

HARTAI ÉVA,

# GEOLÓGIA

11



A Műszaki Földtudományi Alapszak tananyagainak kifejlesztése a  
TÁMOP 4.1.2-08/1/A-2009-0033 pályázat keretében valósult meg.

## XI. A FÖLD ÉS AZ ÉLET FEJLŐDÉSÉNEK FONTOSABB ESEMÉNYEI – PREKAMBRÍUM

### 1. PREKAMBRÍUM

A prekambrium rendkívül hosszú időtartamot, a Föld történetének 7/8-ad részét öleli fel, a Föld kialakulásától a szilárd vázú élőlények megjelenéséig tart. A prekambriumi sorozatokban az üledékes kőzetek mennyisége alárendelt, mert nagy részük a kőzetek körforgása során metamorf vagy magmás kőzetekké alakult. Ezeknek a kristályos kőzeteknek az elterjedtsége jó lehetőséget nyújt a radiometrikus kormeghatározásra, és így a kronológiai beosztásra. Őslénytani alapon viszont a prekambriumot nem tudjuk részletesen tagolni, mivel a szilárd váz hiánya miatt a fossziliák nagyon ritkák. A prekambriumot két eonra (nagy időegységre) osztjuk: **archaikum** és **proterozoikum**.

### 2. ARCHAIKUM

A Föld kialakulása, kezdeti fejlődése, övezetes tagolódása és a földkéreg létrejötte a földtörténet első négyszázmillió évében zajlott le, tehát a szilícium-dús kéreg elkülönülése és a szilárd burok kialakulása körülbelül 4,3 milliárd évvel ezelőttre tehető, amit a legidősebb kőzetleletek is alátámasztanak.

A Föld változásaiban, dinamikus folyamataiban fontos szerepet játszó Hold befogását és Föld körüli pályára állását a holdkőzetek, valamint a földi árapályövbéli üledékes kőzetek kora alapján 3,6 milliárd évvel ezelőttre valószínűsítik.

#### A lemeztektonika kezdetei

A körülbelül 4,3 milliárd évvel ezelőtt kialakult litoszféra valószínűleg nagymértékben különbözött a mai litoszférától. Vékony, kezdetben képlékeny burok lehetett, amelyet sok helyen áttört a köpenyből feláramló olvadékok.



*Ősföldrajzi kép az archaikumi földfelszínről [1]*

Mivel a köpeny a mainál jóval magasabb hőmérsékletű és kevésbé viszkózus volt, a konvekciós áramok gyorsabbak, és a konvekciós cellák kisebb méretűek lehettek. Ebből az következik, hogy a litoszféra-darabok is kisebbek voltak

(becslések szerint maximum 400-500 km kiterjedésűek), és gyorsabban áldozatául estek a lemeztektonikai körforgásnak.

Az archaikumi lemeztektonika értelmezésében a vélemények eltérők. Vannak szerzők, akik kétségbe vonják, hogy az archaikumban lemeztektonika létezett. Ha mégis, valószínű, hogy a mainál melegebb és lágyabb litoszféra kezdetben nem riftesedett, hanem a konvekciós feláramlási zónáknál elvékonyodott, átolvadt, és a szétsodródó lemezek közti helyet a feláramló láva gyarapította.

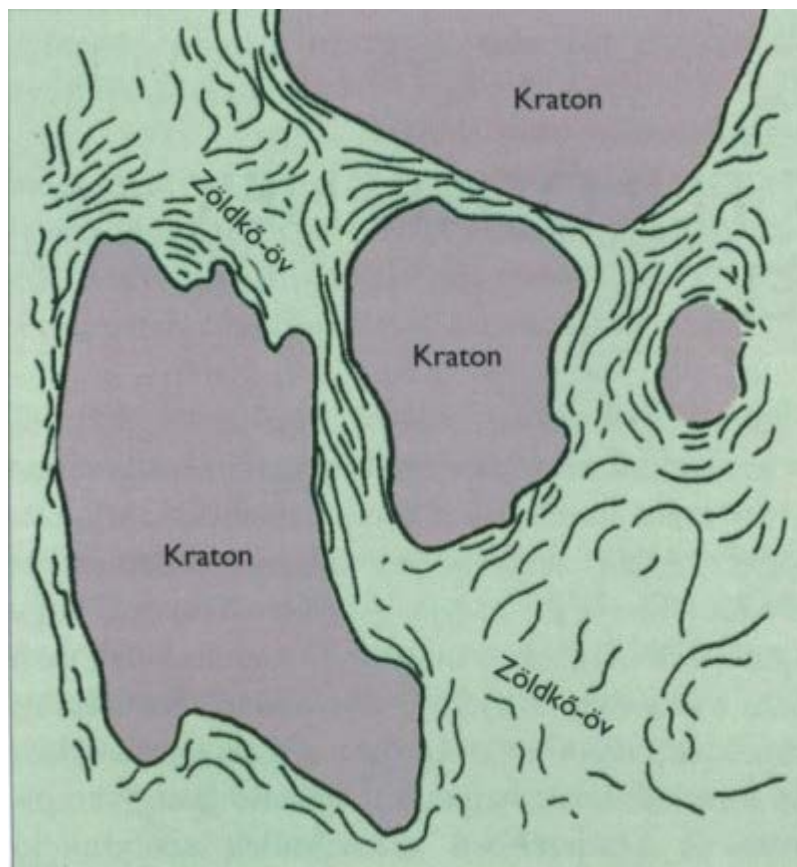
A kezdetekben valószínűleg szubdukció sem volt, mivel az egymás felé mozgó, kisméretű, meleg litoszféra lemezek csak egymáshoz torlódtak és meggyűrődtek. A litoszféra merevebbé válásával szubdukció létrejöhetett. Hogy ez már 3,8-3,6 milliárd évvel ezelőtt bekövetkezhetett, azt valószínűsítik a legidősebb *gránit-gneisz formációk* és *zöldkő formációk* (lásd később), melyek konzumációs lemezszegélyeknél alakulhattak ki.

Az archaikum kezdetén a kontinensek területe jóval kisebb lehetett, mint az archaikum végén, mert a korai kollíziós folyamatok gyarapították a szárazföldek területét.

