

# Klimatske značilnosti Postojnskega jamskega sistema

Stanka Šebela\* in Janez Turk\*

## Povzetek

V Postojnskem jamskem sistemu se od leta 2008 opravljajo meritve osnovnih parametrov jamske klime. Na Veliki gori (Postojna 1), ki od treh merilnih mest v Postojnskem jamskem sistemu leži najvišje, je za obdobje 2009-2010 zabeležena povprečna temperatura 11,10 °C. V istem obdobju je ta temperatura v osrednjem rovu Lepih jam (Postojna 3) 10,66 °C ter 10,30 °C v stranskem rovu (Postojna 2). Največja temperaturna odstopanja v primerjavi z zunanostjo so na Postojni 2 zaradi dotoka vetra iz neznanega ozadja predvsem v zimskem času.

## Uvod

Postojnski jamski sistem je najdaljša (20.570 m) in najbolj obiskana (skoraj 500.000 obiskovalcev v letu 2009) kraška jama v Sloveniji. V okviru projektov *Strokovni nadzor in svetovanje pri upravljanju z jamskimi sistemi*, *Klimatski in biološki monitoring jamskih sistemov* (financer Turizem KRAS, Destinacijski management 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. Prve zvezne meritve temperature zraka pa se v Postojnskem jamskem sistemu (Postojna 2) opravljajo od leta 2008.

V članku analiziramo osnovne značilnosti jamske klime na podlagi urnih meritev, kar bo v prihodnjih letih osnova za razumevanje vpliva rabe naravne vrednote.

Postojnski jamski sistem je zapleten klimatski sistem zaradi velike dolžine rogov, velikih vhodov na različnih višinah, ponora reke Pivke ter velikih nihanj zunanje temperature in padavin med letom. V zimskem režimu 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).

Obsežno meteorološko študijo Postojnskega podzemlja sta prva predstavila Crestani in Anelli (1939). Opravljala sta meritve temperature zraka, podzemeljske Pivke in kamnine ter smeri vetra. Merili so tudi zračni pritisk in relativno vlago. Smeri gibanja zraka v hladnih in toplih obdobjih so prikazane na številnih prečnih profilih, npr. za Veliki dom, Otoško jamo, Pivko jamo. Študija zajema tudi vplive zmrzali v jami, predvsem v vhodnih delih, ter meteorološke razmere dihalnikov na površju nad jamo.

Postojnski jamski sistem sestavljajo klimatsko zelo različni deli. Statična sta rov Biospeleološke postaje in Pisani rov, bolj dinamični so Spodnji Tartarus, Rov brez imena in Lepe jame (Gams, 1970).

Do kroženja zraka, značilnega za zimo ali poletje, prihaja včasih, zlasti na prehodu iz enega v drug režim, tudi med toplim opoldnevom in hladno nočjo. Spomladi in jeseni

---

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

jamam nasploh »vzame sapo«, ker je med temperaturo zraka zunaj in v jami manj razlik. Seveda so izjeme. Ko so partizani spomladi leta 1944 razstrelili bencin v vhodnem rovu Postojnske jame, je veter pihal v jamo, tako je dim potemnil jamo do Kongresne dvorane (Gams, 2004).

Vsak jamski sistem ima elemente edinstvenosti, pri čemer veljajo splošne značilnosti modelov jamske temperature (Smithson, 1991).

### Opis merilnih mest

Sprva smo z ročnimi termometri temperaturo zraka odčitavali na dveh mestih, in sicer na Postojna 1 od 26. 5. 2004 in na Postojna 2 od 18. 5. 2004. Merjenje smo kasneje nadgradili z bolj natančnimi avtomatskimi inštrumenti proizvajalca Van Essen (t. i. *diver*, temperaturna natančnost  $\pm 0.1$  °C), ko smo temperaturo zraka najprej začeli meriti (dne 21. 7. 2008) na merilnem mestu Postojna 2 v Lepih jamah. Kasneje smo meritve razširili na Postojna 1 (dne 18. 3. 2009) in Postojna 3 (dne 6. 5. 2009). Merilno mesto Postojna 1 (Velika gora) se nahaja na nadmorski višini 561,4 m na vrhu podorne dvorane. Nad dvorano je 65 m debel strop apnenca (Šebela, 2010). Postojna 2 leži v umetno povečanem stranskem rovu v Lepih jamah na nadmorski višini 526 m ter ima 58 m debel jamski strop. Tretje merilno mesto (Postojna 3) je v sredini rova Lepih jamah na nadmorski višini 524 m in je od merilnega mesta Postojna 2 oddaljeno približno 12 m.

Poleg treh merilnih mest v jami pa smo od 7. 10. 2009 vzpostavili tudi merilno mesto zunaj jame, in sicer na površju v gozdu nad Otoško jamo na nadmorski višini 545 m.

### Rezultati meritev temperature zraka

Temperaturo zraka, merjeno na treh mestih v Postojnskem jamskem sistemu, smo statistično obdelali za obdobje enega leta od 12. 8. 2009 do 12. 8. 2010, to je za zvezni niz podatkov na vseh treh lokacijah (Tabela 1).

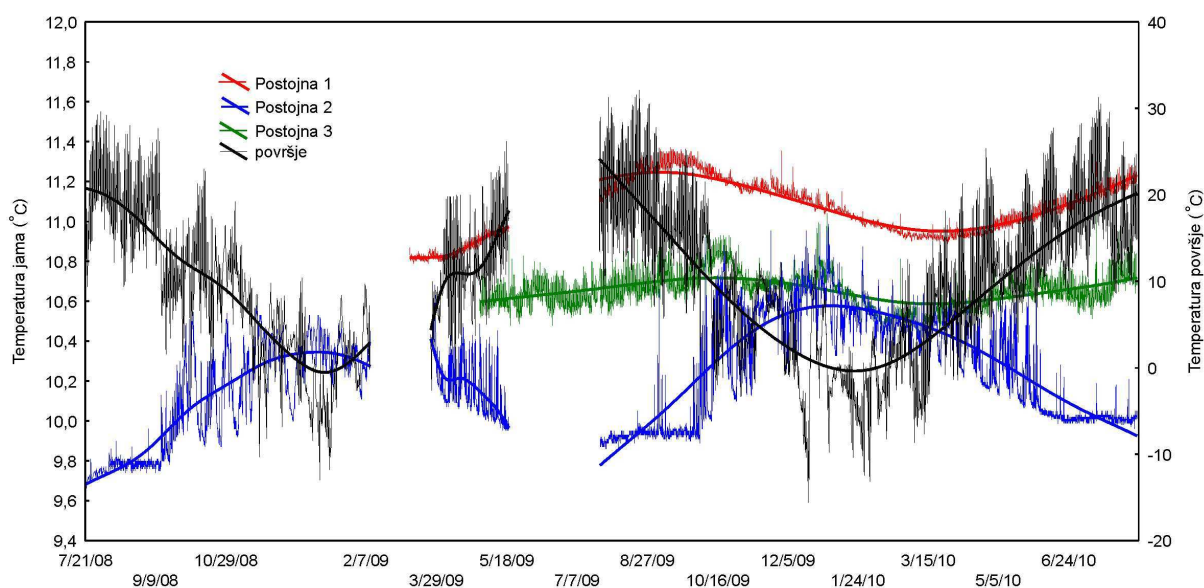
Temperatura zraka je konstantno najvišja na merilnem mestu na Veliki gori (Postojna 1), kjer znaša povprečna letna temperatura 11,10 °C (Tabela 1). Temperatura je tu razmeroma stabilna, v letnem ciklu niha zgolj za približno 0,5 °C. Temperatura zraka na Veliki gori ima značilno sezonsko temperaturno gibanje. Zrak v tem delu jame se jeseni in pozimi počasi ohlaja, spomladi in poleti pa lahko opazujemo počasno segrevanje. Zrak doseže svoj temperaturni višek približno konec septembra, medtem ko se naslednji sezonski temperaturni obrat, ko je dosežena najnižja temperatura, pripeti konec marca (Slika 1).

Podobno sezonsko gibanje letnih temperatur zraka opazujemo tudi na površju (podatki meritev nad Otoško jamo). Vendar sta oba temperaturna obrata (sezonski temperaturni maksimum in minimum) na Veliki gori zamaknjena v primerjavi z obratoma na površju. Najvišja povprečna mesečna temperatura zraka je v Postojni običajno dosežena julija, le malo nižja je povprečna temperatura zraka v avgustu. Najbolj hladen mesec pa je januar (december in februar sta običajno nekoliko manj mrzla). Temperaturni obrat v podzemlju (na Veliki gori) je torej zamaknjen za približno dva do tri mesece v primerjavi s sezonskim temperaturnim obratom na površju. Vendar je potrebno upoštevati, da so temperaturne spremembe v jamskem sistemu majhne v primerjavi z zunanjim okoljem. Temperatura zraka na Veliki gori se giblje okoli 11 °C, oba sezonska obrata odstopata le za nekaj desetink stopinje Celzija. To torej pomeni, da se jama ohlaja v obdobju, ko je zunanja temperatura nižja od 11 °C, in segreva, ko je zunanja temperatura višja od 11 °C. Šele

konec zime (druga polovica marca, aprila) se zunanja temperatura povzpne nad 11 °C za daljše obdobje (več dni zapored), s čimer prične tudi globoko v jamsko notranost pritekati topel zrak. Nasprotno velja za jesenski temperaturni obrat v jami. Konec septembra postanejo noči dovolj hladne (torej pod 11 °C) kar povzroči, da sprva vsaj ponoči (nato pa tudi podnevi) v jamo vdira mrzel zrak, ki privede do počasnega ohlajanja jamskega sistema.

Tabela 1 - Osnovni statistični podatki merjenja temperature zraka v °C za Postojnski jamski sistem (12. 8. 2009 do 12. 8. 2010).

	Postojna 1 – Velika gora (°C)	Postojna 2 – Lepe jame (°C)	Postojna 3 – Lepe jame (°C)	Površje nad Otoško jamo (°C)
POVPREČJE	11,10	10,30	10,66	9,20
STANDARDNA DEVIACIJA	0,12	0,27	0,09	8,74
N	8749	8752	8745	8754
NAJNIŽJA VREDNOST	10,89	9,89	10,34	-15,60
NAJVIŠJA VREDNOST	11,37	10,99	11,23	32,10



Slika 1 - Temperature zraka v Postojnskem jamskem sistemu na treh točkah (Postojna 1, 2 in 3) in zunanja temperatura v °C (12. 8. 2009 do 12. 8. 2010). Od 7. 10. 2009 so za površje nad jamo upoštevani podatki iz gozda nad Otoško jamo, do 7. 10. 2009 pa podatki za Postojno (vir ARSO).

Temperatura zraka na obeh drugih merilnih mestih v Postojnskem jamskem sistemu je izrazito nižja kot na Veliki gori. Merilno mesto na Veliki gori (Postojna 1) leži na vrhu podorne dvorane oziroma 35-37 metrov višje kot Lepe jame (Postojna 2 in 3). Ker je jama z vidika zračne dinamike zelo aktivna, je pod stropom oziroma v vrhnjih predelih velikih dvoran temperatura zraka stalno višja kot na dnu rogov in dvoran oziroma pri tleh.

Temperatura na merilnem mestu Postojna 2 se značilno razlikuje od tiste na Veliki gori (Postojna 1). Ne le da je izrazito nižja (Slika 1), temveč ne kaže nobene značilne korelacije

s temperaturo na Veliki gori. Sezonsko gibanje je tu ravno obratno, kot bi pričakovali. Temperatura je najnižja poleti, tedaj je tudi izredno stabilna, giblje se okoli 9,9 °C–10 °C. Približno toliko znaša tudi minimalna temperatura, ki je zabeležena na Postojni 2 (9,89 °C) (Tabela 1). V drugih treh letnih časih, ko zunanje temperature (stalno ali pa vsaj ponoči) padejo pod jamsko temperaturo 10 – 11 °C, postane temperatura zraka na merilnem mestu Postojna 2 zelo variabilna in v povprečju izrazito višja kot poleti. Celo minimalne zimske temperature so tu višje, kot znašajo maksimalne poletne. Razmeroma velika temperaturna nihanja (nekaj desetink stopinj Celzija do okoli 0,5 °C), ki se pojavljajo na Postojni 2 v dnevnem ciklu, so predvsem posledica spreminjanja smeri cirkulacije lokalnih zračnih mas v jami. Da največ zraka prihaja skozi dihalnike v stropu na zavoju Lepih jam, je opozoril že Gams (1970).

Povprečna letna temperatura zraka v Lepih jamah (Postojna 3) je po merilnih podatkih nižja od temperature zraka na Veliki gori skoraj za 0,5 °C in znaša 10,66 °C (Tabela 1). Iz temperaturnih podatkov se vidi, da temperatura v Lepih jamah (Postojna 3) kaže podobne zakonitosti kot na Veliki gori, le da je sezonsko gibanje manj izrazito. Na obeh lokacijah se pojavljajo podobne temperaturne dnevne variacije.

Jamska temperatura je običajno zelo povezana z zunanjo klimo. Svetovne klimatske spremembe lahko tako vplivajo tudi na podzemeljsko klimo (Badino, 2004). Vendar pa sta za večjo reprezentativnost te trditve potrebna merjenje in statistična obdelava vsaj 10-letnih podatkov.

Modelni izračun prenosa toplote skozi kamnino v jamski prostor je pokazal, da temperaturni signal s površja potuje do Pisanega rova približno 20 let. Zato sklepajo, da temperatura kontinuirano pospešeno narašča in se bo predvidoma dvignila za 1 °C do leta 2030 (Lojen in Domínguez-Villar, 2010, 33). Glede na naše rezultate menimo, da je pri tem potrebno upoštevati tudi dotok toplote skozi glavne jamske vhode z ventilacijo, kar se kaže tudi v dnevnikih spreminjanja jamske temperature.

## Zaključek

Postojnski jamski sistem ima več vhodov, ki so nanizani na različnih nadmorskih višinah. Gre za dinamičen in zapleten klimatski sistem, kjer se zunanji temperaturni vplivi čutijo daleč v notranjost. V jamskem sistemu sta izrazita zimski in poletni režim zračne cirkulacije.

Analiza urnih podatkov temperature zraka (od 12. 8. 2009 do 12. 8. 2010) na treh izbranih lokacijah v Postojnskem jamskem sistemu je pokazala zanimiva odstopanja, pa tudi podobnosti med podatki, predvsem v povezavi z zunanjo temperaturo. Izmed treh merilnih točk je temperatura zraka najvišja na Veliki gori (Postojna 1), ki od treh merilnih mest leži na najvišji nadmorski višini. Povprečna letna temperatura tu znaša 11,10 °C. V Lepih jamah (Postojna 2), kjer je merilna točka 35 m nižje od Velike gore, se temperatura zraka močno razlikuje od razmer na Veliki gori. Na lokaciji Postojna 2 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. Merilno mesto Postojna 2 leži v umetno povečanem rovu manjše velikosti (7 x 1 x 1,5 m), ki so ga zaradi močnega prepaha poskušali razširiti in povezati z domnevnimi neznanimi rovi že pred več kot 30 leti. Temperaturne variacije na mestu Postojna 2 so torej povezane z dotokom vetra iz neznanega ozadja (bodisi dihalnikov ali neznanih jamskih rovov) ter z mešanjem različnih zračnih gmot, predvsem v zimskem času.

Povprečna letna temperatura zraka v osrednjem delu rova v Lepih jamah (Postojna 3) je nižja od temperature zraka na Veliki gori skoraj za 0,5 °C in znaša 10,66 °C. Iz temperaturnih podatkov se vidi, da temperatura v Lepih jamah (Postojna 3) kaže podobne zakonitosti kot na Veliki gori, le da je sezonsko gibanje manj izrazito.

### Seznam literature

- Badino, G. 2004. Cave temperatures and global climatic change. *Int. J. Speleol.* 33 (1/4), 103-114, Trieste.
- Crestani, G. in Anelli, F. 1939. Ricerche di meteorologia ipogea nelle grotte di Postumia. Pubblicazione N. 143, Ministero dei lavori pubblici, Magistrato alle Acque, Ufficio idrografico, XVII, 1-162, Roma.
- Gabrovšek, F. in Mihevc, A. 2009. Cave climate. 17<sup>th</sup> international karstological school "Classical Karst", 15-20<sup>th</sup> June 2009, Guide book & Abstracts, 15-17, Postojna.
- Gams, I. 1970. Zračna cirkulacija kot del jamskega okolja na primeru Postojnske jame. V: Karamani, Z., Manaković, D. (ur) Congrès Yougoslave de spéléologie cinquième session, 15-20. 9. 1968, Skopje, Ohrid, Speleološki sajuz na Jugoslavija Skopje. Skopje.
- Gams, I., 2004. Kras v Sloveniji v prostoru in času, Založba ZRC, 516 pp., Ljubljana.
- Lojen, S. in Domínguez-Villar, D. 2010. Dinamika podzemne vode in okoljske spremembe v Postojnski jami: primer Pisanega rova. V: Košir, A., Zupan Hajna, N., Otoničar, B. (ur) Povzetki in ekskurzije, 3. slovenski geološki kongres, Bovec, 16.-18. September 2010, ZRC SAZU, 33, Ljubljana.
- Smithson, P. A. 1991. Inter-Relationships Between Cave and Outside Air Temperatures. *Theor. Appl. Climatol* 44, 65-73.
- Šebela, S. 2010. Accesses from the surface to the Postojna cave system. *Annales, Ser. hist. nat.* 20, 55-64, Koper.



# Raziskave vpliva lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal na območju Ljubljane z metodami analize mikrotremorjev

Janez Rošer\*, Andrej Gosar\*\*

## Povzetek

Na območju Ljubljane lahko pričakujemo vpliv lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal na celotnem mestnem območju, še posebej izrazitega pa v južnem delu Ljubljane, ki je zgrajen na zelo mehkih jezerskih sedimentih. Primerno karakterizacijo vpliva lokalnih tal lahko izvedemo s poznavanjem resonančne frekvence mehkih plasti in s poznavanjem hitrosti strižnega valovanja v njih. Raziskave so zajele 45 km<sup>2</sup> veliko območje znotraj ljubljanske obvoznice, na katerem smo na prostem površju v mreži 200 × 200 m opravili preko 1200 točkovnih meritev in 31 ploskovnih meritev mikrotremorjev. Za oceno lastne frekvence sedimentov smo izvedli študijo z metodo spektralnega razmerja med vodoravnima in navpično komponento (HVSZ) zapisa mikrotremorjev. Za določitev vertikalnih profilov hitrosti strižnega valovanja in povprečne hitrosti v zgornjih 30 metrih ( $V_{s,30}$ ), ki se uporablja za klasifikacijo tal po standardu Evrokod 8 (EC8), smo uporabili skupno modeliranje podatkov HVSZ metode in disperznih krivulj, pridobljenih s ploskovnimi meritvami mikrotremorjev ter analiziranih z metodama razširjene prostorske avtokorelacije (ESAC) in refrakcijskih mikrotremorjev (ReMi). Nazadnje smo relativno ovrednotili vpliv lokalnih tal na ojačanje potresnega nihanja tal na osnovi geološke zgradbe, znanih vrednosti  $N_{SPT}$ , podatkov o lastni frekvenci tal, amplitud HVSZ vrhov in vrednosti  $V_{s,30}$ . V splošnem so najboljši pogoji značilni za celoten severni in severovzhodni del Ljubljane, pogoji pa se nato slabšajo v smeri proti jugu. Največje ojačanje potresnega nihanja zaradi lokalne geološke zgradbe pričakujemo na območju Barja.

## Uvod

Ljubljana leži v plitvem sedimentnem bazenu, zapolnjenem s kvartarnimi sedimenti. Širše območje Ljubljane je med potresno najbolj dejavnimi v Sloveniji (Slika 1), čeprav v zadnjih 45 letih tu ni bilo potresov, ki bi povzročili poškodbe stavb. Zadnji tak potres se je zgodil leta 1963 na območju Litije ( $M = 4,9$ ) in je v Ljubljani dosegel intenziteto VI-VII stopnje po MSK lestvici. Največ poškodb je povzročil veliki ljubljanski potres leta 1895 ( $M = 6,1$ ), ki je imel največjo intenziteto VIII-IX po MSK lestvici (Ribarič, 1982). Najmočnejši zgodovinski potres v Sloveniji (Idrijski potres,  $M = 6,8$ ) pa je imel nadžarišče približno 30 km zahodno od Ljubljane, vendar njegova lokacija ni zanesljiva, potresni učinki na območju Ljubljane pa so neznani. Na karti potresne nevarnosti Slovenije za povratno dobo 475 let (Lapajne et al., 2001) Ljubljana leži v območju s projektnim pospeškom 0,25 g. To je tudi najgostejše poseljeno območje v Sloveniji z več kot 300.000 prebivalci in številnimi pomembnimi industrijskimi in transportnimi objekti, kar je potrebno upoštevati v vsaki študiji za oceno potresne ogroženosti.

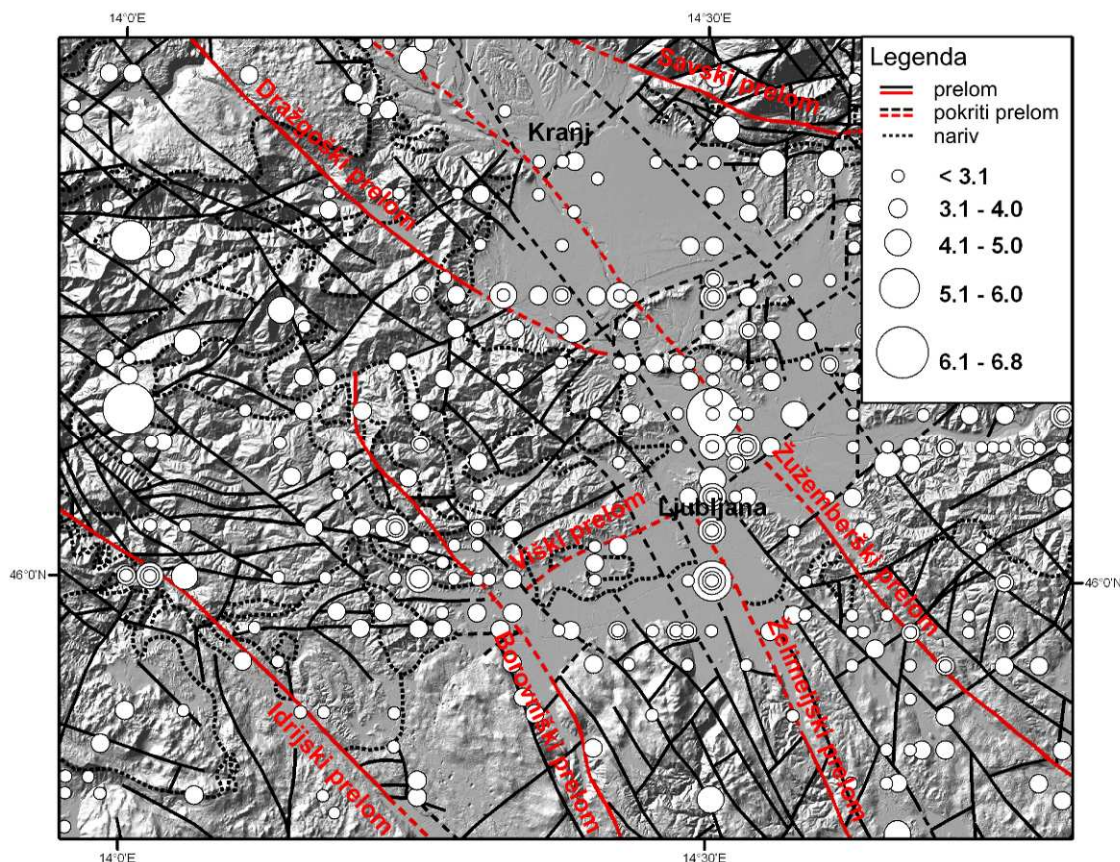
Vplive kvartarnih sedimentov na potresno nihanje tal lahko pričakujemo na območju celotnega mesta, še posebej velike pa v južnem delu Ljubljane, ki je zgrajen na zelo

---

\* dr., PV Invest d.o.o., Koroška c. 62 b, Velenje

\*\* izr. prof. dr., Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana in UL, Naravoslovnotehniška fakulteta

mehkih jezerskih sedimentih Ljubljanskega barja. Severni del mesta je zgrajen na ledeniško-rečnih nanosih reke Save, ki imajo boljše geotehnične značilnosti.



Slika 1 - Karta tektonsko strukturnih elementov in nadžarišč potresov z magnitudo  $\geq 3$  za obdobje od leta 567 dalje na širšem območju Ljubljane (prirejeno po Gosar et al., 2010)

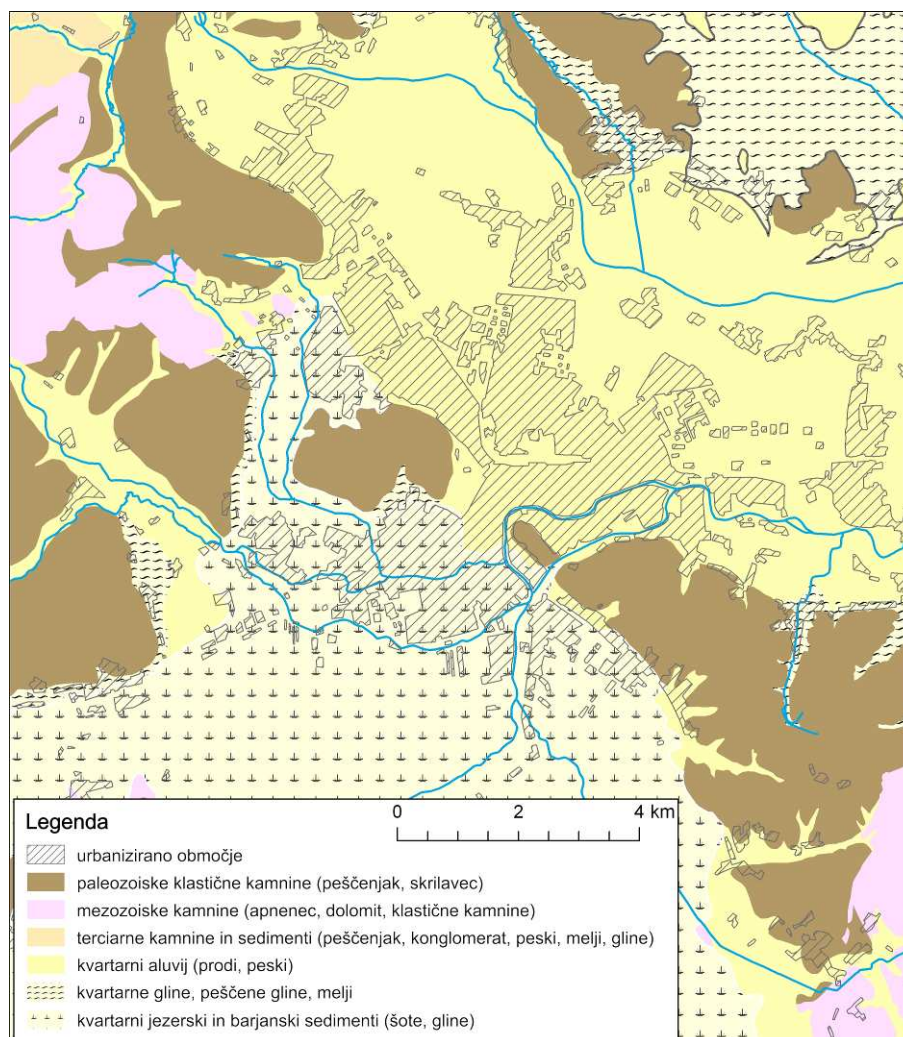
Na območju Ljubljane smo izvedli obsežne meritve z metodo spektralnih razmerij med vodoravnima in navpično komponento (HVSZ) mikrotremorjev za določitev lastne frekvence sedimentov (Gosar et al., 2010) ter ploskovne meritve za pridobitev vertikalnih profilov hitrosti strižnega valovanja v tleh (Rošar & Gosar, 2010). Novi podatki o potresni nevarnosti mesta in ranljivosti stavb na območju Ljubljane dopolnjujejo obstoječo potresno mikrorajonizacijo Ljubljane (Zupančič et al., 2004) in so osnova za oceno nevarnosti resonance med tlemi in stavbami v primeru potresa.

### Geološka zgradba

Geološka zgradba območja Ljubljane je prikazana na Sliki 2. V podlagi so deloma karbonski in permski peščenjaki, konglomerati in laporji, deloma pa triasni in jurski apnenci in dolomiti (Mencej, 1989). Vse te kamnine izdanjajo v gričevju, ki obrobja sedimentni bazen. Ta je nastal predvsem z ugrezanjem vzdolž številnih prelomov, ki je bilo največje v srednjem in zgornjem pleistocenu. Severni del bazena (Ljubljansko polje) je zapolnjen s pleistocenskimi in holocenskimi ledeniško-rečnimi nanosi reke Save, ki so do 100 m debeli. Sestavlja jih predvsem karbonatni prod, v katerem so plasti ali leče konglomerata (Grad & Ferjančič, 1974; Premru, 1982). Relief podlage ni zelo razgiban, vendar je vrtin ali podatkov geofizikalnih raziskav razmeroma malo. Južni del bazena



(Ljubljansko barje) je zapolnjen z jezerskimi in rečnimi nanosi, ki so precej heterogeni. Sestavljajo jih glina, prod, pesek, melj, jezerska kreda in šota (Grad & Ferjančič, 1974; Mencej 1989). Površinska plast je zelo mehka. Topografija skalne podlage je zaradi diferencialnega pogrezanja precej razgibana, globina do nje je od 0 do 200 m.



Slika 2 – Poenostavljena geološka karta območja mesta Ljubljane (Gosar et al., 2010)

### Metode analize mikrotremorjev

Pri raziskavah vpliva sedimentov na potresno nihanje tal na območju Ljubljane smo za analizo mikrotremorjev uporabili tri pasivne metode. Prva temelji na točkovnih meritvah s trikomponentnim senzorjem in jo imenujemo HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) metoda. Drugi dve metodi smo izvajali z uporabo niza vertikalnih geofonov in sodita med ploskovne mikrotremorske metode. To sta metoda razširjene prostorske avtokorelacije (Extended Spatial Autocorrelation – ESAC) in metoda refrakcijskih mikrotremorjev (Refraction Microtremor – ReMi). Osnova ploskovnih meritev je analiza oblike disperzne krivulje površinskih valov, ki sestavljajo mikrotremorje, t. j. določitev odnosa med fazno hitrostjo in frekvenco (Okada, 2003). Skupna predpostavka vsem trem metodam je horizontalna plastovitost pod raziskovanim ozemljem.

HVSR metoda se je v zadnjem desetletju široko uveljavila pri raziskavah vpliva lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal in pri potresni mikrorajonizaciji (Bard, 1999). Kljub temu teoretično ozadje metode še ni enoznačno pojasnjeno, saj obstajajo različne razlage, ki so še predmet raziskovanj. Nakamura (2000) zagovarja razlago resonance strižnega valovanja v mehkih sedimentih, po kateri v mikrotremorjih prevladuje prostorsko valovanje, medtem ko naj bi bil prispevek površinskega valovanja zanemarljiv. Bolj široko sprejeta je razlaga, po kateri v mikrotremorjih prevladuje površinsko valovanje, spektralno razmerje (HVSR) pa odraža eliptičnost Rayleighjevega valovanja, ki je frekvenčno odvisno (Bard, 1999; Bonnefoy-Claudet et al., 2006). Danes je široko sprejeto, da vrh v spektralnem razmerju odraža lastno frekvenco sedimentov. Amplituda tega vrha pa je odvisna predvsem od impedančnega kontrasta med sedimenti in skalno podlago ter podaja le grobo oceno spodnje meje dejanskega ojačanja potresnih valov. Metoda mikrotremorjev tudi ne podaja ocene celotnega frekvenčnega območja, v katerem pride do ojačanja potresnega nihanja tal. Njena glavna prednost pa je, da podaja resonančno frekvenco sedimentov, ne da bi poznali njihovo debelino in hitrost strižnega valovanja. Meritve mikrotremorjev so razmeroma preproste, hitre in poceni. Zato je mogoče raziskave izvesti v mnogo bolj gosti mreži merskih točk kot s katero koli od drugih uveljavljenih metod, ki temeljijo na geofizikalnih raziskavah, vrtanju ali analizi zapisov potresov. Poznavanje debeline in/ali hitrosti strižnega valovanja in primerjave rezultatov mikrotremorjev z rezultati drugih metod ali dejanskih učinkov potresov pa lahko znatno izboljšajo zanesljivost interpretacije podatkov mikrotremorjev (Bard, 1999).

V zadnjih letih je metoda refrakcijskih mikrotremorjev (ReMi) (Louie, 2001) postala popularna zlasti zaradi možnosti uporabe standardne seizmične refrakcijske opreme in izvedbe na majhnem prostoru. Metoda uporablja kot vir valovanja ambientne vibracije, ki jih posnamemo z linearno razvrstitvijo vertikalnih geofonov. Analiza ReMi metode temelji na transformaciji izmerjenih podatkov iz časovne domene v frekvenčno-hitrostno domeno. Ta transformacija se izvede preko "slant-stack" ali " $p$ - $\tau$  transformacije" (Thorson & Claerbout, 1985), ki ji sledi Fourierjeva transformacija v smeri  $\tau$ . Rezultat analize je slika močnostnega spektra kot funkcije frekvence in inverzne vrednosti hitrosti. Ker se lahko jakost močnostnega spektra pri različnih frekvencah zelo razlikuje, spekter normiramo. ReMi omogoča razločevanje med različnimi nihajnimi oblikami površinskih valov, kar pa je odvisno od hitrosti strižnega valovanja na raziskovanem območju in razporeditve virov valovanja. Posledica uporabe linearne razvrstitve geofonov pri ReMi metodi je ta, da ne moremo neposredno interpretirati pridobljenega močnostnega spektra. Valovno polje mikrotremorjev ni točkovnega izvora in realno izvira iz množice izvorov na površini in pod njo. Tako valovanje prihaja na linijsko razvrstitev iz nam neznanih smeri. V izogib izbire previsoke fazne hitrosti (maksimumi v močnostnem spektru) je priporočljiveje izbrati kot pravo fazno hitrost spodnjo mejo navidezne fazne hitrosti Rayleighjevih valov (Louie, 2001). Slaba stran ReMi metode je tako določena subjektivnost pri izbiranju fazne hitrosti pri posameznih frekvencah za določitev disperzne krivulje, zlasti v nizkofrekvenčnem območju.

Razširjena prostorska avtokorelacijska metoda je izpeljana iz prostorske avtokorelacijske (SPAC) metode, katere osnove je proti koncu petdesetih let postavil Keiiti Aki. Metodi obravnavata valovno polje kot stohastični proces, ki je stacionarno tako v času kot prostoru (Aki, 1957). Z analizo vertikalne komponente mikrotremorjev, pridobljenih s senzorji, razporejenimi na krožnici s polmerom  $r$  in v njenem središču, je mogoče določiti prostorski avtokorelacijski koeficient. Ta je povezan s fazno hitrostjo Rayleighjevih valov  $c(f)$  preko Besslove funkcije prve vrste ničtega reda  $J_0(\ )$ , kot kaže enačba 1.

$$\rho(f, r) = J_0\left(\frac{2\pi f r}{c(f)}\right) \quad (1)$$

Določitev fazne hitrosti  $c(f)$  z uporabo SPAC metode je torej pogojena s konstantno razdaljo  $r$ , ki je enaka polmeru krožne razvrstitve. Pri razširjeni prostorski avtokorelacijski metodi pa namesto konstantne vrednosti polmera  $r$  uporabimo konstanto vrednost frekvence  $f$  (Ohori et al., 2002; Okada, 2003). Prostorski avtokorelacijski koeficient  $\rho(f, r)$  za različne frekvence  $f$  prilagajamo Besslovi funkciji  $J_0(\ )$ , ki je odvisna od medsebojne razdalje med senzorji  $r_{bn}$  (razdalja med baznim senzorjem in  $n$ -tim senzorjem) (enačba 2). Ob konstantni frekvenci  $f$  je edina neznanka v tej enačbi fazna hitrost  $c(f)$ , ki jo pridobimo z inverzijo prostorskega avtokorelacijskega koeficienta.

$$\rho_{bn}(f, r_{bn}) = J_0\left(\frac{2\pi f r_{bn}}{c(f)}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (2)$$

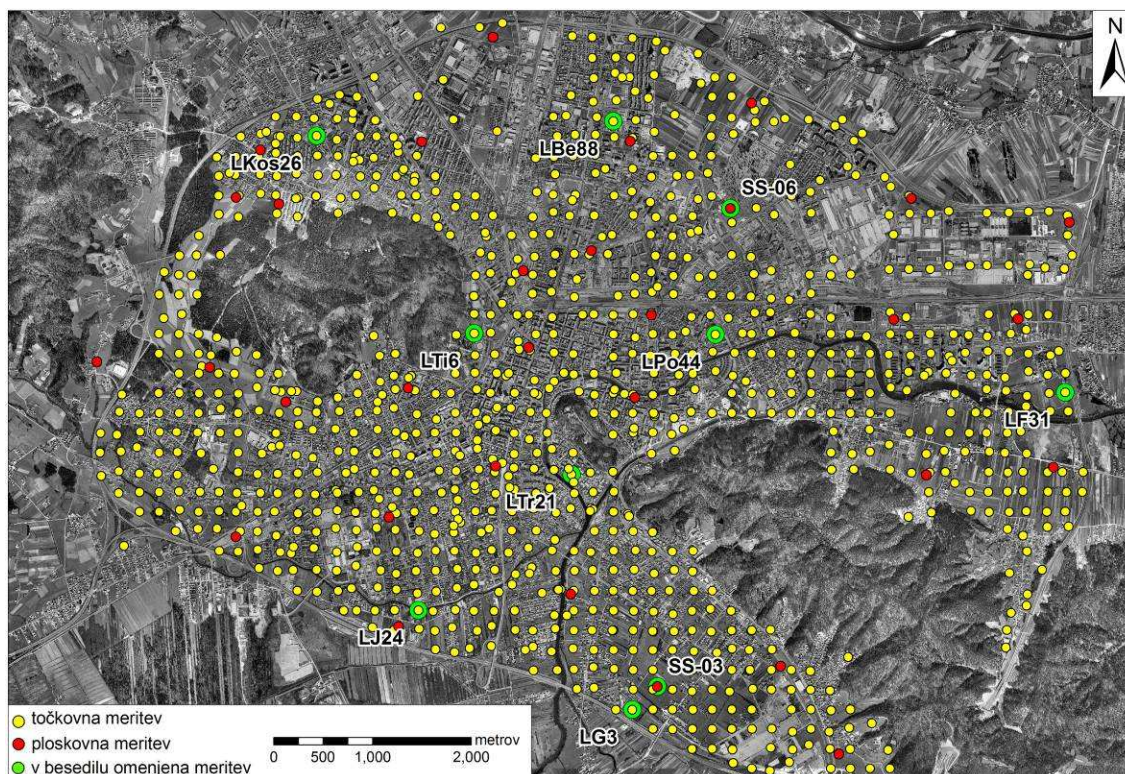
Pri obeh metodah smo uporabili dve predpostavki. Prva je ta, da je v mikrotremorjih dominantna osnovna nihajna oblika Rayleighjevih valov, in druga, da so strukture pod geofonsko razvrstitvijo vzporedne. Če v podatkih dominirajo višje nihajne oblike nad osnovno nihajno obliko površinskih valov, SPAC in ESAC metodi ne omogočata izločitve le-te (Okada, 2003). Za merjenje s SPAC metodo je potrebna krožna razvrstitev senzorjev, kar pa je na urbaniziranih območjih težko izvedljivo. To težavo lahko obidemo z uporabo ESAC metode, kjer ni potrebna krožna razvrstitev, temveč je lahko razvrstitev senzorjev poljubna (L-oblika, T-oblika, križna oblika). V primerjavi z ReMi metodo pa imata SPAC in ESAC metodi še pomembno prednost, saj izločita skalarno hitrost valovanja neodvisno od smeri vira valovanja. Tako vsesmerno valovno polje, ki je značilno za urbanizirana območja, omogoča boljše ocene skalarnih hitrosti (Asten, 2001). Disperzne krivulje pri SPAC in ESAC metodi ne določamo z lastno izbiro fazne hitrosti kot pri ReMi metodi in rezultat ni izpostavljen subjektivnim odločitvam.

