidrologom in meteorologom lahko zelo hitro izvedemo novo simulacijo z ročno korigiranimi vrednostmi izmerjenih ali napovedanih količin padavin.



Slika 2: Orodje za pregledovanje rezultatov in krmiljenje hidrološkega prognošičnega sistema – Flood Watch Online. Levo – simulacija pretokov na v. p. Sava Hrastnik; desno – prikaz izmerjenih in napovedanih padavin na prispevnem območju v. p. Vipava Vipava.

Verifikacija sistema za napovedovanje hidroloških razmer

S testnim operativnim obratovanjem hidrološkega prognošičnega sistema smo pričeli aprila 2011. Hidrološki model znotraj operativnega sistema se poganja s padavinami in temperaturami, ki so izmerjene na avtomatskih meteoroloških postajah in napovedane z meteorološkimi modeli. Parametri hidrološkega modela so bili v času kalibracije določeni iz podatkov, ki so bili izmerjeni na merilnih mestih najširše meteorološke mreže, in se razlikujejo od tistih znotraj operativnega sistema. Zato načrtujemo izvedbo verifikacije kalibriranega hidrološkega modela na operativnem izboru avtomatskih meteoroloških postaj. V okviru projekta je bila zgrajena tudi podatkovna baza simulacij hidrološkega prognošičnega sistema, ki bo uporabljena za analizo kakovosti simulacij in verifikacijo napovedanih pretokov v posameznih prognošičnih profilih. Tovrstno verifikacijo predvidevamo, ko se bo v podatkovni bazi nabral statistično zadosten vzorec visokovodnih valov.

Bistvena ugotovitev, ki se poraja iz testnega obratovanja sistema je ta, da je trenutna mreža avtomatskih merilnih postaj padavin preredka za podrobnejši zajem precej razgibane prostorske porazdelitve padavin v Sloveniji. Tako so simulacije hidroloških modelov v posameznih primerih dokaj negotove. Kombinacija omenjene ugotovitve in načina delovanja modula za korekcijo napovedanih pretokov in vodostajev privede do omejenih napovedi hidrološkega prognošičnega sistema, ki zahtevajo kritično presojo hidrologa prognošičnika. Pričakujemo, da se bo to stanje precej izboljšalo v prihodnjih letih s postavitvijo novih avtomatskih merilnih postaj in vremenskega radarja v okviru projekta BOBER ter z nadaljnjim razvojem hidrološkega prognošičnega sistema.

Prikaz rezultatov sistema za napovedovanje hidroloških razmer

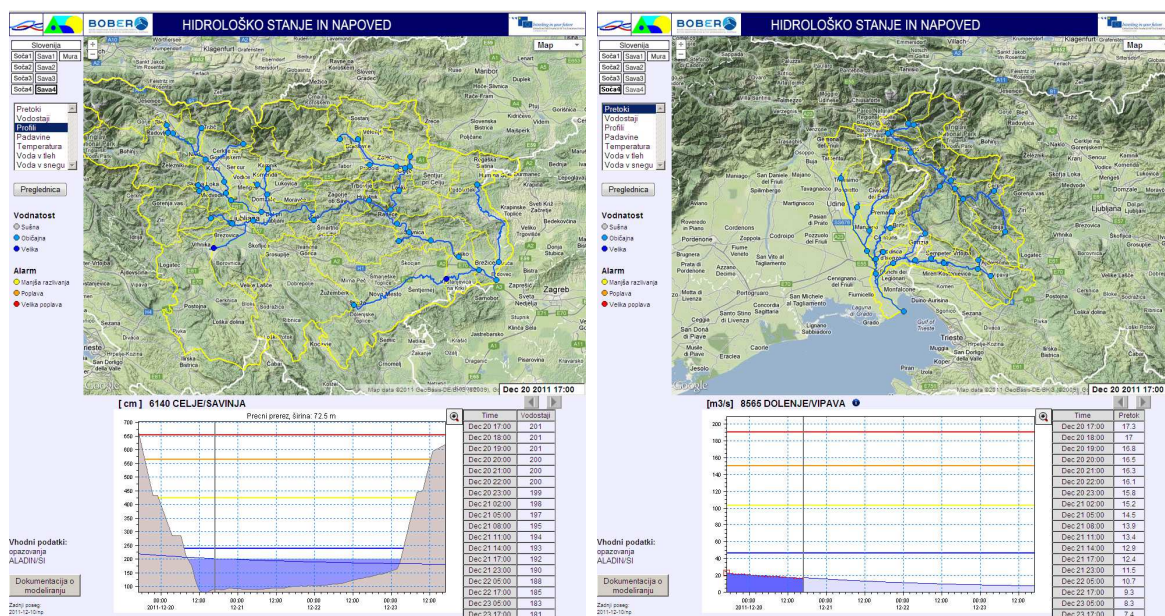
V okviru projekta BOBER je bila izdelana spletna stran, ki prikazuje rezultate hidrološkega prognošičnega sistema in je trenutno dostopna vsem uporabnikom na ARSO,

saj so rezultati sistema uporabni tudi pri optimiziranju delovanja drugih strokovnih služb, npr. s področja kakovosti voda in hidrometrije. V prihodnje bo dostop do rezultatov sistema omogočen tudi zunanjim zainteresiranim uporabnikom, vendar v omejenem obsegu in pod določenimi pogoji, saj je za pravilno interpretacijo rezultatov sistema potrebna kritična hidrološka presoja. Spletni prikaz rezultatov prognostičnega sistema (Slika 3) temelji na prostorskem prikazu modelskih porečij s podporečji oz. računskimi enotami in lokacij prognostičnih profilov na obstoječih geografskih podlagah, ki jih omogočajo dostopni spletni servisi.

Spletna stran omogoča vpogled v rezultate hidrološkega prognostičnega sistema:

- v prognostičnih profilih, kjer so prikazani časovni nizi napovedanih pretokov in vodostajev ter predviden potek gladine v prečnem prerezu, ter
- na prispevnih območjih posameznih prognostičnih profilov, kjer so prikazani časovni nizi izmerjenih in napovedanih padavin in temperatur zraka, izračunanih deležev vode v tleh in vodnega ekvivalenta snežne odeje.

Na diagramih časovnih nizov so ob napovedanih prikazani tudi merjeni vodostaji in pretoki ter pripadajoče opozorilne vrednosti, ki so skladni s sistemom Hidroalarm.



Slika 3: Spletni prikaz rezultatov hidrološkega prognostičnega sistema. Levo – simulacija vodostajev na v. p. Savinja Celje s prikazom prečnega prereza in opozorilnih vrednosti vodostajev v barvni kodi Hidroalarna; desno – simulacija pretokov na v. p. Vipava Dolenje s prikazom opozorilnih vrednosti pretokov.

Na spletni strani je poleg modelskih rezultatov v vsakem prognostičnem profilu na voljo tudi dokument, ki vsebuje izbor metapodatkov o pripadajoči vodomerni postaji iz katastra vodomernih postaj, informacije o trenutno delujočih merilnih instrumentih, aktualni pretočni krivulji in prečnem prerezu, povezavo do morebitne spletne kamere na postaji ter izbor hidroloških značilnosti, kot so povratne dobe malih in velikih pretokov, obdobje letne statistike pretokov in temperatur ter kratek opis razmer ob treh najvišjih zabeleženih vodah.

Zaključki

Hidrološke napovedi so v preteklih letih temeljile na subjektivnih ocenah hidrologa prognostika in enostavnih regresijskih modelih. Z razvojem kompleksnejših numeričnih modelov in avtomatizacijo meteoroloških in hidroloških merilnih mrež so hidrološke napovedi postale tehnično bolj objektivne. Ob upoštevanju znanih omejitev in nezanesljivosti modelov je mogoče zgraditi dovolj kakovosten hidrološki prognostičen sistem, ki bo omogočal pravočasno in natančnejše opozarjanje pred visokimi vodami.

Sistem za napovedovanje hidroloških razmer je sodobno orodje, ki je izrednega pomena za hidrološko prognostično službo in tudi druge strokovne službe na Agenciji RS za okolje pri opravljanju vsakodnevnih nalog. Z njegovim razvojem so omogočeni enoten, enostaven in hiter pregled hidrološkega stanja in napovedi pretokov in vodostajev v izbranih prognostičnih profilih na porečjih Save, Soče in Mure. Sistem izdelava hidrološke napovedi na osnovi simulacij razvoja vremena različnih meteoroloških modelov.

Hidrološki prognostični sistem je v svojem temelju zasnovan za napovedovanje poplavnih dogodkov. Tako lahko pri manjših in zmernih porastih rek prihaja do relativno velikih odstopanj med napovedanim in pozneje izmerjenim hidrološkim stanjem v posameznih prognostičnih profilih. Lahko nastanejo tudi nelogične napovedi prognostičnega sistema kot posledica delovanja modula za korekcijo napovedanih pretokov in vodostajev z merjenimi vrednostmi. Zato je za pravilno interpretacijo rezultatov sistema nujno potrebna kritična in strokovna presoja hidrologa prognostika.

Glavne omejitve hidrološkega prognostičnega sistema izhajajo predvsem iz pomanjkljivosti vhodnih podatkov ali relativno preprostih modulov, ki so vključeni znotraj sistema. Zaradi relativno redke mreže prečnih prerezov, ki je vključena v hidrodinamični model sistema, lahko pride do nestabilnosti in nepričakovanih nihanj simuliranih pretokov in vodostajev, predvsem pri visokih in izredno nizkih hidroloških stanjih. Trenutna mreža avtomatskih merilnih postaj padavin je preredka za natančen zajem precej razgibane prostorske porazdelitve padavin v Sloveniji. Tako so simulacije hidrološkega modela v posameznih primerih dokaj negotove. Snežni modul, ki je trenutno vključen v hidrološki model sistema, uporablja relativno enostavno računsko metodo, ki daje nezanesljive rezultate predvsem na območjih z razgibanim reliefom. V našem primeru modelske napovedi o vodnem ekvivalentu snežne odeje odstopajo od dejanskega poteka akumulacije in taljenja snega.

Hidrološka prognostična služba upošteva vse zgoraj omenjene omejitve pri operativnem delovanju sistema. Tako se bodo z operativnim delovanjem sistema nabirale izkušnje, ki bodo omogočale pripravo izboljšav hidrološkega prognostičnega sistema kot celote. Že v okviru projekta BOBER se bosta do leta 2015 zgostili mreži avtomatskih meteoroloških in tudi hidroloških merilnih mest. Tako bomo hidrološki model sistema poganjali s prostorsko boljše porazdeljenimi padavinami in korigirali napovedane pretoke v več prognostičnih profilih. To pomeni, da bo sistem omogočal točnejše napovedi, delovanje sistema pa bo stabilnejše. Načrtujemo tudi zamenjavo snežnega modula z bolj kompleksnim, ki bo ravno tako prispeval k boljšim napovedim sistema. Prihodnje analize modelskih rezultatov pri izjemnih hidroloških dogodkih bodo omogočile izboljšanje kalibracije tako hidrološkega kot tudi hidrodinamičnega modela. Že v prihodnjih mesecih pa bomo hidrološkemu prognostičnemu sistemu dodali še hidrološke napovedi na osnovi skupinskih numeričnih napovedi razvoja vremena z meteorološkim modelom ALADIN in izvedli povezavo s sistemom Hidroalarm ter tako dosegli višjo stopnjo avtomatizacije procesov pri opozarjanju pred visokimi vodami.

Literatura

Arhiv Agencije RS za okolje.

DHI Software, 2009. Mike 11, A modelling system for rivers and channels, User manual (<http://www.dhigroup.com/Software/WaterResources/MIKE11.aspx>)

Pogačnik, N., Gosar, L., Ruch, C., 2008. Hidrološki prognostični sistem : uporaba prostorskih podatkov. V: PERKO, D. (ur.), Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008, (GIS v Sloveniji, 9), Ljubljana, str. 129-141.

Pogačnik, N., Petan S., Sušnik, M., Jørgensen, G., Polajnar, J., Ruch, C.: Development of a flood forecasting system on the Sava river in Slovenia, XXVth Conference of the Danubian Countries, 16-17 June 2011 – Budapest, Hungary.

Ruch, C., Jørgensen, G., Polajnar, Sušnik, M., Hornich, R., Schatzl, R., Pogačnik N. 2006: Trans - boundary forecasting system on Mur river. 23. Conference of the Danubian countries on the hydrological forecasting and hydrological basis of water management, 28.-31, August 2006, Belgrade.

Vpliv različnih vrst substrata na strukturo hitrosti vodnega toka na primeru potoka Glinščica

Maja Koprivšek*

Povzetek

Prispevek obravnava vpliv različnih vrst substrata in morfološke spremenjenosti struge na strukturo hitrosti vodnega toka. Poudarek je na merjenju hitrosti vodnega toka tik ob dnu, kjer živi večina vodnih organizmov, predvsem makroinvertebratov. Predstavljene so meritve hitrosti vodnega toka nad različnimi vrstami substrata, ki smo jih izvajali na potoku Glinščica v Ljubljani poleti 2010. Uporabljali smo Dopplerjev merilnik pretočnih hitrosti FlowTracker Handheld ADV proizvajalca SonTek. V rezultatih pri različnih vodostajih primerjamo vertikalne profile hitrosti po širini prečnih prerezov nad različnimi naravnimi substrati in umetnim substratom. Na morfološko različnih odsekih struge primerjamo še gostoto turbulentne kinetične energije. Ocenjen je tudi vpliv življenjskih združb na hitrosti vodnega toka in vpliv vodnega toka na organizme.