## Archaikumi kőzetek

Az archaikumi kőzetek a Föld **pajzsterületein** (más néven **kratonjain**) találhatóak. Ezek a nagy kiterjedésű, lepusztult területek minden kontinensen megtalálhatók, azok legősibb magjait alkotják. A pajzsok az archaikumi és proterozoikumi hegységképződések során, számos kollíziós esemény következtében épültek és gyarapodtak, azóta folyamatosan pusztulnak. Régebben az archaikumi pajzsterületeket jóval nagyobbak gondolták, mint napjainkban. Az utóbbi évtizedek nagy számú radiometrikus mérési adata azonban bebizonyította, hogy sok, korábban archaikuminak vélt kőzet valójában a proterozoikum során keletkezett. A fanerozoikumi orogenezisek a pajzsok szegélyeihez újabb és újabb hegyláncokat építve növelték a kontinensek területét.

Az archaikumi kőzetek közül három fő kőzetcsoport emelhető ki: gránit-gneisz formációk, sávos vasérc formációk és a zöldkő formációk.



### Archaikumi kőzettípusok megjelenése

A gránit-gneisz kratonokat körülvevő, erősen gyűrűt zöldkő-övek metamorfizált bazaltból és üledékes kőzetekből állnak. A terület szélessége kb. 100 km, ami az őskontinenseknek a maiaknál sokkal kisebb voltát jelzi.

## Gránit-gneisz formációk

Az archaikumi területek legelterjedtebb kőzete a jellegzetesen világosszürke, durvakristályos **gneisz**. Többnyire erős metamorf foliáció jellemzi, és migmatitosodással keletkezett **gránit**erek és -testek harántolják. Kémiai összetétele az andezitéhez hasonló. Az eredeti kőzetanyag lehetett a Föld korai övezetes differenciációja révén kialakult külső, szilíciumban gazdag kéreg kőzettömege, vagy az ősi bazaltos magmák differenciációja révén létrejött andezit. A metamorf gneisztömegek keletkezése kiterjedt kollíziós zónákhoz köthető.

### **Zöldkő formációk**

A **zöldkő formációk** gránit-gneisz formációkba ágyazott, erősen gyúrt kőzettömegek, amelyek sötét színű vulkanitokból, kis- és közepes metamorf fokozatú kőzetekből, valamint tengeri üledékes kőzetekből állnak. A metamorf kőzeteket főleg szerpentinit és amfibolit képviselik (*zöldpala metamorfózis*), amelyeknek zöld színe miatt kapta elnevezését a kőzetsorozat. A vulkanitok bazalt és ultrabázisos kőzetek, valamint gyakori a **komatiit**, egy magnéziumban gazdag (30 % MgO) ultrabázisos vulkanit, ami kizárólag az archaikumban keletkezett. Feltételezik, hogy ezt több száz kilométeres mélységben, a köpenyben lejátszódó olvadási folyamatok hozták létre.

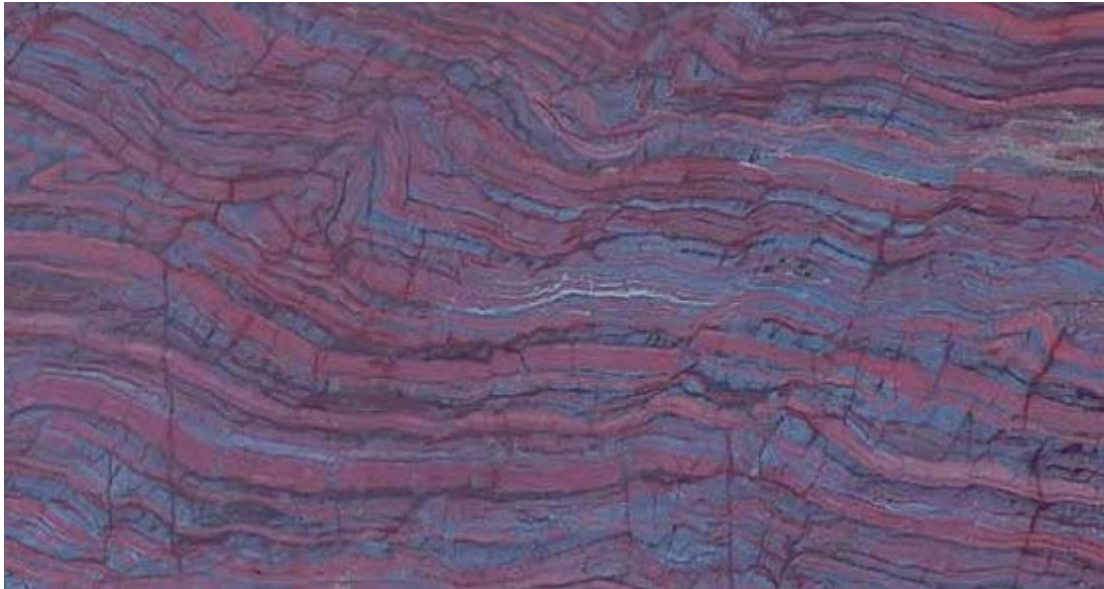
Az üledékes kőzeteket sötétszürke homokkővek (**grauwacke**) és agyagpalák képviselik.



*Archaikum komatiit, Dél-Afrika [ii]*

### **Sávós vasérc formációk**

A **sávós vasérc** formációk az archaikum és kora proterozoikum elterjedt kőzetei. A 3,8-1,6 milliárd évvel ezelőtti időszakban keletkeztek, fiatalabb üledékes sorozatokban nem találjuk meg őket. A kőzetsorozatok összetevői Fe-oxid, -szilikát, -karbonát ásványok és a SiO<sub>2</sub> különböző finomkristályos változatai, tehát vastartalmú és kovarétegek sűrű váltakozásából áll. Képződését az élet megjelenésével, vagyis a fotoszintézist végző *kékmoszatok* oxigént termelő tevékenységével hozzák kapcsolatba.

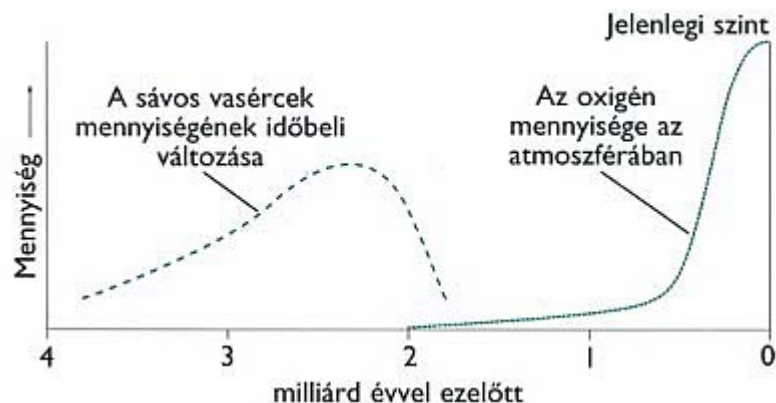


### Sávos vasérc [iii]

A sötét sávok hematitből állnak, a vörös sávok jaspertből (vörös színű kovakőzet). Képszélesség 30 cm.

