

Nove karte gravimetričnih anomalij na območju Republike Slovenije

Klemen Medved¹, Oleg Odalović², Božo Koler³

Povzetek

Obstoječa karta Bouguerovih anomalij, ki pokriva ozemlje Republike Slovenije, je stara nekaj desetletij. Od takrat je na voljo kar nekaj novih podatkov o merjenem težnostnem pospešku na območju Slovenije, ter kakovostnih digitalnih modelov terena, ki so potrebni za izdelavo takšnih kart. Poleg tega so se spremenili tudi metodologija in standardi za izdelavo kart gravimetričnih anomalij. V nizu starih gravimetričnih podatkov, ki izhajajo iz obdobja Jugoslavije, je bilo odkritih in odstranjenih nekaj grobih pogreškov. Na podlagi vseh novih gravimetričnih podatkov so bile izdelane karte gravimetričnih anomalij Republike Slovenije.

Ključne besede: karte gravimetričnih anomalij, Bouguerova anomalija, gravimetrični podatki, Slovenija

Key words: gravity anomalies maps, Bouguer anomaly, gravimetric data, Slovenia

Uvod

Karte gravimetričnih anomalij se uporabljajo v geoloških in geofizikalnih raziskavah. V Sloveniji je za območje celotne države trenutno aktualna karta Bouguerovih anomalij, ki je bila izdelana v drugi polovici prejšnjega stoletja. Nastala je na podlagi gravimetričnih meritev na območju bivše Jugoslavije. Gravimetrične izmere so se na območju Slovenije izvajale v različnih izmerah od leta 1956 do 1965 v Potsdamskem gravimetričnem sistemu. V Sloveniji se je po letu 1996 začela vzpostavljati nova osnovna gravimetrična mreža (Bilibajkić, 1979), ki temelji na gravimetričnem sistemu IGSN71 in predstavlja temelj za vsa sodobna gravimetrična opazovanja. Z Uredbo (Uredba, 2014) so bili v Sloveniji tudi določeni parametri gravimetričnega dela državnega prostorskega koordinatnega sistema. Oznaka slovenskega gravimetričnega datuma je GD06, v katerem se dandanes izvajajo vse gravimetrične meritve v Sloveniji. Tako je bilo na ozemlju Slovenije v zadnjem obdobju izvedenih veliko kvalitetnih gravimetričnih meritev, predvsem z namenom vzpostavitve novega državnega višinskega sistema in izračuna nove višinske referenčne ploskve (model geoida oz. kvazi-geoida). Za ta namen so bili pridobljeni tudi gravimetrični podatki iz sosednjih držav. Poleg tega so bili izdelani različni izboljšani topografski modeli - digitalni modeli reliefa (DMR) v različnih resolucijah. Vse te novo pridobljene podatke smo uporabili pri izdelavi novih kart gravimetričnih anomalij za območje Slovenije.

Pregled stanja in namen

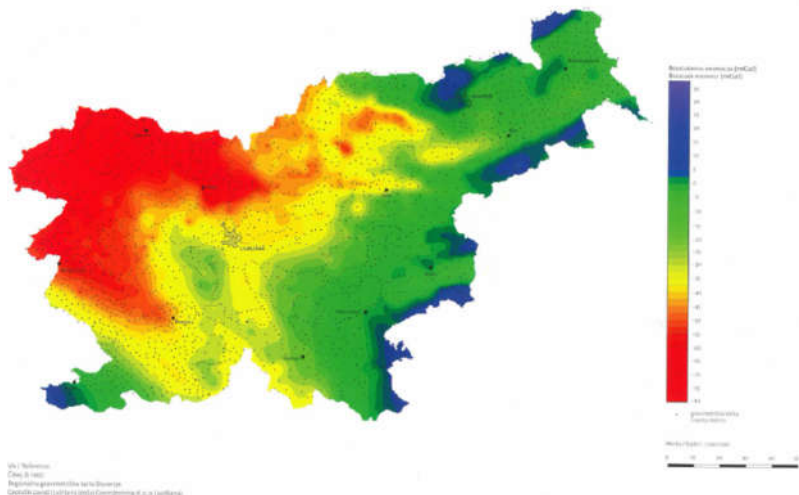
Pred osamosvojitvijo Slovenije so bile izdelane karte Bouguerovih anomalij, ki so pokrivalo celotno območje takratne Jugoslavije. Zvezni geološki zavod iz Beograda je leta

¹ Geodetska uprava RS, Zemljemerska 12, 1000 Ljubljana

² Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11000 Belgrade, Srbija

³ UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

1972 v sodelovanju z drugimi inštitucijami izdal ‘Gravimetrijsko karto SFR Jugoslavije: Bouguerove anomalije’ v merilu 1:500.000. Temelji na regionalni in detajlni gravimetrični izmeri območja Slovenije in štirih sosednjih dežel iz pet-desetih in šest-desetih let, ki je bila namenjena izdelavi te karte (Bilibajkić, 1979). V Sloveniji je bila karta Bouguerovih anomalij na osnovi starih jugoslovanskih gravimetričnih podatkov, pridobljenih med leti 1956 in 1965, izdelana leta 1967 (Čibej, 1967) ter dodatno interpolirana in digitalizirana med 1996 in 2000 (Stopar, 2018). Meritve je na območju Slovenije izvajal takratni Geološki zavod Ljubljana (danes Geološki zavod Slovenije). Za izdelavo karte v merilu 1:100.000 so uporabili približno 2500 točk z izmerjenimi relativnimi vrednostmi težnega pospeška v Potsdamskem gravimetričnem sistem. Izdelana karta je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Obstoječa karta Bouguerovih anomalij za Slovenijo (vir: Stopar, 2018).

Številni avtorji se ukvarjajo z izdelavo posodobljenih državnih kart Bouguerovih anomalij, saj je poleg izboljšanih topografskih modelov na razpolago vedno več kvalitetnih gravimetričnih podatkov. Pri tem se uporabljajo različne metodologije (De Marchi et al., 2014), ki so bile uporabljene v zadnjem obdobju v sosednjih državah: Avstrija – Meurers in Ruess (2009); Madžarska – Kiss (2006); Italija – Tiberti (2005); Hrvaška – Varga in Stipčević, (2021); Jadransko morje – Tassis et al. (2013); območje Alp (Zahorec et al., 2021). Pred kratkim izdelana regionalna karta gravimetričnih anomalij, ki zajema območje Alp (Zahorec et al., 2021) žal ni vključila novejših slovenskih gravimetričnih podatkov, ampak so uporabljeni le stari. Zato je smiselno posodobiti državno karto Bouguerjevih anomalij, saj so se posodobile metodologije oz. standardi za izdelavo kart anomalij težnosti (Hinze et al., 2005).

Obstoječi vhodni podatki

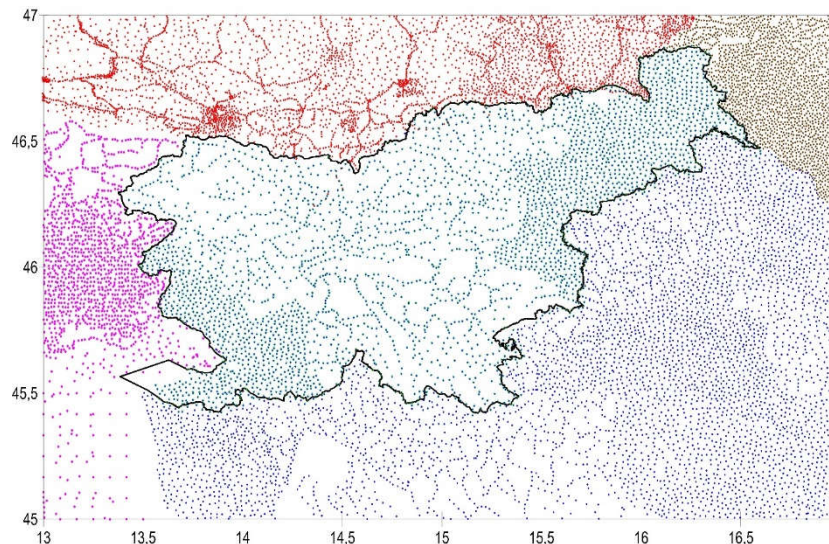
Digitalni model reliefa (DMR)

Za območje Slovenije imamo na razpolago več digitalnih modelov reliefa z oznakami in resolucijami DMR1 (1 × 1 m), DMR 25 (25 × 25 m), DMR100 (100 × 100 m) in DMR1000 (1000 × 1000 m), ki smo jih uporabili v tej raziskavi. DMR1 je bil pridobljen v projektu *Lasersko skeniranje Slovenije (LSS)*, ki se je izvajalo v letih 2011, 2014 in 2015. Iz podatkov LSS je bil izdelan digitalni model reliefa (DMR1) s prostorsko ločljivostjo 1 m in pokriva celotno območje države Slovenije. Podobno tudi DMR25 pokriva širše območje Slovenije s prostorsko ločljivostjo 25 m. DMR100 in DMR1000 sta bila pripravljena za potrebe izračuna

modela novega kvazi-geoida oziroma višinske referenčne ploskve z oznako SLO_VRP2016/Koper (Omang, 2016). Izdelana sta iz izvornih podatkov DMR 12,5 (za državno ozemlje) in za čezmejni pas do oddaljenosti vsaj 167 km združena s podatki SRTM-3 v2.1⁴ (Farr et al., 2007). Iz združenih podatkov sta z bi-linearno interpolacijo izdelana fini (100 × 100 m) in grobi (1000 × 1000 m) digitalni model višin (Žagar in Berk, 2009). DMR100 obsega območje med 45° – 47° N, 15° – 17° E, DMR1000 pa od 43° – 49° N, 11° – 19° E.