Uvod

Vodni tok je najpomembnejši abiotični dejavnik v lotičnih sistemih, saj na vodne organizme vpliva na najrazličnejše načine. Neposredno vpliva nanje z odnašanjem dolvodno, s silo upora, prinašanjem hrane in plinov ter odnašanjem metabolitov, posredno pa vpliva nanje z določanjem velikosti delcev in strukture substrata, morfologije struge vodotoka in preskrbo s kisikom. Hitrost in struktura vodnega toka pa pomembno vplivata tudi na odnose med organizmi, med njimi najbolj očitno na kompeticijo in predatorstvo. Ker se vodni tok v naravnih vodotokih krajevno in časovno zelo spreminja, je potrebno za določitev dejanskega vpliva vodnega toka na vodne organizme zelo natančno izmeriti smer in hitrost vode na mestih, kjer se organizmi zadržujejo. Povprečna hitrost vodnega toka na posamezni vertikalni prečnega profila nam namreč ne pove ničesar o hitrostnih razmerah tik ob posteljici dna, kjer se zadržuje največ vodnih organizmov. Prav merjenje hitrosti tik ob dnu pa predstavlja velik problem, saj tehnologija za merjenje hitrosti v naravnih vodotokih ni prilagojena za merjenje tako blizu dna. Nove raziskave v zadnjih dveh desetletjih so namreč pokazale, da je laminarna mejna plast na kamnih v vodotoku velika le nekaj 100 mikrometrov in s tem mnogo premajhna za zavetje vodnih nevretenčarjev (makroinvertebratov). Kot zavetje ta plast služi le mikroorganizmom, makroinvertebrati pa se vodnemu toku umikajo ali prilagajajo na različne načine. Da bi razumeli, kakšnim razmeram so vodni organizmi podvrženi in kako se nanje prilagajajo, je bistvenega pomena poznavanje dinamike tekočin v naravnih vodotokih kot tudi ekologije.

V prispevku primerjamo vertikalne profile hitrosti, ki so bile izmerjene nad različnimi vrstami substrata ob različnih vodostajih na potoku Glinščica (Koprivšek, 2011). Na vsakem merilnem mestu smo izbrali več prečnih prerezov, na vsakem od njih pa več karakterističnih merilnih točk, na katerih smo z Dopplerjevim merilnikom hitrosti merili hitrosti vodnega toka v vzdolžni, prečni in navpični smeri na različnih oddaljenostih od dna. Iz varianc hitrosti smo izračunali še gostoto turbulentne kinetične energije. Na odseku z betonskim koritom smo izmerili tudi pretoke in ovrednotili vpliv obrasti na pretočno

*UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, SI-1000 Ljubljana

krivuljo. Rezultate smo nato primerjali z rezultati predhodno izvedenih študij združb makroinvertebratov in perifitona na istem potoku.

Metodologija

Najprej smo izvedli dve preliminarni meritvi hitrosti vodnega toka, s katerima smo primerjali rezultate, pridobljene s hidrometričnim krilom Valeport model 104, in rezultate, pridobljene z Dopplerjevim merilnikom hitrosti vodnega toka FlowTracker Handheld ADV proizvajalca SonTek. Namen teh meritev je bil ugotoviti, kateri izmed razpoložljivih instrumentov omogoča natančnejše meritve hitrosti čim bližje dnu struge, bregovom in elementom substrata (večji kamni v strugi). Hkrati smo želeli tudi preveriti, ali napravi dajeta primerljive rezultate, saj je bilo v predhodnih raziskavah, ki so zajemale tudi raziskave perifitona in makroinvertebratov, večinoma uporabljeno hidrometrično krilo. Meritve smo izvajali na morfološko različnih odsekih potoka. Izbrali smo precej zaraščen odsek, reguliran s pragovi, tik pred betonsko strugo, in togo reguliran odsek z betonskim koritom. Podobno kot De Doncker (2008) smo ugotovili, da je za meritve blizu dna ter v bližini objektov v strugi primernejši Dopplerjev merilnik, saj ne potrebuje prostora za vrtenje krila, pri njem pa je tudi manjša verjetnost izpada zaradi ovijanja alg in trave kot pri hidrometričnem krilu, kjer se krilce hitro zamaši z algami, ki jih prinaša vodni tok. V nadaljevanju smo merili le z Dopplerjevim merilnikom.

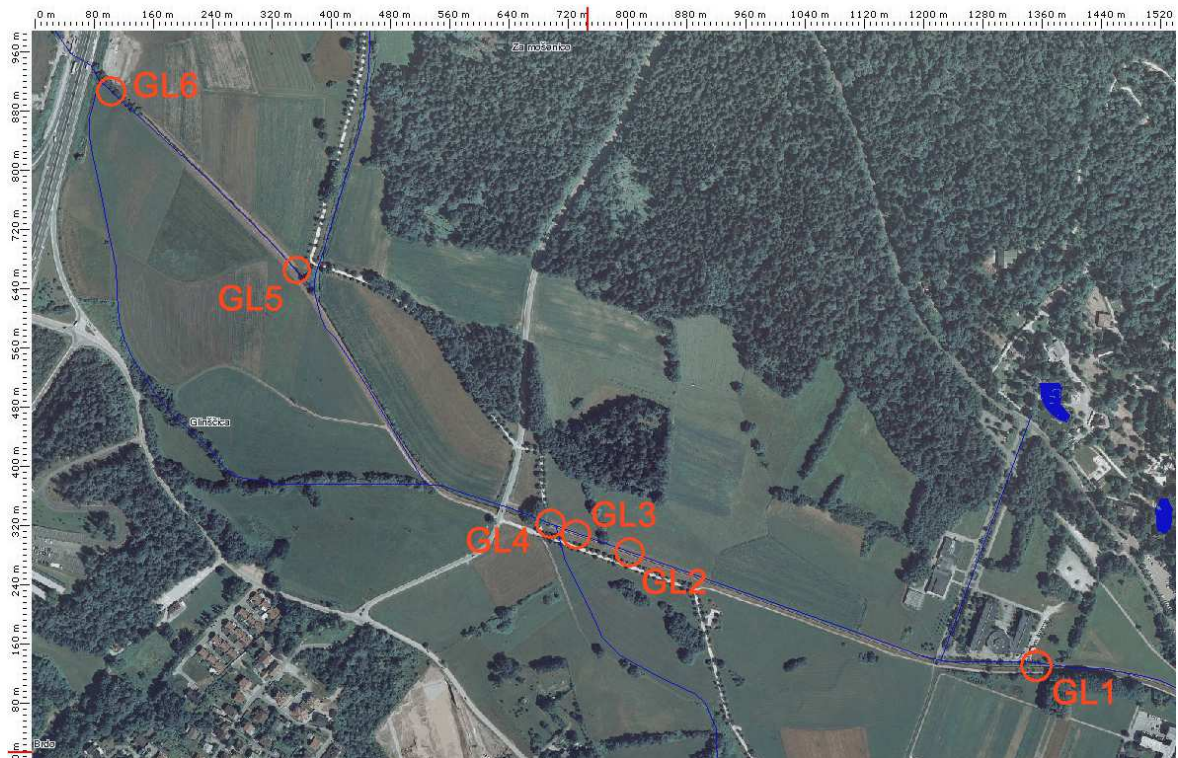
Meritve hitrosti so potekale na merilnih mestih, sestavljenih iz različnega števila prečnih prerezov, odvisno od karakteristik posameznega merilnega mesta. Na vsakem prečnem prerezu smo zbrali vsaj tri karakteristične točke (npr. ob robu struge, pred kamnom, za kamnom, na zaraščenem delu, na golem delu struge) in v teh točkah merili na različnih višinah po vertikali: na vodni gladini, na dveh desetinah globine, šestih desetinah globine (povprečna vrednost vertikale), osmih desetinah globine in pri dnu. Ob dovolj nizkem vodostaju (do približno 30 cm) je bila meritev ob dnu od posteljice dna oddaljena le 0,5 cm, ker smo sondo sneli s stojala in jo ročno držali na dnu, pri višjih vodostajih pa se je meritev približala dnu na 1,6 cm, saj je to najmanjša razdalja od dna, na kateri lahko merimo z uporabo stojala.

Interval merjenja hitrosti je bil 60 sekund na posamezni točki, saj je to minimalni čas merjenja, ki ga potrebujemo, če želimo zajeti potek nastajanja turbulentnih vrtincev (Buffin-Bélanger in Roy, 2005). Izjemoma smo interval merjenja skrajšali na 40 sekund, v primerih, ko smo želeli ujeti podobne pogoje med prehodom visokovodnega vala na čim več merilnih mestih.

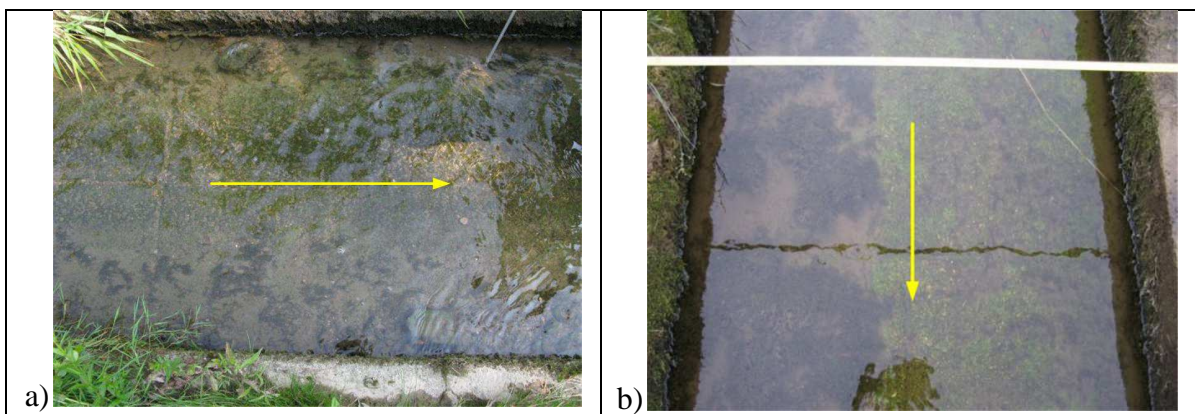
Merilna mesta

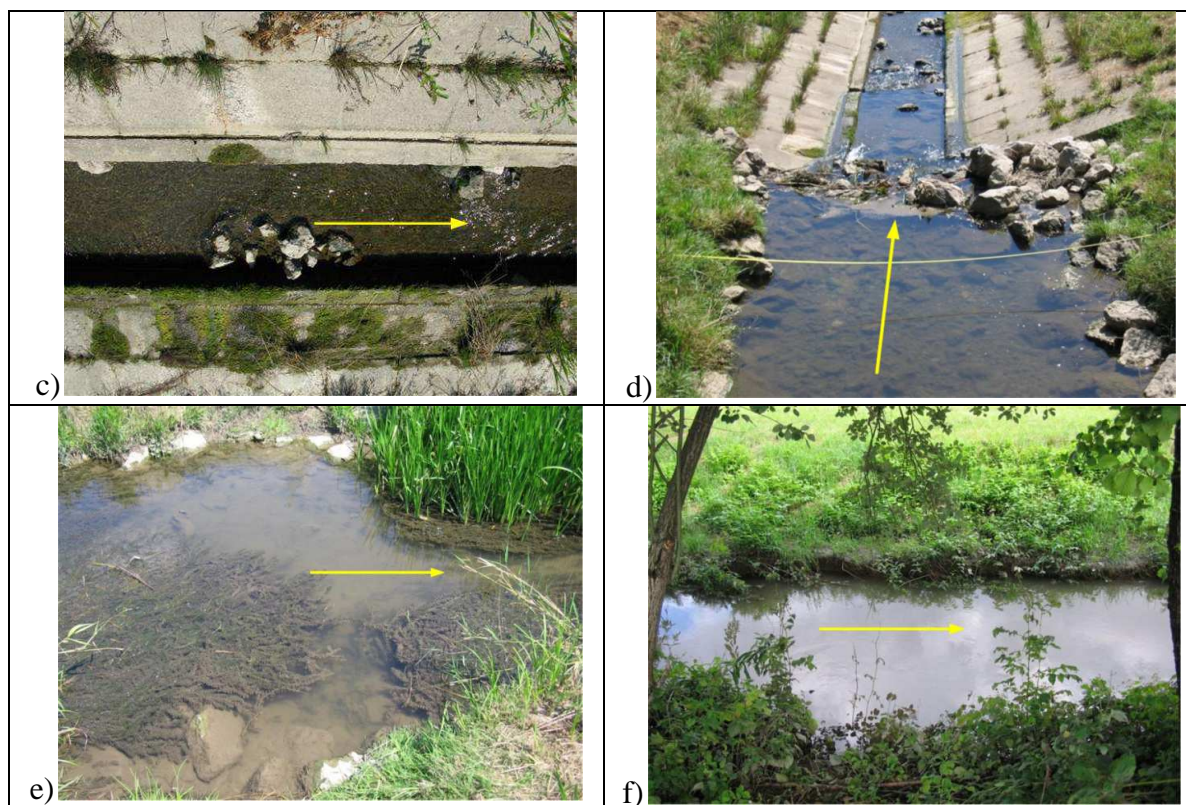
Meritve so potekale na vodotoku Glinščica v Ljubljani. Vodotok je primeren zaradi različnih stopenj reguliranosti na različnih odsekih in raznolikega substrata, kot tudi zaradi velikosti, ki omogoča merjenje z ročnim merilnikom ADV SonTek ter ne nazadnje bližine, ki omogoča merjenje ob pravem času glede na potek poplavnega vala. Za raziskavo smo si izbrali 6 merilnih mest na odseku med Biološkim središčem in ljubljansko obvoznico (slika 1). Merilna mesta smo poimenovali z oznakami od GL1 do GL6 od najbolj dolvodnega proti najbolj gorvodnemu. Prva tri mesta smo izbrali na odseku z betonsko strugo (4. razred po ekomorfološki kategorizaciji), četrto merilno mesto je bilo na prehodu iz betonske struge v klasično regulirano strugo z naravnim substratom, zadnji dve vzorčni mesti pa sta bili na odseku klasično regulirane struge z naravnim substratom (2. - 3. razred

po ekomorfološki kategorizaciji). Odsek z betonsko strugo je trapezne oblike s poglobljenim osrednjim delom za prevajanje sušnega odtoka. Ta del je poglobljen za 0,25 m glede na dno struge, širok pa je en meter. Utrjevanje struge je izvedeno z betonskimi ploščami, velikosti 0,5 m × 0,5 m in debeline 0,1 m. Tlakovanje se v naklonu 1:10 navezuje na obstoječe brežine ali zidove oz. do regulacijske širine dna, ena vrsta plošč pa je položena tudi na brežino, katere nagib se spreminja od 1:1,5 do 1:2. Brežine so nad betonskimi ploščami zatravljene, višina brežin glede na osrednjo kineto pa znaša od 2,3 do 2,5 m (Rusjan, 2003).