A kora-archaikumban a tengeralatti vulkanizmus és a szárazföldi mállás vízben oldódó, két vegyértékű vasat juttatott a tengervízbe, ami oxigénmentes környezetben folyamatosan dúsulhatott. Oxigénnel reakcióba lépve ugyanis a két vegyértékű vas három vegyértékűvé válik, ami a vízben oldhatatlan, tehát kicsapódik. Ez a folyamat csak a kékoszlatok megjelenése után, körülbelül 3,8 milliárd évvel ezelőtt kezdődhetett el, mivel ezek voltak az első fotoszintézist végző és oxigént termelő szervezetek, megjelenésük előtt sem a vízben, sem a levegőben nem volt szabad oxigén.

Az addig a tengerekben felhalmozódott hatalmas mennyiségű  $\text{Fe}^{2+}$  ion körülbelül 2 milliárd éven át teljesen elfogyasztotta a kékbaktériumok által termelt, tengervízben oldott oxigént. Az így három vegyértékűvé vált vas kicsapódásával jöttek létre a Föld legjelentősebb vasérctelepei. Csak az egyensúly beállta után vált lehetővé, hogy az oxigén az atmoszférába is jelentősebb mennyiségben kijusson. Ez egybeesik azzal az időponttal, amikor az első szárazföldi, vörös, törmelékeny kőzetek keletkeztek. Ettől kezdve, vagyis 1,6 milliárd év óta sávos vasérc nem alakult ki.



A sávos vasérc képződés és az atmoszféra oxigéntartalmának változása a földtörténet során

## Az atmoszféra és hidroszféra kialakulása

### A kora-archaikumi atmoszféra

A Föld legősibb atmoszférája valószínűleg a szoláris nebulából származó hidrogénből és nemesgázokból állhatott, amelyek valamilyen folyamat révén a földi vonzáskörből elszöktek. Ez azonban még a planetáris akkréció korai szakaszában, kisebb földméretnél következhetett be. A jelenlegi földtömeg gravitációjával számolva kizártnak tartják a hidrogén és a nemesgázok elszökését.

Körülbelül 4 milliárd évvel ezelőtt, a vulkanizmusnak köszönhetően kezdett el kialakulni a másodlagos földi légkör. Összetételére a jelenlegi vulkáni gázok vizsgálata alapján következtethetünk. Eszerint a kora-archaikumi légkör körülbelül 80 % *vízgőzből* és 10-17 % *szén-dioxidból* állt, ezen kívül SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, kevesebb CO, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub> és Ar vettek részt a felépítésében. A szabad, molekuláris oxigén teljesen hiányzott. Az oxigén a földi élet kialakulásával, az első, fotoszintézist végző kékmoszatok megjelenésével, körülbelül 3,8 milliárd évvel ezelőtt kezdett képződni és felhalmozódni, először csak a tengerekben, majd az atmoszférában is. Becslések szerint az archaikumban az atmoszféra a jelenlegi oxigénmennyiségnek legfeljebb néhány század %-át tartalmazhatta.

Előforduló vegyületek és elemek	A Föld a prekambriumban	A Föld ma	A Vénusz ma	A Mars ma
Vízgőz (H <sub>2</sub> O)	80%	0-4%	0,1%	0,03%
Szén-dioxid (CO <sub>2</sub> )	17%	0,03%	93-98%	95,3%
Oxigén (O <sub>2</sub> )	-	21%	nyomokban	0,13%
Nitrogén (N <sub>2</sub> )	0,2%	78,1%	2-5%	2,7%
Sósav (HCl)	1,7%	-	?	?
Argon	nyomokban	0,93%	nyomokban	0,6%

**A feltételezett archaikumi és a mai légkör összetételének adatai**

*Tájékoztatásul a Föld két szomszédos bolygója, a Vénusz és a Mars légkörének jelenlegi összetétele is fel van tüntetve.*

### A hidroszféra eredete

A földi víz eredetére vonatkozóan elfogadott a kozmikus eredet, azaz hogy azokból a 15-20 % H<sub>2</sub>O-t tartalmazó, szilikátos **kondrit-meteoritokból** származik, amelyek a Föld felépítéséhez a planetáris akkréció során hozzájárultak. A planetáris akkréció lelassulásával és a Föld megolvadásával a kondritok vize az olvadékba került, majd vulkáni működéssel vízgőzként az akkori légkör összetevőjévé vált.



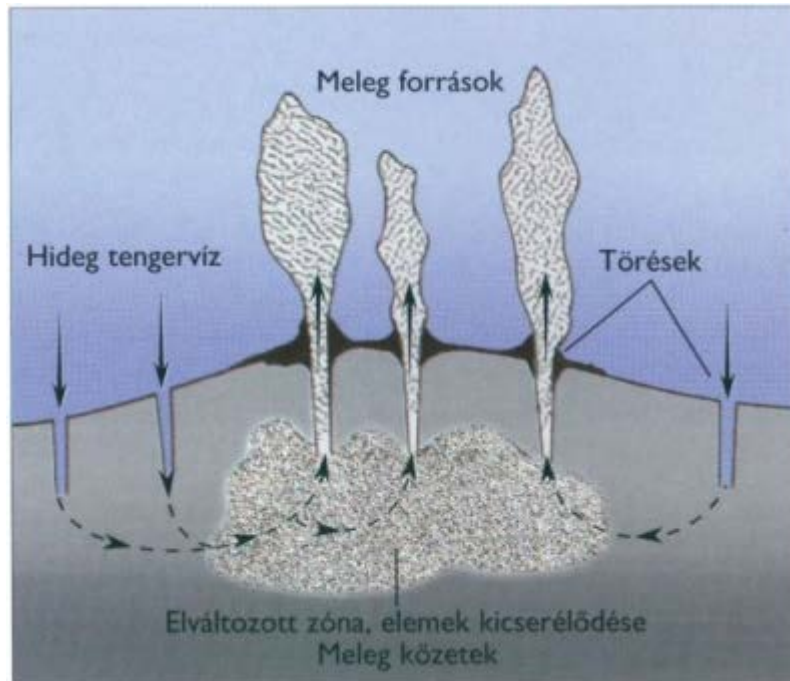
**5,7 kg-os, Marokkóban talált kondrit meteorit [iv]**

A Föld fokozatos hűlésével feltételezhetően már 4 milliárd évvel ezelőtt 100°C alá csökkent a felszíni hőmérséklet, így lehetővé vált a *víz kondenzációja*, létrejöttek az óceánok. A víz valószínűleg nem borította be a teljes földfelszínt, mert az ősi, kisebb litoszféra lemezek ütközése révén felgyűrt tömegek kiemelkedéseket képezhettek. Ezek az ősi tengerek kezdetben nem tartalmaztak sókat, viszont az őslégkör gázainak oldása miatt a jelenleginél jóval savasabb kémhatásúak lehettek.

