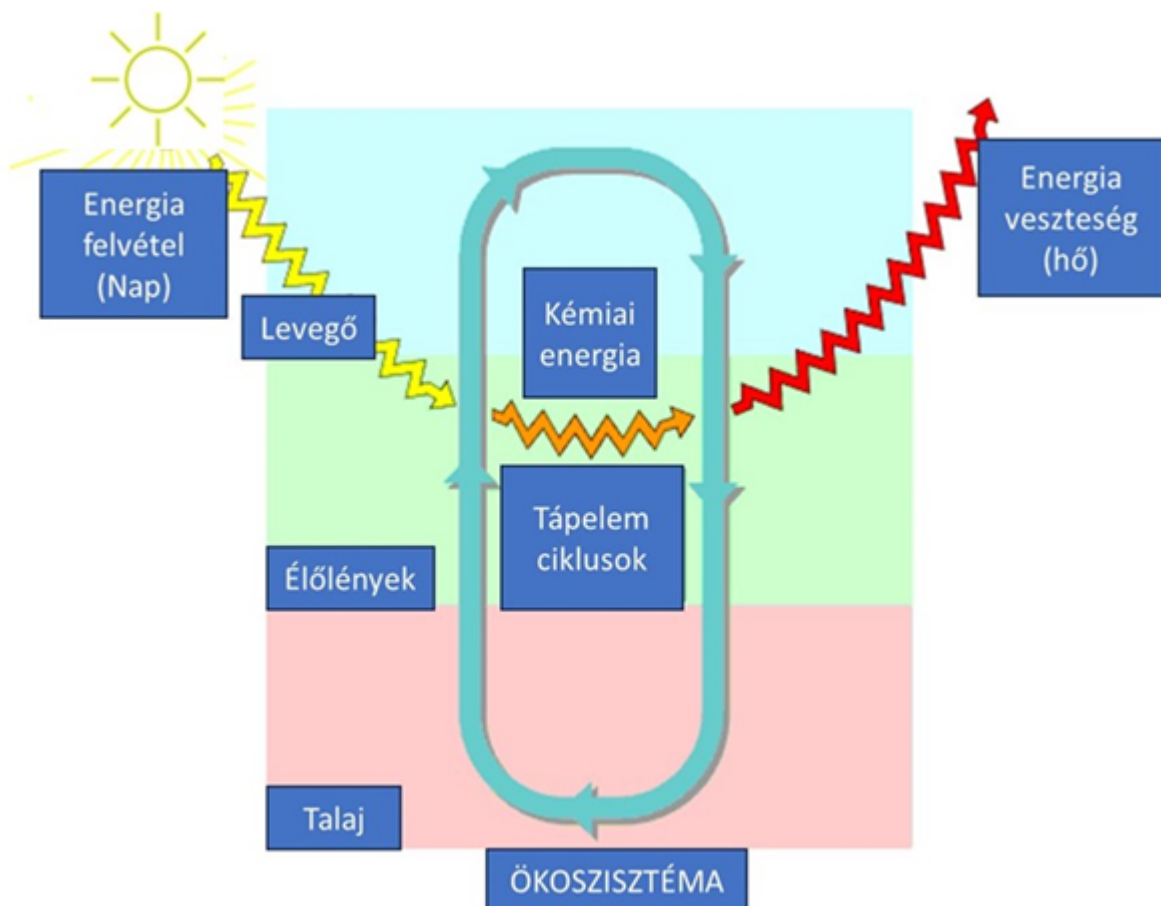


6.9. Biogeokémiai ciklusok és jelentőségük

A biogeokémiai ciklusok a Föld elemkörforgalmi ciklusai, amelyekben az egyes tápelemek regenerációja valósul meg, így a földfelszín anyag és tápelemekészletének jelentős részét tartják állandó mozgásban.

A ciklusokban az elemvándorlás előbből élettelenbe és vissza zajlik, hatalmas geológiai depók épülhetnek bele (pl. szénképződés). Az elemvándorlás során az egyes anyagok kötése szerves kötésből szervesetlenbe és vissza alakulnak, miközben az elemek oxidációs foka, esetenként a halmazállapota is változik. Az egyes elemek tápelem ciklusai egymással szorosan összefüggenek, változatos időskálán, változatos környezetekben zajlanak, szorosan kapcsolódnak a vízkörforgalomhoz.

A ciklusok biotikus (elemvándorlás biológiailag ellenőrzött) és abiotikus fázisokra különíthetők (24. ábra).



Copyright © The Benjamin/Cummings Publishing Co., Inc., from Campbell, Mitchell, Reece *Biology: Concepts and Connections*.

24. ábra Tápanyagok körforgása és energiaáramlás az ökoszisztémákban (Campbell és mtsai (2006))

nyomán; *Biology: Concepts and connections*)

A mikroorganizmusok szerepe az elemkörforgalmi ciklusokban kiemelkedő, hiszen a mikroorganizmusok a bioszféra minden részében jelen vannak, jelentős szerepet játszottak a légkör és a litoszféra (talaj) kialakulásában is, segítségükkel számos mineralizációs folyamat megy végbe (néhány folyamatra pl. kizárólag prokarióta szervezetek képesek). Így segítenek a szervesanyagokat felépítő elemek (C, H, O, N, S, P, Fe) körforgalomban tartásában.

