

Magyarország célba ér



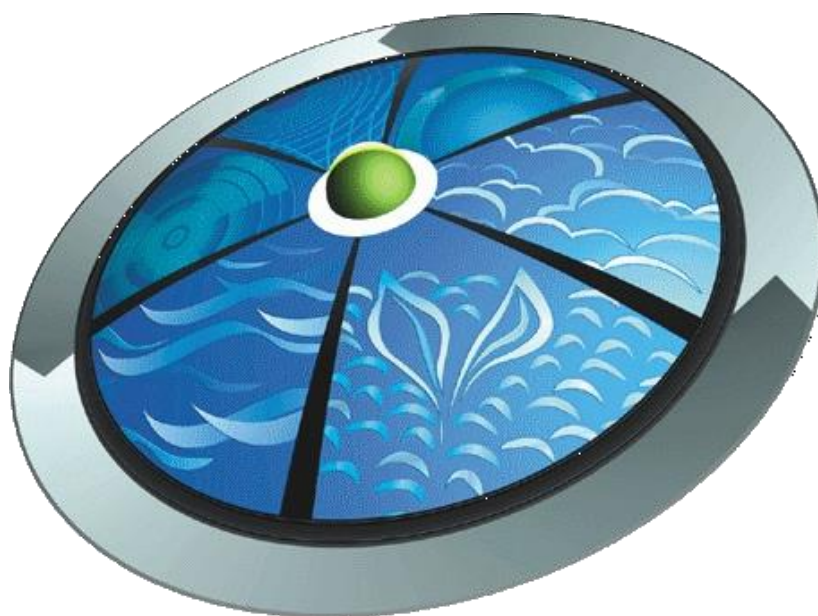
Készült
a HEFOP 3.3.1-P.-2004-0900152/1.0 azonosítójú
„A Felsőoktatás szerkezeti és tartalmi fejlesztése”
című pályázat keretében.

Konzorciumvezető: Pannon Egyetem



Környezetmérnöki Tudástár

Sorozat szerkesztő: Dr. Domokos Endre



7. kötet

Környezettan

Szerkesztő: Dr. Kerényi Attila

Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet

Pannon Egyetem

Környezetmérnöki Szak

Magyarország célba ér



Környezetmérnöki Tudástár

7. kötet

Készült

a HEFOP 3.3.1-P.-2004-0900152/1.0 azonosítójú
„A Felsőoktatás szerkezeti és tartalmi fejlesztése”
című pályázat keretében.

Konzorciumvezető: Pannon Egyetem

Sorozatszerkesztő:

Dr. Domokos Endre



Környezetmérnöki Tudástár

Sorozat szerkesztő: Dr. Domokos Endre

7. kötet

Környezettan

Szerkesztő: Dr. Kerényi Attila

Szerzők:

Ángyán József

Kerényi Attila

Papp Sándor

Rakonczai János

ISBN: 978-615-5044-32-8

2. javított kiadás – 2011

Első kiadás: 2008

Veszprém

Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet

Környezetmérnöki Tudástár

eddig megjelent kötetei

01. Környezetföldtan
02. Környezetgazdálkodás
03. Talajvédelem, talajtan
04. Egészségvédelem
05. Környezeti analitika
06. Környezetvédelmi műszaki technológiák, technológiai rendszerek modellezése, ipari technológiák és szennyezéseik
07. Környezettan
08. Földünk állapota
09. Környezeti kémia
10. Vízgazdálkodás-Szennyvíztisztítás
11. Levegőtisztaság-védelem
12. Hulladékgazdálkodás
13. Zaj- és rezgésvédelem
14. Sugárvédelem
15. Természet- és tájvédelem
16. Környezetinformatika
17. Környezetállapot-értékelés, Magyarország környezeti állapota, monitorozás
18. Környezetmenedzsment rendszerek
19. Hulladékgazdálkodás II.
20. Környezetmenedzsment és a környezetjog
21. Környezetvédelmi energetika
22. Transzportfolyamatok a környezetvédelemben
23. Környezetinformatika II.
24. Talajtan és talajökológia
25. Rezgési spektroszkópia

Felhasználási feltételek:

Az anyag a Creative Commons „Nevezd meg!-Ne add el!-Így add tovább!” 2.5 Magyarország Licenc feltételeinek megfelelően szabadon felhasználható.



Nevezd meg! — A szerző vagy a jogosult által meghatározott módon fel kell tüntetned a műhöz kapcsolódó információkat (pl. a szerző nevét vagy álnévét, a Mű címét).



