

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET**  
**BIOLOŠKI ODSJEK**

**ULOGA MORSKIH MIKROORGANIZAMA U KRUŽENJU**  
**SUMPORA U MORU**

**ROLE OF MARINE MICROORGANISMS IN**  
**SULPHUR CYCLING**

Matea Baburi  
Preddiplomski studij biologij  
(Undergraduate Study of Biology)  
Mentor: prof. dr. sc. Damir Vilić

Zagreb, 2011

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KRUŽENJE SUMPORA U BIOSFERII.....	3
2.1. SULFURIFIKACIJA .....	3
2.2. SULFOFIKACIJA .....	4
2.3. DESULFOFIKACIJA .....	5
3. HIDROTERMALNI IZVORI .....	6
4. KISELE KIŠE.....	7
5. METABOLIČKA KLASIFIKACIJA MIKROORGANIZMA.....	9
6. REDUCENTI SULFATA I METANOGENI U FUNKCIJI SALINITETA .....	9
7. MIKROBNA EKOLOGIJA U SLOJEVIMA GIPSA .....	10
8. LITERATURA .....	15
9. ZAKLJUČAK.....	18
10. SUMMARY .....	18

## 1. UVOD

Sumpor je biogeni element neophodan za odvijanje životnih procesa, a u isto vrijeme može u poveanim koncentracijama imati negativne učinke na vegetaciju i okoliš općenito. Industrijskim izgaranjem fosilnih goriva stvara se sumporov dioksid ( $\text{SO}_2$ ), koji u atmosferi reagira s kisikom i vodenom parom te tvori sumpornu kiselinu ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), koja je komponenta kiselih kiša.

Postoji 66 biogenih elemenata, a uz sumpor su elementarni ugljik, dušik, vodik i fosfor.

Sumpor je esencijalan element u biokemijskim procesima. Sumpor u organskom obliku prisutan je u vitaminima biotin i tiamin. Sumpor je važan dio mnogih enzima i antioksidansa u molekulama kao što su glutation i thioredoxin. Organski vezan sumpor sastavni je dio svih proteina, kao dio aminokiselina cisteina i metionina. Disulfidna veza je u velikoj mjeri odgovorna za vrstu proteina keratina, koji se nalazi u vanjskom sloju kože, u kosi i perju, dok sumpor u keratinu pridonosi mirisu koji se javlja kod spaljivanja kose.

U biljkama sumpor gradi estere sulfatne kiseline ( $\text{R-SO}_3\text{H}$ ) koji su neophodni za sintezu cisteinske kiseline. Aminokiseline sa sumporom cistein ( $\text{R-SH}$ ), metionin ( $\text{R-S-R}$ ) i cistin ( $\text{R-S-S-R}$ ) sadrže oko 50% sumpora u biljkama. Sumpor sudjeluje u građenju i mnogih enzima (proteaze, ureaze i dr.), sekundarnih biljnih tvari kao što su senfna ulja, glukozidi (sinigrin, rafain, alin itd.). Osim toga, sadrže ga vitamini biotin (vitamin H) i tiamin (vitamin B1), zatim različitih antibiotici itd.

Sumporne bakterije žive na dnu muljevutih bara i u sumpornim vrelima, općenito na mjestima gdje se razgrađuju velike količine sumporovodika. One mogu oksidirati spojeve koji sadrže sumpor. Tu reakciju provodi Beggiatoa i Thiotrix. Sulfat – reducirajuće bakterije (SRB) su grupa obligatnih anaerobnih bakterija koje imaju veliku ulogu u biogeokemijskom ciklusu ugljika i sumpora (Woodrow, 1995). Za kemoautotrofne bakterije i zajednice koja o njima ovisi (npr. fauna u hidrotermalnim izvorima na dnu oceana) izvor energije za sintezu organskih tvari su kemijske reakcije (kemosinteza). U dva zasebna slaništa u kojima se razvijale mikrobne zajednice, uz raspon saliniteta od 156 g/L i 206 g/L. Raznolikost sulfat reducirajućih bakterija je bila najveća uz niži salinitet, a smanjivala se s porastom saliniteta.

Sumpor je kemijski element koji se javlja u istom i kristalnom obliku. Kristali su mu žute boje, a najčešće se pojavljuje u obliku sulfida i sulfata ili kao elementarni oblik posebno u blizini vulkana, te u solima sfalerit i pirit. Sulfati su minerali koji sadrže anion  $(SO_4)^{2-}$ . Obično nastaju u evaporitnim uvjetima u kojima slana voda postupno isparava stvaraju i sulfate i halide. Sulfati se javljaju i u hidrotermalnim izvorima, na dnu oceana, na dodiru kontinentalnih ploča. Poznati minerali ove skupine su anhidrit (kalcijev sulfat), celestit (stroncijev sulfat), barit (barijev sulfat) i gips (hidratizirani kalcijev sulfat).