Mikroorganizmusok lehetséges szerepei az elemkörforgalmi ciklusokban:

- **Ásványosítás:** Szerves kötés szervesetlenbe alakulása, a vegyületek energia tartalma, biokémiai komplexitása csökken; közösségi funkció; tápelem-regeneráció; bioszintézis számára nélkülözhetetlen elemeket újra felvehető alakba transzformálja.
- **Immobilizáció:** Tápelemek konverziója szervesetlen kötésből szervesbe; biokémiai komplexitás nő; szaprofita mikroorganizmusok anorganikus kötésű tápelem hasznosítása; teljes spektrumú immobilizáció (autotrófok).
- **Oxidációk lehetnek:** A sejt energetikai anyagcseréjével kapcsolatos folyamatok (szerves és szervesetlen vegyületek oxidálása)

Enzimatikusan katalizált oxidációk (pl. heterotróf nitrifikáció)

Közvetett hatásra bekövetkező oxidációk (valamely mikrobiális anyagcseretermékek hatására)

- **Redukciók lehetnek:** A sejt energetikai anyagcseréjével kapcsolatos folyamatok (szerves és szervesetlen vegyületek redukálása)

Oxigén felhasználásra visszavezethető redukciók (redukáló vegyületek produkciója)

Savképzés hatására bekövetkező redukciók ($\text{Fe}^{3+} - \text{Fe}^{2+}$)

- **Volatilizáció és fixáció:** Az egyes elemek mennyiségének szabályozása az ökoszisztémákban
 Fixáció: valamely anyag gázhalmazállapotból másba (pl. biológiai nitrogén kötés)
 Volatilizáció: gázhalmazállapotúba transzformálás (pl. denitrifikáció)
- **Geológiai üledékképződés mikrobák hatására:** Oxido-redukciós folyamatok, mikroorganizmusok anyagcsere termékei és maguk a mikrobák is – geológiai formációk létrejötté (szénülés, kőolaj képződés stb.)

Függ: milyen körülmények között képződnek és mely mikrobák vannak jelen.

- **Kelátképző anyagcsere termékek:** Viszonylag oldhatatlan anyagok oldatba vitele (pl. kétértékű kationok), oldódó stabil komplex kialakítása
- **Kémiai elemek egyoldalú felhalmozása:** Anorganikus anyagok adszorpciójánál a mikrobák göcként szerepelhetnek (pl. gyepvasérc telepek kialakulása)

A LEGFONTOSABB TÁPELEKÖRFORGALMI CIKLUSOK (5. táblázat)

5. táblázat. A legjelentősebb biogeokémiai ciklusok.

Ciklus	Gáz fázis jelentős	Redukált forma	Köztes oxidációs állapotok			Oxidált forma
C	igen	CH₄ (-4)	CO (+2)			CO₂ (+4)
N	igen	NH₃, szerves-N (-3)	N₂ (0)	N₂O (+1)	NO₂⁻ (+3)	NO₃⁻ (+5)
S	igen	H₂S, R-SH (-2)	S⁰ (0)	S₂O₃²⁻ (+2)	SO₃²⁻ (+4)	SO₄²⁻ (+6)
Fe	nem	Fe²⁺ (+2)				Fe³⁺ (+3)

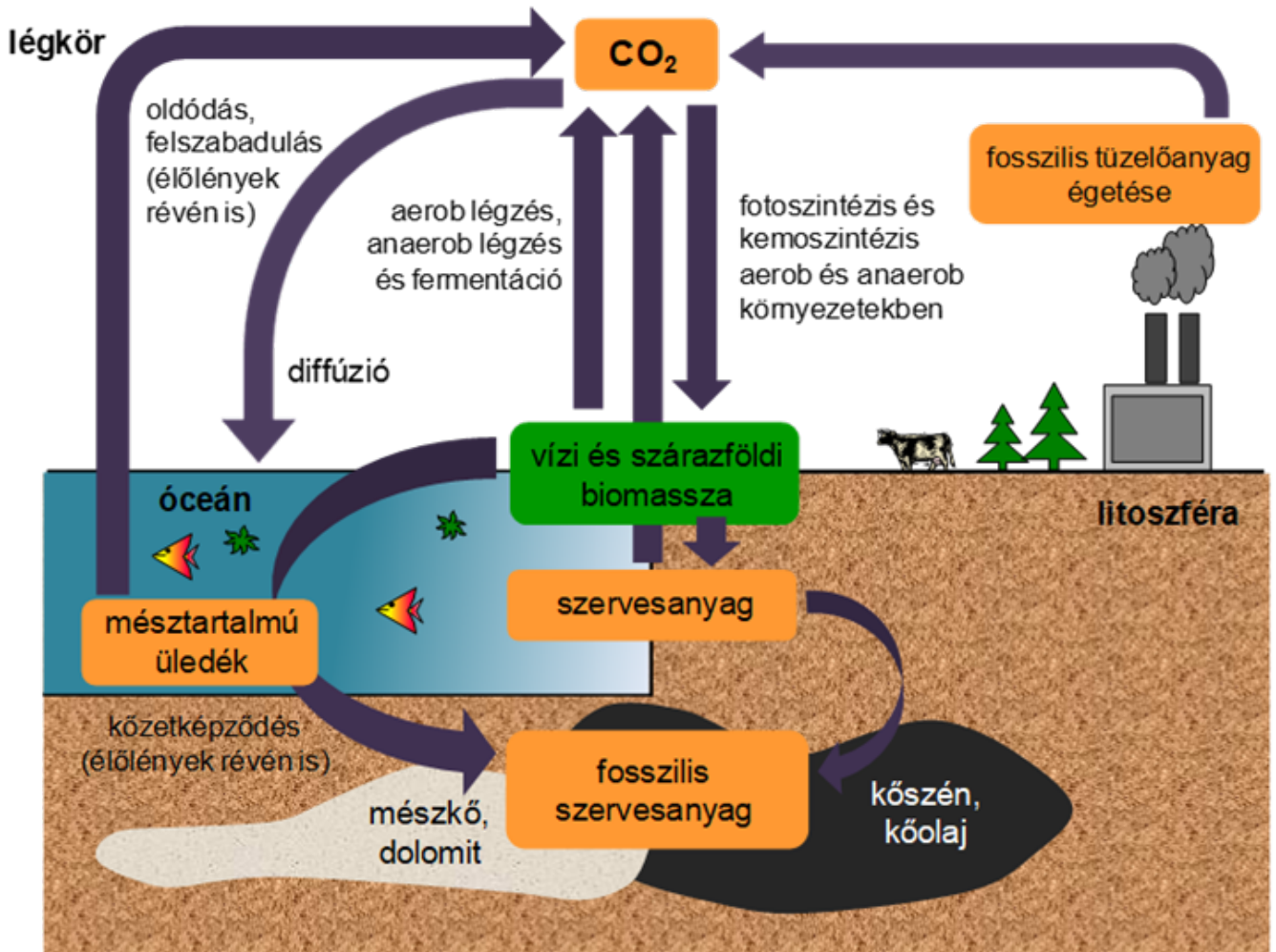
A SZÉN BIOGEOKÉMIAI CIKLUSA:

A szén a Föld 12. leggyakoribb eleme, a Föld tömegének 0,034%-a, földkéregben 0,19%-át adja, valamennyi élő szervezetben előfordul, előfordulását a Földön az 6. táblázat mutatja.

6. táblázat. A szén előfordulása a Földön.

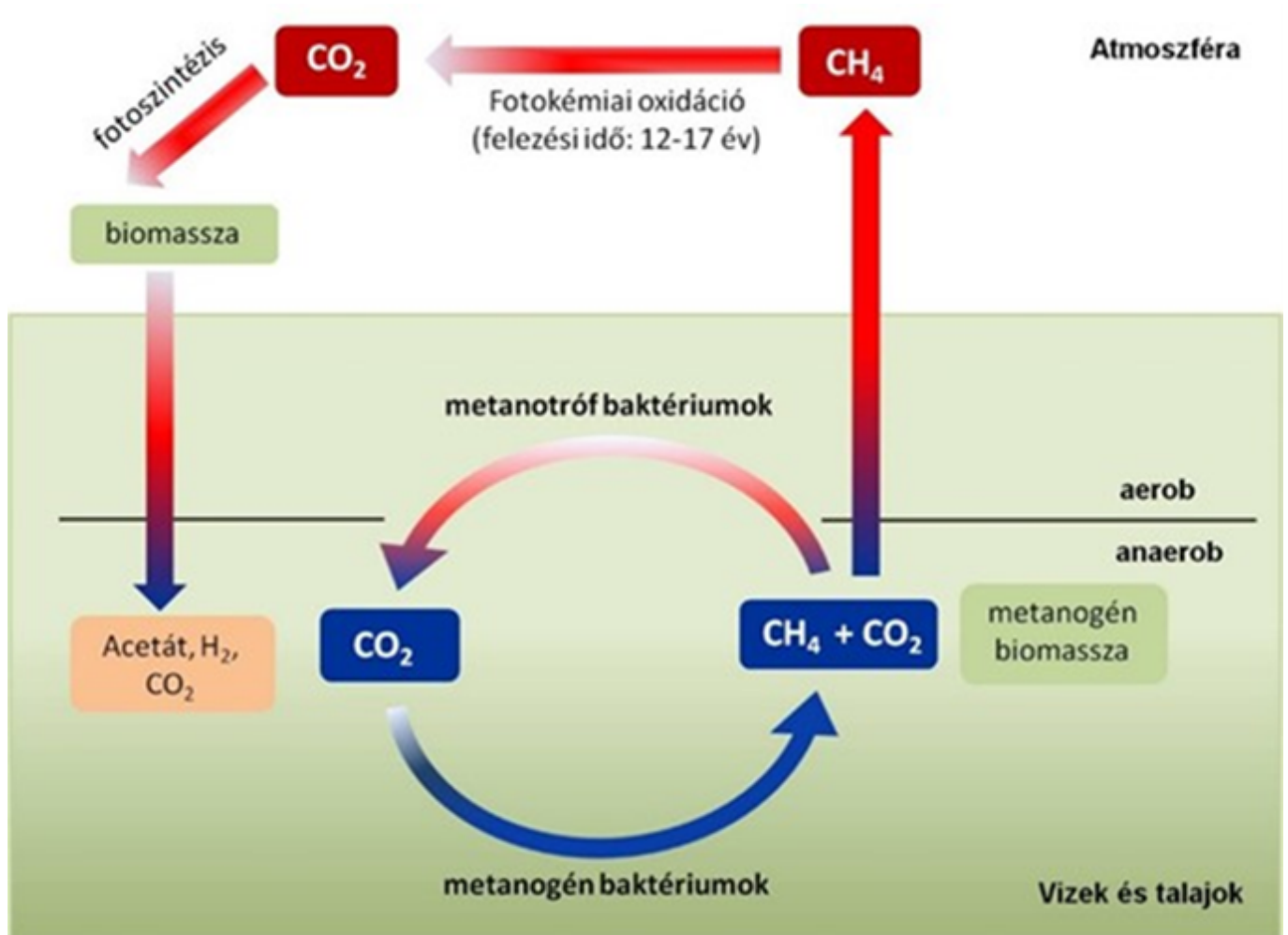
Rezervoár	Szén (Gt)	Földünk szén-készletének %-a
Óceánok	38×10^3 (>95% szervesetlen)	0,05
Kőzetek és üledékek	75×10^6 (>80% szervesetlen)	>99,5
Szárazföldi bioszféra	2×10^3	0,003
Vízi bioszféra	1-2	0,000002
Fosszilis tüzelőanyagok	$4,2 \times 10^3$	0,006
Metán hidrátok	10^4	0,014