Gravimetrični podatki

V Sloveniji razpolagamo z več nizi gravimetričnih podatkov in sicer: stari gravimetrični podatki bivše SFRJ za območje Slovenije in dela Hrvaške, gravimetrični podatki obmejnega območja sosednjih držav, t.j. Italije, Avstrije in Madžarske, ki so bili pridobljeni s formalnimi dogovori in uporabljeni za potrebe izračuna novega kvazi-geoida Slovenije, podatki osnovne gravimetrične mreže, gravimetrični podatki reperjev nivelmanske mreže 1. reda in podatki nove regionalne gravimetrične izmere za območje Slovenije (slika 2). Vsi ali vsaj večina teh podatkov se je uporabila tudi pri izračunu nove višinske referenčne ploskve, t.j. modela kvazi-geoida Slovenije



Slika 2: Gravimetrični podatki bivše SFRJ za območje Slovenije (zelena) in dela Hrvaške (modro) in gravimetrični podatki Italije (vijolična), Avstrije (rdeča) in Madžarske (rjava).

a) Gravimetrični podatki, bivše SFRJ za območje Slovenije in dela Hrvaške

Podatki stare gravimetrične izmere SFRJ segajo v drugo polovico prejšnjega stoletja. Že za potrebe izračuna novega kvazi-geoida je bil niz teh podatkov analiziran in transformiran (iz koordinatnega sistema (D48/GK), Bessel elipsoid v ETRS89 (D96/TM), GRS80 elipsoid) z državno trikotniško transformacijo, različico 3.0 (Berk in Komadina, 2013). Na sliki 2 so prikazani stari gravimetrični podatki bivše SFRJ za območje Slovenije in dela Hrvaške, ki jih imamo na razpolago. Celotni niz vsebuje 6362 točk, od tega jih je na ozemlju Slovenije 3365, ostalih 2997 je na območju Hrvaške.

⁴ Angl. Shuttle Radar Topography Mission

b) Podatki obmejnega območja sosednjih držav (Italija, Avstrija in Madžarska)

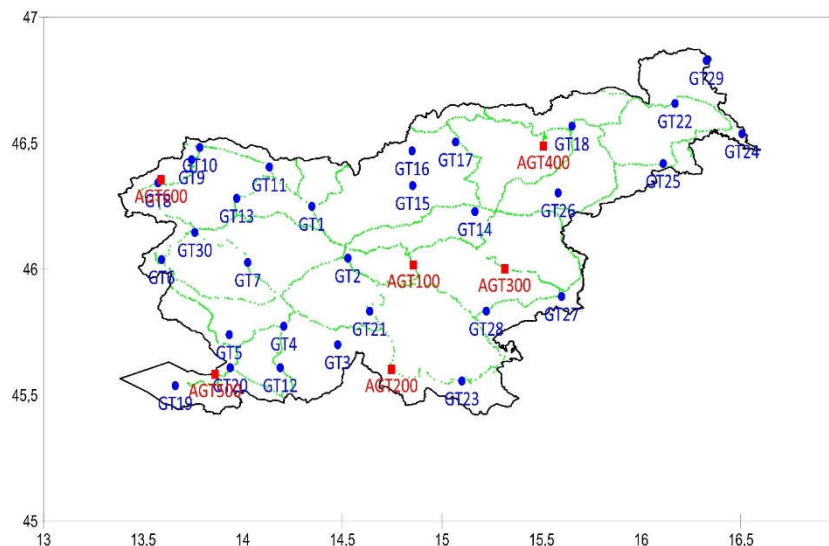
Gravimetrični podatki obmejnega območja pokrivajo območja izven teritorija Slovenije v koordinatnem okvirju $45^{\circ} - 47^{\circ}$ N in $13^{\circ} - 17^{\circ}$ E. Gravimetrični podatki obmejnega območja z Italijo vsebujejo niz 1402 točk. Obdobje meritev ni poznano. Izvirne višine se nanašajo na italijanski višinski sistem z datumom Genova 1942, zato so bile transformirane v višinski datum Trst 1875 (CRSEU, 2016). Avstrijski gravimetrični podatki pokrivajo mejno območje južno od 47° vzporednika. Gre za skupno 3984 točk. Višine se nanašajo na višinski datum Trst 1875. Gravimetrične meritve izhajajo iz obdobja 1952 – 2009. Gravimetrični podatki obmejnega območja z Madžarsko vsebujejo niz 1801 točk. Izvirne višine se nanašajo na višinski datum Kronstadt, zato so pretvorjene v višinski datum Trst 1875 (CRSEU 2016). Za vse navedene podatke so koordinate podane v ETRS89 (elipsoid GRS80), gravimetrične vrednosti se nanašajo na IGSN71. Na sliki 2 so prikazani vsi podatki navedenih sosednjih držav.

c) Podatki osnovne gravimetrične mreže

Osnovno gravimetrično mrežo Slovenije tvori 36 točk, 6 absolutnih gravimetričnih točk mreže 0. reda in 30 relativnih gravimetričnih točk 1. reda (Slika 3). Absolutne gravimetrične točke so bile stabilizirane leta 1995 in od takrat se je na njih izvedlo nekaj kampanjskih meritev, nazadnje leta 2014 (Ullrich in Medved, 2015). Določitev vrednosti težnega pospeška na točkah 1. reda je bila opravljena z gravimetričnimi meritvami leta 2006 z dvema relativnima gravimetroma tipa Scintrex CG-3M. Obdelava gravimetričnih meritev je opravljena z izračunom ustreznih popravkov in redukcij merjenih vrednosti težnega pospeška z izravnavo gravimetrične mreže v dveh korakih. Ocenjene natančnosti določitve posameznih točk znašajo od $3,0 \mu\text{Gal}$ do $6,2 \mu\text{Gal}$ (Koler et al., 2012). Na osnovi novo izračunane osnovne gravimetrične mreže je bila narejena tudi primerjava s starim Potsdamskim datumom, v katerem so bile opravljene vse predhodne gravimetrične meritve v Sloveniji, in določena transformacija med sistemoma Potsdam in IGSN71 (Medved et al., 2009). Nova osnovna gravimetrična mreža Republike Slovenije predstavlja kakovostno osnovo za vse nadaljnje gravimetrične meritve na območju Slovenije in definira državni gravimetrični datum z oznako GD06.

d) Gravimetrični podatki reperjev nivelmanske mreže 1. reda

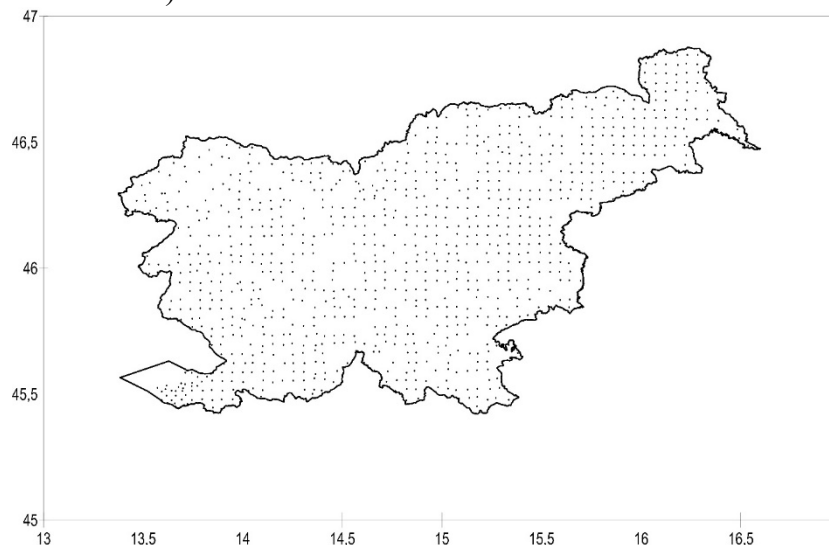
Za potrebe uvedbe novega višinskega sistema (SVS2010), kar v praksi pomeni izračun geopotencialnih višin reperjev, je bila na $\sim 85\%$ reperjev nivelmanske mreže 1. reda Slovenije izvedena gravimetrična izmera (Koler et al., 2019). Ta se je izvajala sočasno z nivelmansko izmero, to je od leta 2006 do 2016, in sicer z dvema relativnima gravimetroma Scintrex (model CG-3M in CG5). Ocenjena natančnosti izvedenih meritev je $50 \mu\text{Gal}$. Niz vsebuje 2054 točk. Vse meritve težnega pospeška se nanašajo na osnovno gravimetrično mrežo Slovenije (IGSN71). Na sliki 3 so z zeleno barvo prikazani vsi reperji na katerih je bila izvedena gravimetrična izmera.