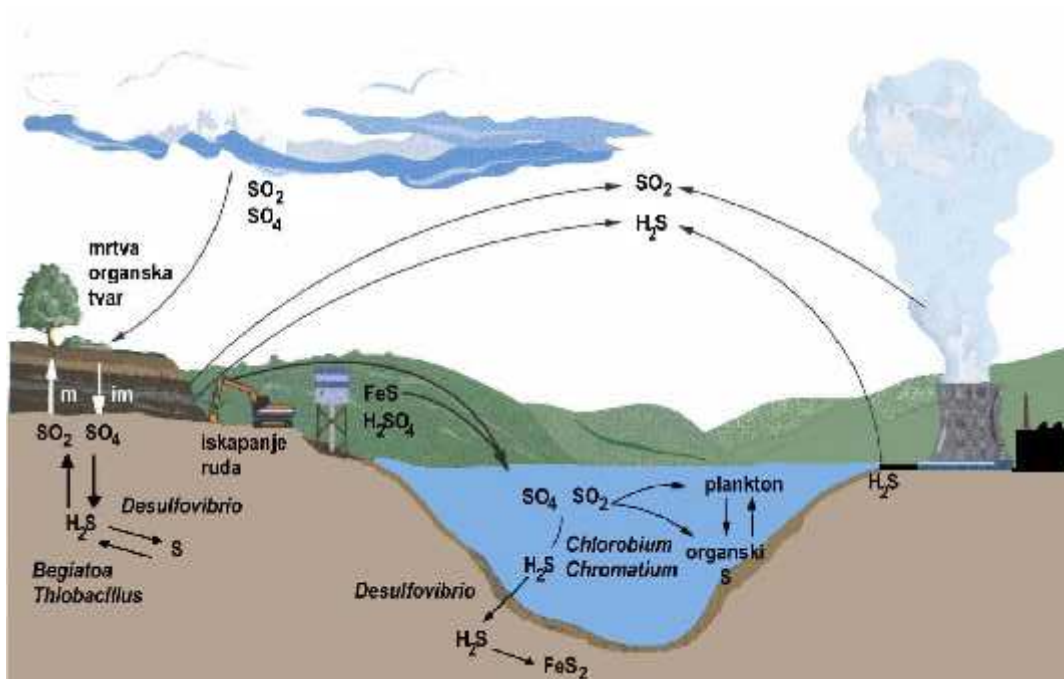
Tali se pri temperaturi  $115^\circ$  pri tome mijenja boju od svijetložute do crvenosmeđe. Mirisom podsjeća na šibice, lagan je i mekan. Gori plavi astim plamenom pri tome nastaje sumporov dioksid ( $SO_2$ ). Na povišenim temperaturama tvori spojeve s klorom, ugljikom, željezom i drugim elementima.

Transformacije (kruženje) sumpora u biosferi se odvijaju u biogeokemijskim ciklusima gdje u sklopu procesa mineralizacije i sinteze organskih tvari odlučuju u ulogu imaju razni organizmi. Sumpor čini 0.05 do 1% težine suhe tvari, a biljke ga primaju u obliku aniona  $(SO_4)^{2-}$ . Prije ugradnje u organske spojeve moraju ga reducirati. Sumpor sadrže aminokiseline cistein, cistin i metionin, koenzim A, feredoksin i neki drugi spojevi. Pokazatelji nedostatka sumpora slični su onima pri nedostatku dušika, uključuju i klorozu (Slika 1.), kržljav rast i akumulaciju antocijana (Pevalek – Kozlina, 2003).



Slika 1. Kloroza na listu vinove loze <http://goo.gl/kx6EG> 17.09.2011

## 2. KRUŽENJE SUMPORA U BIOSFERII



Slika 2. Kruženje sumpora u biosferi.

[http://www.agr.unizg.hr/cro/nastava/bs/moduli/doc/ag1061\\_2dio\\_kruzenje\\_ps.pdf](http://www.agr.unizg.hr/cro/nastava/bs/moduli/doc/ag1061_2dio_kruzenje_ps.pdf)

20.09.2011.

Sumpor u tlu potije e iz mati nih stijena gdje se najviše nalazi u obliku sulfida i prilikom raspadanja stijena se osloba a i brzo oksidira (Slika 2.)

### 2. 1. SULFURIFIKACIJA

Stvaranje sumporovodika – sulfurifikacija je mikrobiološki proces u kojem se organski spojevi sumpora (proteini), posebno iz humusa, postepeno pretvaraju u sumporovodik, mineralni oblik ovog elementa. Po reakcijama koje se odvijaju u ovom procesu, kao i po mehanizmu i enzimima u njima, ovaj proces potpuno odgovara procesu amonifikacije proteina uopće. Ova dva procesa teku istovremeno i obavljaju ih isti mikroorganizmi. Međutim, proizvod amonifikacije je amonijak, koji je oblik dušika pristupačan biljkama, dok je u procesu sulfurifikacije proizvod sumporovodik – spoj otrovan za sav živi svijet.

## **2. 2. SULFOFIKACIJA**

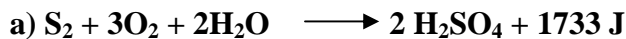
Stvaranje sulfata - sulfifikacija je mikrobiološki ili biokemijski proces u kojem nastaju sulfati, koje mogu koristiti i biljke i mikroorganizmi.

Sastoji se iz dvije faze:

1. **sumporifikacija** (oksidacija sumporovodika do elementarnog sumpora), koje mikroorganizmi talože u svojoj citoplazmi ili oko svog tijela



2. **sulfatifikacija** (oksidacija elementarnog sumpora, preko sulfita do sulfata), koji su pristupa ni biljkama.



Sulfatifikaciju provode sumporne bakterije ili sulfifikatori. Sumporne bakterije žive u muljevitim sedimentima i u sumpornim vrelima, op enito na mjestima gdje se razgra uju velike koli ine sumporovodika. Možemo ih podijeliti u dvije grupe: obojene bakterije (Chromobacteria) i bezbojne bakterije (Achromobacteria).

One mogu oksidirati spojeve koji sadrže sumpor, npr. sumporovodik koji nastaje pri razgradnji organskog materijala ili pri redukciji sulfata. Tu reakciju provode bezbojne bakterije Beggiatoa i Thiotrix.

Vrste roda Thiobacillus mogu osim sumporovodika, sulfida i sumpora do sulfata oksidirati i druge sumporne spojeve kao što su sulfit ( $\text{SO}_3^{2-}$ ), tiosulfat ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ), ditionat, tritionat, tetracionat i tiocijanat.

Stvorena sumporna kiselina smanjuje alkalnu reakciju u slatinama i potpomaže rastvaranju fosfata u tlu. To je važna uloga ovih bakterija u tlu, pored stvaranja sulfata kao biljnih asimilativa.

