

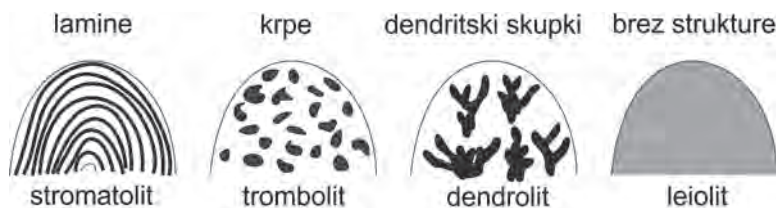
Stromatoliti – žive(če) kamnine

Timotej Verbovšek, Luka Gale

Stromatoliti so najstarejši fizični dokaz za življenje na našem planetu. Začuda so preživeli vsa množična izumiranja v geološki zgodovini, tako da jih živeče najdemo še danes. Poleg tega so odlični pokazatelji okoljskih razmer na nekdanjem morskem dnu, zaradi njih se je v ozračju pojavil kisik, z njihovo pomočjo pa lahko tudi določamo dolžino dni v daljnji preteklosti. Fosilne stromatolite najdemo tudi marsikje v Sloveniji. Razlogov, da tem zanimivim organizmom namenimo nekaj besed, je torej več kot dovolj.

Stromatoliti, mikrobialiti, tromboliti ...?

Izraz stromatolit se lahko tudi napačno uporablja za druge sorodne oblike, zato je najprej najbolje razjasniti, kako stromatolite razlikujemo od ostalih podobnih oblik. Mikroskopske organizme, med katere sodijo modrozeleni cepčljivke (cianobakterije) in druge bakterije, glive, drobne alge in protozoji, ter sediment, ki ga naštetih organizmi med svojo rastjo lovijo in vgrajujejo v svojo strukturo, širše s skupnim izrazom imenujemo *mikrobialit*. Ta mikrobni sediment (največkrat karbonat) se lahko pojavlja v



Strukture mikrobialitov.



Menjavanje svetlih in temnih lamin v zgornjetriasnem dachsteinskem apnencu v okolici Bogatina na Komni.

Foto: Luka Gale.

različnih oblikah. Tistega, v katerem lahko prepoznamo posebno plastovito strukturo, imenujemo *stromatolit* (grško *stroma* = plast, *lithos* = kamnina). Zanj je značilno menjavanje svetlejših in temnejših plasti, ki so tanjše od enega centimetra, po čemer jih tudi makroskopsko najlažje spoznamo. Te plasti imenujemo lamine, prav laminirana struktura pa stromatolite loči od *trombolitov* (grško *thrombos* = strdek), ki imajo notranje krpasto strukturo, od *dendrolitov* z razvejeno dendritsko strukturo (grško *dendron* = drevo) in od brezstrukturnih *leolitov* (grško *leios* = gladek). Stromatoliti so lahko različnega izvora in različne sestave, njihovem nastanku pa lahko botrujejo trije procesi: organsko mikrobno izločanje karbonata, anorgansko izločanje karbonata ter lovljenje in vgrajevanje sedimentnih zrn.

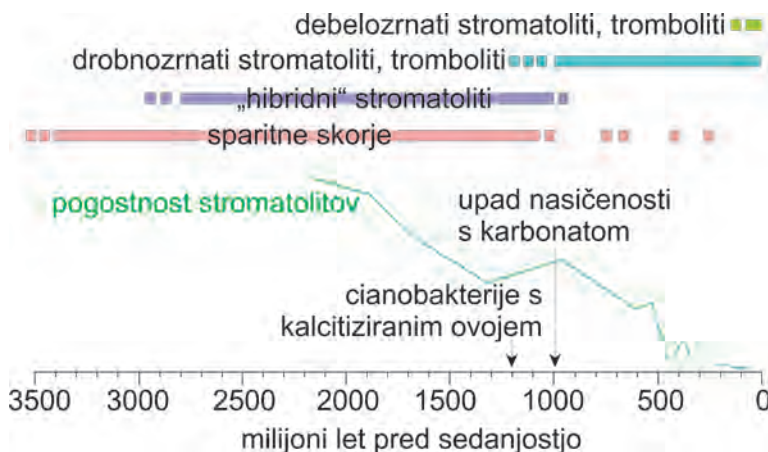
Kratka zgodovina mikrobialitov

Prvi opisani mikrobialiti so bili stromatoliti iz 230 milijonov let starih kamnin pogorja Harz. O njih je leta 1908 pisal nemški profesor mineralogije Ernst Kalkowsky, šele leta 1956 pa so ugotovili, da obstajajo tudi živeči primerki. Mikrobialiti so danes precej redki, njihova pogostnost pa se veča s pomikanjem v preteklost. Najstarejše mikrobialite iz obdobja arhaika najdemo v približno 3.500 milijonov let starih kamninah skupine Pilbara v zahodni Avstraliji. Najbolj razšir-