Ne add el! — Ezt a művet nem használhatod fel kereskedelmi célokra.



Így add tovább! — Ha megváltoztatod, átalakítod, feldolgozod ezt a művet, az így létrejött alkotást csak a jelenlegivel megegyező licenc alatt terjesztheted.

További felhasználás esetén feltétlenül hivatkozni kell arra, hogy

"Az anyag a HEFOP 3.3.1-P.-2004-0900152/1.0 téma keretében készült a Pannon Egyetemen."

Részletes információk a következő címen találhatóak:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/hu/>

Tartalomjegyzék

1.	<i>A Környezettan alapjai</i>	7
1.1.	A környezettan tárgya	7
1.2.	A környezeti rendszerek tulajdonságai és a rendszermodellek	8
1.2.1.	A környezeti rendszerek, mint anyagi rendszerek	8
1.2.2.	A rendszermodellek és a modellalkotás	13
1.3.	A globális földi rendszer egységes működésének bizonyítékai	15
1.3.1.	A Föld bolygó fejlődésének eltérő minőségű szakaszai	15
2.	<i>Biogeokémiai körfolyamatok és antropogén módosításuk</i>	54
2.1.	Bevezetés	54
2.2.	Körfolyamatok a természetben	55
2.2.1.	Az ökológiai rendszerek dobozmodellje; definíciók	56
2.3.	A biológiailag esszenciális elemek biogeokémiai körforgása	59
2.3.1.	Karbóniumciklus	59
2.3.2.	A nitrogén körforgása	69
2.3.3.	A kén körforgása	83
2.3.4.	A foszfor körforgása	93
2.3.5.	Az oxigén körforgása	100
2.3.6.	Néhány fém környezeti kémiája, fémciklusok	104
2.4.	Az emberi tevékenység hatása a biogeokémiai körfolyamatokra	130
2.4.1.	A globális éghajlatváltozás	130
2.4.2.	Savas ülepedés	135
2.4.3.	Ózonképződés és -bomlás a sztratoszférában	140
2.4.4.	Fotokémiai füstköd	142
2.4.5.	Az eutrofizáció	144
2.4.6.	A földi élet és a biogeokémiai körfolyamatok	146
2.5.	A légkör szerepe a földi élet szemszögéből	150
2.5.1.	A légkör összetétele és szerkezete	150
2.5.2.	Az üvegházhatás	154
2.5.3.	Az ózon kettős szerepe a légkörben	165
2.5.4.	A légkör, mint szennyezés szállító közeg, savas esők	175
2.5.5.	Nemzetközi egyezmények a légkör védelmében	179

2.6.	A vízburok jelentősége az élővilág és a társadalom számára	197
2.6.1.	A világóceán	198
2.6.2.	Édesvizek	222
2.6.3.	Nemzetközi egyezmények a vízről	252
2.7.	A kőzetburok és a szárazföldek mint a társadalom életének meghatározó szinterei	260
2.7.1.	Lemeztektonikai alapismeretek: a kőzetlemezek mozgásai és ezek környezeti következményei 260	
2.7.2.	A kőzetek csoportosítása, jelentőségük a társadalom számára	266
2.7.3.	A kőzetek éghajlat-függő mállása, a talajképződés földrajzi különbségei a Földön	285
2.7.4.	A szárazföldi környezet eltartóképessége: területi különbségek	299
2.8.	A kontinensek természeti környezetének mozaikos felépítése: a természeti és kultúrtájak. Gazdálkodás a tájak természeti potenciáljával	309
2.8.1.	Alapismeretek a tájakról	309
2.8.2.	Gazdálkodás az erdőkkel	325
2.9.	A globális társadalom és a környezet	343
2.9.1.	A társadalmi gazdasági fejlődés és a globalizáció környezeti következményei	343
2.9.2.	Mindennapi környezetünk	356
2.9.3.	Mindennapi környezeti veszélyek és azok kivédése	361

1. A KÖRNYEZETTAN ALAPJAI

1.1. A környezettan tárgya

A környezettan tárgyának megértéséhez fontosnak tartjuk a környezettudomány kialakulásának bemutatását és alapvető feladatainak ismertetését, mert e két fogalom (környezettan és környezettudomány) szoros kapcsolatban van egymással.