S postavitvijo primerne strukturnega modela lahko z inverznim izračunom s prilagajanjem izračunane teoretične HVSR krivulje eksperimentalno določeni HVSR krivulji pridobimo vertikalni profil hitrosti strižnega valovanja v tleh, seveda ob postavitvi ustreznih robnih pogojev. Brez postavljenih omejitev bi za eksperimentalno HVSR krivuljo našli neskončno mnogo sintetičnih modelov, katerih teoretične HVSR krivulje bi se ujemale z eksperimentalno krivuljo. Pri tej raziskavi smo za robne pogoje uporabili vrednosti hitrosti strižnega valovanja pripovršinskih plasti iz disperzijskih krivulj, ki smo jih pridobili z ReMi in ESAC analizo ploskovnih meritev mikrotremorjev.

### Meritve mikrotremorjev in njihova analiza

Raziskave meritev mikrotremorjev so zajemale območje mesta Ljubljane, ki leži znotraj obvoznice. Točkovne meritve mikrotremorjev na prostem površju smo izvajali s šestimi prenosnimi seizmografi tipa Tromino (Micromed, 2005) približno v mreži  $200 \times 200$  m, opravili pa smo 1232 meritev. Na vsaki točki smo s frekvenco vzorčevanja 128 Hz merili seizmični nemir 20 minut, kar omogoča zanesljivo spektralno analizo do vsaj 0,5 Hz na spodnjem robu frekvenčnega območja (SESAME, 2004). Lokacije teh meritev so na Sliki 3 prikazane v rumeni barvi. Če se je izkazalo, da predvidena točka ni primerna za izvedbo

meritve, smo jo premaknili, v najslabšem primeru pa smo meritev opustili. Ploskovne meritve mikrotremorjev so praktični izziv, saj v urbaniziranih območjih ni veliko prostora za postavitev večjih seizmičnih razvrstitev. Tako smo ploskovne meritve izvajali v mestnih parkih, na šolskih igriščih in na kmetijskih površinah. Meritve smo izvedli na 31 lokacijah, ki so prikazane v rdeči barvi (Slika 3). Meritve smo izvajali v 2D razvrstitvi, ki smo jo formirali z uporabo štiriindvajsetih 4,5 Hz vertikalnih geofonov. Meritev je trajala približno 15 minut pri frekvenci vzorčenja 512 Hz. Pri ESAC metodi smo uporabili posnetke, pridobljene z L-obliko razporeditve, pri ReMi metodi pa le daljše krake iste razvrstitve.



Slika 3 – Lokacije meritev mikrotremorjev na območju Ljubljane: v rumeni barvi točkovne meritve, v rdeči barvi ploskovne meritve, z zeleno obrobo v besedilu omenjena meritev

Analizo spektralnih razmerij smo izvedli po naslednjem postopku. Posnete seizmogramne smo pregledali, da bi ugotovili morebitne napake v meritvah in močnejše prehodne motnje. Vsak seizmogram smo nato razdelili v 30-sekundna okna, za katera smo izračunali amplitudne spektre v frekvenčnem območju 0,5-64 Hz z uporabo trikotnega okna in 5 % glajenja. Podatke smo popravili tudi za prenosno funkcijo senzorja. Sledil je izračun spektralnega razmerja kot povprečja amplitudnega spektra obeh vodoravnih komponent deljenih z navpično komponento (HVSr) za vsako okno posebej. Na barvnem prikazu HVSr funkcij vseh 40-ih oken smo identificirali okna z močnejšimi prehodnimi motnjami in jih izločili iz nadaljnjega izračuna. Na koncu smo izračunali povprečno HVSr funkcijo za vsa okna s pripadajočim 95 % intervalom zaupanja.

ReMi analizo smo izvedli s programsko opremo SoilSpy Rosina in Grilla (Micromed, 2006; Micromed, 2008), disperzna krivulja pri ESAC analizi pa je bila izdelana s programom ESAC (Baliva, 2006). Pri obeh metodah, ReMi in ESAC, smo posnetek razdelili na 10-sekundna časovna okna brez prekrivanja in za vsako okno izračunali

disperzne krivulje. Neinformativna časovna okna smo v primeru ReMi izločili in s povprečenjem disperznih spektrov ustreznih posameznih oken pridobili končni disperzni spekter. Pri ESAC metodi smo uporabili celotno sled, končno disperzno krivuljo pa prav tako pridobili s povprečenjem disperznih krivulj posameznih oken. Pri obeh metodah smo uporabili postopek, ki se v angleščini imenuje "iterative grid search" in omogoča določitev vrednosti fazne hitrosti, ki se najbolj prilagaja vhodnim podatkom.

Za pridobitev podpovršinskih profilov hitrosti strižnega valovanja smo uporabili skupno modeliranje podatkov spektralnega razmerja horizontalnih in vertikalne (HVSR) komponente posamičnih meritev mikrotremorjev in disperznih krivulj pridobljenih s ploskovnimi meritvami mikrotremorjev. Modeliranje smo izvedli s programskim paketom Grilla, natančneje z modulom Phase Velocity Spectra Module (Micromed, 2007 in 2008), ki predpostavlja vertikalno heterogen 1D elastični model podpovršja. Teoretični izračun disperzne krivulje Rayleighjevih valov za večplastni 1D model je podan v Ben-Menahem & Singh (2000) ali v Lai & Wilmanski (2005), izračun teoretične HVSR krivulje na osnovi Rayleighjevega valovanja pa temelji na algoritmu, podanem v Arai & Tokimatsu (2004).

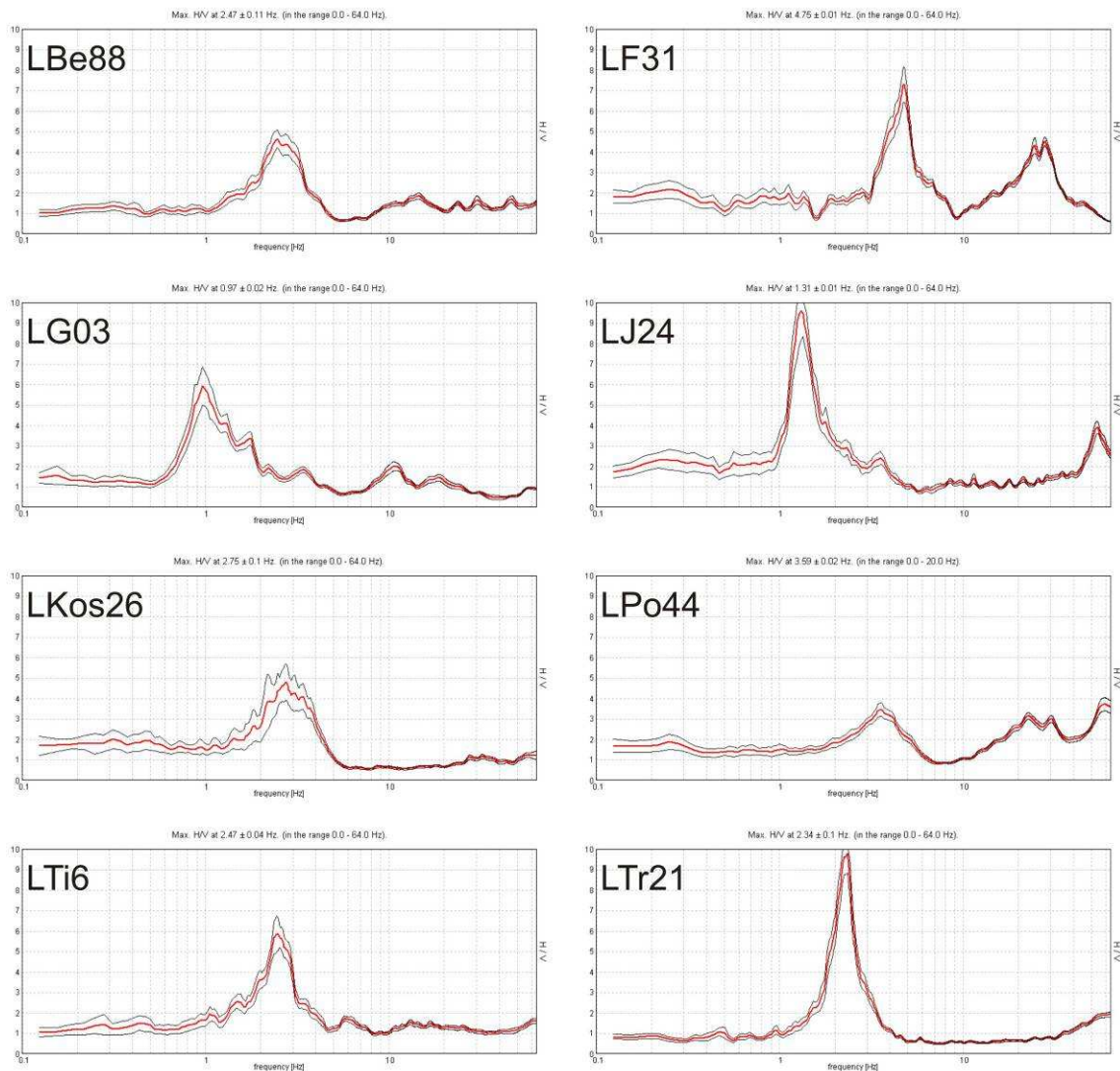
### Rezultati in interpretacija

Analize spektralnih razmerij (HVSR) so pokazale, da večina meritev izpolnjuje kriterije, ki so jih opredelili v okviru evropskega projekta SESAME (SESAME, 2004). Trije od teh kriterijev o zanesljivosti HVSR krivulje temeljijo na razmerju med frekvenco vrha in dolžino okna, številu značilnih ciklov in standardnem odklonu amplitude vrha. Naslednjih šest kriterijev za jasen vrh temelji na razmerju med amplitudo vrha in nivojem HVSR krivulje drugod ter na standardnem odklonu frekvence vrha in njene amplitude (amplituda se mora na obeh straneh hitro zmanjševati). Pri meritvah na območju Ljubljane so bili glavni razlogi za neizpolnjevanje teh kriterijev: a) visok nivo motenj, b) dva ali več vrhov v spektru ali c) prenizka amplituda vrha.

Zelo jasne vrhove v spektralnem razmerju smo dobili v celotnem južnem delu mesta (Slika 4; LG03, LJ24, LTr21). Visoke amplitude HVSR vrhov kažejo na močan impedančni kontrast med sedimenti in skalno podlago. Časovna stabilnost signala je bila v splošnem dobra, kar se kaže v ozkem območju 95 % intervala zaupanja povprečne krivulje. V severnem delu mesta je bila večina meritev prav tako dobrih (Slika 4; LBe88, LF31, LKos26, LPo44, LTi6), čeprav je odziv v splošnem manjši zaradi manjšega impedančnega kontrasta proda s skalno podlago. V tem delu pa so bila tudi nekatera območja, za katere so bile značilne zelo nizke amplitude HVSR krivulje ali celo njena ploskost. Možen razlog je lahko prisotnost konglomerata znotraj peščeno-prodnega zasipa, ki je značilen za to območje, vendar njegovega obsega ne poznamo zaradi prereditih vrtin. Slabo sprijet konglomerat domnevno zmanjšuje ali zakrije glavni impedančni kontrast na meji med nevezanimi sedimenti in skalno podlago. Po drugi strani je na tem območju nekaj večjih industrijskih con, kjer niso izključene obsežnejše podzemne komunikacije, ki lahko vplivajo na meritve.

Na podlagi točkovnih meritev na 1003 točkah, ki so dale dovolj jasne vrhove v spektralnem razmerju, da smo lahko opredelili resonančno frekvenco sedimentov, smo izrisali dve karti: karto resonančne frekvence sedimentov (Slika 5) in karto amplitud HVSR vrhov (Slika 6). Karta lastnih frekvenc (Slika 5) kaže njihov razpon v območju 0,9-10 Hz. V južnem delu Ljubljane se lastna frekvenca dobro ujema s spremembami v debelini sedimentov, ki jo poznamo iz geofizikalnih raziskav in nekaterih vrtin. Debelina sedimentov v splošnem narašča proti jugu, lastna frekvenca pa upada v isti smeri. Povprečna lastna frekvenca v južnem delu Ljubljane je  $2,9 \pm 1,8$  Hz (Slika 7 desno). V

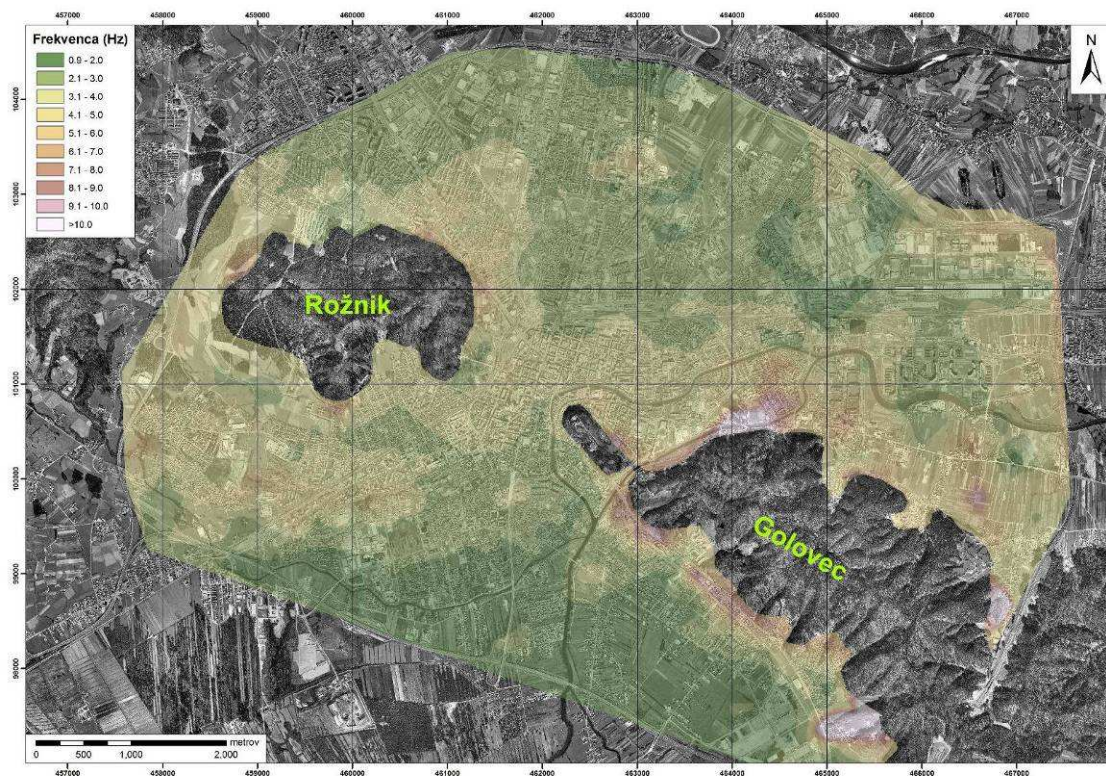
severnem delu Ljubljane, ki je zapolnjen predvsem s prodrom, v katerem so plasti in leče konglomerata, je korelacija med debelino sedimentov in lastno frekvenco manj značilna, čeprav je njihova debelina v splošnem manj spremenljiva kot v južnem delu. Vendar za to območje ni na voljo skoraj nič geofizikalnih podatkov, vrtime pa so zelo neenakomerno razporejene. Povprečna lastna frekvenca v severnem delu Ljubljane je  $3,5 \pm 1,7$  Hz (Slika 7 levo).



Slika 4 – Izbrane meritve mikrotremorjev (HVSR analiza) z območja Ljubljane; črni krivulji predstavljata 95% interval zaupanja

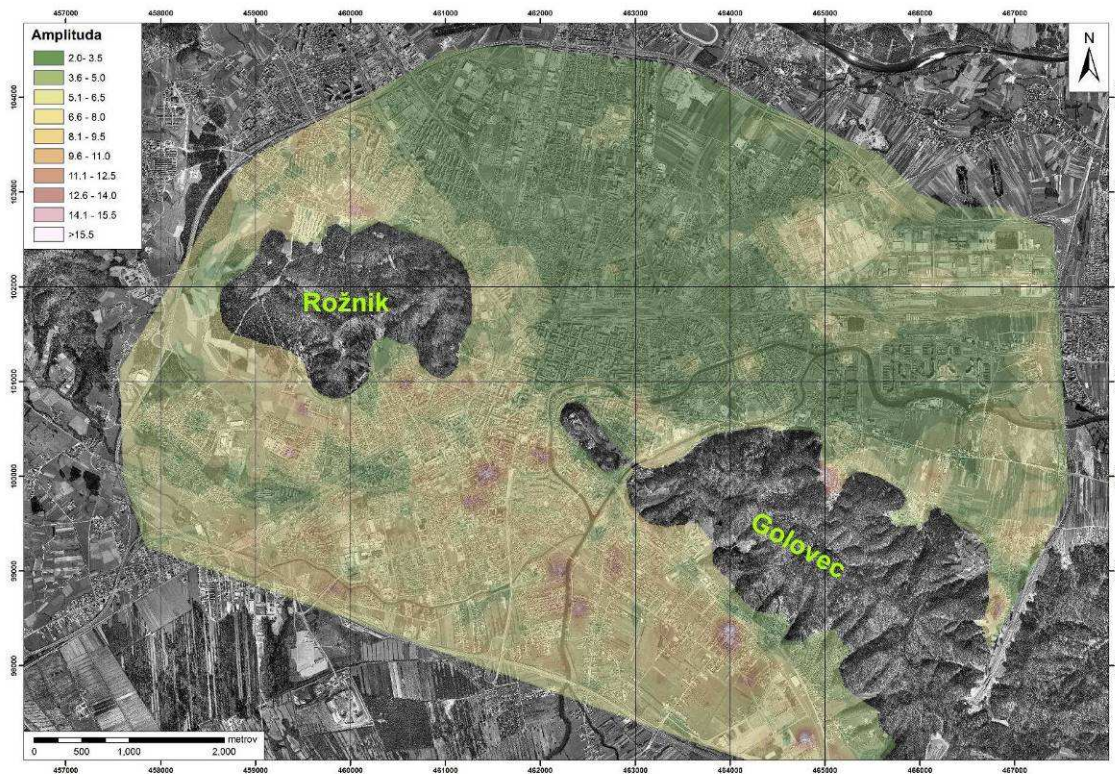
Karta amplitud vrhov HVSR krivulj (slika 6) kaže njihov razpon v območju 2-15, le na posameznih točkah so vrednosti višje. V severnem delu mesta je nekaj večjih območij, kjer so amplitude vrhov nizke (pod 3), predvsem v osrednjem delu. Možni razlogi za šibek odziv so opisani zgoraj. Povprečna amplituda HVSR vrhov v severnem delu Ljubljane je  $4,1 \pm 2,1$  (Slika 7 levo). V južnem delu je povprečna amplituda vseh vrhov mnogo višja in znaša  $6,8 \pm 2,5$  (Slika 7 desno). Območje z visokimi amplitudami (nad 5), ki kažejo na velik impedančni kontrast med jezerskimi sedimenti in skalno podlago, se dobro ujema z območjem, klasificiranim kot vrsta tal  $S_1$  po Evrokod 8 v predhodni potresni mikrorajonizaciji (Zupančič et al., 2004). Vidi se tudi več izoliranih območij z zelo

visokimi amplitudami (nad 10), vendar zanje nismo našli korelacije s površinsko geološko zgradbo ali debelino sedimentov.

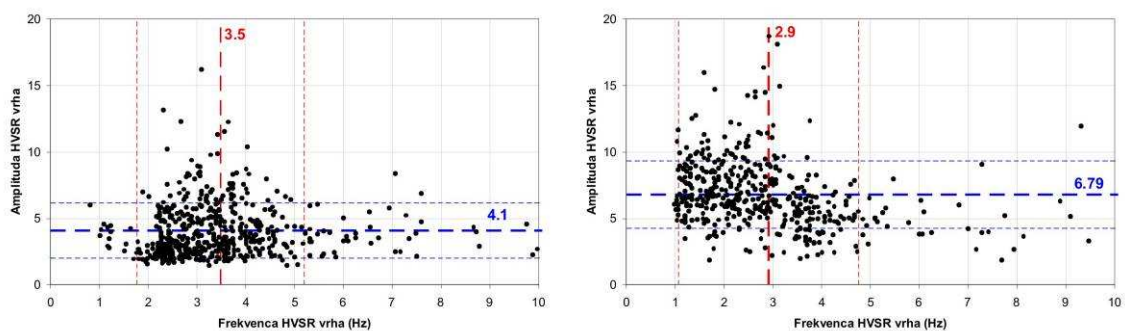


Slika 5 – Karta resonančne frekvence sedimentov na območju Ljubljane, izdelana na podlagi točkovnih meritev mikrotremorjev na prostem površju

Ploskovne meritve mikrotremorjev smo izvedli na 31 lokacijah (Slika 3), na katerih smo pridobili HVSR krivulje in disperzne krivulje Rayleighjevih valov. Na Sliki 8 je prikazan značilen primer iz severnega dela Ljubljane; slika (a) prikazuje eksperimentalno HVSR krivuljo v rdeči barvi ter prilegajočo se teoretično HVSR krivuljo v modri barvi. Primerjava med disperznimi krivuljami, pridobljenimi z ReMi in ESAC metodo ter teoretično (modelno) krivuljo, je prikazana na sliki (b). Disperzna krivulja po ESAC metodi je prikazana z rumenimi krogi, ReMi disperzna krivulja pa je prikazana z barvno kodiranim močnostnim spektrom. Svetlomodri krogi prikazujejo teoretično disperzno krivuljo fazne hitrosti Rayleighjevih valov, pridobljeno s skupnim modeliranjem, in odražajo disperzno krivuljo teoretičnega profila, ki je prikazan na sliki (c). Glavni namen HVSR meritev na lokacijah ploskovnih meritev je, poleg ocene lastne frekvence tal pridobiti obliko HVSR krivulje za skupno modeliranje. Vrednost povprečne hitrosti strižnega valovanja v vrhnjih 30 metrih na tej lokaciji znaša 530 m/s.

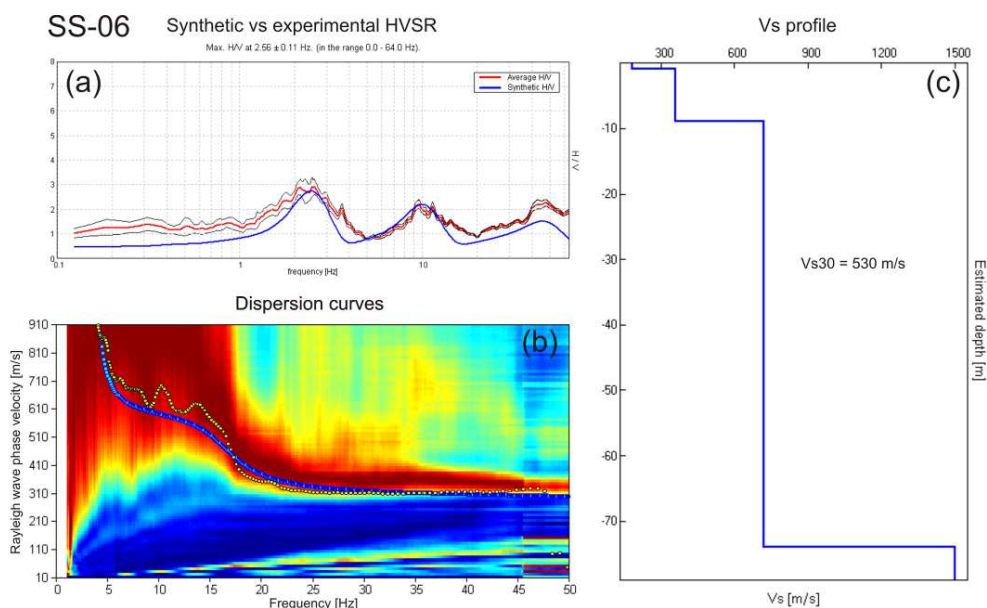


Slika 6 – Karta amplitud HVSR vrhov na območju Ljubljane, izdelana na podlagi točkovnih meritev mikrotremorjev na prostem površju



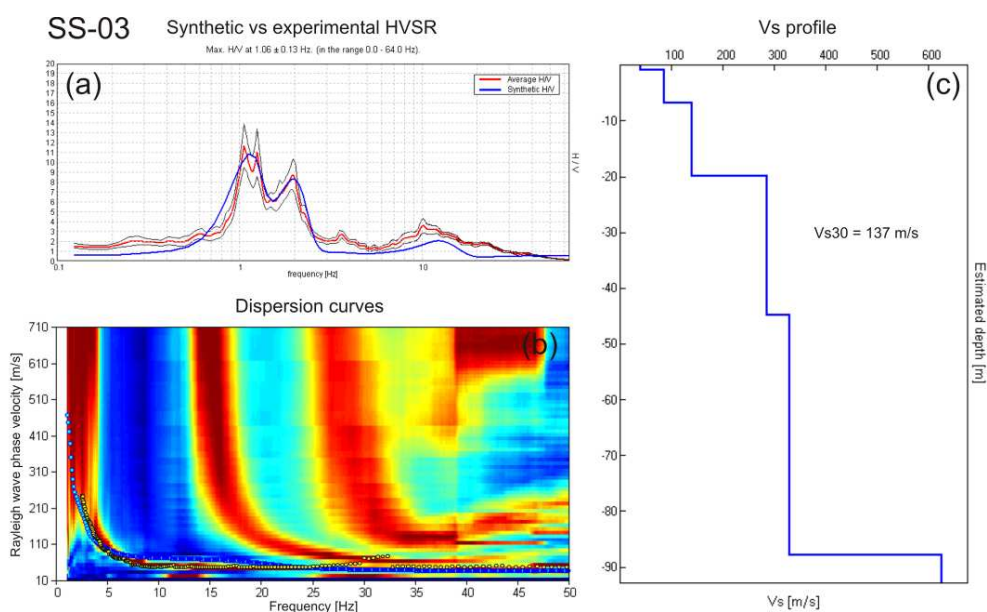
Slika 7 – Diagram odvisnosti amplitude od lastne frekvence vrhov HVSR krivulj za meritve mikrotremorjev v: severnem delu (levo) in južnem delu Ljubljane (desno). Povprečna vrednost je prikazana z debelejšo, standardni odklon s tanjšo črtkano linijo.





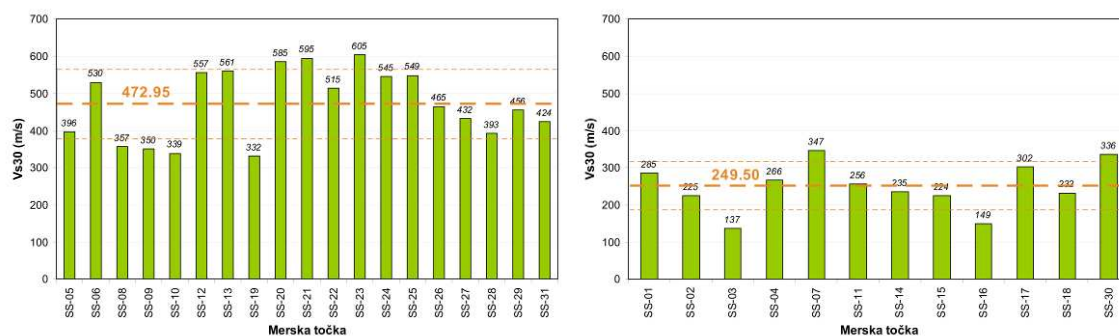
Slika 8 – Skupno modeliranje HVSR in disperzne krivulje za pridobitev profila hitrosti strižnega valovanja na lokaciji SS-06: (a) eksperimentalna HVSR krivulja v rdeči barvi (črni krivulji predstavljata 95 % interval zaupanja) in modelirana teoretična krivulja v modri barvi, (b) primerjava eksperimentalnega ReMi disperznega spektra (barvno kodirani močnostni spekter) in ESAC disperzne krivulje (rumeni krogi) s teoretično disperzno krivuljo (modri krogi), (c) pripadajoč vertikalni profil hitrosti strižnega valovanja.

Iz ReMi barvno kodiranega spektra za lokacijo, ki leži v južnem delu Ljubljane (Slika 9), se vidijo tako osnovna nihajna oblika disperzne krivulje in tudi dve višji nihajni obliki. Nasprotno ESAC krivulja podaja zgolj najdominantnejšo nihajno obliko, ki pa je večinoma osnovna nihajna oblika. Na podlagi pridobljenega hitrostnega modela smo izračunali povprečno hitrost strižnega valovanja v prvih 30 metrih, ki znaša 137 m/s.



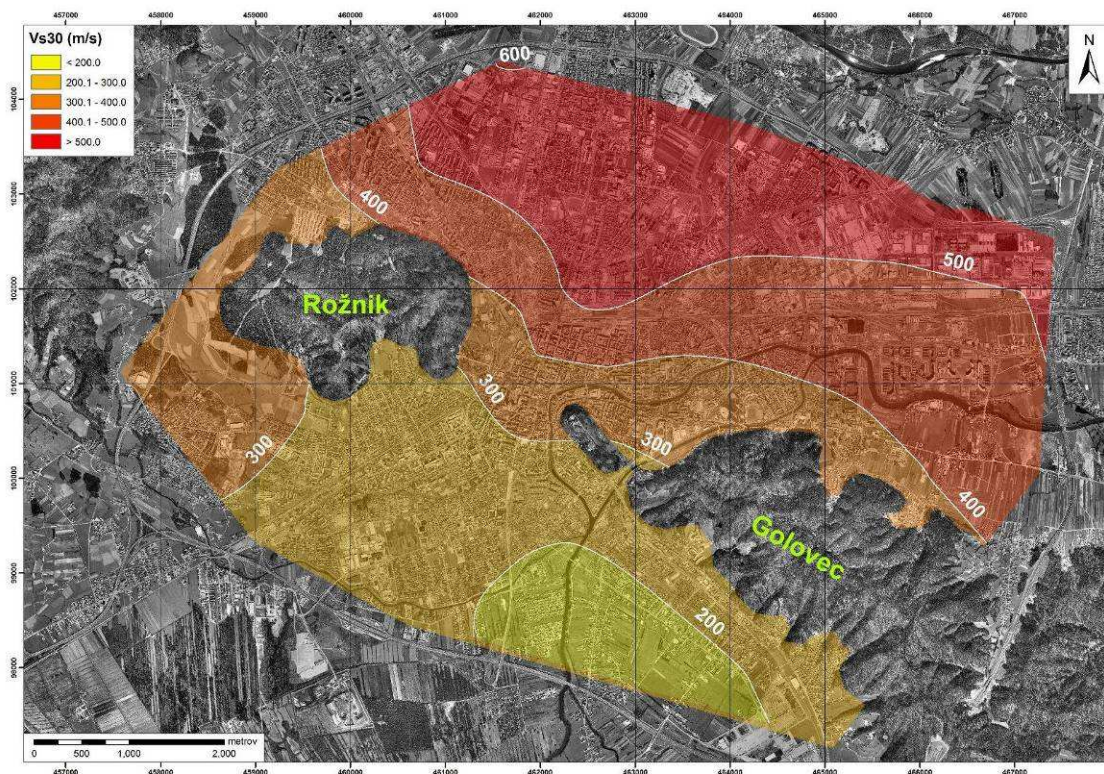
Slika 9 – Enako kot na Sliki 8, lokacija SS-03

Za večino rezultatov ploskovnih meritev je značilno, da fazna hitrost disperzne krivulje Rayleighjevi valov narašča z manjšanjem frekvence, kar kaže na zvezno večanje hitrosti strižnih valov z globino. Glede na pridobljene hitrostne profile lahko raziskovano območje razdelimo na dva dela, severni in južni del. V splošnem nižje seizmične hitrosti v južnem delu mesta ustrezajo mehkejšim kvartarnim sedimentom Barja, v severnem delu pa višje strižne hitrosti odražajo boljše seizmogeološke lastnosti pleistocenskih in holocenskih glaciofluvialnih sedimentov. Pomemben del te raziskave je določitev vrednosti parametra  $V_{s,30}$ , na podlagi katerega po EC8 klasificiramo tip tal (CEN, 2004). Vrednosti  $V_{s,30}$  v severnem delu Ljubljane znašajo od 332 do 605 m/s, s srednjo vrednostjo  $472,95 \pm 93,93$  m/s (Slika 10 levo). Za južni del Ljubljane so značilne nižje vrednosti, od 137 do 347 m/s, srednja vrednost pa znaša  $249,50 \pm 64,56$  m/s (Slika 10 desno).



Slika 10 – Diagram pridobljenih  $V_{s,30}$  vrednosti na posameznih merskih točkah severnega (levo) in južnega dela (desno) Ljubljane. Povprečne vrednosti so prikazane z debelejšo črtkano linijo, tanjše linije pa podajajo standardni odklon.

Na Sliki 11 je prikazana razporeditev vrednosti  $V_{s,30}$  na osnovi interpolacije merjenih točk. Primerjava geološke karte (Slika 2) in karte razporeditve  $V_{s,30}$  kaže na zelo dobro ujemanje. Nizke hitrosti v južnem delu ustrezajo mehkim jezerskim in rečnim kvartarnim sedimentom. Vrednosti  $V_{s,30}$  se nato povečujejo v smeri proti severu, kjer prevladuje bolj tog material (pleistocenski in holocenski glaciofluvialni sedimenti).



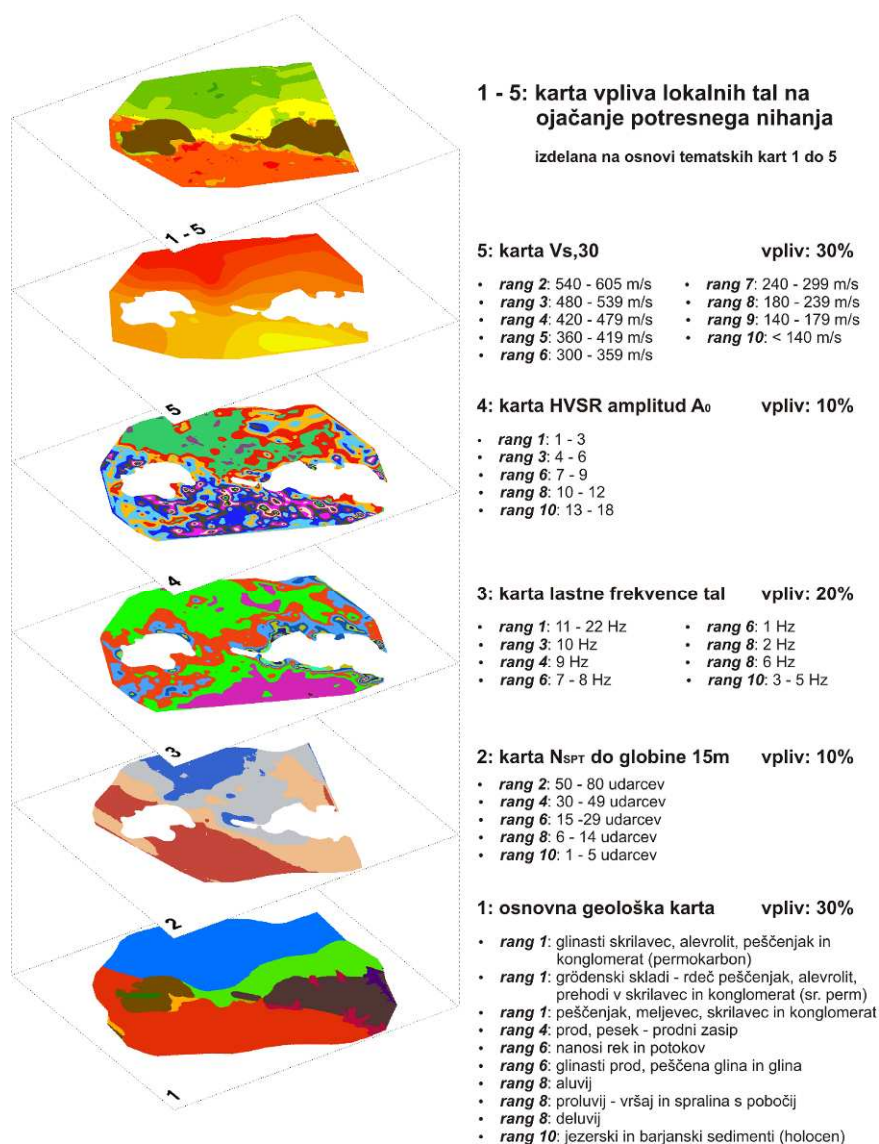
Slika 11 – Karta porazdelitve vrednosti  $V_{s,30}$  na območju Ljubljane

Nadalje smo s poglobljeno prostorsko analizo relativno ovrednotili vpliv lokalnih tal na ojačanje potresnega nihanja. Končni sloj temelji na petih tematskih podatkovnih slojih, ki opredeljujejo posamezne lokalne geološke in seizmične pogoje ter posledično vpliv na ojačanje potresnega nihanja. Vsakemu tematskemu sloju smo določili utež oz. delež vpliva glede na preostale tematske sloje. Znotraj vsakega posameznega sloja pa smo vrednostim prav tako določili uteži, oz. jih glede na tveganje rangirali od 1 do 10, kjer višji rang ustreza večjemu tveganju (npr. nižjim hitrostim strižnih valov bomo določili višji rang). Rangirane vrednosti smo določili glede na klasifikacijo EC8, kjer vrsta tal A pomeni rang 1, vrsta tal S pa rang 10. Pri končnem sloju, ki predstavlja vpliv lokalnih tal na ojačanje potresnega nihanja, smo upoštevali naslednje tematske sloje:

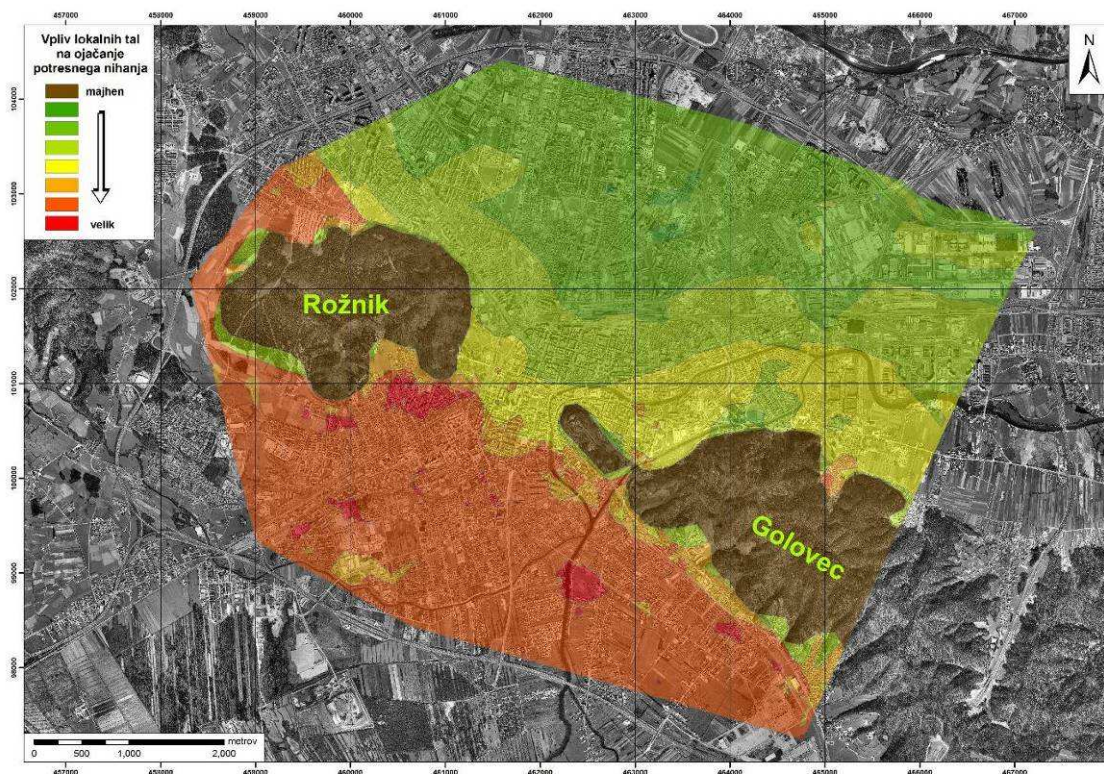
1. Sloj geološke zgradbe. Ker geološka zgradba predstavlja enega izmed osnovnih podatkov pri potresni mikrorajonizaciji, smo temu sloju določili 30 % vpliv.
2. Sloj povprečnih  $N_{SPT}$  vrednosti do globine 15 metrov. Nižje vrednosti  $N_{SPT}$  ustrezajo slabši vrsti tal po EC8 in imajo tako višji rang. Vpliv sloja je 10 %, saj so razpoložljive  $N_{SPT}$  vrednosti le do globine 15 metrov.
3. Sloj lastne frekvence tal. Rangiranje je narejeno z ozirom na resonančne frekvence stavb. Največji delež stavb v resonanci je v frekvenčnem območju 3 do 5 Hz (Gosar et al., 2010). Posledično smo temu območju določili najvišji rang. Ker je lastna frekvenca pomemben parameter za določitev ranljivosti stavb, smo ji pripisali 20 % vpliv.
4. Sloj amplitud HVSR vrhov, ki prikazuje lastno frekvenco tal. Amplituda HVSR vrha podaja grobo oceno ojačanja tal. Nižjim vrednostim zato ustreza nižji, višjim pa višji rang. Ker je vršna amplituda spektralnega razmerja mikrotremorjev le groba ocena spodnje meje ojačanja, smo temu sloju pripisali manjši vpliv (10 %).