jene in raznolike so bile mikrobialitne tvorbe v izredno dolgem obdobju pred 2.800 do 1.000 milijoni let (v mlajšem arhaiku, paleoproterozoiku in mezoproterozoiku). Med njimi so prevladovali stromatoliti, pri katerih so se menjavale sparitne skorje (karbonatne skorje z večjimi kristali) s cianobakterijskimi preprogami iz strjenega gostega in drobnozrnatega karbonatnega blata (mikrita). Ti tako imenovani »hibridni« stromatoliti so bili pogosti tako v plitvi vodi kot na dnu globokih morij.

Pred približno 1.000 milijoni let (po nekaterih mnenjih že prej, pred približno 1.400 milijoni let) so bili vse redkejši, saj naj bi bila morska voda vse manj nasičena s karbonatom, ki ga ti mikroorganizmi potrebujejo za rast in za vgrajevanje. Namesto iz sparitnih skorij so bili čedalje pogostejše sestavljeni iz mikritnih lamin.

Pred približno 1.200 milijoni let (v neoproterozoiku) so začeli nastajati tromboliti, ki so se pozneje pogosto pojavljali skupaj s stromatoliti. Tik pred začetkom kambrija ob koncu neoproterozoika, ko so bile vse pogostejše mnogocelične živali, se je delež trombolitov kljub splošnemu dramatičnemu upadu mikrobialitov povečal. V kambriju in starejšem ordoviciju so tromboliti z dendroliti sodelovali celo pri gradnji karbonatnih grebenov.



Pogostost in razvrstitve različnih tipov mikrobialitov v geološki zgodovini.

Prirrejeno po Ridingu (2011).

Delež mikrobialitov se je v primerjavi z drugimi organizmi nekoliko povečal v obdobjih, ko je bila morska voda bolj nasičena s karbonatom, pa tudi po nekaterih množičnih izumrtjih. Dolgo so domnevali, da je bilo mikrobialitov (zlasti stromatolitov) od kambrija dalje precej manj kot v predkambrijskih obdobjih, ker so se z njimi bodisi hranile živali bodisi so jih ogrožale alge in nekateri nevretenčarji. Danes menijo, da je na zmanjšanje števila teh sicer dolgoživih cianobakterij z izjemno počasno evolucijo ter na spremembe njihove velikosti, oblike in notranje strukture poleg razvoja drugih »višje razvitih« organizmov precej vplivalo neživo okolje, predvsem že omenjena spremenjena kemična sestava morske vode.

Stromatoliti kot pokazatelji življenjskih razmer in dolžine dneva

O nastanku stromatolitov poznamo več različnih teorij. Te skrivnostne organizme je med prvimi leta 1969 preučeval C. D. Gebelein. Po njegovi precej enostavni razlagi je nastanek lamine v stromatolitu povezan z nočno-dnevno ciklom. Menil je, da debelejša svetla lamina nastane podnevi, ko se cianobakterijska vlakna (filamenti) usmerijo proti svetlobi. Mednje naj bi se ulovil droben sediment. Ponoči naj bi se cianobakterijske niti razlezele po površini, iz česar naj bi nastala tanjša temna lamina.

Novejše raziskave Reida in sodelavcev (2000), ki so opazovali sodobne morske stromatolite na Bahamih, nadgrajujejo Gebeleinovo razlago z bolj zapletenim modelom. Najprej naj bi nastale vlaknaste (filamentne) cianobakterije, nato naj bi se na njih v krajših, nekajdnevnik prekinitvah razvil biofilm, prevleka, sestavljena iz združbe bakterij, amorfne polimera in igličastih kristalov minerala aragonita. Med še daljšimi, nekajtedenskimi prekinitvami naj bi se v nastajajoči sediment naselile še kokoidne in vlaknate cianobakterije, za katere domnevajo, da zvrstajo drobne luknje v aragonitno plast. V teh naj bi se izločili novi aragonitni kristali, ki daje-

jo stromatolitu trdnost. Tako naj bi nastala značilna »plastovitost« oziroma bolj pravilno laminiranost stromatolitov, ki jo opazimo tudi s prostim očesom. Tak proces rasti se lahko ponavlja celo nekajtisočkrat, prav to ponavljanje pa naj bi po mnenju Reida in sodelavcev ustvarilo laminirano strukturo, ki jo lahko opazujemo pri sedanjih stromatoliti in s pomočjo katere lahko skušamo razumeti tudi nastanek fosilnih stromatolitov.

