

# PROTEUS

december 2009, 4/72. letnik  
cena v redni prodaji 4,00 EUR  
naročniki 3,50 EUR  
dijaki in študenti 2,45 EUR  
[www.proteus.si](http://www.proteus.si)



mesečnik za poljudno naravoslovje



■  
Ornitologija

Beločeli deževnik (*Charadrius alexandrinus*) – evropsko ogrožena vrsta

■  
Geologija

Fraktali v geologiji  
ali kaj je skupnega potresom in rekam

■  
Botanika

Močvirnice (*Epipactis*) so zanimiv in zahteven rod v družini divjerastočih orhidej

# Fraktali v geologiji ali kaj je skupnega potresom in rekam

Timotej Verbovšek



*Pokrajina, ki je na svetu ne bomo našli nikjer. Današnji računalniški programi (na primer Terragen™), ki ustvarjajo površine s fraktalnimi metodami, so namreč že tako izpopolnjeni, da čedalje težje ločimo zgornjo računalniško sliko od naravne.*

*Vir: [http://www.planetside.ws/terrigen/gallery\\_images/GalleryImage446994.jpg](http://www.planetside.ws/terrigen/gallery_images/GalleryImage446994.jpg).*

*»Fraktalna geometrija bo povzročila, da boste vse videli drugače. Pozor pri nadaljnjem branju! Tvegate izgubo otroškega pogleda na oblake, gozdove, galaksije, liste, perje, rože, kamnine, gore, potoke, preproge, zidake in še marsikaj drugega. Vaša interpretacija teh stvari ne bo nikoli več taka kot prej.«*

*Michael Barnsley*

Geologi se hitro naučijo, da morajo na fotografijo poleg stvari, ki jo želijo fotografirati, ujeti tudi pokrovček objektiv ali kakšen drug predmet kot merilo, da je razvidno, koliko je posnetek dejansko velik. Če fotografiramo ljudi, merilo ni potrebno, saj je znano, da smo visoki približno 170 centimeter in ne 20 centimetrov ali 500 centimetrov. Pri naravnih objektih pa ni vedno tako. Lastnosti, da se videz objektov ne spreminja glede na povečavo, pravimo samopodobnost, ta pa je značilna za fraktale. Te najlažje opišemo kot objekte, sestavljene iz delov, ki so geometrijsko podobni celoti. Le



*Timotej Verbovšek, rojen leta 1976, je univerzitetni diplomirani geolog. Doktoriral je leta 2008 s področja podzemnih voda in uporabe fraktalov v geologiji. Je docent na Oddelku za geologijo na Naravoslovnotehniški fakulteti v Ljubljani, kjer predava predmete GIS v geologiji, Ekonomska geologija, Geokemija in okolje ter vodi sklepne terenske vaje. Področje njegovega raziskovanja zajema delo na širšem področju podzemnih voda, geokemičnih raziskav in fraktalov. Je član mednarodnih združenj IAH, AGU in NGWA in tajnik slovenskega društva hidrogeologov. Kontakt, publikacije in ostale informacije najdete na osebni spletni strani <http://www.geo.ntf.uni-lj.si/tverbovsek/>*

pravi matematični fraktali (na primer Kochova snežinka in Sierpinskijev trikotnik) so resnično samopodobni. V naravi pa srečamo bolj ali manj nepravilne fraktale. Naravni fraktali tudi ne morejo obstajati v neskončnem razponu meril, saj smo v skrajnostih omejeni z velikostjo atoma ali, na drugi strani, z velikostjo planeta. Fraktale poznajo tudi ostale naravoslovne vede – biologija, fizika, kemija in astronomija. Zanimivo je, da jih uporabljajo tudi v ekonomiji in v družbenih vedah, na primer za analiziranje velikosti računalniških datotek, števila in obsežnosti vojn, gibanja cen, števila prebivalcev v mestih, pogostosti imen in pogostosti uporabe besed v jezikih. Ljudje s svojimi navadami smo del narave in zato imamo na določeni način tudi fraktalne lastnosti.