A szén körforgalma a termelő szervezetek CO₂ fixációja, szerves anyag előállítása és a lebontó szervezetek szerves anyag fogyasztása, CO₂ kibocsátása köré szerveződik (25. ábra).



25. ábra. A szén körforgalma (Forrás: Márialigeti, K. (szerk.) 2013. Bevezetés a prokarióták világába.)

Az ábrán ugyan nem szerepel külön, de kiemelkedő szerepük van a ciklusban a metanogén és metilotróf/metanotróf szervezeteknek is, a metánciklus jelentős szereppel bír a Föld klimatikus szempontjából is (26. ábra). A metán biológiai körforgalmában a metanogén és metanotróf baktériumok vesznek részt: a metanogén baktériumok obligát anaerob környezetben metánt állítanak elő, míg a metanotróf szervezetek aerob körülmények között a metán oxidációját valósítják meg.



26. ábra. A metán ciklus (Forrás: Márialigeti, K. (szerk.) 2013. Bevezetés a prokarióták világába.)

Amikor a szerves anyag lebontása hiányos, lassú (pl. lápokban, bizonyos mélytengeri, anaerob körülmények hatására csapdázódik a szerves anyag) holt szerves anyag felhalmozódás indulhat meg és megfelelő körülmények esetén a szén a körforgalomból kivonódik, ezt a folyamatot hívjuk fosszilizációnak. A folyamatra, bármely végtermék is keletkezzen, jellemző, hogy a szerves anyag víztartalma csökken, a szén mennyisége feldúsul, az O₂, nitrogén és kéntartalom csökken, valamint mindig szerepet játszanak benne egyéb geokémiai folyamatok is (konjugált hó és rétegterhelés hatása) (Márialigeti szerk., 2013).

A NITROGÉN BIOGEOKÉMIAI CIKLUSA:

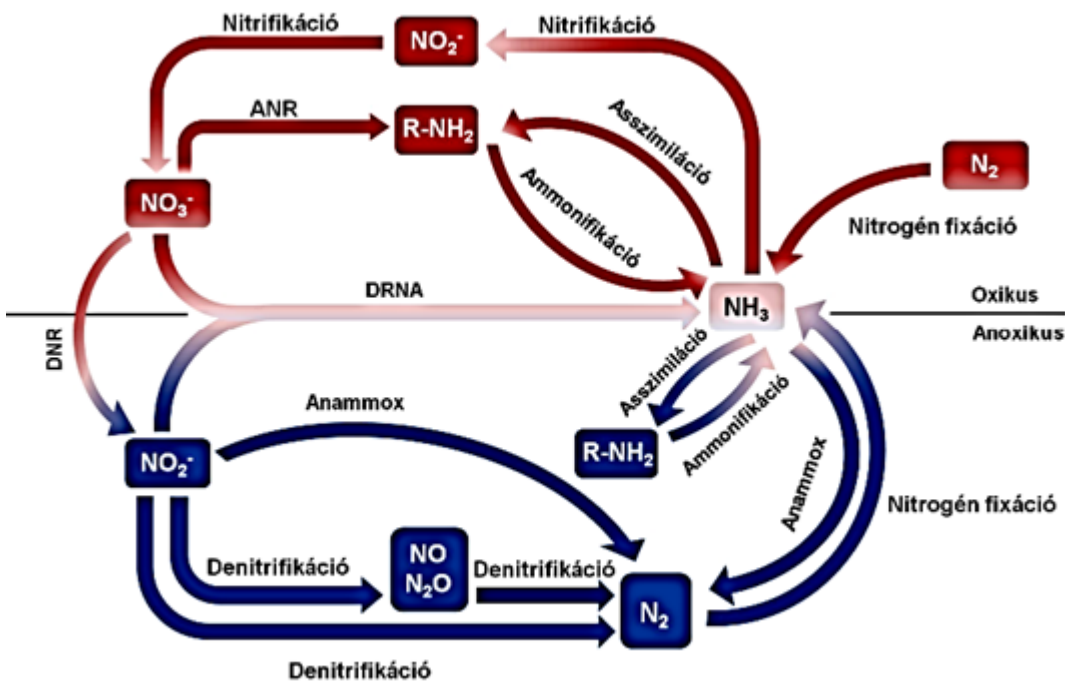
A nitrogén, mint biogén elem, szintén minden élő szervezet felépítésében részt vesz, pl. a nukleinsavakban, a fehérjékben és számos más biológiai szempontból fontos molekulában megtalálható. A nitrogén azonban korlátozó anyag számos ökoszisztémában. A nitrogén transzformációs reakciók egyedi és globális szinten is fontosak, földi előfordulásukat a 7. táblázat mutatja, az elemkörforgalomban résztvevő nitrogén legnagyobb része a légkör, a talaj és a talajvíz, továbbá a bioszféra között oszlik meg szerves és szervesetlen vegyületek formájában (Márialigeti

(szerk., 2013).

