

ANALIZA ANIZOTROPIJE KRAŠKEGA POVRŠJA Z UPORABO SMERNIH SEMIVARIOGRAMOV IZ DIGITALNEGA MODELA RELIEFA

dr. Timotej Verbovšek

Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo
timotej.verbovsek@ntf.uni-lj.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1908-5759>

DOI: https://doi.org/10.3986/9789610506683_02

UDK: 551.435.82:54.03

IZVLEČEK

Analiza anizotropije kraškega površja z uporabo smernih semivariogramov iz digitalnega modela reliefa

V prispevku je predstavljena uporaba semivariogramov za določevanje anizotropnih lastnosti površja. Za kraško površje je značilno, da ga oblikuje tektonska poškodovanost kamnin, kot glavna površinska oblika pa so značilne vrtače, ki so velikokrat nanizane v določeni smeri. Iz semivariogramov razberemo stopnjo anizotropije površja in tudi smer, v kateri se površje najbolj spreminja. Spreminjanje je opredeljeno kot višinske razlike iz digitalnega modela reliefa. Na primeru šestih analiziranih območij smo pokazali, da imajo kraška območja različno stopnjo anizotropije. Preferenčne smeri, pridobljene iz semivariogramov, se zelo dobro ujemajo s smermi, ki jih določimo vizualno iz kart, pa tudi s smermi prelomov na geoloških kartah. Metoda je torej uporabna za kvantitativno določevanje anizotropije, kot njeno nadgradnjo pa predlagamo izdelavo strukturno-geoloških kart.

KLJUČNE BESEDE

kras, vrtače, površje, anizotropija, semivariogram

ABSTRACT

Anisotropy of karstic surface with directional semivariograms from digital relief model

The paper presents use of semivariograms to determine the anisotropic properties of the land surface. Karstic landforms are typically shaped by tectonic deformations, and the main surface features are usually dolines, usually formed in a linear direction. From the semivariograms it is possible to determine the degree of anisotropy and the preferential direction, in which the surface changes the most. Surface changes are defined as height differences, obtained from the digital relief model. Results, based on the six studied test areas, show that anisotropy is present in the karstic areas. Directions from semivariograms agree very well with the ones obtained from visual inspection of the maps, and with the orientations of the faults. Method is therefore useful for quantitative determination of anisotropy. As its upgrade we propose a comparison with structural-geological maps.

KEY WORDS

karst, dolines, caves, anisotropy, semivariogram

1 Uvod

Kraško površje je zelo razgibano in njegova oblikovanost je predvsem posledica raztapljanja kamnin. Na površju je razvitih več površinskih oblik, ki so genetsko povezane s podzemnimi (Ford in Williams 2007). Med prvimi prevladujejo vrtače, s katerimi so se kvantitativno ukvarjali številni raziskovalci že pred več kot 40 leti (Williams 1972; Jennings 1975; White in White 1979; Čar 1982 in 1986), raziskave vrtač pa intenzivno potekajo tudi v Sloveniji (na primer v zadnjih letih Žvab Rožič, Čar in Rožič 2015; Šegina s sodelavci 2018; Podobnikar, Štefančič in Verbovšek 2019; Verbovšek in Gabor 2019; Mihevc in Mihevc 2021; Novljan 2021). Ena zanimivejših, a relativno slabo preučevanih lastnosti kraškega površja je njegova anizotropija, torej spreminjanje lastnosti površja v določeni smeri. Za kraško površje je namreč značilno, da ga oblikuje tektonska poškodovanost kamnin, zaradi katere so kamnine hidrogeološko zelo različne, posledično pa hidrogeološke lastnosti vplivajo na raztapljanje kamnin, na pretakanje podzemne vode v krasu (Šušteršič 2006) in na oblikovanost površja. Različne kamnine se namreč pri tektonskih deformacijah drugače poškodujejo, zato v kamninah nastanejo zdrobljene, porušene in razpoklinske cone (Čar 1982; Bauer, Schröckenfuchs in Decker 2016), predvsem pa se v različnih tektonskih conah oblikujejo različni tipi vrtač (Čar 2001 in 2018) in s tem tudi površja.