5. Sloj hitrosti strižnih valov  $V_{s,30}$ . Prav povprečna strižna seizmična hitrost v vrhnjih 30 metrih pod površjem je eden izmed osnovnih parametrov, ki opredeljujejo vrsto tal oziroma faktor tal v standardu EC8. Zaradi navedenega je vpliv tega sloja višji ter znaša 30 %.

Vpliv posameznih slojev in rangirane vrednosti posameznih parametrov znotraj slojev so prikazani na Sliki 12, na Sliki 13 pa je prikazana končna karta vpliva lokalnih tal na ojačanje potresnega nihanja.



Slika 12 – Shematski prikaz kvalitativnega ovrednotenja posameznih tematskih slojev (levo); vrednosti končnega sloja so rezultat različnih deležev posameznih celic znotraj slojev. Delež vpliva glede na preostale tematske sloje in rangiranje vrednosti znotraj vsakega posameznega sloja (desno).



Slika 13 – Karta vpliva lokalnih tal na ojačanje potresnega nihanja na območju Ljubljane

### Zaključek

Raziskave z metodo mikrotremorjev na prostem površju na območju Ljubljane so podale dobre podatke o lastni frekvenci nevezanih sedimentov, odloženih na skalni podlagi. Pri tem se je potrdila prednost uporabljene metode, ki za oceno lastne frekvence ne zahteva poznavanja debeline sedimentov in hitrosti strižnega valovanja v njih. Če bi želeli v podobno gosti mreži točk (več kot tisoč meritev) uporabiti za oceno lastne frekvence numerično modeliranje, bi to zahtevalo zelo obsežne, dolgotrajne in drage geofizikalne raziskave ter raziskovalno vrtnanje.

V sklopu opravljenih raziskav smo z analizami ploskovnih meritev pridobili tudi vrednosti hitrosti strižnega valovanja. Čeprav morda  $V_{s,30}$  ni najprimernejši parameter za opredelitev potresnega odziva tal, je trenutno sestavni del številnih nacionalnih predpisov o potresno odporni gradnji. Kljub vsemu je ugotovljena prostorska porazdelitev  $V_{s,30}$  na območju Ljubljane pomembna dopolnitev predhodne mikrorajonizacije (Zupančič et al., 2004), novi podatki pa v primerjavi z njo kažejo na celotnem raziskanem območju na boljše seizmogeološke pogoje, na splošno za eno stopnjo višjo vrsto tal po klasifikaciji EC8. Karta porazdelitve vrednosti  $V_{s,30}$  (Slika 11), karta relativnega vpliva lokalnih tal na ojačanje potresnega nihanja (Slika 13) in rezultati predhodne mikrorajonizacije MOL se bistveno ne razlikujejo. Vse tri klasifikacije podajajo najboljše pogoje za celoten severni in severovzhodni del Ljubljane. Pogoji se nato slabšajo v smeri proti jugu. Severozahodni del Ljubljane, t. j. območje Kosez in območje, ki se razteza po zahodni strani Rožnika vse do Brda, kategoriziramo z vidika potresne nevarnosti za slabše. To ugotovitev podpira znana geološka zgradba tega območja, kjer so prisotni barjanski in jezerski sedimenti, ki se v tem delu razširjajo najseverneje. Svojevrsten seizmogeološki prostor je celotno območje južno

od Golovca in Rožnika, za katerega so značilni barjanski in jezerski sedimenti spremenljive debeline od 0 metrov, kjer izdanja kamninska podlaga, do preko 100 metrov. Glede na izdelano karto relativnega vpliva lokalnih tal na ojačanje potresnega nihanja je to območje klasificirano kot območje, kjer je pričakovati največje ojačanje potresnega nihanja zaradi lokalne geološke zgradbe.

Opravljenе raziskave prispevajo k določitvi ustreznih parametrov ojačanja potresnega nihanja tal na območju Ljubljane, ki jih predvideva standard za potresno odporno gradnjo EC8, dodatno pa so izdelane karte lastne frekvence nihanja tal, amplitude HVSR krivulj in karta vrednosti  $V_{s,30}$  pomemben doprinos k poznavanju potresne nevarnosti ter ogroženosti mesta Ljubljane kot najbolj urbaniziranega območja Slovenije.

## Literatura

- Aki, K. 1957.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 35, str. 415–456.
- Arai, H., Tokimatsu, K. 2004: *S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum*, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 94, no. 1, str. 53–63.
- Asten, M. W. 2001: The Spatial Auto-Correlation Method for Phase Velocity of Microseisms – Another Method for Characterisation of Sedimentary Overburden, *Earthquake Codes in the Real World*, Australian Earthquake Engineering Society, Proceedings of the 2001 Conference, Canberra, Paper 28.
- Baliva, F. 2006: *Profilo di velocità delle onde S dallo studio dei microtremori* [v italijanščini], doktorsko delo, Università degli Studi di Siena, 182 str.
- Bard, P.-Y. 1999: *Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?*, *The Effects of Surface Geology on seismic motion*, Balkema, Rotterdam, str. 1251–1279.
- Ben-Menahem, A., Singh, S. J. 2000: *Seismic waves and sources*, 2<sup>nd</sup> Edition, Dover Publications, Inc. Mineola, New York, 1102 str.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P. Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J., Fäh, D. 2006: *H/V ratio: a tool for site effects evaluation, Results from 1D noise simulations*, *Geophysical Journal International*, vol. 167, no. 2, str. 827–837.
- CEN 2004: Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization.
- Gosar, A., Rošer, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P. 2010: Microtremor study of site effects and soil-structure resonance in the city of Ljubljana (central Slovenia), *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 571–592.
- Grad, K., Ferjančič, L. 1974: Osnovna geološka karta 1: 100.000 – list Kranj. Geološki zavod Ljubljana.
- Lai, C. G., Wilmanski, K. 2005: *Surface Waves in Geomechanics: direct and inverse modelling for soils and rocks*, Springer, 385 str.
- Lapajne, J., Šket-Motnikar, B. in Zupančič, P. 2001: *Karta projektnege pospeška tal Slovenije, Potresi v letu 1999*, Ljubljana, str. 40–49.
- Louie, J. N. 2001: *Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays*, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 91, no. 2, 347–364.
- Mencej, Z. 1989: *Prodni zasipi pod jezerskimi sedimenti Ljubljanskega barja*, *Geologija*, 31–32, Ljubljana, str. 517–553
- Micromed: Tromino 2005: Portable ultra-light seismic noise acquisition system, User's Manual, Treviso, 51 str.
- Micromed 2006: Grilla ver. 2.2, spectral and HVSR analysis, User's manual, Treviso, 47 str.
- Micromed 2007: An introduction to the H/V inversion for stratigraphic purposes, Treviso, 31 str.
- Micromed 2008: An introduction to the phase velocity spectra module in Grilla, Treviso, 16 str.
- Nakamura, Y. 2000: Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications, 12WCEE, Auckland.

- Ohori, M., Nobata, A., Wakamatsu, K. 2002: *A Comparison of ESAC and FK Methods of Estimating Phase Velocity Using Arbitrarily Shaped Microtremor Arrays*, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 92, no. 6, 2323–2332.
- Okada, H. 2003: *The Microtremor Survey Method*, Geophysical monograph series, no. 12, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 135 str.
- Premru, U. 1982: Osnovna geološka karta 1: 100.000 – list Ljubljana. Geološki zavod Ljubljana.
- Ribarič, V. 1982: *Seizmičnost Slovenije, katalog potresov 792 – 1981*, Seizmološki zavod SR Slovenije, 649 str.
- Rošar, J., Gosar, A. 2010: Determination of Vs30 for seismic ground classification in the Ljubljana area, Slovenia, *Acta Geotechnica Slovenica*, vol. 7, 61-76.
- SESAME, 2004: Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation, [http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/Del-D23 HV\\_User\\_Guidelines.pdf](http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Delivrables/Del-D23 HV_User_Guidelines.pdf).
- Thorson, J. R., Claerbout, J. F. 1985: *Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion*, *Geophysics*, 50, 2727-41.
- Zupančič, P., Šket-Motnikar, B., Gosar, A., Prosen, T. 2004: *Karta potresne mikrorajonizacije Mestne občine Ljubljana, Potresi v letu 2002:32-54*.





# Vpliv spodnje vode na izračun toka reke Save čez pregrado

Anja Horvat, Andrej Vidmar, Maja Koprivšek, Mitja Brilly\*

## Povzetek

Za račun pretoka reke Save čez prelivna polja na pregradi pri NEK je v rabi pretočna krivulja, ki je bila izvedena na Vodnogospodarskem inštitutu leta 1980. Pretočna krivulja določa razmerje med gladino vode (m) in pretokom ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Račun, s katerim je bila dobljena pretočna krivulja, ne upošteva gladine spodnje vode, ki zavira pretok in tako daje previsoke vrednosti. Zbrali smo različne metode računa pretoka vode čez prelivna polja pri vplivu spodnje vode in jih med seboj primerjali. Rezultati potrjujejo predpostavko, da so pretoki, dobljeni po metodi v rabi, precenjeni in da so dejanski pretoki manjši.

## Uvod

Prvotni koncept meritev pretokov (leta 1975) je predvideval, da se za meritev skupnih količin reke Save uporabi nova avtomatična vodomerna postaja v Krškem, medtem ko se za merjenje količin, odvzetih za potrebe hlajenja, uporabi školjčni diagram na vtočnem objektu. Na podlagi obsežnih modelnih raziskav je Vodogradbeni laboratorij prišel do dokaza, da se lahko uporabi naslednji koncept meritve pretokov: celotni dotok Save dobimo z vsoto pretokov vode, ki teče čez jez, in količino tople vode, ki teče čez betonski preliv v iztočni objekt (VGI, 1980).

S tem naj bi bilo zadoščeno pogojem za odzvem vode za hlajenje, ki določajo, da sme biti temperatura vode v točki mešanja pod elektrarno zaradi iztoka hladilne vode največ za  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  višja kot temperatura vode nad elektrarno, ne sme pa preseči  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## Metodologija

V prvem delu so predstavljene meritve, ki jih izvaja Nuklearna elektrarna Krško v sklopu monitoringa, nato pa sledi še preračun pretoka čez pregrado iz dobljenih meritev po metodah različnih avtorjev in primerjava.

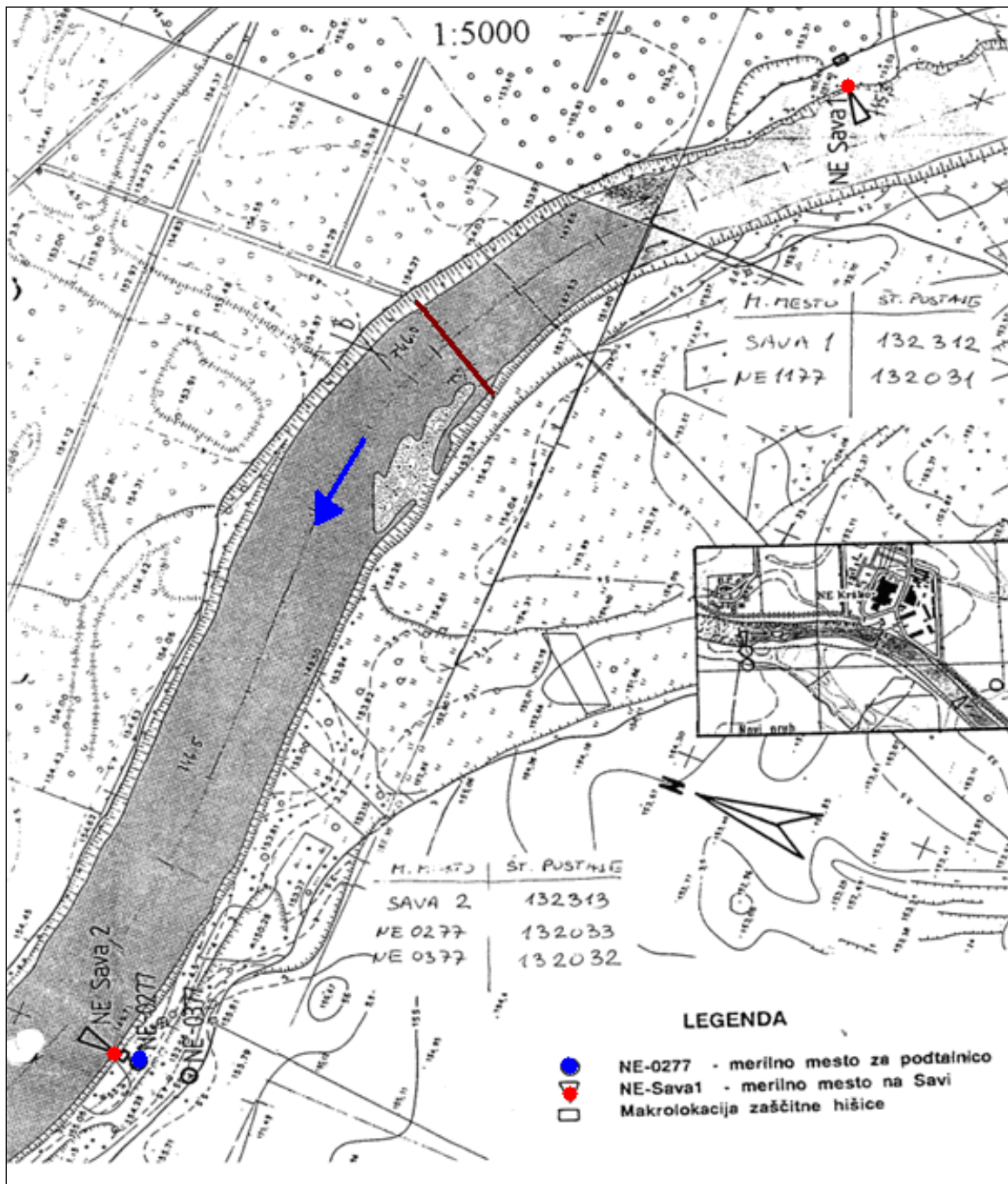
## Meritve

Vodnogospodarsko dovoljenje predpisuje NEK nenehno merjenje temperatur, pretokov in koncentracije kisika v savski vodi. Meritve se izvajajo s pomočjo avtomatskega merilnega sistema. NEK izvaja vse predpisane meritve temperatur, pretokov in koncentracije kisika v savski vodi ter mesečne meritve biološke in kemijske porabe kisika.

NEK opravlja tudi nadzor podtalnice, in sicer neprekinjene meritve gladine in temperature v treh vrtinah in na dveh lokacijah na reki Savi ter tedenske meritve v desetih vrtinah Krško–brežiškega polja (NEK, 2010) (Slika 1).

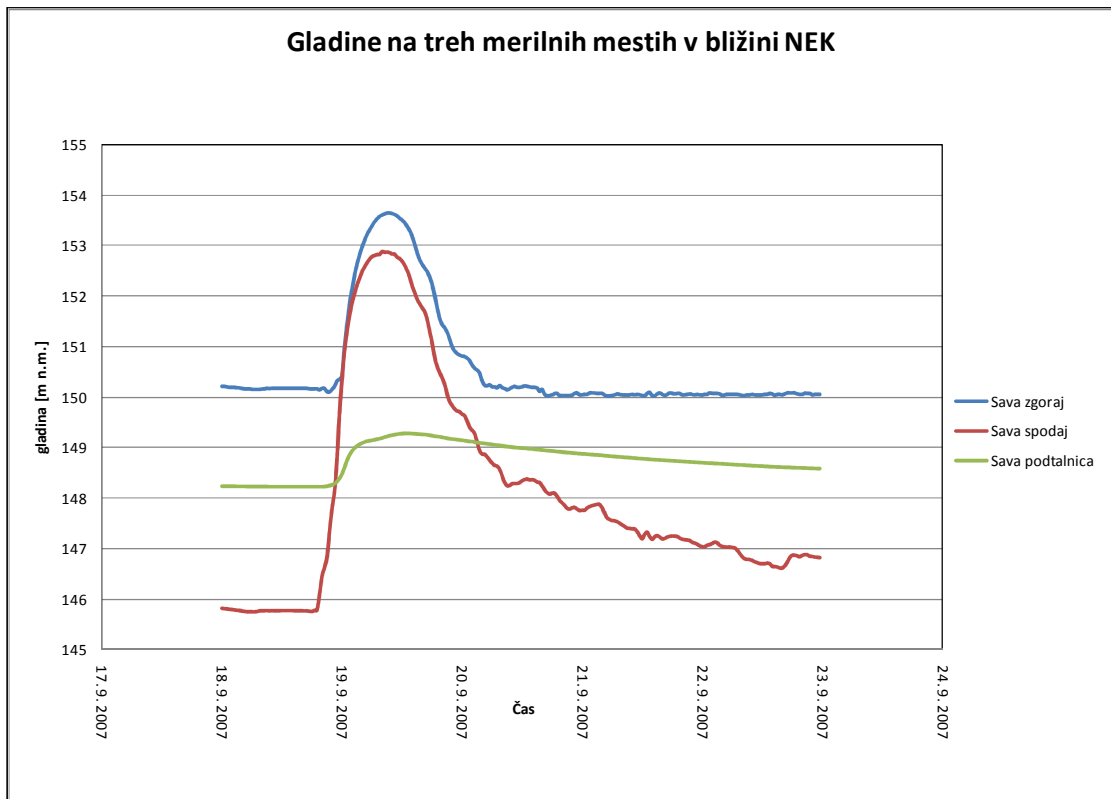
---

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



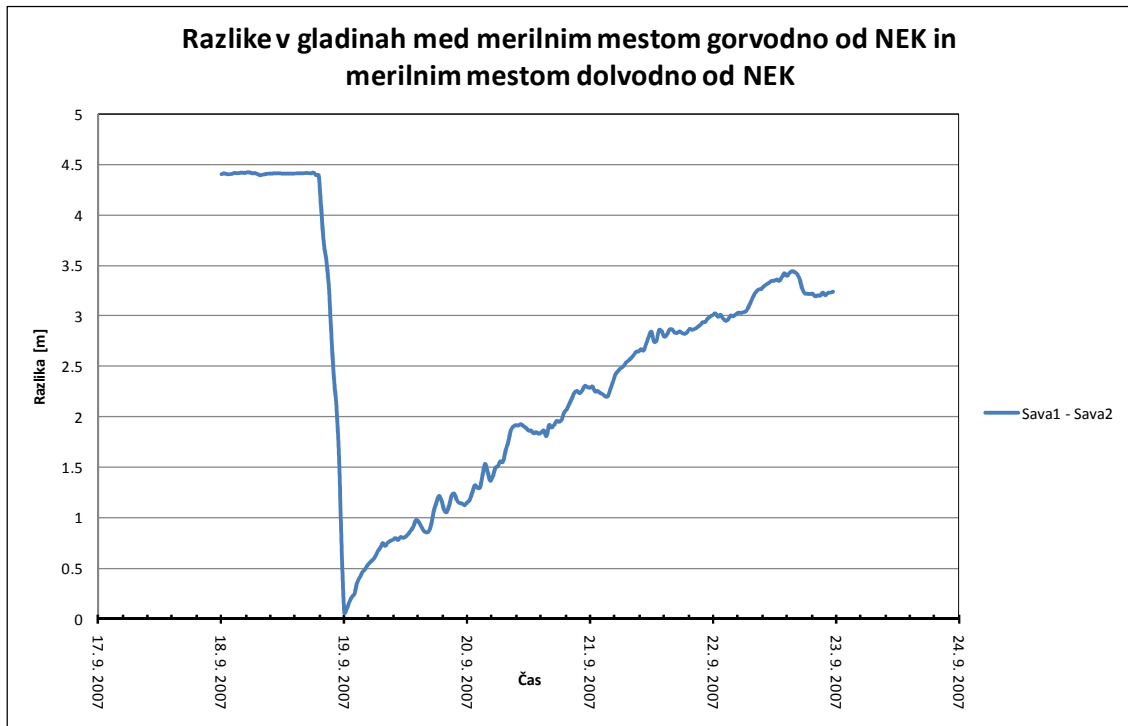
Slika 1 - Položaj merilnih mest za monitoring

Na sliki zgoraj so prikazane lokacije merilnih mest, na katerih se meri gladina vode. Na lokacijah gorvodno in dolvodno od pregrade se meri gladina površinske vode, medtem ko se dolvodno, na postaji NE 0277, meri še gladina podtalnice. Na Sliki 2 so prikazani podatki iz vseh treh merilnih mest v času poplavnega vala septembra 2007.



Slika 2 - Gladine na treh merilnih mestih v bližini pregrade

Na sliki zgoraj je razlika v gladinah nad in pod pregrado očitna, prav tako je na vseh treh mestih dobro viden tudi poplavni val. Na Sliki 3 spodaj pa so te razlike izračunane in prikazane.

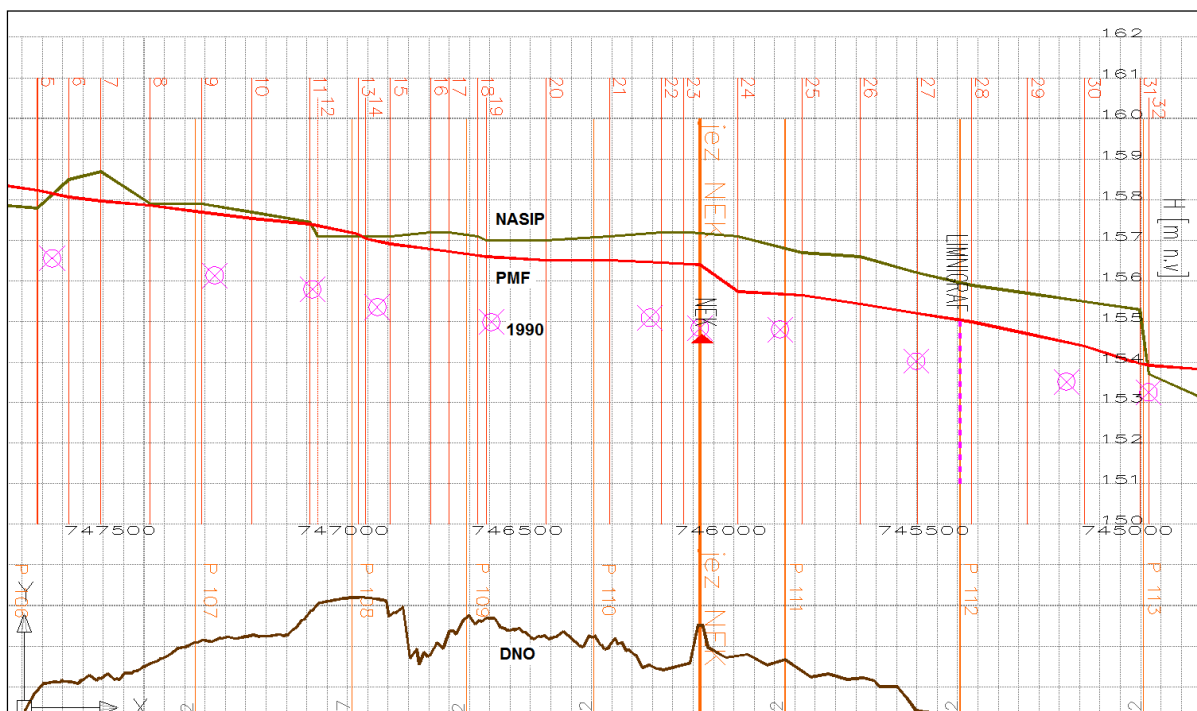


Slika 3 - Razlike v merjenih gladinah gorvodno in dolvodno od pregrade

Na Sliki 3, kjer so prikazane razlike med višino zgornje in spodnje vode, vidimo, da v določenem trenutku te razlike ni, kar pomeni da pride do pojava potopljenega preliva. To se vidi tudi iz podatkov v Preglednici 1.

Preglednica 1 - Kote gladin nad in pod pregrado

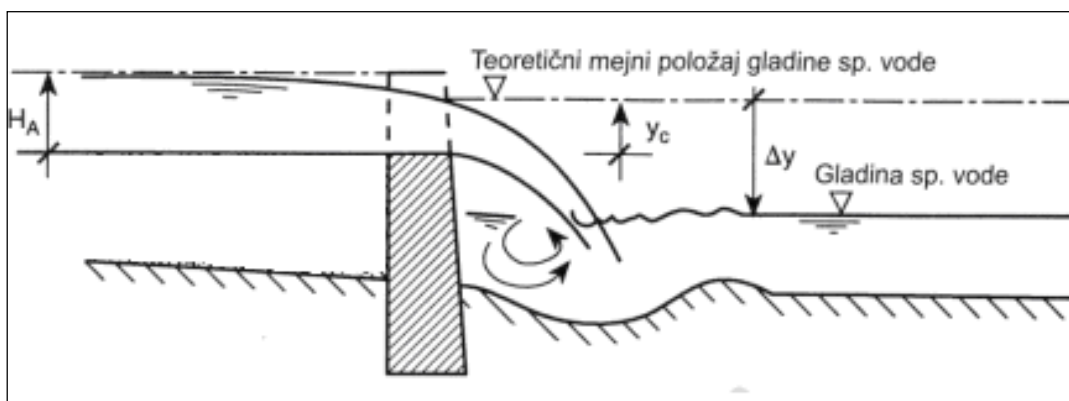
	Nad pregrado, profil 23	Pod pregrado, profil 24
Meritve maksimalnih gladin 1990	155.1	154.8



Grafični prikaz k preglednici 1

Že v Pravilniku za ročno upravljanje segmentnih zapornic na jezu NE Krško leta 1980 (VGI) je bilo kot opomba zapisano, da pri pretokih nad 2000 m<sup>3</sup>/s pričinja spodnja voda zajezevati odtok preko preliva iztočnega objekta, s čimer dana konsumpcijska krivulja ne velja več.

Za potopljeni preliv je značilno, da voda ne more preiti iz mirnega v deroči tok, kar dosežemo, če gladina spodnje vode ni višja od kritične globine na prelivni kroni  $\Delta$ pregrade. Kadar je omenjeni pogoj ravno izpolnjen, je gladina spodnje vode višje od prelivne krone. Takrat govorimo o potopljenem prelivu. Pogoji za pretvorbo energije so takrat posebno neugodni (Mikoš, 2008) (Slika 4).



Slika 4 - Pogoj za nepotopljenost prelivanja preko pregrade

V primeru potopljenega preliva pride do vpliva spodnje vode, ki zavira pretočnost, zaradi česar je potreben drugačen izračun pretoka kot za nepotopljene prelive. V tuji literaturi je več primerov izračunov pretoka čez potopljene prelive, ki izhajajo iz pretoka, izračunanega za nepotopljeni preliv z upoštevanjem gladin zgornje in spodnje vode.

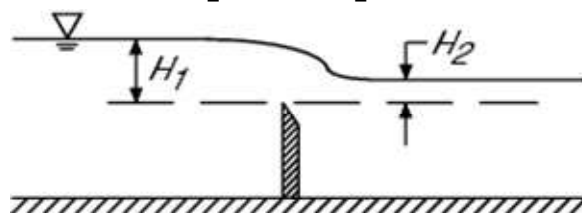
### Račun pretoka čez potopljen preliv

Pri izračunih smo uporabili podatke o pretoku septembra leta 2007 in novembra 1990. Spodnjo vodo septembra 2007 smo izračunali s pomočjo v nadaljevanju predstavljenih enačb, spodnjo vodo novembra pa smo izračunali s pomočjo enačbe (1).

Iz odčitanih podatkov gladin leta 1990 v Preglednici 1 smo odčitali še pretok nad pregrado iz priložene krivulje Q–H (Priloga 1). Z uporabo odčitane pretoka smo izračunali pretok spodnje vode.

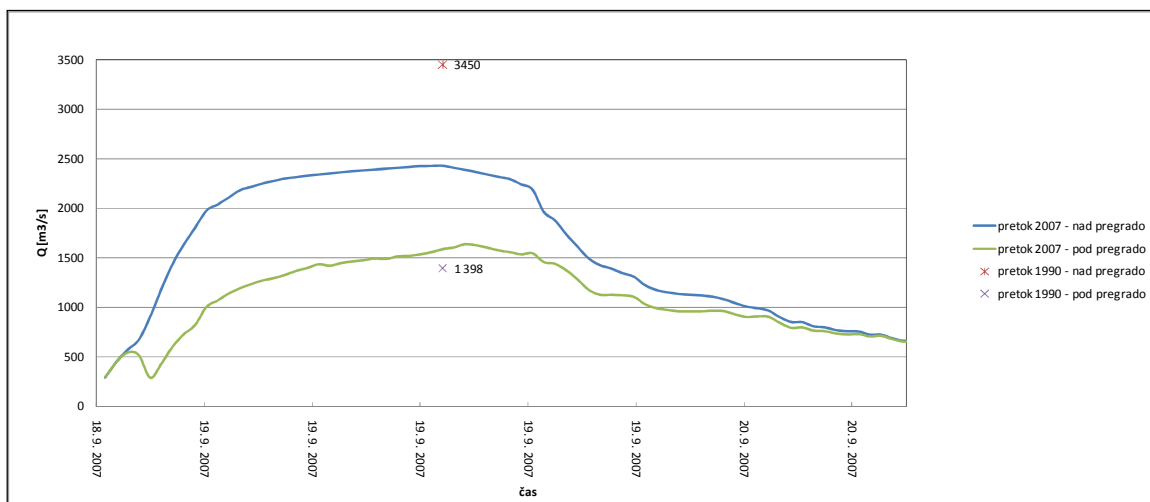
1. Najpogostejša enačba uporabljena za račun pretoka pri potopljenem prelivu je enačba (1) (Villemonte, 1947) (Brater, 1976). Pri tej enačbi se upoštevata gladini zgornje in spodnje vode (Slika 5).

$$Q = Q_1 \left[ 1 - \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^n \right]^{0.385} \quad (1)$$



Slika 5 - Skica s spremenljivkami k enačbi (1)

Na Sliki 6 je prikazan merjen pretok 2007 (nad pregrado) in 1990 v primerjavi z izračunanim po enačbi (1). Maksimalni izračunani pretok pod pregrado za leto 1990 je za skoraj 40 % manjši od največjega merjenega pretoka; izračunani pretok pod pregrado leta 1990 je za 60 % nižji od pretoka nad pregrado.



Slika 6 - merjen pretok v primerjavi z izračunanim po enačbi (1)

2. Enačba (2) (Hankó, 1984) upošteva poleg višine zgornje in spodnje vode tudi hitrosti vode in širino struge. Enačba vsebuje koeficient  $Q (= \mu)$ , ki se ga izračuna kot  $m_s \cdot \sigma$ . (enačba (3) \* enačba (4)).

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left[ \left( h + \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} - \left( \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \quad (2)$$

$Q$  (m<sup>3</sup>/s) ... pretok

$b$  (m) ... širina struge

$g = 9.81$  (m/s<sup>2</sup>)

$h$  (m) ... višina (merjena 5 m gorvodno od pregrade)

$v = Q/b$  ( $M + h$ ) (m/s) ... srednja hitrost toka

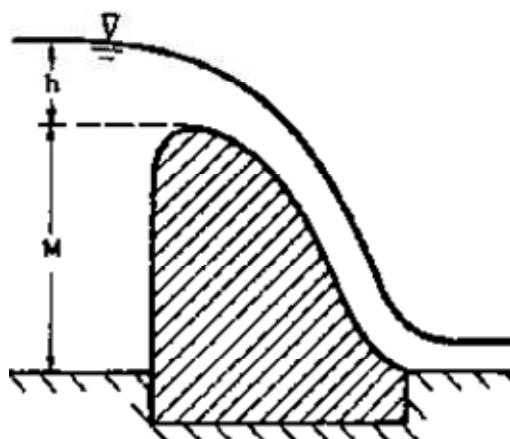
$M$  (m) ... višina rešetk nad dnom zgornje vode

$m$  ... brezdimenzijski koeficient (vpliv preliva)

$e$  ... višina spodnje vode

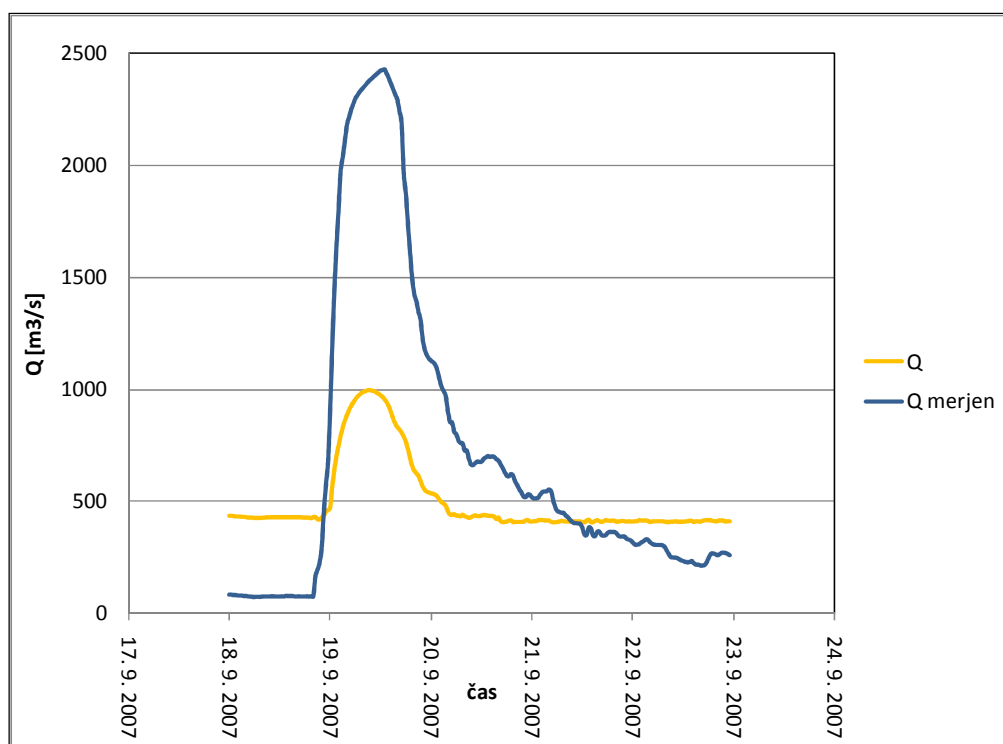
$$m_s = \left( 0.6075 + \frac{0.0045}{h} \right) \left[ 1 + 0.55 \left( \frac{h}{M + e + h} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\sigma = 1.05 * \left( 0.95 + 0.2 \cdot \frac{e}{M} \sqrt[3]{\frac{h}{e + h}} \right) \quad (4)$$



Slika 7 - Skica k enačbama (3) in (4)

Na Sliki 8 so rezultati izračuna  $Q$  za potopljeni preliv s pomočjo enačb (2), (3) in (4). Pretok, izračunan po enačbi (4) je za kar 60 % manjši od pretoka, izračunanega po enačbi za nepotopljene prelive.