A kutatók egyetértenek abban, hogy a tengervíz *sótartalma a szárazföldről* szállítódik a tengerbe. Számítások szerint a jelenlegi óceáni tömegeket és a szárazföldről beszállított sók mennyiségét figyelembe véve 80 millió év lenne szükséges ahhoz, hogy édesvízből kiindulva az óceánok a jelenlegi sókoncentrációt elérjék. Az archaikumban azonban a szárazföldi területek a mainál jóval kisebbek lehettek, ezért feltételezések szerint az óceánok csak

körülbelül 2 milliárd évvel ezelőtt érhatték el jelenlegi sótartalmukat.

Felmerülhet a kérdés, hogy miért nem növekszik folyamatosan az óceáni sótartalom. Erre vonatkozóan eltérő elképzelések születtek. A sótartalom egy része az evaporittelepek képződése során kiválik. Nagy valószínűséggel a sótartalom szabályozásában eddig nem ismert biológiai mechanizmusok is szerepet játszanak. Az utóbbi évtizedek mélytengeri kutatásai arra is rámutattak, hogy az óceánfenéken lévő, szétnyíló lemezszegélyeknél található meleg források is vonnak el nátrium-kloridot a tengervízből. Az 1977-ben felfedezett "**black smoker**"-nek (fekete füstölő) is nevezett forró, 350°C-os források környezetében kéményszerű struktúrák épülnek fel, melyek uralkodóan anhidritből ( $\text{CaSO}_4$ ) állnak, de felépítésükben NaCl, Mn- és Fe-oxidok, -hidroxidok, valamint Cu- és Zn-szulfidásványok is részt vesznek, amelyek a feláramló gőzt feketére festik. A fekete füstölők az élet kialakulásában is szerepet játszhattak.



#### "Black smoker" keletkezése

A tengervíz beszívárog a tengeralfjatot alkotó bazaltba. A mélyben lévő magma a vizet felmelegíti, ami felfelé kezd áramlani. A forró víz felfelé áramlása közben a kőzetet oldja, de bizonyos alkotók, így a Na+ és Cl- egy része is kiválik belőle. A tengervízzel érintkezve a kicsapódó anyag fénoxidokat és -szulfidokat is tartalmazó anhidrit-kéményeket épít

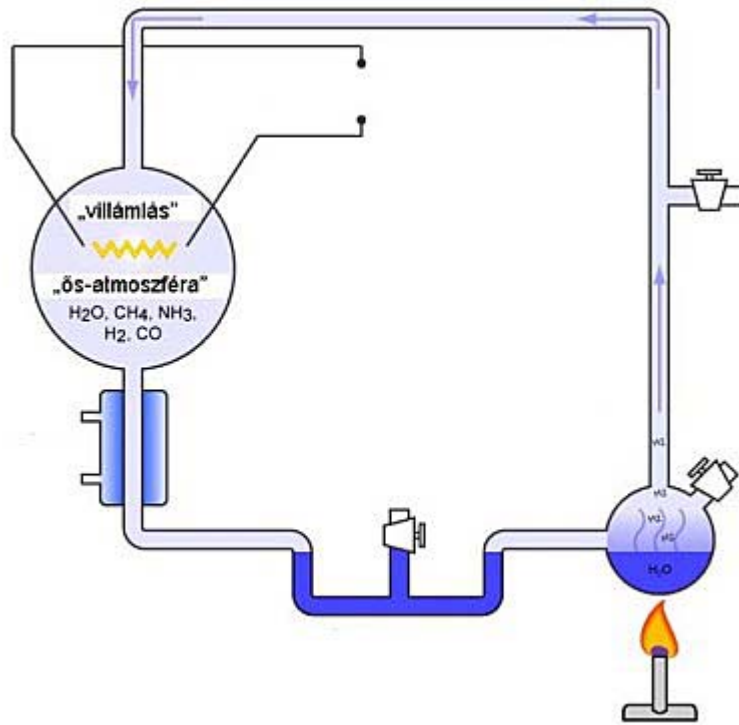
## A bioszféra megjelenése

Amikor a bioszféra kialakulására, vagyis a földi élet keletkezésére szeretnénk választ kapni, először is azt kell tisztáznunk: mi az élet, mikor tekinthetjük az anyagot élőnek?

Az élő szervezeteknek négy alapvető tulajdonsága van: *anyagcsere*, *növekedés*, *szaporodás* és *fejlődés*. Fejlődés alatt az evolúciót értjük, vagyis azt, hogy generációról generációra, lassú változással, az alacsonyabb rendű szervezetekből magasabb rendűek alakulnak ki. Az élő anyag kémiai építőkövei a *szén*, *hidrogén*, *nitrogén* és *oxigén*, melyek szerves molekulákat alkotnak. Bár szerves anyagokat meteoritokból is kimutattak, valószínű, hogy az élet nem "földön kívüli" eredetű, hanem az élethez szükséges szerves molekulák földi körülmények között jöttek létre.

A legidősebb fossziliák 3,8 milliárd évvel ezelőtti **baktériumok**. Arról, hogy ezek hogyan alakultak ki, melyek voltak megjelenésük előzményei, nincsenek kőzetbe zárt információink. Így a földi élet kialakulására csak elméleteink lehetnek.

Az ötvenes évektől kezdve több laboratóriumi kísérlet zajlott az élet keletkezésének kutatására. Először a földi ősléggkört modellezték, vízgőzből, hidrogénből, ammóniából és metánból. A gázkeverékben – a villámlások hatását vizsgálva – elektromos kisüléseket hoztak létre. Ennek hatására kémiai reakcióval különböző szerves vegyületek, köztük aminosavak – a fehérjék építőkövei – jöttek létre. A keletkezett vegyületek a lecsapódó vízben gyűltek össze (annak idején az esővízzel az óceánokba kerülhettek).