2 Metode dela

Za ugotavljanje smernih lastnosti površja smo uporabili lastnosti semivariograma, ki se uporabljajo pri prostorski interpolacijski metodi krigiranja oziroma kriganja (kakor lahko tudi tvorimo glagolnik iz priimka Krige, avtorja metode) (Davis 2002). Semivariogram je graf odvisnosti variance (oziroma polovice variance oziroma semivariance, od tod tudi ime semivariogram) z razdaljo med pari točk, ki jih analiziramo. Med bližnjimi pari točk je varianca majhna, saj so si vrednosti točk (na primer nadmorske višine površja) podobne. Z razdaljo korelacija med vrednostmi točk upada, semivarianca se posledično večja. To večanje ni linearno, poleg tega pa se varianca na neki razdalji večinoma ustali na določeni vrednosti in se ne spreminja več. Semivariogramu lahko tako pripišemo tri lastnosti oziroma vrednosti (slika 1): *doseg* (angleško *range*), ki je razdalja, s katero se varianca v prostoru ne spreminja več, *prag* (angleško *sill*), ki je vrednost semivariance, dosežene na razdalji dosega, in *odstopanje* (angleško *nugget*), to je odsek krivulje semivariograma na ordinatni osi. Slednji izraz je ponekod preveden tudi kot tako imenovani efekt zlatega zrna (Zagmajster, Sket in Culver 2008), kar je posledica dobesednega prevoda besede (angleško *nugget*), toda ta izraz pri statistični analizi ne pove kaj dosti. Z izbiro omenjenih vrednosti sprva določimo samo obliko semivariograma, ki naj se čim bolje prilega podatkom, s tem pa dobimo tudi vpogled v lastnosti podatkov (kako se spreminjajo v prostoru). Nadgradnja semivariograma, ki je relativno redko uporabljena, je preučevanje različnih semivariogramov v različnih smereh – torej preučevanje anizotropije. V GIS okolju oziroma z ustreznimi geostatističnimi programi se lahko tega lotimo na dva načina, ki se med seboj ne izključujeta; lahko si izberemo smer v prostoru (azimut) in naredimo semivariogram v tej smeri, lahko pa izberemo možnost hkratnega prikaza več semivariogramov na istem grafu in tako dobimo vpogled v stopnjo anizotropije. Če je namreč območje izotropno, si bodo vsi semivariogrami podobni (se bodo prekrivali), v primeru velike anizotropije pa se bodo precej razlikovali. Poleg tega lahko tudi numerično ovrednotimo anizotropijo z razmerjem največjega dosega (torej v smeri, ki ima največji doseg) in najmanjšega dosega. Večje ko je to razmerje, večja je anizotropija (Lyew-Ayee, Viles in Tucker 2007).

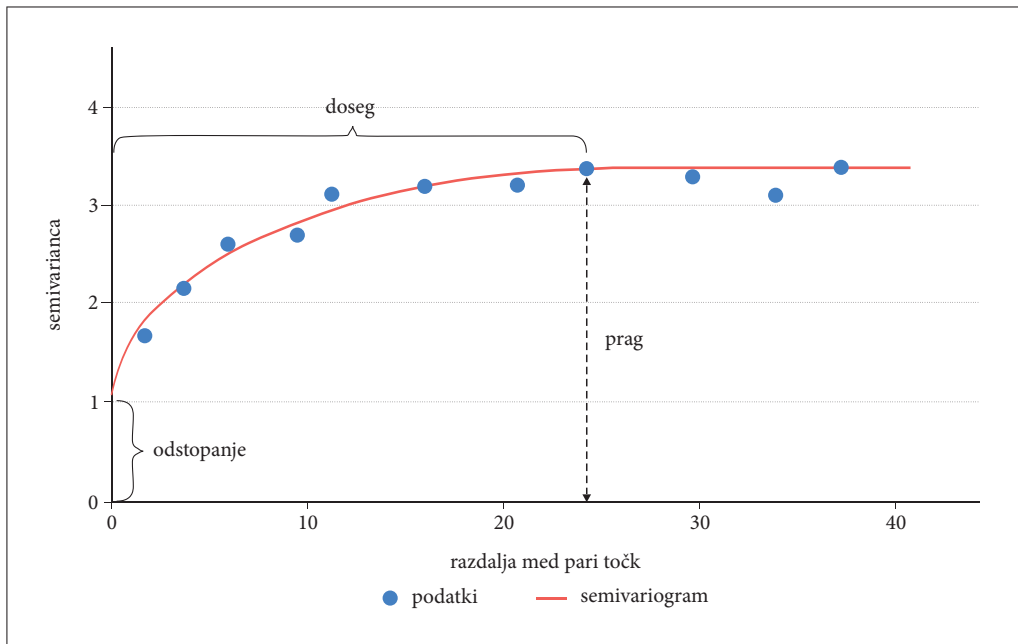
Te lastnosti lahko izkoristimo za preučevanje kraškega površja preko njegove spremenljivosti, ki je v tem prispevku določena kot razlika v nadmorskih višinah površja oziroma digitalnega modela višin (manjša razlika v višinah torej pomeni manjšo spremenljivost površja). Če so vrtače nanizane v eni smeri, bo spremenljivost površja zaradi večje razgibanosti nadmorskih višin v tej smeri precej večja (in s tem bo večja semivarianca) kot na primer v pravokotni smeri, kjer bo površje manj razgibano. Podoben

pristop so za analizo različnih tipov pobočnih sedimentov uporabili Trevisani, Cavalli in Marchi (2009), za analizo kraškega površja pa Lyew-Ayee, Viles in Tucker (2007). Za model kriginanja je bil izbran tako imenovani stabilni model (angleško *stable model*, ki je razširitev eksponentnega modela; Johnston s sodelavci 2001), ker je bilo ujemanje s podatki boljše kot pri na primer sferičnem (Zagmajster, Sket in Culver 2008), Gaussovem ali eksponentnem modelu, pri ostalih preučenihih modelih pa so bila ujemanja še slabša. Semivariogrami so bili narejeni v programskem paketu ESRI ArcGIS 10.5.