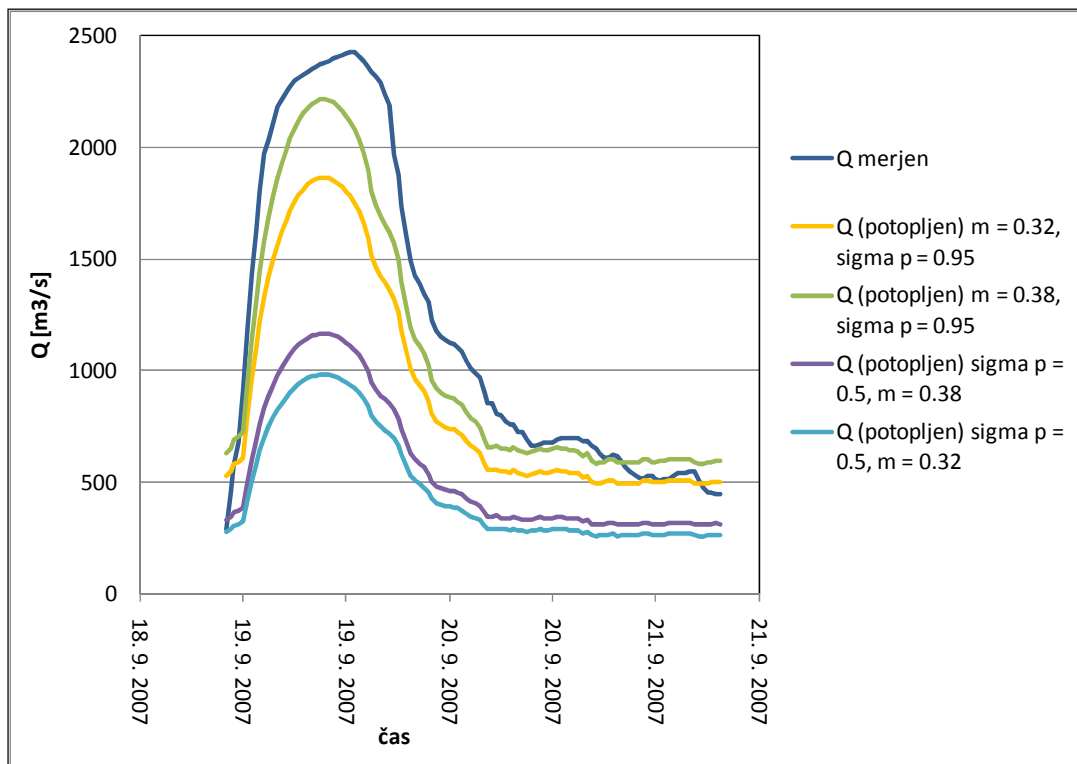
Slika 8 - merjen pretok v primerjavi z izračunanim po enačbi (2)

- Enačba (5) (Agroskin, 1964) upošteva koeficienta potopljenosti in pretoka. Na koeficient pretoka vpliva oblika vhoda na pregrado. Določene so tudi zgornje in spodnje meje obeh koeficientov v enačbi (5).

$$Q = \sigma_p * m * b * \sqrt{(2 * g)} * H^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

$\sigma_p$  ... koeficient potopljenosti = 0.5:0.95  
 $m$  ... koeficient pretoka (vpliv oblike roba preliva) = 0.32:0.38

Na Sliki 9 so prikazani rezultati izračuna pretoka po enačbi (5). Pri izračunu je upoštevanih več variant, ki prikažejo mero vpliva na pretok čez pregrado.



Slika 9 - merjen pretok v primerjavi z izračunanim po enačbi (5)

Na Sliki 9 so prikazane primerjave izračunov z različnimi koeficienti, ki določajo vpliv potopljenosti ( $\sigma_p$ ) in vpliv oblike roba preliva ( $m$ ). Iz krivulj se vidi, da bolj kot je preliv potopljen in bolj kot je rob oster, večji je vpliv na izračun pretoka in posledično je izračunani pretok manjši. Pri ekstremnih vplivih obeh koeficientov je pretok manjši za kar 60 %.

- Enačbi (6) in (7) (Nikolov, 1978) zajemata koeficient hitrosti, koeficient potopljenosti, koeficient pretoka ter razliko v višinah med zgornjo in spodnjo vodo. V enačbi (6) je prisoten koeficient hitrosti, medtem ko je v enačbi (7) prisoten koeficient potopljenosti (enačba (8)) in oblike preliva.

$$Q(1) = \varphi * b * h * \sqrt{2g} * (H_0 - h) \quad (6)$$

Enačbo (6) lahko preoblikujemo in zapišemo kot enačbo (7):

$$Q(2) = \sigma_n * m_0 * \sqrt{2g} * (H_0)^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

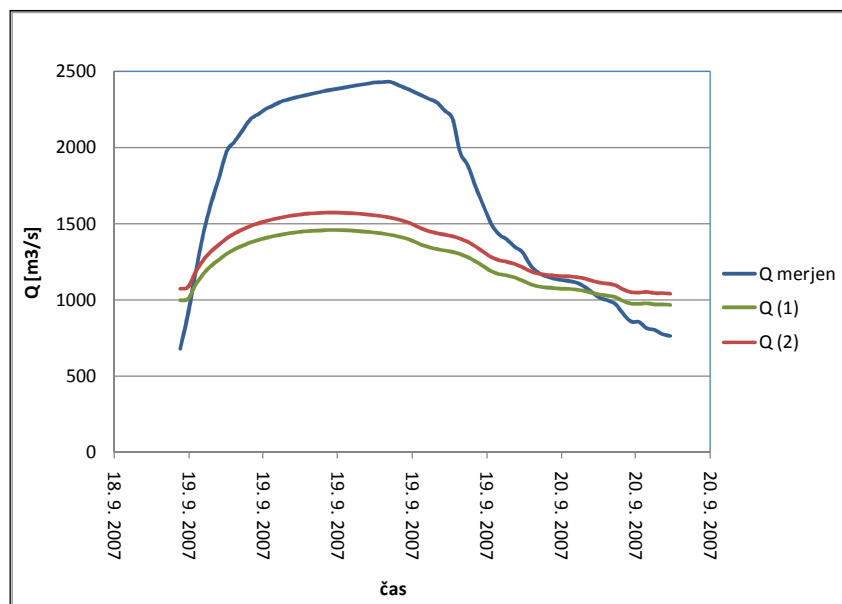
$\varphi$  ... koeficient hitrosti



$\sigma_n$  ... koeficient potopljenosti  
 $h$  ... višina vode nad pregrado  
 $H_0$  ... razlika med gladino zgornje in spodnje vode  
 $m_0$  ... koeficient pretoka (vpliv oblike roba preliva): 0.3-0.372 ( $m=0.372$ )

$$\sigma_n = 2.6 * \left( \frac{h}{H_0} \right) * \sqrt{1 - \frac{h}{H_0}} \quad (8)$$

Na Sliki 10 so prikazani rezultati izračuna enačb (7) in (8). V enačbi (7) je vzet koeficient hitrosti  $\varphi = 0.99$ , koeficient pretoka je v enačbi (8) 0.372. Pri manjšem koeficientu pretoka ( $m = 0.3$ ) je izračunani pretok manjši od izračuna Q 1 za cca. 15 %.

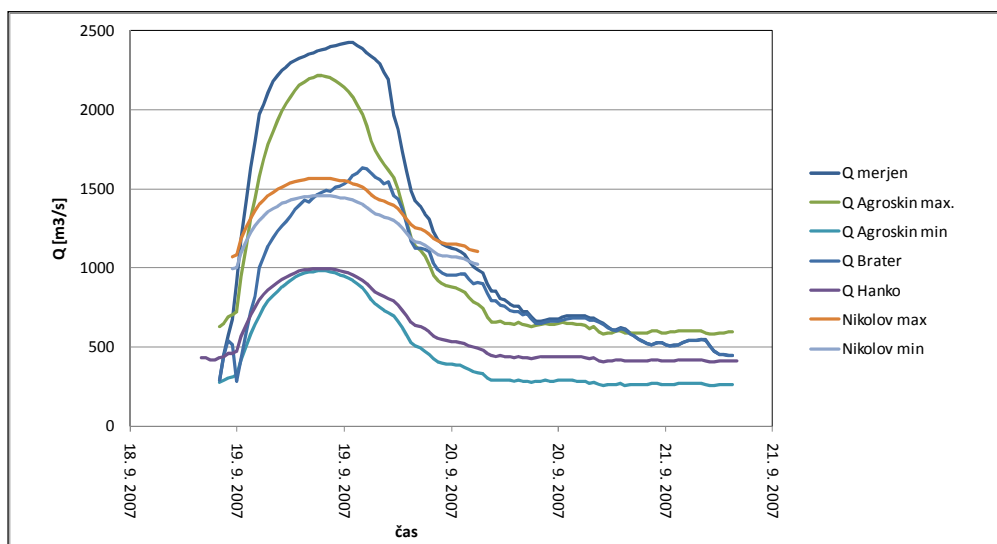


Slika 10 - merjen pretok v primerjavi z izračunanim po enačbi (6) in (7)

Pretoki izračunani za potopljeni preliv po enačbah (6) in (7) so za 40 % manjši od pretokov izračunanih z enačbo za nepotopljeni preliv.

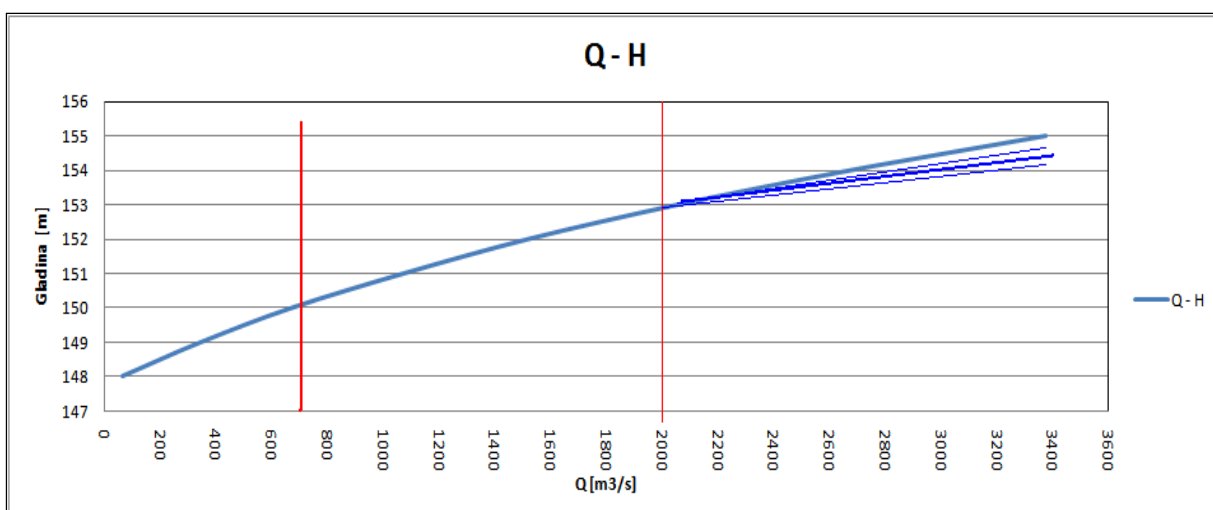
## Rezultati

Zbrani rezultati različnih izračunov pretoka za potopljeni preliv kažejo na 20-60 % manjši pretok pri potopljenem prelivu kot pri nepotopljenem prelivu (Slika 11). Na izračun pretoka najbolj vplivajo koeficienti vpliva oblike preliva – vpliv ostrega roba in potopljenost preliva.



Slika 11 - Zbrani rezultati računa pretoka za potopljeni preliv

Konsumpcijska krivulja, podana s strani VGI 1981, naj bi dala prave vrednosti do pretoka 2000 m<sup>3</sup>/s, kar je zapisano že v Poročilu VGI, 1981.



Slika 12 - Konsumpcijska krivulja s popravki

Glede na to, da pretoki nad 2000 m<sup>3</sup>/s dajejo nižje gladine, bi morali konsumpcijsko krivuljo popraviti, tako da bi bila nad 2000 m<sup>3</sup>/s bolj položna. V primeru gladine vode 19. 9. 2007 pa je bil preliv potopljen že pri precej nižjih pretokih, torej bi bilo potrebno popraviti konsumpcijsko krivuljo že od vrednosti pretoka 700 m<sup>3</sup>/s dalje (Slika 12).

### Zaključki

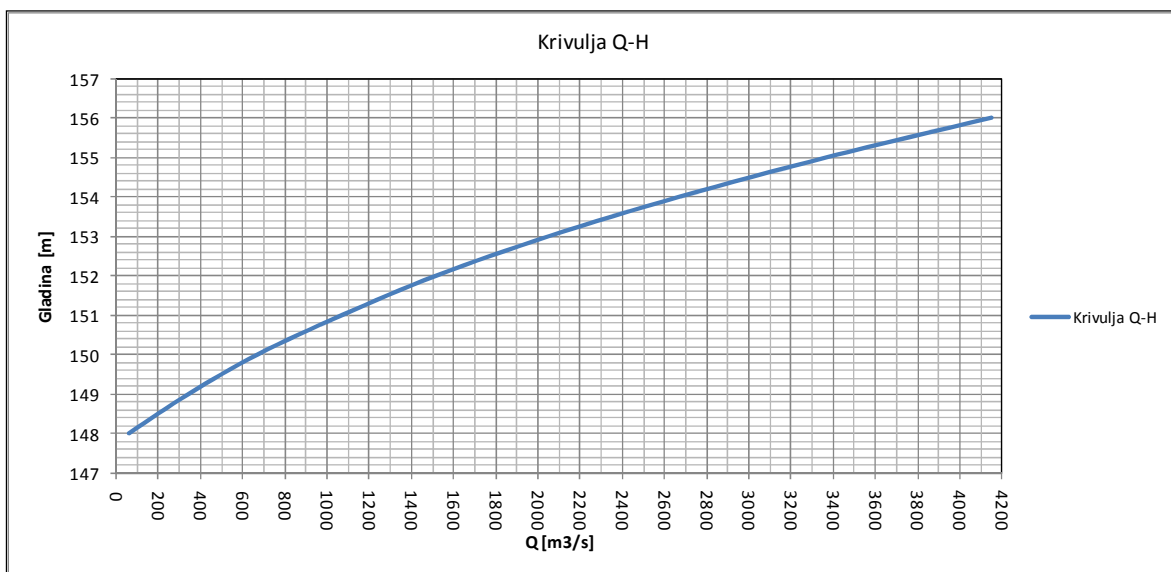
Glede na meritve gladin na NEK smo zaključili, da je preliv pri gladini spodnje vode višji od 150.4 m n. m. potopljen. Zato smo iz različnih virov izračunali pretok potopljenega

preliva, ki je po različnih enačbah do 60 % manjši kot pri izračunu nepotopljenega preliva. Z uporabo različnih koeficientov v enačbah smo ugotovili, da na rezultat poleg razlike gladin najbolj vpliva oblika preliva. Glede na to, da se že za pretoke nad 700 m<sup>3</sup>/s odčitavajo napačni pretoki, bi bilo v prihodnje potrebno upoštevati vpliv spodnje vode pri izračunu pretokov.

## Literatura

- Agroskin I.I., e tal, 1964. Hidraulika. Tehnička knjiga, Zagreb.
- Brater, 1976. <http://docs.bentley.com/en/HMFlowMaster/FlowMasterHelp-06-49.html>
- Hankó, 1984. Aquaculture Development And Coordination Programme - Lectures presented at the ADCP Inter-regional Training Course in Inland Aquaculture Engineering, Research Centre for Water resources Development, Budapest, Hungary.
- <http://www.fao.org/docrep/x5744e/x5744e04.htm#4.%20flow%20over%20weirs>
- NEK, 2010. Uradna spletna stran Nuklearne elektrarne Krško, Krško. [http://www.nek.si/sl/okolje/vplivi\\_nek\\_na\\_okolje/ostali\\_vplivi/](http://www.nek.si/sl/okolje/vplivi_nek_na_okolje/ostali_vplivi/) NEK, 2010
- Nikolov et al, 1964. Hydraulic calculation of a submerged broad chesred weir. *Gidrotekhnicheskoe Stroltel'stvo*, No. 6, pp. 54-56, June, 1978.
- Mikoš, Osnove hudournišva, skripta. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2008.
- Villemonte, 1947. Submerged\_weir\_discharge\_studies. *Engineering news record*. Pages: 866-869.
- Vodnogospodarski inštitut – vodogradbeni laboratorij, 1981. Pravilnik za ročno upravljanje zapornic na jezu NE Krško. Ljubljana, 1980.

# PRILOGA 1: Krivulja Q–H



# Prostorska porazdelitev erozivnosti padavin v Sloveniji

Sašo Petan\*

## Povzetek

V podporo kvantifikaciji erozijskih procesov oz. napovedovanju izgube tal v Sloveniji smo določili parametre regresijskih enačb za račun kinetične energije padavin, ki je izhodišče za določitev podnebnega dejavnika erozije tal oz. erozivnosti padavin v okviru metodologije (R)USLE. Pri tem smo izvajali meritve porazdelitve padavinskih delcev in intenzitete padavin na treh podnebnih območjih Slovenije. Končni cilj raziskave smo dosegli z izdelavo karte erozivnosti padavin Slovenije na podlagi določenih regresijskih enačb za račun kinetične energije padavin in dolgoletnih nizov podatkov o intenzitetah padavin, ki jih zbira Agencija Republike Slovenije za okolje na pluviografskih merilnih mestih po Sloveniji.

## Uvod

Tla so zelo pomemben naravni vir. Njihova najpomembnejša lastnost je rodovitnost. Ta omogoča kopenskim bitjem pridobivanje življenjsko potrebnih snovi in energije iz tal. Rodovitnost in druge fizikalne, kemične in biološke lastnosti tal ogroža erozijo tal - govorimo o mehanski degradaciji tal zaradi delovanja naravnih sil (gravitacija, veter in padavine) in človekovih dejavnosti (npr. gradbeništvo, rudarstvo, turizem). Talni delci, ki so na zemeljskem površju, so nenehno podvrženi erozivnim silam. V naravni krajini z gostim vegetacijskim pokrovom, kot so gozdovi ali travniki, so tla pred erozijo dobro zaščitena. Človek s svojimi dejavnostmi spreminja naravno krajino že tisočletja. Na obdelovalnih površinah vegetacijo praviloma odstranimo, pridelke pospravimo, površine pa ostanejo gole in izpostavljene. Naravni erozijski procesi se tako pričnejo odvijati pospešeno. Govorimo o antropogeni eroziji, katere škodljive posledice se poznajo tudi na nekmetijskih površinah oz. ekosistemih. Erozijski nanos s kmetijskih površin vsebuje velike količine hranil in pesticidov. Dotok teh snovi v vodotoke, jezera in morja vpliva na kakovost voda in lahko povzroči porušenje biološkega ravnovesja z nepredvidljivimi posledicami. Zato ima pravilna ocena erozijskih procesov izjemen pomen pri preprečevanju in blaženju posledic erozije tal oz. degradacij okolja.

Poznavanje podnebnih oz. hidroloških razmer, oblikovanosti površja, fizikalnih lastnosti tal, pokrovnosti tal in človeških dejavnikov (Mikoš in Zupanc, 2000) so osnova za razumevanje erozijskih procesov. Eden najbolj pomembnih dejavnikov erozije tal je erozivnost padavin in površinskega odtoka (Mannaerts in Gabriels, 2000) in tudi glavnino erozije tal v Evropi povzroča voda (UNEP, 2002). Erozivnost padavin in površinskega odtoka je podnebni dejavnik, ki je najbolj natančno opredeljen v okviru široko uporabljene metodologije za izračun sproščanja tal USLE oz. RUSLE. Univerzalno enačbo izgube tal USLE (Universal Soil Loss Equation) sta razvila in podrobno opisala Wischmeier in Smith (1965, 1978) na podlagi dolgoletnih raziskav v ZDA. Osnovna ideja je bila razviti enostavno metodo za napovedovanje najbolj verjetnega povprečja letne izgube tal za potrebe gospodarjenja s kmetijskimi zemljišči. Renard in sod. (1997) so metodologijo USLE nekoliko osvežili in ji nadeli ime RUSLE (Revised USLE). Erozivnost padavin in

---

\* UL FGG, Jamova 2, Ljubljana in Agencija RS za okolje, Vojkova 1b, Ljubljana

površinskega odtoka je po (R)USLE odvisna od kinetične energije padavinskih dogodkov in pripadajoče maksimalne 30-minutne intenzitete padavin. Meritve kinetične energije padavin so glede na razširjenost meritev intenzitete padavin zelo redke (Mikoš in sod., 2006), saj šele novejša tehnologija omogočajo cenovno dostopnejše merilne instrumente.

Zato se kinetična energija padavin v praksi večinoma določa s pomočjo regresijskih enačb različnih oblik, ki podajajo odvisnost kinetične energije od intenzitete padavin in veljajo za specifično (podnebno) območje in interval intenzitet padavin.

V okviru raziskave sta bila zastavljena dva cilja: določiti parametre regresijskih enačb za račun kinetične energije padavin na treh podnebnih območjih Slovenije in izdelati karto erozivnosti padavin za območje Slovenije, ki bi služila kot izhodišče za določitev podnebnega dejavnika pri kvantifikaciji erozijskih procesov. Za doseg te ciljev smo opravljali meritve porazdelitve padavinskih delcev in intenzitete padavin. Upoštevali smo tudi podatke o intenzitetah padavin, ki jih zbira Agencija Republike Slovenije za okolje (v nadaljnjem besedilu: ARSO) na merilnih mestih po Sloveniji.

### O metodologiji (R)USLE

Erozivnost padavin je podnebni dejavnik, ki je najbolj natančno opredeljen v okviru široko uporabljene metodologije (R)USLE za račun izgube tal. Osnovna enačba (R)USLE je bila zasnovana na podlagi poskusov, ki so bili opravljeni na standardni erozijski ploskvi USLE dolžine 22,1 m (in širine približno 4 m), naklona 9 %, neporaščeni in obdelani z oranjem v smeri padca pobočja. Takšne razmere, ki so pogojene z dimenzijami, naklonom, pokrovnostjo in obdelavo standardne ploskve USLE, v okviru metodologije (R)USLE imenujemo tudi standardne razmere. Enačba pa se glasi:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

pri čemer posamezne oznake pomenijo:

*A* - povprečna letna izguba tal na enoto površine [ $t \text{ ha}^{-1}$ ],

*R* - dejavnik padavin in odtoka oz. erozivnost padavin [ $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$ ],

*K* - dejavnik erodibilnosti tal glede na standardne razmere [ $t \text{ MJ}^{-1} \text{ h mm}^{-1}$ ],

*L* - dejavnik dolžine pobočja oz. razmerje med izgubo tal pri dejanski in standardni dolžini [-],

*S* - dejavnik naklona pobočja oz. razmerje med izgubo tal pri dejanskem in standardnem naklonu [-],

*C* - dejavnik pokrovnosti tal oz. razmerje med izgubo tal pri dejanski in standardni pokrovnosti [-] in

*P* - dejavnik zaščitnih (kmetijskih) ukrepov oz. razmerje med izgubo tal pri dejanski in standardni obdelavi oz. zaščiti zemljišča [-].

Vrednosti reaktivnih dejavnikov (*K*, *C* in *P*) načeloma razberemo iz predpisanih preglednic oz. grafikonov, aktivne dejavnike (*R*, *L* in *S*) pa praviloma izračunamo iz predpisanih enačb, za širša območja pa je lahko dejavnik *R* že določen v obliki kart. Erozivnost padavin *R* je definirana kot letno povprečje vsote produktov kinetične energije padavin *E* [ $\text{MJ ha}^{-1}$ ], in maksimalne 30-minutne intenzitete padavin *I*<sub>30</sub> [ $\text{mm h}^{-1}$ ] znotraj posameznih erozivnih dogodkov *ed*, ki so nastopili v daljšem časovnem obdobju trajanja *N* let (Renard in sod., 1997):

$$R = \frac{\sum_{ed} E \cdot I_{30}}{N} \quad (2)$$

Po metodologiji (R)USLE med erozivne dogodke  $ed$  štejemo vse deževne dogodke, pri katerih se je v šestih urah akumuliralo vsaj 12 mm padavin oz. v 15 minutah vsaj 6 mm padavin (Wischmeier in Smith, 1978).

Kinetično energijo padavin je težko meriti neposredno, zato se po navadi izračuna posredno iz meritev porazdelitve padavinskih delcev. Ker so bile v preteklosti te meritve razmeroma redke in do danes še niso doživele pravega razmaha, saj gre za aparature višjega cenovnega razreda, so se v preteklosti uveljavile empirične enačbe zasnovane na meritvah porazdelitve padavinskih delcev. Te enačbe podajajo specifično kinetično energijo padavin  $e$  kot funkcijo merjene intenzitete padavin  $I$ . Specifična kinetična energija padavin  $e$  je lahko podana v dveh oblikah: kot ploskovna gostota moči oz. energija na enoto časa in površinsko enoto  $e_A$  ali kot energija na površinsko enoto in enoto količine padavin  $e_B$  oz. količnik med ploskovno gostoto moči in intenziteto padavin. Tako lahko kinetično energijo  $E$  posameznega erozivnega dogodka oz. naliva izračunamo kot vsoto produktov specifične kinetične energije  $e_A$  in časa  $\Delta t$  intervala meritev intenzitete padavin  $I$  ali pa kot vsoto produktov specifične kinetične energije  $e_B$  in izmerjene višine padavin  $P_k$  v časovnem intervalu  $\Delta t$ . Pri tem je  $k$  število meritev oz. mnogokratnik intervala  $\Delta t$  v času erozivnega dogodka s trajanjem  $t$ :

$$E = \sum_k e_A \cdot \Delta t = \sum_k e_B \cdot P_k \quad (3)$$

Wischmeier in Smith (1958) sta na podlagi meritev, ki sta jih opravila Laws in Parsons leta 1943 v Washingtonu (ZDA), v metodologijo USLE vpeljala logaritmčno enačbo za račun specifične kinetične energije padavin  $e_B$  [ $\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ]:

$$e_B = 0,1187 + 0,0873 \cdot \log_{10} I \quad (4)$$

pri čemer sta vrednost  $e_B$  omejila navzgor na  $0,283 \text{ MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$  pri intenzitetah padavin  $I$  višjih od  $76 \text{ mm h}^{-1}$ . Pozneje sta Brown in Foster (1987) predlagala eksponentno enačbo za račun specifične kinetične energije padavin  $e_B$ , ki jo priporočajo tudi avtorji metodologije RUSLE (Renard in sod., 1997):

$$e_B = e_{\max} \cdot [1 - a \cdot \exp(-bI)] \quad \text{oz.} \quad (5)$$

$$e_B = 0,29 \cdot [1 - 0,72 \cdot \exp(-0,05I)] \quad (6)$$

Kadar gre  $I$  proti zelo visokim vrednostim (oz. neskončnosti) se specifična kinetična energija  $e_B$  asimptotično približuje vrednosti  $e_{\max}$ . Obratno, kadar gre  $I$  proti nič, pa  $e_B$  dobi končno pozitivno vrednost. Zato je oblika enačbe 5 superiorna analitična oblika za račun specifične kinetične energije (Renard in sod., 1997). Brown in Foster (1987) sta enačbo 6 izpeljala za jug ZDA. Sledilo jima je veliko avtorjev, ki so določili parametre enačbe 5 za druga (podnebna) območja po svetu.

### Meritve porazdelitve padavinskih delcev

Tudi eden naših ciljev je bil ta, da določimo  $KE-I$  funkcijske povezave oz. parametre ( $e_{\max}$ ,  $a$  in  $b$ ) eksponentne enačbe 5 za tri podnebna območja Slovenije. V ta namen smo v času med decembrom 2007 in julijem 2009 opravljali meritve porazdelitev padavinskih delcev z optičnimi disdrometri proizvajalca OTT (Slika 1) na treh merilnih mestih: v Bovecu, Ilirski Bistrici in Ljubljani. V podporo tem meritvam smo istočasno opravljali meritve intenzitete padavin s tehtalnimi dežmeri (Bovec in Ilirska Bistrica) oz. z dežmerom s prekucnikom (Ljubljana).

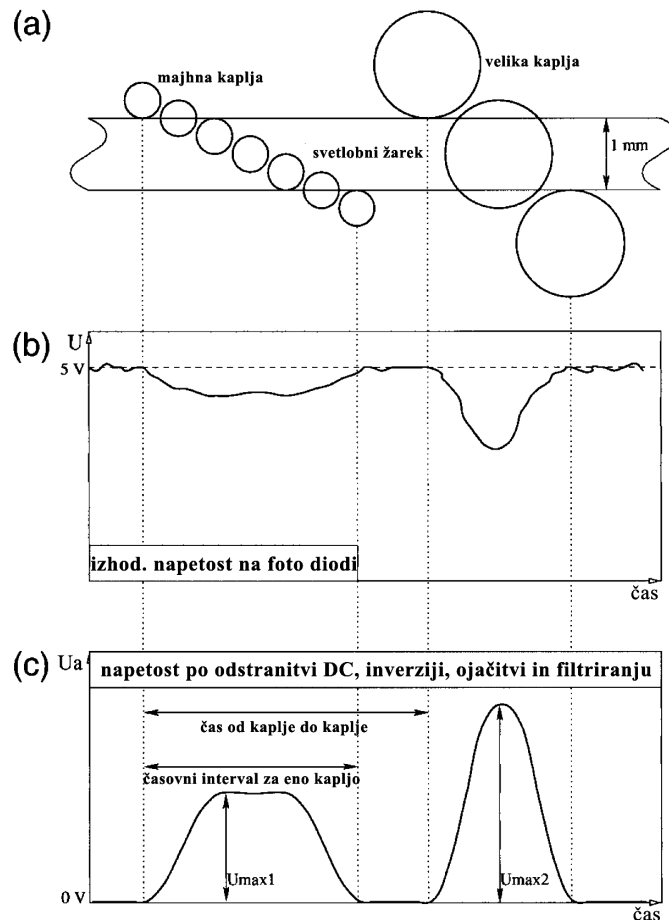
Optični disdrometer je v splošnem sestavljen iz naslednjih elementov: oddajne glave, sprejemne glave in elektronskega vezja s komunikacijskimi vrati. Bistveni element v oddajni glavi je IR-laserska dioda, ki oddaja svetlobni žarek, usmerjen proti sprejemni glavi, kjer leži fotodioda. Ob prehodu padavinskega delca skozi svetlobni žarek površine  $54 \text{ cm}^2$  pride do zatemnitve na fotodiodi in posledično zmanjšanja izhodne napetosti (Slika 2). Izhodni signal na fotodiodi analizira programska oprema instrumenta: iz amplitude oslabljenega signala instrument ugotovi velikost padavinskega delca, iz časa trajanja oslabljenega signala pa hitrost padanja delca (Löffler-Mang in Joss, 2000). Algoritem instrumenta, ki vsebuje tovarniške kalibracijske parametre, izračuna ekvivalenten premer padavinskega delca krogelne oblike oz. premer ekvivolumetrične krogle in ne dejanske širine padavinskega delca (Thies Clima, 2006). Vsi veljavni padavinski delci, ki jih instrument zazna v izbranem merilnem koraku (praviloma 1 minuta), se nato razvrstijo v velikostne (32 razredov na intervalu med 0,2 in 25 mm) in hitrostne (32 razredov na intervalu med 0,2 in 20  $\text{m s}^{-1}$ ) razrede. Iz porazdelitve padavinskih delcev instrument prepozna vrsto padavin, izračuna intenziteto padavin (z ločljivostjo  $0,001 \text{ mm h}^{-1}$  na intervalu do  $1200 \text{ mm h}^{-1}$ ) in radarsko odbojnost. Vse podatke instrument sestavi v podatkovni telegram, ki ga po preteku merilnega koraka samodejno pošlje na izhode instrumenta.



Slika 1: Optični disdrometer OTT na meteorološki postaji Bovec Letališče (Fotografija: Sašo Petan)

Proizvajalec disdrometra v tehničnih navodilih ne omenja točnosti disdrometra pri merjenju hitrosti padavinskih delcev, vendar Löffler-Mang in Joss (2000) navajata, da je točnost merjene hitrosti padavinskih delcev 25 % oz. 5 % za delce s premerom 0,3 mm oz. 5 mm.





Slika 2: Princip delovanja disdrometra (prirejeno po Löffler-Mang in Joss, 2000)

### Opredelitev parametrov regresijskih enačb za račun kinetične energije padavin

Merjene podatke o porazdelitvi padavinskih delcev (meritve DSD) smo najprej filtrirali, saj je šlo za 1-minutne podatke iz disdrometriških meritev s trajanjem vsaj enega leta. Upoštevali smo samo deževne dogodke (brez sneženja), ki so dosegli skupno višino padavin vsaj 6 mm. Pri tem je bila višina padavin izračunana iz 1-minutnih intenzitet padavin  $I(dt)$ , ki so jih disdrometri sporočali v podatkovnih telegramih. V nadaljevanju smo iz obravnave izločili tudi vse 1-minutne meritve, pri katerih je bila intenziteta padavin  $I(dt)$  nižja od  $0,1 \text{ mm h}^{-1}$ , da bi se izognili velikim napakam pri nadaljnjih računih zaradi nezanesljivosti instrumentov pri nizkih intenzitetah padavin. Za spodnjo mejo višine padavin pri določitvi erozivnih dogodkov smo izbrali 6 mm in ne 12 mm, kot je predpisano v (R)USLE, z namenom, da zaobjamemo tudi tiste deževne dogodke, ki niso med najbolj intenzivnimi (vsaj 6 mm v 15 minutah), a prispevajo primerljiv delež k bilanci kinetične energije padavin.

Pri računu intenzitete padavin  $I(dsd)$  in specifične kinetične energije padavin  $KE(dsd)$  (v smislu  $e_A$ ) iz meritev DSD nismo upoštevali zaznanih padavinskih delcev s premerom večjim od 7 mm. S tem smo zmanjšali vpliv merskih napak pri disdrometrih, ki nastopijo ob hkratnem prehodu dveh ali več padavinskih delcev skozi svetlobni žarek oz. merilno površino. V takšnih primerih disdrometer zazna en velik padavinski delec in tako meri previsoke vrednosti maksimalnih intenzitet padavin (Lanzinger in sod., 2006). Meja 7 mm

pa je bila izbrana zato, ker se v svetovni literaturi za največje dežne kaplje, ki so še zmožne padati, ne da bi se razdelile v več manjših, navajajo vrednosti med 6 in 8 mm (Mason, 1978; Glickman, 2000; Fujiyoshi in sod., 2008, van Mook, 2002). Tako smo izključili tudi morebitna zrna toče.

Intenziteta padavin  $I(dsd)$  [ $\text{mm h}^{-1}$ ] je bila izračunana kot vsota volumnov padavinskih delcev iz vseh veljavnih ( $< 7$  mm) velikostnih razredov  $i$  znotraj porazdelitve padavinskih delcev. Pri tem smo upoštevali simetrično krogelno obliko padavinskih delcev, ki so v časovnem intervalu s trajanjem  $\Delta t$  (1/60 h) prešli skozi merilno površino disdrometra  $F$  [ $\text{mm}^2$ ]:

$$I(dsd) = \frac{\pi}{6F\Delta t} \cdot \sum_i n_i \cdot \frac{1}{D_{b,i} - D_{a,i}} \cdot \int_{D_{a,i}}^{D_{b,i}} D_i^3 dD \quad (7)$$

Pri tem je  $n_i$  [-] število zaznanih padavinskih delcev znotraj velikostnega razreda  $i$ ,  $D_i$  [mm] pa premer padavinskega delca znotraj velikostnega razreda  $i$ , ki je omejen na intervalu med  $D_{a,i}$  do  $D_{b,i}$ . Specifična kinetična energija  $KE(dsd)$  [ $\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ] je bila za vsak časovni interval s trajanjem  $\Delta t$  izračunana na dva načina. Pri prvem izračunu oz. pri računu  $KE_1(dsd)$  je bila upoštevana merjena hitrost padanja padavinskih delcev pri prehodu skozi merilno površino disdrometra  $F$  [ $\text{mm}^2$ ]:

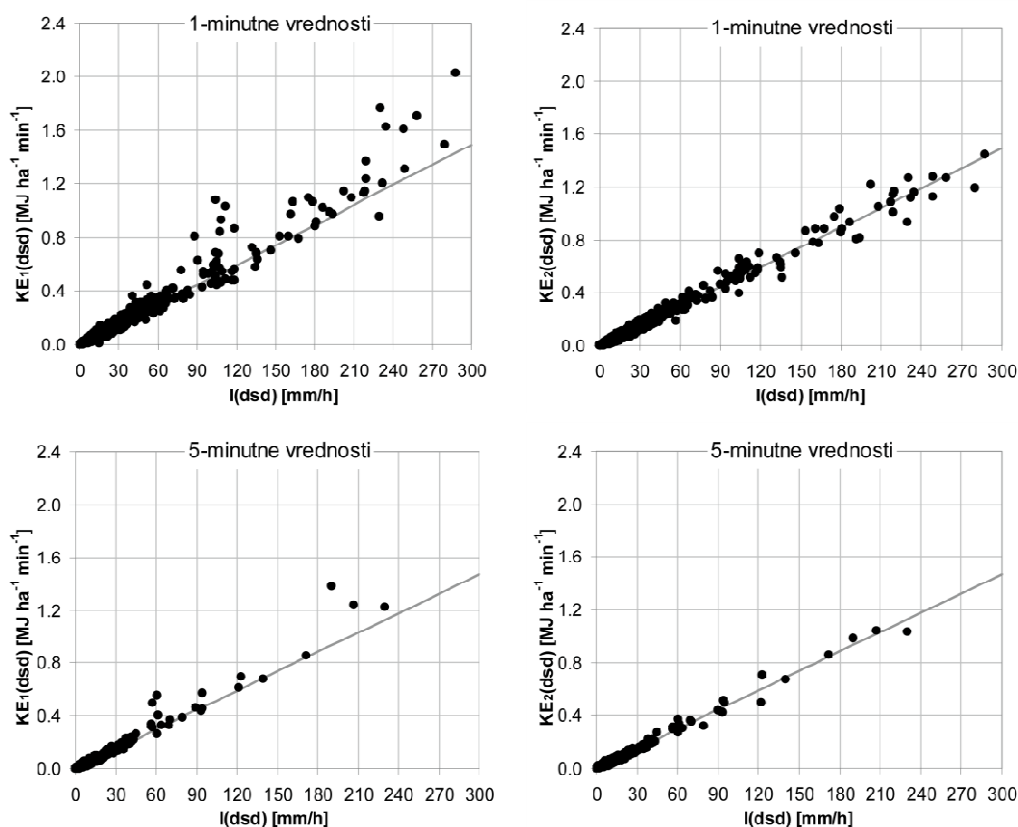
$$KE_1(dsd) = \frac{\pi\rho}{12 \cdot 10^3 F\Delta t} \cdot \sum_i n_i \cdot \frac{1}{D_{b,i} - D_{a,i}} \cdot \int_{D_{a,i}}^{D_{b,i}} D_i^3 dD \cdot \frac{1}{v_{b,i} - v_{a,i}} \cdot \int_{v_{a,i}}^{v_{b,i}} v_i^2 dv \quad (8)$$

V enačbi 8 je gostota vode označena kot  $\rho$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ], hitrost padanja padavinskih delcev znotraj razreda  $i$  pa kot  $v_i$  [ $\text{m s}^{-1}$ ], ki je omejena na intervalu med  $v_{a,i}$  do  $v_{b,i}$ . Pri izračunu specifične kinetične energije  $KE_2(dsd)$  pa je bila hitrost  $v_i$  v enačbi 8 nadomeščena s končno hitrostjo padanja dežnih kapelj  $v_t$  [ $\text{m s}^{-1}$ ] po Atlasu in sod. (1973):

$$v_t(D_i) = 9,65 - 10,3 \exp(-0,6D_i) \quad (9)$$

Tako izračunane 1-minutne vrednosti za specifično kinetično energijo padavin  $KE_1(dsd)$  in  $KE_2(dsd)$  so bile korelirane z 1-minutnimi vrednostmi intenzitete padavin  $I(dsd)$  za vse tri z disdrometri opremljene merilne lokacije (Slika 3 prikazuje primer Ilirske Bistrice). Pri določitvi parametrov eksponentne enačbe 5 smo upoštevali specifično kinetično energijo  $KE_2(dsd)$  in ne  $KE_1(dsd)$ , saj je slednja imela višjo razpršenost in tudi višjo napoved vsote kinetične energije  $E$  vseh erozivnih dogodkov.