Če preučujemo naravne pojave, je geologija poleg biologije, fizike in kemije ena izmed najbolj primernih ved za študij njihovih oblik in lastnosti. Ko pogledamo okoli sebe, namreč vidimo, da ne živimo v preprostem dolgočasnem svetu stožcev in popolnih oblik kristalov. Pogled na naš planet nam odkriva cel spekter zapletenih oblik gora, vulkanov, rek, otokov, potresov in ostalih pojavov. Fraktali so zato uporabni predvsem, ker z njimi lahko opišemo zapletene oblike v naravi in hkrati bolje razložimo geološke procese, ki so pripeljali do njihovega nastanka. Fraktalne metode so uspešno uporabili skoraj na vseh področjih geologije: v geofiziki, geokemiji, speleologiji, paleontologiji, seizmiki, geomorfologiji, strukturalni geologiji, hidrogeologiji in stratigrafiji. Uporabna so predvsem tri področja fraktalov: geometrijski fraktali, fraktalne porazdelitve in časovne analize.

### **Geometrijski fraktali in fraktalna razsežnost**

Najbolj znani so geometrijski fraktali, saj so po svojem videzu najbolj privlačni. Navajeni smo, da se pogovarjamo o razsežnostih, ki so cela števila, na primer 0 (točka), 1 (premica), 2 (ploskev) ali 3 (telo). Nasprotno imajo fraktali lahko razsežnosti, ki zavzemajo vrednosti med temi celimi števili – fraktalne dimenzije oziroma fraktalne razsežnosti ( $D$ ). Najenostavnejše jih lahko razložimo kot vrednosti, ki določajo, kako se neki objekt spreminja prek različnih meril oziroma kako je objekt sposoben »napolniti« prostor. Geometrijske fraktale so odkrili na veliko področjih, na primer pri določanju dolžin obal. Izmerjena dolžina obale namreč ni stalnica, temveč je odvisna od tega, pri kateri povečavi jo opazujemo oziroma kako dolgo »merilno palico« smo uporabili. Če namreč natančno merimo tudi vse manjše rte in zalivčke, bo obala daljša, kot če jo določamo z manj podrobnega zemljevida. Opazili so tudi, da je zveza med dolžino rek in površino njihovega porečja neodvisna od opazovanega merila in da



Fraktalne lastnosti imajo tudi suture oziroma lobne črte amonitov (zgoraj), saj lahko njihove oblike (spodaj) lepo opišemo s fraktali. Bolj enostavni amoniti iz starejših časovnih obdobj (na primer paleozojski goniatiti) imajo enostavnejše lobne črte z manjšimi fraktalnimi razsežnostmi, bolj razviti (na primer jurski in kredni amoniti) pa zapletenejše črte in s tem večje fraktalne razsežnosti (do  $D = 1,7$ ). Na fotografijah je amonit *Cleoniceras cleon*. Velikost amonita je 124 milimetrov.

Vir: [www.fossilmuseum.net/ammonite-pictures/Cleoniceras-cleon/Cleoniceras-cleon.htm](http://www.fossilmuseum.net/ammonite-pictures/Cleoniceras-cleon/Cleoniceras-cleon.htm).