Slika 3: Osnovna gravimetrična mreža Slovenije (6 absolutnih z rdečo barvo in 29 relativnih točk 1. reda z modro barvo) in izvedene gravimetrične meritve na reperjih nivelmanske mreže Sloveniji (z zeleno barvo).

e) Podatki nove regionalne gravimetrične izmere Slovenije

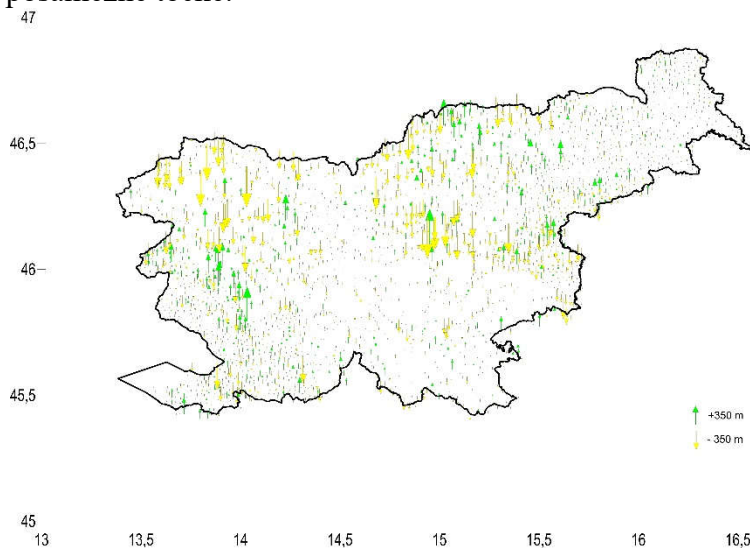
Za potrebe izračuna nove referenčne višinske ploskve (geoid oz. kvazi-geoid) se je v Sloveniji izvedla regionalna gravimetrična izmera. Predhodno je bila narejena analiza gostote obstoječih gravimetričnih točk izmerjenih po letu 2006 za potrebe določitve geopotencialnih višin reperjev. Na podlagi tega se je izdelal predlog zgostitve točk na območju, kjer njihova gostota ne zadošča (Medved et al., 2019). S tem je celotno območje države pokrito s kvalitetnimi gravimetričnimi točkami v rastru vsaj 4×4 km, na območju slovenske obale je bila celična mreža zgoščena na velikost celice 2×2 km in sicer za potrebe izračuna geoida na morju (Slika 4). Izmera je potekala med leti 2014 – 2019, pri čemer se vse meritve nanašajo na državni gravimetrični datum GD06 (IGSN71), skupno je bilo izmerjenih 1006 gravimetričnih točk. Ocenjena natančnost je $30 \mu\text{Galov}$. Koordinate vseh izmerjenih detajlnih točk regionalne gravimetrične izmere so bile določene z izmero GNSS (RTK ali statična metoda).



Slika 4: Regionalna gravimetrična izmera Slovenije med leti 2014 – 2019.

Analiza kakovosti »starih« jugoslovanskih gravimetričnih podatkov

Z vidika kakovosti gravimetričnih podatkov je potrebno posebno pozornost nameniti podatkom stare gravimetrične izmere SFRJ na območju Slovenije in dela Hrvaške. Podatki stare gravimetrične izmere SFRJ namreč segajo v šestdeseta in sedemdeseta leta prejšnjega stoletja, nekatere gravimetrične izmere višjih redov pa še dlje v preteklost. Skladno z arhivsko dokumentacijo (Bilibajkić et al., 1979), ki opisuje način izvedbe gravimetričnih meritev v SFRJ sklepamo, da so bili za določitev položaja točk izbrani večinoma značilni objekti, ki so bili prikazani na topografskih kartah merila 1 : 50 000 ali 1 : 25 000. Kjer to ni bilo možno, so položaj točk določali glede na referenčni objekt in izmerili oddaljenost od objekta. Za določanje smeri so v nekaterih primerih uporabljali tudi busolo. Pri regionalnih raziskavah so za gravimetrične točke skladno z možnostmi uporabljali reperje in trigonometre državne mreže. Pri detajlnih gravimetričnih meritvah je položaj določen na osnovi poligonov (tudi busolnih) ali pa z merjenjem razdalje od gravimetrične točke do izbranega objekta, katerega položaj so določili na karti. Poligone so povezali bodisi s trigonometrično mrežo, bodisi s točkami, ki so že imele znane položaje. Merjeni podatki so bili izravnani z uporabo približnih metod. Izvorni podatki meritev nam niso na razpolago, zato težko ocenimo kvaliteto gravimetričnih meritev, lahko pa preverimo njihovo položajno/višinsko natančnost. Zato smo vse podatke stare gravimetrične izmere SFRJ na območju Slovenije in dela Hrvaške primerjali z digitalnim modelom reliefa DMR1 in sicer višine izvornih koordinat gravimetričnih točk s pripadajočimi višinami iz DMR1. Na ta način dobimo odstopanja (razlike) med obema višinama za vsako posamezno gravimetrično točko. Pri tem ne vemo ali je odstopanje posledica pogrešene višine ali pogrešene horizontalne koordinate posamezne točke. Na sliki 5 so prikazana odstopanja po celotnem ozemlju Slovenije za posamezne točke.

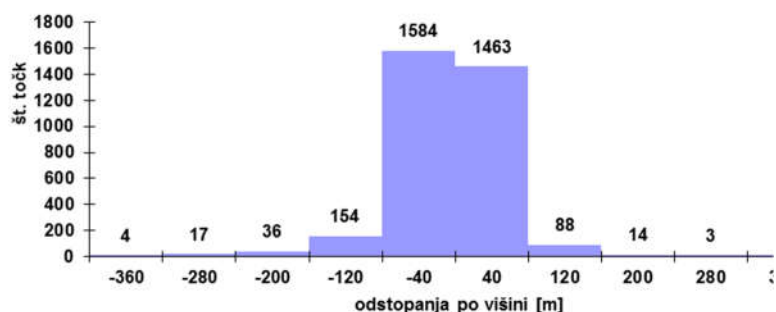


Slika 5: Odstopanja po višini na podlagi analize z DMR1.

Odstopanja so prikazana kot razlika med 'izvorno višino' minus 'DMR višino'. Na prvi pogled se zdi, da so odstopanja največja na območju S in SZ Slovenije, predvsem v goratih predelih. Na območjih SV in J Slovenije so odstopanja v povprečju manjša. Verjetno so bile izmere izvedene v posameznih sklopih in je metoda določitve koordinat vezana tudi na to, vendar o tem trenutno nimamo podatkov. Statistični kazalci te analize so zbrani v preglednici 1.

Preglednica 1: (levo) - Statistični kazalci analize višin na nizu jugoslovanskih gravimetričnih podatkov; (desno) Histogram odstopanj po višini v 10 - ih velikostnih razredih.

Število točk	3364
Min [m]	-390,94
Max [m]	333,14
Povprečje [m]	-7,10
Mediana [m]	-0,42
Std. dev. [m]	51,25



Statistični kazalci analize kažejo, da je izvorna višina nekaterih točk oz. posledično njihov položaj zelo vprašljiv. Odstopanja so od min. – 391 m do max. 333 m. Posledično to pomeni, da je uporaba teh podatkov v nekaterih primerih neprimerna za nadaljnje izračune. Gre pa za normalno porazdelitev odstopanj, kar kaže da ni nekega sistematičnega zamika oz. napake, kar bi povzročilo takšna odstopanja. Zato smo se odločili, da te podatke ustrezno filtriramo in v nadaljnjih postopkih uporabimo samo podatke, za katere predvidevamo, da niso grobo pogrešeni. Za določitev kriterija za izločitev oz. filtriranje podatkov izvedemo podobno analizo na nizu kvalitetnih gravimetričnih podatkov na reperjih (glej poglavje 3.2-d), ki imajo višino določeno z geometričnim nivelmanom. Njihov horizontalni položaj je določen na različne načine, v nekaterih primerih tudi odčitano iz karte oz. DOF⁵ - a, zato tudi tukaj pričakujemo odstopanja. Statistični rezultati te analize (primerjava višin reperjev na DMR1) so prikazani v Preglednici 2.