Parametre eksponentne enačbe 5 so bili določeni tako, da smo začetne približke parametrov (enačba 6) spreminjali toliko časa, dokler ni bila dosežena maksimalna možna vrednost Nash-Sutcliffovega koeficienta modelske učinkovitosti (Nash in Sutcliffe, 1970). Za vsako od merilnih lokacij so bili na enak način določeni tudi parametri eksponentne enačbe na podlagi 5-minutnih podatkov za  $I(dsd)$  in  $KE(dsd)$  (5-minutne vsote 1-minutnih vrednosti, normirane na časovno enoto) z namenom uporabe s 5-minutnimi intenzitetami padavin iz pluviografov ARSO. Preglednica 1 združuje ugotovljene parametre eksponentne enačbe na vseh merilnih mestih. Enačba za račun specifične kinetične energije padavin iz 1-minutnih (5-minutnih) intenzitet padavin ima veljavnost na območju intenzitet padavin med 0,1  $\text{mm h}^{-1}$  in 255, 280 oz. 399  $\text{mm h}^{-1}$  (147, 172 oz. 254  $\text{mm h}^{-1}$ ) na merilnih mestih v Ljubljani, Ilirski Bistrici oz. Bovcu.



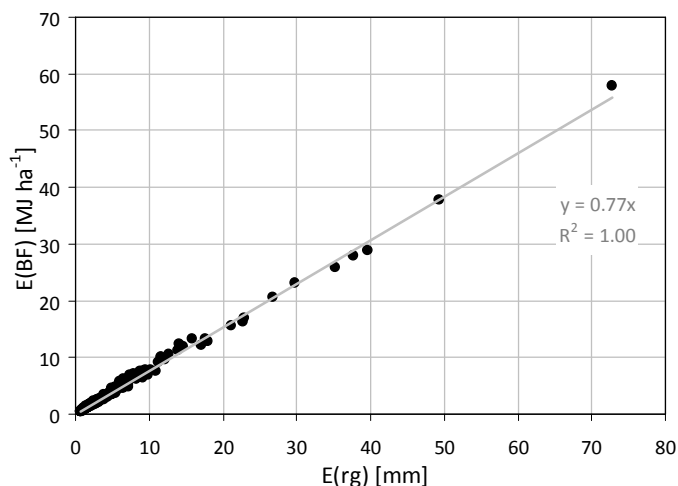
Slika 3: Korelacija med intenzitetami padavin  $I(dsd)$  in specifično kinetično energijo padavin:  $KE_1(dsd)$ , račun z upoštevanjem merjene hitrosti padanja dežnih kapelj, levo;  $KE_2(dsd)$ , račun z upoštevanjem končne hitrosti padanja dežnih kapelj po Atlas in sod. (1973), desno. Siva črta predstavlja eksponentno enačbo 5 s parametri za Ilirsko Bistrico

Preglednica 1: Vrednosti parametrov ( $e_{max}$ ,  $a$  in  $b$ ) eksponentne enačbe za račun specifične kinetične energije padavin  $e_B$  v Bovcu, Ilirski Bistrici in Ljubljani

Parametri enačbe $e_B = e_{max} \cdot [1 - a \cdot \exp(-bI)]$	1-min. intenzitete padavin			5-min. intenzitete padavin		
merilno mesto	$e_{max}$	$a$	$b$	$e_{max}$	$a$	$b$
Bovec	0,341	0,60	0,040	0,336	0,60	0,047
Ilirska Bistrica	0,298	0,60	0,071	0,294	0,60	0,085
Ljubljana	0,316	0,60	0,061	0,310	0,60	0,074

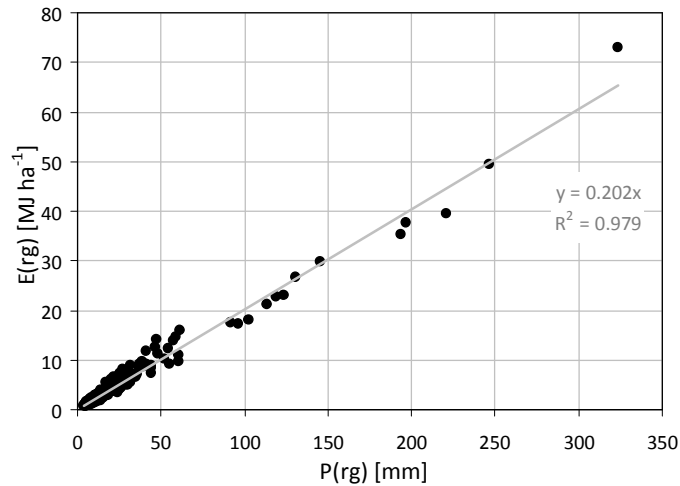
Modelsko učinkovitost eksponentne enačbe 5 z opredeljenimi parametri (Preglednica 1) smo preverili ob uporabi enačbe na izračunane 1-minutne in 5-minutne intenzitete padavin  $I(dsd)$  ter na merjene intenzitete  $I(rg)$  s strani dežemerov. Te modelske učinkovitosti smo primerjali z učinkovitostmi  $KE-I$  funkcijskih povezav, ki so v svetovni literaturi predlagane s strani drugih avtorjev in so do sedaj že bile uporabljene pri raziskavah v mediteranskem in širšem prostoru. Pri tem smo iz obravnave izključili tiste funkcijske povezave drugih avtorjev, ki niso imele zadostnega intervala veljavnosti na območju intenzitet padavin. Primerjava je izpostavila tri enačbe drugih avtorjev, ki so imele zelo

primerljivo učinkovitost pri napovedovanju kinetične energije  $E$  erozivnih dogodkov z učinkovitostjo eksponentne enačbe 5 z opredeljenimi parametri (Preglednica 1) na vseh treh merilnih mestih. To so enačbe avtorjev: Usón in Ramos (2001) v kombinaciji s Sempere Torres in sod. (1992), Zanchi in Torry (1980) ter Wischmeier in Smith (1958). Enačba (6) Browna in Fosterja (1987), ki jo metodologija RUSLE priporoča pri računu erozivnosti padavin, se je izkazala kot neprimerna za uporabo v Sloveniji, saj podcenjuje kinetično energijo  $E$  posameznih erozivnih dogodkov v povprečju za 23 % (Slika 4).



Slika 4: Razmerje med kinetično energijo vseh zabeleženih erozivnih dogodkov na obravnavanih merilnih mestih po Brownu in Fosterju (1987) –  $E(BF)$  in po eksponentni enačbi 5 z opredeljenimi parametri (Preglednica 1) –  $E(rg)$

Veliko pozornost nam je vzbudila izrazita linearna odvisnost med višinami padavin  $P$  in kinetičnimi energijami  $E$  pripadajočih erozivnih dogodkov ob primerjavi na vseh treh merilnih mestih. Če račun specifične kinetične energije  $e_B$  kot funkcijo intenzitete padavin  $I$  nekoliko poenostavimo: namesto triparametrne eksponentne enačbe privzemimo linearno odvisnost na celotnem območju intenzitet padavin, tako kot so to storili Sempere Torres in sod. (1992) in tudi Uson in Ramos (2001), integrirajmo jo po času trajanja erozivnega dogodka in, kot že nakazuje Slika 3, dobili bomo linearno zvezo med kinetično energijo  $E$  erozivnega dogodka in pripadajočo višino padavin  $P$ . Ob taki predpostavki se račun kinetične energije erozivnih dogodkov  $E$  močno poenostavi. Pri tem se koeficient linearne odvisnosti praktično ne spreminja po merilnih mestih in znaša  $0,20 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  v primeru, ko smo kinetično energijo erozivnih dogodkov  $E(rg)$  in pripadajočo višino padavin  $P$  izračunali na podlagi merjenih intenzitet padavin  $I(rg)$  (Slika 5).

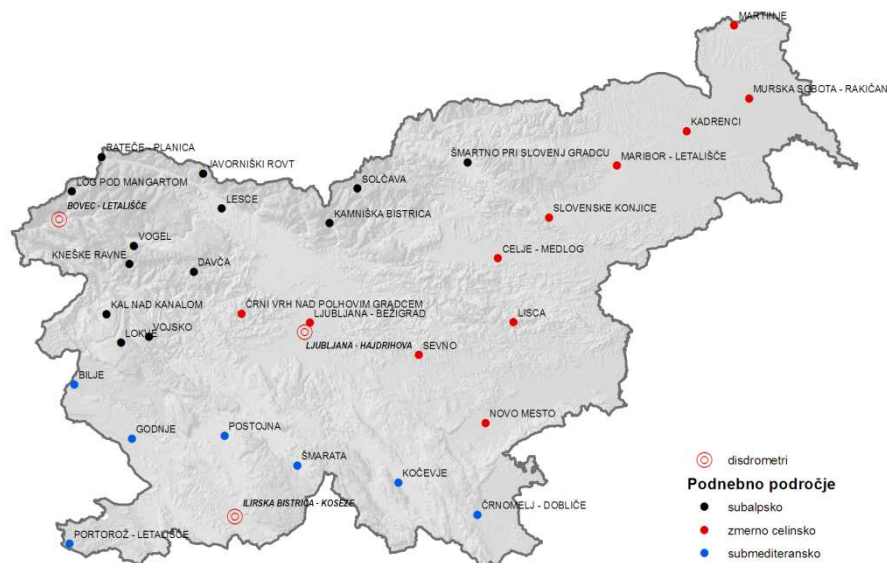


Slika 5: Razmerje med višino padavin  $P(\text{rg})$  in kinetično energijo  $E(\text{rg})$  erozivnih dogodkov, ki so jih zabeležili dežemeri v Bovcu, Ilirski Bistrici in Ljubljani

Na tem mestu naj omenimo tudi to, da so disdrometri zelo občutljivi instrumenti in naklonjeni netočnim meritvam, sploh pri visokih intenzitetah padavin. Kljub njihovi tovarniški kalibraciji so disdrometri v Ilirski Bistrici, Ljubljani oz. Bovcu namerili 1, 20 oz. 25 % višjo skupno vsoto padavin od dežemera na isti lokaciji znotraj obravnavanih erozivnih dogodkov. Do podobnih ugotovitev je prišel tudi Lanzinger s sod. (2006), ki je na isti lokaciji postavil tri identične optične disdrometre in izmerjeno višino padavin primerjal z meritvami referenčnega dežemera. V povprečju so posamezni disdrometri namerili višje vsote padavin, in sicer 5, 15 oz. 20 %.

### Erozivnost padavin v Sloveniji

Izhodišče pri prostorskem modeliranju erozivnosti padavin so bili 10-letni nizi podatkov o intenziteti padavin na 31 pluviografskih postajah znotraj opazovalne mreže ARSO (Slika 6). Na podlagi merjenih 5-minutnih intenzitet padavin so bili določeni erozivni dogodki podobno kot pri disdrometriških meritvah, pri čemer smo upoštevali le deževne dogodke brez sneženja. Pluviografske postaje smo razdelili v tri podnebne skupine glede na geografski položaj in opravili račun specifične kinetične energije padavin po eksponentni enačbi (5) z ustreznimi parametri iz Preglednice 1. Pri tem smo na submediteranskem, subalpskem oz. zmerno celinskem območju Slovenije upoštevali parametre, ki smo jih določili iz disdrometriških meritev v Ilirski Bistrici, Bovcu oz. Ljubljani. Sledil je račun kinetične energije posameznih dogodkov  $E$  in povprečne letne erozivnosti padavin  $R$  (enačba 2). Manjkajoči prispevek k bilanci erozivnosti padavin  $R$  tistih erozivnih dogodkov, ki so na posameznih postajah ostali nezabeleženi zaradi izpada merilnih instrumentov, smo nadomestili s koreliranimi vrednostmi prispevkov glede na najprimernejšo postajo v neposredni bližini. Tako smo dobili končne vrednosti erozivnosti padavin  $R$  na pluviografskih postajah ARSO in jih kot atribut pripisali točkam v vektorskem sloju, ki so predstavljale geografski položaj omenjenih pluviografskih postaj.



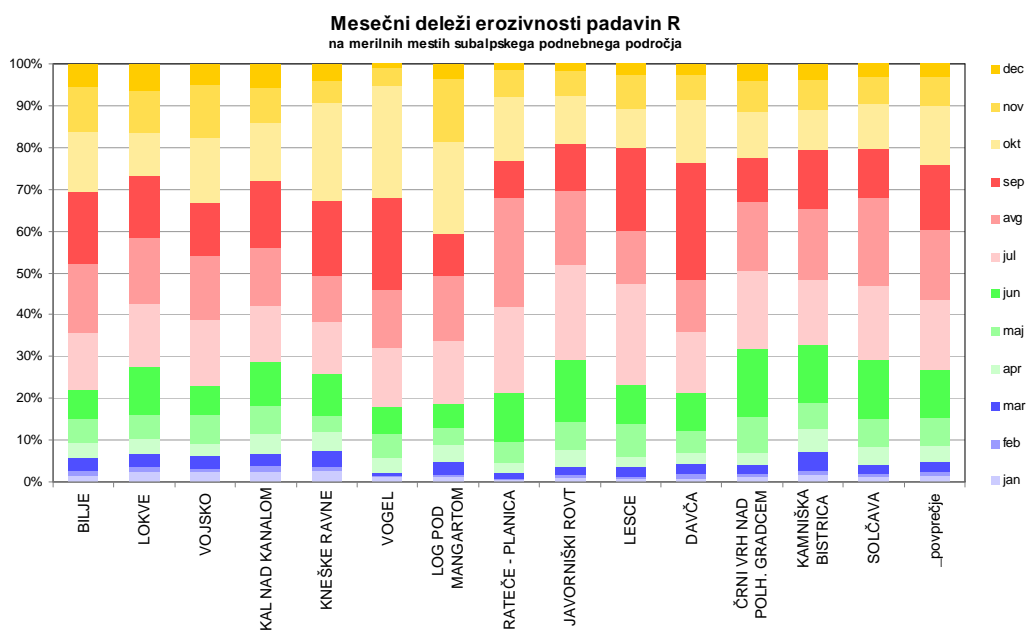
Slika 6: Pozicija disdrometrov in pluviografskih postaj ARSO ter njihova porazdelitev po podnebnih območjih Slovenije

Preden smo se lotili prostorske interpolacije erozivnosti padavin, smo določili mesečne deleže erozivnosti padavin. S tem smo dobili vpogled v sezonskost oz. časovno porazdelitev erozivnosti padavin skozi leto. Naj omenimo, da bi zagotovo potrebovali daljši niz podatkov, da bi se izognili močnim vplivom ekstremnih erozivnih dogodkov na posamezne mesečne deleže erozivnosti padavin, saj ti lahko predstavljajo tudi več kot 30 % povprečne letne erozivnosti padavin. Tako imajo izjemni padavinski dogodki, na primer novembra 2000 v Logu pod Mangartom, avgusta 2005 na Lisci, avgusta 2006 v Portorožu oz. septembra 2007 v Davči, prevladujoč vpliv na mesečne deleže erozivnosti padavin, kar se vidi na Slikah 7, 8 in 9. Zadnji stolpec na omenjenih slikah z oznako "\_povprečje" pomeni delež vsote mesečnih erozivnosti padavin v vsoti letne erozivnosti padavin na vseh 31 merilnih mestih.

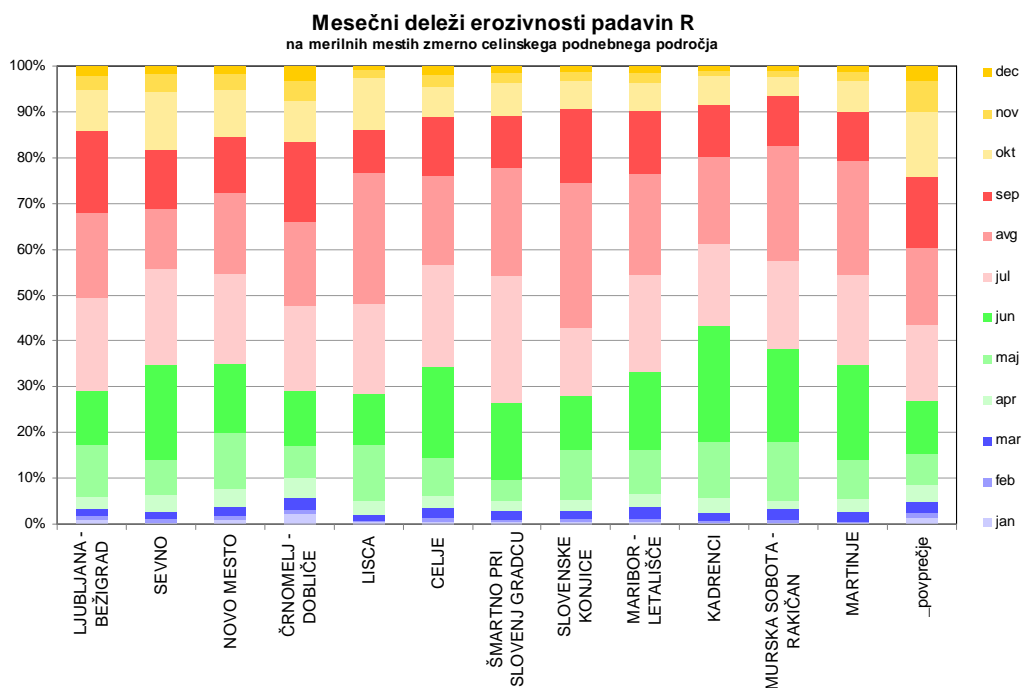
Glede na mesečne deleže erozivnosti padavin  $R$  lahko posamezna merilna mesta znotraj istega podnebnega območja razdelimo v skupine. Tako smo merilna mesta subalpskega podnebnega območja (Slika 7) razdelili na dve skupini glede na skupni delež  $R$  ob koncu septembra oz. poletja: pri merilnih mestih jugozahodno od Alpsko-Dinarske gorske pregrade je ta delež v povprečju nekoliko nižji od deleža pri merilnih mestih, ki ležijo na severovzhodni strani gorske pregrade. Pri prvih se ti deleži gibljejo med 59 in 73 % (povprečje 68 %), pri drugih pa med 76 in 80 % (povprečje 79 %). Merilna mesta zmerno celinskega podnebnega območja (Slika 8) smo ravno tako razdelili v dve skupini glede na porazdelitev mesečnih deležev  $R$ . Ob koncu septembra imajo merilna mesta južno oz. severno od Posavskega hribovja skupen delež  $R$  med 81 in 86 % (povprečje 84 %) oz. med 89 in 93 % (povprečje 91 %). Merilna mesta submediteranskega podnebnega območja (Slika 9) pa tvorijo homogeno skupino glede na skupen delež  $R$  ob koncu poletja.

Iz porazdelitve mesečnih deležev  $R$  in medsebojnih podobnosti oz. razlik le-teh med merilnimi postajami smo ugotovili, da so bile določene merilne postaje napačno razvrščene po podnebnih območjih. Tako smo štiri merilna mesta prestavili iz enega v drugo podnebno območje: Šmartno pri Slovenj Gradcu iz subalpskega v zmerno celinsko, Črni vrh pri Polhovem Gradcu iz zmerno celinskega v subalpsko, Črnomelj iz submediteranskega v zmerno celinsko in Bilje iz submediteranskega v subalpsko podnebno

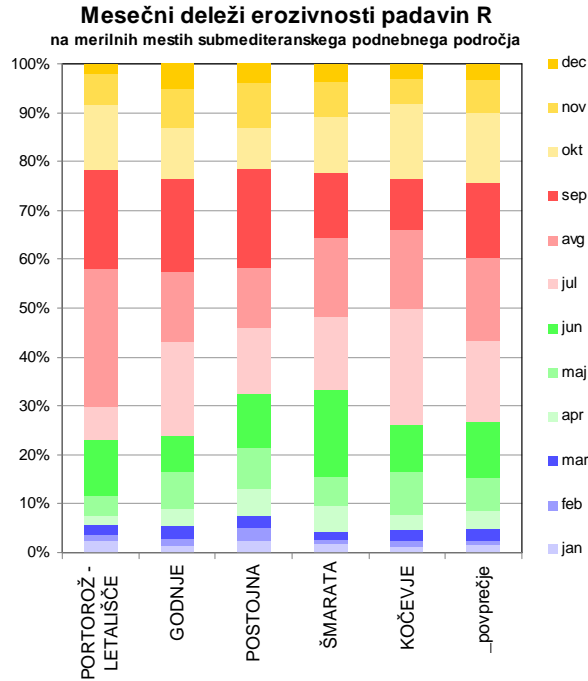
območje. Za te štiri postaje smo pred izdelavo karte erozivnosti padavin ponovno izračunali erozivnost padavin  $R$ , pri čemer smo uporabili ustrežnejše parametre eksponentne enačbe za račun specifične kinetične energije padavin.



Slika 7: Mesečni deleži erozivnosti padavin R na merilnih postajah ARSO, ki sodijo v subalpsko podnebno območje



Slika 8: Mesečni deleži erozivnosti padavin R na merilnih postajah ARSO, ki sodijo v zmerno celinsko podnebno območje



Slika 9: Mesečni deleži erozivnosti padavin R na merilnih postajah ARSO, ki sodijo v submediteransko podnebno območje

Sledila je prostorska interpolacija podatkov o povprečju letne erozivnosti padavin  $R$ , ki smo jo izvedli v enakem smislu, kot se izvaja prostorska interpolacija dolgoletnega povprečja višine padavin na ARSO (Dolinar, 2009), saj gre za enako fizikalno ozadje oz. izhodišče (intenziteta padavin). Izvedli smo interpolacijo mešanega tipa, ki je kombinacija globalne (regresijske) interpolacijske metode in geostatistične metode navadnega kriginga. Karto prvega približka erozivnosti padavin smo določili s pomočjo multiple linearne regresije (MLR), pri čemer smo želeli povprečje letne erozivnosti padavin  $R$  na pluviografskih postajah ARSO zapisati kot funkcijo Gauss-Krugerjevih koordinat postaj ( $X$  in  $Y$ ) in njihove nadmorske višine ( $Z$ ):

$$R_{pp} = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4Y^2 + a_5Z + a_6\Delta Z + a_7XY + a_8XZ + a_9YZ \quad (10)$$

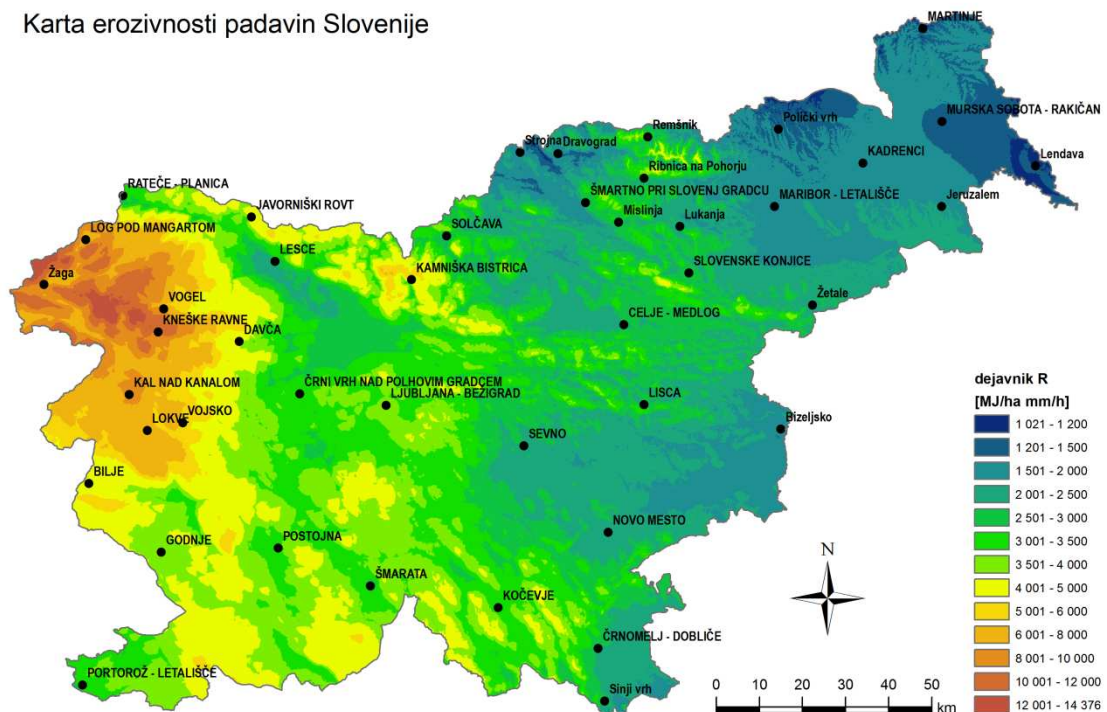
Spremenljivke za račun prvega približka dejavnika  $R_{pp}$  smo pripravili iz 100-metrskega digitalnega modela reliefa (DMR) za celotno območje Slovenije. Pri tem spremenljivka  $\Delta Z$  pomeni višinsko razliko med nadmorsko višino obravnavane točke in najvišje točke v smeri proti severovzhodu, ki leži v krožnem izseku širine  $60^\circ$  in radija 2000 m. V našem primeru je bila ta vrednost radija na intervalu med 500 in 4000 m s poskušanjem izbrana kot merodajna. Ugotovili smo, da imata spremenljivki  $Z$  in  $\Delta Z$  največjo signifikantnost oz. težo pri linearnem modelu, najmanjšo pa  $Y$  in  $YZ$ , ki smo jih tudi izločili iz računa prvega približka erozivnosti padavin  $R_{pp}$  po enačbi 10. Tako smo iz digitalnega modela reliefa Slovenije pripravili matriko  $R_{pp}$  za celotno območje Slovenije. Matriko koeficientov za množenje s karto  $R_{pp}$  pa smo pridobili s pomočjo interpolacije kriging iz 31 točkovnih vrednosti t. i. ostankov  $d_{pp}$ :

$$d_{pp} = \frac{R}{R_{pp}} \quad (11)$$



Skalarni produkt matrik oz. kart  $R_{pp}$  in  $d_{pp}$  je dal preliminarno karto erozivnosti padavin  $R$ . Tako pridobljena karta erozivnosti padavin  $R$  Slovenije ni bila zadovoljiva, saj so bile vrednosti na robovih drugačne od pričakovanih oz. ponekod celo negativne, sploh ob jugovzhodni in severni meji Slovenije. Zato smo na problematičnih območjih posegli po podatkih iz najbližjih padavinskih postaj, kjer se beležijo le dnevne višine padavin. Na osnovi korelacije letnih višin padavin iz padavinskih postaj z višinami padavin na najbližjih pluviografskih postajah smo pridobili vrednosti za dejavnik  $R$  na 13 dodatnih merilnih mestih. Tako smo lahko ponovili postopek MLR, le da smo ga sedaj opravili na osnovi vrednosti dejavnika  $R$  na 44 merilnih mestih ARSO. Pot do zadovoljivega končnega rezultata je vodila skozi nekaj ponovitev interpolacije navadnega kriginga. Pri interpolaciji smo dodali še osem točk oz. uteži na skrajnem severovzhodu Slovenije, saj so vrednosti dejavnika  $R$  na določenih mestih (predvsem na robovih) še vedno zasedale nižje vrednosti od najnižjih pričakovanih, tako da smo končni rezultat dosegli tudi s pomočjo "ročnih" korekcij. Karta erozivnosti padavin je prikazana na Sliki 10.

Karta erozivnosti padavin Slovenije



Slika 10: Karta erozivnosti padavin Slovenije

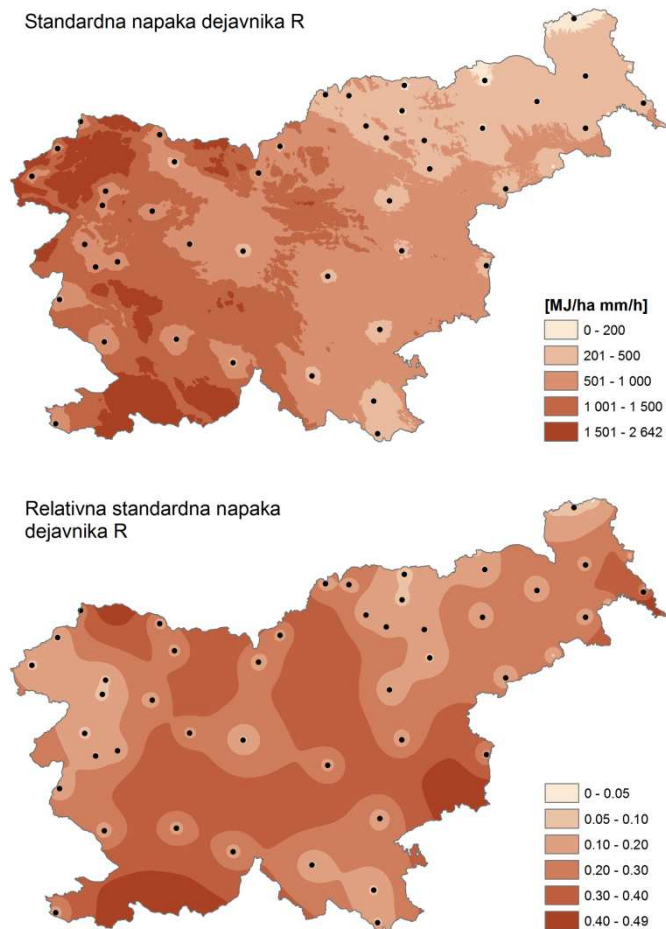
Preglednica 2: Porazdelitev razredov dejavnika *R* glede na preliminarno karto erozivnosti padavin

razred dejavnika <i>R</i> [MJ ha <sup>-1</sup> mm h <sup>-1</sup> ]	delež površja Slovenije [%]
1021 do 1200	0,5
1200 do 1500	3,6
1500 do 2000	13,0
2000 do 2500	16,7
2500 do 3000	14,3
3000 do 3500	15,4
3500 do 4000	14,6
4000 do 5000	11,9
5000 do 6000	2,5
6000 do 8000	4,0
8000 do 10000	2,0
10000 do 12000	1,3
12000 do 14376	0,4

Najnižje vrednosti erozivnosti padavin v Sloveniji najdemo na skrajnem severovzhodu države, kjer se vrednosti gibljejo med 1000 in 2000 MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup>, najvišje pa na najvišjih območjih Julijskih Alp, kjer vrednosti presegajo 10 000 MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup>, v Krnskem pogorju pa celo 14 000 MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup>. Iz karte se vidi, da v Sloveniji prevladujejo območja z erozivnostjo padavin med 2000 in 4000 MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup> in tako zasedajo 61 % celotnega območja Slovenije. V Preglednici 2 so prikazani deleži razredov dejavnika *R* po površju Slovenije glede na izdelano karto erozivnosti padavin. Srednja vrednost erozivnosti padavin *R* v Sloveniji znaša 3393 MJ ha<sup>-1</sup> mm h<sup>-1</sup>.

### Zaključki

Bistvena pomanjkljivost izdelane karte erozivnosti padavin Slovenije je relativno slaba natančnost napovedi dejavnika *R* (Slika 11). Ta nenatančnost izhaja iz interpolacije prostorskih podatkov zaradi dveh bistvenih razlogov: izhodišče za izdelavo karte dejavnika *R* je bila relativno redka mreža pluviografskih postaj s podatkovnim nizom vsaj 10 let (1999–2008) in pri izdelavi karte nismo poznali vrednosti dejavnika *R* onstran slovenske meje. Ti dve pomanjkljivosti smo zasilno odpravili tako, da smo na najbolj kritičnih območjih mrežo dopolnili s padavinskimi postajami, kjer se merijo dnevne višine padavin, in v teh točkah določili dejavnik *R* s pomočjo korelacije iz letnih višin padavin oz. da smo v posameznih točkah ob meji Slovenije privzeli pričakovane vrednosti za dejavnik *R*.



Slika 11: Standardna napaka (zgoraj) in relativna standardna napaka (spodaj) karte erozivnosti padavin Slovenije

Iz Slike 11 se vidi, da je na območjih, kjer smo zgostili mrežo znanih vrednosti dejavnika  $R$  oz. je ta bolj gosta kot drugje, relativna standardna napaka najmanjša. Najbolj problematična območja so tista, kjer ni znanih vrednosti  $R$  oz. ni daljšega niza pluviografskih meritev padavin. Ta območja so: širše območje Brkinov in Idrije, Karavanke oz. Jezersko, Koroška, Suha Krajina, Posavje in Pomurje. Podobno ugotavljajo tudi Angulo-Martínez in sod. (2009), ki so testirali številne interpolacijske metode (regresijske, geostatistične, mešane) za izdelavo karte erozivnosti padavin na povodju reke Ebro (Španija). Na približno enako gosti mreži znanih vrednosti dejavnika  $R$  kot v našem primeru (Ebro – 112 postaj na 85 000 km<sup>2</sup>, Slovenija – 31 postaj na 20 000 km<sup>2</sup>) so vse interpolacijske metode pokazale visoko negotovost kot posledico visoke spremenljivosti dejavnika  $R$  tako v časovnem kot tudi prostorskem smislu. Pri tem poudarjajo pomen dolgoletnega niza podatkov z gosto prostorsko pokritostjo.

## Viri

Angulo-Martínez, M., López-Vicente, M., Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. 2009. Mapping rainfall erosivity at a regional scale: a comparison of interpolation methods in the Ebro basin (NE Spain). *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13: 1907-1920.

- Atlas, D., Srivastava, R.C., Sekhon, R.S. 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence. *Rev. Geophys. Space Phys.* 11: 1-35.
- Brown, L. C., Foster, G. R. 1987. Storm erosivity using idealised intensity distribution. *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs* 30: 379-386.
- Dolinar, M. 2009. Osebna korespondenca o izdelavi karte erozivnosti padavin. (26. 11. 2009 in 17. 12. 2009)
- Fujiyoshi, Y., Yamamura, I., Nagumo, N., Nakagawa, K., Muramoto, K., Shimomai, T. 2008. The maximum size of raindrops – can it be a proxy of precipitation climatology? International Conference on Clouds and Precipitation 2008, Cancun, Mexico, July 7–11, 2008. <http://cabernet.atmosfcu.unam.mx/ICCP-2008/abstracts/> (16. 8. 2010)
- Glickman, T.S. 2000. *Glossary of Meteorology*, druga izdaja. Boston, American Meteorological Society. <http://amsglossary.allenpress.com/glossary/> (16. 6. 2010)
- Lanzinger, E., Theel, M., Windolph, H. 2006. Rainfall amount and intensity measured by the Thies laser precipitation monitor. *TECO-2006: WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation Geneva, Switzerland, 4–6 December 2006. WMO, Instruments and observing methods, IOM No. 94.3: 9 str.*
- Laws, J.O., Parsons, D.A. 1943. The relation of raindrop size and intensity. *Trans. Amer. Geophys. Un.* 24: 452-460.
- Löffler-Mang, M., Joss, J. 2000. An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 17: 130-139.
- Mannaerts, C.M., Gabriels, D. 2000. Rainfall erosivity in Cape Verde. *Soil Till. Res.* 55: 207-212.
- Mason, B.J. 1978. Physics of a raindrop. *Physics Education* 13: 414-419.
- Mikoš, M., Zupanc, V. 2000. Erozijska tal na kmetijskih površinah. *Sodobno kmetijstvo* 33: 419-423.
- Mikoš, M., Jošt, D., Petkovšek, G. 2006. Rainfall and runoff erosivity in the alpine climate of north Slovenia. *Hydrol. Sci. J.* 51 (1): 115-126.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Washington, DC, USDA ARS. *Agricul. Handbook* 703: 384 str.
- Sempere-Torres, D., Salles, C., Creutin, J.D., Delrieu, G. 1992. Quantification of soil detachment by raindrop impact: performance of classical formulae of kinetic energy in Mediterranean storms. V: Bogen, J., Walling, D.E., Day, T. (ur). *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins. Oslo, IAHS Publ.* 210: 115-124.
- Thies Clima. 2006. *Laser Precipitation Monitor, Instruction for Use 021341/02/06.* Göttingen, Adolf Thies GmbH & Co. KG: 56 str.
- UNEP. 2002. *Global Environment Outlook 3.* London, Earthscan Publications Ltd: 416 str.
- Usón, A., Ramos, M.C. 2001. An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a Mediterranean climate. *Catena* 43: 293-305.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Trans Am. Geophys. Union* 39: 285-291.
- van Mook, F.J.R. 2002. *Driving Rain on Building Envelopes.* Doktorska disertacija. Eindhoven, University of Technology, Building Physics Group (FAGO), Eindhoven University Press: 198 str.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1965. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Washington, DC, USDA ARS. *Agricul. Handbook* 282: 47 str.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. Washington, DC, USDA ARS. *Agricul. Handbook* 537: 57 str.
- Zanchi, C., Torri, D. 1980. Evaluation of rainfall energy in central Italy. V: De Boodt, M., Gabriels, D. (ur.). *Assessment of Erosion.* Toronto, Wiley: 133-142.

# Gradnja geomagnetnega observatorija pod Sinjim vrhom nad Ajdovščino

Rudi Čop<sup>1</sup>

## Povzetek

Geomagnetni observatorij je referenčno mesto za geomagnetne meritve na ozemlju, ki ga tak observatorij pokriva. Zato mora biti postavljen na skrbno izbranem mestu, ki ustreza vsem mednarodnim priporočilom. Prav tako mora biti po teh priporočilih tudi opremljen, da se lahko vključi v obstoječo mednarodno informacijsko meržo INTERMAGNET (*INTERNational Real-time MAGnetic Observatory NETWORK*). Prav ta povezava daje geomagnetnemu observatoriju veljavo, saj mu omogoča mednarodno sodelovanje, preverjanje merilnih rezultatov in mu priznava usposobljenost za opravljanje geomagnetnih meritev po veljavnih mednarodnih priporočilih. V Republiki Sloveniji se geomagnetni observatorij šele postavlja in se obenem tudi usposablja grupa merilcev. Pri tem pa je zelo pomembna tudi predstavitev observatorija širši javnosti kot tudi praktična uporaba geomagnetnih meritev. Del prve faze gradnje geomagnetnega observatorija je bil zaključen v decembru 2010. Dokončanje te faze kot tudi zaključne druge faze se bo po predvidevanjih izpeljalo v letu 2011.

## Uvod

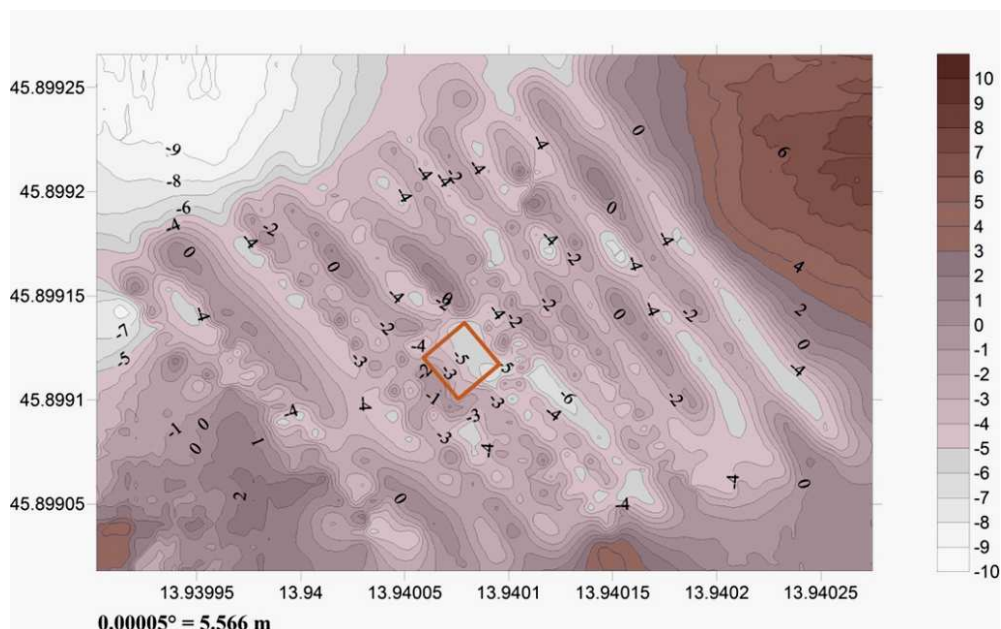
Sistematično iskanje primerne mesta za primarne ali izhodiščne meritve zemeljskega magnetnega polja na ozemlju Slovenije se je začelo v okviru projekta ARRS CRP-MIR-2007 s številko M4-225 in naslovom: Določitev magnetne deklinacije za območje Slovenije in primerjava z globalnimi modeli zemeljskega magnetnega polja. Projekt se je zaključil decembra 2009 (Fefer et al., 2010). Celotno nadaljnjo podrobno raziskavo skupaj z nakupom potrebne merilne opreme je plačalo Visokošolsko središče Sežana (v nadaljnjem: VSS Sežana). Ta raziskava je najprej potekala vzporedno kot dopolnitev raziskovalnega projekta M4-225 (Paliska et al., 2010), nato pa se je nadaljevala v samostojnem projektu izgradnje geomagnetnega observatorija v okviru Laboratorija za geomagnetizem in aeronomijo pri VSS Sežana (v nadaljnjem: laboratorij). Laboratorij je bil vpisan v knjigo raziskovalnih organizacij pri ARRS v Ljubljani januarja 2009, s svojo aktivnostjo pa je začel že dve leti prej.