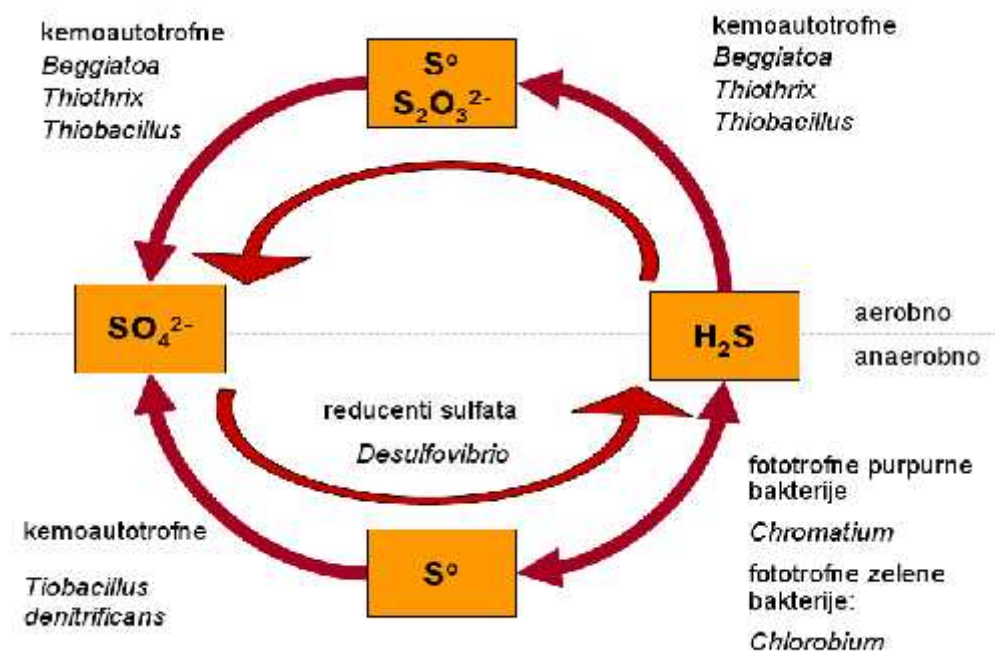
### 2.3. DESULFOFIKACIJA

Redukcija sulfata - desulfifikacija je redukcijski proces u kojem se sulfati reduciraju do sumporovodika. Razlikujemo direktnu i indirektnu desulfifikaciju.

**Direktna desulfifikacija** je mikrobiološki proces u kojem dolazi do redukcije oksidiranih spojeva sumpora u anaerobnim uvjetima. Ovaj proces vode obligatno anaerobni mikroorganizmi (*Spirillaceae*).

**Indirektna desulfifikacija** je kemijski proces redukcije sulfata u anaerobnim uvjetima u prisustvu stvorenog metana i vodika. Ovdje mikroorganizmi uglavnom indirektno doprinose stvaranju metana i vodika.

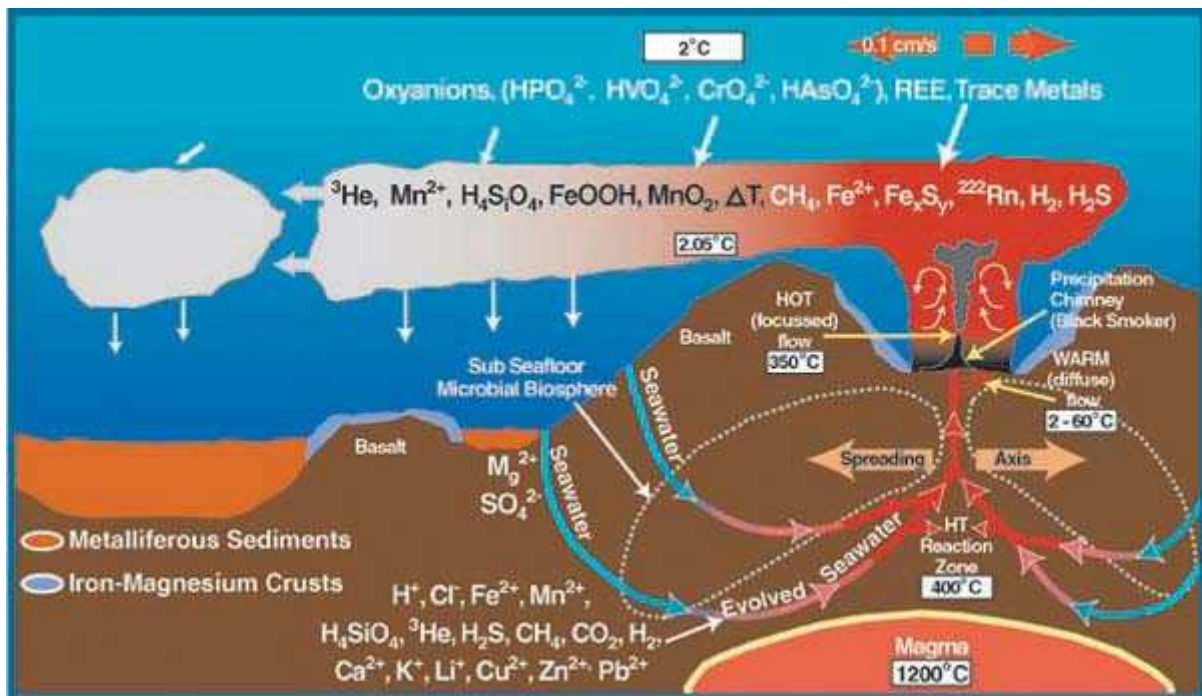
Sulfat reduciraju e bakterije (SRB) su raznolika skupina obligatnih anaerobnih bakterija koje se nalaze posvuda u prirodi, te isto tako igraju važnu ulogu u biogeokemijskom ciklusu sumpora (Woordouw, 1995). Desulfovibrio su reduciraju e bakterije. Uglavnom koriste sulfat kao akceptor elektrona tijekom oksidacije različitih donora elektrona (Widdel, Hansen, 1991, Muyzer, Stams, 2008).



Slika 3. Ciklus sumpora: [www.scribd.com/doc/52945683/Ciklus-sumpora](http://www.scribd.com/doc/52945683/Ciklus-sumpora) 17.09.2011.

### 3. HIDROTERMALNI IZVORI

U hidrotermalnim izvorima na dnu oceana, bezbroj bakterija i Archaea žive i napreduju unato tome što su okružene visokoj temperaturi, hladno i, tlaku i nedostatku svjetlosti. Otkako su znanstvenici 1979. godine otkrili postojanje hidrotermalnih izvora klasificirane su zajednice arhea i bakterija u hidrotermalnim otvorima (Takai et al., 2001). 10-20 tisu a vrsta bakterija i Archaea oslanjaju se na kemiosintezu, proces kojim anorganske tvari sintetiziraju u nove spojeve koji se koriste kao izvor energije za sebe ili za druge organizme. Ovaj proces koji provode kemioautrofi vrlo je sli an procesu fotosinteze kod biljaka (Wirsen et. al., 2002).