Slika 1 - Položaj merilnih mest na potoku Glinščica (Vir: ARSO)



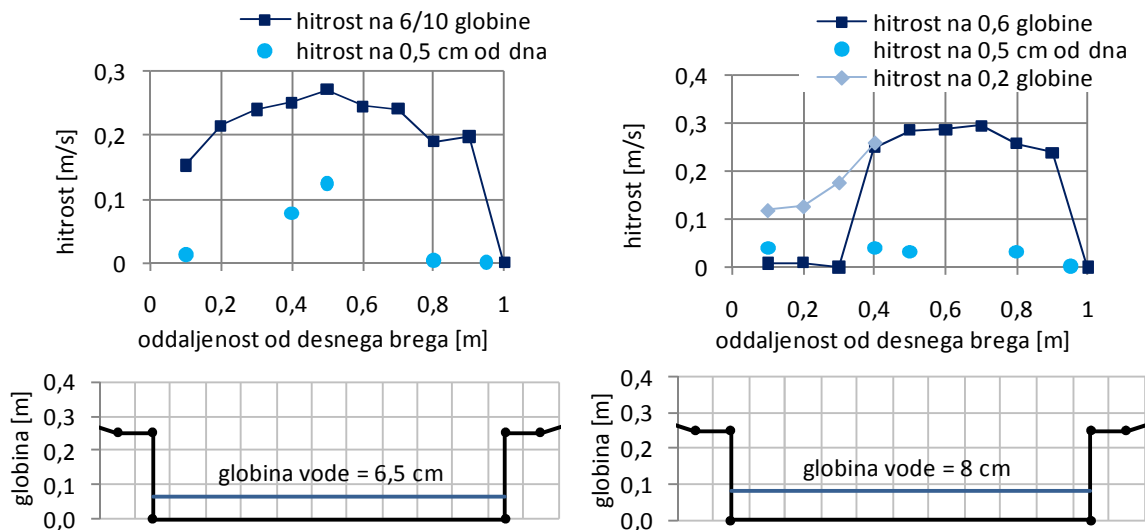


Slika 2 - Merilna mesta: a) GL1; b) GL2; c) GL3; d) GL4; e) GL5; f) GL6

Rezultati

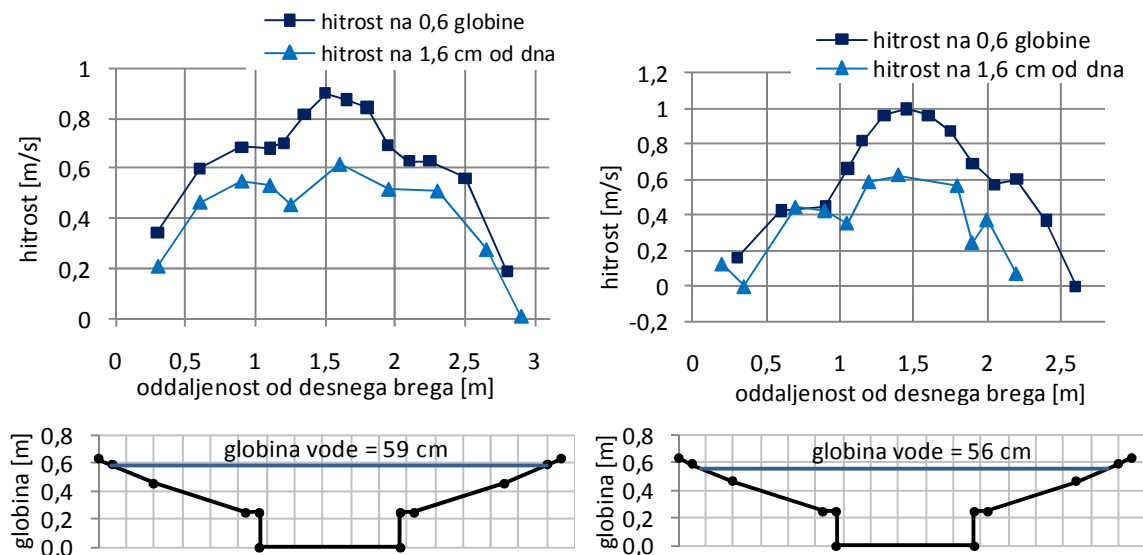
Večina merilnih mest je bila sestavljena iz več prečnih prerezov. Primerjali smo hitrosti vzdolž različnih prečnih prerezov na različnih globinah in ob različnih vodostajih. Zaradi velike količine podatkov prikazujemo v prispevku le primerjave ob najnižjem in najvišjem vodostaju, in sicer le na najzanimivejših merilnih mestih: GL2, GL4 in GL6.

Na merilnem mestu GL2 smo primerjali povprečne hitrosti in hitrosti pri dnu med prečnima prerezoma na zaraščenem in nezaraščenem betonskem koritu (sliki 3 in 4). Povprečna hitrost celotnega prečnega prereza je bila seveda večja na nezaraščenem delu betonskega korita, saj je bil koeficient hrapavosti struge tam manjši. Zanimivo pa je, da je bila največja hitrost na 6/10 globine izmerjena na zaraščenem delu struge. Razlog je v tem, da zaraščenost ni bila enakomerna, pač pa je bil del prereza ob desnem bregu (4/10 prečnega prereza) bistveno bolj zaraščen od preostalih 6/10 prečnega prereza (slika 2b). Obrast, ki so jo predstavljali predvsem mahovi, je prekrivala približno 80% površine na bolj zaraščenem delu prereza in okrog 30 % površine na manj zaraščenem delu prereza. Tako je glavnina vodnega toka tekla po manj zaraščenem delu prečnega prereza in posledično so bile hitrosti na tem delu bistveno večje kot na bolj zaraščenem delu.



Slika 3 - Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri nizkem vodostaju (GL2)

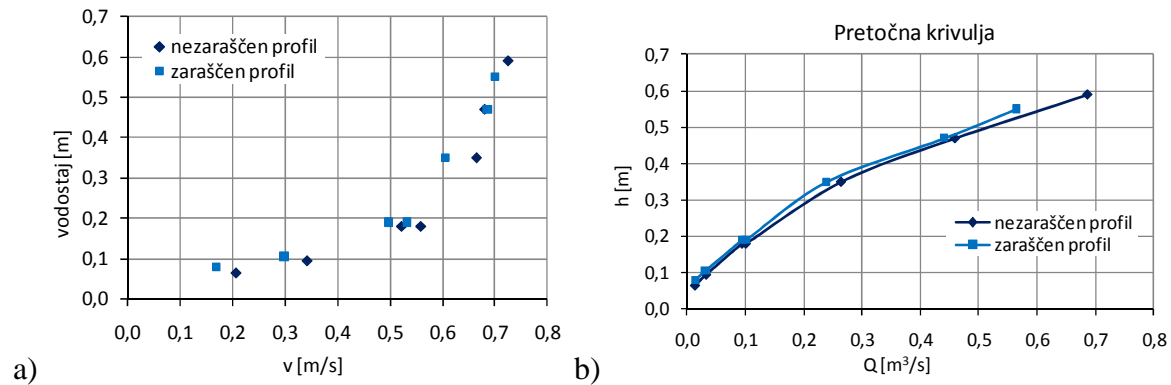
Z večanjem pretoka se je zaradi odtrganja obrasti zmanjšala obraščenost zaraščenega dela betonskega korita, zato so se razlike v hitrostih v glavni strugi med zaraščenim in nezaraščenim delom zmanjšale (slika 4). Obraščenost z mahovi v glavni, poglobljeni, strugi ni več imela bistvenega vpliva, velik vpliv pa so imele trave, ki rastejo iz špranj na zunanem delu betonskega korita. Zaradi tega so bile hitrosti v matici struge na 6/10 globine še vedno opazno večje kot na nezaraščenem delu struge. Hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna so bile zaradi manjše zaraščenosti z mahovi v glavni strugi precej podobne na obeh prečnih prerezih, do velikih razlik pa je prišlo na zunanem delu betonskega korita, kjer so se na zaraščenem prečnem prerezu pojavljale tudi protitočne hitrosti.



Slika 4 - Primerjava hitrosti nad nezaraščenim (levo) in zaraščenim (desno) betonskim koritom pri visokem vodostaju (GL2)

Slika 5a prikazuje primerjavo povprečne hitrosti zaraščenega in nezaraščenega prečnega prereza. Pri zelo nizkih vodostajih, pod 10 cm, ko je bila gostota obrasti največja, so bile

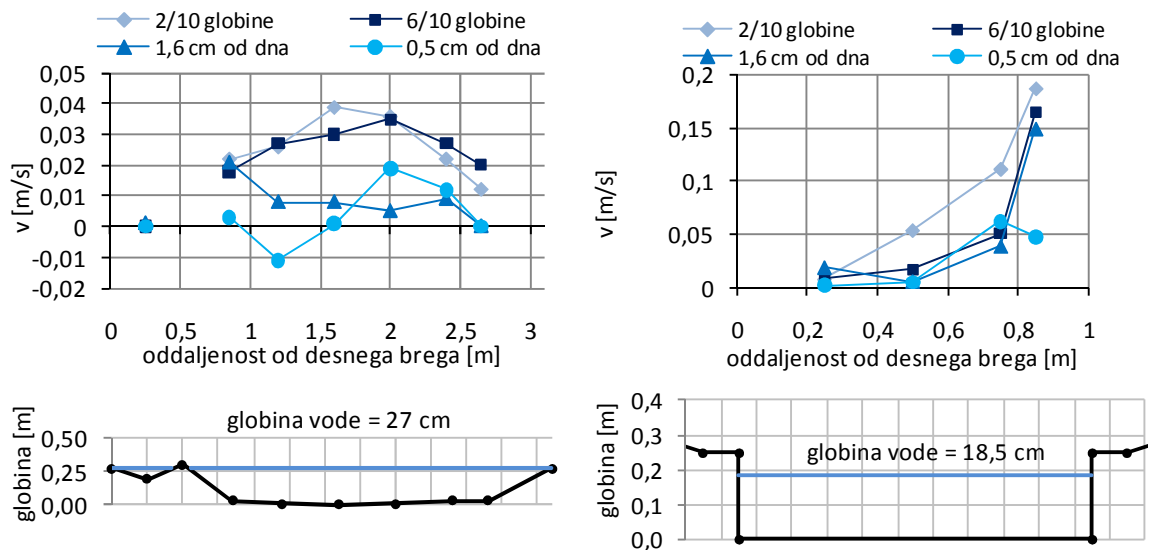
povprečne hitrosti okrog 20% manjše od tistih na nezaraščenem delu struge. Pri višjih vodostajih se ta odstotek sicer nekoliko zniža in znaša od globine 20 cm dalje približno 12%, saj je bila takrat tudi gostota obrasti manjša. Pri vodostajih od 50 cm dalje vrednosti niso več primerljive, saj sta se vodostaja pri merjenju na enem in drugem prerezu že precej razlikovala zaradi hitrega upada visokovodnega vala med izvajanjem meritev.



Slika 5 - a) Povprečna hitrost v v odvisnosti od vodostaja; b) Pretočna krivulja nad zaraščenim in nezaraščenim betonskim koritom

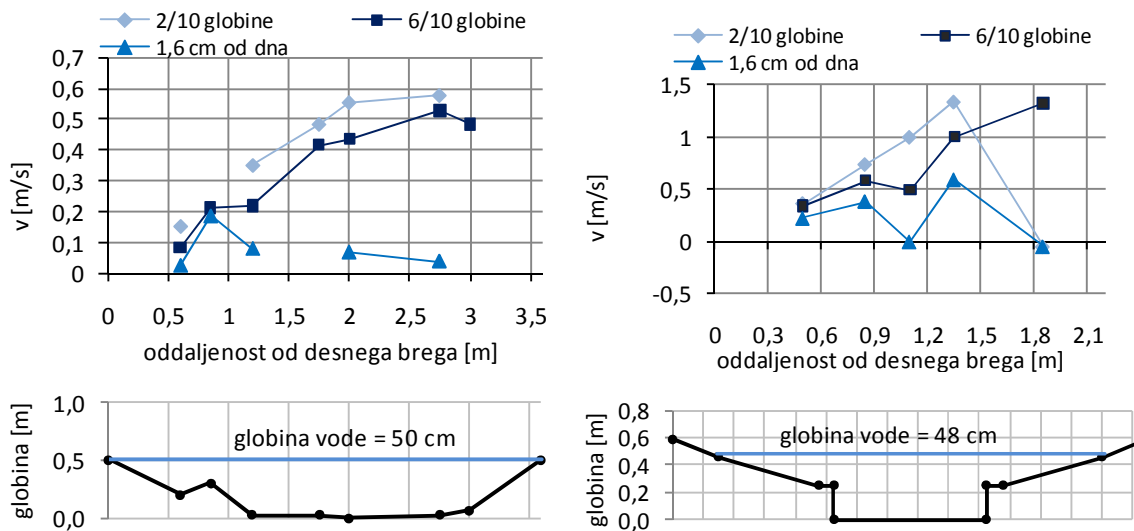
Na merilnem mestu GL2, sestavljenem iz nezaraščenega in zaraščenega prečnega prereza, smo merili tudi pretoke in primerjali pretočni krivulji na obeh prerezih (slika 5b). Pri enakem vodostaju se pretoki seveda zmanjšajo za enak odstotek kakor hitrosti vode. Naše meritve pretokov so potekale neposredno ena za drugo, in sicer smo vedno najprej merili na nezaraščenem in nato na zaraščenem prerezu, zato sta bila ob stabilnih pretočnih razmerah pretoka na obeh mestih enaka, zaradi zmanjšane povprečne hitrosti pa se je na zaraščenem prerezu povišal vodostaj. Pri višjih vodostajih se je pretok pri merjenju na zaraščenem prerezu že znižal glede na meritve na nezaraščenem prerezu in smo tako pri približno enakem vodostaju izmerili nižje hitrosti in manjši pretok.