Na osnovi predhodnih meritev geomagnetnega gradienta (Čop in Kocen, 2009) je v letu 2009 izdelal projektni biro podjetja Primorje Ajdovščina idejni projekt za geomagnetni observatorij na robu vasi Predmeja v Trnovskem gozdu. Na tem robu pa je tudi rastišče rebrinčevolistne hladnikije ali hladnikovke (*Hladnikia Pastinacifolia*), ene najstarejših endemičnih in redkih rastlin pri nas. Na predlog Oddelka za okolje pri Občini Ajdovščina in v sodelovanju z zavodom RS za varstvo narave, Območna enota Nova Gorica, smo zato določili novo področje pod Sinjim vrhom nad Ajdovščino. Izbrani sta bili dve parceli Za goro ob nekdanji domačiji Krapša v skupni izmeri 23520 m<sup>2</sup>, ki sta v upravljanju Sklada kmetijskih zemljišč in gozdov Republike Slovenije. Z meritvami geomagnetnega gradienta na izbranih zemljiščih, opravljenih avgusta 2009, smo nato potrdili njihovo primernost (Slika 1), da na njih postavimo geomagnetni observatorij (v nadaljevanju: observatorij).

---

<sup>1</sup> Visokošolsko središče Sežana, Laboratorij za geomagnetizem in aeronomijo, Kraška ulica 2, 6210 Sežana

Izbrano mesto za observatorij je optimalna rešitev, ki je nastala po triletnem iskanju primernege mesta zanj in dogovarjanju z vsemi prizadetimi ob njegovi gradnji. Postavitev observatorija je pomembna tako za državo (Zadeva, 2010) kot tudi za razvoj znanja na področju geomagnetizma pri nas. Čeprav imajo meritve zemeljskega magnetnega polja že več kot štiristoletno tradicijo (Stern, 2002; Stegel in Čop, 2009), se s postavitvijo observatorija pri nas le-te šele prav začenjajo.



Slika 1: Geomagnetni gradient na mestu merilnega stebra za opravljanje absolutnih geomagnetnih meritev

### Izhodišče

Geomagnetni observatorij mora biti postavljen na kraju brez magnetnih motenj umetnega izvora. Zato morajo biti tudi merilnice zgrajene iz nemagnetnih materialov in dovolj oddaljene od objektov, ki bi bili zgrajeni ali bi vsebovali dele in predmete z remanenčnim magnetizmom. Kovine s takimi lastnostmi so: železo, nikelj, kobalt, gadolinij in magnetne zlitine kovin ter feromagnetni materiali, ki so prešli Curie-jevo temperaturo. Najpogosteje so to feromagnetni materiali, sestavljeni iz fero-oksidnih spojin. Vpliv teh materialov na geomagnetne meritve mora biti pod nivojem merilne občutljivosti uporabljenih merilnih instrumentov na observatoriju. Ta nivo je po priporočilih mednarodnih organizacij IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) in INTERMAGNET manjši od 0,1 nT (Korepanov, 2006; Jankowski in Sucksdorff, 1996; INTERMAGNET, 1999). Merilni instrumenti za absolutne meritve, ki so v lasti VSS Sežana in v uporabi laboratorija, so bili s primerjalnimi meritvami na tujih geomagnetnih observatorijih potrjeni, da ustrezajo priporočilom teh mednarodnih organizacij (Čop in Kosovac, 2010; Živković in Mihajlović, 2010). Prvi variometer triosni Fluxgate Magnetometer (Suspendet version) Model FGE je bil naročen pri DTU Space v Copenhagenu na Danskem in je prispel v laboratorij julija 2010 (Slika 2).



Slika 2: Triosni fluxgate magnetometer za observatorij

### Gradnja observatorija

Objekti na observatoriju so razporejeni tako, da se čim bolj vključujejo v okolje in najmanj motijo dosedanjo kmetijsko dejavnost na obeh parcelah Za goro poleg nekdanje domačije Krapša. Zaradi dodatnih zahtev, navkljub dogovorom in vpisom služnostnih pravic v zemljiško knjigo, smo morali zastavljeni projekt med sam gradnjo stalno prilagajati.

Sama gradnja observatorija je sestavljena iz dveh faz. Prva faza je namenjena postavitvi primarne postaje Krapša (v nadaljevanju: primarna postaja) in obsega enostavne objekte, za katere ni potrebno gradbeno dovoljenje: merilnice tlorisne površine do 5 m<sup>2</sup> in inštalacijski kolektor, zakopan v zemljo (Uradni list RS št. 37, 2008). Električno napajanje merilne opreme je v tej fazi izgradnje lahko neodvisno od javnega elektroenergetskega omrežja.

Od prve faze gradnje observatorija so bili v letu 2010 postavljeni:

- Merilni steber za izvajanje absolutnih meritev, ki je postavljen v začasni baraki z merilnimi linami (Slika 3). V njej je mogoče opravljati absolutne meritve do temperature 0°C v vsakem vremenu.
- Dostopna pot po katastrski poti do nekdanje domačije Krapša.
- Inštalacijski kolektor v celotni dolžini s položenimi inštalacijskimi cevmi za elektriko, telefon, optiko in vodo. V letošnjem letu smo usposobili približno 2/5 inštalacijskega kolektorja in vanj položili vse električne kable in obe ozemljili. Usposobljeni

instalacijski kolektor poteka od priključka na električno omrežje do glavnega razdelilnega jaška in naprej do začasne barake za elektroniko.

- Začasna baraka za elektroniko z urejenim mestom za merilni senzor variometra na zunanji strani.

Za leto 2011 ostajajo od prve faze gradnje še: postavitve dveh merilnic za variometre, merilni steber za senzor protonskega magnetometra in hiša za elektroniko. Vsi ti objekti bodo delno vkopani in vsak od njih ne bo presegal tlorisne površine 5 m<sup>2</sup>. V letu 2010 nas je pri gradnji na Gori prehitela zima, zato nam teh objektov ni uspelo postaviti.



Slika 3: Začasna baraka z merilnim stebrom na primarni postaji Krapša

V drugi fazi gradnje GMO bo nad glavnim instalacijskim jaškom postavljena servisna hiša, v kateri bodo celotna energetika, informatika in telekomunikacije. Namesto barake z elektroniko bo postavljena hiša za absolutne meritve. Oba objekta presejata tlorisno površino 5 m<sup>2</sup> in je zato potrebno pridobiti gradbeno dovoljenje. V instalacijski kolektor bomo obenem položili tudi vse predvidene električne, komunikacijske in optične vode.

### **Usposobitev primarne postaje**

Primarna postaja je glavna ponavljalna postaja za absolutne geomagnetne meritve. Te se na ponavljalni postaji opravljajo vedno nad isto označeno točko in v isti višini (Newitt et al, 1997). Primarna postaja Krapša je postavljena na parceli namenjeni observatoriju. Po njegovi postavitvi bo primarna postaja Krapša prevzela vlogo sekundarne postaje observatorija za preverjanje rezultatov absolutnih meritev na njem.

Novembra 2010 je bil na primarni postaji postavljen protonski magnetometer, ki deluje po načinu 'Base' in je napajen iz akumulatorja 12 V / 110 Ah. Decembra 2010 je bila



primarna postaja začasno priključena tudi na električno omrežje. Trajni priključek bo narejen, ko bo za gradnjo observatorija pridobljeno gradbeno dovoljenje.

S priključkom observatorija na električno omrežje je mogoče na njem postaviti tudi variometer in začeti z rednimi absolutnimi meritvami zemeljskega magnetnega polja. Observatorij bo tako pripravljen za preizkusno obratovanje. Da pa se lahko vključi v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET moramo usposobiti še daljinski prenos merilnih rezultatov, njihovo skladiščenje, zavarovanje, obdelavo in pošiljanje. Poleg tega pa moramo zagotoviti tudi dvojni merilni sistem tako za absolutne kot tudi za variabilne meritve. Da bo observatorij popolno opremljen z merilnimi instrumenti, potrebujemo še en variometer in še en D/I magnetometer.

### **Načrti za nadaljevanje gradnje observatorija**

V letu 2010 je bilo pri gradnji observatorija največ dela s pridobivanjem dovoljenj za gradnjo in s samo gradnjo najosnovnejših objektov. V letu 2011 bo poudarek na meritvah in obdelavi merilnih rezultatov. To pa zahteva izobraževanje merilcev in organizacijo dela v laboratoriju in na observatoriju.

Za datalogger, ključni element za daljinski prenos merilnih podatkov iz observatorija v laboratorij, je bila razvita programska oprema na LTFE pri Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Po zaključku projekta ARRS CRP-MIR-2007 decembra 2009 na nadaljnjem razvoju te opreme ni bilo ničesar storjenega. Ta datalogger je usposobljen za zajemanje merilnih podatkov iz protonskega magnetometra, ki deluje v načinu 'Base'. Potrebovali pa bi bolj univerzalni način, ki bi omogočil tudi sprejem podatkov iz protonskega magnetometra v načinu 'Observatory' in iz 3-osnega variometra. Te podatke bi moral datalogger tudi shranjevati in pošiljati po brezžičnem omrežju do strežnika v laboratoriju.

Laboratorij se bo moral v letu 2011 usposobiti za obdelavo merilnih podatkov iz observatorija, njihovo shranjevanje in pošiljanje v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET. Za dodatno shranjevanje merilnih podatkov iz observatorija je pripravljena poskrbeti Geodetska uprava RS v Ljubljani, s katero je potrebno podpisati ustrezeni dogovor. Tako bi bila naloga osnovne skupine zaposlenih v laboratoriju, ki bi jo sestavljali trije sodelavci, da sproti vzdržuje observatorij in izvaja redne absolutne meritve na njem. Za potrebe Republike Slovenije bi opravljala meritve sekularnih sprememb geomagnetnega polja in vodila ustrezeni geomagnetni kataster tega ozemlja.

### **Literatura**

- Čop, R. Kocen, J. (2009): Geomagnetne meritve na geomagnetni referenčni točki na Predmeji. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008*. Zbornik predavanj. 14. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 22. januarja 2009. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Čop, R. Kosovac, P. (2010): Primerjalne meritve Overhouserjevega protonskega gradiometra. *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2009*. Zbornik predavanj. 15. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 21. januarja 2010. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Fefer, D. et al. (2010): Zaključno poročilo o rezultatih opravljenega raziskovalnega dela na projektu v okviru ciljnega raziskovalnega programa (CRP) »Znanje za varnost in mir 2006 – 2010«. Ljubljana: Univerza v Ljubljani; Fakulteta za elektrotehniko.
- INTERMAGNET Technical Reference Manual*. Version 4.0. Edited by Douglas F. Trigg and Richard L. Coles. Denver (CO, US): The INTERMAGNET office, 1999.

- Jankowski, J. Sucksdorff, C. (1996): *IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice*. Boulder (CO, US): International Association of Geomagnetism and Aeronomy, ISBN: 0965068625.
- Korepanov, V. (2006): Geomagnetic Instrumentation for Repeat Station Survey. Edited by Jean L. Rasson and Todor Delipetrov. *Geomagnetics for Aeronautical Safety: A Case Study in and around the Balkans*. Editors Jean L. Rasson and Todor Delipetrov. 1 edition. Dordrecht (NL): Springer, str. 145-166. ISBN: 1402050240.
- Newitt, L.R. et al. (1997): *IAGA Guide for Magnetic Repeat Station Surveys*. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, ISBN: 0965068617.
- Paliska, D. et al. (2010): The Use of GIS-based Spatial Multi-criteria Evaluation in the Selection Process for the New Slovenian Geomagnetic Observatory Site. *Annales Ser. hist. nat.*, vol. 20, no. 1, p. 1-8.
- Stegel, R. Čop, R. (2009): Štiri stoletja meritev zemeljskega magnetnega polja. *Življenje in tehnika*, vol. 60, no. 10, p. 23-32.
- Stern, P. D. A (2002): Millennium of Geomagnetism. *Reviews of Geophysics*, vol. 40, no.3, p. B-1-B-30.
- Uradni list RS, št. 37/2008 z dne 15.4.2008. 1567. Uredbe o vrsti objektov glede na zahtevnost. Poglavje 6. Enostavni objekti, člen 14. (pomožni infrastrukturni objekti), odstavek 10. pomožni objekt za spremljanje stanja okolja.
- Zadeva: *Observatorij za geomagnetizem aeronomijo – potrditev namembnosti*. Številka: 350-257/2009. Podpisani mag. Boris Balant, generalni direktor. Ljubljana: Republika Slovenija; Ministrstvo za obrambo, 18.06.2010. Available also in DOC format: *Kovk\_potrdilo\_namembnosti\_18062010.doc*.
- Živković, D. Mihajlović, J. S. (2010): Izveštaj o rezultatima uporednih apsolutnih i baznih merenja DIM magnetometrima na Geomagnetskoj opservatoriji Grocka (GCK) u periodu od 21.- 24. marta 2010.godine. Elaborat. Beograd; Grocka: GMO Grocka.

# Uporaba vesoljskih tehnologij v zemeljskih aplikacijah

Krištof Oštir<sup>1,2</sup>, Jože Rakovec<sup>1,3</sup>, Nedjeljka Žagar<sup>1,3</sup> in Tomaž Rodič<sup>1,4</sup>

## Povzetek

Vesoljske tehnologije so v procesu revolucionarnega prehoda, ki je posebej izrazit na področju mikro in nano satelitov. Konzorcij slovenskih znanstvenikov in inženirjev iz akademskih ustanov ter visoko tehnoloških malih in srednje velikih podjetij, združen v Centru odličnosti Vesolje-SI, je spoznal velik potencial porajajočih se tehnologij in aplikacij. Svoje raziskovalno tehnološke aktivnosti usmerja v mikropotisne sisteme, kontrolo pozicije satelitov, komunikacije, samodejno obdelavo in distribucijo daljinsko zaznanih podatkov ter virtualne in eksperimentalne raziskave mikro in nano satelitskih sistemov. Razvite tehnologije bodo uporabne pri opazovanju Zemlje, v meteorologiji in astrofiziki.

## Tehnologije

Ko so se v sedemdesetih in osemdesetih letih preteklega stoletja pričeli pojavljati osebni računalniki, jim je le redko kdo napovedoval svetlo prihodnost. Veliki računalniki so bili na višku svojih moči in osebni računalniki so bili v primerjavi z njimi videti igrače. Vendar pa je miniaturizacija dosegla svoje in razvoj mikropocesorjev je osebne računalnike naredil dostopne širšim množicam. Podoben proces revolucionarnega prehoda se dogaja na področju vesoljske tehnologije. Na področju majhnih, tako imenovanih mikro in nano satelitov je z radikalno miniaturizacijo integriranih podsistemov in relativno ugodnimi komercialnimi komponentami prišlo do občutnega znižanja stroškov razvoja, izstrelitve in uporabe satelitov. Vesolje zaradi teh korenitih sprememb ni več rezervirano samo za velike organizacije iz ekonomsko močnih držav.

Konzorcij slovenskih znanstvenikov in inženirjev, združenih v *Centru odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije (Vesolje-SI)*, je spoznal velik potencial porajajočih se tehnologij in aplikacij na področju majhnih satelitov. Center odličnosti, ki je bil ustanovljen leta 2010, ima raziskovalno tehnološki potencial za razvoj mikro potisnih sistemov, kontrole satelitov, komunikacije, obdelavo posnetkov ter virtualnih in eksperimentalnih raziskav mikro in nano satelitskih sistemov. Večdisciplinarnost področja pokrivajo predstavniki petih raziskovalnih inštitucij (Naravoslovnotehniške fakultete, Fakultete za elektrotehniko ter Fakultete za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani, Znanstvenoraziskovalnega centra SAZU in Instituta Jožef Stefan), šestih visokotehnoloških podjetij (DEWESoft, Sinergise, TIC – LENS, Impol in Iskra TELA) in končnega uporabnika (Zavarovalnice Maribor).

Raziskave, razvoj in uporaba mikro in nano satelitskih tehnologij zagotovo predstavljajo eno od najperspektivnejših strateških področij za vključevanje slovenskih raziskovalnih inštitucij in podjetij v mednarodne razvojne in komercialne aktivnosti, povezane z vesoljem. Center odličnosti Vesolje-SI se je glede na potenciale in pričakovani dolgoročni

---

<sup>1</sup> Center odličnosti Vesolje-SI, Aškerčeva cesta 12, Ljubljana

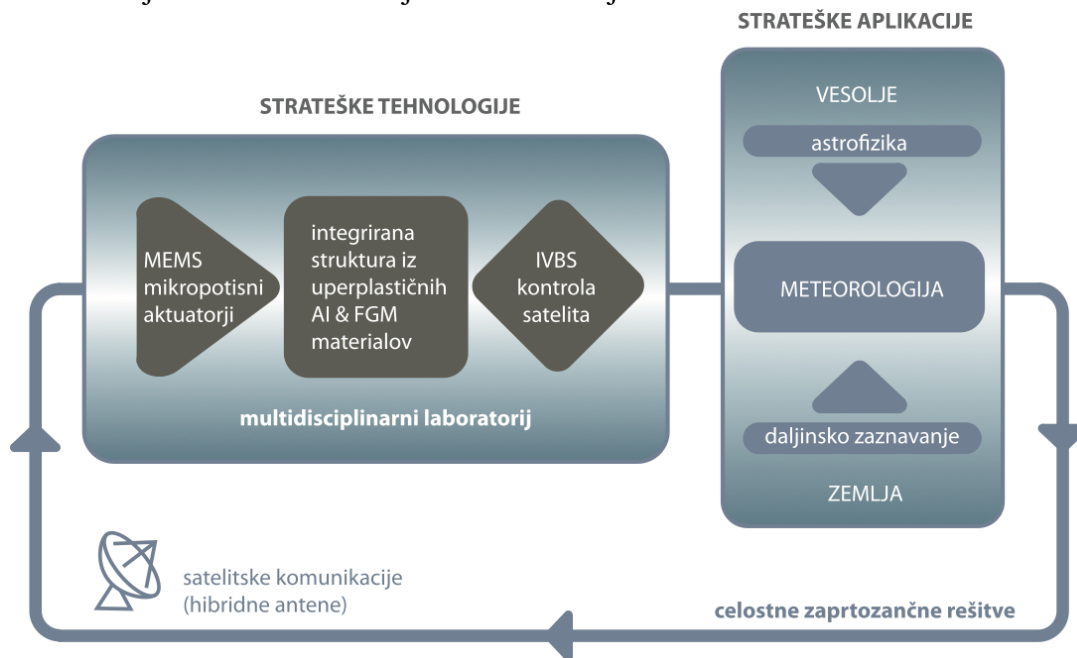
<sup>2</sup> Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Novi trg 2, Ljubljana

<sup>3</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Oddelek za fiziko, Katedra za meteorologijo, Jadranska cesta 19, Ljubljana

<sup>4</sup> Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Aškerčeva cesta 12, Ljubljana

razvoj osredotočil na tiste aplikacije, pri katerih so pričakovane prednosti mikro in nano satelitskih tehnologij izrazito visoke, in sicer:

- natančno manevriranje orbitalnih platform,
- konstelacije, letenje v formacijah,
- orbitalni pregledi in servisiranje satelitov ter
- visokoločljivo interaktivno daljinsko zaznavanje.



Slika 1: Tehnologije in aplikacije, s katerimi se ukvarja Center odličnosti Vesolje-SI.

Aktivnosti Centra odličnosti so razdeljene v sedem delovnih paketov, ki jih dopolnjujeta sklopa, namenjena prenosu tehnologij in razširjanju rezultatov:

- DP1 Daljinsko zaznavanje,
- DP2 Meteorologija,
- DP3 Astrofizika,
- DP4 Tehnologije mikro in nano satelitov,
- DP5 Satelitske komunikacije, hibridne antene in radarske tehnologije,
- DP6 Razvoj multidisciplinarnega laboratorija za testiranje vesoljskih tehnologij,
- DP7 Sodelovanje v mednarodnih vesoljskih misijah,
- DP8 Prenos vesoljskih tehnologij na zemeljske aplikacije ter
- DP9 Razširjanje rezultatov RTD.

Center odličnosti bo ustvaril pogoje za razumevanje pomena vesoljskih tehnologij za širši družbeno-ekonomski kontekst. To bo tudi omogočilo vzpostavitev pogojev za ustanovitev koordinacijskega telesa, ki bi moralo postati centralna točka za delovanje na področju RTD vesoljskih tehnologij in znanosti v regiji. Skupina se bo vključila v popularizacijo znanosti, ki jih je z velikim uspehom Mednarodnega leta astronomije ([www.astronomija2009.si](http://www.astronomija2009.si)) začela skupina za astrofiziko.

## Naravoslovna področja raziskav

Delovanje centra odličnosti posega tudi na raznolika naravoslovna znanstvena področja, ki jih je nemogoče v celoti opisati na kratko. Astronomi na primer, so pri proučevanju celostne podobe vesolja močno vezani na satelitsko tehnologijo, saj je Zemljina atmosfera neprozorna za velik del valovnih dolžin elektromagnetnega valovanja. Že vrsto let so člani skupine vključeni v uspešne vesoljske programe, kot so Rave, GAIA, Kepler, Planck, Swift in Fermi, pri katerih so ravno satelitski podatki in njihova obdelava ključni za pridobitev novega znanja o astrofizikalnih pojavih in vesolju nasploh. Skupina ima široko razpredene interese – od preučevanja najbolj energetskih eksplozij v vesolju do njegovega nastanka. Ukvarjajo se z izbruhi sevanja gama in opazovanjem njihovega izseva v optičnih in bližnjih infrardečih valovnih dolžinah, zanimajo jih kemična sestava in fizikalne lastnosti zvezd v naši galaksiji, ker to pomaga pri razkritju njenega nastanka. Lastnosti skupin tisočev galaksij in celostno podobo vesolja, njegov nastanek in evolucijo proučujejo s primerjavo simuliranih modelov vesolja z realnimi opazovanji.

Meteorologi so tudi redni in operativni uporabniki ogromne količine podatkov, pridobljenih s satelitov: npr. za vsako napoved vremena jih je uporabljenih več kot milijon – o tem glej članka Rakovec in Žagar, Oštir in sod. ter Žagar in sod. (2011, v tem zborniku). Podatke daljinskega zaznavanja uporabljamo tudi za opazovanje površja Zemlje, recimo pri spremljanju vegetacije in njenega razvojnega cikla, ocenjevanju rasti pridelkov in posledic suš, opazovanju stanja gozdov, opazovanju človeških posegov v prostor, ocenjevanju škode v okolju, spremljanju razvoja urbanih površin, opazovanju legalnih in nelegalnih odlagališč odpadkov, izdelavi digitalnih modelov višin in reliefa, kartiranju, izdelavi in hitremu posodabljanju topografskih in tematskih kart, opazovanju vodnih teles ter poplav (Oštir in sod., 2011, v tem zborniku), ocenjevanju posledic naravnih in antropogenih nesreč (npr. plazov, poplav, gozdnih požarov) itd.

## Zahvala

Članek je uvod v tri tematske prispevke v tem zborniku, ki so bili pripravljani v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI, ki je financiran s sredstvi Evropskih strukturnih skladov.

## Literatura

- Oštir, K., Kokalj Ž., Veljanovski T., Rakovec J., Žagar N. (2011): Uporaba satelitskega daljinskega zaznavanja za napovedovanje in opazovanje poplav, Zbornik predavanj, 16. strokovno srečanje SZGG, Ljubljana, str. 87-93.
- Rakovec, J. in Žagar N. (2011): Kaj vse za potrebe napovedovanja in opazovanja vremena in klime merimo s satelitov? Zbornik predavanj, 16. strokovno srečanje SZGG, Ljubljana, str. 69-78.
- Žagar N., J. Rakovec, G. Skok in L. Honzak (2011): Izzivi regionalnega klimatskega modeliranja. Zbornik predavanj, 16. strokovno srečanje SZGG, Ljubljana, str 79-86.



# Kaj vse za potrebe napovedovanja in opazovanja vremena in klime merimo s satelitov

Jože Rakovec\* in Nedjeljka Žagar\*

## Povzetek

Podan je pregled preko glavnih načinov merjenja meteoroloških spremenljivk na daljavo – s satelitov. Opisane so glavne lastnosti polarno-orbitalnih in geostacionarnih meteoroloških satelitov in merjenj z njih. Pri tem je razloženo, zakaj so ta merjenja – poleg kvalitete že močno izpopolnjenih meteoroloških numeričnih modelov za simuliranje dogajanj v ozračju – bistvena za kvaliteto in uspešnost vsakodnevnih operativnih napovedi vremena. Na kratko je tudi opisan zgodovinski razvoj na tem področju. Opisano je, kako lahko z radiometričnimi meritvami navzdol dobimo informacije o vertikalnem poteku temperature in vlažnosti zraka nad množico točk na Zemlji od tal pa tja do približno 50 km visoko nad tlemi. Taka merjenja omogoča dejstvo, da je emisivnost plinov v ozračju pri različnih valovnih dolžinah – poleg odvisnosti od temperature teh plinov – tudi nekoliko odvisna od tlaka teh plinov in s tem od višine, kjer se le-ti nahajajo – in to za vsako valovno dolžino malo drugače. S satelitov pa merimo tudi marsikaj drugega: npr. polje vetra v višinah na podlagi meritev premikanja oblakov ali pa vetra pri tleh nad oceani na podlagi meritev hrapavosti morske površine, vsebnosti ozona in drugih primesi v ozračju in še marsikaj.

## Uvod

Skoraj vsak odrasel človek pri nas ve, da meteorologija veliko uporablja podatke, dobljene s pomočjo satelitov. Vendar pa velika večina misli, da gre pri tem predvsem za slike – predvsem za slike oblačnosti. Te namreč vsak dan lahko vidijo npr. na televiziji. Toda tudi glede slik so ljudje rahlo v zmoti. Slike namreč izgledajo, kot da bi bile posnete v vidni svetlobi, kar pa nam ponoči ne bi nič pomagalo, ker je »ponoči vsaka krava črna«. Zato ker nas zanimajo razmere tudi ponoči, so od satelitskih slik najpomembnejše tiste, posnete v infrardeči (IR) »svetlobi«. Vse kar je na Zemlji, namreč seva (v skladu s Planckovim in Stefanovim zakonom), in to tem bolj, čim topleje je. IR sevanje omogoča, da senzorji na satelitih »gledajo« navzdol tako podnevi kot ponoči. Ker infrardeče svetlobe naše oči ne vidijo, meteorologi predelamo infrardeče slike tako, da so podobne slikam, ki bi jih videli podnevi ob sončni svetlobi. Le-ta se močno odbija od belih oblakov in od z ledom in snegom prekritih območij Zemlje, nekaj manj od rumenorjavih puščavskih predelov, še manj od zelenih območij, ki jih pokriva vegetacija, ali pa od temnomodrih oceanov. Tako so tudi na predelanih IR slikah mrzli vrhovi oblakov in ledeni predeli umetno pobarvani belo, pa čeprav ti – najbolj mrzli – predeli v resnici najmanj »svetijo« navzgor proti senzorjem na satelitih.

---

\* oba: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Oddelek za fiziko, Katedra za meteorologijo, Jadranska 19, Ljubljana in Center odličnosti Vesolje-SI, Aškerčeva 12, Ljubljana



Slika 1: Sedanji sistem satelitov, namenjenih opazovanju Zemlje. [Podrobneje](#) so predstavljeni samo meteorološki sateliti in tisti, ki so neposredno uporabni za meteorologijo. Tisti sateliti, ki krožijo nad ekvatorjem od zahoda proti vzhodu s točno tako hitrostjo, kot se pod njimi vrti Zemlja (na višini malo manj kot 35 tisoč km), so tako vedno nad istim predelom – zato jim rečemo geostacionarni sateliti. Sateliti na nižjih krožnicah (okrog 800 km visoko) krožijo okrog Zemlje hitreje (eno obkroženje Zemlje v kaki uri in pol), tako da ponavadi obkrožijo Zemljo večkrat dnevno z orbitami približno preko obeh polov – zato jim rečemo polarno-orbitalni sateliti. Vir: EUMETSAT, Copyright 2011 © EUMETSAT, iz [http://www.eumetsat.int/eps\\_webcast/eps/print.htm#s1p1](http://www.eumetsat.int/eps_webcast/eps/print.htm#s1p1) povzeto 3. 1. 2011.

### Pomembnost sondiranja skozi ozračje za napoved vremena

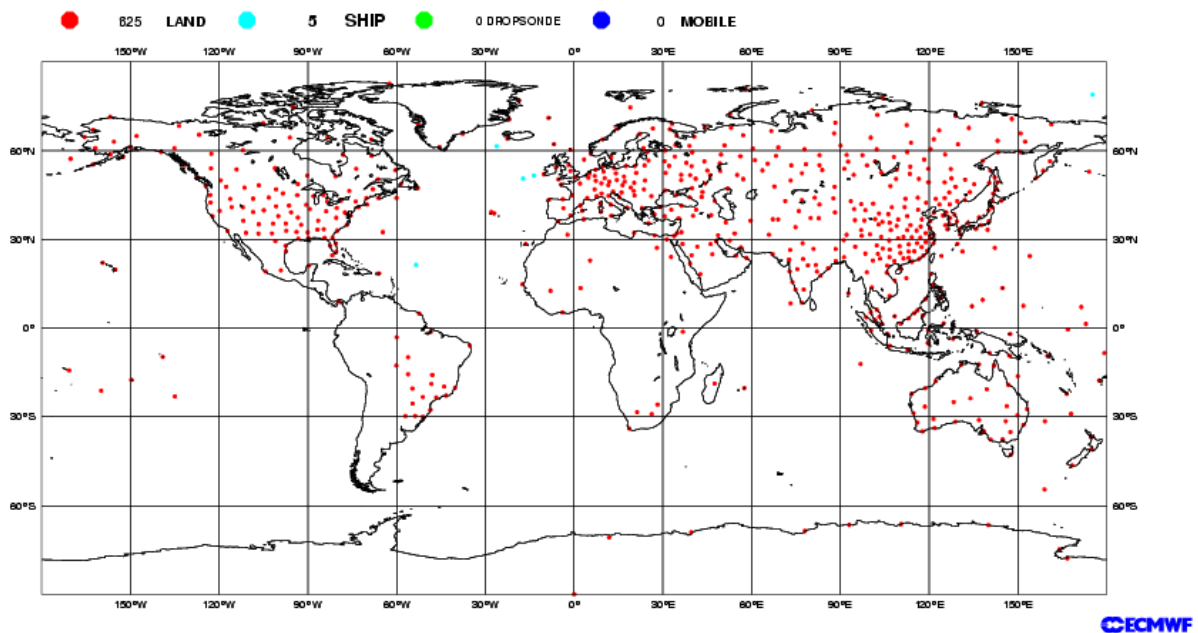
Vreme se spreminja predvsem v troposferi – v plasti ozračja, ki sega od tal pa tja do višine kakih 8 do 9 km nad polarnimi predeli in do višine kakih 15 do 16 km nad ekvatorialnimi predeli. V tej plasti npr. nastajajo oblaki in padavine. Toda tudi zračni tokovi v stratosferi imajo vpliv na troposfero. Zato moramo za potrebe napovedovanja vremena poznati razmere ne samo pri tleh, temveč po vsem ozračju – od tal skozi troposfero in stratosfero do višine dobrih 50 km nad tlemi. Kako dobiti podatke s teh višin, ki jih potrebujemo kot vhodne, začetne podatke za računanje vremenskih spremenljivk za teden ali največ dva tedna vnaprej?

Pred raketno in satelitsko dobo smo si pomagali samo z meteorološkimi instrumenti, ki so jih dvigali v višine zmaji, baloni ali letala. Tako zmaji kot letala in baloni s posadko so tedaj imeli precej omejeno zmožnost poletov visoko v ozračje. Poleg tega pa so se morale posadke najprej spustiti nazaj na tla ter nekako posredovati podatke tistim, ki so jih potrebovali – kar je pomenilo velike časovne zaostanke. Zato so bili ti podatki koristni predvsem za raziskave »a posteriori« in skoraj neuporabni za sprotne napovedi vremena. Pravi preboj glede meritev temperature, vlažnosti, zračnega tlaka in vetra navzgor skozi ozračje se je zgodil šele potem,



ko so Francoz Robert Bureau (1929), Rus Pavel Molčanov (1930) in Finec Vilho Väisälä (1931) ter še nekateri skonstruirali prve radiosonde (glej npr. Pitkanen, 1986), to je naprave, ki so izmerjene vrednosti sproti po radijski povezavi sporočale sprejemnim postajam na tleh. Predvsem je pomemben Väisälä, ki je leta 1936 ustanovil tudi podjetje za izdelavo radiosond ter s tem to napravo naredil široko uporabno. (Podjetje Väisälä je še danes eno od vodilnih proizvajalcev radiosond in drugih meteoroloških merilnih instrumentov.) Z radiosondami smo tako pričeli dobivati podatke približno do višine okrog 10 ali 15 km nad tlemi in predvsem na teh podatkih je slonela napoved vremena vse do dobe merjenja s satelitov. Tedanja (in še vedno tudi sedanja – kot kaže Slika 2) pomanjkljivost pa je bila (in je še), da radiosonde seveda spuščamo v zrak predvsem s kopnega, medtem ko so širni oceani, ki pokrivajo okrog 2/3 površja Zemlje, nepokriti s podatki – le tu in tam z radiosondo merijo s kakega otoka ali ladje.

**ECMWF Data Coverage (All obs DA) - TEMP**  
**04/JAN/2011; 00 UTC**  
**Total number of obs = 630**



Slika 2: Radiosondni podatki, uporabljeni v Evropskem centru za srednjeročno napoved vremena, za katero so izračun pognali 4. januarja 2011 ob 00 UTC: na razpolago je bilo 630 radiosondnih meritev in oceani so bili skoraj brez podatkov. (Poleg teh je bilo ob tej napovedi uporabljenih še 30440 meritev pri tleh, 9925 meritev na morskih bojah, 1716 meritev profilov vetra s tal, 42736 meritev, ki so jih opravila letala na svojih linijah, ter mnoge druge meritve s satelitov.) Vir: ECMWF, © ECMWF,

[http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w coverage!latest/](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w%20coverage!latest/) povzeto 4. 1. 2011.

Predhodnik sodobne napovedi vremena na osnovi računanja sprememb meteoroloških spremenljivk s pomočjo fizikalnih enačb je bil Norvežan Vilhelm Bjerknes. Kakšne so te enačbe? Npr. da pospeševanje zraka (in s tem spremembe vetra) povzročajo sile, ki delujejo na zrak. Ali pa, da povečanje temperature zraka povzročajo ali dovod toplote temu zraku ali

stiskanje zraka ali pa kondenzacija vodne pare, ki se v zraku spreminja iz plinastega stanja v tekoče kapljice. Take enačbe (le da s precej bolj podrobnim opisom dogajanj v ozračju) uporabljamo še danes. Prvi, ki je res naredil tak izračun, in to z “računanjem peš” – to pomeni s svinčnikom (in z radirko) na papir – pa je bil Anglež Lewis Fry Richardson (1922, 2007). On je seveda računal »za nazaj« – kajti računal je več mesecev, da je dobil rezultate za en dan vnaprej. Žal je bila Richardsonova napoved napačna. Meteorologi dolgo nismo zanesljivo vedeli, kaj je bil glavni vzrok za neuspeh. Šele leta 2000 je Peter Lynch iz Irske meteorološke službe (glje npr. Lynch, 2006) nedvoumno pokazal, da je Richardson uporabil prave enačbe, da je postopal pravilno, da se pri računanju ni niti enkrat zmotil – toda “pokopali” so ga premalo natančni začetni podatki (predvsem tisti o vetru v višinah). Napoved vremena je namreč odvisna od začetnih pogojev (torej od aktualnega vremena), ki jih pripravimo s pomočjo opazovanj. V postopku priprave začetnih pogojev (ti. asimilacije) je potrebno upoštevati dejstvo, da opazovanja in fizikalne enačbe niso perfektni. Zelo majhne napake pri obdelavi začetnih pogojev lahko zelo hitro naraščajo in »uničijo« napoved, tako kot se je zgodilo Richardsonu.

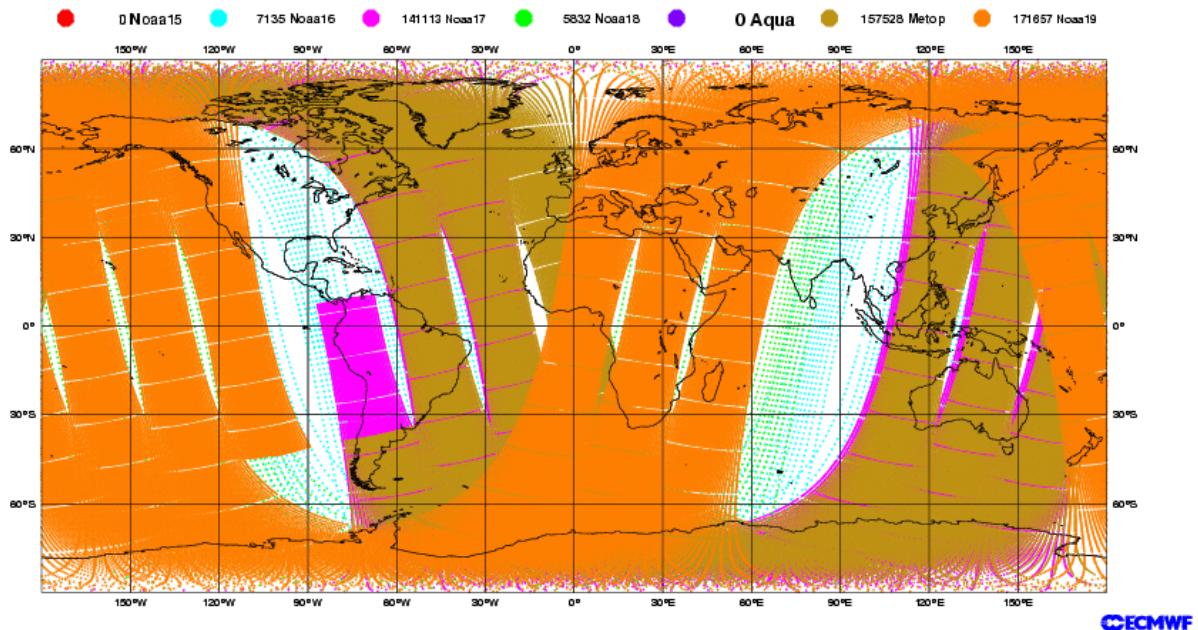
Šele po 2. svetovni vojni so potem meteorologa Jule Charney in Ragnar Fjörtoft ter matematik John von Neumann (1950) s pomočjo še nekaterih sodelavcev spet izračunali napoved vremena – tokrat s pomočjo računalnika ENIAC, ki so ga malo pred tem razvili v Penn State University. Za prvo uspešno numerično napoved vremena so bile sicer uporabljene filtrirane enačbe, ki so napovedovale gibanje vremenskih sistemov v srednji troposferi in možnost ciklonalnega razvoja, ampak niso omogočale opisa poteka vremena pri tleh.