7. táblázat. A nitrogén előfordulása a Földön.

Rezervoár	Nitrogén (kg)	Formái
Litoszféra	$\sim 1,64 \times 10^{20}$ kg	magmás kőzetek, elsősorban ammónium gyökök; vulkáni gázok, üledékes kőzetek (salétrom, szalmiáksó)
Atmoszféra	$\sim 3,86 \times 10^{18}$ kg	elemi nitrogén
Hidroszféra	$\sim 2,3 \times 10^{16}$ kg	vízben oldott formában, szerves és szervetlen, nitrátok
Bioszféra	$\sim 2,8 \times 10^{14}$ kg	élőlények

A nitrogén körforgalom főbb lépései (27. ábra):



27. ábra. A nitrogén biogeokémiai ciklusa (Forrás: Márialigeti, K. (szerk.) 2013. Bevezetés a prokarióták világába.)

Biológiai nitrogén fixáció (BNF) – CSAK PROKARIÓTÁK ÁLTAL MEGVALÓSULÓ FOLYAMAT!

Szabadon és szimbiózisban élő szervezetek segítségével valósul meg, a növényi szimbiózisban élők között vannak gümőképzők és nem gümőképzők is. A folyamatban a légkori nitrogén (N_2) ammóniává (NH_3) alakul.

Asszimiláció: az ammónia formájában fixált nitrogén beépülése szerves anyagokba.

Ammonifikáció: ammónia felszabadulása a szerves vegyületekből.

Nitrifikáció: szerves nitrogénvegyületek (ammónia és nitrit) oxidálása aerob körülmények között végső soron nitráttá – szintén csak prokarióta szervezetek sajátja, kemolitotróf baktériumok végzik.

Disszimilatórikus nitrát redukció: nitrát redukciója történik ammóniáig, melynek során a nitrát először nitritté redukálódik, majd ezt követően a nitrit elektron felvételével történő redukciós lépésben ammóniává alakul. Valójában nitrát légzés történik – szintén kizárólag prokarióta szervezetek által.

Denitrifikáció: a disszimilatórikus nitrát redukció különleges formája, a légzésben a nitrát itt is végső elektronakceptoroként szerepel (anaerob légzés), de a folyamat végterméke légnemű halmazállapotú, általában molekuláris nitrogén gáz (N_2).

A KÉN BIOGEOKÉMIAI CIKLUSA:

A kén a földkéreg elemeinek gyakorisági sorrendjében a 14. helyet foglalja el, az élővilágban relatív mennyiségét tekintve sorrendben a 10. Tápelemként szulfhidril (-SH) csoportot tartalmazó aminosavak (cisztein, metionin), koenzimek (koenzim A, biotin), egyes vitaminok (B1 vitamin, H vitamin, liponsav) esszenciális komponense.

Előfordulása sokrétű:

Litoszféra: a földkéreg és földköpeny magmás kőzeteiben szulfidásványok formájában, üledékes kőzetekben az evaporitok (szulfátok), valamint a szénhidrogének és kőszenek a kén legfontosabb tárolói (átlagosan a barnakőszén 0,7%, átlagos feketekőszén 1% körüli ként tartalmaz), talajokban a kén kisebb mennyiségben szulfát (10-25%) és nagyobb mennyiségben szerves anyagokba beépülve fordul elő anaerob talajokban szulfidok, polisulfidok halmozódnak fel.

Atmoszféra: SO_2 , H_2S és illó szerves kénvegyületek, szulfátos aeroszolok.

Hidroszféra: főleg szulfát (SO_4^{2-}).

Bioszféra: szerves kénvegyületek formájában (fehérjék, vitaminok pl. B_1 vitamin, liponsav)