Slika 4. Hidrotermalna cirkulacija i razmjene kemijskih tvari između oceanske kore i morske vode; [http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Deep\\_sea\\_vent](http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Deep_sea_vent), 20.09.2011.

Jedne od glavnih tipova bakterija koje žive u blizini hidrotermalnih izvora su mezofilne bakterije sumpora. Ove bakterije su u mogućnosti postizanja visoke gustoće biomase zbog svoje jedinstvene fiziološke prilagodbe.



Na primjer, *Beggiatoa* je u stanju nositi unutarnje nakupine nitrata kao elektron akceptora koji pomaže kod sakupljanja slobodnog sulfida u gornjem sedimentu izvora. Cijeli se hranidbeni lanac tih bakterija bazira na prisutnosti H<sub>2</sub>S tj. reduciranog sumpora koji se nalazi u hidrotermalnoj vodi. Taj H<sub>2</sub>S koriste bakterije koje ga oksidiraju (*Thiomicrospira* i *Beggiatoa*) a oslobode energiju koja se koristi za proizvodnju organske tvari istimbiokemijskim putem kao i kod fotosintetskih organizama. Za to je potreban i kisik koji je otopljen u okolnoj vodi:



#### **4. KISELE KIŠE**

Naziv kisele kiše označava oborine čiji je pH niži od 5. Takve oborine nastaju zbog velike količine SO<sub>2</sub> i dušikovih oksida NO, koji dopijevaju u zrak raznim zagađivačima. Najčešće su to postrojenja i strojevi koji koriste fosilna goriva. Kada štetni oksidi dušika i sumpora dospiju u atmosferu, dolaze u dodir sa esticama vodene pare i tako nastaju sumporna i dušična kiselina.

Kisele kiše nastaju također prirodnim procesima, djelovanjem bakterija i fitoplanktona u moru. Kokolitoforidi (Malin et al., 1993), ali i druge alge (Kwint, Kramer, 1995), bakterije (Niki et al., 1997) i cijanobakterije (Vogut et al., 1998) mogu za vrijeme cvjetanja osloboditi hlapljivi dimetilsulfid koji iz mora prelazi u atmosferu. Dimetilsulfid nastaje iz dimetilsulfonium propionata koji stanicama alga služi kao osmoregulator, a u atmosferi čini i do 90% prirodne emisije sumpora i oko 50% ukupne emisije biogenog sumpora iz mora i oceana. U atmosferi se dimetilsulfid oksidira u sumpornu i metan sulfonsku kiselinu čije molekule vežu vodu i u atmosferi stvaraju sitni sulfatni aerosol. Sulfatne estice čine jezgre kondenzacije vodene pare, čime se stvaraju oblaci koji reflektiraju Sunčevu zračenje i time smanjuju zagrijavanje površine oceana (v. popratnu literaturu u Vilić i 2003). Sulfatna se kiselina iz atmosfere obara kišom koja ima smanjeni pH (kiselu kišu), pa se tako može i promijeniti kiselost tla.

Oborine s niskim pH oštećuju biljke. Najosjetljivije su četinjače poput bora, smreke i jele. Velik dio šuma u sjevernoj Americi i sjeverozapadnoj Europi je veoma oštećen ovakim oborinama (Slika 4.).

Osim na biljke, kisele kiše djeluju negativno i na kopnene vode. Zakiseljuju jezera i rijeke izravno djeluju i na živi svijet u njima. Nizak pH oštećuje škrge riba i drugih vodenih životinja, a uzrokuje i odumiranje vodenoga bilja. Osim zakiseljavanja vodenih staništa, mogu uzrokovati i zakiseljavanje tla. Posljedice toga očituju se u razgradnji kompleksnih spojeva koji sadrže teške metale te njihovog ispiranja u vodene ekološke sustave. Teški metali su toksični za žive organizme, a u kralježnjaka se najčešće talože u jetri i mozgu, te mogu uzrokovati ozbiljna oštećenja tih organa.

Područje Hrvatske je izloženo kiselim kišama koje donose značajne mase s oborinom iz zapadnih zemalja Europe. Kisele kiše imaju u području hrvatskog krša manji učinak jer vapnena podloga sadrži velike količine hidrogenkarbonata i karbonata koji djeluju kao pufer, odnosno sprječavaju zakiseljavanje i balansiraju pH vode.



Slika 5. Posljedice kisele kiše <http://eko.biol.pmf.hr/zlatko/Predavanje10P.pdf>, 17.09.2011.

Na sastav atmosfere znatno utječu prirodne emisije. Prigodom vulkanskih erupcija u atmosferu se izbacuju značajne količine plinova gdje prevladavaju  $H_2S$ ,  $SO_2$  i estica vulkanske prašine. Pri erupciji vulkana El Chicho u Meksiku 1982.g., u atmosferu je dospjelo 20 milijuna tona  $SO_2$ , što je približno 10% godišnje emisije  $SO_2$  emitirano spaljivanjem fosilnih goriva.

Fosilna goriva su trenutno osnovni izvor energije na Zemlji. Energija iz fosilnih goriva obično se oslobađa izgaranjem, i prilikom tog izgaranja također se oslobađaju otrovni i štetni plinovi koji utječu na okoliš kao: ugljikov monoksid  $CO$ , ugljikov dioksid  $CO_2$ , sumpornidioksid  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $NO_3$  itd.

## **5. METABOLIČKA KLASIFIKACIJA MIKROORGANIZMA**

U redoks reakcijama u moru djeluju

- fotoautotrofi: iz anorganskih tvari primljenih iz okoliša mogu sintetizirati organske spojeve koriste i se svjetlosnom energijom
- kemoautotrofi: potrebe za energijom podmiruju oksidacijom različitih anorganskih tvari koje primaju iz okoliša u stanicu, a produkte oksidacije izlučuju u okolišni medij. U kemoautotrofne organizme spadaju nitrifikacijske, sumporne, željezne, manganske, metanske, ugljik monoksidne bakterije i bakterije praskavog plina (Pevalek-Kozlina, 2002).