Uspeh ENIAC-a je odprl novo dobo za napovedovanje vremena – z numeričnimi modeli ozračja. Računanje je z računalnikom potekalo dovolj hitro, da so bili rezultati uporabni za napoved za »naslednji dan«. In tako je ta metoda nekako okrog 1970 prevladala nad prejšnjo metodo. Istočasno so se meteorologi spet, tokrat uspešno, vrnil k napovedovanju vremena z osnovnimi enačbami, kakršne je uporabil Richardson. Ob tem pa se je postopoma pokazalo, da sta premajhna natančnost podatkov in predvsem nad oceani njihova daleč premajhna gostota, resni oviri za zanesljive napovedi za več kot dan ali dva vnaprej. Pokazala se je potreba po dodatnih podatkih, ki bi dovolj na gosto in primerno natančno pokrivali vse ozračje okrog in krog zemeljske oble od tal do velikih višin. Rešitev so bili radiometri na satelitih.

### **Meritve profilov temperature in vlažnosti navzdol skozi ozračje z radiometri na satelitih**

Danes so sateliti nepogrešljivi za potrebe napovedi vremena. V ECMWF so za že omenjeno napoved vremena uporabili skoraj milijon radiometričnih meritev s satelitov!

**ECMWF Data Coverage (All obs DA) - HIRS**  
**04/JAN/2011; 00 UTC**  
**Total number of obs = 483265**



Slika 3: Primer radiometričnih meritev navzdol skozi ozračje s satelitov: podatki, uporabljeni v Evropskem centru za srednjeročno napoved vremena, za katero so izračun pognali 4. januarja 2011 ob 00 UTC: na razpolago je bilo 483265 meritev v vidnem in infrardečem (IR) območju (merilnik HIRS) – gornja slika, poleg teh pa še preko 950000 radiometričnih podatkov v mikrovalovnem (MW) območju: za vertikalne profile temperature in vlažnosti zraka (merilnika AMSU-A,  $\lambda$  od 3,4 mm do 1,25 cm in AMSU-B,  $\lambda$  od 1,6 mm do 3,3 mm) s šestih satelitov, štirih NOAA 15-18, Aqua in Metop – skupaj torej več kot milijon podatkov za določanje profilov temperature in vlažnosti skozi ozračje. Bistvena je – poleg točnosti, ki je primerljiva s točnostjo radiosond – pokritost vsega ozračja krog in krog Zemlje od tal do zgornje stratosfere. Ločljivost po horizontali je 15 km za HIRS in AMSU-B in 48 km za AMSU-A, kar je za sondiranje temperature in vlažnosti dokaj zadovoljivo, saj se ti dve količini v višjih plasteh ozračja po horizontali le počasi spreminjata. (Poleg teh podatkov je bilo v isto napoved vključenih še okrog pol milijona satelitskih podatkov o hrapavosti morske površine – kar je odvisno od vetra pri tleh, nekaj manj kot 124000 podatkov o ozonu, pa podatki o zakasnitvi signalov GPS – kar je odvisno od vlažnosti v ozračju, ter malo manj kot 44000 podatkov izmerjenih v mikrovalovnem območju – podatki nad oceani in še drugi podatki s satelitov).

Vir: ECMWF, © ECMWF

[http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w\\_coverage!latest/](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w_coverage!latest/), povzeto 4. 1. 2011.

### Kako je mogoče s satelitov meriti profile temperature in vlažnosti skozi ozračje

V ozračju so poleg dvoatomnih dušika  $N_2$  in kisika  $O_2$ , ki predstavljata skoraj 99 % vse mase ozračja, tudi tri- in večatomni plini: vodna para  $H_2O$ , ogljikov dioksid  $CO_2$ , ozon  $O_3$  in še drugi plini, katerih molekule lahko na več načinov vibrirajo s takimi energijami, ki ravno

ustrezajo energijam posameznih kvantov elektromagnetnega valovanja (EMV) oz. fotonov v infrardečem in v mikrovalovnem območju. Kadar EMV spravi molekule v nihanje (glej npr. Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular\\_vibration](http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_vibration)) ali v vrtenje, se energija EMV pretvori v vibracijsko (ali rotacijsko) energijo nihanj oz. vrtenja teh molekul, kadar se vibriranje (ali pa vrtenje) ustavi, pa molekule oddajo to energijo. V prvem primeru gre za absorpcijo, v drugem pa za emisijo elektromagnetnega valovanja. To se dogaja pri posameznih valovnih dolžinah oz. frekvencah EMV – pri tistih, katerih energija ravno ustreza posameznim načinom vibracij ali rotacij. Ti plini torej absorbirajo in emitirajo predvsem infrardeče (IR) sevanje, pa tudi mikrovalovno sevanje (MW). Infrardeče sevanje pa je ravno tisto, ki ga (v skladu s Planckovim in Stefanovim zakonom) sevajo objekti, ki imajo temperaturo med 230 in 320 K – kar je približno temperatura v ozračju in pri tleh na Zemlji – vse okrog nas torej seva predvsem v infrardečem območju, gostota skupne izsevane moči  $j$  pa je po Stefanovem zakonu ( $j = \varepsilon \sigma T^4$ ) sorazmerna s (četrtto potenco) temperature tistega objekta, ki seva. Tu smo z  $\varepsilon$  označili emisivnost – to je stopnjo oddajanja sevanja glede na največje možno sevanje pri  $\varepsilon = 1$ . Plinom v ozračju, ki absorbirajo in sevajo IR sevanje, rečemo plini tople grede, saj bi brez absorpcije in emisije sevanje, ki ga navzgor oddajajo tla, šlo neovirano v vesolje in bi bilo pri tleh na Zemlji za okrog 35 °C hladneje, kot je sicer. Kisik O<sub>2</sub> pa npr. seva v mikrovalovnem območju (kar pa na toplo grede nima vpliva).

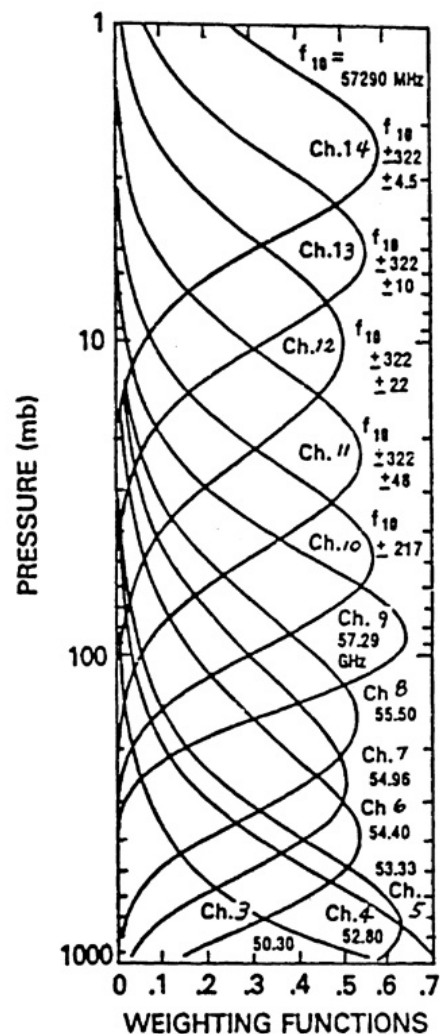
Lastnost absorpcije in emisije uporabljamo pri meritvah za potrebe meteorologije. Če senzor na satelitu – radiometer – »gleda« navzdol pri tisti valovni dolžini ali frekvenci, kjer ravno noben od plinov ozračja nič ne absorbira, torej neovirano »vidi« do tal. Od tam, kjer je topleje, prihaja s tal več energije. V infrardečem območju vse na tleh okrog nas v naravi (tudi mi sami) seva maksimalno: vse okrog nas ima emisivnost skoraj 1. Zato tak senzor dobiva največjo gostoto moči sevanja od najbolj toplih predelov na Zemlji – npr. od toplih tal v tropskih ali subtropskih predelih, najmanj pa od najbolj mrzlih predelov – to so ponavadi vrhovi visokih oblakov, ki imajo temperaturo okrog –55 °C.

Kaj pa, če bi imeli na satelitu radiometer, ki bi »gledal« navzdol ravno pri takšni valovni dolžini oz. frekvenci, pri kateri nek plin ozračja absorbira – ki je torej v resonanci s kakim od vibracijskih načinov? Tu je pomembno več stvari.

Najprej je važno, da je jakost absorpcije ali emisije sevanja nekoliko »razmazana« okrog resonančne valovne dolžine oz. frekvence. Za sondiranje profila temperatur navzdol skozi ozračje pa je še bolj pomembno to, da je širina absorpcijskega in emisijskega območja odvisna tudi od zračnega tlaka: pri nekih zračnih tlakih (in s tem na neki višini v ozračju) je absorpcija močnejša (območje absorpcije in emisije bolj široko), pri drugih pa šibkejša. In še najbolj bistveno: za različne valovne dolžine oz. frekvence so – k sreči! – te odvisnosti močnejše in šibkejše absorpcije različno odvisne od zračnega tlaka. Primer je na Sliki 4. Ta slika nam pove, da večina tistega sevanja, ki ga senzor AMSU-A zaznava npr. v svojem kanalu 3, izhaja iz ozračja prav blizu tal (ker ima krivulja za ta kanal maksimum pri tleh), večina tistega sevanja, ki ga zaznava npr. kanal 6, pa izhaja iz plasti zraka pri 400 hPa = 400 mbar, kar je na nadmorski višini okrog 7200 m. Tako vsak kanal senzorja AMSU-A »gleda« drugo plast ozračja.

Žal se – kot se tudi vidi iz Slike 4 – območja močnejše absorpcije za posamezne kanale raztezajo preko precej širokih območij zračnih tlakov oz. višin v ozračju in žal se medsebojno tudi prekrivajo. Tako ne moremo reči, da npr. kanal 6 »gleda« v plast pri 400 hPa in nikamor drugam, npr. kanal 5 pa samo v plast pri 700 hPa. Velja: kanal 6 sicer najbolj zaznava sevanje, ki izhaja iz plasti pri 400 mbar, toda zaznava pa tudi kar precej sevanja, ki izhaja iz višjih in nižjih plasti ozračja. Zaradi tega prekrivanja je potrebno precej dodatnega truda, da iz sedmih izmerjenih jakosti sevanja, ki pridejo v sedmih kanalih do satelita, izluščimo potek temperature z višino  $T(z)$ . (Pri tem uporabljamo še druge kanale – predvsem nekatere kanale senzorja HIRS v infrardečem območju, pa tudi še druge informacije.) Kljub vsem naštetim in

še nekaterim težavam pa je dandanes merjenje profila temperature skozi ozračje s satelitov enako točno, kot so merjenja z radiosondami. Bistvena prednost pa je, da z merjenji s satelitov pokrivamo praktično celo zemeljsko ozračje, medtem ko so radiosondne postaje predvsem nad oceani hudo, hudo redko posejane (kot smo pokazali na Sliki 2).



Slika 4: Tim. funkcije občutljivosti za radiometer AMSU-A: odvisnost moči absorpcije in emisije je odvisna tudi od tlaka, torej od višine, iz katere izhaja sevanje, ki ga zaznava radiometer na satelitu – in to za vsako valovno dolžino oz. frekvenco drugače! Na sliki so funkcije občutljivosti za kanale 3 do 14 radiometra AMSU-A v mikrovalovnem območju od 50,30 GHz do 57,29 GHz, to je v območju milimetrskih valovnih dolžin od  $\lambda = 5,96$  mm do  $\lambda = 5,24$  mm), iz NASA GSFC [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/images/AMSU\\_WGT.TIF](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/images/AMSU_WGT.TIF), povzeto 4. 1. 2011.

Jakost sevanja iz posamezne plasti ozračja je, kot smo povedali, odvisna od četrte potence temperature tiste plasti zraka. Poleg tega pa je jakost odvisna tudi od tega, koliko je v plasti plina, ki seva. Ker sta npr.  $O_2$  ali pa  $CO_2$  v ozračju dobro premešana, je njuna koncentracija povsod po ozračju dokaj enaka. Torej za sevanje, ki ga oddajata  $O_2$  ali  $CO_2$ , ni treba upoštevati njune koncentracije in tako ostane samo odvisnost od temperature – ta omogoča

merjenje profila temperature skozi ozračje, kot smo povedali v prejšnjem poglavju<sup>1</sup>. Zelo močan sevalec v območju IR in MW pa je tudi vodna para H<sub>2</sub>O. Količina vodne pare se spreminja iz dneva v dan in iz kraja v kraj. Zato je močnejše ali šibkejše sevanje iz plasti odvisno ne samo od temperature (ki jo sedaj že poznamo), temveč tudi od tega, ali je v tisti plasti več ali manj vodne pare. Tako uporabimo informacije o sevanju v kanalih 10, 11, in 12 senzorja HIRS ( $\lambda = 8,2 \mu\text{m}$ ,  $7,3 \mu\text{m}$  in  $6,7 \mu\text{m}$ ) ter kanalih 1 do 4 senzorja AMSU-A v mikrovalovnem območju ( $\lambda = 12,6 \text{ mm}$ ,  $9,55 \text{ mm}$ ,  $5,96 \text{ mm}$  in  $5,68 \text{ mm}$ ) za to, da iz sevalnih podatkov določimo tudi potek vlažnosti z višino.

### Meritve z geostacionarnih satelitov

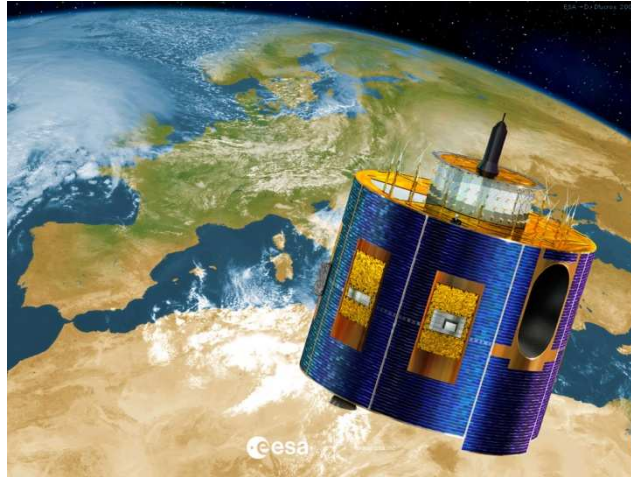
Geostacionarni sateliti so ves čas nad istim predelom Zemlje, zato območje pod njimi lahko pregledujemo zelo pogosto – npr. na vsakih 15 minut. Taka možnost je pomembna za sprotno spremljanje razvoja vremena in za hitro opozarjanje na morebitne vremenske nevarnosti. Seveda je tudi pri geostacionarnih satelitih najpomembnejša informacija v IR delu spektra: v tem območju EMV lahko senzorji na satelitih »vidijo« navzdol tudi ponoči. Toda na sodobnih geostacionarnih satelitih je ne samo en IR senzor, ampak jih je dosti več. Z njimi predvsem merimo temperaturo oblakov, tal in morske površine, merimo hitrost premikanja oblakov in še marsikaj. Eden takih je Meteosat Second Generation, ki ga je po naročilu EUMETSAT izdelala in lansirala Evropska vesoljska agencija ESA in ga potem predala v upravljanje naročniku. Je v obliki 2,4 m visokega valja s premerom 3,2 m, ki se vrti okrog svoje osi, ki je vzporedna osi vrtenja Zemlje. Tako ob vrtenju »gleda« vse bolj in bolj v levo – vse bolj na zahod in potem, ko se zavrti skoraj za en krog, spet iz desne smeri – od vzhoda, spet vse bolj navpično navzdol.

Glavni senzor na njem je dvanajstkanalni snemalnik v vidni in IR svetlobi (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager - SEVIRI), ki ob vrtenju celega satelita lahko »gleda« tudi bolj proti severu ali pa bolj proti jugu. Tako vsakih 15 minut »pregleda« ozračje in tla pod njim – npr. temperaturo oblakov, tal in površine oceanov na skoraj polovici zemeljske oble. (Prav na severni in južni polarni predel pa ne »vidi«, ker je pač Zemlja okrogla.) Njegova ločljivost je najboljša, kadar gleda navpično navzdol, in sicer tedaj za opazovanja v vidni svetlobi znaša 1 km, kar je za satelit v visoki orbiti skoraj 35 tisoč km nad tlemi zelo dobra ločljivost. Meri tudi vsebnost ozona v zraku, omogoča pa tudi merjenje vertikalnih profilov temperature in vlažnosti skozi ozračje.

Poleg sondiranja ozračja po višini, s čimer se dopolnjuje podatke, dobljene s polarno orbitalnih satelitov, pa novi podatki na vsakih 15 minut omogočajo sledenje nevarnim vremenskim dogajanjem in omogočajo opozarjanje nanje. Za preučevanje klime in njenih sprememb pa so pomembni podatki merilnika sevalne bilance Zemlje (Geostationary Earth Radiation Budget – GERB), ki meri koliko sočne energije se odbije od Zemlje nazaj v vesolje in koliko seva naš planet v IR delu spektra.

---

<sup>1</sup> V resnici se vsebnost CO<sub>2</sub> v ozračju tudi nekoliko spreminja preko letnih časov in iz kraja v kraj ter na splošno povečuje iz desetletja v desetletje. Zato primerjava različnih podatkov o sevanju CO<sub>2</sub>, kot so ga izmerili s satelitov, pomaga določati količino tega plina v ozračju.



Slika 5: Geostacionarni satelit Evropske organizacije za uporabo meteoroloških satelitov EUMETSAT druge generacije MSG ESA/D.Ducros 2002  
[http://esamultimedia.esa.int/images/downloads/msg-2/wallpapers/msg-2\\_02\\_WP02.jpg](http://esamultimedia.esa.int/images/downloads/msg-2/wallpapers/msg-2_02_WP02.jpg),  
 povzeto 5. 1. 2011.

Uporabnost marsikaterega načina merjenja s pomočjo meteoroloških satelitov je večkratna: npr. podatki o stanju vegetacije ali odbojnosti tal za sončno svetlobo, ali pa o zalogi vode v tleh, so pomembni za meteorologijo. Toda zelo pomembni so ti podatki tudi v kmetijstvu, ekonomskem načrtovanju in še marsikje (glej npr. Oštir in sod., 2011, ta zbornik). Za tiste, ki jih zanimajo podrobnosti, je na svetovnem spletu prosto dostopna npr. publikacija svetovne meteorološke organizacije WMO: The Space-based Global Observing System in 2010 - <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/Techdocuments.html> z mnogimi povezavami na tehnične lastnosti posameznih satelitov in senzorjev na njih. Zelo informativna je tudi domača stran Evropske agencije za uporabo meteoroloških satelitov EUMETSAT <http://www.eumetsat.int/Home/Main/AboutEUMETSAT/index.htm> in še marsikaj se najde.

### **Zaključne pripombe**

Po zaslugi satelitskih meritev so napovedi vremena danes enako kvalitetne nad morjem in kopnim, na južni in severni polobli. Še pred nekaj leti je bila kvaliteta napovedi na južni polobli slabša zaradi pomanjkanja podatkov za pripravo začetnih pogojev. Tudi nad območjem Slovenije so satelitske meritve ozračja pomembne, ker konvencionalnih meritev skozi ozračje nad nami ni veliko. Npr. edine meritve vetra nad tlemi v Sloveniji se opravljajo ob 3 zjutraj v Ljubljani. Kot omenjeno, satelitske meritve danes predstavljajo okoli 95 % vseh podatkov, uporabljenih za numerično napovedovanje. Napovedi so pa vseeno včasih že čez nekaj dni, vsekakor pa čez en teden ali dva neuporabne, kar je posledica napak v začetnih pogojih, modelskih napak in hidrodinamične nestabilnosti toka v ozračju. Izboljšave napovedi so možne na vseh treh področjih.

Znotraj meteorološkega delovnega sklopa v Centru odličnosti Vesolje-SI se ukvarjamo z uporabo satelitskih meritev v meteorologiji in klimatologiji. Posebna naloga je povezana z razumevanjem lastnosti prognostičnih napak. Ta informacija je vgrajena v proces priprave začetnih pogojev, v ti. asimilacijo podatkov. V procesu asimilacije se opazovanja in modelska informacija kombinirajo tako, da se upoštevajo lastnosti njihovih napak. Upoštevanje oz. predstavljanje napake napovedi je izredno pomemben del postopka asimilacije. Ker prave

resnice ne poznamo, lahko napake napovedi kvečjemu modeliramo. Zato bo boljše razumevanje napak napovedi pomagalo k izboljšanju napovedi skozi izboljšane začetne pogoje.

Vpliv začetnih pogojev je še posebej pomemben v primeru izrednih vremenskih pojavov v mezoskali, kot so močne padavine ter nevihtni procesi z viharnim vetrom in točo. Omenjeni vremenski pojavi se v razgibanem reliefu Slovenije na stičišču vplivov Alp in Sredozemlja pojavljajo še posebej pogosto. Vremena nad Slovenijo ni mogoče napovedovati brez razumevanja procesov nad Evropo in Atlantikom ter za daljše napovedi brez razumevanja globalnih procesov, njihove dinamike in napak njihovih napovedi. Zato se raziskovalno usmerjamo na različne prostorske skale, pri čemer uporabljamo globalne in regionalne modele. Regionalni modeli, kot je ALADIN-SI, ki dajejo prostorske podrobne rezultate, so odvisni od začetnih in robnih pogojev (glej članek Žagar in sod., 2011, v tem zborniku), ki jih pridobijo iz globalnega modela. Satelitske meritve v regionalnih modelih tako vplivajo na rezultate napovedi z modeli na več načinov: z modelskimi lastnimi začetnimi pogoji ali pa z v model iz globalnega modela vpeljanimi začetnimi pogoji ter preko stranskih robnih pogojev, pridobljenih iz globalnih modelov.

## Zahvala

Priprava članka je bila narejena v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI, ki je financiran s sredstvi Evropskih strukturnih skladov.

## Literatura

Jule G. Charney, Ragnar Fjörtoft and John von Neumann, (1950): Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation, *Tellus*, **2**, 237-254.

ECMWF:

[http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w\\_coverage!latest!/](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w_coverage!latest!/) © ECMWF, povzeto 4. 1. 2011.

ECMWF:

[http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w\\_coverage!latest!/](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w_coverage!latest!/) © ECMWF, povzeto 4. 1. 2011.

ESA: [http://esamultimedia.esa.int/images/downloads/msg-2/wallpapers/msg-2\\_02\\_WP02.jpg](http://esamultimedia.esa.int/images/downloads/msg-2/wallpapers/msg-2_02_WP02.jpg), ESA/D.Ducros 2002, povzeto 5. 1. 2011.

EUMETSAT: [http://www.eumetsat.int/eps\\_webcast/eps/print.htm#s1p1](http://www.eumetsat.int/eps_webcast/eps/print.htm#s1p1), Copyright 2011 © EUMETSAT, povzeto 3. 1. 2011.

EUMETSAT: <http://www.eumetsat.int/Home/Main/AboutEUMETSAT/index.htm>.

Peter Lynch, (2006): *The emergence of numerical weather prediction : Richardson's dream*. Cambridge [etc.] : Cambridge University Press, XII + 279 str., ISBN978-0-521-85729-1,

NASA, Goddard Space Flight Center: [http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/images/AMSU\\_WGT.TIF](http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/images/AMSU_WGT.TIF), povzeto 4. 1. 2011.

Krištof Oštir in sod., (2011): Uporaba satelitskega daljinskega zaznavanja za napovedovanje in opazovanje poplav. Zbornik predavanj, 16. strokovno srečanje SZGG, Ljubljana, str. 87-93.

Hannu Pitkanen, (1986): *Fifty years of environmental measurement : Vaisala 1936-1986*, Helsinki : Vaisala Oy, 110 str., ISBN951-99765-5-8, COBISS.SI-ID31401.

Lewis Fry Richardson, (1922), 2. izdaja 2007: *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge, Cambridge University Press, (Cambridge Mathematical Library), 250 str. ISBN 0521680441, (ISBN13 9780521680448).

Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular\\_vibration](http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_vibration).

WMO: <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/Techdocuments.html>.



# Izzivi regionalnega klimatskega modeliranja

Nedjeljka Žagar, Jože Rakovec, Gregor Skok in Luka Honzak\*

## Povzetek

Članek predstavlja izzive povezane z regionalnim klimatskim modeliranjem s poudarkom na procesu povezovanja regionalnega in globalnega klimatskega modela in na oceni nedoločenosti modelskih rezultatov. Predstavljene so tekoče raziskave na tem področju v Sloveniji v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI.

## Uvod

Novoustanovljeni *Centru odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije (Vesolje-SI)* združuje slovenske raziskovalce na področjih daljinskega zaznavanja, meteorologije, astrofizike in različnih področij tehnologij mikro in nano satelitov, satelitskih komunikacij, hibridnih anten in radarskih tehnologij ter laboratorija za testiranje vesoljskih tehnologij (<http://www.space.si>). Namen meteorološkega delovnega sklopa je vključitev satelitskih meritev v meteorološke in klimatološke raziskave v Sloveniji. Raziskovalno delo je razdeljeno na tri naloge: uporaba in verifikacija vremenskih in klimatskih modelov, raziskave napovedljivosti in modelskih napak ter klimatske raziskave. V tem članku bomo predstavili izzive, povezane s klimatskim raziskovanjem v visoki ločljivosti.

## Napovedljivost

Meteorološko modeliranje je predvsem napovedovanje. Minilo je 60 let, odkar je bila pripravljena prva objektivna (numerična) vremenska napoved. Prva napoved je bila narejena z uporabo barotropne enačbe vrtinčnosti, ki opisuje advekcijo geopotenciala v srednji troposferi in kot takšna pove zelo malo o vremenu pri tleh. Danes so napovedi vremena za nekaj dni naprej na skalah nekaj sto km precej uspešne. Tipičen primer uspešne napovedi so napovedi poplav septembra 2010 v Sloveniji (Oštir, 2011). V ozadju kvalitetne napovedi so: dober model za pripravo začetnih pogojev in za napovedovanje, veliko kvalitetnih opazovanj za pripravo začetnih pogojev in zmogljiv računalnik. Vseeno so napovedi vremena za več kot nekaj dni neuporabne, kar je posledica napak v začetnih pogojih, modelskih napak in hidrodinamične nestabilnosti toka v ozračju. Nestabilnost toka pomeni, da je numerični rezultat občutljiv na majhne razlike v začetnih pogojih, kakršne so npr. posledica napak opazovanj. Zato pravimo, da je napovedovanje vremena problem začetnih pogojev. Dolgoročne napovedi (daljše od deset dni), kot so mesečne, sezonske, večletne napovedi in napovedi klime so problem robnih pogojev. Za klimo je vreme šum. Do posameznega skupnega signala, ki je posledica določenih procesov, se pride s povprečevanjem mnogih simulacij (trajektorij). Modelerji klime povprečujejo rezultate več zagonov, in sicer ne zaradi tega, ker vreme ni pomembno, ampak da pridejo do robustne ocene obravnavanega signala.

---

\* vsi: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Oddelek za fiziko, Katedra za meteorologijo, Jadranska 19, Ljubljana, in Center odličnosti Vesolje-SI, Aškerčeva 12, Ljubljana

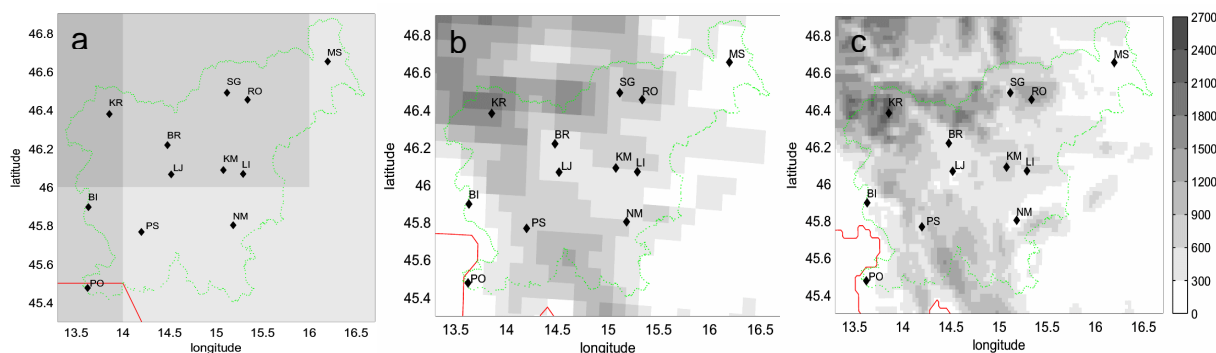
Za razliko od dosedanjih poročil Medvladnega panela za klimatske spremembe IPCC (<http://www.ipcc.ch>), ki so govorila o projekcijah klime v primeru določenih scenarijev emisij (in ne o napovedih klime), bo naslednje poročilo (poročilo znano kot AR5) vsebovalo, poleg projekcij klime za obdobje 2100 in naprej, tudi napovedi klime za prihodnja desetletja. Časovna skala nekaj deset let je potrebna za sprejemanje odločitev in ukrepov. Napovedi in projekcije bodo pripravljene z izboljšanimi modeli glede na prejšnje poročilo AR4. Znanstveniki (npr. Trenberth, 2010) pa opozarjajo, da bo nedoločenost v napovedih in projekcijah klime v AR5 veliko večja kot v dosedanjih poročilih. Logični sklep bi bil, da bi se istočasno z naraščanjem razumevanja in znanja o različnih faktorjih, ki vplivajo na klimo, nedoločenost zmanjševala, toda z vedno boljšim razumevanjem klime tudi bolj natančno razumemo dejavnike, ki jih doslej nismo upoštevali in/ali se jih sploh zavedali.

### Modelska ločljivost in regionalno klimatsko modeliranje

Horizontalna ločljivost modelov, uporabljenih v poročilu IPCC AR4, je bila med 125 km in 400 km. Klima Slovenije je tako v dosedanjih modelih IPCC pod mrežni proces. Pri tej ločljivosti eksplicitna predstavitev marsikaterih za klimo pomembnih fizikalnih procesov ni možna, takšni procesi so nujno parametrizirani ali zanemarnjeni.

Večina študij vpliva klimatskih sprememb, ki so posledica človeškega vpliva na ozračje, zahteva veliko večjo ločljivost, kot jo ponujajo globalni klimatski modeli. Zato je potrebno ločljivost modelskih rezultatov izboljšati na fizikalno pravilen način. Postopek je znan kot dinamično povečevanje modelske ločljivosti (ang. downscaling) in ima namen priti s skale, ki jo uporablja globalni klimatski model (ang. global climate model, GCM), na skalo potrebno za oceno učinkov oz. za politične odločitve, s pomočjo regionalnega klimatskega modela (ang. regional climate model, RCM).

Globalni klimatski model priskrbi spodnje pogoje (vlago in toploto v tleh, temperaturo površine morja, morski led), stranske meteorološke robne pogoje (ang. lateral boundary conditions, LBC) na približno vsakih 6 ur in odziv procesov velikih skal (okoli 100 in več km) na naravno in antropogeno siljenje sistema. Regionalni klimatski model pa producira podroben odziv na skalah okoli 10 km. Fizikalni motivi za regionalno modeliranje so še posebej močni za majhna območja z nepravilno obliko, območja s kompleksno orografijo, kompleksno obalo ter heterogenimi kopenskimi površinami. Rezultati RCM se uporabljajo kot vhodni parametri za druge modele (npr. modele onesnaženja) na še večji ločljivosti in za oceno odziva klime na siljenja na visoki ločljivosti (npr. orografija). Primer vpliva izboljšane ločljivosti na predstavitev orografije Slovenije v modelih je prikazan na Sliki 1.



Slika 1. Orografija Slovenije, kot jo »vidijo« numerični modeli ozračja na ločljivosti (a) okoli 120 km, (b) okoli 10 km in (c) 2.5 km. Barvna skala (v metrih) je enaka na vseh slikah.

Prikazane so lokacije nekaterih postaj na orografsko različnih območjih v različnih modelih. Slika levo ustreza ločljivosti današnjih klimatskih modelov, ki bodo uporabljeni za AR5.

Dinamično povečevanje horizontalne ločljivosti za potrebe napovedovanja vremena se uporablja že dalj časa, uporaba za klimatsko modeliranje je stara okoli 20 let (Dickinson, 1989). Danes obstajajo številni RCM in skupine, ki se ukvarjajo z regionalnim klimatskim modeliranjem; npr. v evropskem projektu ENSEMBLES je na temo klimatskega modeliranja sodelovalo 60 partnerjev, ki so uporabljali okoli 20 različnih regionalnih klimatskih modelov (<http://ensembles-eu.metoffice.com/participants.html>). Skupni viri napak GCM in RCM so posledica numeričnega reševanja enačb, omejene ločljivosti, parametrizacije pod mrežnih fizikalnih procesov in dejstva, da so nekateri vplivi v enačbah kljub vsemu opisani le približno. Dodatni viri napak v RCM, ki jih GCM nima, so velikost domene, metoda gnezdenja, razlika v ločljivosti med globalnim in regionalnim modelom, pogostost uporabe stranskih robnih pogojev in napake v njihovi uporabi.

Posebna težava z RCM je njihova verifikacija. GCM se verificirajo s pomočjo reanaliz, ki nimajo dovolj velike ločljivosti za verifikacijo regionalnih modelov. Istočasno je mreža opazovanj na večjem delu sveta preredka za direktno primerjavo RCM. Satelitska opazovanja ponujajo različne možnosti verifikacije, njihova uporaba v ta namen pa zahteva previdnost. Problem verifikacije postaja vedno bolj pomemben, ker ločljivost regionalnih modelov ves čas narašča.

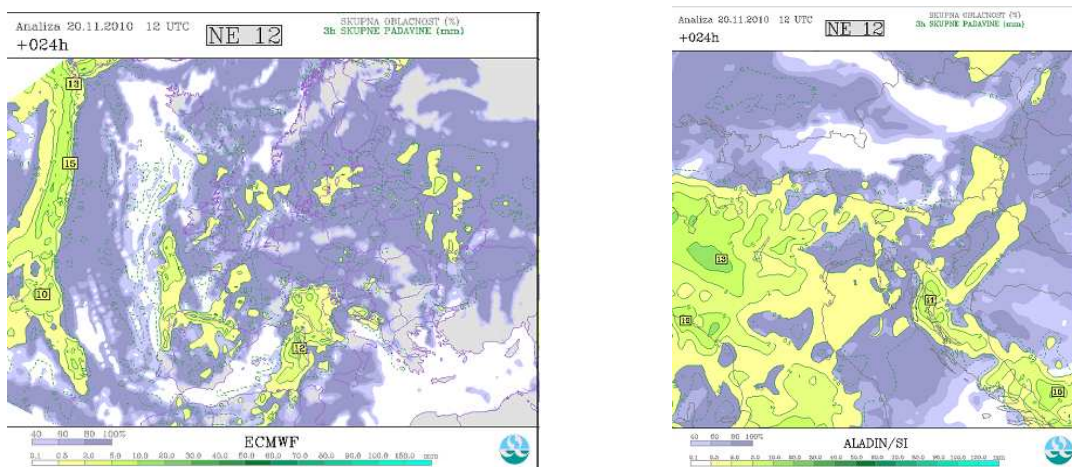
### **Načelo povečevalnega stekla**

Postopek zvišanja ločljivosti je podoben povečevalnem steklu. Laprise in sod. (2008) so obravnavali pet osnovnih načel pri postopku zviševanja ločljivosti. Predpostavlja se veljavnost nekaterih fizikalnih principov, čeprav njihova veljavnost ni natančno potrjena:

1. RCM so sposobni generirati procese na skalah, ki jih globalni model, uporabljen za stranske pogoje, nima.
2. Proces, generirani na manjših skalah, imajo pravo amplitudo in klimatsko statistiko.
3. Proces, generirane v manjših skalah, bi globalni model reproduciral, če bi le imel zadostno ločljivost.
4. Proces, generirani v manjših skalah, so za uporabljene stranske pogoje enolično definirani.
5. Proces, velikih skal (ki so rezultat GCM) v domeni RCM znotraj domene RCM v principu ostanejo nespremenjeni.

Nobenega od načel ni mogoče povsem potrditi ali ovreči. Najbolj natančna ocena njihove točnosti se dobi s pomočjo simulacij, v katerih se predpostavi, da je model perfekten, oz. se stanje ozračja simulira na visoki ločljivosti z istim modelom, ki se potem uporabi za testiranje naštetih predpostavk. Simulacija visoke ločljivosti predstavlja simulirano »resnico« in služi za verifikacijo simulacije na omejenem območju. Če se iz te simulacije filtrirajo majhne skale in se polja uporabijo kot stranski pogoji za simulacijo RCM, primerjava rezultatov simulirane »resnice« in polj pridobljenih iz simulacije RCM,

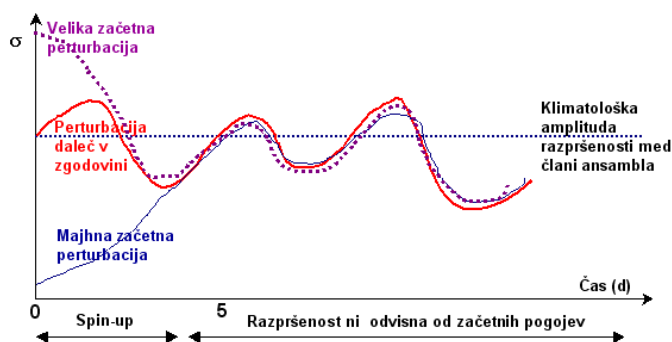
omogoča določanje napak, ki so izključno posledica metode gnezdenja in so neodvisne od modelskih napak in napak v LBC (Laprise in sod., 2008).



Slika 2. Napoved 3-urnih padavin z (levo) modelom ECMWF, ki ima horizontalno ločljivost okoli 16 km in (desno) z modelom ALADIN-SI s 4,4 km mrežo, in s stranskimi pogoji iz modela ECMWF. Napoved padavin nad Slovenijo in okolico je precej različna in ne glede na njeno kvaliteto lahko opazimo, da model z višjo ločljivostjo poda več detajlov, še posebej tistih, ki so orografsko pogojeni. Vir: ARSO.

Najlažje je preveriti prvo načelo, saj ga ves čas uporabljamo pri pripravi vremenskih napovedi visoke ločljivosti. Primer na Sliki 2 je sicer predstavljen za vremensko skalo, toda enaka predpostavka velja na vse časovne skale.