Merilno mesto GL4 smo si izbrali na prehodu iz struge s seminaravnim substratom in betonskim koritom, in sicer tako, da je bil en prečni prerez postavljen na seminaravnem substratu 2,5 m gorvodno od začetka betonskega korita, drugi pa 1,8 m dolvodno od začetka betonskega korita. Vmes je nizek prag iz večjih kamnov, zato prihaja na seminaravnem prerezu do zaježitve. Pri nizkem vodostaju so zato hitrosti na tem delu bistveno manjše, struga pa je širša in globlja kakor na dolvodnem odseku z betonskim koritom (slika 6). Na prerezu z betonskim koritom (slika 6, desno) se lepo vidi vpliv kamnov v strugi dolvodno od prečnega prereza. Ob desnem bregu so bili ti kamni višji, zato so hitrosti vodnega toka bistveno večje ob levem bregu. Zanimivo je tudi to, da so bile na prerezu s seminaravnim substratom bistvene razlike med hitrostmi na različni oddaljenosti od dna struge, medtem ko so bile hitrosti nad betonskim koritom po vertikali praktično konstantne, kar pomeni, da so bile na betonskem koritu že hitrosti na oddaljenosti 0,5 cm od dna precej velike. Po drugi strani pa so bile na betonskem koritu bistveno večje razlike med posameznimi točkami na prečnem prerezu, medtem ko so bile na seminaravnem substratu hitrosti precej izenačene po celotnem prečnem prerezu.



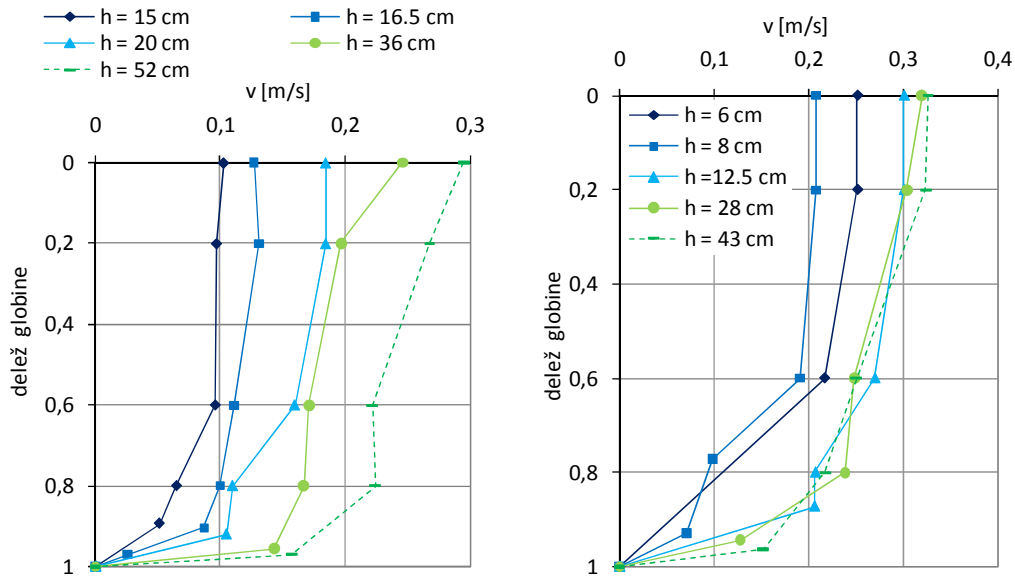
Slika 6 - Primerjava hitrosti nad seminaravnim substratom (levo) in umetnim substratom (desno) pri nizkem vodostaju (GL4)

Pri najvišjem vodostaju, pri katerem smo merili, sta se vodostaja na prerezu s seminaravnim substratom in na prerezu z betonskim koritom že popolnoma izenačila, širina struge pa je bila še vedno za dobro polovico večja na prerezu s seminaravnim substratom. Hitrosti na vseh globinah so bile na prerezu z betonskim dnom približno dvakrat večje (slika 7). Razlika v hitrosti vodnega toka med obema prerezoma se torej manjša z naraščanjem vodostaja, še vedno pa ostaja tudi pri izenačenem vodostaju še kar velika zaradi zaježitve s kamnitim pragom, ki omogoča širši omočen prerez struge na gorvodnem prerezu.



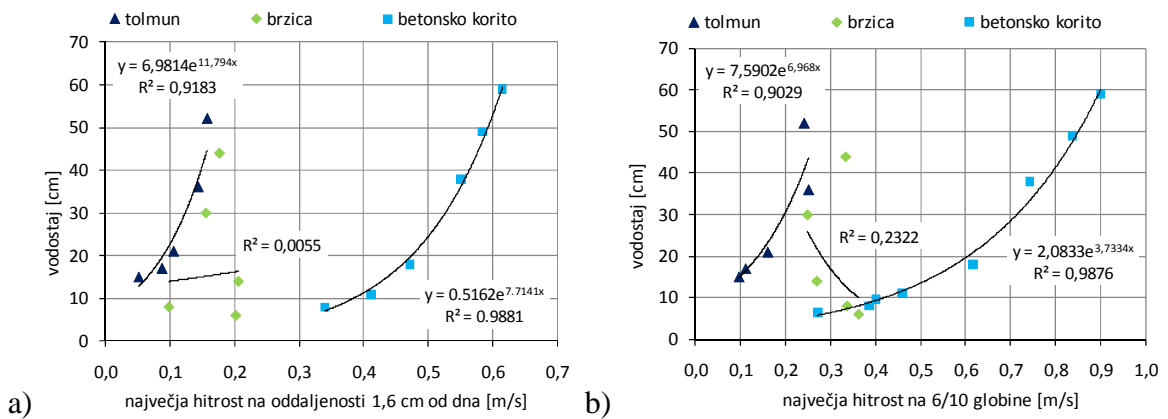
Slika 7 - Primerjava hitrosti nad seminaravnim substratom (levo) in umetnim substratom (desno) pri visokem vodostaju (GL4)

Na merilnem mestu GL6 smo primerjali seminaravno brzico in tolmun. Na vsakem od prerezov smo merili v treh točkah, enakomerno porazdeljenih po prečnem prerezu. Struga je bila na območju tolmana nekoliko širša kot na območju brzice, posebno ob nižjih vodostajih. Na sliki 8 prikazujemo vertikalne profile hitrosti na sredini struge ob različnih vodostajih. Razlike v hitrosti vode kakor tudi v vodostaju se med brzico in tolmunom manjšajo z naraščanjem vodostaja oz. povečevanjem pretoka. Posebej v tolmunu (slika 8, levo), kjer so hitrosti ob nizkem vodostaju majhne, se lepo vidi naraščanje hitrosti ob naraščanju vodostaja, in to po celotni vertikali. Na brzici (slika 8, desno) je že hitrost pri najnižjem vodostaju nekoliko večja, od vodostaja 13 cm naprej pa se ne povečuje več bistveno, zato se krivulje hitrosti ob zadnjih treh vodostajih prepletajo.



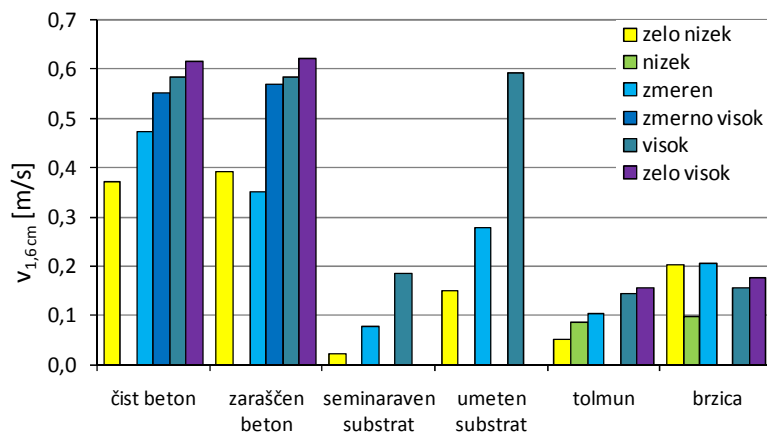
Slika 8 - Primerjava vertikalnih profilov hitrosti na sredini struge v odvisnosti od vodostaja v tolmunu (levo) in na brzici (desno) (GL6)

Primerjali smo še hitrosti pri dnu in hitrosti na 6/10 globine v odvisnosti od vodostaja na seminaravni brzici in tolmunu ter dodali še primerjavo z betonskim koritom. Iz slike 9a vidimo, da hitrosti ob dnu v tolmunu kažejo lepo eksponentno korelacijo z vodostajem, medtem ko meritve na brzici sploh ne kažejo statistične soodvisnosti med hitrostjo pri dnu in vodostajem. Razlog za to je predvsem neravno dno na območju brzice, pri čemer smo lahko največje vrednosti hitrosti ob dnu izgubili na območjih med izbranimi vertikalami, saj je matica toka med posameznimi vodostaji vidno spreminjala položaj. Seveda najlepšo eksponentno soodvisnost med hitrostmi pri dnu in vodostajem izkazujejo hitrosti nad betonskim koritom, kjer je hidravlična hrapavost dna najmanjša. Iz slike 9a vidimo tudi, da so hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna najmanjše v tolmunu. Nekoliko večje, vendar ne več kot dvakrat, so vrednosti hitrosti ob dnu na brzici, bistveno večje pa so hitrosti pri dnu nad betonskim koritom, ki so kar dva- do trikrat večje od hitrosti na brzici, in tri- do štirikrat večje kot v tolmunu.



Slika 9 - Hitrost v odvisnosti od vodostaja nad različnimi vrstami substrata: a) hitrost pri dnu; b) hitrost na 6/10 globine

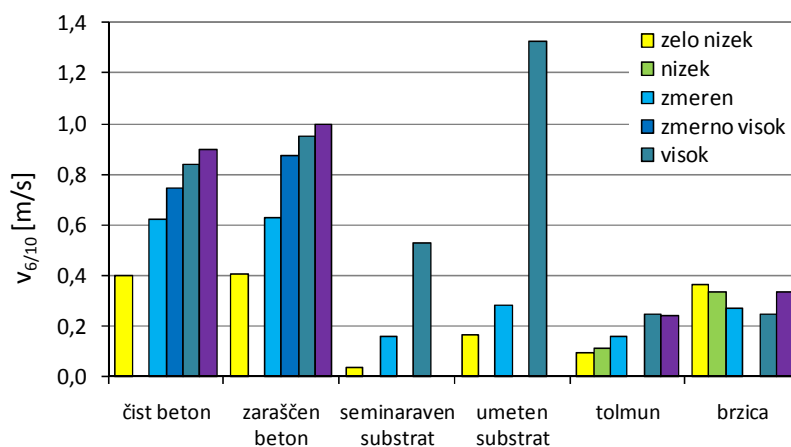
Slika 9b prikazuje hitrosti na 6/10 globine v odvisnosti od vodostaja. Tudi v tem primeru dobimo najlepšo eksponentno korelacijo na odseku z betonskim koritom, zelo velika soodvisnost se kaže tudi na prerezu preko tolmunu, na prerezu preko brzice pa tudi hitrosti na 6/10 struge ne kažejo statistične soodvisnosti z vodostajem. Opazimo še, da so razlike v hitrostih med posameznimi odseki na tej globini nekoliko manjše kot pri dnu, še posebej pri nižjih vodostajih, kjer so hitrosti na brzici povsem primerljive s hitrostmi nad betonsko strugo.



Slika 10 - Primerjava največjih hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

Hitrosti na oddaljenosti 1,6 cm od dna in na 6/10 globine na prej analiziranih merilnih mestih smo primerjali še na skupnih grafih (slike 11 – 14) in tako ovrednotili vpliv različnih morfoloških oblik ter vpliv vodostaj. Prečna prereza »čist beton« in »zaraščen beton« sestavljata merilno mesto GL2, prečna prereza »seminaraven substrat« in »umeten substrat« merilno mesto GL4, prečna prereza »tolmun« in »brzica« pa merilno mesto GL6. Najbolj verodostojne so seveda primerjave prečnih prerezov po parih na istem merilnem mestu, saj sta ta dva prereza zelo blizu en drugemu, meritve pa so se izvajale neposredno ena za drugo, zato lahko privzamemo, da je bil pretok na obeh prerezih enak.

Kot je razvidno z grafov na slikah 10 in 11 se tako hitrosti na 6/10 globine kakor hitrosti pri dnu z naraščanjem pretoka povečujejo, in sicer na vseh prečnih prerezih. Do odstopanj pride la na brzici, kjer je bil vodostaj pri manjših pretokih zelo nizek, matica toka pa je svoj položaj spreminjala glede na vodostaj. Vpliv pretoka in morfoloških oblik na hitrosti vode smo ovrednotili z analizo variance (ANOVA). Zaradi zagotavljanja enakosti varianc znotraj posameznih skupin, nismo mogli hkrati primerjati vseh prečnih prerezov pri vseh pretokih, zato smo med sabo primerjali le prečne prereze »čist beton«, »zaraščen beton« in »seminaraven substrat« ter pri hitrostih pri dnu še »umeten substrat«, nato pa naredili še analizo znotraj posameznih parov prečnih prerezov na istem merilnem mestu. Tako pri analizi hitrosti pri dnu kakor tudi hitrosti na 6/10 globine smo ugotovili, da nanje statistično značilno vplivata oba parametra, pretok in morfologija struge. Zanimivo je, da pri primerjavi »čistega« in »zaraščenelega betona« na hitrosti pri dnu bolj vpliva pretok kakor substrat (signifikanten vpliv imata sicer oba), medtem ko na povprečno hitrost bolj vpliva substrat. Na hitrosti pri dnu na mestih »seminaraven substrat« – »umeten substrat« glede na rezultate ANOVE niti pretok niti morfologija nimata signifikantnega vpliva, kljub temu pa iz grafa (slika 10) vidimo, da se hitrosti ob dnu s pretokom povečujejo, prav tako pa so ob vseh pretokih večje na »umetnem« kot na »seminaravnem substratu«. Na povprečne hitrosti vertikale imata približno enak, statistično značilen, vpliv morfologija in pretok. Na paru »brzica« – »tolmun« ima signifikanten vpliv na povprečne hitrosti morfologija, pretok pa ne, medtem ko imata na hitrosti pri dnu signifikanten vpliv oba parametra, pri čemer je vpliv pretoka nekoliko večji kot vpliv morfologije. Tako povprečne hitrosti kakor hitrosti pri dnu so statistično značilno različne med mesti nad betonskim substratom v primerjavi z mesti nad seminaravnim substratom, med tem ko med vsemi tremi mesti nad betonskim koritom ni signifikantnih razlik.