Namen prispevka je torej primerjati smerne semivariograme na različno zakraselih območjih, kjer se pojavljajo vrtače, in preveriti, v kolikšni meri je opisana metoda uporabna za določevanje stopnje anizotropije, pa tudi za to, v kateri smeri je variabilnost površja največja. Ta smer je, kot omenjeno, največkrat vezana na litološke meje in predvsem na tektonske cone.

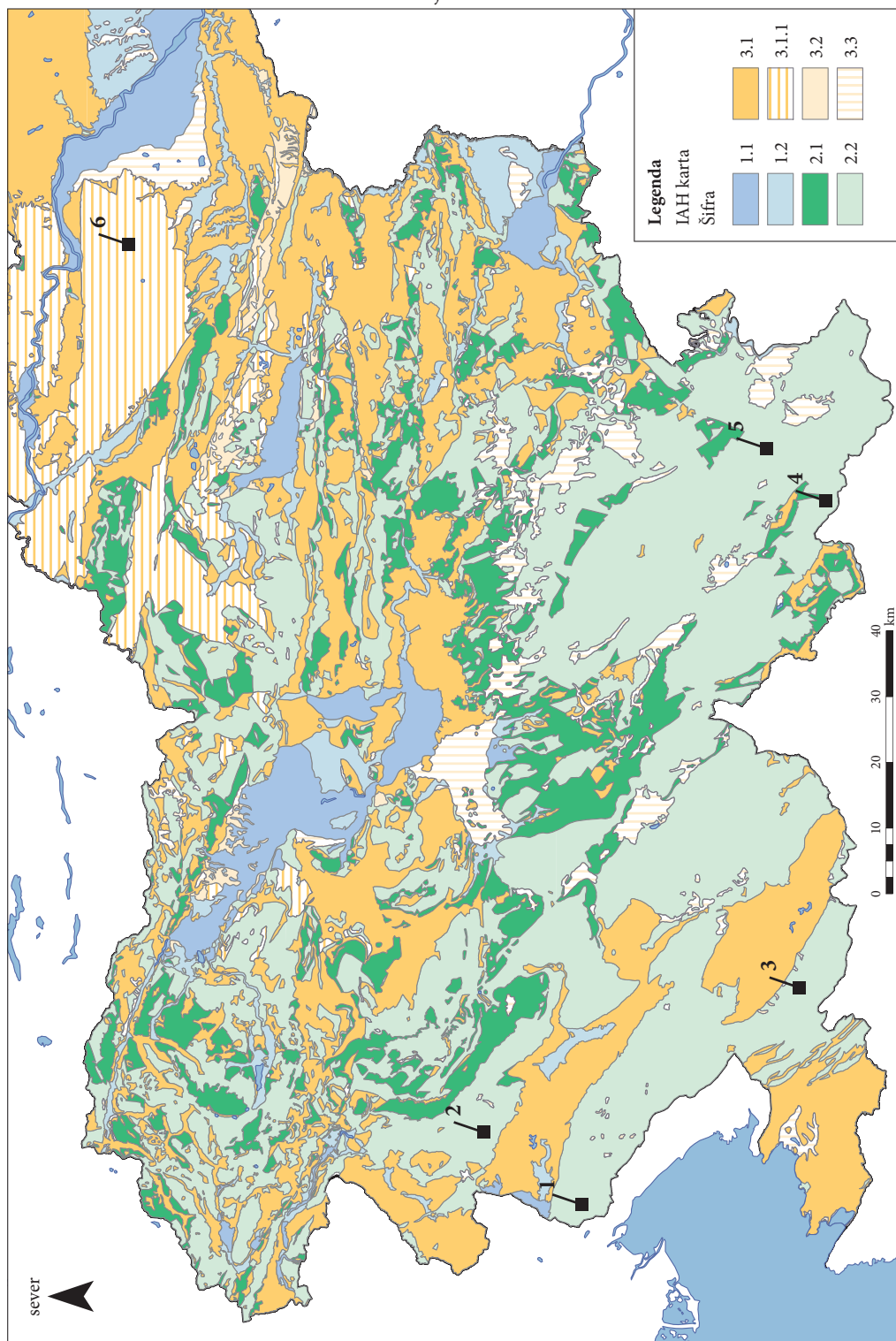
3 Testna območja

Metoda je bila preizkušena na petih kraških območjih in na enem nekraškem za preverbo delovna metoda. Območja (slika 2) so vsa iste velikosti (2×2 km), pridobljena iz rastrskih slojev nadmorskih višin s portala Agencije Republike Slovenije za okolje (Atlas voda 2021). Rastrski podatki imajo prostorsko ločljivost 1×1 m, za analize semivariogramov pa so bili pretvorjeni v vektorske točkovne sloje



Slika 1: Semivariogram in njegove komponente.