Tudi oblika stromatolitov lahko precej pove o tem, kakšne so bile med njihovo rastjo razmere v okolju. Ploskovne, bočno široko razširjene mikrobialitske preproge so značilne za mirno morsko okolje, kupolasti in stebričasti stromatoliti pa za bolj razburkano vodo, v kateri lahko stromatolite prekrijejo kamenčki, lupine odmrlih školjk, polžev ali odpadle vejice dreves. Tako nastajajo tridimenzionalne gomoljaste tvorbe, ki jih imenujemo onkoidi. Če onkoid prerežemo, lahko torej razberemo, kako je nastajal in kako hitro je potekala sedimentacija v okolju, v katerem je nastajal.

Ker se cianobakterije med rastjo usmerjajo proti soncu in zato spreminjajo svoj naklon, se nagib filamentov sinusoidno spreminja glede na letne čase. Če preštejemo število plasti v eni valovni dolžini te sinusoidne, lahko ocenimo nekdanje število dni v letu. V zemeljski zgodovini namreč leto ni imelo vedno 365,24 dneva kot danes, temveč se je to število nenehno spreminjalo. Ker se Luna počasi oddaljuje od Zemlje, se naš planet vrti čedalje počasneje, to pa vpliva na število dni v letu. Tako so izračunali, da je imelo leto pred 370 milijoni let 400 dni, dan pa je bil dolg le nekaj manj kot 22 ur, saj se je tedaj Zemlja vrtela hitreje. Treba pa je poudariti, da lahko tako preprosto štejemo letnice stromatolitov le, če so ti nastajali v mirnem okolju. V višjeenergijskih okoljih, kjer je bila voda razburkana, so imeli namreč pomembno vlogo pri nastanku lamin tudi erozija in drugi dejavniki, omenjeni pri nastanku onkoidov, kar lahko določanje števila dni v letu precej zaplete.

Stromatoliti zaliva Shark Bay



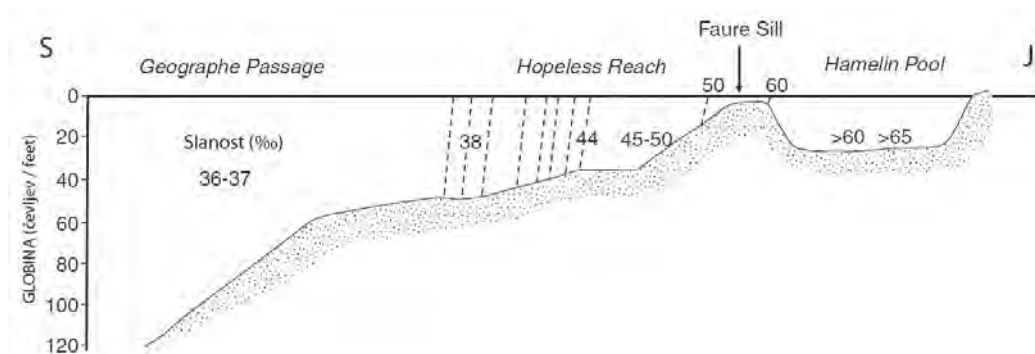
Območje Shark Baya v zahodni Avstraliji. Stromatolite najdemo na obali južnega dela zaliva Hamelin Pool. Severno od njega je podmorski prag Faure sill s svetlo modrim območjem plitve vode.

Vir: Google Earth, 2013.