Prijenos redoks energije može se predstaviti kao ukupni biogeokemijski ciklus. Reakcije u ciklusu pokreće sunčeva energija. U fotosintetskih prokariota (fotosintetske bakterije i cijanobakterije) mjesto fotosinteze je stanična membrana ili membrane koje su od nje nastale. Procesom fotosinteze sunčeva se energija pretvara u termodinamički nestabilne kemijske vrste. Pretvorba je inicirana prijenosom elektrona iz vode u ugljikov-dioksid uslijed čega se stvara organska tvar i kisik. Organska tvar je termodinamički nestabilna u prisutnosti kisika. Kataliziraju i oksidaciju organske tvari, nefotosintetski organizmi nastoje vratiti sistem u ravnotežu. Tim reakcijama elektroni dobiveni iz organske tvari uzrokuju da se kisik, nitrati, sulfati i  $\text{CO}_2$  reduciraju na vodu, atmosferski dušik, sumporovodik i metan. Oksidacija organske tvari regenerira  $\text{CO}_2$  potreban za fotosintezu. Reducirani elementi nastali oksidacijom organske tvari su također termodinamički nestabilni u prisutnosti kisika. Njihova oksidacija regenerira oksidativne vrste  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_2$  potrebne za ponovno pokretanje kruga. Elektroni se zatim vraćaju na vodu koja onda sudjeluje u fotosintezi (Libes, 1992).

## **6. REDUCENTI SULFATA I METANOGENI U FUNKCIJI SALINITETA**

Slaništa su sustavi u kojima se mikrobiološke zajednice razvijaju u uvjetima visokog saliniteta, od morske vode do kamene soli – halita (Sørensen et al., 2009).

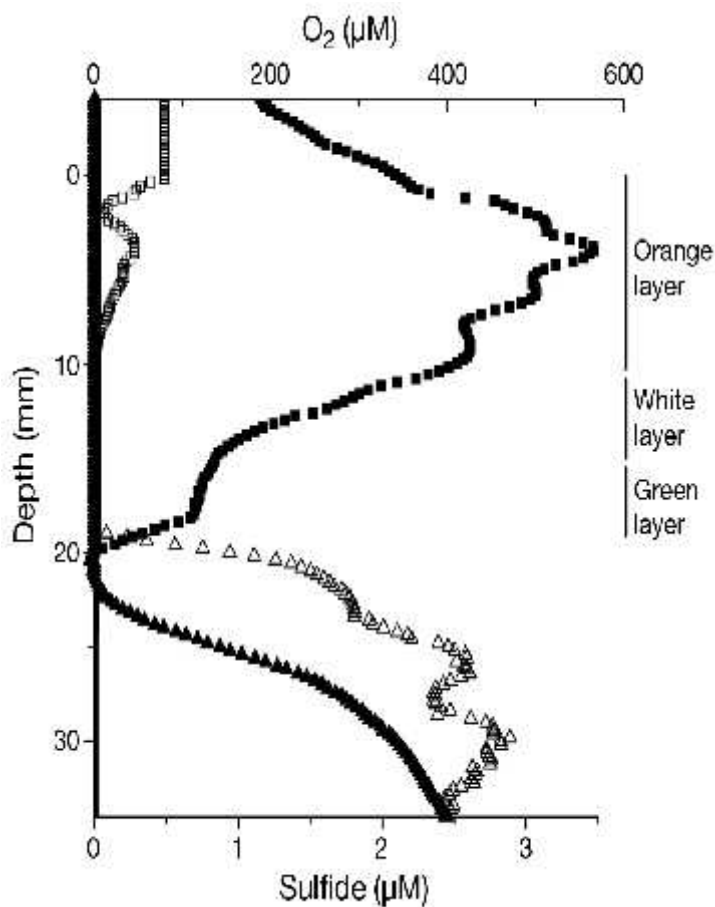
U takvim sustavima, sol se taloži u nizu evaporacijskih lokaliteta s obzirom na njihove različite topljivosti i tako tvore kristalnu koru od karbonata – gipsa ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ili halita, ovisno o specifičnom salinitetu. Gips je glavni taložni produkt pri salinitetu od između 150 i 250 g/L, i stvara debele gipsane naslage na dnu lokaliteta morskih salina. Fototrofske alge i cijanobakterije nastanjuju te naslage stvaraju i aerobne zajednice koje postoje nekoliko centimetara ispod površine kore. Gornja oksigenirana zona je obično podijeljena u tri različita sloja: gornji narančasti ili smeđi sloj, srednji zeleni i donji bijeli bez prisustva ikakvih fototrofa (Caumette et al., 1994, Oren et al., 1995, Oren, 2005). Prijašnja istraživanja o sposobnosti prodiranja svjetlosti su pokazala da je fotoaktivna svjetlost prisutna u sva tri sloja (Oren et al., 1995). Šalaze i dublje u sediment, naslage postaje sve zasjenjenije i raste prisutnost sulfida. Istraživanja o biokemiji, strukturi i sastavu takvih mikrobioloških zajednica su pokazala da su sulfat – reduciraju i i metanogene mikroorganizmi prisutni u naslagama. Ali dok su metanogeni dobro adaptirani na prisutni visoki salinitet, sulfat reducirajuće bakterije su vrlo osjetljive na salinitet, također, čini se da visoki salinitet na neki način inhibira različite grupe oksigenih i ne oksigenih fototrofa (Canfield et al., 2004, Sorensen et al., 2004). Rezultat toga je da se zajednice mikroorganizama u naslagama dramatično mijenjaju kada su izložene salinitetu između 100 i 200 g/L.