Preglednica 2: Statistični kazalci analize višin na nizu izmerjenih reperjev.

Število točk	2054
Min [m]	-22,72
Max [m]	14,45
Povprečje [m]	0,58
Mediana [m]	0,73
Std. dev. [m]	2,38

Rezultati analize tega niza podatkov, ki vsebuje 2054 točk, so pričakovano boljši. Minimalno odstopanje po višini znaša – 23 m in maksimalno znaša 14 m. Ob predvidevanju, da so koordinate teh točk določene kvalitetno vzamemo kot kriterij za izločanje (filtriranje) 3 -kratno vrednost maksimalnega odstopanja. S tem izločimo grobo pogrešene položaje točk. Kriterij tako znaša 3×22 m, kar zaokrožimo na ± 70 m in je postavljen zelo ohlapno. Če bi namreč kot kriterij vzeli 3 - kratno vrednost standardne deviacije ($3 \times 2,4$ m), bi izločili preveč podatkov in ne bi mogli izvesti nadaljnjih analiz.

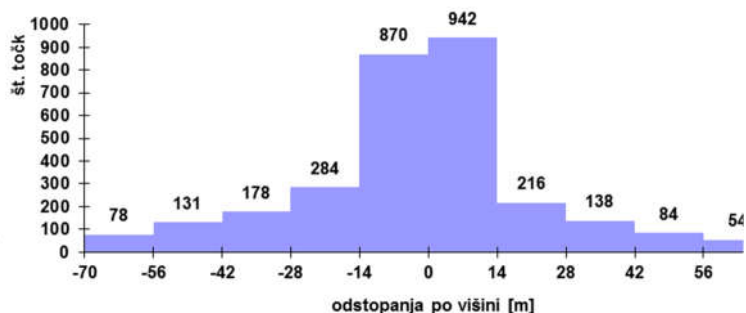
Tako iz niza starih jugoslovanskih gravimetričnih podatkov, ki na območju Slovenije vsebuje 3365 točk izločimo vse, ki po višini odstopajo za več kot ± 70 m. Izločenih je 390 predvidoma grobo pogrešenih točk, tako v filtriranem nizu ostane 2975 točk. Statistični

⁵ Digitalni orto foto

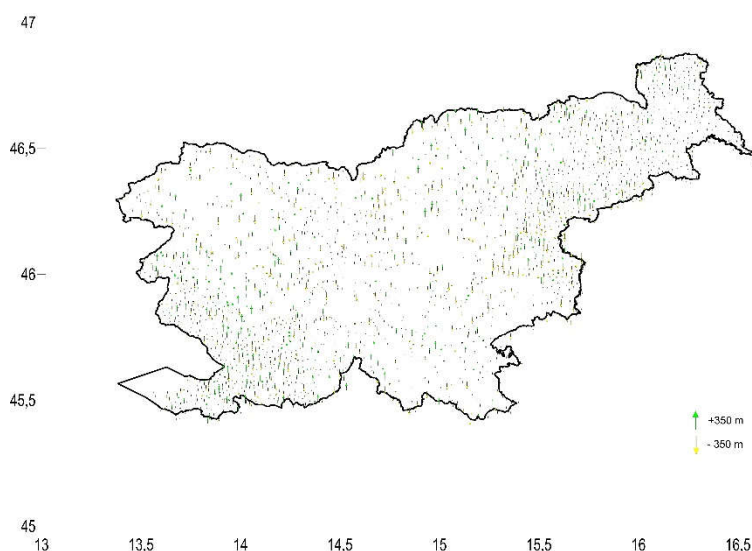
kazalci po izvedenem filtriranju niza jugoslovanskih gravimetričnih podatkov na območju Slovenije so zbrani v preglednici 3. Na sliki 6 so grafično prikazana odstopanja na posameznih gravimetričnih točkah po izvedenem filtriranju.

Preglednica 3: Statistični kazalci analize višin na nizu filtriranih jugoslovanskih podatkov.

Število točk	2975
Min [m]	-68,65
Max [m]	68,92
Povprečje [m]	-2,29
Mediana [m]	-0,18
Std. dev. [m]	23,51



Za širša območja sosednjih držav nimamo na razpolago podatkov DMR1, vendar vseeno izvedemo analizo odstopanj z DMR100. Zaradi slabše natančnosti in zanesljivosti tega modela (v primerjavi z DMR1) kot kriterij za izločitev grobih podatkov vzamemo odstopanja po višini ± 100 m. S tem kriterijem so podatki filtrirani in dodatno so izločene 4 točke z območja Italije in 28 točk z območja Hrvaške. Za podatke z območja Avstrije in Madžarske ni zaznati grobih napak v njihovi geolokaciji.



Slika 6: Odstopanja po višini po izvedenem filtriranju.

Uporabljene enačbe za izračun anomalij težnosti

Merjene vrednosti težnosti je potrebno reducirati za različne popravke z namenom izračuna anomalij težnosti. V splošnem so postopki za reduciranje merjenih težnosti neregulirani in se v raznih geofizikalnih tekstih, dostopnih (komercialnih) programskih paketih in znanstvenih člankih med seboj razlikujejo (Holom and Oldow, 2007). Z namenom

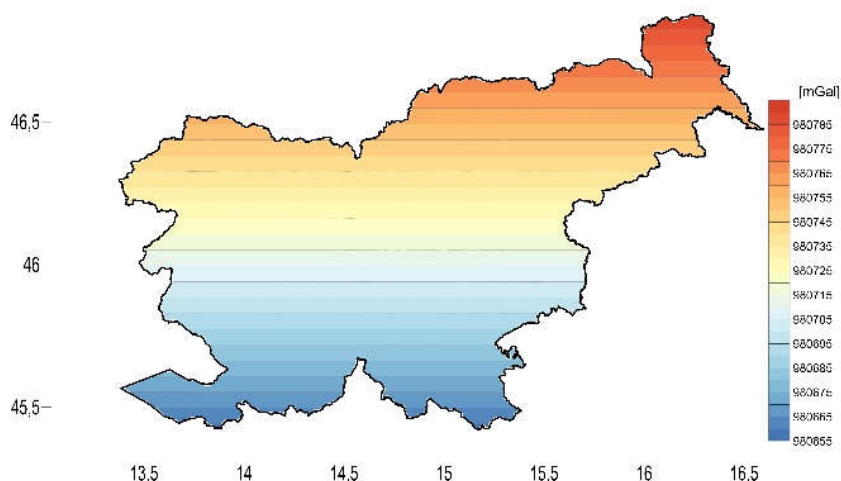
poenotenja in standardiziranja postopkov je Geološki zavod ZDA in Odbor za gravimetrično podatkovno bazo Severne Amerike⁶ predpisal enotne standardne postopke izračuna anomalij težnosti (NGIA, 2008). Bistvena sprememba je uvedba elipsoidne višine v postopke izračuna anomalij težnosti (Hinze et al., 2005, Meurers in Ruess, 2009). To je omogočila uporaba globalnih navigacijskih satelitskih tehnologij, katerih meritve višin se nanašajo na elipsoid.

V naših izračunih smo uporabili spodaj navedene enačbe za posamezne popravke. Gre za znane metode, enačbe in konstante pri čemer redukcije temeljijo na nadmorskih višinah, podanih v slovenskem državnem višinskem sistemu SVS2000 z datumom Trst. Izračuni so opravljeni v tem višinskem sistemu, ker imamo pač v njem na razpolago vse DMR-je.

Teoretična oz. **normalna težnost** na elipsoidu (oznaka γ), je izračunana z izrazom Somigliana (1929), ki se nanaša na elipsoid GRS80:

$$\gamma_0 = \frac{a \gamma_a \cos^2 \phi + b \gamma_b \sin^2 \phi}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}} \quad (1)$$

Za območje Slovenije se izračunane vrednosti normalnih težnosti so v razponu od 980658,36 mGal do 980789,22 mGal, to je v razponu 130,86 mGal na geografski širini od 45,35016° do 46,97134°. Grafični prikaz je podan na sliki 7, statistični podatki pa so podani v preglednici 4.



Slika 7: Model normalnih (γ) težnosti Slovenije (oznaka SLO_NG).

Atmosferski popravek⁷ (Hinze et al., 2005):

$$\delta g_{ATM} = 0,874 - 9,9 \times 10^{-5}h + 3,56 \times 10^{-9}h^2 \quad (2)$$

Popravek je v [mGal], h - višina v metrih.