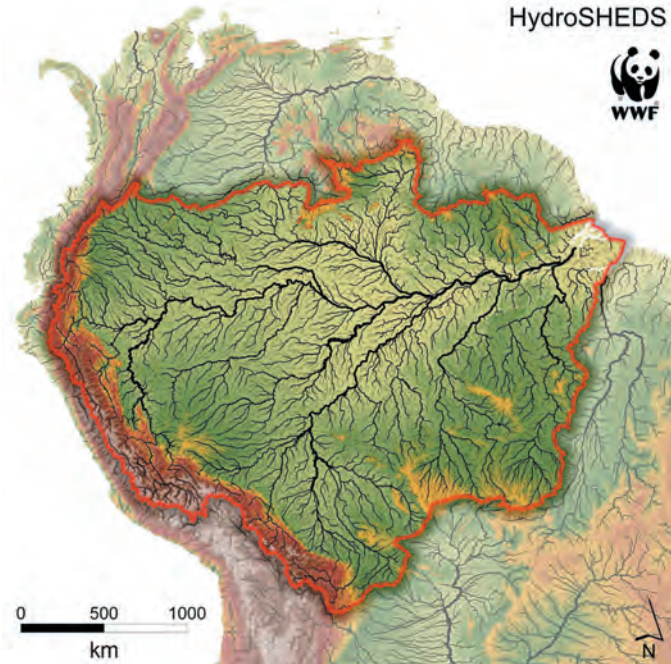
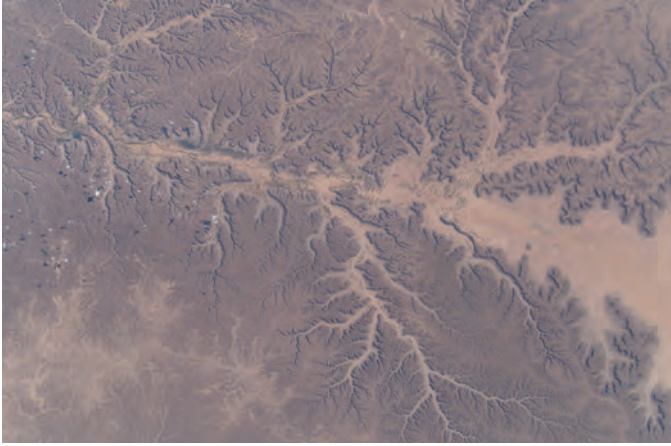
je tako njihova dolžina približno sorazmerna površini, ki jo potenciramo na vrednost fraktalne razsežnosti  $D/2$  (Hackov zakon). Fraktalna razsežnost rečnih mrež leži med skrajnima vrednostma  $D = 1$  (reke so v tem primeru le enostavni premi kanali) in  $D = 2$  (reke postanejo tako skrajno zvižugane, da zapolnijo vso površino, ob tem pa nastane zvezna vodna ploskev). Bolj ko torej reke zapolnjujejo prostor in odvodnjavajo površino, večja je njihova razsežnost. Na vrednosti fraktalnih razsežnosti rečnih mrež, ki dejansko ležijo večinoma med 1,2 in 1,7, vpliva predvsem različna geološka sestava tal; fraktalna ureditev rečnih mrež pa se pojavi, ker se reke hierarhično združujejo in s tem učinkoviteje odvajajo vodo.

Pri analizi površinske oblikovanosti planeta predstavlja fraktalna razsežnost količino, ki opisuje »razgibanost« terena. Topografske površine imajo tako vrednosti  $D$  med 2 (ravna ploskev) in 3 (izredno razgibana ploskev, ki zapolnjuje trirazsežnostni prostor). Fraktalna površina je določena z dvema parametroma – s fraktalno razsežnostjo in z razponom višin terena (amplitudo). Fraktalna razsežnost površine na videz ravne letalske steze je lahko enaka kot fraktalna razsežnost gorstev, toda razpon višin je v slednjem primeru precej večji. Seveda vse oblike niso nujno fraktalne – obliko vulkanov, ki nastanejo na točki preboja magme na površino, lahko preprosto primerjamo s stožci, toda le dokler jih ne »uniči« fraktalni proces, ki deluje v vseh merilih – denudacija!

talna razsežnost površine na videz ravne letalske steze je lahko enaka kot fraktalna razsežnost gorstev, toda razpon višin je v slednjem primeru precej večji. Seveda vse oblike niso nujno fraktalne – obliko vulkanov, ki nastanejo na točki preboja magme na površino, lahko preprosto primerjamo s stožci, toda le dokler jih ne »uniči« fraktalni proces, ki deluje v vseh merilih – denudacija!

### Porazdelitve velikosti objektov

Zanimivo zakonitost opazimo, če opazujemo število potresov, ki so večji od določene magnitude. Izberemo si jakost potresa (na primer magnituda 1) in preštejemo vse potrese, ki so bili močnejši od te magnitude. Nato ponovimo postopek za potrese, večje od magnitude 2, in tako dalje. Če te podatke nanesemo na graf, kjer je na osi  $x$  logaritmirana



*Manjše reke se hierarhično združujejo v večje, te spet v večje in tako dalje, kar je značilno za fraktale. Enake oblike rečnih mrež opazimo tako v goratih puščavah Jemna (zgoraj) kot tudi v vodnatih nižinah Amazonke (spodaj). Spodnja slika je narejena z računalniškim modelom in je zelo podobna naravnemu stanju.*