Slika 2: Lokacije preučenihih območij (kvadrati 2×2 km), katerih številke od 1 do 6 ustrezajo opisu v preglednici 1. Kratice so šifranti mednarodne hidrogeološke (IAH) karte. Kraške in razpoklinske kamnine so prikazane v zelenih odtenkih s šiframa 2.1 in 2.2. Šifri 1.1. in 1.2 predstavljata porozne medzrnske vodonosnike (predvsem prode), šifre 3.1, 3.1.1., 3.2 in 3.3. pa nekraške kamnine – slabo izdatne manjše vodonosnike ali vodonosnike z omejenimi viri oziroma brez virov podzemne vode (v glavnem magmatske, metamorfne in vulkanoklastične kamnine, fliš, glinavce in podobno). ► (str. 32)

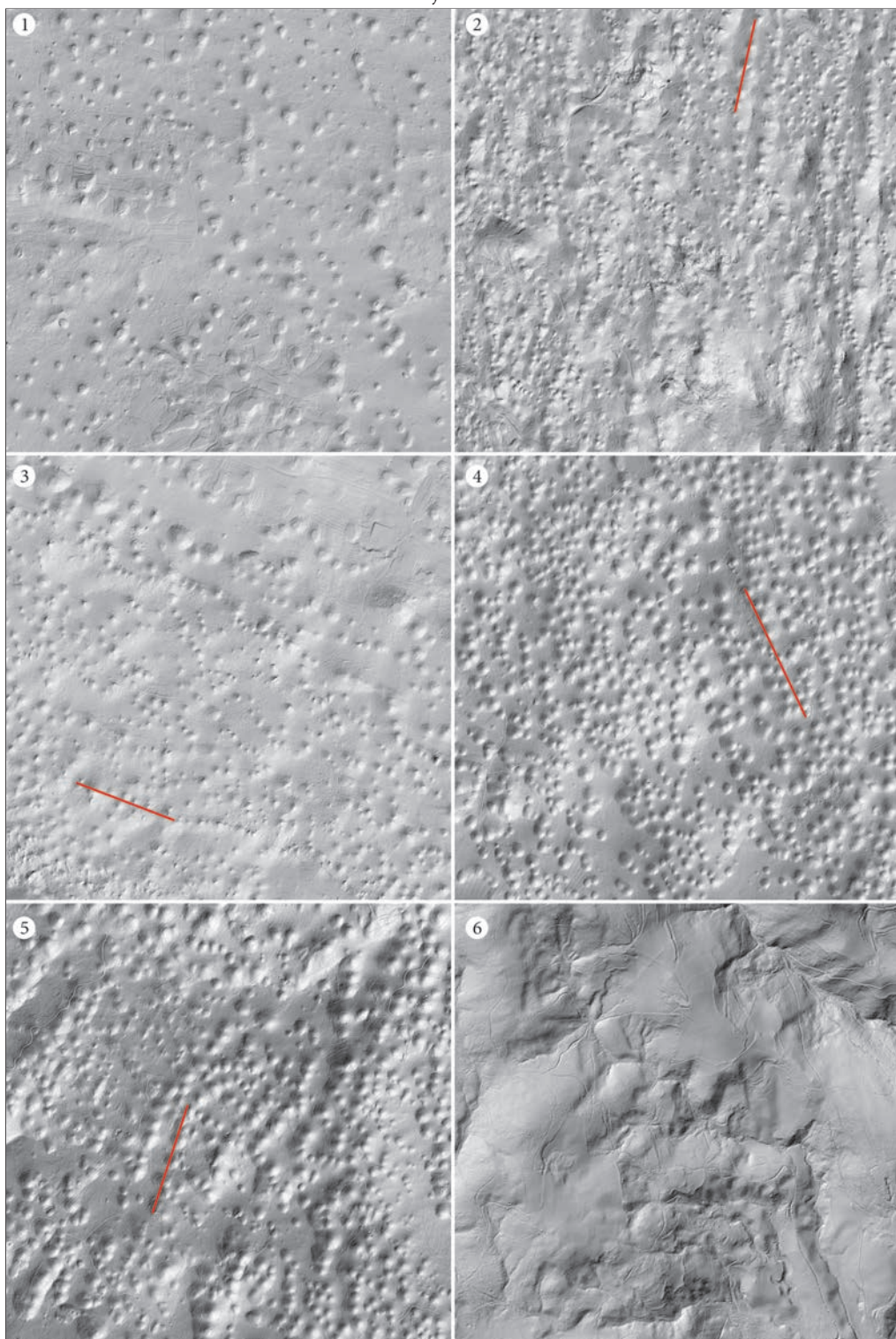


Preglednica 1: Izbrana območja in njihove lastnosti. *Smer OGK je prevladujoča smer prelomnih struktur, odčitana s pripadajočega lista Osnovne geološke karte v merilu 1:100.000.