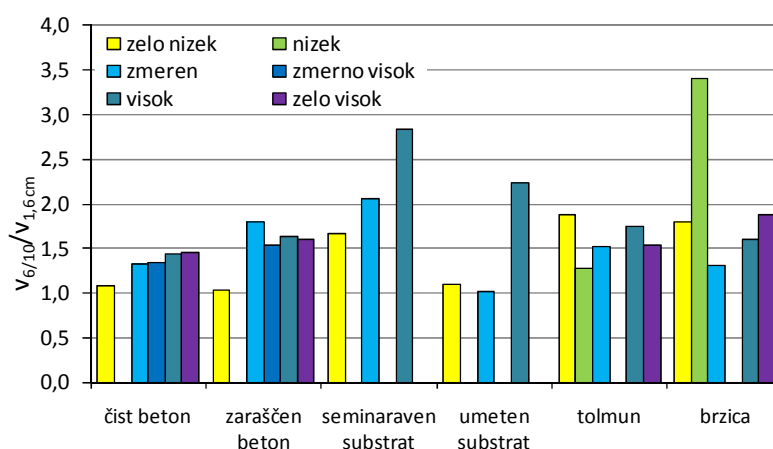


Slika 11 - Primerjava največjih hitrosti na 6/10 globine na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

Primerjane hitrosti so v obeh primerih (povprečje vertikale in pri dnu) največje hitrosti prečnega prereza, torej v matici toka. Kot je razvidno s slik 10 in 11 sta razporeda hitrosti na 6/10 globine in 1,6 cm od dna zelo podobna, le da so hitrosti na 6/10 globine primerno večje. To pomeni, da je oddaljenost 1,6 cm od dna že tolikšna, da ni več lokalnega vpliva substrata, saj je razpored hitrosti takšen kot v »prostem« vodnem stolpcu. Seveda to ne pomeni, da substrat na hitrosti vode ne vpliva. Vpliva namreč na hitrosti v celotnem vodnem stolpcu. To pomeni le, da je ta vpliv na oddaljenosti 1,6 cm od dna praktično enak

vplivu na povprečno hitrost vodnega stolpca, medtem ko bi morali za lokalni vpliv substrata meriti bližje dnu.

Izračunali smo še razmerje med povprečnimi hitrostmi vodnega stolpca in hitrostmi vode pri dnu (slika 12) in ugotovili, da obstajajo statistično značilne razlike med umetnim in seminaravnim substratom. Razmerje je na odsekih z betonskim koritom manjše kot na odsekih s seminaravno strugo, kar pomeni, da so bile hitrosti pri dnu v primerjavi s povprečnimi hitrostmi večje kot na odsekih s seminaravnim substratom. Opazna je tudi razlika med hidravlično gladko in hidravlično hrapavo podlago. Pri nizkem vodostaju razlike med posameznimi substrati niso bile velike, razmerje pa se je gibalo med 1,3 in 1,8. Pri visokih vodostajih pa je na mestih s hidravlično gladko podlago (betonsko dno, tolmun) razmerje ostalo približno enako, kar pomeni, da so se enako kot povprečne hitrosti povečale tudi hitrosti pri dnu, medtem ko se je na mestih s hidravlično hrapavo podlago (seminaraven substrat, umeten substrat) to razmerje povečalo, kar pomeni, da so se hitrosti pri dnu povečale manj kot povprečne hitrosti v vodnem stolpcu.



Slika 12 - Razmerje med hitrostmi na 6/10 globine in hitrostmi na oddaljenosti 1,6 cm od dna na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

Intenziteta turbulence se odraža kot magnituda fluktuacij posameznih komponent hitrosti (v vzdolžni, prečni in navpični smeri) okrog njihovih povprečnih vrednosti (Wilcox in Wohl, 2007). Za nize hitrosti na 6/10 globine, katerih povprečja so prikazana na sliki 12, smo izračunali gostoto turbulentne kinetične energije (TKE) po naslednji enačbi (Clifford in French, 1993):

$$TKE = \frac{1}{2} \rho (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2),$$

kjer je:

TKE...gostota turbulentne kinetične energije [N/m²],

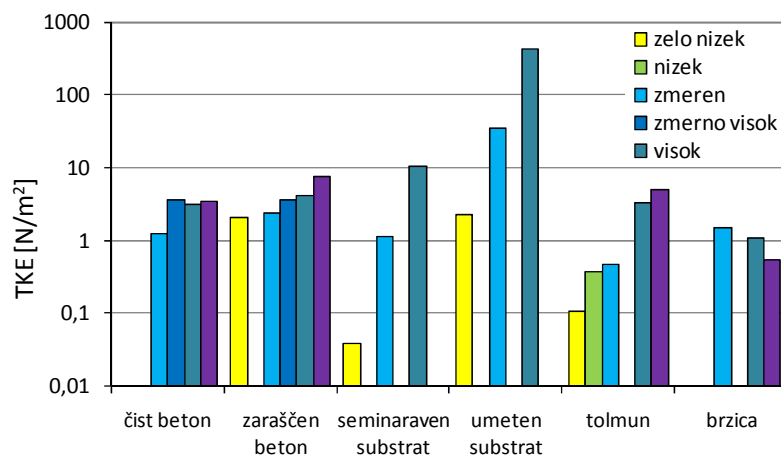
ρ ...gostota vode [kg/m³] (privzeta vrednost 1000 kg/m³),

σ_x^2 ... standardna deviacija hitrosti v vzdolžni smeri,

σ_y^2 ... standardna deviacija hitrosti v prečni smeri in

σ_z^2 ... standardna deviacija hitrosti v navpični smeri.

Rezultati so prikazani na sliki 13, kjer so vrednosti TKE prikazane na logaritemski osi. Pri vodostajih, nižjih od približno 10 cm, ki so se pojavljali ob nizkem in zelo nizkem pretoku na betonskem koritu in na brzici, vrednosti TKE nismo mogli izračunati, saj zaradi premajhne globine vode nismo mogli izmeriti navpične komponente hitrosti. Tako že zaradi izostanka najnižjih pretokov na dveh prečnih prerezih ter tudi zaradi neenakosti med variancami posameznih nizov z ANOVO ni bilo mogoče primerjati vseh prečnih prerezov naenkrat, zato smo primerjali le posamezne pare ter vsa mesta na seminaravnem substratu v primerjavi z vsemi mesti na betonskem substratu. Med brzico in tolmunom ni bilo statistično značilnih razlik, kakor tudi ne med čistim in zaraščenim betonskim koritom, signifikantne pa so bile razlike v morfologiji med tolmunom in zaraščenim betonskim koritom. Med vsemi mesti na seminaravnem substratu in vsemi mesti na betonskem substratu prav tako ni bilo statistično značilnih razlik. Razen na brzici, kjer so se pojavljale anomalije že pri primerjavi hitrosti na 6/10 globine in pri dnu, turbulentna kinetična energija s pretokom narašča. Daleč največja vrednost je bila na prerezu z umetnim substratom merilnega mesta GL4 pri visokem pretoku, ko je bil tok tudi na videz zelo turbulenten, vodna gladina pa je bila zelo vzvalovana. Na začetku betonskega korita je namreč prag iz večjih kamnov, ki ob višjih vodostajih povzroča intenzivno vrtnčenje. Na prerezu »seminaraven substrat«, ki ima prav tako značilnosti tolmunu, in prerezu »tolmun« sta bili izračunani drugi največji vrednosti TKE pri velikem pretoku. Najnižje vrednosti TKE pri velikih pretokih so bile na brzici. Tudi razlike med vrednostmi TKE pri različnih pretokih so bile največje na prerezih »seminaraven substrat«, »umeten substrat« in »tolmun«, medtem ko so se na »čistem« in »zaraščenem betonskem prerezu« ter na »brzici« vrednosti zelo malo spreminjale glede na pretok.



Slika 13 - Primerjava turbulentne kinetične energije na morfološko različnih prečnih prerezih ob različnih pretokih

Vpliv hitrosti na združbi perifitona in makroinvertebratov

Na približno istih merilnih mestih so se v letih 2005 in 2006 izvajale raziskave makroinvertebratske (Kereži, 2007) in perifitonske združbe (Štendler, 2007), hkrati pa so bili merjeni tudi hidrološki, fizikalni in kemijski parametri (Koprivšek, 2006).

Vrednost Shannon – Wienerjevega diverzitetnega indeksa, izračunanega na podlagi diatomejske združbe (Štendler, 2007) je bila ob največjem pretoku v primerjavi z ostalimi vzorčnimi mesti bistveno nižja na obeh vzorčnih mestih z betonsko strugo. Ti dve mesti sta se v tem času bistveno razlikovali od drugih mest po hitrosti vodnega toka, medtem ko vsi ostali merjeni parametri niso bistveno odstopali od ostalih vzorčnih mest. Iz tega torej lahko sklepamo, da ima hitrost vodnega toka zelo velik vpliv na diverzitetno diatomejske združbe. Povprečne hitrosti vodnega stolpca so na teh dveh mestih v času vzorčenja dosegale vrednosti 0,9 m/s. V času ostalih merjenj, ko je bil vodostaj nižji, so se hitrosti na mestih z betonskim prerezom manj razlikovale od ostalih vzorčnih mest – dosegale so vrednosti okrog 0,4 m/s, kar je verjetno glavni razlog, da takrat ni bilo bistvenih razlik v Shannon-Wienerjevem indeksu med umetnim in semi-naravnim substratom.

Na predelu Glinščice, obloženem z betonskimi ploščami, je bila kljub skoraj popolnoma homogenemu substratu vrstna diverziteta presenetljivo pestra. Prevladoval je mah vrste *Fontinalis antipyretica*, ki zaradi mrežaste razrasti filtrira različne celice in delce in s tem omogočajo visoko stopnjo usedanja in pritrjanja, kar poveča tudi diverzitetno mikroalg (Štendler, 2007). Štendler (2007) je še ugotovila, da na sezonsko dinamiko alg na potoku Glinščica vplivajo predvsem hidrološke spremembe (hitrost vodnega toka), ob nizkem vodostaju pa tudi temperatura vode, hranilne snovi in svetloba. Skupinski in vrstni sestav se med različno spremenjenimi odseki ni bistveno spreminjal, razlike so bile le v pogostosti posameznih vrst. Tudi sezonska dinamika perifitona se ni bistveno razlikovala med seminaravnim in togo reguliranim odsekom struge.

V nasprotju z združbo perifitona na združbo makroinvertebratov bolj vplivajo vzorčna mesta kot letni časi. Zanimivo je, da se vrstna diverziteta ni bistveno zmanjšala pri meritvah ob največjem pretoku na mestih z betonskim koritom, kjer so hitrosti dosegale kar 0,9 m/s. Znatno se je zmanjšalo le število osebkov na drugem betonskem prerezu (pri viški cerkvi), medtem ko je bilo število osebkov na vzorčnem mestu pri Biološkem središču še večje od gorvodnih mest na semi-naravnem substratu. Shannon-Wienerjev diverzitetni indeks na splošno sicer upade na mestih z betonskim koritom, vendar ob povečani hitrosti ob največjem pretoku nič bolj kot pri ostalih meritvah. Največja diverziteta makroinvertebratske združbe pa je bila na vzorčnem mestu nad Brdnikovo cesto, kjer so bile zaradi heterogenega substrata tudi hitrosti zelo heterogene. Ta odsek je sicer umetno spremenjen, vendar je urejen z nizkimi pragovi, ki ustvarjajo odseke s hitrim in počasnim tokom. Število taksonov je namreč večje v heterogenem okolju s pestrimi habitati, kjer več vrst najde primerno ekološko nišo (Beisel in sod., 2000). Poleg tega je bilo na tem vzorčnem mestu tudi največ makrofitev, kar tudi vpliva na povečano diverzitetno, kot so ugotovili Biffagni in sod. (2000) ter Gregg in Rose (1985), saj makrofiti predstavljajo zatočišča pred hidravličnim stresom ter hkrati povzročajo veliko heterogenost fizičnega habitata in tudi veliko površino za pritrjanje alg in vodne favne.

Sicer je bilo največ variabilnosti makroinvertebratske združbe pojasnjene s spremenljivko temperaturni razpon vode (17,3 %), vendar je tudi maksimalna hitrost vode pojasnila več kot 13% variabilnosti (Kereži, 2007). Medtem ko diverziteta na betonskih odsekih upade, pa ne upade število osebkov – največja vrednost je bila presenetljivo izmerjena prav na vzorčnem mestu z betonskim substratom, ob Biološkem središču.

Težave pri meritvah

Instrument FlowTracker ni preveč primeren za merjenje blizu dna struge, brežin ali objektov v vodi. Točka vzorčenja se namreč nahaja 10 cm od oddajnika, zato bližje kot 10 cm od desnega brega ob pravilni usmeritvi senzorja ne moremo meriti. Omejitve pri merjenju v vzdolžni smeri predstavlja oddaljenost sprejemnikov od oddajnika, zaradi česar lahko merimo najbližje 5 cm pred ali za objektom v vodi. Meritve v globino so omejene z nosilno palico, in sicer je z njo možno meriti 1,6 cm od dna. Če sondo snamemo z merilne palice, se ta oddaljenost zmanjša na 0,5 cm od dna. Vendar pa moramo upoštevati, da je pri meritvah blizu dna ali objektov v vodi velika verjetnost odboja od teh objektov namesto od delcev v vodi (Wilcox in Wohl, 2007). Ta verjetnost je toliko večja pri hidravlično hrapavi posteljici dna z nehomogenim substratom, medtem ko dobimo pri meritvah nad betonom in v tolmunu, kjer je substrat predstavljal enakomeren droben pesek, dokaj zanesljive meritve tudi na oddaljenosti 0,5 cm od dna. Drug problem, ki se pojavlja pri meritvah na mikrolokacijah, je, da se vzorčevalni volumen nekoliko spreminja od instrumenta do instrumenta, poleg tega se oddaljenost od dna precej spremeni, če sonde ne držimo povsem navpično.