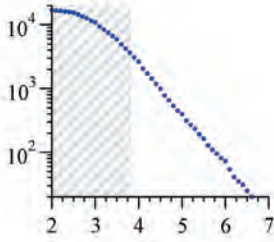
*Vira: <http://solarviews.com/cap/earth/yemen.htm> in [http://hydrosbeds.cr.usgs.gov/---images---hydrosbeds\\_amazon\\_large.jpg](http://hydrosbeds.cr.usgs.gov/---images---hydrosbeds_amazon_large.jpg).*

velikost potresov in na osi y njihovo logaritmirano število, dobimo premico. Povezava števila potresov ( $N$ ) in njihove magnitude ( $m$ ) je fraktalna in znana kot Gutenberg-Richterjev zakon:  $N \approx m^{-b}$  (vrednost potence  $b$  je konstantna, približno 1,0). Lastnost, da so velikosti objektov fraktalne, je značilna tudi za porazdelitve velikosti izbruhanih delcev pri vulkanskem delovanju, dolžine in velikosti jam, velikosti kraterjev (ki jo lahko povežemo z velikostjo meteoritov), velikosti nahajališč rud, nafte in plina ter tudi za druge porazdelitve.

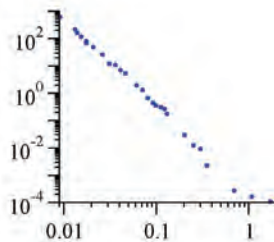
### Časovne analize

Manj znano je, da so fraktalne lastnosti značilne tudi za časovna spreminjanja, saj opazamo fraktalne porazdelitve tudi pri različnih časovnih razmikih med dogodki. Bistvena razlika je v razsežnostih, saj imajo prostorski fraktali le prostorske razsežnosti, časovni pa poleg teh seveda tudi časovno. V naravi opazujemo take procese pri spreminjanju temperature ali izotopske sestave elementov v geoloških obdobjih, pri spremembah gladin in preto-

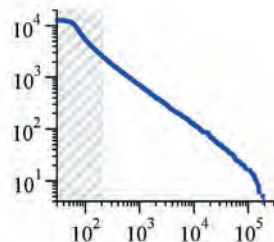
kov vode ter sedimentacije in debeline plasti, pri pojavljanju fosilov v določenih obdobjih, pri porazdelitvi stratigrafskih praznin in pri nihanjih geofizikalnih meritev. Težave pri izračunih in napovedih nastanejo tudi zaradi naše življenjske dobe, saj pogosto procese, ki delujejo že milijone let, preučujemo šele nekaj desetletij ali celo manj, hkrati pa so tudi metode obravnav dokaj zapletene. Iz navidez kaotičnega nihanja podatkov lahko podobno kot prej izračunamo potenco, ki ji pravimo Hurstov eksponent. Za naključne procese (kjer podatki niso odvisni drug od drugega) je ta enak 0,5,



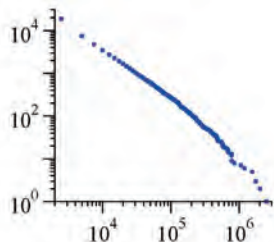
Magnituda potresov  
(že logaritmirana vrednost!).



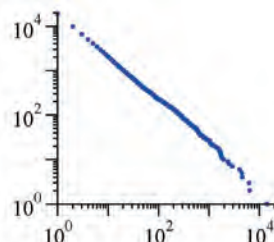
Premer kraterjev (km).



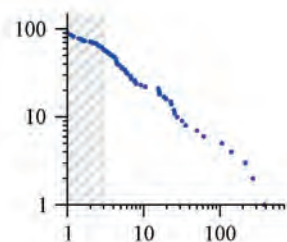
Intenzivnost gama sevanja  
v sončnih izbruhih (1980–1989).



Pogostost imen.



Pogostost posameznih besed v  
knjigi *Moby Dick*.



Intenzivnost vojn (1816–1980)  
po številu smrti na 1000 prebivalcev.