## **7. MIKROBNA EKOLOGIJA U SLOJEVIMA GIPSA**

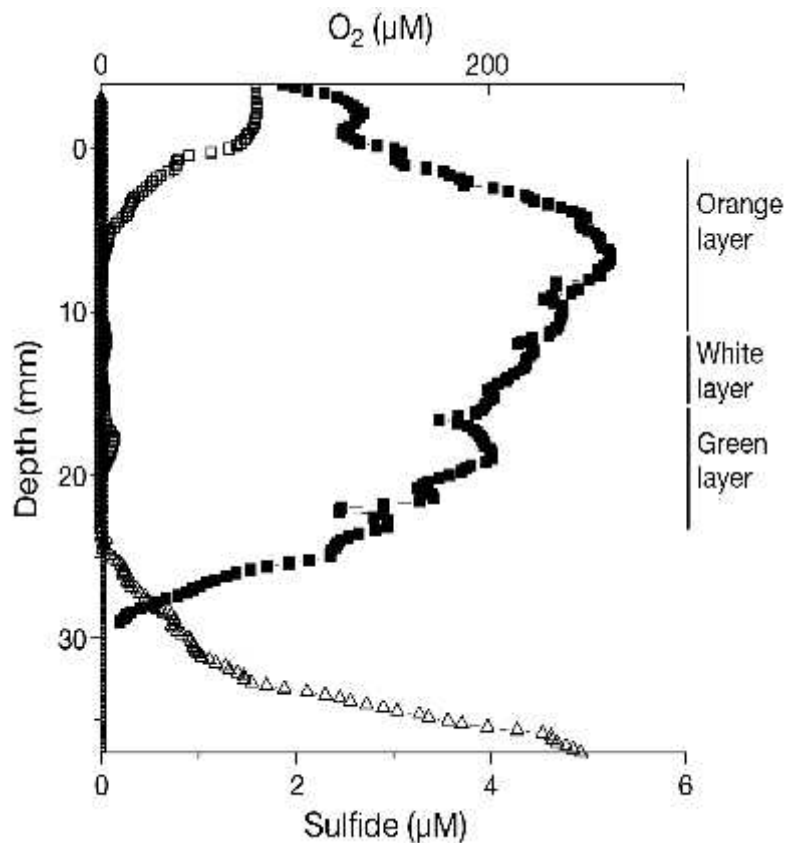
Na prvi pogled se čini da su gipsane naslage evaporacijskih lokaliteta vrlo slične, bez obzira na salinitet. Ipak, uzimajući u obzir snažan utjecaj saliniteta na stopu primarne produkcije i progresivno isključenje funkcionalnih grupa s povećanjem saliniteta, vidi se da postoje bitne razlike među mikrobiološkim zajednicama (Oren, 1999, 2001).

Ovo istraživanje je provedeno da se usporede zajednice fototrofa, metanogena i sulfat reducirajućih bakterija u dva susjedna lokaliteta (lokalitet 103 i lokalitet 200) saliniteta 156 g/L i 206 g/L u salinom sustavu u Eilat. Istražen je sastav dvije nastale naslage i mikroskopski i molekularno analizirane zajednice fototrofa, metanogena i sulfat reducena. Uzorci gipsanih naslaga sakupljeni su u dva spomenuta lokaliteta su mikroskopski analizirani te profilirani mikrosenzorom za kisik, pH i sulfide i podvrgnuti PCR metodi.

Provedena su mjerenja mikrosenzorom na nekoliko različitih lokacija 2 – 5 cm udaljenima na površini naslage. Slika 4. i 5. prikazuju primjere omjera kisika i sulfida u naslagi mjerenih u dva različita doba dana: 5:30 h prije izlaska sunca i 11:30 h pri jakom suncu. Kisik akumuliran u gornjih nekoliko cm preko dana u obje naslage je potrošen tijekom noći. Naslaga sakupljena u lokaliteta 103 je postigla mnogo veću koncentraciju kisika i značajniju pojavu mjehurića (pretpostavljeno kisika) na površini u odnosu na naslagu iz lokaliteta 200.



Slika 6: Koncentracija kisika i sulfida u sloju gipsa na lokalitetu 103, u 5:30 sati (svijetli simboli) i u 10 sati (tamni simboli). (Sørensen et al., 2009)



Slika 7: Količina kisika i sulfida u sloju gipsa na lokalitetu 200 u 5 i 30 h (svijetli simboli) i u 11 i 30 h (tamni simboli). Sulfida nema u 11 i 30 h. (Sørensen et al., 2009)

Slojevi gipsa iz lokaliteta 103 podijeljeni su u tri različite grupe temeljeno na PCA (principal component analyses). Prvu grupu predstavljaju gornja dva sloja, narančasti i bijeli (0-1 cm dubine). Karakterizira ih prisustvo kolonijalnih i solitarnih cijanobakterija *Halothece* sp., *Halospirulina tapeticola*, *Leptolyngbya woronichinii* i *Phormidium* sp.

Također su pronađene *Marichromatium* slične stanice (ovalne ružičaste bakterije) i spiralne bakterije. Zeleni i ružičasti sloj na dubinama od 1-2 i 2-3 cm formiraju drugu grupu – cijanobakterije koje uključuju *Leptolyngbya*, *Phormidium* cf. *inundatum*, dijatomeju *Nitzschia* aff. *N. lorenziana* i neklasificirane bezbojne stapičaste bakterije. Malinasto – zeleni sloj dubine 3-4.5 cm formira treću grupu – koju karakteriziraju cijanobakterije *Aphanoscapa* sp., *Pseudanabaena* sp., i *Phormidium laetervirens*.

U lokalitetu 200, pronađeno je 10 slojeva, od prvog najvišeg do 10 najnižeg i najdubljeg budući da su slojevi bili vrlo tanki i nemogući za izmjeriti. Narančasti, bijeli i zeleni sloj (1 –

3 sloj) koloniziraju cijanobakterije *Haloteche* sp, *Leptolyngbya* cf. *Woronichinii* i *Phormidium laetevirens*. Dublji zeleni i ljubi asti slojevi 4 i 5 sadrže cijanobakterije *Halospirulina tapeticola* i *Phormidium* cf. *Inundatum* i *Phormidium* sp. Duboki slojevi u lokalitetu 200, vjerojatno ispod fototrofi ke zone, tako er sadrže cijanobakterije i druge fototrofe (posebice slojevi 7 i 8). Sloj 6 predstavlja prijelaz izme u površinskih (1 – 5) i drugih slojeva. Sloj 7 nastanjuje cijanobakterija *Halothece*, i ruži asta ovalna *Halochromatium* / *Marichromatium* sli na bakterija. Slojevi 8 i 9 su prijelaz izme u 7. i 10. sloja koji ne sadrži cijanobakterije niti druge fototrofe. Stanice prona ene u tom sloju su jednostani ne ovalne, zelene štapi aste ili kolonijalni koki.