Načeli 2 in 3 na splošno veljata v zmernih geografskih širinah pod pogoji, da je domena dovolj velika, sicer močan tok v višinah lahko »odpihne« dogajanja manjših skal iz domene, še preden pride do ravnovesja. Načelo 3 na splošno ne drži za vremensko skalo, kar pa za klimatsko modeliranje (statistiko) ni težava težave. Sicer sta ti dve načeli testirani v prej opisanem idealiziranem eksperimentu, če privzamemo, da ni modelskih napak in so LBC perfektni.



Slika 3. Časovni potek razpršenosti med člani ansambla simulacij narejenih z enakimi stranskimi robnimi pogoji (prirejeno po Laprise in sod., 2008)

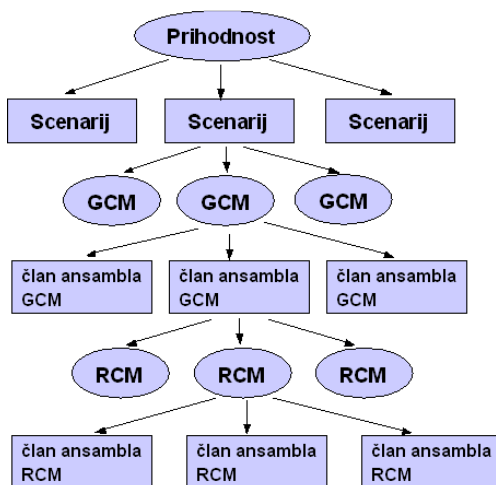
Načelo 4, ki pravi, da so generirani procesi manjših skal enolično definirani za uporabljene stranske pogoje, ne drži in je najbolj pogosto narejena napaka pri klimatskem modeliranju. Predpostavka enolične rešitve na omejenem območju bi pomenila, da ni

lastne (notranje) variabilnosti RCM. Za identične robne pogoje pa obstaja razpršenost RCM. Zato posamezna klimatska simulacija ne pove veliko, če je ne spremlja ocena njene nedoločenosti, ki se pridobi iz ansambla simulacij. V primeru poročila IPCC oz. globalnih klimatskih modelov se povprečevanje naredi preko vseh uporabljenih modelov. Sicer pa ima vsak model lastno notranjo variabilnost in bi v idealnem primeru vsak GCM potreboval lasten ansambel simulacij za oceno lastne notranje variabilnosti. Potrebno je še omeniti, da je zaradi LBC notranja variabilnost za RCM vsekakor manjša kot naravna variabilnost.

Pri petem načelu v primeru perfektnega globalnega modela velike skale ostanejo nespremenjene, kar je tudi nujen test za uporabnost regionalnega modela. Za neperfekten model to še vedno drži in se napake LBC v RCM reproducirajo z enako amplitudo. Sicer obstajajo študije, ki trdijo nasprotno: da se velike skale iz LBC poslabšajo oz. izboljšajo v domeni RCM.

Diskusija načelnega pristopa povečevalnega stekla sloni na ideji perfektnega modela in LBC. V resničnih aplikacijah pa se ukvarjamo s problemom stranskih robnih pogojev slabe ločljivosti in z napakami. Poleg tega uporabljamo tudi RCM z napakami različnih vrst ter z napakami LBC na robovih.

V idealnem primeru klimatsko modeliranje v visoki ločljivosti poteka na način, predstavljen na Sliki 4. Takšen potek je uporabljen v ravnokar končanem projektu EU ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>), pri katerem so se številne evropske institucije združile z namenom izboljšanja modeliranja evropske klime v prihodnjih desetletjih in zmanjševanja nedoločenosti rezultatov klimatskih napovedi.

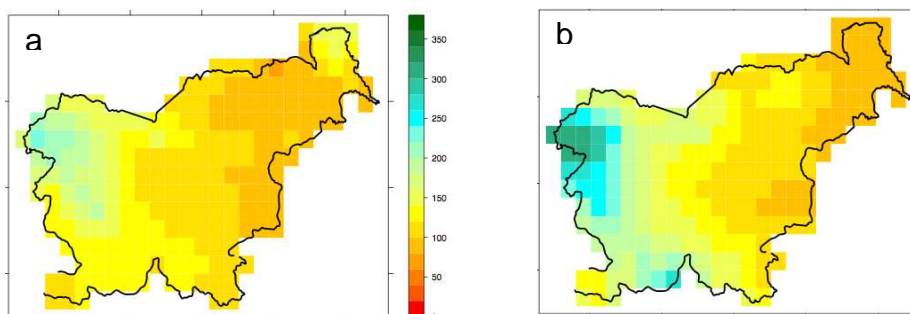


Slika 4. Potek procesa regionalnega klimatskega modeliranja zahteva ansambel simulacij, ki bo določil notranjo variabilnost modela in oceno nedoločenosti, povezano z nedoločenostjo stranskih robnih pogojev.

### Regionalno klimatsko modeliranje v Sloveniji

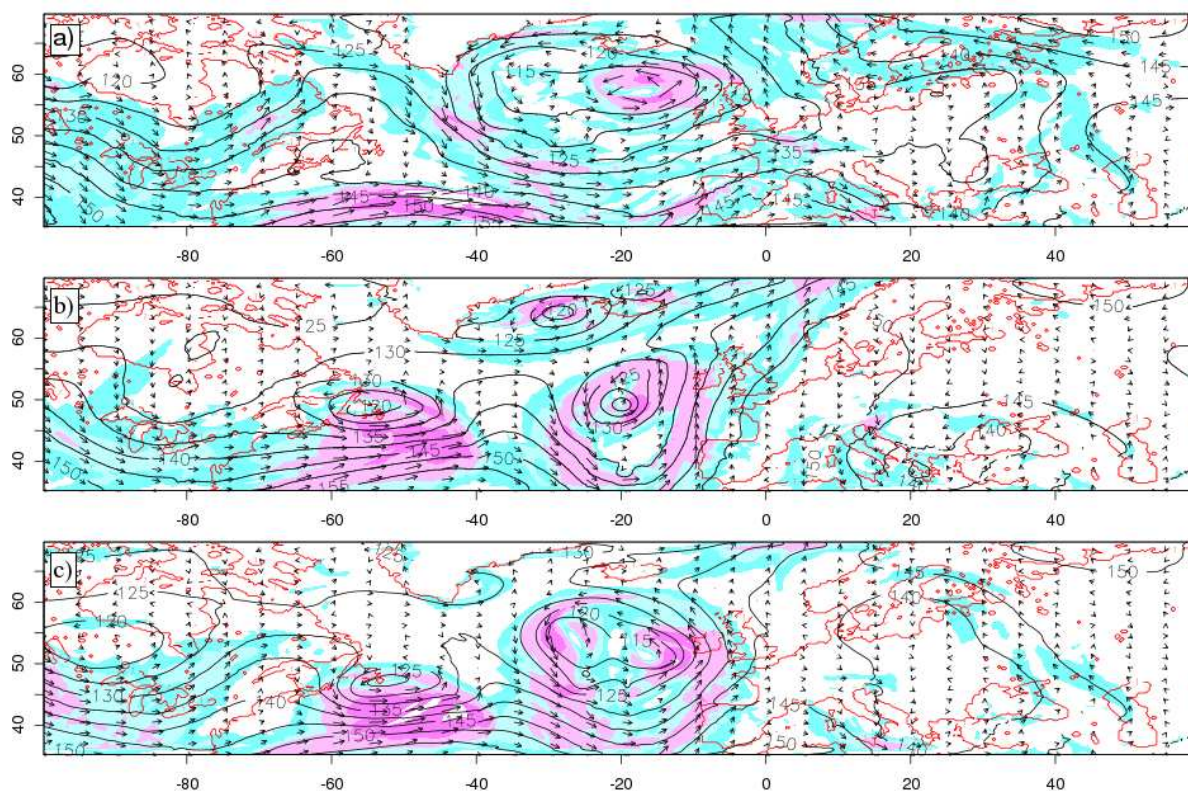
V projektu “Konkurenčnost Slovenije 2006-2013: Numerično modeliranje podnebja z visoko ločljivostjo za pripravo scenarijev podnebnih sprememb v Sloveniji za 21. stoletje“ (nosilci projekta: K. Bergant, M. Žagar, J. Rakovec) so bili verificirani rezultati regionalnega klimatskega modela RegCM3 na območju Slovenije za sedanjo klimo, obdobje 1961-1990. V drugem delu so modelski rezultati za sedanjo klimo primerjani s klimo v prihodnjih obdobjih 2021-2050 in 2071-2100. Stranski robni pogoji so pridobljeni

iz GCM ECHAM4. Slika 5 prikazuje primerjavo izmerjenih mesečnih povprečnih padavin v Sloveniji z modelskimi rezultati, povprečenimi za isto 30-letno obdobje in interpoliranimi v pravilno mrežo ločljivosti  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ .



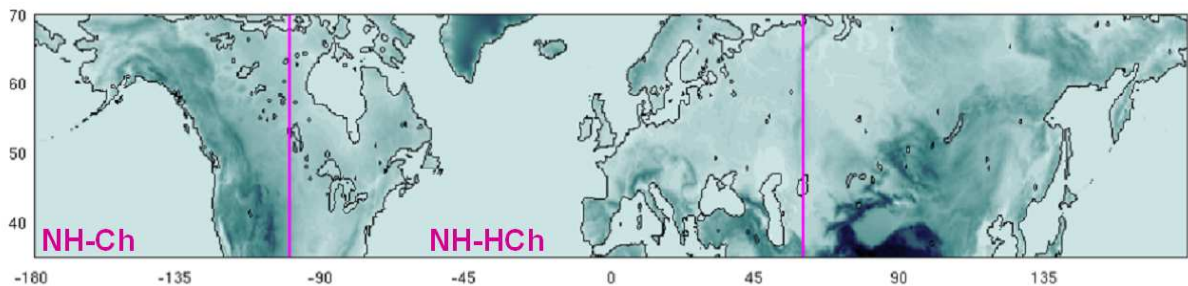
Slika 5: (a) Izmerjene mesečne povprečne padavine v Sloveniji. (b) Padavine modelirane z modelom RegCM3 za isto obdobje. (Vir: Boštjan Muri: Diplomsko delo, 2009)

Pridobljen rezultat je potrebno dodatno ovrednotiti z oceno nedoločenosti. Takšna raziskavo opravljamo v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI. Ocene nedoločenosti regionalnih klimatskih simulacij se lotevamo na dva načina. Uporabili bomo rezultate ansambla simulacij RCM za oceno razpršenosti regionalnih modelov nad Slovenijo. V drugi študiji pa bomo ocenjevali notranjo variabilnost posameznega modela. Primer nekaterih rezultatov te raziskave je predstavljen na Sliki 6, ki ilustrira dve lastnosti regionalnih simulacij: notranjo variabilnost regionalnega modela in pomembnost lokacije stranskih robnih pogojev.



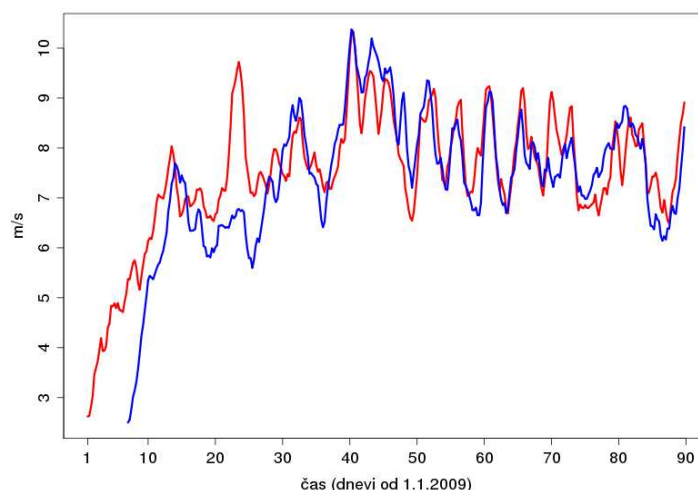
Slika 6. Napoved geopotencialne višine (izolinije) in hitrosti vetra (v barvah) na ploskvi 850 hPa 30. 1. 2009 ob 00 UTC na območju Atlantika in Evrope. V primerih (a - zgoraj) in (b – na sredini) je bila simulacija začeta 1. 1. 2009, v primeru (c - spodaj) pa 7. 1. 2009. Rezultati prikazani na slikah (a) in (c) so iz simulacij na zonalno periodični, neprekinjeni domeni krog in krog Zemlje, v primeru (b) pa je domena v zonalni smeri omejena (glej Sliko 7).

Rezultati, predstavljeni na slikah 6a in 6c, so narejeni na domeni, ki je v zonalni smeri neprekinjena in sega krog in krog Zemlje (globalni kanal, glej Sliko 7). V tem primeru so stranski pogoji predpisani le na severnem in južnem robu domene. Razlika med obema tema simulacijama je le v začetnih pogojih – druga simulacija je začeta nekaj dni po prvi. Po nekaj tednih so razlike lokalno zelo velike, kar je posledica notranje variabilnosti modela (predpostavka 4). Npr. v enem primeru je nad Atlantikom greben (Slika 6a), v drugem dolina (Slika 6c) geopotenciala. Rezultati predstavljeni na Slikah 6a in 6b pa so začeti v istem času, toda v primeru (b) je domena v zonalni smeri omejena (na polovico pasu okrog Zemlje) in s tem je treba predpisovati stranske robne pogoje tudi na zahodnem in vzhodnem robu, kar močno vpliva na dogajanje znotraj domene. V primeru Slike 6c je rezultat nad Atlantikom precej podoben rezultatu 6b, kjer vpliv robnih pogojev predvsem na zahodu močno določa razvoj v notranjosti manjše domene. To dejstvo, da sta si rezultata na Slikah 6b in 6c nad Atlantikom po enem mesecu simulacij tako zelo podobna, je v veliki meri naključno.



Slika 7. Domena numeričnih simulacij predstavljenih na Sliki 6. Velika domena (NH-Ch) je globalni kanal med 35 in 70 stopinj severne zemljepisne širine, ki je v zonalni smeri neprekinjen in sega krog in krog Zemlje. Manjša domena (NH-HCh) je polovica velike domene in zajema polovico severne Amerike, severni Atlantik in Evropo.

Prostorsko povprečen časovni potek napake dveh simulacij zonalnega vetra na 850 hPa v globalnem kanalu je prikazan na Sliki 8. Slika 8 se lahko primerja s Sliko 3. Opazimo, da po približno dveh tednih simulacije, ko še vplivajo začetni pogoji, napaka pride na vrednost, ki ustreza časovnem povprečju, okoli 8 m/s. Povprečna napaka v dveh simulacijah je od prvega meseca naprej približno enaka. Njihove lokalne značilnosti, predstavljene na Slikah 7a,c, so posledica notranje variabilnosti sistema.



Slika 8. Časovni potek napak zonalnega vetra na 850 hPa v simulacijah na globalnem kanalu. Povprečenje je narejeno preko celotne domene.

## Zaključki

Sposobnost regionalnih klimatskih modelov, da razvijejo informacijo na visoki ločljivosti, ni vprašljiva. Pri postopku povečevanja ločljivosti opisa klime na omejenem območju so stranski robni pogoji iz globalnega klimatskega modela večinoma glavni vir nedoločenosti. Različne metode povezovanja globalnega in regionalnega klimatskega modela lahko povzročijo različne scenarije o prihodnjih obdobjih tudi v primeru enega globalnega modela. Z drugimi besedami povedano, postopek povečanja ločljivosti ima pristo komponento, ki je posledica notranje variabilnosti regionalnega modela.

Izboljšano prostorsko ločljivost regionalnega klimatskega modela je potrebno predstaviti v kontekstu ostalih nedoločenosti oz. potrebno je določiti relativni pomen nedoločenosti zaradi prostorske skale. Ostali viri nedoločenosti so povezani z uporabo alternativnih scenarijev emisij toplogrednih plinov in aerosolov in z modeliranjem globalnega odziva na emisije v regionalnem modelu v primerjavi z globalnim modelom.

## Zahvala

Priprava članka je bila narejena v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI, ki je financiran s sredstvi Evropskih strukturnih skladov.

## Literatura

- Dickinson, R. E., R. M. Errico, F. Giorgi and G. T. Bates, (1989): A regional climate model for the western United States. *Climatic Change* **15**, 383-422.
- Larprise, R. in sod., (2008): Challenging some tenets of regional climate modeling. *Meteorol. Atmos. Phys.* **100**, 3-22.
- Muri, B., (2001): *Projekcije podnebnih sprememb na območju Slovenije z modelom RegCM3* : diplomska naloga, Ljubljana, UL FMF, 60 str. + 1 CD-ROM, COBISS.SI-ID277929
- Oštir, K. in sod., (2011): Uporaba satelitskega daljinskega zaznavanja za napovedovanje in opazovanje poplav, Zbornik predavanj, 16. strokovno srečanje SZGG, Ljubljana, str. 87-93.
- Trenberth, K. (2010): More knowledge, more uncertainty, *Nature Reports Climate Change* Published online: 21 January 2010 | doi:10.1038/climate.2010.06



# Uporaba satelitskega poraba satelitskega daljinskega zaznavanja za napovedovanje in opazovanje poplav

Krištof Oštir<sup>1,2</sup>, Žiga Kokalj<sup>1,2</sup>, Tatjana Veljanovski<sup>1,2</sup>,  
Jože Rakovec<sup>1,3</sup> in Nedjeljka Žagar<sup>1,3</sup>

## Povzetek

V prispevku je opisana uporaba daljinskega zaznavanja pri napovedovanju vremena in opazovanju poplav. Slovenijo so med 17. in 19. septembrom 2010 zajele obilne padavine. Padavine so bili tako količinsko kot krajevno zelo dobro napovedane, povzročile pa so obilne poplave v različnih delih države. Center odličnosti Vesolje-SI je v okviru aktivacije programa Vesolje in velike nesreče pridobili serijo radarskih satelitskih posnetkov. Ta nam je omogočila, da smo upoštevaje štiri datume znotraj 14 dnevnega razdobja razčlenili dinamiko poplav v okolici Ljubljane in na kraških poljih ter krajevnega zastajanja oziroma odtekanja vode. Z radarskimi posnetki lahko v skoraj realnem času dobimo zelo dober vpogled v stanje v naravnem okolju in na širšem območju, ne moremo pa zaznavati poplav v naseljih. S prispevkom želimo odpreti razpravo o uporabnosti podatkov daljinskega zaznavanja in hitrega kartiranja za različne uporabnike, upoštevaje smeri razvoja vesoljske tehnologije v Sloveniji.

## Uvod

Slovenijo so v času med 17. in 19. septembrom 2010 zajele močne in obsežne padavine, ki so povzročile močan porast gladin rek in razlivanja vodotokov skoraj povsod po državi. V 48 urah, od petka do nedelje zjutraj, je v povprečju padlo 170–180 mm padavin, kar je največja količina v takšnem časovnem obdobju v zadnjih 60 letih (ARSO 2010). V primerjavi s preteklimi izjemnimi padavinskimi dogodki tega najbolj zaznamuje zelo veliko območje, na katerem je bila količina padavin velika. Obsežne poplave so zajele porečje Vipave, Idrijce, Poljanske Sore, Savinje v spodnjem toku, Krke, Save v spodnjem toku, kraška polja Notranjskega in Dolenjskega krasa ter Ljubljansko barje. Visoke vode so najbolj opustošile naselja na območju Ljubljane in Posavja.

Po podatkih Civilne zaščite so poplave ogrozile več kot 15.000 ljudi, več kot 8200 objektov, okrog 30.000 hektarov kmetijskih zemljišč in več deset mostov. Povzročile so obsežno škodo v kletih in na hišah, poškodovane so bile ceste in železnica, v osrednji in zahodni Sloveniji so se pojavljali številni zemeljski plazovi, umrli so trije ljudje. Zavarovalnice ocenjujejo, da bo skupna škoda dosegla 35 milijonov evrov.

## Napovedovanje vremena

---

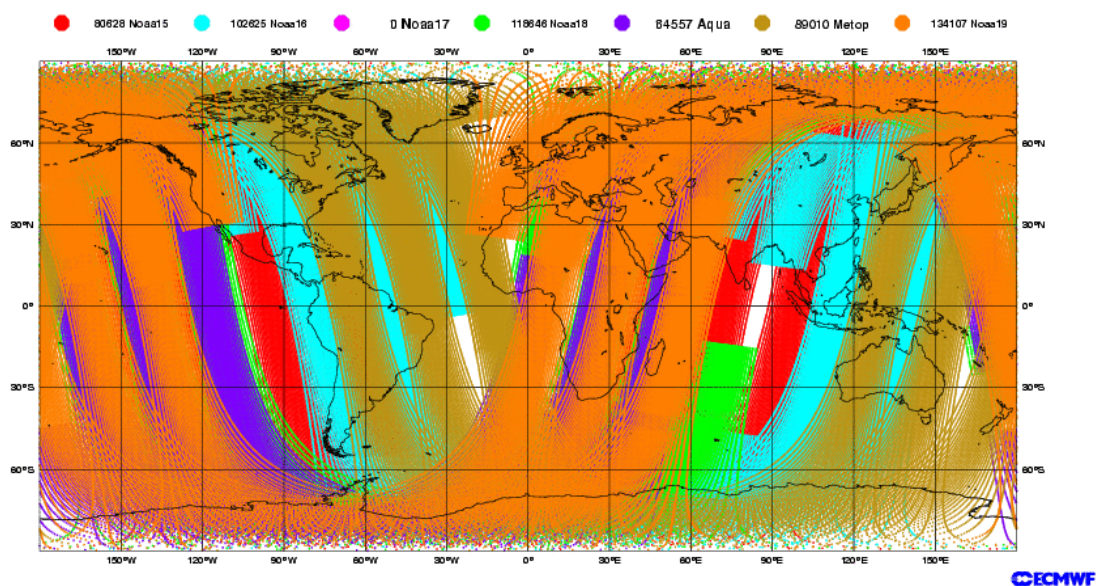
<sup>1</sup> Center odličnosti Vesolje-SI, Aškerčeva cesta 12, Ljubljana

<sup>2</sup> Znanstvenoraziskovalni center SAZU, Novi trg 2, Ljubljana

<sup>3</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Oddelek za fiziko, Katedra za meteorologijo, Jadranska cesta 19, Ljubljana

Napoved nastanka vremenskih pogojev, spremljanje razvoja in obsega poplav ter učinkovito obveščanje strokovne in druge javnosti je v prvi vrsti naloga Agencije RS za okolje (ARSO). Katastrofalne poplave so bile napovedane odlično, in sicer tako količinsko kot časovno in prostorsko. Prvo predhodno opozorilo pred močnimi padavinami je državna meteorološka služba izdala dne 16. septembra 2010 ob 08:50 in ga posredovala Upravi RS za zaščito in reševanje (URSZR). V njem so natančno napovedali količino in trajanje padavin.

Meteorologi pri svojem delu za spremljanje vremena uporabljajo satelitske slike meteoroloških satelitov, ki kažejo trenutne razmere, za potrebe napovedi pa je treba upoštevati mnogo širši nabor podatkov – večina teh je dobljena iz satelitov s sondiranjem navzdol skozi ozračje. Pred desetletji tovrstna dobra napoved ni bila možna, čeprav je meteorologija tedaj že poznala glavne značilnosti dogajanj v ozračju in metode, kako ta dogajanja simulirati in s tem napovedovati. Natančnost napovedi so izboljšali bistveno večja količina vhodnih podatkov, predvsem pa možnost numerične napovedi vremena. Ta je bila pred pojavom zmogljivih računalnikov preveč zahtevna, poleg tega pa je bilo pred desetletji razumevanje procesov v ozračju bolj pomanjkljivo, kot je danes, fizikalno in matematično pa so bili bistveno slabši tudi modeli za napovedovanje vremena.



Slika 1: Meteorološki globalni opazovalni sistem za pridobivanje podatkov za potrebe napovedovanja vremena. Na sliki je približno četrtnina navpičnih profilov (AMSU-A) radiometričnih meritev temperature in vlažnosti, ki jih v enem dnevu uporabi ECMWF Vir:

[http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!AMSUA!00!p op!od!mixed!w\\_coverage!latest/](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!AMSUA!00!p op!od!mixed!w_coverage!latest/) © ECMWF, povzeto 6. 1. 2011.

Modele poganjamo od znanega začetnega stanja – od znanih (izmerjenih) lastnosti ozračja. Čim boljše poznamo to začetno stanje, tem boljša je lahko napoved. Pri tem je bistven prispevek satelitov, ki omogočajo pridobivanje vertikalnih profilov temperature zraka in

vlačnosti, vektorje vetra za razne predele in razne višine v ozračju (če je v ozračju dovolj delcev) in podobno. Podatki meritev meteoroloških satelitov so danes že glavni vir za določanje začetnega stanja ozračja za potrebe napovedovanja vremena, saj predstavljajo 95 % vseh asimiliranih podatkov meritve sevanja (in iz tega torej temperature in vlažnosti), medtem ko okoli 5 % odpade na konvencionalne meritve, ki se opravljajo s tal (meritve pri tleh, na morju in radio-sondažne meritve) ali na letalih. Več o tem v članku Rakovec in Žagar (2011, ta zbornik).

Podrobno napoved za Slovenijo računajo na ARSO z modelom ALADIN, ki za začetne in v času spreminjajoče se robne pogoje uporablja rezultate modelov francoske meteorološke službe Meteo-France in Evropskega centra za srednjeročno napoved vremena (ECMWF). Čeprav se vremenske napovedi nenehno izboljšujejo, kvantitativne napovedi vremenskih pojavov, kot so močne padavine ter nevihtni procesi z viharnim vetrom in točo, ki se v razgibanem reliefu Slovenije na stičišču vplivov Alp in Sredozemlja pojavljajo pogosto, še vedno niso povsem zanesljive. Danes si prizadevamo, tudi znotraj centra odličnosti, za izboljšane metode asimilacije podatkov, ki bodo odstotek uporabljenih satelitskih meritev še zvišale in prinesle izboljšane napovedi vremena.

### **Kartiranje poplav**

Uprava RS za zaščito in reševanje je v sodelovanju s Centrom odličnosti Vesolje-SI in ZRC SAZU ob nedavnih poplavah aktivirala mednarodni program Vesolje in velike nesreče (Space and Major Disasters, [www.disasterscharter.org](http://www.disasterscharter.org)) ter projekt SAFER. V primeru večjih naravnih nesreč se različne vesoljske agencije, kot so evropska ESA, kanadska CSA, japonska JAXA, ameriška NASA in številne druge, združijo in začnejo s snemanji prizadetih območij. Nove in izbrane arhivske posnetke prizadetega območja nato posredujejo lokalnim centrom v nadaljnjo obdelavo in uporabo.

V okviru omenjenih iniciativ je center odličnosti prejel skoraj 30 različnih posnetkov. 13 satelitskih posnetkov, ki so pokrivali območje osrednje in južne Slovenije, smo navsezadnje vključili v nadaljnjo obravnavo opazovanja posledic vremenskega dogodka. Od teh trinajstih so bili štiri posnetki arhivski, eden zajet med najhujšimi padavinami, osem posnetkov je bilo zajetih po glavnih padavinah. Kot najuporabnejši so se izkazali podatki radarskih satelitov ENVISAT (ESA) in RADARSAT (CSA), ki jih je bilo skupaj 9. Bistveni prednosti radarskih sistemov pred optičnimi sta neodvisnost od sonca kot vira svetlobe, zato lahko z njimi zemeljsko površje opazujemo tudi ponoči, ter zmožnost opazovanja skozi oblake. Z radarskimi posnetki smo lahko kartirali stanje in dinamiko poplavljenosti na Ljubljanskem barju in okolici, notranjskih in kraških poljih, in sicer za 19. 9., 23. 9., 26. 9. in 2. 10. Od optičnih posnetkov smo imeli na razpolago serijo posnetkov Landsat (14. 9., 20. 9. in 21. 9.), ki pa so bili za določanje obsega poplav primerni le za večja razlitja vode na območju dolenjskih in notranjskih kraških polj, saj so bili nad širšim območjem Ljubljane prisotni oblaki.

Satelit (Vesoljska agencija)	Senzor / Tip podatka	Datum zajema	Območje	Prostorska ločlj. (m)	Način uporabe
ENVISAT ASAR (ESA)	ASAR Alternating Polarisation Medium-resolution image	19. 9. 2010	Ljubljana in okolica	12,5	Kartiranje poplav
RADARSAT-2 (CSA)	Extended High HH ASAR Alternating	23. 9. 2010	Ljubljana in okolica	12,5	Kartiranje poplav
ENVISAT ASAR (ESA)	Polarisation Medium-resolution image ASAR Alternating	25. 9. 2010	Zasavje, Krka	12,5	Kartiranje poplav
ENVISAT ASAR (ESA)	Polarisation Medium-resolution image ASAR Alternating	26. 9. 2010	Zasavje, Krka	12,5	Kartiranje poplav
RADARSAT-2 (CSA)	Path Image Plus HH	26. 9. 2010	Ljubljana in okolica	12,5	Kartiranje poplav
RADARSAT -2 (CSA)	Path image HH	28. 9. 2010	Zasavje	6,25	Kartiranje poplav
RADARSAT-2 (CSA)	Path Image Plus HH	2. 10. 2010	Ljubljana in okolica	12,5	Kartiranje poplav
Landsat (USGS)	Landsat TM, 30m, 7 MS	14. 9. 2010	Osrednja Slovenija	30	Pregled stanja, referenca
Landsat (USGS)	Landsat TM, 30m, 7 MS	21. 9. 2010	Zahodna Slovenija	30	Pregled stanja poplav

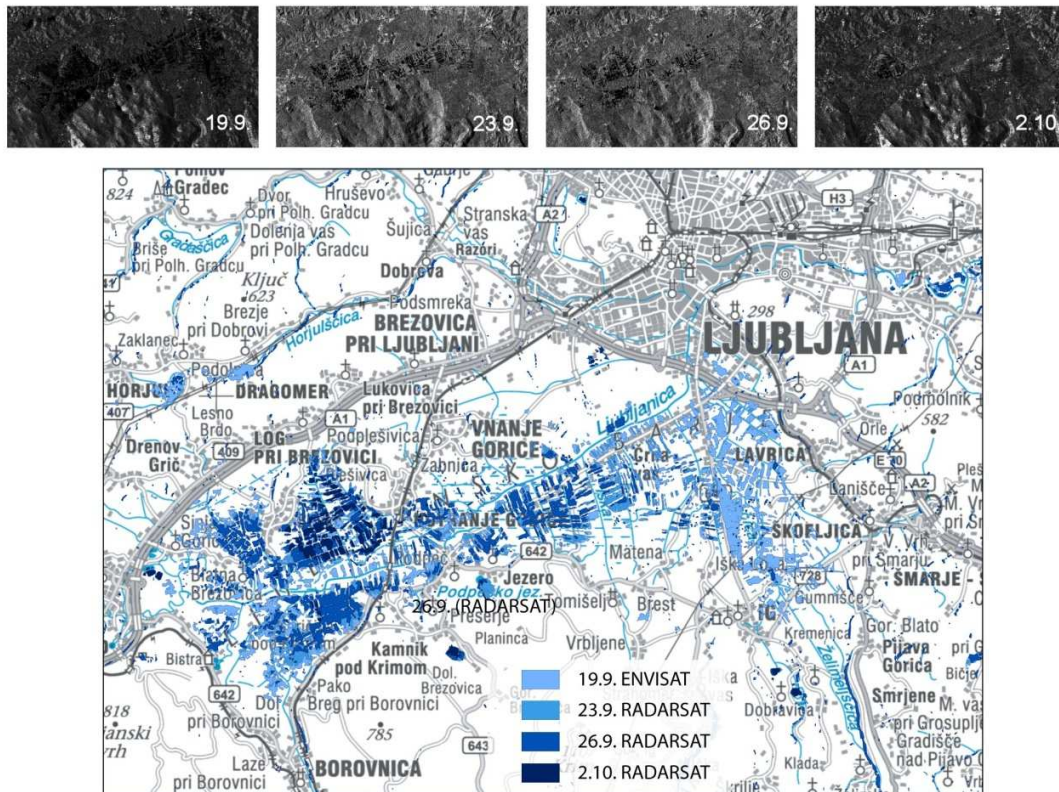
Preglednica 1: Pregled uporabljenih satelitskih posnetkov, pridobljenih v okviru programa Vesolje in velike nesreče, njihove pomembnejše lastnosti ter vloga pri kartiranju poplavljenosti.

Prvi posnetek satelita ENVISAT, zajet z radarskim sistemom ASAR, je bil narejen v nedeljo, 19. septembra 2010, nekaj pred deveto uro zvečer. Posnetek zajema stanje na območju osrednje in zahodne Slovenije. Temu so na primerljivem območju snemanja sledili še trije posnetki satelita RADARSAT-2. Vse posnetke smo najprej natančno georeferencirali v državni koordinatni sistem ter opravili ortorektifikacijo, da smo odpravili razlike zaradi različnih kotov opazovanja satelita. Ker je voda na radarskih posnetkih zelo temna, smo jo z določanjem praga odboja, klasifikacijo ter modeliranjem vpliva reliefa in senc razmeroma enostavno razločili. Rezultat obdelave so karte poplavnih območij na Ljubljanskem barju, v okolici Ljubljane in na kraških poljih, ki smo jih posredovali URSZR. Serija posnetkov omogoča spremljanje obsega poplav vsakih nekaj dni.

Odkrivanje vode na radarskih posnetkih se zdi razmeroma enostavna naloga, saj je radarski povratni signal na gladki gladini vode neznaten. Voda ima zato na radarskih posnetkih najnižjo intenziteto. Vendar so nizke vrednosti tudi posledica senc, zato pri klasifikaciji praviloma prihaja do prevelike zaznave t. i. vodne površine. Dodatno težavo povzroča zrnatost, to je značilni šum na radarskih posnetkih. Poleg precenjene zaznave vodnih površin se srečujemo tudi z nezmožnostjo zaznave vode. Vsak objekt, večji od nekaj centimetrov, ki je/gleda nad vodno površino, povzroči, da se del valovanja odbije do sprejemnika. Intenziteta

odbojnega signala je tako povečana in zato se taka površina v fazi analize ne klasificira kot voda. Odbojni objekt je lahko hiša, drevo, koruzno polje ali celo val na vodi.

Z obdelavo posnetkov smo pripravili karte poplavnih območij na Ljubljanskem barju, v okolici Ljubljane in na kraških poljih za opazovane dni (Slika 3). Karte smo posredovali Upravi RS za zaščito in reševanje ter objavili na spletni strani Programa Vesolje in velike nesreče (<http://www.disasterscharter.org>) in CO Vesolje-SI (<http://www.space.si/presentation>). Postopek obdelave radarskih posnetkov je polsamodejen in uporaben za vse prejete radarske posnetke, rezultate pa daje v nekaj urah po zajemu s satelitom.



Slika 2: Dinamika poplav na Ljubljanskem barju, dobljena iz radarskih posnetkov zajetih 19. 9., 23. 9., 26. 9. in 2. 10.

Posamezen satelitski posnetek je mogoče obdelati v razmeroma kratkem času, vendar obdelava zaenkrat še zahteva prisotnost in odločanje strokovnjaka. Center odličnosti zato razvija tehnologijo (skoraj) samodejne obdelave, ki bo bistveno skrajšala čas same obdelave, predvsem pa bo omogočila takojšnjo objavo interpretiranih rezultatov v obliki spletne karte.

### Distribucija in uporaba podatkov

Potencial obdelave podatkov v skoraj realnem času zaživi šele s takojšnjo dostavo rezultatov prek spleta. Pomemben del aktivnosti centra odličnosti je zato spletni portal, ki bo končna točka za dostavo izdelkov. Del spletnega portala bo namenjen splošni javnosti in

uporabnikom z malo znanja o prostorskih podatkih in njihovi obdelavi, del pa bo omogočal tudi uporabo naprednejših orodij, kombiniranje podatkov ter modeliranje.

Potencialni uporabniki v primeru naravnih nesreč so vsi, ki se ukvarjajo s hidrološkimi pojavi, z reševanjem, to so v prvi vrsti URSZR, gasilci in drugi, ustvarjeni rezultati pa bodo tudi pomemben dejavnik pri obveščanju javnosti. Če bi razpolagali tudi s podatki visoke prostorske ločljivosti, bi bilo rezultate interpretacije in izdelane karte mogoče uporabiti pri reševanju, saj bi bile karte poplavljenih območij narejene v nekaj dneh po dogodkih oziroma še v času visokih voda. Velik pomen dobljenih rezultatov ima tudi ocena škode ter izboljšanje postopkov pri odpravljanju posledic poplav in preprečevanju ponovitve tovrstnih nesreč. Poleg tega bodo dobljeni podatki lahko uporabljeni tudi kot vhodni ali učni podatek v modeliranju oziroma simulaciji podobnih dogodkov.

### **Zaključek**

Pomanjkljivost, ki smo jo znova občutili ob aktivaciji programa, je, da izvajalec kartiranja in končni uporabnik nimata zadostnega vpliva na določitev območja in časovnega zaporedja načrtovanega snemanja. Kot se je pokazalo v primeru poplav tako velikega obsega, bi bili pogostejši podatki v času največjih padavin in takoj po njih izjemnega pomena tako za reševanje kot za hidrološke študije. Za učinkovita satelitska opazovanja nesreč tako postaja imperativ lasten satelitski sistem in hiter, neposreden prenos snemanj do izvajalca kartiranja.

Velik del aktivnosti centra odličnosti je namenjen daljinskemu zaznavanju in aplikacijam. Satelitske posnetke bomo uporabili tako pri napovedovanju in spremljanju vremena kot pri opazovanju zemeljskega površja in sprememb na njem. Cilj prvega delovnega paketa centra odličnosti je pripraviti samodejen sistem obdelave od zajetega podatka do spletne karte, ki bo uporabna tako za strokovno kot za splošno javnost.

### **Zahvala**

Študija ne bi bila izvedljiva brez podpore programa Vesolje in velike nesreče. Avtorji se zahvaljujejo URSZR za aktivacijo programa ter v njem sodelujočim Evropski vesoljski agenciji (ESA) ter Kanadski vesoljski agenciji (CSA) za posredovanje posnetkov, ki smo jih v študiji uporabili. Raziskave so bile delno opravljene v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI, ki je financiran s sredstvi Evropskih strukturnih skladov.

### **Literatura**

ARSO (2010): Poročilo izjemno obilnih padavinah od 16. do 19. septembra 2010. Elaborat, ARSO. Ljubljana.

ECMWF:

[http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!AMSUA!00!pop!od!mixed!w\\_coverage!latest/](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!AMSUA!00!pop!od!mixed!w_coverage!latest/) © ECMWF, povzeto 6. 1. 2011.

Henderson, Floyd M., Lewis, Anthony J. (1998): Principles and Applications of Imaging Radar, 3rd ed. New York (ZDA).

- Puech, C., Hostache, R., Raclot, R., Matgen, P. (2009): Quality of flooded plains free water detection using radar images: Towards a methodology for estimation water depth. Proceeding of VALgEO 2009. Ispra (Italija).
- Oštir, K. (2006): Daljinsko zaznavanje. Ljubljana.
- Rakovec, J. in N Žagar, (2011): Kaj vse za potrebe napovedovanja in opazovanja vremena in klime merimo s satelitov, zbornik predavanj, 16. strokovno srečanje SZGG, Ljubljana, str. 69-78.
- URSZR (2010): Dnevni informativni bilten. Bilten, URSZR. Ljubljana. Medmrežje: <http://www.sos12.si/db/priloga/p10518.pdf>, <http://www.sos12.si/db/priloga/p10460.pdf> (20. 10. 2010).