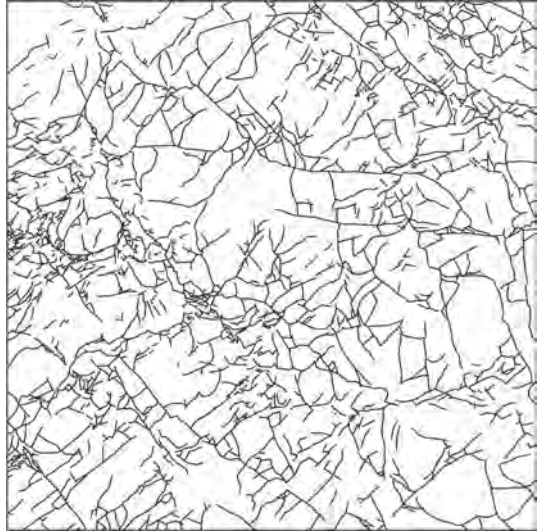
Če je objekt fraktalen, bo njegova pogostost porazdeljena potenčno oziroma fraktalno, kar na grafih (kjer podatke logaritmiramo tako na osi  $x$  kot na osi  $y$ ) opazimo kot premico. Fraktalno razsežnost določimo preprosto kot potenco oziroma negativni naklon premice ( $D = -\log y / \log x$ ). Take zveze so značilne za številne pojave, tako geološke kot tudi negeološke.

Vir: Newman, 2005.

dejansko pa je za naravne procese večji (približno 0,7). To pomeni, da če opazovana vrednost (na primer temperatura) kljub nihanjem nekaj časa narašča, potem je zelo verjetno, da bo naraščala še naprej. Naravni podatki imajo torej kljub kratkoročnim nihanjem neke vrste dolgoročni spomin!

### Kako nastanejo fraktali?

Čeprav so fraktali popularni, naletimo v literaturi večinoma le na opise teh pojavov, le redko pa tudi na razlago, kaj v resnici povzroči fraktalne lastnosti objektov. Enostaven primer je razpokanje kamnin. Razpokanje je proces, ki deluje v vseh merilih (od velikih svetovnih prelomnic, kot je prelomnica Svetega Andreja pri San Franciscu, do drobnih mikroskopskih razpok) in zato povzroči fraktalno porazdelitev zdobljenih delcev različnih velikosti. Razpokanje povzroči določena količina energije, ki se razporedi približno enakomerno po prostornini kamnine. Tako je hkrati potrebna enaka količina energije za lom velikega števila majhnih delcev ali majhnega števila velikih delov, kar vodi v fraktalno porazdelitev velikosti. Podobno se padavine ali energija raztapljanja (erozija) razporedijo po površini terena in povzročijo fraktalno razporeditev rečnih mrež. Narava torej deluje tako, da poskrbi za minimalno izgubo energije v »dobavnih sistemih« oziroma v mrežah, hkrati pa skrbi, da imajo sistemi čim večjo površino stika z okolico (pridobivanje energije).



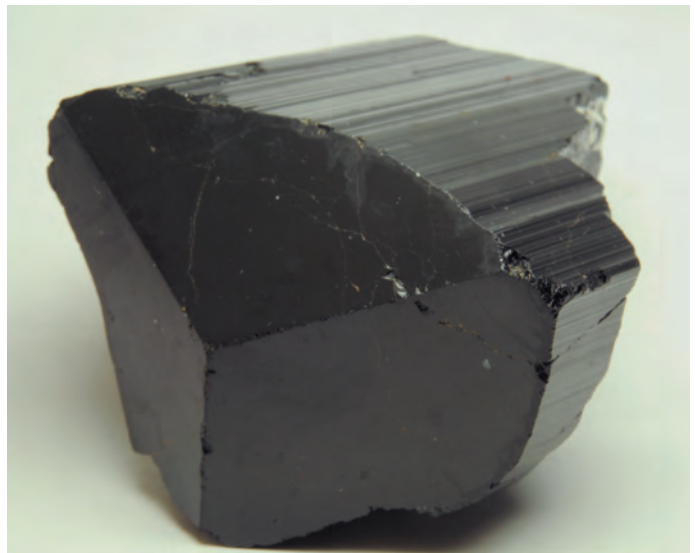
*Le iz fotografije (levo) težko določimo, ali so razpoke velike nekaj centimetrov ali nekaj metrov. Razpoke (desno), ki jih določimo na podlagi omenjene fotografije, imajo fraktalno razsežnost  $D = 1,78$ . Fraktalne analize razpokanih kamnin so pomembne pri raziskavah vodnih virov, saj lahko s to razsežnostjo ugotovljamo, ali so razpoke med seboj dovolj povezane, da se skozi začne pretakati voda. Na fotografiji je kamnina dolomit, širina fotografije je približno en meter.*