Za **popravek višine oz. popravek prostega zraka**⁸ uporabimo enačbo (Hinze et al., 2005), ki velja za elipsoid GRS80:

⁶ Angl. U.S. Geological Survey and the North American Gravity Database Committee

⁷ Angl. atmospheric effect

⁸ Angl. Height correction oz. Free-air correction

$$\delta g_{FA} = -(0,3087691 + 0,0004398\sin^2\varphi)h + 7,2125 \times 10^{-8}h^2 \quad (3)$$

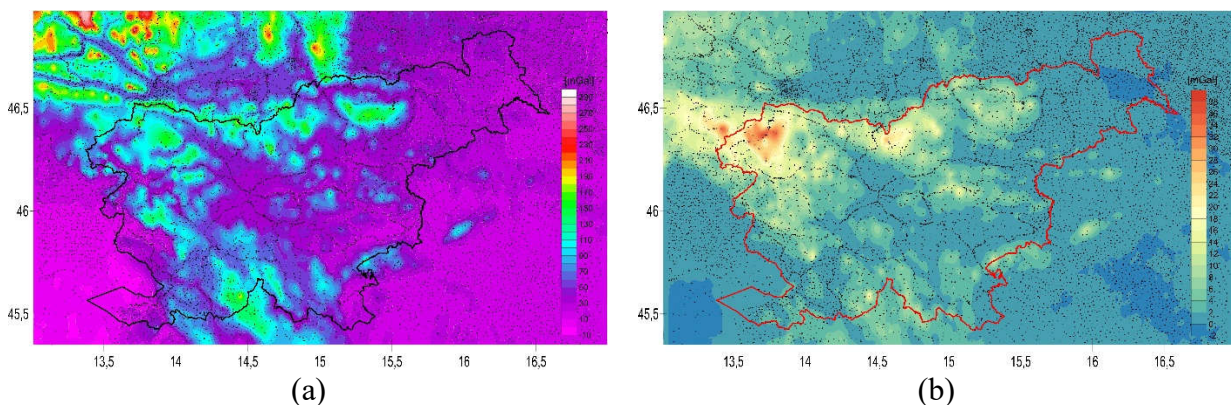
kjer je višina h v metrih, popravek v [mGal].

Topografski popravek razdelimo na dva dela in sicer popravek Bouguerove plošče in terenski popravek. **Popravek Bouguerove plošče** za točke na terenu (LaFehr, 1991, NGIA, 2008):

$$\delta g_B = 2\pi G\rho(\mu h - \lambda R) \quad (4)$$

kjer so: μ in λ brez-dimenzionalna koeficienta vzeta iz (Holom in Oldow, 2007). Upošteva se radij 166.7 km (LaFehr, 1991), ki temelji na sferni Zemlji z polmerom 6371 km; G (gravitacijska konstanta) = $6.673 \pm 0.01 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$. Ta konstanta je nedavno sprejeta vrednost in se razlikuje od vrednosti podane v elipsoidu GRS80. h predstavlja referenčno višino točke. V enačbi so popravki podani v enoti m/s^2 , ki se pretvori v [mGal] z množenjem 10^5 , ρ - povprečna gostota Zemlje je 2670 kg/m^3 (Hinze et al., 2005). Prikaz izračunanih popravkov za Slovenijo je na sliki 8a, statistični kazalci pa v preglednici 4.

Za izračune **terenskih popravkov** smo uporabili programsko orodje TopoSK (Zahorec et al., 2017). Program TopoSK omogoča izračun različnih terenskih (topografskih) vplivov oz. popravkov gravimetričnih količin. Izračuni temeljijo na Pohankini formuli, ki izračuna gravitacijski učinek poliedričnega telesa (Pohanka, 1988) do podane razdalje. Uporabijo se različne ločljivosti DMR, pri čemer ločljivost narašča proti točki izračuna. V našem primeru je bil DMR25 (velikost celice $25 \times 25 \text{ m}$) uporabljen do razdalje 250 m, DTM100 (velikost celice $100 \times 100 \text{ m}$) od 250 m do 5240 m in DTM1000 (velikost celice $1000 \times 1000 \text{ m}$ oz. $3,0^\circ \times 4,5^\circ$) od 5240 m naprej. Za zunanji radij izračuna smo vzeli standardno razdaljo 166,7km (npr. Hinze et al., 2005), saj se s tem eliminira vpliv sfernega pokrova (Nowell, 1999). Za gostoto topografije je vzeta konstanta 2670 kg/m^3 , kar predstavlja povprečno gostoto kamenin na obravnavanem območju. Popravki so bili izračunani za 16455 točk v koordinatnem okvirju $45^\circ - 47^\circ$ severne geografske širine in $15^\circ - 17^\circ$ vzhodne geografske dolžine. Povprečna vrednost terenskega popravka je 3,03 mGal, standardna deviacija je 4,90 mGal, minimalni je 0,0 in maksimalni 56,70 mGal (v Avstriji). Razporeditev in velikost terenskih popravkov na območju Slovenije je prikazana na sliki 8b.



Slika 8: (a) Popravki Bouguerove plošče na širšem območju Slovenije (oznaka SLO_BP).
(b) Terenski popravki na širšem območju Slovenije (oznaka SLO_TP); oba prikaza z uporabljenimi gravimetričnimi točkami.

V preglednici 4 so zbrani statistični podatki za karto (model) normalnih težnosti γ Slovenije (oznaka SLO_NG), model Bouguerovih popravkov na območju Slovenije (oznaka SLO_BP) in model terenskih popravkov na območju Slovenije (oznaka SLO_TP).

Preglednica 4: Statistični podatki modelov SLO_NG, SLO_BP in SLO_TP.

	SLO_NG [mgal]	SLO_BC [mgal]	SLO_TC [mgal]
Min	980658,360	-1,680	-0,030
Max	980789,220	196,040	37,230
Razpon	130,860	197,720	37,260
Povp.	980720,731	55,684	4,185
Mediana	980722,330	48,545	2,300
Std. dev.	30,591	31,303	5,173

Pri tem se je potrebno zavedati, da je kvaliteta terenskih popravkov odvisna predvsem od kvalitete uporabljenih digitalnih modelov reliefa. V postopku izračuna terenskih popravkov imamo kot referenčno višino možnost upoštevati višino posamezne dane točke, za katero se anomalija računa, ali pa pripadajočo višino te točke vzeto iz digitalnega modela reliefa. Glede na raznolikost kvalitete vhodnih podatkov gravimetričnih točk, pri čemer so vprašljive predvsem geolokacije in posledično višine jugoslovanskih gravimetričnih podatkov lahko upravičeno sklepamo tudi na vprašljivo kvaliteto izračunanih terenskih popravkov.

Izdelane karte gravimetričnih anomalij težnosti Slovenije

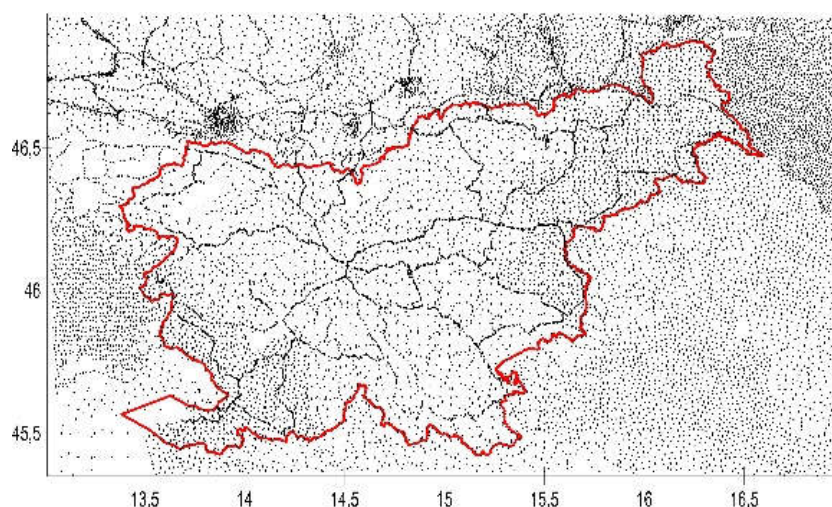
Z uporabo zgoraj navedenih popravkov lahko izračunamo različne anomalije težnosti. Izračuni se nanašajo na posamezne točke, na katerih imamo opravljene gravimetrične meritve in ki niso enakomerno (homogeno) razporejene. Za potrebe izrisa novih kart anomalij jih je zato potrebno prikazati v pravilni celični mreži, za kar uporabimo metodo interpolacije '*Krigging*'. Npr. Kamguia et al. (2007) so na več testnih območjih izvedli primerjalno študijo interpolacijo gravimetričnih anomalij, pri čemer so testirali in analizirali naslednje metode interpolacije: '*Minimum Curvature Spline in Tension*', '*Least Square Polynomial Fitting*' (dve varianti), '*Krigging*' in '*Inverse distance to a power*' (dve varianti). Kot optimalna se je izkazala metoda '*Krigging*' zato jo uporabimo tudi v našem primeru, saj gre za podobna izhodišča.