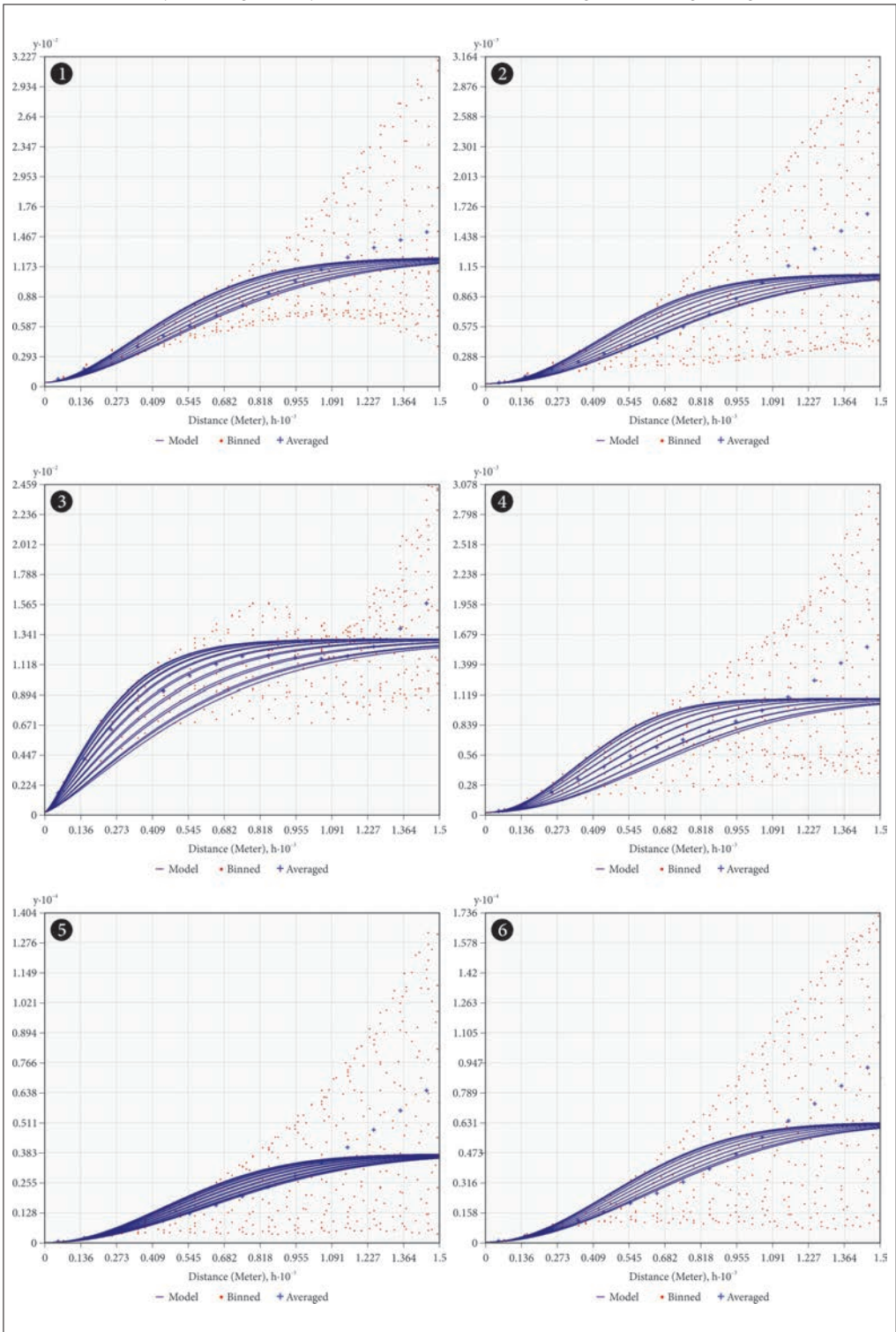
številka območja na karti	kratko ime	geološka zgradba	opombe	razmerje daljši/krajši doseg	azimut (iz semi-vario-grama)	ročno odčitani azimut	smer OGK*
1	Kras	spodnje- in zgornjekredni apnenci ter dolomiti, zgornjekredni rudistni apnenci	vizualno anizotropno območje	1,39	65°	–	–
2	Trnovski gozd	plastoviti spodnjekredni apnenci, spodnjekredni deloma oolitni apnenci, zgornjejurski koralni apnenci	vidna anizotropija v dveh smereh	1,44	10°	15°	10°
3	Matarsko podolje	spodnje- in zgornjekredni apnenci ter dolomitne in apnenčaste breče, zgornjekredni rudistni apnenci	vidna izrazita anizotropija	2,33	130°	120°	115°
4	Bilpa	biomikritni spodnjekredni apnenci, v manjši meri dolomiti, apnenčaste breče in zgornjejurski apnenci	vidna izrazita anizotropija	1,81	150°	155°	150°
5	Rog	spodnjekredni biomikritni apnenci, srednejurski mikritni apnenci, v manjši meri spodnejurski dolomiti	vidna anizotropija v dveh smereh	1,37	15°	15°	40°
6	Pohorje	tonalit, muskovitno-biotitni gnajs, v manjši meri amfibolit in marmor	grape, nekraško površje	1,32	15°	–	–