Morske mikrobne karbonate danes najdemo v plimskem pasu subtropskega podnebja. Med najbolj znanimi so stromatoliti in tromboliti zaliva Shark Bay v zahodni Avstraliji. To območje obsega velik in izredno plitev zaliv s subaridnim podnebjem, kjer je povprečna letna temperatura 26,5 stopinj Celzija. Izhlapevanje vode je intenzivno

in znaša približno 300 milimetrov na leto, medtem ko je padavin v povprečju zgolj 228 milimetrov na leto. Stromatoliti rastejo v manjšem zalivu Hamelin Pool, ki je najbolj plitev del Shark Baya. Videti so kot temnejše stebričaste in kupolaste tvorbe, ki so občasno poplavljeni, ker ležijo v medplimskem pasu. Na tem območju se pojavljajo

Slanost v zalivu Hamelin Pool (prerez zaliva od severa proti jugu). Slanost je izrazito večja v južnem delu za pregrado Faure Sill. Prirejeno po Moryju in Haigu (2011).



predvsem zaradi tamkajšnje bolj slane vode. Njena slanost znaša tudi do 70 odtisočkov (promilov) oziroma dvakrat več, kot je običajno za morskovo vodo. Do povečanja slanosti je prišlo zaradi omenjenega stalnega izhlapevanja, poleg tega pa je bil pred približno 6.000 do 4.000 leti pretok morske vode v zaliv otežen zaradi razrasti morske trave na podvodnem grebenu Faure Sill. Ker bolj slana voda omejuje življenje ostalih živali in rastlin, ki bi lahko tekmovali s cianobakterijami, so lahko stromatoliti oziroma mikrobialiti tam vse do danes nemoteno uspevali. Čeprav so stromatoliti iz zaliva Shark Bay med najbolj znanimi, nastajajo v nekoliko posebnem okolju skoraj zaprtega in izredno plitvega zaliva, zato ne morejo biti vzorec, po katerem bi sklepali na nastanek vseh so-

dobnih, še manj pa fosilnih stromatolitov. Stromatoliti so zaradi svoje ranljivosti in počasne rasti danes zaščiteni, ni pa bilo vedno tako. V začetku dvajsetega stoletja so preko njih z vozovi vozili volno s kopnega do ladij. Kolesnice lahko vidimo še danes, saj se ti organizmi izredno počasi obnavljajo.

Vloga cianobakterij pri zgodnjih podnebnih spremembah

Preučevanje stromatolitov je izredno zanimivo tudi v luči ene izmed najpomembnejših sprememb ozračja v zemeljski zgodovini in s tem povezanega razvoja življenjskih oblik. Cianobakterije, ki sestavljajo stromatolite, so več milijonov let počasi, a vztrajno spreminjale svet okoli sebe, tako da so pri fotosintezi v okolje sproščale kisik. Pred



Izbijanje mehurčkov kisika iz sodobnih stromatolitov v zalivu Hamelin Pool. Tako se že več kot polovico zemeljske zgodovine v ozračje sprošča kisik. Širina fotografije je približno 40 centimetrov.

Foto: Timotej Verbovšek.



Danes živeči stromatoliti v zalivu Hamelin Pool. Foto: Timatej Verbovšek.



Kolesnice iz začetka 20. stoletja potekajo čez ravnico stromatolitov v zalivu Hamelin Pool. Danes si jih je mogoče ogledati le z lesene platforme (levo). Foto: Timatej Verbovšek.

približno 2.200 milijoni let je bila namreč njegova količina le en odstotek vseh plinov v zemeljskem ozračju. Kisik je sicer nujno potreben za življenje, kakršnega poznamo danes, ni pa bil dobrodošel v predkambrijskem

svetu zgodnjih organizmov z anaerobnim metabolizmom, saj je bil zanje smrtonosen. Cianobakterije so z izdelovanjem kisika tako počasi »zastrupile« takratno okolje in omogočile razvoj drugačnega sveta.

Zanimivo je, da je bila porast kisika v ozračju dolgo upočasnjena zaradi železa, ki ga je bilo ogromno raztopljenega v morski vodi. Ko so namreč v vodi raztopljeni železovi ioni (Fe^{2+}) reagirali s kisikom, so nastali netopni minerali (predvsem oksidi), ki so se izločili iz morske vode in ki so vsebovali netopno oksidirano železo v obliki železovih ionov (Fe^{3+}). Po eni od teorij so tako v več sto milijonov let dolgem obdobju na različnih mestih nastale debele skladovnice železove rude, imenovane »pasasta železova ruda« (angleško *Banded Iron Formation, BIF*), ki še danes velja za eno največjih rudnih zalog železa na svetu. Šele ko je železa, ki je nase vezalo kisik, zmanjkalo, se je ta plin lahko