Območje danih podatkov in izračuna je $45^{\circ} - 47^{\circ}$ N in $15^{\circ} - 17^{\circ}$ E. Za ciljno ločljivost izberemo korak po geografski širini $30''$ in po geogr. dolžini $45''$, kar v naravi predstavlja celico velikosti približno 1000×1000 m. Ta korak je izbran na podlagi dejstva, da je z enako ločljivostjo izdelan novi slovenski model kvazi-geoida SLO_VRP2016/Koper (Omang, 2016).

Pri izdelavi kart (modelov) gravimetričnih anomalij smo uporabili naslednje razpoložljive nize gravimetričnih podatkov:

- Podatki osnovne gravimetrične mreže,
- gravimetrični podatki reperjev nivelmanske mreže 1. reda,
- podatki nove regionalne gravimetrične izmere Slovenije,
- filtrirani gravimetrični podatki, bivše SFRJ za območje Slovenije,
- gravimetrični podatki obmejnega območja sosednjih držav (Italija, Avstrija, Madžarska in Hrvaška).

Skupaj je bilo tako izračunanih 15.930 točkovnih anomalij, od tega 6457 na območju Slovenije in preostalih 9473 na območju sosednjih držav. Na sliki 9 so prikazani vsi uporabljeni gravimetrični podatki.



Slika 9: Vsi razpoložljivi gravimetrični podatki Slovenije z okolico.

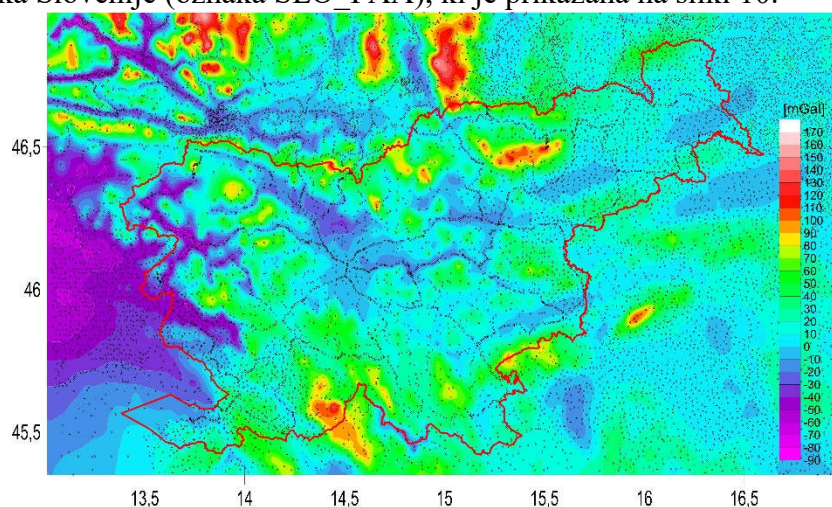
Razpolagamo torej z relativno velikim številom gravimetričnih točk, kar nam omogoči da izvedemo tudi analizo vpliva vhodnih podatkov na izračunane anomalije težnosti. Analiza je podrobneje predstavljena v Medved et al. (2021) in jo v tem prispevku ne podajamo.

Za izračun različnih prikazov gravimetričnih anomalij so bile uporabljene naslednje enačbe:

Anomalija prostega zraka⁹:

$$\Delta g_{FA} = g_{OPZ} - \gamma + \delta g_{ATM} + \delta g_{FA} \quad (5)$$

Anomalije izračunamo za vse dane gravimetrične točke. Iz njih izdelamo karto anomalij prostega zraka Slovenije (oznaka SLO_FAA), ki je prikazana na sliki 10.



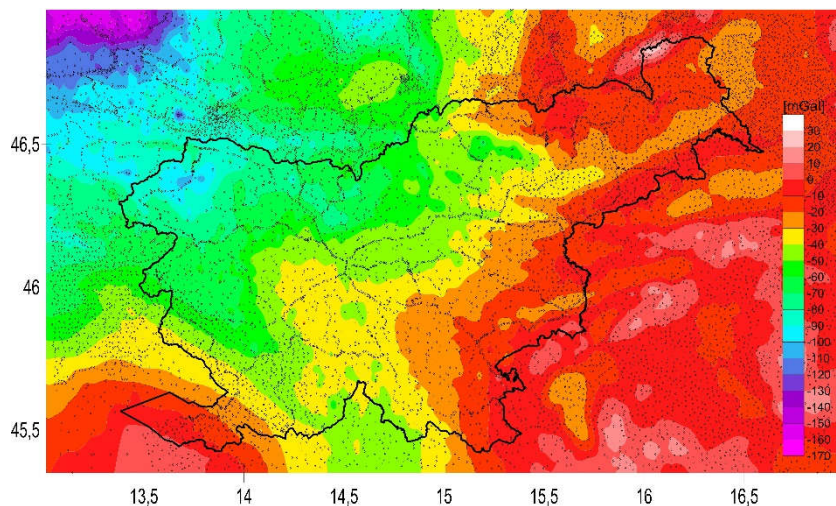
Slika 10: Karta anomalij prostega zraka Slovenije (SLO_FAA) z okolico in uporabljenimi gravimetričnimi točkami.

⁹ Angl. Free-air gravity anomaly

Bouguerova anomalija težnosti¹⁰:

$$\Delta g_B = g_{OPZ} - \gamma + \delta g_{ATM} + \delta g_{FA} - \delta g_B \quad (6)$$

kjer so g_{OPZ} – opazovana vrednost dejanske težnosti, γ – normalna težnost na elipsoidu GRS80, δg_{ATM} – atmosferski popravek, δg_{FA} – popravek prostega zraka, δg_B – Bouguerov popravek. Anomalije izračunamo za vse dane gravimetrične točke. Iz njih izdelamo Bouguerovo karto anomalij (oznaka SLO_BA), ki je prikazana na sliki 11.



Slika 11: Karta Bouguerovih anomalij Slovenije (SLO_BA) z okolico in uporabljenimi gravimetričnimi točkami.

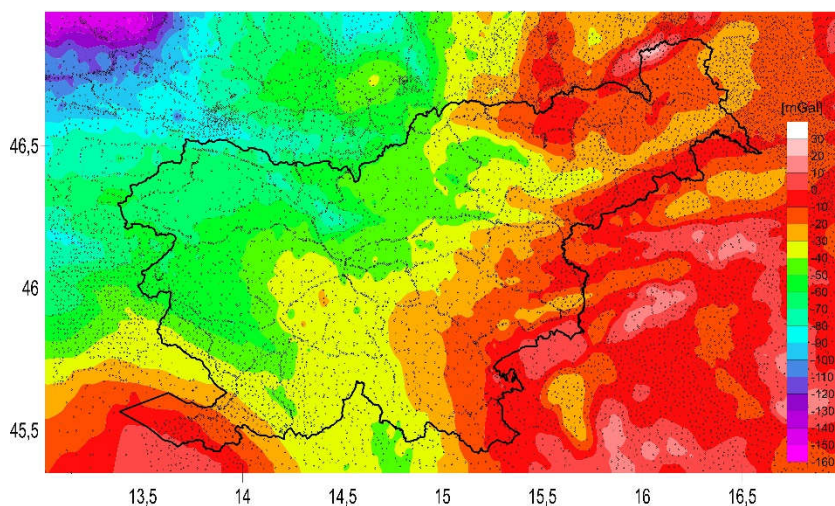
Popolna Bouguerova anomalija težnosti¹¹:

$$\Delta g_{CB} = g_{OPZ} - \gamma + \delta g_{ATM} + \delta g_{FA} - \delta g_B + TC \quad (7)$$

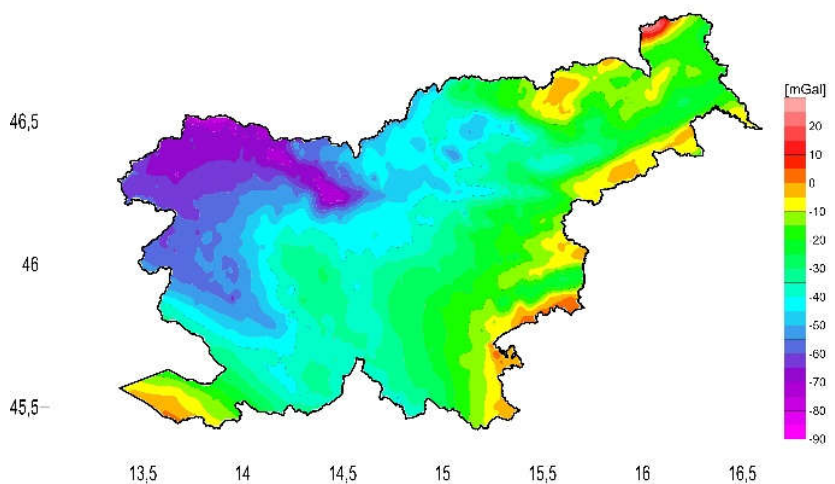
kjer je TC – terenski popravek. Popolne Bouguerova anomalije težnosti dobimo tako, da Bouguerovim anomalijam težnosti prištejemo še terenski popravek. Anomalije izračunamo za vse dane gravimetrične točke. Iz njih izdelamo karto popolnih Bouguerovih anomalij (oznaka SLO_CBA), ki je prikazana na sliki 12. Karta izrezana samo za območje Republike Slovenije je prikazana na sliki 13.