Slika 3: Senčeni modeli izbranih območij z vrisanimi prevladujočimi smermi nanizanih vrtač. Številke na sliki ustrezajo številkam območij v preglednici 1. Vsa območja so orientirana proti severu in velikosti 2 × 2 km. ► (str. 34)

Slika 4: Semivariogrami izbranih območij. Črta predstavlja model oziroma krivuljo semivariograma, ki jo prilagajamo točkam na grafu – podatkom medsebojnih parov razdalj med prostorskimi točkami, združenimi (angleško binned) v skupine. Ker slik ni možno spreminjati, so tukaj razložene in podane vrednosti na obeh koordinatnih oseh. Vrednosti na x-osi so razdalje med pari točk (povsod je zaradi medsebojne primerjave semivariogramov določena največja ista vrednost, 1500 m). Vrednosti na y-osi so semivarianca, ki je za območja različna in teh vrednosti ni možno prilagajati; za območje ① je vrednost 323 m, ②: 3164 m, ③: 245,9 m, ④: 3078 m, ⑤: 14.040 m, ⑥: 17.360 m. Številke na sliki ustrezajo številkam območij v preglednici 1. ► (str. 35)



Analiza anizotropije kraškega površja z uporabo smernih semivariogramov iz digitalnega modela reliefa



z isto prostorsko ločljivostjo, saj metoda krigiranja in semivariogramov kot vhodni podatek zahteva točkovni sloj. Metoda je bila preizkušena tudi na slojih s prostorsko ločljivostjo 5×5 m, ki so bili narejeni iz prvotnih slojev z ločljivostjo 1×1 m z ukazom Resample v programskem paketu ESRI ArcGIS.

Območja so predstavljena na karti, ki prikazuje hidrogeološko zgradbo ozemlja Slovenije (Hidrogeološka karta 2006), in je prikazana namesto geološke karte Slovenije. Razloga sta dva – zaradi enostavnosti, majhnega števila enot in predvsem zaradi dejstva, da je bila izdelana iz litološke karte Slovenije, ta karta odslikava geološko zgradbo ozemlja in zadošča za splošni prikaz izbranih območij. Poleg tega bi bile obstoječe geološke karte v merilu 1 : 100.000 za splošen prikaz preveč podrobne. Litološke enote Geološke karte Slovenije v merilu 1 : 250.000 so bile razdeljene na osnovi svojih hidrogeoloških lastnosti v določene razrede skladno s priporočili IAH klasifikacije (Hidrogeološka karta 2006). Za analizo je bilo izbranih pet kraških območij ter dodatno šesto na Pohorju, kjer se pojavljajo magmatске in metamorfne kamnine. To območje je bilo dodano za primerjavo, kako izgleda vizualno in tudi kvantitativno semivariogram na ozemlju, ki nima take morfološke razgibanosti kot kraške vrtače, ki jih je v izbrani smeri več (in se površje zato hitro spreminja), temveč gre za rečni relief z grapami. Poleg tega tektonika na teh kamninah ne vpliva na oblikovanost tako, kot na krasu, kjer so prelomne strukture ključne za oblikovanost površja.

4 Rezultati in razprava

V preglednici 1 so za vsako preučevano območje podani kvantitativni parametri, pridobljeni z analizo smernih semivariogramov, tako razmerje med največjim in najmanjšim dosegom kot tudi azimut, pri katerem je variabilnost površja največja.