Pri merjenju smo se soočali še z eno težavo, in sicer z dolgim časom trajanja meritev na enem prečnem prerezu, kar je bilo posebej problematično ob večjih pretokih, ko se je pretok in z njim tudi hitrost vodnega toka od začetka do konca merjenja že občutno spremenila. Na razpolago smo žal imeli le en instrument, zato nismo mogli meriti na vseh merilnih točkah po prečnem prerezu hkrati, pač pa zapovrstjo, medtem pa so se razmere lahko že nekoliko spremenile. Meritev na enem prečnem prerezu je trajala povprečno skoraj eno uro, saj smo morali posebno pri meritvah blizu dna intervale merjenja ponavljati, kadar je instrument javljal slabe robne pogoje in majhno vrednost razmerja signal – šum. Pri največjih pretokih smo zato interval skrajšali na 40 sekund in tako zmanjšali razlike v pretoku med začetkom in koncem merjenja na enem prečnem prerezu.

Zaključki

V sklopu raziskave smo merili hitrosti vodnega toka na odsekih z različnimi substrati in različno morfologijo struge, pri čemer smo ugotovili, da ima tako sama morfologija struge (razširitve, zožitve) kot tudi neživ in živ substrat bistven vpliv na povprečno hitrost vodnega stolpca in na hitrosti pri dnu. Bistvene razlike v hitrosti vode smo opazili med odseki s popolnoma togo ureditvijo (betonsko korito) in odseki s seminaravnim substratom. Tako povprečne hitrosti kot hitrosti pri dnu so bile bistveno večje na prvih odsekih, s povečevanjem pretoka pa so se razlike še povečevale, saj so se hitrosti na odsekih z betonskim tlakovanjem ob višjih vodostajih povečale bolj kot na odsekih s seminaravnim substratom. Hitrosti pri dnu so bile tako na odseku z betonskim koritom 2 do 3-krat večje kot na seminaravni brzici in 3 do 4-krat večje kot v seminaravnem tolmunu. Izračunali smo še razmerje med povprečnimi hitrostmi vodnega stolpca in hitrostmi pri dnu (1,6 cm od dna), kjer smo prav tako opazili statistično značilne razlike med odseki z betonskim koritom in odseki s seminaravno strugo. Vrednosti so bile na prvih odsekih manjše, kar pomeni, da so bile hitrosti pri dnu v primerjavi s povprečnimi hitrostmi večje kot na odsekih s seminaravnim substratom. Opazne razlike so bile tudi med odseki na hidravlično gladki in odseki na hidravlično hrapavi podlagi. Razmerje na odsekih s hidravlično gladko podlago namreč ostaja približno enako, tudi ko se pretok povečuje, medtem ko se na odsekih s hidravlično hrapavo podlago to razmerje bistveno poveča, ko se poveča pretok. To pomeni, da tudi ob povečanju povprečnih hitrosti zaradi objektov v vodi

hitrosti pri dnu ostajajo relativno majhne in primerne za življenje vodnih organizmov. Tak primer je tudi na prečnem prerezu »umeten substrat« na merilnem mestu GL4, tik dolvodno od začetka betonskega tlakovanja, kjer je na betonskem koritu veliko kamenja. V višini kamenja ostajajo hitrosti majhne, kljub zelo velikim hitrostim v prostem vodnem stolpcu.

Podobne rezultate smo dobili tudi pri izračunu gostote turbulentne kinetične energije: na hidravlično bolj hrapavi podlagi, z večjimi kamni v strugi, so bile vrednosti TKE bistveno večje kot na hidravlično gladki podlagi. Daleč največja vrednost je bila izmerjena na prečnem prerezu »umeten substrat« tik dolvodno od začetka betonskega korita, na zožitvi struge, dolvodno od kamnitega praga in gorvodno od večjih kamnov v strugi. Na tem in ostalih mestih z večjimi kamni v strugi so se vrednosti izrazito povečale ob povečanem pretoku, medtem ko na hidravlično gladki podlagi to povečanje ni bilo tako očitno.

Na dveh merilnih mestih smo ocenjevali vpliv živega substrata na hitrosti in strukturo vodnega toka; na merilnem mestu GL2 smo preučevali vpliv obrasti, ki so jo predstavljali predvsem mahovi, na merilnem mestu GL5 pa vpliv makrofitov (rmanec). Na betonskem koritu, obraščenim z mahovi, so se hitrosti zmanjšale za približno 20% ob največji zaraščenosti in 12% pri najmanjši zaraščenosti glede na hitrosti na nezaraščenem betonskem koritu. Mahovi so ob največji gostoti zaraščenosti segali 5 cm v višino, ob večjih pretokih pa do 2 cm. Večji vpliv na vodni tok imajo makrofiti, ki segajo višje v vodni stolpec, običajno do vodne gladine. Rmanec na merilnem mestu GL5 je segal do vodne gladine in prekrival skoraj celotno širino struge, hitrosti pa so se med njim zmanjšale za približno 5× glede na hitrosti vodnega toka okrog njega.

Ugotavljali smo tudi vpliv hitrosti vodnega toka na biocenozo. Do bistvenega zmanjšanja gostote in velikosti mahov na vzorčnem mestu GL2 je prišlo pri hitrosti 0,9 m/s. Kdaj in pri kateri pretočni hitrosti natančno je prišlo do odtrganja mahov, žal ne vemo. Visokovodni val, ki je sledil daljšemu sušnemu obdobju, med katerim so se mahovi bujno razrasli, je namreč dosegel največjo povprečno hitrost okrog 0,9 m/s, do odtrganja pa je lahko prišlo že pri manjših hitrostih ob naraščanju visokovodnega vala. Pri enaki povprečni hitrosti se je bistveno zmanjšala tudi biodiverzitetna kremenastih alg (Štendler, 2007), pri čemer pa so bile takrat hitrosti izmerjene ob upadu visokovodnega vala in je do odtrganja lahko prišlo tudi pri večjih hitrostih. Diverzitetna makroinvertebratske združbe se zanimivo ob enako veliki hitrosti vodnega toka ni zmanjšala glede na vzorčenja pri nižjih hitrostih na istih vzorčnih mestih. Zmanjšala se je le številčnost osebkov, in še to le na dolvodnem izmed dveh vzorčnih mest na betonskem koritu (Kereži, 2007). Ne glede na čas merjenja in hitrosti vodnega toka, pa se je vrstna diverzitetna zmanjšala na obeh mestih z betonskim koritom glede na gorvodna mesta s seminaravnim substratom, kar daje slutiti, da na združbi makroinvertebratov bolj kot sama hitrost vodnega toka vpliva substrat, ki je na betonskem odseku bistveno preveč homogen, da bi nudil ugodne življenjske pogoje za vodne nevretenčarje.

Meritve smo izvajali z Dopplerjevim merilnikom hitrosti vodnega toka FlowTracker, ki za merjenje ob dnu, ob vodni gladini in v bližini podvodnih objektov ni preveč primeren. Dnu se lahko približamo na najmanj 1,6 cm, pri zelo nizkem vodostaju pa brez stojala na 5 mm, vendar so te meritve že precej nezanesljive in možne le na hidravlično gladki podlagi. Ugotovili smo, da so meritve pri dnu (1,6 cm ali 5 mm od dna) statistično povezane s povprečnimi hitrostmi vodnega stolpca, torej se hitrosti v obeh točkah spreminjajo enako glede na merilno mesto in vodostaj. To pomeni, da je oddaljenost od dna, pri kateri smo merili, že prevelika, da bi zaznali lokalni vpliv substrata. Hart s sod. (1996) namreč ugotavlja, da ni statistično signifikantnih povezav med hitrostmi 2 mm od dna in 1 cm od dna. Za natančnejši vpogled v dogajanje tik ob dnu bi morali uporabiti drugačno merilno opremo, na primer toplotni anemometer ali merilnik hitrosti, ki deluje na principu

magnetne indukcije. Najbolje bi bilo imeti več takšnih merilnikov na enem stojalu, da bi lahko merili na različnih oddaljenostih od dna hkrati in bi bili nizi hitrosti, izmerjeni na eni vertikali, primerljivi med sabo.

Literatura

- Beisel, J. N., Usseglio-Polatera, P., Moreteau, J. C. 2000. The spatial heterogeneity of a river bottom: a key factor determining macroinvertebrate communities. *Hydrobiologia* 422/423: 163-171.
- Biffagni, A., Crisa, G. A., Harper, D. M., Kemp, J. L. 2000. Using macroinvertebrate species assemblages to identify river channel habitat units: an application of the functional habitats concept to a large, unpolluted Italian river (River Ticino, northern Italy). *Hydrobiologia* 435: 213-225.
- Buffin-Bélanger, T., Roy, A. G. 2005. 1 min in a life of a river: selecting the optimal record length for the measurement of turbulence in fluvial boundary layers. *Geomorphology* 68: 77-94.
- Clifford, N. J., French, J. R. 1993. Monitoring and modelling turbulent flow: historical and contemporary perspectives. V: Clifford, N. J., French, J. R. in Hardisty, J. (ur.). *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*. Wiley, Chichester idr.: 1-34.
- De Doncker, L., Troch, P., Verhoeven, R. 2008. Accuracy of discharge measurements in a vegetated river. *Flow measurement and instrumentation* 19: 29-40.
- Gregg, W. W., Rose, F. L. 1985. Influences of aquatic macrophytes and invertebrate community structure, field structure and microdistribution in streams. *Hydrobiologia* 128: 45-56.
- Hart, D. D., Clark, B. D., Jasentuliyana, A. 1996. Fine-scale field measurement of benthic flow environments inhabited by stream invertebrates. *Limnol. Oceanogr.* 41: 297- 308.
- Kereži, V. 2007. Makroinvertebratska združba potoka Glinščica. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo: 84 str.
- Koprivšek, M. 2011. Vpliv različnih vrst substrata na strukturo hitrosti vodnega toka in njen vpliv na biocenozo na primeru potoka Glinščica. Magistrsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerzitetni podiplomski študij varstvo okolja: 108 str.
- Koprivšek, M. 2006. Ekohidrološke raziskave na potoku Glinščica. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 100 str.
- Rusjan, S. 2003a. Sonaravno urejanje vodotokov – primer ureditve odseka Glinščice na območju Viča. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 89 str.
- Štendler, E. 2007. Perifitonska združba v potoku Glinščica. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo: 102 str.
- Wilcox, A. C., Wohl, E. E. 2007. Field measurements of three-dimensional hydraulics in a step-pool channel. *Geomorphology* 83: 215-231.
- Atlas okolja: http://gis.arso.gov.si/gis/profile.aspx?id=UPR_VODAMI_AXL@Arso (23.3.2010)

Izračun lokalnih magnitud potresov iz podatkov Državne mreže potresnih opazovalnic

Jurij Bajc*, Žiga Zaplotnik**, Mladen Živčić***, Martina Čarman***

Povzetek

V prispevku predlagamo izboljšavo postopka določanja lokalne magnitude potresov na ozemlju Slovenije in bližnje okolice. Osredotočimo se predvsem na vpliv podatkov posamezne opazovalnice in primerjamo dve različici računanja lokalne magnitude iz vertikalnih komponent zapisov hitrosti. V osnovni različici, ki jo uporabljamo pri rutinskem izračunu magnitud v Uradu za seizmologijo in geologijo Agencije RS za okolje, se za podatke vseh opazovalnic uporablja enotna magnitudna enačba, potresu pa se pripiše vrednost magnitude, ki je enaka povprečju magnitud, ki jih izračunamo iz podatkov posamezne opazovalnice. V izboljšani različici, ki jo predstavljamo v prispevku, enotni magnitudni enačbi dodamo aditivno konstanto, ki je različna za vsako opazovalnico in odseva lokalne značilnosti opazovalnice. Značilne *popravke za posamezno opazovalnico* določimo tako, da za izbrani nabor podatkov minimiziramo vsoto kvadratov razlik med magnitudo, izračunano iz podatkov ene opazovalnice, in povprečno magnitudo potresa. Rezultati raziskave kažejo, da z vpeljavo značilnih popravkov za vsako opazovalnico znatno zmanjšamo nedoločenost vrednosti lokalne magnitude, ki jo pripišemo posameznemu potresu.