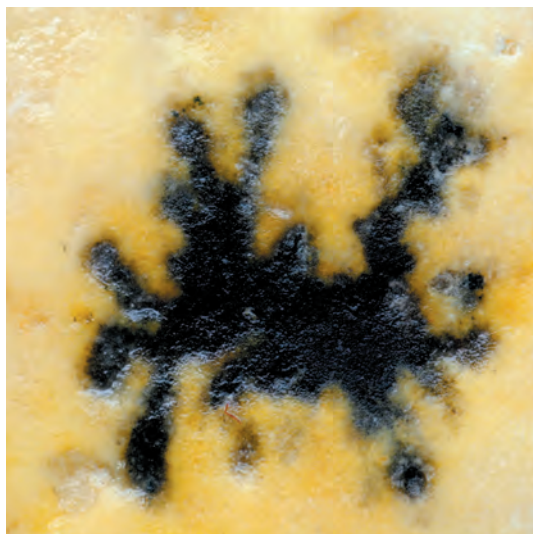
*Foto in digitalizacija: Timotej Verbovšek.*

Svojevrstno razlago nastanka fraktalov je ponudil Per Bak v knjigi z izzivalnim naslovom *Kako deluje narava?* Po njegovi teoriji (tako imenovani teoriji samoorganizirane kritičnosti, angl. Self-Organized Criticality, SOC) naj bi se naravni procesi sami organizirali tako, da so v nestabilnem kritičnem stanju (torej niso v ravnotežju), dokler jih ne zmotijo sunki (na primer potres), po sunku pa se vrnejo nazaj v prvotno stanje. Nasprotno od nestabilnih so popolnoma stabilni sistemi »dolgočasni«, saj se iz njih nič ne razvije. Podobno se tudi ljudje v nedejavnem stanju hitro polenimo in takrat ničesar ne ustvarimo. Iz teorije je Bak nadalje sklepal, da morajo biti jakosti potresov, ki jih povzročijo sunki, poraz-

*Mineral turmalin ponavadi raste v trigonalni obliki oziroma singoniji (desno), redko pa najdemo tudi mineralna zrna nepravilnih oblik, ki so fraktalna (naslednja stran levo). Ti nastanejo zaradi hitre rasti v raztopini, opišemo pa jih lahko s fraktalnim modelom kopičenja delcev pri difuziji (model DLA), kjer delci po raztopini potujejo naključno z Brownovim gibanjem in se ujamejo na že obstoječe mineralno zmo. Tako iz naključnega procesa nastanejo nenavadne oblike (naslednja stran desno), ki so zelo podobne naravnim. Velikost turmalina na fotografiji desno je šest centimetrov, izseka na naslednji strani pa dva centimetra.*

*Fotografiji: Miran Udovč.*





*Viri in priporočljiva literatura:*

- Barton, C. C., La Pointe, P. R., 1995: *Fractals in the Earth Sciences*. New York: Plenum Press.
- Gleick, J., 1991: *Kaos: rojstvo nove znanosti*. Ljubljana: DZS.
- Mandelbrot, B., 1983: *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W. H. Freeman & Co.
- Newman, M. E. J., 2005: *Power laws, Pareto distribution and Zipf's law*. *Contemporary Physics*, 46: 323–351. <http://aps.arxiv.org/abs/cond-mat/0412004v3>.
- Turcotte, D. L., 1992: *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Verbovšek, T., 2008: *Vpliv prevodnih struktur na tok in prenos snovi v kraško-razpoklinskih vodonosnikih*. Doktorska disertacija. Ljubljana: Naravoslovnotehniška fakulteta.
- Verbovšek, T., 2007: *Fractal analysis of the distribution of cave lengths in Slovenia = Fraktalna analiza porazdelitve dolžin jam v Sloveniji*. *Acta carsologica*, 36 (3): 369-377. <http://carsologica.zrc-sazu.si/downloads/363/2verbovsek.pdf>.

deljene fraktalno, kar tudi dejansko opazamo. Poleg potresov so poučen primer tudi plazovi. Te lahko v pomanjšanem merilu opazujemo na kupu peska, na katerega v preprostem poskusu počasi stresamo peščena zrna. Pričakovali bi, da ob vsakem dodanem zrnu peska eno zrno tudi splazi, toda v resnici ni tako. Le vsake toliko časa eno samo zrno namreč sproži večji ali manjši plaz. Povprečno se število dodanih zrn izenači s številom splazelih zrn, dejansko število zrn v posameznem plazu pa se nenehno spreminja. Pri tem je bistveno, da so velikosti plazov porazdeljene fraktalno. Podobno lahko topografijo terena razumemo kot ravnovesje med dodano energijo (tektonski dvig) in izgubljeno energijo (erozija z rekami in vetrom). To dogajanje se ujema s teorijo katastrof, po kateri se tako razvoj življenja kot tudi geološki pojavi dogajajo hitro v določenih trenutkih in ne zvezno.