začel kopičiti v Zemljinem ozračju. Raziskovalci menijo, da je to odločilno vplivalo tako na okolje kot tudi na nadaljnji razvoj življenja: kisik je v ozračju reagiral z meta-

nom, ki je bil tedaj glavni toplogredni plin. Ob tem se je ozračje, ki je bilo pred povečanjem koncentracije kisika v zraku precej toplejše, shladilo. Ohlajeno ozračje je verjetno poleg takratne razporeditve kopnega in morja ter morskih tokov močno pripomoglo k nastanku globalne poledenitve – prve v nizu številnih, ki so sledile v naslednji milijardi let in pol. Zemlja se je iz ledenega oklepa izvila šele po zaslugi vulkanov, ki so v ozračje vztrajno vnašali drug toplogredni plin, ogljikov dioksid, in jo počasi ponovno segreli.

Stromatoliti v slovenskih kamninah

Stromatoliti niso nikakršna redkost niti v slovenskih kamninah. Najdemo jih v sedimentnih kamninah različnih časovnih obdobj. Posebej znani so stromatoliti, ki se v nekaj decimetrov debelih pasovih pojavljajo v plasteh zgornjetriasnega tako imenovanega glavnega dolomita in dachsteinskega apnenca (starosti približno od 227 do 200 milijonov let). Glavni dolomit je zelo pogosta litološka enota južne polovice Slovenije in seveda Dolomitov v Italiji, dachsteinski apnenec pa lahko občudujemo v Severni triglavski steni, v pogorju Kanina ali drugod v Julijskih Alpah, pa tudi marsikje v Karavankah (na severni strani Begunjščice, na Stolu in grebenu Košute). Vse te plasti so nastajale na obsežni plitvi karbonatni platformi, ki je v širini več sto kilometrov prekrivala rob nekdanjega oceana. Meter ali več debele plasti teh karbonatov so sestavljene iz več delov, ki so nastali v različno globokem morju. Posamezno plast spodaj večinoma tvori gost, na prvi pogled homogen del, nastal v plitvi morski vodi, nad njim pa je stromatolitni del, ki kaže, da je karbonat nastajal tik pod vodno gladino. Če pa je prišlo do okopnitve območja, na vrhu plasti najdemo še rdeče ali zelenkaste drobnozrnate glinaste sedimente, v katerih so vloženi oglati kosi apnenca (kosi nekdanjega karbonatnega blata, ki so se posušili in pomešali z glinenim materialom). Redno ponavljanje

tega zaporedja plasti dokazuje, da je gladine morske vode v geološki zgodovini zelo pogosto nihala, kar se je dogajalo večinoma zaradi orbitalnih Milankovičevih ciklov ali tektonskih premikov.

Med izletom po Julijcih lahko torej tudi sami poskusite poiskati te zanimive fosile. Če vas bo slučajno spremljalo slabo vreme, pa se v mislih preselite na obalo plitvega morja iz neke davne geološke preteklosti pod pripekajoče sonce, ki je sijalo na drugačen svet, kot je današnji.

Viri in priporočljiva literatura:

Mikrobialiti, stromatoliti in thromboliti:

Awramik, S. M., Vanyo, J. P., 1986: *Heliotropism in modern stromatolites*. *Science*, 231: 1279–1281. (<http://quest.nasa.gov/projects/spacewardbound/australia2011/resources/Heliotropism%20in%20modern%20stromatolites.pdf>)

Gebelein, C. D., 1969: *Distribution, morphology, and accretion rate of recent subtidal algal stromatolites, Bermuda*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39: 49–69.

Logan, B. W., Rezak, R., Ginsburg, R. N., 1964: *Classification and environmental significance of algal stromatolites*. *Journal of Geology* 72 (1): 68–83.

McNamara, K., 2009: *Stromatolites*. *Welshpool, Avstralija: Western Australian Museum*. 86 str.

Mikuž, V., 2004: *Miocenski onkoidi iz območja med Orešjem in Vinjim vrhom nad Šmarjeto na Dolenjskem*. *Slovenska akademija znanosti in umetnosti, Razred za naravoslovne vede. Razprave*, 45 (3): 51–89.

Mory, A. J., Haig, D. W., (ur.), 2011: *Permian–Carboniferous geology of the northern Perth and Southern Carnarvon Basins, Western Australia — a field guide: Geological Survey of Western Australia. Record 2011/14*, 65 str.