Uvod

V prispevku raziščemo določanje lokalne magnitude iz vertikalnih komponent zapisov hitrosti (M_{LV}), ki jo za potrese na območju Slovenije in bližnje okolice določajo pri rutinskih analizah v Uradu za seizmologijo in geologijo (USG) Agencije RS za okolje (ARSO) in opredeljuje velikost potresov v uradnih katalogih ARSO. Raziskav o ustreznosti enačbe za računanje lokalne magnitude za Slovenijo v literaturi ni zaslediti, nekaj podobnih raziskav je bilo narejenih za sosednjo Italijo (Bindi et al., 2005; Bragato in Tento, 2005). V USG se uporablja za rutinski izračun lokalne magnitude M_{LV} iz podatkov katerekoli opazovalnice isto empirično določeno magnitudno enačbo

$$M_{LV} = \log\left(\frac{A}{T}\right)_{\max} + 1,52 \log(\Delta) - 0,1, \quad (1)$$

kjer pomeni A amplitudo nihanja tal, izraženo v nanometrih, T nihajni čas nihaja z amplitudo A v sekundah in Δ žariščno (hipocentralno) oddaljenost opazovalnice od potresa v kotnih stopinjah. Ena kotna stopinja približno ustreza razdalji 111,2 km. Čeprav A in T v enačbi (1) pomenita amplitudo nihanja in nihajni čas tega nihanja, v USG s seizmogramov dejansko odčitavajo največjo amplitudo hitrosti nihanja tal v navpični smeri, kar je sorazmerno največjemu kvocientu A/T , saj magnitudna enačba (1) temelji na največji vrednosti kvocienta A/T in ne na največji vrednosti amplitude odmikov A , kakor je prvo definicijo magnitude postavil Richter (1935). Vrednost koeficientov v magnitudni enačbi (1) je določil pred približno tremi desetletji takratni direktor Seizmološkega zavoda prof. Ribarič, žal pa zapisi o tej raziskavi niso objavljeni, tako da ni znana niti natančna

* UL, Pedagoška fakulteta, Kardeljeva ploščad 16, Ljubljana

** UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska 19, Ljubljana

*** Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana

metodologija določanja koeficientov v magnitudni relaciji niti ni povsem znano, kateri podatki so bili uporabljeni pri njihovem določanju. Funkcijska odvisnost magnitude od amplitude, nihajnega časa in oddaljenosti, ki je zapisana v enačbi (1), še vedno izhaja iz prvotne Richterjeve (1935, 1958) definicije magnitude, a prirejene za sodobne seizmometre, ki ne merijo odmikov nihanja tal, temveč merijo hitrost nihanja tal, vrednosti koeficienta pred logaritmom oddaljenosti ($=1,52$) in aditivne konstantne ($= -0,1$) pa sta določeni empirično in sta odvisni od povprečne strukture tal pod Slovenijo. Potresu pripišemo magnitudo M_{LV} , ki je enaka povprečni vrednosti magnitud, ki jih iz razpoložljivih podatkov izračunamo za posamezno opazovalnico. Tako zmanjšamo vpliv posamezne magnitude, ki je določena iz zapisov na izbrani opazovalnici. Individualne vrednosti magnitud lahko namreč znatno odstopajo od povprečne vrednosti, ki je dodeljena posameznemu potresu, za kar sta vsaj dva očitna vzroka. Po eni strani se potresno valovanje od žarišča potresa ne širi enakomerno na vse strani, ampak je značilno prostorsko porazdeljeno, kar opisuje sevalna funkcija, ki je odvisna od žariščnega mehanizma potresa. Po drugi strani je amplituda, odčitana na opazovalnici, odvisna od lokalne zgradbe tal pod opazovalnico, včasih pa tudi od kake druge lastnosti izgradnje opazovalnice. Oboje vodi do tega, da je vrednost magnitude, ki je dodeljena posameznemu potresu, lahko precej odvisna od tega, na katerih opazovalnicah je bila določena, posebej, če je amplituda odčitana na majhnem številu opazovalnic. Na spreminjanje sevalne funkcije od potresa do potresa ne moremo vplivati, medtem ko se lastnosti lokalne strukture in same zgradbe opazovalnice odsevajo v sistematičnih odstopanjih, ki jih lahko pripišemo posamezni opazovalnici kot značilni popravek na opazovalnici.



Slika 1 – Državna mreža potresnih opazovalnic (rdeči kvadrati) in potresna opazovalnica TRI pri Trstu (črni kvadratik).

Imenujmo magnitudo M_{LV} , izračunano iz podatkov posamezne opazovalnice, *individualna* magnituda M_{ind} , in povprečno vrednost individualnih magnitud za en potres *povprečna* magnituda potresa M . Primerjava vrednosti M_{ind} in M je med seizmologi v USG že dlje časa vzbujala občutek, da so magnitude M_{ind} iz podatkov nekaterih opazovalnic sistematično večje oziroma manjše od povprečnih magnitud M . Ker je po drugi strani že Richter (1935) vpeljal za vsako opazovalnico svojo aditivno konstanto C_j (enačba 2), smo se lotili izračuna individualne magnitude z enačbo v splošni obliki

$$M_{ind}^j = \log\left(\frac{A[\text{nm}]}{T[\text{s}]}\right)_{\max} + a \log\left(\frac{r[\text{km}]}{111,2 \text{ km}}\right) + C_j, \quad (2)$$

kjer je M_{ind}^j individualna lokalna magnituda, izračunana na j -ti opazovalnici, a in C_j pa konstanti – parametra, ki ju je potrebno še določiti. Načeloma bi lahko imela vsaka opazovalnica svojo vrednost tako C_j kot a . Ker a opisuje dušenje oziroma pojemanje amplitude valovanja z oddaljenostjo od žarišča in se potresni valovi za potrese po Sloveniji širijo od vseh morebitnih žarišč potresov do vseh opazovalnic Državne mreže potresnih opazovalnic (slika 1) v povprečju po istih tleh, je smiselno iskati rešitev z enako vrednostjo a za vse opazovalnice. Tako določena vrednost a opisuje pojemanje amplitude valovanja z razdaljo za povprečno strukturo zemeljske skorje na območju Slovenije. Če bi za vse opazovalnice izbrali enako vrednost C_j , bi pravzaprav le ponovno določili vrednosti obeh koeficientov v enačbi (1). Bistvena razlika med osnovno in izboljšano različico računanja lokalne magnitude je v tem, da privzamemo v novi različici za vsako opazovalnico drugo vrednost C_j . Na ta način lahko kompenziramo sistematične individualne razlike med odčitanimi amplitudami na posameznih opazovalnicah. Sistematične razlike so, kot rečeno, običajno posledica lokalnih lastnosti opazovalnice, ki vplivajo na velikost odčitane amplitude nihanja tal, in s tem povečujejo negotovost vrednosti magnitude, ki jo pripišemo izbranemu potresu. Glavni cilj raziskave je poiskati koeficient a in značilne popravke C_j za posamezno opazovalnico tako, da bodo vrednosti vsake posamezne individualne magnitude M_{ind} za izbrani potres čim bližje povprečni magnitudi tega potresa M .

V nadaljevanju v poglavju *Metodologija in podatki* podrobno opišemo, kako smo določili iskane parametre v magnitudni enačbi (2) in katere podatke smo uporabili pri izračunu. Nato v poglavju *Rezultati* primerjamo vrednosti in negotovosti lokalnih magnitud, izračunanih z izboljšano in osnovno različico magnitudne enačbe ter v *Zaključkih* povzamemo glavne ugotovitve raziskave.

Metodologija in podatki

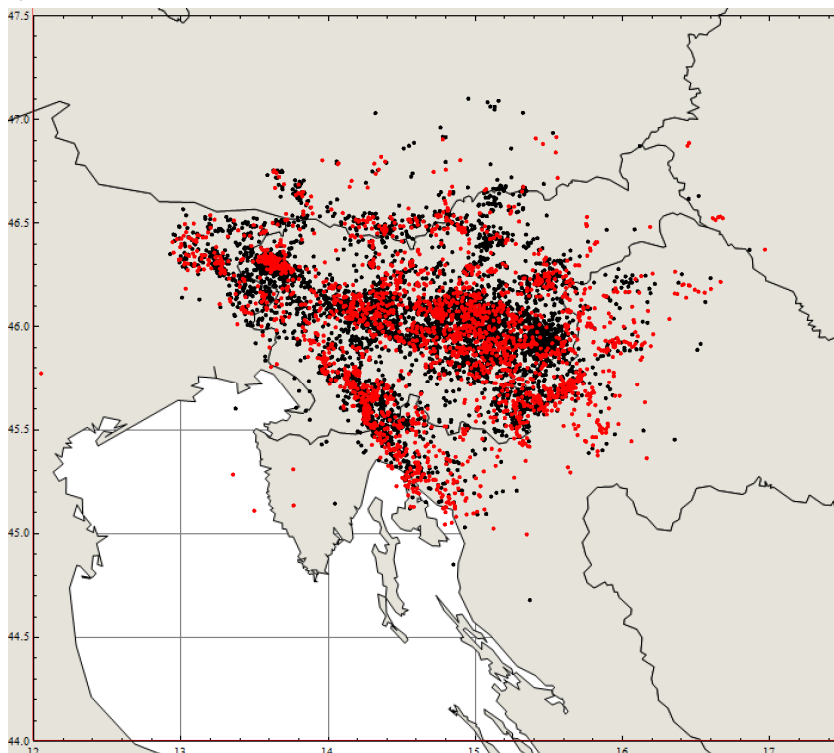
Lokalna magnituda potresa M_{LV} se v USG rutinsko določa kot povprečna magnituda M vseh izračunanih individualnih magnitud M_{ind} iz dosegljivih podatkov za posamezen potres. Vsaka individualna magnituda se izračuna z enačbo (1), kar pomeni, da moramo imeti za izbrano opazovalnico podatke o oddaljenosti od žarišča in o amplitudi hitrosti nihanja tal. To je direktno računanje magnitud iz znanih podatkov z uporabo znane enačbe (1). V pričujoči raziskavi želimo poiskati parametre a in C_j v magnitudni enačbi (2) za računanje individualne magnitude iz podatkov posamezne opazovalnice. To je inverzni problem, ki nima enolične rešitve, zato ga moramo najprej dobro definirati. Vhodni podatki za nalogo so še vedno podatki o največji amplitudi hitrosti nihanja tal oziroma največjem razmerju A/T in oddaljenosti opazovalnic r od žarišča posameznega potresa, vendar sedaj ne iščemo le povprečne magnitude M za en potres, ampak iščemo tako parametre a in C_j , kot tudi povprečne vrednosti magnitud M za več potresov hkrati. Pri tem parametre a in C_j določamo s standardnim pristopom najmanjše vsote kvadratov razlik. To pomeni, da iščemo vrednosti parametrov a in C_j , ki minimizirajo funkcijo f , definirano kot

$$f = \sum_i \sum_j (M_{ij} - M_i)^2, \quad (3)$$

kjer je M_{ij} individualna magnituda i -tega potresa, izračunana iz podatkov j -te opazovalnice, in M_i povprečna magnituda i -tega potresa

$$M_i = \frac{1}{n_i} \sum_j M_{ij} . \quad (4)$$

Tu j teče po vseh opazovalnicah, za katere imamo izračunane individualne magnitude M_{ij} in je število izračunanih individualnih magnitud enako n_i . Neznanke v enačbi (3) so koeficient a in popravki C_j ter povprečne magnitude M_i vseh potresov, katerih podatke smo uporabili.



Slika 2 – Potresi v obdobju od leta 1997 do 2010, za katere poznamo lokacijo žarišča. S črno s označeni potresi, katerih podatkov v inverziji ne uporabimo, z rdečo pa tisti potresi, katerih podatki so uporabljeni v inverziji.

V raziskavo smo vključili več kot 78000 avtomatsko odčitanih podatkov za potrese v obdobju od vključno leta 1997 do vključno leta 2010. Podatki so izvirali z 29 potresnih opazovalnic Državne mreže in opazovalnice TRI v Trstu (slika 1). Podatke slednje smo vključili iz zgodovinskih razlogov, saj je bila enačba (1) izpeljana na osnovi primerjave izračunanih magnitud na opazovalnici TRI v trstu in LJU v Ljubljani. Pri inverzih problemih se rezultati običajno opazno spreminjajo, če izbiramo različne nabori vhodnih podatkov. Zato smo izmed vseh avtomatsko odčitanih podatkov o največji vrednosti A/T po določenih kriterijih izbrali podmnožico 23546 ustrezno zanesljivih podatkov za 3152 potresov, ki smo jih uporabili v inverziji za iskane parametre (slika 2). Izbor vhodnih podatkov smo naredili v nekaj korakih. Najprej smo primerjali nekaj deset naključno izbranih avtomatsko odčitanih podatkov z dostopnimi ročno odčitanimi podatki, da smo preverili načelno pravilnost delovanja algoritma za avtomatsko odčitavanje največjih vrednosti A/T . Ujemanje je bilo zadovoljivo, seveda pa nobeno avtomatsko odčitavanje ne more delovati 100 % zanesljivo, zato smo z dodatnimi kriteriji izločili podatke, ki so bili videti nezanesljivi. Izbirni kriteriji so se nanašali na hitrost širjenja valovanja, kjer pričakujemo največje amplitude hitrosti nihanja tal, na pričakovane nihajne čase, smiselno najmanjšo oddaljenost med potresom in opazovalnico, najmanjše sprejemljivo razmerje med signalom in šumom, najmanjše število podatkov za posamezen potres in podobno. Mejne kriterije smo po nekaj testiranjih (tabela 1) izbrali glede na presojo ravnotežja med

tem, da uporabimo kar se da kvalitetne in zanesljive podatke, in med tem, da imamo čim več podatkov in s tem zagotovimo statistično večjo veljavnost z inverzijo izračunanih parametrov. V končni nabor podatkov smo zajeli potrese, ki so bili od opazovalnic oddaljeni od 20 km (izbrana spodnja meja) do okoli 270 km in so imeli magnitude v razponu od okoli 0,2 do 5,1.

Tabela 1 – Rezultati testnih naborov podatkov za izračun parametrov magnitudne enačbe M_{LV} . V prvem stolpcu je časovno obdobje, za katerega je narejena inverzija, v drugem številu uporabljenih podatkov, v tretjem številu potresov, katerih podatke smo uporabili, v četrtem vrednost konstante a .

V osenčeni vrstici je končna rešitev in opis pripadajočih podatkov.