Največje razmerje (2,33) in s tem največja anizotropija površja sta razvidna na območju **Matarskega podolja (številka 3)**, kjer so vrtače vizualno zelo usmerjene v smeri približno SZ–JV, kar ustreza tako litološkim mejam kot tudi tektonskim elementom. Ročno določena smer nanizanih vrtač iz karte senčenega modela površja je 130° (zaradi preglednosti je na kartah na sliki 3 prikazana le po ena reprezentativna črta), računalniško pridobljena vrednost pa 120° . Vrednosti sta si torej zelo podobni. Tudi na območju **Bilpe (številka 4)** je razmerje veliko (1,81), smeri nanizanih vrtač pa sta si zelo podobni. Anizotropija obeh območij je razvidna tudi na semivariogramih (slika 4), saj so krivulje posameznih semivariogramov v različnih smereh med seboj najbolj oddaljene. Manjša, a še vedno vidna anizotropija je na območju **Trnovskega gozda (številka 2)**, kjer je razmerje 1,44 sicer manjše kot prej, a še vedno bistveno večje kot 1 (izotropna vrednost). Tudi krivulje semivariogramov so med seboj manj razmaknjene, a anizotropne lastnosti potrjujejo tudi podobni (ročno in računalniško pridobljeni) vrednosti usmerjenosti vrtač na površju. Pri območju **klasičnega krasa (številka 1)** pa anizotropija vizualno ni razvidna. Da pa gre za vsaj delno anizotropno površje, je razvidno iz krivulj semivariogramov, ki so sicer precej blizu, a dokaj podobne območju 2 (Trnovski gozd), pa tudi razmerji med največjim in najmanjšim dosegom sta si precej podobni (1,44 in 1,39). Verjetno na rezultate vpliva manjše število vrtač, ki so nanizane v smeri približno 65° (označene na sliki 3) in jih metoda semivariograma zazna, vizualno pa niso razvidne. Območje **Roga (številka 5)** je težje interpretirati, saj je vizualno anizotropija velika, a iz semivariogramov to ni razvidno, saj so njihove krivulje dokaj skupaj. Prav tako je relativno majhno tudi razmerje med največjim in najmanjšim dosegom (1,37). Najverjetneje je razlog za razhajanje med vizualno in računalniško vrednostjo v tem, da je morfolologija območja bolj pestra kot pri do sedaj omenjenih primerih. Korelacija med posameznimi točkami v prostoru se zato verjetno zmanjša in učinkovitosti anizotropije niso več zaznavni. Nekraško območje **Pohorja (številka 6)** že na videz ne kaže kakih anizotropnih značilnosti, kar potrjujejo tako semivariogrami kot razmerja. Krivulje semivariogramov so namreč precej skupaj, predvsem pa je razmerje med največjim in najmanjšim dosegom najmanjše.

Rezultati so zelo podobni tudi za relief s prostorsko ločljivostjo 5×5 m, saj je površje podobno in slabša ločljivost bistveno ne spremeni ničesar. Razlike med razmerji daljšega in krajšega dosega DMR

1 × 1 m in DMR 5 × 5 m se gibljejo od 0,18 % do 3,66 %. Razlike med azimuti DMR 1 × 1 m in DMR 5 × 5 m so podobno majhne – vsa štiri območja (številke od 2 do 5) z izrazito anizotropijo so celo brez razlik.

Samodejno pridobljene preferenčne smeri največje anizotropije se zelo dobro ujemajo tudi z glavnimi smermi prelomov, odčitanimi iz pripadajočih listov Osnovne geološke karte v merilu 1 : 100.000 (preglednica 1), kar potrjuje ugotovitve, da so vrtače vezane predvsem na tektonske strukture.

Opozoriti pa je treba, da je merilo te geološke karte za interpretacijo omenjenih območij neustrezno, saj bi bilo potrebno določiti prelomne strukture v bistveno natančnejšem merilu s strukturno-geološkim kartiranjem (Žvab Rožič, Čar in Rožič 2015; Vrvišar 2016; Čar 2018) in predvsem določiti večje število prelomov ter različne tipe geoloških struktur, ne le smeri samih prelomov.

5 Sklep

Anizotropija površja je precej opazna ter ima različne stopnje glede na litološke in tektonske značilnosti ozemlja. Efekti anizotropije so opazni na vseh kraških območjih, v manjši meri tudi na tistih, ki so vizualno izotropni. Azimuti usmerjenosti vrtač v njih, pridobljenih z ročnim oziroma vizualnim pregledom površja, se zelo dobro ujemajo s tistimi, ki so bili pridobljeni samodejno z analizo semivariograma, pa tudi s smermi prelomov, pridobljenimi z Osnovne geološke karte.

Čeprav je možno že vizualno opaziti preferenčne smeri na površju, je kvantitativni pristop obdelave površja oziroma nadmorskih višin boljši zaradi večje objektivnosti. Tako lahko bolj zanesljivo pridobimo preferenčno smer oziroma azimut največje variabilnosti površja. Če se na območju pojavlja več preferenčnih smeri, pa moramo variabilnosti ugotavljati z izdelavo semivariogramov v več smereh, ki jih določimo sami, nato pa kvantitativno preverjati variabilnosti v izbranih smereh med seboj.

Metoda preučevanja anizotropije z uporabo semivariogramov je torej uporabna na kraških območjih, saj se vrtače orientirajo vzdolž tektonskih struktur in podrejeno litoloških mej. Interpretacija, ki temelji samo na vizualnih lastnostih krivulje semivariograma ali samo na razmerju med daljšim in krajšim dosegom, ni ustrezna, saj moramo upoštevati vse rezultate hkrati.