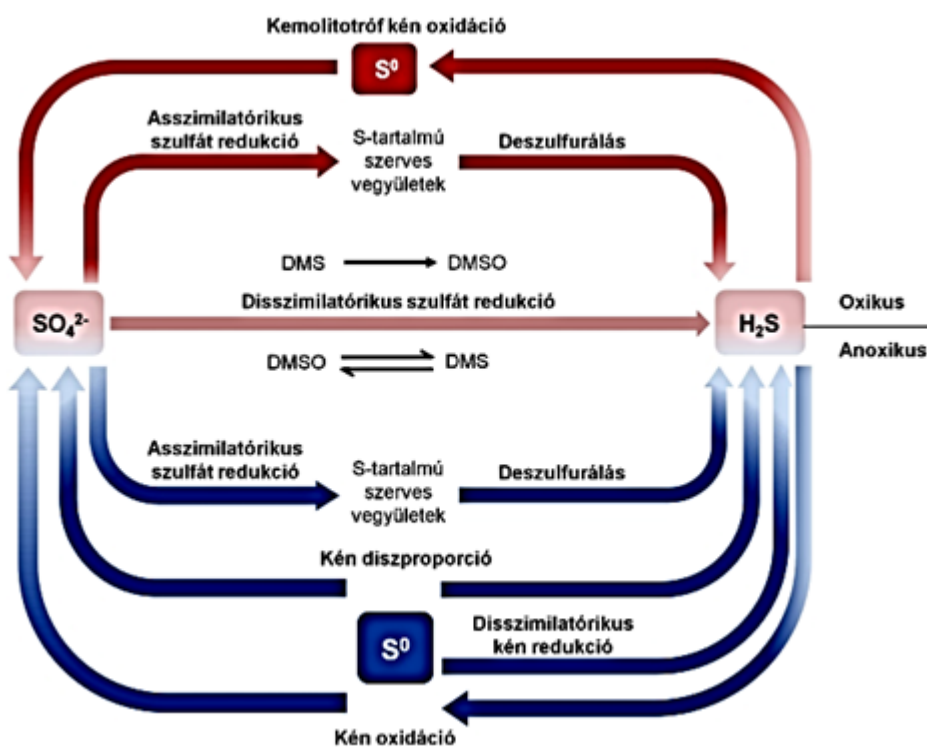
A kén biogeokémiai ciklusában az alábbi folyamatok zajlanak (28. ábra):

Szulfid és elemi kén oxidációja kemolitotróf és fotolitotróf prokarióták által (46-47-48. kép)

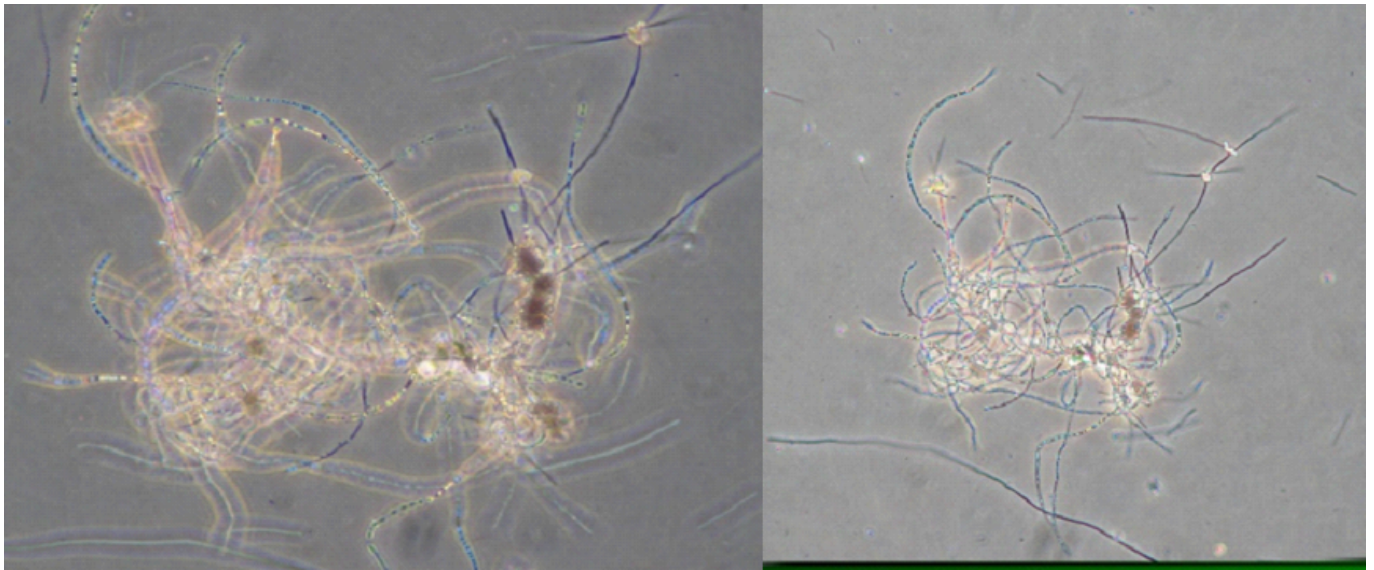
Disszimilatórikus szulfátredukció (szulfát légzés) anaerob szulfát légző baktériumok által

Asszimilatórikus szulfátredukció (szulfát redukálása és beépítése szerves anyagokba) növények és mikrobák által