¹⁰ Angl. Bouguer gravity anomaly

¹¹ Angl. Complete Bouguer gravity anomaly



Slika 12: Karta popolnih Bouguerovih anomalij Slovenije (SLO_CBA) z okolico in uporabljenimi gravimetričnimi točkami.



Slika 13: Karta popolnih Bouguerovih anomalij Slovenije (SLO_CBA).

Statistični podatki za zgoraj navedene in prikazane karte (modele) gravimetričnih anomalij so zbrani v preglednici 5. Nanašajo se na izrezano območje znotraj Slovenije, torej ne na celotni koordinatni okvir obdelave.

Preglednica 5: Statistični podatki modelov gravimetričnih anomalij Slovenije.

	SLO_FAA [mgal]	SLO_BA [mgal]	SLO_CBA [mgal]
Min	-58,620	-106,030	-86,620
Max	135,120	22,680	23,150
Razpon	193,740	128,710	109,770
Povp.	17,878	-37,806	-33,621
Mediana	15,090	-36,900	-34,270
Std. dev.	26,017	21,254	17,753

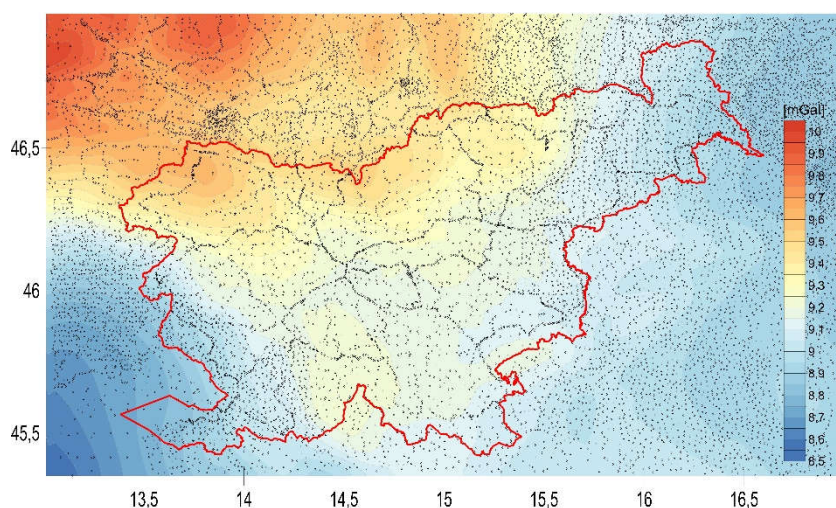
Indirektni učinek

Potrebno je poudariti še terminološko razliko pri uporabi različnih višin (Hackney in Featherstone, 2003). Pri uporabi nadmorskih oz. ortometričnih višin (oznaka H) govorimo o »anomalijah težnosti«¹², pri uporabi elipsoidnih višin (oznaka h) pa o »moteči težnosti«¹³. Razliko med njima predstavlja geoidna višina. Če bi bila le ta konstantna, bi bilo dejansko irelevantno, katere višine uporabljamo v izračunih, ker pa se spreminja (na območju Slovenije znaša od 44,16 m do 48,81 m) je to potrebno upoštevati. V fizikalnem smislu to razliko predstavlja t.i. *indirektni učinek (efekt)*.

Indirektni učinek se torej pojavi zaradi uporabe različnih višinskih datumov pri določitvi višin gravimetričnih točk in teoretičnega polja težnosti. Predstavlja vpliv težnosti mas med tema dvema višinskima datumoma, ki so zajete v popravke Bouguerove plošče. Če predpostavimo konstantno gostoto plošče med njima lahko popravek indirektnega efekta izračunamo kot (Hackney in Featherstone, 2003):

$$\delta g_{IE} = (0,3086 - 2\pi G\rho) \times N = 0,1976 \times N \quad (8)$$

kjer je N – geoidna višina v m , ρ – povprečna gostota Zemlje (2670 kg/m^3). Popravek nam poda vrednost v $[mGal]$. Na sliki 14 je prikazana karta indirektnih efektov za območje Slovenije z izolinijami $0,05 \text{ mGal}$.



Slika14: Karta geofizikalnega indirektnega efekta Slovenije z okolico in uporabljenimi gravimetričnimi točkami.

Poudariti je potrebno, da se pri vseh izdelanih kartah nismo posvečali pozornosti morski obali oz. morju (batimetričnih popravkov). Za morske površine namreč nimamo na razpolago gravimetričnih podatkov, prav tako nismo upoštevali ustreznih enačb pri računanju terenskih popravkov na morju. Pri vodnih površinah bi bilo namreč potrebno upoštevati ustrezno gostoto vode. Tako je npr. za opazovanja izvedena na morju gostota morske vode 1027 kg/m^3 , za opazovanja na sladki vodi znaša gostota vode 1000 kg/m^3 , in za opazovanja na ledenikih znaša gostota ledu 917 kg/m^3 . Več o tem podaja Nowell (1999).

¹² Angl. gravity anomaly

¹³ Angl. gravity disturbance

Zaključek

Prikazana karta Bouguerovih anomalij Slovenije je ponovno izračunana po več desetletjih. V tem času se je delno posodobila oz. revidirala sama metodologija izračuna anomalij težnosti. Poleg tega pa so se bistveno izboljšali »vhodni« podatki, ki jih potrebujemo za določitev karte anomalij težnosti. Predvsem imamo na razpolago kvalitetnejše digitalne modele reliefa in kvalitetnejše gravimetrične podatke. Ti podatki pa se ne nanašajo samo na ozemlje Slovenije ampak zajemajo tudi območja sosednjih držav. Predvidevamo namreč, da v prejšnjem izračunu anomalij težnosti podatkov sosednjih držav (razen Hrvaške) ni bilo na voljo. Razpolagamo tudi z učinkovito programsko opremo, ki omogoča relativno hitro obdelavo vseh zahtevanih podatkov.

Za izdelavo opisanih kart smo uporabili vse razpoložljive gravimetrične podatke na območju Slovenije in okolice. Skupaj je bilo tako izračunanih 15.930 točkovnih anomalij, od tega 6.457 na območju Slovenije in 9.473 na območju sosednjih držav. Kot je opisano smo iz obstoječega niza jugoslovanskih gravimetričnih podatkov izločili le tiste, ki smo jih ocenili kot grobo pogrešene in sicer le na podlagi geolokacije (presek z DMR). Pri tem se pojavi vprašanje, če niso v tem nizu podatkov grobe napake prisotne tudi v samih vrednostih težnih pospeškov in bi jih bilo morda smiselno v prihodnosti iz obdelave izločiti.

Nezanemarljiv vpliv pri končnem izdelku ima tudi uporabljena izbrana metoda interpolacije. Pri kreiranju končne pravilne celične mreže (iz nehomogeno razporejenih točk) imamo možnost uporabe različnih metod interpolacij. Razlike med njimi v tem članku sicer niso predstavljene, vendar pa so prisotne in bi bilo potrebno izvesti nadaljnje analize na to temo.

Iz izvedene primerjave različnih kart in analize vpliva vhodnih gravimetričnih podatkov lahko zaključimo, da imajo novejši gravimetrični podatki Slovenije velik vpliv na izdelavo kart gravimetričnih anomalij Slovenije. Prav tako je pomembno, da so vhodni podatki iz katerih se v nadaljnjih postopkih modelirajo karte zanesljivi, torej brez prisotnih grobih napak. Zato je pri izdelavi kart gravimetričnih anomalij bistveno, da se v postopkih obdelave gravimetričnih podatkov uporabi samo kvalitetne podatke. Priprava, čiščenje in analiza podatkov so bistveni del postopka, saj nam le to omogoča izdelavo kvalitetnih končnih modelov.

Na območju Slovenije smo tako po nekaj desetletjih dobili posodobljeno karto gravimetričnih anomalij, ki temelji na posodobljenih postopkih izračuna in predvsem na kvalitetnejših vhodnih podatkih, tako gravimetričnih kot DMR. Predvidevamo, da je zato izdelana nova karta Bouguerovih anomalij za območje Slovenije boljše kakovosti in bolje odraža dejansko stanje na področju težnostnega polja. Kot taka omogoča kvalitetnejše interpretacije pojavov.