Kot nadgradnjo metode predlagamo podrobno strukturno-geološko kartiranje izbranih območij, da se pridobi podatke o lastnostih in usmerjenostih prelomnih con, poleg tega pa tudi litološke značilnosti kamnin, saj oboje precej vpliva na vrtače. S tovrstno primerjavo rezultatov kartiranja in računalniško pridobljenih podatkov o površju bo mogoče natančneje preučiti smeri največjih variabilnosti površja in stopnjo anizotropije.

6 Viri in literatura

- Atlas voda, 2021. Medmrežje http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso (15. 12. 2021).
- Bauer, H., Schröckenfuchs, T. C., Decker, K. 2016: Hydrogeological properties of fault zones in a karstified carbonate aquifer (Northern Calcareous Alps, Austria). *Hydrogeology Journal* 24-5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1388-9>
- Čar, J. 1982: Geološka zgradba požiralnega obrobja Planinskega polja. *Acta Carsologica* 10.
- Čar, J. 1986: Geološke osnove oblikovanja kraškega površja = Geological bases of karst surface formation. *Acta carsologica* 24/25.
- Čar, J. 2001: Structural bases for shaping of dolines. *Acta Carsologica* 30-2.
- Čar, J. 2018: Geostructural mapping of karstified limestones. *Geologija* 61-2. DOI: <https://doi.org/10.5474/geologija.2018.010>
- Davis, J. C. 2002: *Statistics and data analysis in geology*. New York.
- Ford, D., Williams, P. W. 2007: *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester.

- Hidrogeološka karta, 2006. Medmrežje <http://gis.arso.gov.si/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7BD0A9674F-16B8-45A1-9E30-34B00F3A1C45%7D> (19. 2. 2022).
- Jennings, J. N. 1975: Doline morphometry as a morphogenetic tool: New Zealand examples. *New Zealand Geographer* 31-1. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-7939.1975.tb00793.x>
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., Lucas, N., 2001: Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Redlands.
- Lyew-Ayee, P., Viles, H. A., Tucker, G. E. 2007: The use of GIS-based digital morphometric techniques in the study of cockpit karst. *Earth Surface Processes and Landforms* 32-2. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1399>
- Mihevc, A., Mihevc, R., 2021. Morphological characteristics and distribution of dolines in Slovenia, a study of a lidar-based doline map of Slovenia. *Acta Carsologica* 50-1. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v50i1.9462>
- Novljan, Ž. 2021: Morfometrija in gostota vrtač na izbranih pobočjih slovenskega krasa. *Dela* 56. DOI: <https://doi.org/10.4312/dela.56.89-108>
- Podobnikar, T., Štefančič, M., Verbovšek, T. 2019: A GIS-based approach to karst relief cyclicity by using Fast Fourier transform. *AGILE 2019 – Limassol*, June 17-20.
- Šegina, E., Benac, Č., Rubinič, J., Knez, M. 2018: Morphometric analyses of dolines – the problem of delineation and calculation of basic parameters. *Acta Carsologica* 47-1. DOI: <http://doi.org/10.3986/ac.v47i1.4941>
- Šušteršič, F. 2006: Relationships between deflector faults, collapse dolines and collector channel formation: some examples from Slovenia. *International Journal of Speleology* 35. DOI: <http://doi.org/10.5038/1827-806X.35.1.1>
- Trevisani, S., Cavalli, M., Marchi, L. 2009: Variogram maps from LiDAR data as fingerprints of surface morphology on scree slopes. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences* 9. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-9-129-2009>
- Verbovšek, T., Gabor, L. 2019: Morphometric properties of dolines in Matarsko podolje, SW Slovenia. *Environmental Earth Sciences* 78. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8398-6>
- Vrviščar, B. 2016: Geološka karta kraškega ozemlja nad jamo Medvedjak na Matarskem podolju : diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Ljubljana.
- White, E. L., White, W. B. 1979: Quantitative morphology of landforms in carbonate rock basins in the Appalachian Highlands. *Bulletin* 90. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1979\)90%3C385:QMO-LIC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90%3C385:QMO-LIC%3E2.0.CO;2)
- Williams, P. W. 1972: Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. *Bulletin* 83. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[761:MAOPKI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[761:MAOPKI]2.0.CO;2)
- Zagmajster, M., Sket, B., Culver, D. C. 2008: Prikaz razporeditve vrstne pestrosti podzemeljskih hroščev z uporabo interpolacijskih metod. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007–2008*.
- Žvab Rožič, P., Čar, J., Rožič, B. 2015: Geological structure of the Divača area and its influence on the speleogenesis and hydrogeology of Kačna jama. *Acta Carsologica* 44-2. DOI: <https://doi.org/10.3986/ac.v44i2.1958>