#### A Miller-Urey kísérlet [v]

A földi őslégkör és ósóceán modellezésével eljutottak a sejtyszerű mikroszférák előállításáig.

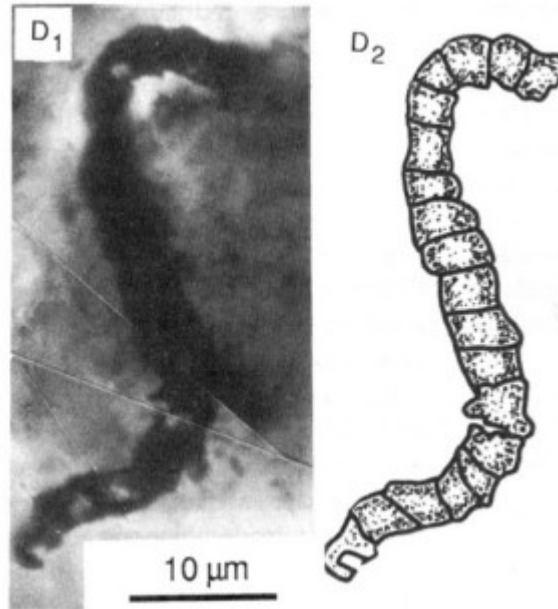
A laboratóriumi kísérletek azt is kimutatták, hogy az aminosavak bizonyos feltételek mellett fehérjékké rendeződtek. Meglepődve tapasztalták, hogy ezek az elő-fehérjék lehűlő vizes oldatokban sejtyszerű, burokkal ("sejtfallal") rendelkező **mikroszférákká** szerveződtek. Ebben a folyamatban az *agyagásványok* jelenlétének katalizáló hatása volt. Ennél a pontnál azonban a modellezés megállt. A genetikai kódok elsajátítását, a DNS és RNS láncok létrejöttét nem sikerült kísérletileg alátámasztani.

Újabb annak a lehetőségét is felvetették, hogy a kémiai evolúció nem az őslégkörben, hanem a tenger alatti meleg források környezetében ment végbe. Szén-dioxid, ammónia és kénhidrogén-feláramlás ugyanis ezeken a helyeken is van, így bonyolult szerves molekulák kialakulhatnak. Az így létrejött első élőlényeket ebben a környezetben nem fenyegette az ibolyántúli sugárzás, viszont magas hőmérsékletet kellett elviselniük. Az ilyen környezetben lehetséges életet bizonyítja, hogy a mai "**black-smokerek**" környezetében olyan autotróf baktériumokat figyeltek meg, melyek energiájukat inorganikus úton, a kénhidrogén oxidációjával nyerik.

#### Az archaikumi fossziliák

Az első fossziliák a **prokarióták (sejtmagnélküliek)** csoportjába tartozó egysejtűek. A prokarióták sem növényekhez, sem állatokhoz nem sorolhatók, ugyanis minden más földi élőlénytől különböznek abban, hogy nem rendelkeznek körülhatárolt sejtmaggal. A prokariótákhoz két élőlénycsoport tartozik, a **baktériumok** és a **kékoszatok**. A kékoszatokat újabban – és helyesebben – **kékbaktériumoknak** is nevezik, hiszen nem rokonai a sejtmagos moszatoknak (más néven algáknak). A kékoszat elnevezés a szálas, algaszerű megjelenésre utal. A két törzs képviselői őslénytani leletek alapján 3,8 milliárd évvel ezelőtt jelentek meg, és napjainkig fennmaradtak. Az első fosszilis baktériumok a 3,8 milliárd éves grönlandi *Isua-közetsorozat* kovapaláiból kerültek elő. Ezek azonban rossz megtartásúak, így fosszília-mivoltukat néhányan kétségbe vonják. Több kora-archaikumi baktériumot találtak Dél-Afrikában és Nyugat-Ausztráliában is, főleg tűzkősorozatokban.





*Láncszerűen kapcsolódó egyedekből álló kékbaktérium telep, a grönlandi Isua kőzetsorozatból származó egyik legidősebb fosszília [vi]*

*A jobboldali rekonstrukciós rajz a baloldali lelet jobb megértését teszi lehetővé.*

A baktériumok között vannak – és valószínűleg voltak – autotróf és heterotróf csoportok. A heterotróf táplálkozásuk a tengervízben lévő szerves molekulákat fogyaszthatják. A kékoszatok autotróf élőlények, tehát testük felépítéséhez fényenergiát használnak, vagyis *fotoszintézist* folytatnak. A folyamat során *oxigén* szabadul fel, aminek az archaikumban óriási jelentősége volt az élővilág további fejlődése szempontjából.

A kékoszatok közreműködésével jöttek létre a **sztramatolitos** mészkövek, vagyis a koncentrikus héjából álló, gumós szerkezetű kőzetek. A legidősebb sztramatolitos mészkövek 3,5 milliárd évesek. Képződésükkor a kalcium-karbonát a kékalgák fotoszintézise, vagyis széndioxid-elvonása miatt a finom algaszálakra csapódik ki. A mésszel bekérgezett kékoszatok elhalnak, majd a mészkérget újabb "alga"-szőnyeg vonja be. A folyamat ismétlődésével akár méteres átmérőjű, héjas felépítésű tömbök jöhetnek létre. Sztramatolitok napjainkban is képződnek, de sokkal alárendeltebben, mint a földtörténet korai időszakában.



### **Sztromatolitos mészkő [vii]**

*A mállott felszínen jól láthatók a szakaszos mészkiválást jelző koncentrikus héjak.*

A legkorábbi fossziliák közé számítanak a dél-afrikai, 3,4 milliárd éves, *Ramsey-gömböknek* nevezett, 0,5-5 mm méretű maradványok is, amelyeknek osztódásos szaporodási folyamatának nyomait is megőrizte a kovaanyagú üledékes kőzet. Az ugyancsak dél-afrikai *Fig-Tree sorozatban* gömb, pálcika és fonál alakú, algaszerű maradványokat találtak.

## **3. PROTEROZOIKUM**

A proterozoikum alsó határát 2,5 milliárd évvel ezelőtt húzzák meg, a maihoz hasonló, merev, rideg litoszféra kialakulásának alapján. A felső határ 570 millió évvel ezelőtt jelölhető ki, ezt az **ediacarai fauna** kihalása, illetve az élőlények szilárd vázának megjelenése jelzi.