U ovom istraživanju nisu mjerene stope fotosinteze, no mnogo ve a akumulacija kisika u sloju s lokaliteta 103 nego s lokaliteta 200 o ito pokazuje da je stopa fotosinteze ve a, što je salinitet manji. Reducirani sulfid nije uo en u naran astim, bijelim i zelenim površinskim slojevima no u u lokalitetu 200 (Canfield et al., 2004, Sørensen et al., 2004) Biološka reoksidacija sulfida i/ili precipitacija sulfida sa metalnim ionima može zna ajno ukloniti sulfide iz vodnene okoline ak i u prisutnosti sulfatne redukcije. Makar nedostatak slobodnih sulfida u vodi ne isklju uje prisutnost sulfatne redukcije. Op enito, profili kisika i sulfida se nisu preklapali, što bi moglo uputiti da akceptor elektrona nije nužno kisik nego npr. nitrat kojeg proizvode prokarioti u korama.

Rezultati mikroskopskih analiza pokazuju razli itu raspodjelu mikroorganizama i njihove aktivnosti po dubini naslage gipsa, te specifi ne razlike na dva susjedna lokaliteta (103 i 200). Istraživanja naslage iz lokaliteta 200, dokazuju da prodiranje Sun eve svjetlosti nekoliko centimetara u koru, kao i konstantno mijenjanje kvalitete i kvantitete svjetlosti u razli itim slojevima utje u na vrstu i oblik zajednice fototrofa na razli itim dubinama.

Bakteria su bile mnogo zastupljenije od Archea u svim slojevima naslage. Velika koli ina arheja u lokalitetu 200 je vjerojatno uzrokovana rastom halobakterija unutar aerobnog sloja same kore (Sørensen et al., 2005). Op enito, halobakterije su nadene u oklišu visokog saliniteta izme u 150 i 200 g/L, što se podudara sa pronalaskom njihove velike populacije u Bari 200 gdje je salinitet ve i (Oren, 2006). Ukupni broj arheja uvelike premašuje broj metanogena u svim dubinama kore u oba jezera.

Raznolikost metanogena je i ni se ograničena, budući da su na njima samo jedinice roda *Methanohalobium* i *Methanohalophilus*. Njihova raznolikost je najniža u lokalitetu 103 gdje je na njima samo *Methanohalophilus*.

Poznato je da oba roda opstaju pri salinitetima sličnima iz lokaliteta 103 i 200 i da za metanogenezu koriste nekompetitivne spojeve poput metilamina i trimetilamina.

Sulfid se nije taložio unutar oksigeniranog sloja naslage tijekom navedenih, čak u slojevima gdje je kisik u potpunosti iskorišten, što nužno ne isključuje prisustvo sulfatne redukcije. Ipak, sulfat reducirajuće bakterije i sulfat oksidirajuće bakterije predstavljaju manjinu populacije prokariota u slojevima kore.

Iako su stope saliniteta od 156 g/L i 206 g/L dosta slične, postoje bitne razlike i kod fototrofnih i heterotrofnih zajednica. Razlog tomu su kompleksne interakcije među u efektima saliniteta na produktivnost i status nutrijenata u svakom od slojeva. Zajednice sulfat reducirajućih bakterija su varirale s dubinom unutar kore i njihova raznolikost je bila manja kako se salinitet povećavao. Iako je broj metanogena u odnosu na broj bakterija bio manji pri većem salinitetu, njihova raznolikost je bila visoka, a moguće i viša nego u bari manjeg saliniteta.



## **8. LITERATURA:**

1. Caumette, P., Matheron, R., Raymond, N., Relexans, J. C., 1994: Microbial mats in the hypersaline ponds of Mediterranean salterns (Salins-de-Giraud, France). *FEMS Microbiol. Ecol.* 13, 273–286.
2. Canfield, D.E., Des Marais, D.J., 1993: Biogeochemical cycles of carbon, sulfur and free oxygen in a microbial mat. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, 3971-3984.
3. Canfield, D.E., Sørensen, K., Oren, A., 2004: Biogeochemistry of a gypsum-encrusted microbial ecosystem. *Geobiology* 2, 133–150.
4. Ionescu D., Lipski A., Altendorf K., Oren A., 2007: Characterization of the endoevaporitic microbial communities in a hypersaline gypsum crust by fatty acid analysis. *Hydrobiologia* 576, 15–26.
5. Kwint, R. L. J., Kramer, K. J. M., 1995: Dimethylsulphide production by plankton communities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 121, 227-237.
6. Libes, S. M., 1992: *An Introduction to Marine Biochemistry*. John Wiley and Sons, New York.
7. Malin, G., Turner, S., Liss, P., Holligan, P., Harbour, D., 1993: Dimethylsulphide and dimethylsulphonipropionate in the NE Atlantic during the summer coccolithophore. *Deep-Sea Res.* 40, 1487-1508.
8. Muyzer, G., Stams, A. J. M., 2008: The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nat. Rev. Microbiol.* 6, 441–454.
9. Niki, T., Kunugi, M., Kohata, K., Otsuki, A., 1997: Annual monitoring of DMS-producing bacteria in Tokyo Bay, Japan, in relation to DMSP. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 156, 17-24.
10. Oren, A., Kühl, M., Karsten, U., 1995: An endoevaporitic microbial mat within a gypsum crust: Zonation of phototrophs, photopigments, and light penetration. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 128, 151–159.
11. Oren, A., 1999: Bioenergetic aspects of halophilism. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 63, 334–348.