Literatura

- Berk, S., Komadina, Ž. 2013. Local to ETRS89 Datum Transformation for Slovenia: Triangle-Based Transformation Using Virtual Tie Points. Survey Review, 45(328), 25–34. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1752270611Y.0000000020>
- Bilibajkić, P., Mladenović, M., Mujagić, S. in Rimac, I. 1979. Tolmač za gravimetrično karto SFR Jugoslavije – Bouguerove anomalije. Geofizika Zagreb, Zavod za geološka in geofizična raziskovanja Beograd.
- Čibej B. 1967. Regionalna gravimetrična karta Slovenije 1966-1967. Geološki zavod Ljubljana.

- De Marchi, P. A., Ghidella M.E., Tocho C.N. 2014. Analysis of Different Methodologies to Calculate Bouguer Gravity Anomalies in the Argentine Continental Margin. *Geosciences*. 4 (2):33-41. DOI: 10.5923/j.geo.20140402.02.
- Farr T.G., P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, D. Alsdorf, 2007. The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, DOI: [10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183)
- Forsberg, R., Tscherning C.C. 2008. An overview manual for the GRAVSOFIT geodetic gravity field modelling programs. Contract report for JUPEM. 2nd edition.
- Hackney, I.R., Featherstone, W. 2003. Geodetic Versus Geophysical Perspectives of the 'Gravity Anomaly'. *Geophysical Journal International*. 154, 35-43. DOI: 10.1046/j.1365-246X.2003.01941.x.
- Hinze, W.J., Aiken, C., Brozena, J.M., Coakley, B.J., Dater, D., Flanagan, G.P., Forsberg, R., Hildenbrand, T.G., Keller, G.R., Kellogg, J.W., Kucks, R., Li, X., Mainville, A., Morin, R.J., Pilkington, M.I., Plouff, D., Ravat, D., Román, D.A., Urrutia-Fucugauchi, J., Véronneau, M., Webring, M.W., & Winester, D. 2005. New standards for reducing gravity data : The North American gravity database. *Geophysics*, 70,4: 25-32. DOI: 10.1190/1.1988183
- Holom D.I., Oldow J.S. 2007. Gravity reduction spreadsheet to calculate the Bouguer anomaly using standardized methods and constants. *Geosphere*, vol. 3, No. 2. doi: 10.1130/GES00060.1. p. 86-90.
- Kamguia, J., Tabod, C. T., Tadjou, J. M., Manguelle-Dicoum, E., Nouayou, R., & Kande, L. H. (2007). Accurate gravity anomaly interpolation: A case study in Cameroon, Central Africa. *Earth Sciences Research Journal*, 11(2), 115-123.
- Kiss J. 2006. Bouguer anomaly map of Hungary. *Geophysical transactions*, 45, 2: 99 – 104 http://real.mtak.hu/11103/1/GFT_JKiss_english.pdf
- Koler, B., Medved K., Kuhar M. 2006. Projekt nove gravimetrične mreže 1. reda republike Slovenije. *Geodetski vestnik*, 50 (3), 451–460. http://www.geodetski-vestnik.com/50/3/gv50-3_451-460.pdf
- Koler, B., Medved K., Kuhar M. 2012a. The New Fundamental Gravimetric Network of Slovenia. *Acta geodaetica et geophysica Hungarica*, 47(3): 271–286. <http://akademai.com/doi/abs/10.1556/AGeod.47.2012.3.1>.
- Koler, B., Stopar, B., Sterle, O., Urbančič, T., in Medved, K. 2019. Nov slovenski višinski sistem. *Geodetski vestnik*, 63 (1), 27–40. http://www.geodetski-vestnik.com/63/1/gv63-1_koler.pdf
- LaFehr, T.R. 1991. An exact solution for the gravity curvature (Bullard B) correction. *Geophysics*, vol 56, 1179-1184. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1443138>
- Medved, K., Kuhar, M., Stopar, B., Koler, B. 2009. Izravnava opazovanj v osnovni gravimetrični mreži Republike Slovenije, *Geodetski vestnik* 53, 2: 223-238. http://www.geodetski-vestnik.com/53/2/gv53-2_223-238.pdf
- Medved, K., Kuhar, M., Koler, B. 2019. Regional gravimetric survey of central Slovenia, *Measurement*, 136, 395-404. DOI: [10.1016/j.measurement.2018.12.065](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.065).
- Medved K, Odalović O, Koler B. 2021. New Bouguer Anomaly Map for the Territory of the Slovenia. *Remote Sensing*. 13(22):4510. <https://doi.org/10.3390/rs13224510>
- Meurers, B., Ruess, D. 2009. A new Bouguer gravity map of Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*. 102, 62-70. https://www.univie.ac.at/ajes/archive/volume_102_1/meurers_ruess_ajes_v102_1.pdf
- NGIA 2008. Gravity stations data format and anomaly computations. National Geospatial-Intelligence Agency, Office of Geoint Sciences. <http://bgi.obs-mip.fr/fr/content/download/725/4975/file/computations.pdf>
- Nowell, D. 1999. Gravity terrain corrections - an overview. *Journal of Applied Geophysics*. 42. 117-134. DOI: [/10.1016/S0926-9851\(99\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(99)00028-2)
- Omang O.C.D. 2016. Geoid of Slovenia 2016, Interno poročilo, Honefoss, Norwegian Mapping Authority

- Pohánka, V. 1988. Optimum expression for computation of the gravity field of a homogeneous polyhedral body. *Geophys. Prospect.* 36, 733–751. DOI: [10.1111/j.1365-2478.1988.tb02190.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1988.tb02190.x)
- Somigliana, C. 1929. Teoria generale del campo gravitazionale dell'ellissoide di rotazione. *Memorie della Societ`a Astronomica Italiana* 4, 425. <https://adsabs.harvard.edu/pdf/1929MmSAI...4..425S>
- Stopar, R. 2018. Bouguerove anomalije. v *Geološki atlas Slovenije - Kartografsko gradivo*, 2. popravljena in dopolnjena izd., In: Novak M., Rman N. (Ur.), Ljubljana, Geološki zavod Slovenije. 24-25.
- Tassis, G.A., Grigoriadis, V., Tziavos, I., Tsokas, G.N., Papazachos, C., Vasiljević, I. 2013. A new Bouguer gravity anomaly field for the Adriatic Sea and its application for the study of the crustal and upper mantle structure. *Journal of Geodynamics*, 66: 38–52. DOI: [10.1016/j.jog.2012.12.006](https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.12.006).
- Tiberti, M., Orlando, L., Di Bucci, D., Bernabini, M., Parotto, M. 2005. Gravity anomaly map and crustal model of the Central-Southern Apennines (Italy). *Journal of Geodynamics*, 40: 73-91. DOI: [10.1016/j.jog.2005.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.07.014).
- Ullrich, C., in Medved, K. 2015. A Highly Accurate Absolute Gravimetric Network for Slovenia. 26th IUGG General Assembly 2015, Praga.
- Uredba (2014). Uredba o določitvi parametrov horizontalne sestavine in gravimetričnega dela vertikalne sestavine državnega prostorskega koordinatnega sistema, imen teh sestavin in državne kartografske projekcije. *Uradni list Republike Slovenije*, št. 57/2014.
- Varga, M.; Stipčević, J. 2021. Gravity anomaly models with geophysical interpretation of the Republic of Croatia, including Adriatic and Dinarides regions. *Geophys. J. Int.*, 226, 2189–2199. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab180>
- Zahorec, P.; Marušiak, I.; Mikuška, J.; Pašteka, R.; Papčco, J. 2017. Understanding the Bouguer Anomaly, Numerical Calculation of Terrain Correction within the Bouguer Anomaly Evaluation (Program Toposk); Roman Pašteka, R., Mikuška, J., Meurers, B., Eds.; Understanding the Bouguer Anomaly: A Gravimetry Puzzle; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 79–92. ISBN 978-0-12-812913-5. https://books.google.si/books?hl=en&lr=&id=ue9_DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA79&ots=3I5ABZ7TPw&sig=nQY5RuBxpY_kaomsKKiTnKd3ZTY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Zahorec, P., Papco, J., Pasteka, R., Bielik, M., Sylvain, B., Braitenberg, C., Ebbing, J., Gabriel, G., Gosar, A., Grand, A., Götze, H. J., Hetényi, G., Holzrichter, N., Kissling, E., Marti, U., Meurers, B., Mrlina, J., Nogová, E., Pastorutti, A., Varga, M. 2021. The first pan-Alpine surface-gravity database, a modern compilation that crosses frontiers. *Earth System Science Data*. 13. DOI: 10.5194/essd-13-2165-2021.
- Žagar T. in Berk S. 2009. Primerjava podatkov SRTM z DMV Slovenije. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008, 14. strokovno srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, Ljubljana, 22. januar 2009. Zbornik predavanj. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, str. 77–86.
- Spletna stran CRS-EU, 2016: IT_ROMA40. http://www.crs-geo.eu/nn_124226/crseu/EN/CRS_Description/crs-national_node.html?_nnc=true Pridobljeno 15.2.2020