A közel kétmilliárd évig tartó proterozoikum folyamán az "ősi" Föld "modern" Földdé alakult, azaz a valószínűsíthetően a jelenleginél képlékenyebb tektonikai rendszerekkel, redukáló atmoszférával és savas tengerekkel jellemezhető állapotból olyan állapotba fejlődött, amit egyértelműen rideg litoszféra, maihoz közelálló oxigéntartalmú atmoszféra és a jelen óceánokhoz hasonló összetételű hidroszféra jelez.

### **A proterozoikumi lemezmozgások és hegységképződés**

#### **A jelentősebb orogenezisek**

A proterozoikumban több alkalommal, több helyen játszódtak le hegységképződési események. Ilyen szempontból a legjelentősebb periódusnak a *2-1,9 milliárd évvel ezelőtti* időszak tekinthető, melynek során nagy tömegű új kontinentális kéreg képződött a megelőzőleg, vagyis 2,5-2 milliárd évvel ezelőtt kialakult kőzetekből. Ez a folyamat az archaikumi pajzsterületek szegélyeit gyarapította, olyan módon, hogy sok helyen az átmenetek nehezen felismerhetők, ezért korábban az ekkor képződött kőzeteket is az archaikumi pajzsokhoz sorolták. A másik jelentős időszak *1,3-1,1 milliárd évvel ezelőtt* volt, melynek során erős kompressziós orogenezisek zajlottak. Ezeknek az orogeneziseknek a nevezéktana nagyon bonyolult, a különböző kontinenseken eltérő neveket használnak ugyanazokra a fázisokra, ezért az elnevezésekre nem térünk ki.

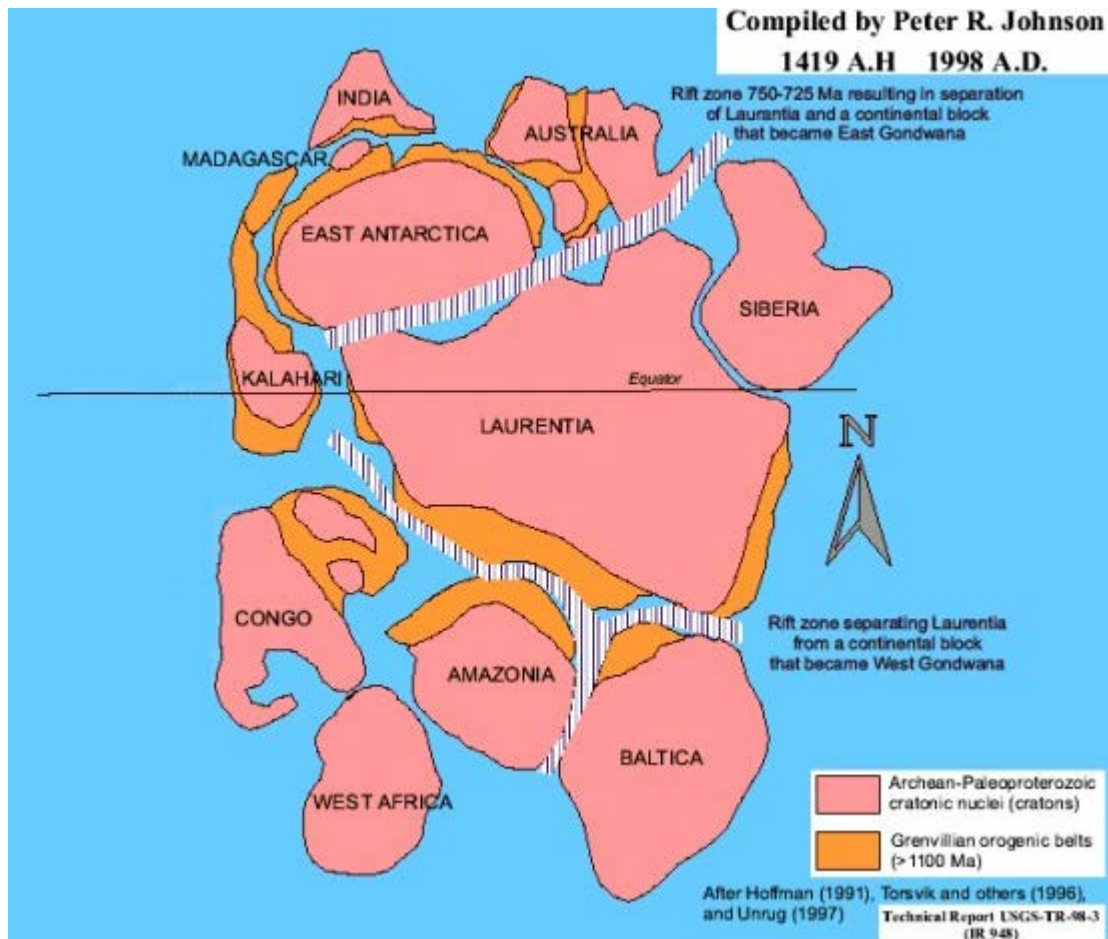
#### **A kontinensek helyzetének változása**

A kollíziós folyamatok eredményeként a proterozoikumban négy "szuperkontinens" alakult ki: (1) a mai Észak-Amerika, Grönland, Észak-Skócia, a Baltikum és Oroszország nyugati része, (2) India, Ausztrália, Antarktis és Madagaszkár, (3) Dél-Amerika, Afrika és Arábia, (4) Kelet-Ázsia, beleértve a szibériai és kínai pajzsterületeket is. Az összeforrások helyei, a proterozoikumi hegláncok, mára már szinte teljesen lepusztult területek.



*Erősen lepusztult felszínű proterozoikumi területek Finnországban*

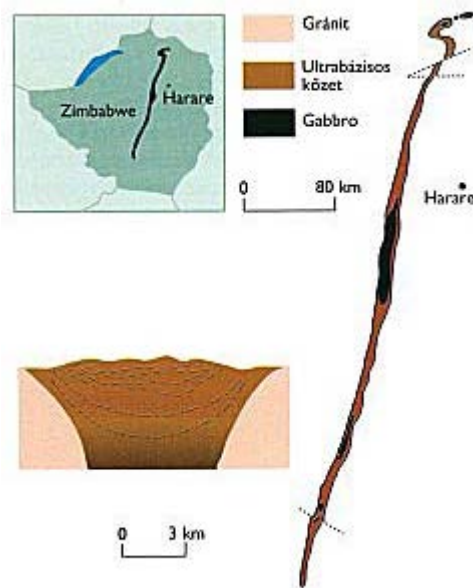
A proterozoikum végéhez közeledve a lemezmozgások révén valamennyi kontinens egybeforr. Az így keletkezett hatalmas kontinenset nevezzük **Rodiniának**, vagy más néven *proterozoikumi Pangeának*. A jelző használata azért szükséges, mert a kontinensek összeforrása később, a perm-ben is bekövetkezett, az így létrejött szuperkontinens is Pangeának nevezzük. Rodinia még a paleozoikum kezdete előtt két darabra szakadt, majd a paleozoikum elején tovább tagolódt.