12. Oren., A., 2001: The bioenergetic basis for the decrease in metabolic diversity in increasing salt concentrations: implications for the functioning of salt lake ecosystems. *Hydrobiologia* 466, 61-72.
13. Oren., A., 2005: Microscopic examination of microbial communities along a salinity gradient in saltern evaporation ponds: a 'halophilic safari'. In: Gunde-Cimerman, N., Oren, A., Plemenitaš, A., (eds) *Adaptation to life at high salt concentrations in Archaea, Bacteria, and Eukarya*. Springer Dordrecht, 41–57.
14. Oren., A., 2006: Life at high salt concentrations. In: Dworkin, M., Falkow, S., Rosenberg, E., Schleifer, K. H., Stackebrandt, E. (eds) *The prokaryotes. A handbook on the biology of bacteria: ecophysiology and biochemistry*, Vol 2. Springer, New York, 263–282.
15. Pevalsek – Kozlina, B., 2002: *Fiziologija bilja*, Profil, Zagreb.
16. Sørensen, K.B., Canfield, D.E., Oren, A., 2004: Salt responses of benthic microbial communities in a solar saltern (Eilat, Israel). *Appl. Environ. Microbiol.* 70, 1608–1616.
17. Sørensen, K.B., Canfield, D.E., Teske, A.P., Oren, A., 2005: Community composition of a hypersaline endoevaporitic microbial mat. *Appl. Environ. Microbiol.* 71, 7352–7365.
18. Sørensen, K., eháková, K., Zapom lová, E., Oren, A., 2009: Distribution of benthic phototrophs, sulfate reducers, and methanogens in two adjacent salt ponds in Eilat, Israel, *Aquatic Microbial Ecology* 56, 275-284.
19. Takai, K., Komatsu, T., Inagaki, F., Horikoshi, K., 2001: Distribution of Archea in a black smoker chimney structure. *Appl. Environ. Microbiol.* 67, 3618–3629.
20. Vili i , D., 2003: *Fitoplankton u ekološkom sustavu mora*, Školska knjiga, Zagreb.
21. Vogt, C., Rabenstein, A., Rethmeier, J., Fischer, U., 1998: Alkali-labile precursors of dimethyl sulfide in marine benthic cyanobacteria. *Arch. Microbiol.* 169, 263-266.
22. Voordouw, G., 1995: The genus *Desulfovibrio*: the centennial. *Appl. Environ. Microbiol.* 61, 2813-2819.
23. Widdel, F., Hansen, T. A., 1991: The dissimilatory sulphate and sulphur-reducing bacteria In *The Prokaryotes*. Springer, New York, vol. II, 2nd edn., 583 – 624.
24. Wirsen, C. O, Sievert, S. M., Cavanaugh, C. M., Molyneaux, S. J., Taylor, L. T., DeLong, E.F., Taylor, C. D., 2002: Characterization of an Autotrophic Sulfide-Oxidizing Marine

Arcobacter sp. That Produces Filamentous Sulfur. Applied and Environmental Microbiology 68, 316-325.

Internetski izvori:

1. <http://goo.gl/kx6EG> 17.09.2011.
2. [http://www.agr.unizg.hr/cro/nastava/bs/moduli/doc/ag1061\\_2dio\\_kruzenje\\_ps.pdf](http://www.agr.unizg.hr/cro/nastava/bs/moduli/doc/ag1061_2dio_kruzenje_ps.pdf) 20.09.2011.
3. [www.scribd.com/doc/52945683/Ciklus-sumpora](http://www.scribd.com/doc/52945683/Ciklus-sumpora) 17.09.2011.
4. [http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Deep\\_sea\\_vent](http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Deep_sea_vent) 20.09.2011.
5. <http://eko.biol.pmf.hr/zlatko/Predavanje10P.pdf>, 17.09.2011.

## **9. ZAKLJUČAK**

Autotrofni organizmi mogu iz anorganskih tvari primljenih iz okoliša sintetizirati organske spojeve koriste i se svjetlosnom energijom (fototrofi) ili kemijskom energijom oslobode u različitim kemijskim reakcijama (kemoautotrofi). Kemoautotrofni organizmi su sumporne, nitrifikacijske, željezne, manganske, metanske, ugljik monoksidne bakterije i bakterije praskavog plina. Sumporne bakterije žive u sedimentima stajalicama i u sumpornim vrelicama, gdje transformiraju velike količine sumporovodika. Mogu oksidirati sumporovodik koji nastaje pri razgradnji organskog materijala ili pri redukciji sulfata. Tu reakciju provode *Beggiatoa* i *Thiotrix*. Vrste roda *Thiobacillus* mogu osim sumporovodika, sulfida i sumpora do sulfata oksidirati i druge sumporne spojeve, dok *Desulfovibrio* koristi sulfat kao akceptor elektrona tijekom oksidacije uz različite donore elektrona. Publicirani istraživački rad u talogu gipsa pokazuje vertikalnu raspodjelu sumpornih bakterija pomoću mikrosenzora za ispitivanje kisika, pH i sulfida, utvrđen sastav i aktivnost sulfat reducirajućih bakterija

## **10. SUMMARY**

Autotrophic organisms are receiving inorganic substances from the environment to synthesize organic compounds using light energy (phototrophic) or by chemical energy released in various chemical reactions (chemoautotrophic). Chemoautotrophic organisms transform sulfur, nitrogen, iron, manganese and carbon. Sulfur bacteria live on the muddy bottom of sediments, in sulfur springs, generally in places where they transform hydrogen sulphide. They can oxidize compounds containing sulfur, such as hydrogen sulfide, which occurs during decomposition of organic material or the reduction of sulfate. This reaction is carried out by *Beggiatoa* and *Thiothrix*. *Thiobacillus* can oxidize hydrogen, sulfide, sulfate and other sulfur compounds, while *Desulfovibrio* is a sulfate-reducing bacteria using sulfate as an electron acceptor during oxidation of different electron donors. The published case study in the gypsum crust, vertical distribution of phototrophic, sulfate reducers and methanogens in salinities of 156 and 206 g/L was examined using microsensors for oxygen, pH and sulfide. Community of sulfate reducing bacteria varied with the depth of the crust and their diversity was lower as the salinity increased.