Posth, N. R., Konhauser, K. O., Kappler, A., 2011: *Banded Iron Formations. V: Reitner, J. R., Thiel, V., (ur.): Encyclopedia of Geobiology. Springer Science & Business Media B. V.*, 92–102.

Reid, R. P., Visschar, P. T., Decbo, A. W., Stolz, J. F., Bebout, B. M., Dupraz, C., Macintyre, I. G., Paerl, H. W., Pinckney, J. L., Prafaert-Bebout, L., Steppe, T. F., DesMarais, D. J., 2000: *The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites*. *Nature*, 406: 989–992.

Riding, R., 2011: *Microbialites, Stromatolites, and Thrombolites*. *Encyclopedia of Geobiology*.

Podatki o zalivu Shark Bay in Unescova območja svetovne dediščine:

<http://www.sharkbay.org/>

<http://whc.unesco.org/en/list/578>.

Slovarček manj znanih pojmov:

(Pojmi, označeni z zvezdico *, so povzeti iz Geološkega terminološkega slovarja, urednik J. Pavšič, 2003, Založba ZRC, ZRC SAZU.)

Cianofiti (cianobakterije)* Kopne, morske ali sladkovodne cepljivke, ki imajo poleg klorofila tudi modro barvilo.

Dendrolit. Stromatolit z dendritsko strukturo.

Evkariont.* Organizem z evkariontsko celico (celica z izraženim jedrom in različnimi organeli).

Leiolit. Stromatolit brez urejene strukture.

Litifikacija.* Spreminjanje novo odloženih sedimentov v trdno kamnino s procesi cementacije, konsolidacije, izsuševanja in kristalizacije.

Metazoj.* Večcelična žival, ki ima celice združene v tkiva in razvit živčni sistem.

Mikrit.* Apnenec z zrni kalcita, manjšimi od 0,004 milimetra.

Mikrobialit. Sediment, ki ga med svojo rastjo lovijo in nase vežejo mikroskopski organizmi (cianobakterije in druge bakterije, glive, drobne alge in protozoji) ali se izloči zaradi njihovega metabolizma.

Onkoid.* Kroglasta kalcitna tvorba modrozelenih cepljivk.

Ooid.* Kroglasta mineralna tvorba s koncentrično strukturo, ki je nastala z izločanjem mineralne snovi iz valujoče morske vode v priobalnem okolju. Velika je od nekaj stotink milimetra do dva milimetra.

Prokariont.* Organizem, ki nima niti jedrne mase, obdane z membrano, niti drugih organelov, ima pa DNA v eni krožni molekuli.

Sparit.* Apnenec z zrni kalcita, ki so večja od 0,05 milimetra.

Stromatolit.* Kalcitna ali aragonitna skorja na morskem dnu ali supralitoralno, ki nastaja pri presnovi modrozelenih cepljivk.

Trombolit. Stromatolit s krpasto notranjo strukturo.



Timotej Verbovšek, rojen leta 1976, je univerzitetni diplomirani geolog in doktor znanosti, ki je leta 2008 doktoriral s področja podzemnih vod in uporabe fraktalov v geologiji. Je izredni profesor na Oddelku za geologijo na Naravoslovnotehniški fakulteti v Ljubljani, kjer predava na Katedri za aplikativno geologijo. Področje njegovega raziskovanja zajema delo na področju krasa, inženirske geologije, GIS-a in fraktalov. Je član mednarodnih združenj AGU, IAH, NGWA in IAEG.



Luka Gale, rojen leta 1984, se je po zaključenem študiju geologije leta 2008 zaposlil kot mladi raziskovalec na Geološkem zavodu Slovenije. S področja mikropaleontologije je doktoriral leta 2012 in se kmalu zatem zaposlil kot docent na Oddelku za geologijo na Naravoslovnotehniški fakulteti v Ljubljani, kjer predava predvsem predmete s paleontološko vsebino, kot član programske skupine Regionalna geologija pa je dopolnilno zaposlen tudi na Geološkem zavodu Slovenije. Njegovo raziskovalno delo je usmerjeno v biostratigrafijo in taksonomijo triasnih in jurskih foraminifer, biotske spremembe na meji trias-jura, triasno stratigrafijo ter preučevanje sestave in zgradbe triasnih grebenov.