Časovno obdobje	Število podatkov	Število potresov	a
1997-2004	4229	757	1,830
2005-2007	7013	869	1,796
2008-2010	12304	1526	1,819
1997-2010	23546	3152	1,827
1998	287	86	1,754
2003	1092	186	1,792
2004	1869	240	1,816
2005	1908	250	1,794
2008	2469	316	1,870
2010	6718	823	1,783

Reševanje inverznega problema za veliko neznanih parametrov (31 parametrov a in C_j v magnitudni enačbi in 3152 magnitud M_{LV} potresov) je časovno zahtevno in pogosto numerično nestabilno, zato smo problem poenostavili s trikom, ki nam je dal enak rezultat (preverjeno na manjšem naboru podatkov), a je vključeval kot neznanke le prvih 31 parametrov iz magnitudne enačbe. Neznane vrednosti a in C_j smo iskali iterativno, medtem ko smo se neznanih vrednosti magnitud potresov izognili tako, da smo v k -tem koraku iteracije pripisali potresom magnitudo, ki smo jih izračunali po magnitudnih enačbah (2) in (4), a smo pri tem uporabili vrednosti parametrov a in C_j iz $(k-1)$ -tega koraka iteracije. Iz enačbe (3) je očitno, da sprememba vseh parametrov C_j za enako aditivno konstanto ΔC ne spremeni vrednosti funkcije f , saj se za ΔC spremenijo tako M_{ij} kot M_i in ostanejo razlike $M_{ij} - M_i$ nespremenjene. Torej so koeficienti C_j določljivi le do aditivne konstante natančno in je potrebno za enoličnost rešitve in numerično stabilnost uporabiti dodatni pogoj, na primer pogoj, da je povprečna vrednost popravkov vseh opazovalnic enaka 0, kar pomeni, da so popravki C_j razporejeni okoli vrednosti 0. Enačbo (2) zato preoblikujemo v

$$M_{ind}^j = \log\left(\frac{A[\text{nm}]}{T[\text{s}]}\right)_{\max} + a \log\left(\frac{r[\text{km}]}{111,2 \text{ km}}\right) + \Delta C + C_j, \quad (5)$$

kjer vrednost aditivne konstante ΔC med reševanjem inverznega problema postavimo na 0, na koncu pa jo določimo tako, da so povprečne magnitude potresov po osnovni in izboljšani različici določanja M_{LV} čim bolj enake. Ker iz uporabljenih podatkov ne moremo absolutno določiti ΔC , izboljšano različico računanja pač sidramo na rezultate osnovne različice z eno magnitudno enačbo (1).

Rezultati

Iz nihanj vrednosti parametra a za podatke iz različnih časovnih obdobj (tabela 1) ocenimo tako vrednost parametra kot njegovo nedoločenost. S približno 95 % verjetnostjo sprejmemo za a vrednost

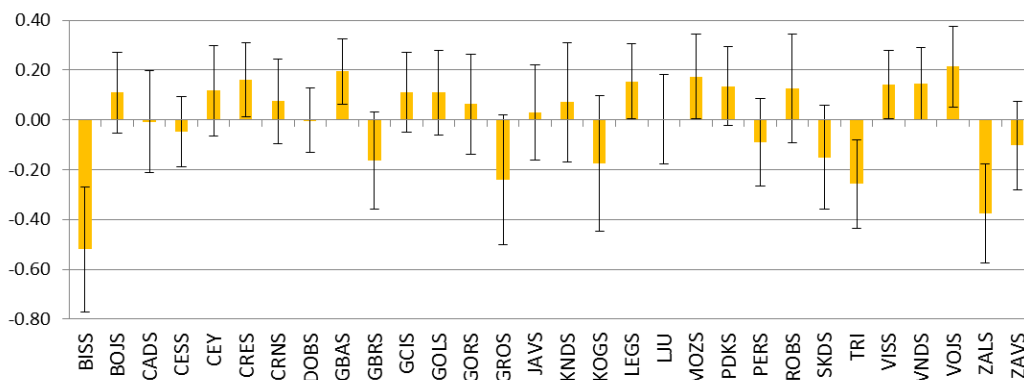
$$a = 1,83 \pm 0,03 = 1,83 (1 \pm 0,02), \quad (6)$$

kar pomeni, da smo vrednost a določili na okoli 2 % natančno. Vrednosti parametrov C_j se za izbrana časovna obdobja prav tako le malo spreminjajo, zato v tabeli 2 podajamo samo končne rezultate, ki so izračunani iz podatkov za celotno obdobje od leta 1997 do 2010. Rezultati so za lažjo predstavbo grafično prikazani tudi na sliki 3.

Tabela 2 – Izračunani popravki na opazovalnicah za celotno obdobje od leta 1997 do leta 2010. Vsi popravki so izračunani za vertikalno komponento hitrosti nihanja tal. V prvem stolpcu je ime opazovalnice, v drugem popravek opazovalnice (C), v tretjem številu uporabljenih podatkov (N) in v četrtem povprečna velikost odstopanja individualne magnitude od povprečne magnitude za isti potres (σ_M). S krepkim tiskom sta zapisani vrednosti parametrov za opazovalnici LJU in TRI, ki sta pomembni iz zgodovinskih razlogov.

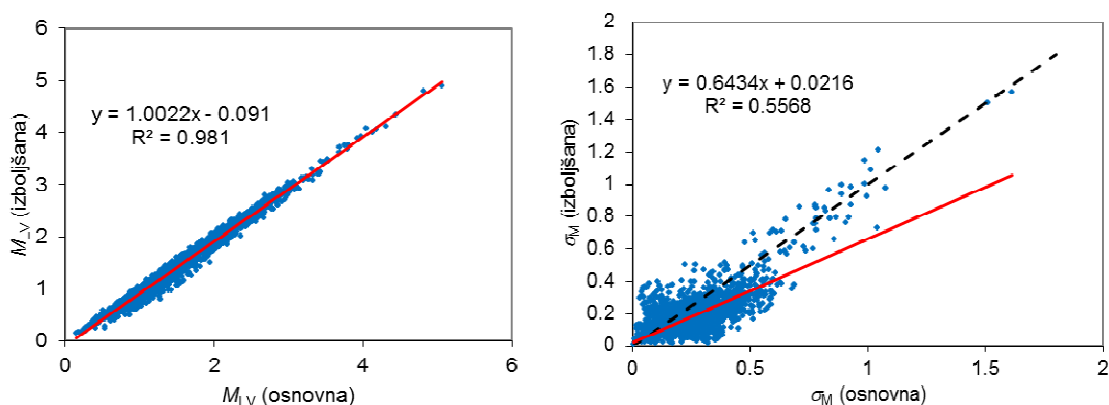
opaz.	C	N	σ_M	opaz.	C	N	σ_M	opaz.	C	N	σ_M
LJU	0,00	625	0,18	TRI	-0,26	767	0,18	MOZS	0,17	617	0,17
BISS	-0,52	781	0,25	GBRS	-0,16	363	0,20	PDKS	0,14	1549	0,16
CESS	-0,05	373	0,14	GCIS	0,11	624	0,16	PERS	-0,09	552	0,18
CEY	0,12	1453	0,18	GOLS	0,11	1322	0,17	ROBS	0,13	231	0,22
DOBS	0,00	929	0,13	GORS	0,06	958	0,20	SKDS	-0,15	1069	0,21
BOJS	0,11	928	0,16	GROS	-0,24	728	0,26	VISS	0,14	1320	0,14
CADS	-0,01	590	0,21	JAVS	0,03	763	0,19	VNDS	0,15	594	0,15
CRES	0,16	936	0,15	KNDS	0,07	427	0,24	VOJS	0,21	865	0,16
CRNS	0,07	543	0,17	KOGS	-0,18	280	0,27	ZALS	-0,38	483	0,20
GBAS	0,19	944	0,13	LEGS	0,15	1453	0,15	ZAVS	-0,10	479	0,18

Individualne magnitude M_{ind} , ki so izračunane iz podatkov ene opazovalnice, se praviloma razlikujejo od povprečne magnitude $M_{LV} = M$, ki jo pripišemo potresu. Merilo, kako negotova je vrednost magnitude, ki jo odčitamo samo na eni opazovalnici, je povprečna velikost razlike med individualno magnitudo in magnitudo potresa, ki jo poimenujemo *negotovost individualne magnitude* in jo označimo s σ_M (tabela 2 in slika 3).



Slika 3 – Popravki na opazovalnicah. Označen je tudi interval povprečnega odstopanja individualne magnitude M_{ind} od magnitude M , ki jo pripišemo potresu (tabela 2).

Iz slike 3 in tabele 2 razberemo, da je σ_M ob uporabi popravkov na opazovalnicah v povprečju okoli 0,18, samo na treh opazovalnicah (BISS, GROS in KOGS) pa dosega ali malo presega 0,25. V grobem lahko sklepamo, da so ob vpeljavi popravkov na posamezni opazovalnici vrednosti magnitud, odčitanih samo iz podatkov ene opazovalnice, nedoločene na okoli $\Delta M = 0,18$. Podobni izračuni z eno samo magnitudno enačbo (1) dajo za povprečno vrednost negotovosti individualne magnitudo vrednosti okoli $\Delta M = 0,25$, kar pomeni, da vpeljava popravkov C_j negotovost vrednosti M_{LV} posebej v primeru majhnega števila podatkov zmanjša za okoli 30 %.



Slika 4 – Levo: Ujemanje magnitud, določenih po izboljšani (5) in osnovni enačbi (1) za vse potrese, katerih podatki so bili uporabljeni v inverziji. Dodana je najboljše prilegajoča se premica (rdeča črta). Desno: Povprečno odstopanje individualnih magnitud od povprečne vrednosti za posamezen potres, katerega podatki so bili uporabljeni v inverziji. Dodana je najboljše prilegajoča se premica (rdeča črta) in premica $y = x$ (črna črtna črta), da se bolje vidi razlika med odstopanji po izboljšani (5) in osnovni magnitudni enačbi (1).

Da preverimo, kaj vpeljava popravkov na opazovalnicah (enačba 5) prinese v primerjavi z uporabo ene same enačbe (1) za vse opazovalnice, med seboj primerjamo tako vrednosti M_{LV} (slika 4, levo), določene z obema različicama magnitudne enačbe za vsak potres, kot tudi odstopanja individualnih magnitud, ki jih dobimo z magnitudnima enačbama (5) in (1), od vrednosti M_{LV} (slika 4, desno). V prvem primeru vsakič primerjamo vrednosti M_{LV} za izbrani potres, v drugem pa odstopanja individualnih magnitud od ustrezne vrednosti M_{LV} za vsako od opazovalnic, za katero imamo podatke za izbrani potres. Primerjava magnitud potresov da dobro korelirano linearno zvezo, ki ima smerni koeficient v okviru napake enak ena in tudi korelacijski koeficient R skoraj ena, $R = 0,98$. Vezna enačba med magnitudami, izračunanimi z izboljšano in osnovno različico magnitudne enačbe je

$$M_{LV}(\text{izboljšana}) = 1,0022 M_{LV}(\text{osnovna}) - 0,091 \cong M_{LV}(\text{osnovna}) - 0,09, \quad (7)$$

kar pomeni, da so magnitudo potresov, izračunane po enačbi (5) brez vpeljave aditivne konstante ($\Delta C = 0,0$), v povprečju le za približno 0,09 magnitudo manjše od rezultatov enačbe (1). Z ustrezno izbiro vrednosti aditivne konstante $\Delta C = 0,09$ v enačbi (5) dasta obe enačbi v povprečju enake vrednosti magnitud, ob tem pa je nedoločenost tako posamezne individualne magnitudo kot tudi povprečne magnitudo potresov ob uporabi končne oblike magnitudne enačbe

$$M_{ind}^j = \log\left(\frac{A[\text{nm}]}{T[\text{s}]}\right) + 1,83 \log\left(\frac{r[\text{km}]}{111,2 \text{ km}}\right) + 0,09 + C_j \quad (8)$$

za okoli 30 % manjša od nedoločenosti magnitud, izračunanih z enačbo (1).

Zaključek

V raziskavi osnovno magnitudno enačbo (1) razširimo z vpeljavo aditivnih popravkov na posamezni opazovalnici (enačbi 5 in 8), da bi tako kompenzirali morebitno potencialno sistematično preveliko ali premajhno individualno izračunano magnitudo na posamezni opazovalnici. Z inverzijo več kot 23000 podatkov iz obdobja od leta 1997 do leta 2010 smo določili parametre v modelski magnitudni enačbi (5) oziroma (2) in tako zapisali izboljšano magnitudno enačbo (8). Vrednosti značilnih popravkov C_j , ki nastopajo v enačbi (8), so zbrani v tabeli 2. Glavna rezultata raziskave lahko strnemo v naslednje:

- Nova, izboljšana magnitudna enačba (9), da za potrese približno enake vrednosti M_{LV} , kot jih je dajala osnovna enačba (1) določena pred več kot tridesetimi leti. To se zgodi za potrese na ozemlju Slovenije kljub temu, da je vrednost koeficienta a , ki opisuje dušenje in geometrijsko razširjanje potresnih valov, v enačbi (8) precej večja ($a = 1,83$) od vrednosti ($a = 1,52$) v enačbi (1). Očitno se v danem intervalu oddaljenosti med žarišči in opazovalnicami razlika v dušenju kompenzira z vpeljavo popravkov, značilnih za posamezno opazovalnico.
- Bistvena prednost vpeljave značilnih popravkov za opazovalnice je večja zanesljivost individualne magnitude in posledično za okoli 30 % manjši nedoločenosti izračunane lokalne magnitude M_{LV} .

Raziskavo bi bilo smiselno nadaljevati v smeri povezovanja oziroma iskanja povezave med lokalno magnitudo M_{LV} , ki jo v USG na ARSO sedaj rutinsko uporabljamo kot mero za velikost potresa, in navorno magnitudo, ki je fizikalno najboljše definirana mera za velikost potresa, ali Richterjevo oziroma Wood-Andersonovo magnitudo, ki je zgodovinsko gledano osnova vsem sodobnim magnitudam in na podlagi katere je prof. Ribarič izpeljal enačbo (1) s primerjavo zapisov istih potresov v Trstu in v Ljubljani.

Literatura

- Bindi D., Spallarossa D., Eva C., Cattaneo M. (2005). Local and duration magnitudes in northwestern Italy, and seismic moment versus magnitude relationships, *Bull. Seism. Soc. Am.* **95**, 592-604.
- Bragato P.L., Tenta A. (2005). Local magnitude in northeastern Italy, *Bull. Seism. Soc. Am.* **95**, 579-591.
- Richter C.F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale, *Bull. Seism. Soc. Am.* **25**, 1-31.
- Richter C.F. (1958), *Elementary Seismology*, W.H. Freeman and Co., San Francisco, California, 578 p.