A rózsaszínel jelölt részek archaikumi **kratonok**. Az összeforrás orogén területeit sötétsárga szín jelöli. A sávozott részek a proterozoikum végi szétnyílás törésvonalai.

### Riftesedés a proterozoikumban

A kollíziós folyamatok mellett ki kell térnünk a kontinentális riftesedésre is. Az archaikumnál említettük, hogy a kontinentális kéreg még nem volt eléggé rideg ahhoz, hogy a mai értelemben véve riftesedjen, valószínűleg felboltozódás és elvékonyodás előzte meg a szétnyílását. A korai proterozoikumtól kezdve viszont már kőzettani bizonyítékok vannak a *rideg kontinentális kéreg riftesedésére*. A folyamatot nem minden esetben követte szétnyílás és óceáni aljzat kialakulása. Ilyen, kezdeti szétnyílási stádiumban megállt állapotot rögzítenek az archaikumi kratonokat több száz kilométer hosszúságban átszelő *bazalt dájkok* (Zimbabwe, Great Dyke) vagy a felső, gránitos kéregbe nyomult, *bázisos-ultrabázisos rétegekből álló komplexumok* (Dél-Afrikai Köztársaság, Bushveld).



**A Föld krómérckészletének közel egynegyedét tartalmazó Great Dyke**

A félbemaradt riftöv többszáz kilométer hosszan szeli át Zimbabwe archaikumi gránitterületeit. A szelvényben a szaggatott vonalak a krómérc rétegeket jelölik

## Proterozoikumi kőzetek

### A főbb kőzettípusok

A proterozoikum kőzetei sok hasonlóságot mutatnak a fanerozoikumi kőzetekkel. Legelterjedtebbek a **metamorf kőzetek** és a **gránit**, melyek a kollíziós zónákhoz köthetők. Viszonylag gyakoriak a riftesedéssel keletkezett **bázisos magmás testek** is. Az archaikumra jellemző komatiit a proterozoikumban már nem képződött.

Az üledékes kőzetek típusaiban változás következik be a korábbiakhoz képest. A **sávós vasérc** képződése a proterozoikum elejétől háttérbe szorul, és annak közepére teljesen meg is szűnik. Ezzel egyidejűleg megjelennek a szárazföldi oxidáció első jeleként a **vörös törmelékes üledékes** kőzetek. Ugyancsak új jelenség a **tillit** jellegű üledékek kialakulása, ami már a proterozoikum elején a felszíni hőmérséklet 0°C alá való csökkenését, vagyis jégképződést jelez.



**Eljegesedést jelző proterozoikumi tillit, Észak-Norvégia [ix]**

A jégtömeg az idősebb kvarcitrétegek felületén mozgott. A piros nyíl a jégkarcok irányát mutatja, amikből a mozgás iránya rekonstruálható.

A tengeri üledékes kőzetek között az **agyagpala** dominál, de a proterozoikum közepétől jelentősen megnő a **mészkö** és **dolomit** képződése is. A mészkőkeletkezés intenzív növekedése több tényező együttes hatásának eredménye. Valószínű, hogy a tengervíz pH-ja növekedett, és az oldóképesség csökkenésével, vegyi kicsapódással is keletkezhetek mészkövek. Még fontosabb tényező a kéalgák elszaporodása és mészkiválasztó tevékenysége. A dolomitok bőséges keletkezésének oka vitatott. Feltehetőleg a tengervízben oldott  $Mg^{2+}$  ionok nagy mennyiségéhez jelentősen hozzájárultak a korábbi időszakok magas magnézium-tartalmú bazaltjai és a komatiitok.

A legidősebb **evaporitos** összlet a 300 m vastagságú, 2 milliárd évvel ezelőtt keletkezett, ausztráliai Bitter Springs Formáció, amely dolomit-gipsz sorozatból áll. Ezeknek az evaporitoknak, valamint a fanerozoikumi evaporitoknak az összehasonlításából arra a következtetésre jutottak, hogy a *proterozoikumi tengervíz kationjainak aránya nagyjából megegyezett a mai óceánokéval.*

**A kőzetekből kiolvasható éghajlati változások**

A proterozoikum éghajlatában több alkalommal jelentős változások következtek be. Az üledékes kőzetek között találunk **meleg, trópusi** viszonyokra utaló típusokat is (laterites mállásból eredeztethető vasérc, mészkő). Elterjedtek viszont a glaciális üledékek, amelyek alapján a proterozoikumban több (sokan egyetértenek abban, hogy négy) eljegesedési időszak rekonstruálható. Az eljegesedések nyomai valamennyi földrészen megtalálhatók. A **jégkorszakok** közül legjelentősebb a *700-600 millió évvel ezelőtt lezajlott varangani eljegesedés*, amelyet elsősorban Norvégiában előforduló glaciális eredetű kőzetekben vizsgáltak.

**Az élet fejlődése a proterozoikumban**

**Az eukarióták megjelenése**

A proterozoikum élővilágát a **prokarióták**, vagyis a **baktériumok** és **kékmoszatok** uralták. Körülbelül *1,5 milliárd évvel ezelőtt* azonban *megjelentek az első eukarióták*, azaz a sejtmagosok. Ezek is egysejtű lények voltak, de méretük a prokarióták méretének körülbelül százszorosa, és legfőbb jellemzőjük a prokariótákkal szemben, hogy genetikai anyagukat a sejtfoliadéktól maghártya választotta el, azaz *sejtmaggal rendelkeztek*. Sejtjük kromoszómákat is tartalmazott, így a korábbi, sejtagnélküliekre jellemző osztódásos szaporodás mellett megjelent az ivaros szaporodás.

Az ivaros szaporodás és az a tény, hogy az oxigén jelenléte lehetővé tette a jelentős energia-felszabadulással járó légzést, az eukarióták fejlődésének lendületet adott, és az élővilágban óriási diverzitást, sokféleséget bontakoztatott ki. A mai élet minden formája, növények és állatok egyaránt – a baktériumok és kékmoszatok kivételével – eukarióta-jellegű, azaz sejtmagos sejtekből épül fel. Az osztódással szaporodó baktériumok és kékmoszatok viszont 3 milliárd évvel ezelőtt szinte ugyanúgy néztek ki, mint napjainkban.