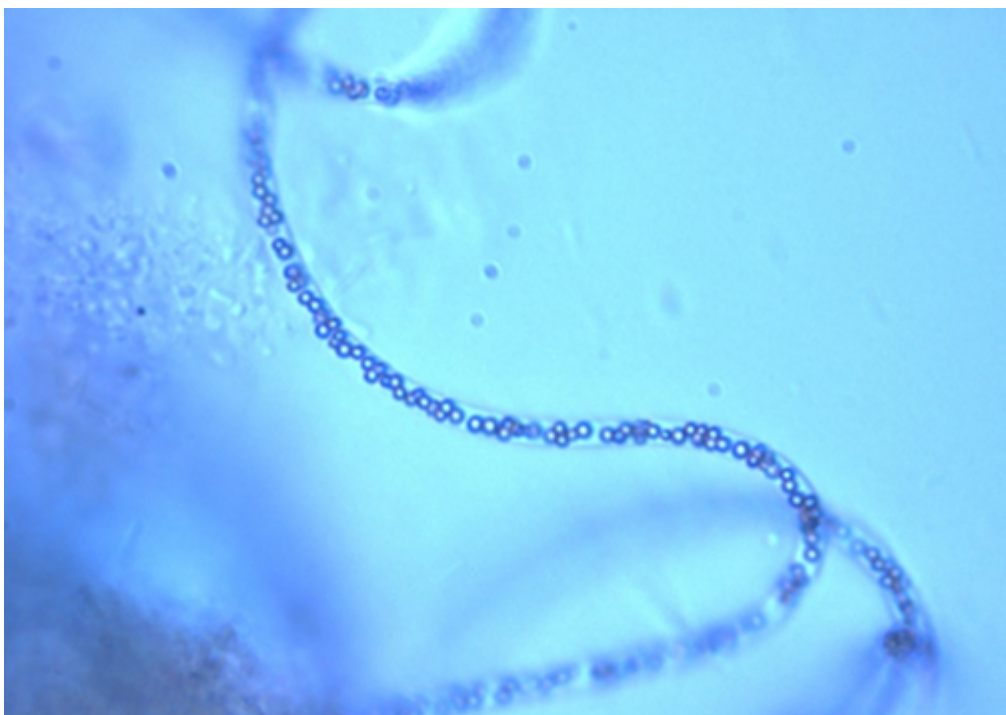
Deszulfurálás (szerves anyagokból kénhidrogén felszabadítása) mikrobák és állatok által.



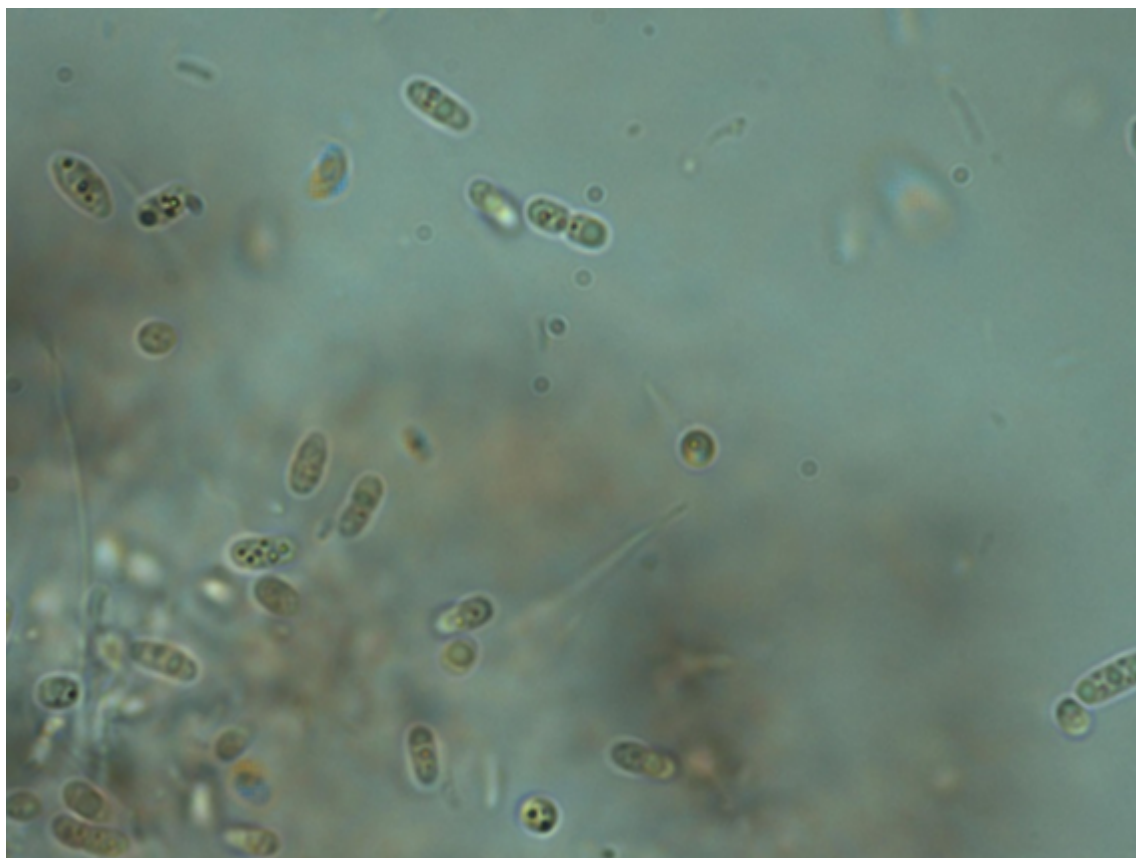
28. ábra. A kén biogeokémiai ciklusa (Forrás: Márialigeti, K. (szerk.) 2013. Bevezetés a prokarióták világába.)



46. kép. A harkányi termálvíz fonalas kénbaktériumai (*Thiotrix* spp., Fotó: Miseta Roland).



47. kép. Fonalas kénbaktériumok (*Beggiatoa* spp., fotó: Makk Judit).