Na prvi pogled zelo zapletene fraktale torej lahko na zelo enostaven način opišemo s preprostimi matematičnimi enačbami. Narava očitno z enostavnim zapisom določi, kako se objekti razraščajo, hkrati pa je v njej skrito tudi preprosto pravilo, kako geometrijsko najbolj učinkovito porabiti energijo v vseh merilih. In te zakonitosti se nam kažejo kot čudovite oblike pokrajin, mineralov, fosilov in številnih ostalih pojavov, ki nas obdajajo.





## ■ Ornitologija

### **Beločeli deževnik (*Charadrius alexandrinus*) – evropsko ogrožena vrsta**

*Beločeli deževnik je ptica slanišč. Sodi med ogrožene vrste v Evropi. V Sloveniji je izjemno redek gnezdilca. Na Rdečem seznamu ptic gnezdilca Slovenije je uvrščen v kategorijo prizadetih vrst. Pozimi se umakne v toplejše kraje Sredozemlja, posamezni osebk ali manjše skupine prezimujejo tudi pri nas, in sicer v Sečoveljskih solinah. Pri nas gnezdi ob morskem obrežju. Najpomembnejše gnezdišče so Sečoveljske soline (drugo gnezdišče je v Škočjanskem zatoku, v Ankaranu pa ne gnezdi več). Kljub temu, da je beločeli deževnik na slovenski obali prilagodljiva vrsta, je njegova prihodnost zaradi čedalje večjih človekovih vplivov na gnezditvenih območjih zelo negotova.*



## ■ Geologija

### **Fraktali v geologiji ali kaj je skupnega potresom in rekam**

*Čeprav so fraktali popularni, naletimo v literaturi večinoma le na opise teh pojavov, le redko pa tudi na razlago, kaj to resnici povzroči fraktalne lastnosti objektov. Enostaven primer je razpokanje kamnin. Razpokanje je proces, ki deluje v vseh merilih (od velikih svetovnih prelomnic, kot je prelomnica Svetega Andreja pri San Franciscu, do drobnih mikroskopskih razpok) in zato povzroči fraktalno porazdelitev zdrobljenih delcev različnih velikosti. Razpokanje povzroči določena količina energije, ki se razporedi približno enakomerno po prostornini kamnine. Tako je hkrati potrebna enaka količina energije za lom velikega števila majhnih delcev ali majhnega števila velikih delov, kar vodi v fraktalno porazdelitev velikosti. Podobno se padavine ali energija raztapljanja (erozija) razporedijo po površini terena in povzročijo fraktalno razporeditev rečnih mrež. Narava torej deluje tako, da poskrbi za minimalno izgubo energije v »dobavnih sistemih« oziroma v mrežah, hkrati pa skrbi, da imajo sistemi čim večjo površino stika z okolico (pridobivanje energije).*



## ■ Naravoslovje v šoli

### **V lasih zasavskih srednješolcev navsezadnje ni povišanih koncentracij težkih kovin**

*Vnos škodljivih snovi v organizem predstavlja tveganje za zdravje ljudi, četudi so koncentracije teh snovi zelo nizke, a je čas izpostavljenosti dolg. To še posebej velja za snovi, ki se v telesu akumulirajo – sem spadajo tudi težke kovine. V raziskavi z naslovom Določanje vsebnosti težkih kovin v lasih zasavskih srednješolcev je sodelovalo 55 dijakov oziroma dijakinj Gimnazije in ekonomske srednje šole Trbovlje. Ugotovitev te raziskovalne naloge je, da so bile vrednosti koncentracij težkih kovin v lasih zasavskih dijakov primerljive z rezultati podobnih študij in glede na te študije koncentracije težkih kovin v lasih zasavskih dijakov niso povišane. Vendar pa je treba opozoriti, da lasje niso najboljši indikator izpostavitve kovinam v okolju, predvsem ne kadmiju.*

ISSN 0033-1805



9 770033 180000