### A proterozoikumi fossziliák

Az eukarióták megjelenését a "szerves molekula fossziliák" jelzik. Ezek a fossziliák vékony, filmszerű benyomatok, és valószínűleg nagyobb méretűek, mint maga a sejt lehetett. Feltételezhetően eukariótáktól származnak, bár ezekben fosszilizálódott sejtmagot nem találtak.

A proterozoikum második felében a légköri oxigéntartalom elérte a mai érték 1 %-át. Ez olyan vastagságú ózonréteg képződésével járt együtt, ami az életet elpusztító ultraibolya sugarakat kiszűrte, így a tengeri élet egészen a partszegélyi területekig kiterjeszkedhetett.

A proterozoikum végére **többséjtű szervezetek** alakultak ki. Ezek lágytestű, medúzaszerű vagy szelvényezett állatok voltak, melyeknek fossziliái "ediacarai fauna" néven váltak ismertté. Leggazdagabb lelőhelyük ugyanis az ausztráliai Ediacara, ahol finomszemcsés, kovaanyagú üledékben maradtak fent a lágytestek lenyomatai. A sekély tengerben élt állatok között *plankton, nekton és bentosz formák is lehettek*. A körülbelül 1600 előkerült példány főleg a medúzákhoz, gyűrűsférgekhez és ízeltlábúakhoz tartozik, de sok az ismert rendszertani kategóriákba nem sorolható forma is. Ediacarán kívül más lelőhelyeken is találtak hasonló fossziliákat. A prekambrium végét ezeknek a fossziliáknak az eltűnése, vagyis az ediacarai fauna kihalása jelzi.



*Dickinsonia*, késő proterozoikum [x]

Az ediacarai faunaegyüttesből származó, gyűrűsférgekre emlékeztető forma. Flinders Ranges Nemzeti Park, Dél-Ausztrália

## 4. ELLENŐRZŐ KÉRDÉSEK

### PREKAMBRIUM - ELLENŐRZŐ FELADATOK

Többször megoldható feladat, **elvégzése kötelező**.  
A feladat végső eredményének a mindenkor **legutolsó megoldás** számít.



**Döntse el, hogy az alábbi állítások igazak vagy hamisak!**

1. Az archaikumban már a maihoz hasonló lemeztektonikai folyamatok voltak. 

I	H
2. Az archaikumban volt jellemző a sávos vasérc képződése. 

I	H
3. A földi élet 4,6 milliárd évvel ezelőtt jelent meg. 

I	H
4. A legidősebb fosszíliák 3,8 milliárd évesek. 

I	H
5. A sztromatolitos mészkövek a kékbaktériumok közreműködésével jöttek létre. 

I	H

**Társítsa a megfeleltethető fogalmakat!**

Kattintással válasszon elemet majd mozgassa a nyilakkal a kívánt helyre!

- 6.
- |                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| első életformák            | kékbaktériumok              |
| zöldkő formáció            | vulkáni gázok               |
| kondrit meteorit           | óceáni bazalt metamorfózisa |
| kora-archaikumi atmoszféra | proterozoikum vége          |
| ediacarai fauna            | víz eredete                 |

**Jelölje az adott eseményhez tartozó időpontot (hány évvel ezelőtt) a megadott időpont beírásával!**

A kitöltéshez válasszon először szót, majd kattintson egy pontozott vonalra!

4,6 milliárd év, 3,8 milliárd év, 2,5 milliárd év, 4,2 milliárd év,  
700 millió év, 570 millió év, 1,6 milliárd év

Az élet megjelenése:	
Az ediacarai fauna kihalása:	
A szilárd földkéreg kialakulása:	
A proterozoikum kezdete:	
A sávos vasérc képződés befejeződése:	
A varangini jégkorszak kezdete:	
A Föld kialakulása:	

Válassza ki a helyes választ a következő kérdésekre!

**14. Miért nem voltak rideg lemeztektonikai jelenségek a z archaikumban?**

- Mert elterjedt vulkanizmus volt.
- Mert a litoszféra még vékony és meleg volt.
- Mert nem voltak konvekciós áramlások.

**15. Mit nevezünk zöldkő formációknak?**

- A smaragd tartalmú kőzeteket
- A szerpentinitet, amfibolitot, bazaltot és üledékes kőzeteket tartalmazó, gyúrt archaikumi kőzettömegeket
- A malachitot tartalmazó formációkat

**16. Mikor volt a varangini jégkorszak?**

- 3200-3100 millió évvel ezelőtt
- 700-600 millió évvel ezelőtt
- 2000-1500 millió évvel ezelőtt

**17. Mikor jelent meg a földi élet?**

- 1500 millió évvel ezelőtt
- 570 millió évvel ezelőtt
- 3800 millió évvel ezelőtt

**18. Melyik élőlényrel hozható kapcsolatba a sávós vasérc képződése?**

- Dickinsonia
- kékbaktériumok
- kagylók

**Párosítsa a meghatározáshoz a fogalmat!**

A kitöltéshez kattintson először az adott szóra, majd a beszúrás helyére!

*pajzsterület, sztromatolit, ediacarai fauna, komatiit, zöldkő formáció*

**19. Az archaikumi és proterozoikumi hegységképződések során, számos kollíziós esemény következtében épültek és gyarapodtak, azóta folyamatosan pusztulnak:**

**20. Egy magnéziumban gazdag (30 % MgO) ultrabázisos vulkanit, ami kizárólag az archaikumban keletkezett:**



21. Koncentrikus héjából álló, gumós szerkezetű kőzetek:
22. A proterozoikum végén élt sekélytengeri élőlények, melyek kihalásához kötjük a prekambrium végét:
23. Gránit-gneisz formációkba ágyazott, erősen gyűrt kőzettömegek, amelyek sötét színű vulkanitokból, kis- és közepes metamorf fokozatú kőzetekből, valamint tengeri üledékes kőzetekből állnak:

## BIBLIOGRÁFIA:

---

- [i] <http://www.bbc.co.uk>
- [ii] <http://geology.about.com>
- [iii] <http://geology.com>
- [iv] <http://www.niger-meteorite-recon.de>
- [v] <http://commons.wikimedia.org>
- [vi] Rogers, J., J., W. (1993): History of Earth and Life
- [vii] <http://commons.wikimedia.org>
- [viii] <http://expertvoices.nsd.org>
- [ix] <http://www.snowballearth.org>
- [x] Fotó: Vörös Péter