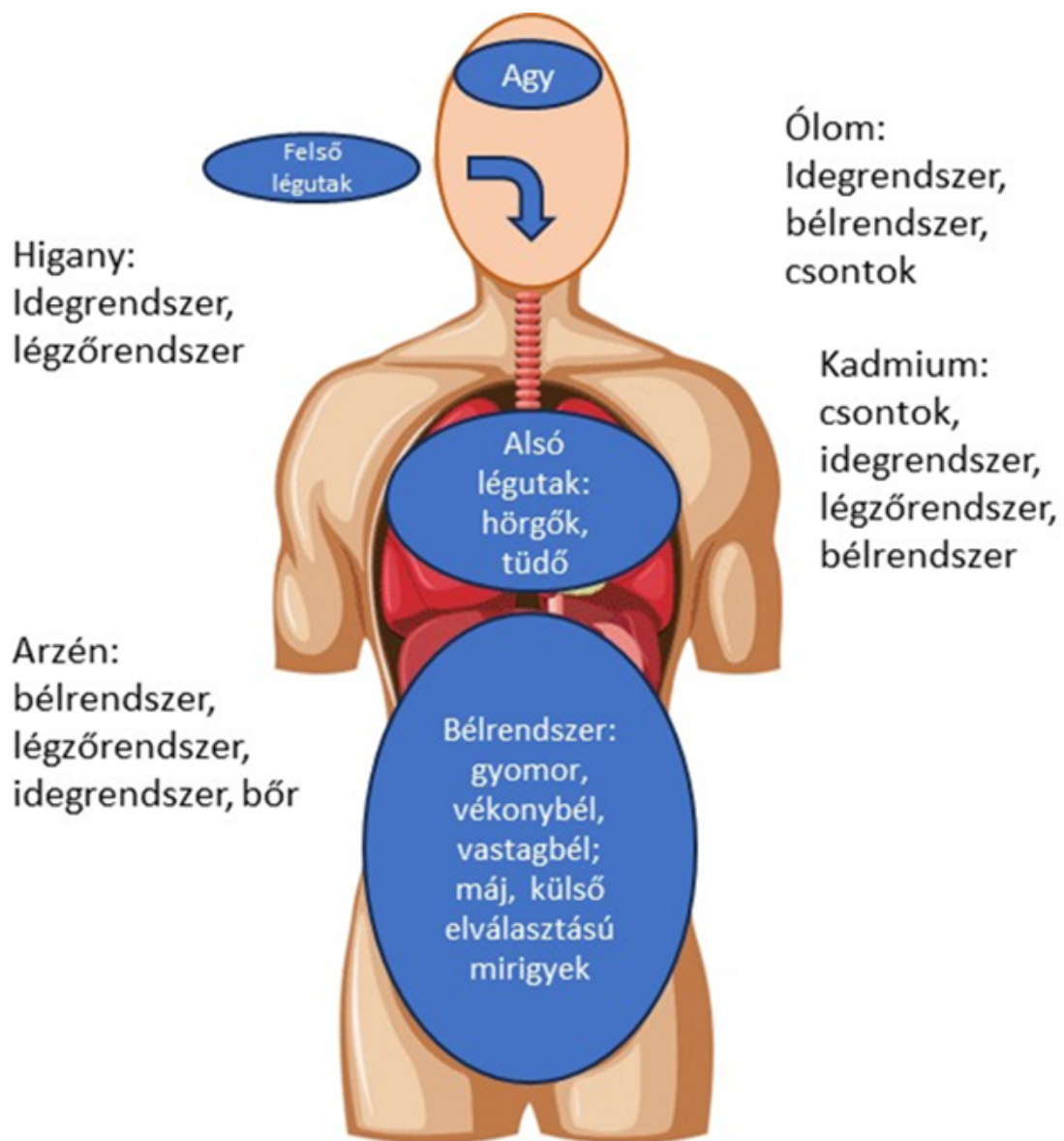


48. kép. Vízben található anaerob fényhasználó kénbaktériumok (*Chromatium* sejtek, Fotó: Makk Judit).

NEHÉZFÉMEK ÉS TOXIKUS ELEMELK A FÖLDÖN

65 fémes elemet ismerünk, diverz fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságokkal. Számos közülük alacsony koncentrációban esszenciális (pl. enzimek kofaktorai - Co^{2+} , Mn^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} stb.), magasabb koncentrációban már ezek is mérgezőek lehetnek. Sok közülük azonban nagyon toxikus, és nem is szükségesek az életműködésekhez pl. As^{3+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} . Természetes környezetekben ezen elemek koncentrációja általában alacsony, azonban koncentrációjuk emelkedése bizonyos helyeken és esetekben kritikussá válhat. A szennyező források változatosak, természetes vagy mesterséges eredetűek egyaránt lehetnek, pl. vulkánok, talajerózió, fosszilis tüzelőanyagok égetése, ércbányászat és feldolgozás, nukleáris és ipari szennyvíziszap, biocidok és lepárló üzemek, egyéb ipari aktivitások. Ezen anyagok potenciális kockázatot jelentenek, akut/krónikus mérgezés formájában (29. ábra).

Határértékek EU szabályozás alá esnek, Magyarországon a 6/2009(IV.14) KvVM-EüM-FVM rendelet írja elő megengedett határértékeiket.



29. ábra. Bizonyos nehézfémek és toxikus elemek gyakori mérgező hatásai az emberre.

A Földön ezen toxikus elemeknek is létezik körforgása, melyben a mikroorganizmusok széles körű adaptációs és transzformációs lehetőségeikkel szintén jelentős szerepet játszanak.

További ajánlott irodalom:

Márialigeti, K. (szerk.) 2013. Bevezetés a prokarióták világába