A 20. század során a tudományok rendkívüli mértékben differenciálódtak: a tudományágak szinte áttekinthetetlen rendszere jött létre. A szakemberek ismeretanyagára a túlzott specializáció volt jellemző. Az 1960-as években *a környezeti problémák sokasodása életre hívott az eddigiekkel szemben egy ellentétes folyamatot: a szintézisre törekvést*. A természetes és az ember által létrehozott környezet *sajátos heterogén rendszereket* alkot, amelyek egy-egy túlspecializálódott tudományág eszközzel és szűk szemléletével nem ismerhetők meg. Alapvető megközelítési mód a komplexitás kell, hogy legyen.

A *környezettudomány* olyan szintetizáló tudomány, amelynek alapvető feladata e *heterogén* (természetes és ember által alkotott) *környezeti rendszerek* működésének és működési zavarainak feltárása, megismerése abból a célból, hogy az élővilág számára (beleértve az embert is) ezen ismeretek gyakorlati alkalmazásával tartósan kedvező életfeltételeket biztosítsunk. A környezettudomány tehát egyszerre igényli az elméleti megközelítéseket és a gyakorlati alkalmazás módszereinek kidolgozását.

E heterogén környezeti rendszerek bonyolultsága megköveteli, hogy a környezetkutatók a differenciálódott tudományágak ismereteit és módszereit is felhasználják a környezeti problémák megoldásához. Így tehát a környezettudomány magában foglal bizonyos ismereteket és felhasznál bevált módszereket a fizikából, kémiából, biológiából, ökológiából, orvostudományból, földtudományokból, a műszaki és az agrártudományokból, de a társadalomtudományok területeiről is, mint a történelem, közgazdaságtudomány, szociológia, politológia, demográfia és jogtudomány.

Vannak tudósok, akik a *környezettudományt másképpen értelmezik*. A természettudományos megközelítést a magyar kutatók közül *Mészáros Ernő* képviseli a legmarkánsabban. (MÉSZÁROS E.: *A környezettudomány alapjai*; 2001; Budapest; Akadémiai Kiadó; 210: VI.) *A környezettudomány alapjai* c. könyvében a következőket írja: „Jelen kötet célja a földi környezet kialakulásának és jelenlegi állapotának leírása, az ember és környezete kapcsolatának *természettudományos* tárgyalása. Ebből következik, hogy nem térünk ki a szorosan vett

környezetvédelmi kérdésekre... Nem kívánjuk továbbá a társadalomtudományi összefüggéseket sem taglalni.” (Előszó, VI. oldal.)

Úgy gondoljuk, hogy a társadalom olyan mértékű változásokat idézett elő már eddig is a Föld bolygón, hogy indokolt megvizsgálni, mik ezeknek a – többnyire nem kívánt – változásoknak a gyökerei. Milyen emberi tevékenységek vezetnek az élő természeti környezet pusztulásához és az élettelen környezet degradálódásához? Mi az, amit a társadalomnak másképp kell csinálnia, mint eddig? Ezekre a kérdésekre csak akkor tudunk válaszolni, ha a természet és a társadalom működésével egyaránt foglalkozunk.

A *környezettudományt* mi úgy definiáljuk, mint a globális földi rendszer működésének tudományát, amelyben különös hangsúlyt kap a természet és társadalom közötti kölcsönkapcsolatok vizsgálata. A *környezettan* pedig nem más, mint a környezettudomány által feltárt legfontosabb ismeretek szisztematikus összefoglalása. (A környezetmérnök képzés tantárgyi rendszerének sajátosságából fakad, hogy a környezettan egyes témakörei más tantárgyakban jelennek meg. Így pl. az éghajlatváltozás a Földünk állapota keretében, a levegőszennyezés a Levegőtisztaság-védelem c. tantárgyban kerül tárgyalásra.)

A környezettan témaköreinek jobb megértéséhez szükséges olyan kérdésekkel is foglalkoznunk, mint a környezeti rendszerek általános tulajdonságai és az ezekkel összefüggő rendszermodellek típusai. A társadalom és a környezete közötti kölcsönkapcsolatok mélyebb megismerését segíti, ha azt is megvizsgáljuk, bolygónk fejlődése milyen minőségű szakaszokon esett át. Tisztában kell lennünk azzal, hogyan működött a földi rendszer a társadalom létezése előtt, és miben változott meg ez a működés a társadalom fejlődése során. Tananyagunk következő fejezeteiben ezekkel a témákkal foglalkozunk.

1.2. A környezeti rendszerek tulajdonságai és a rendszermodellek

Kerényi Attila, Debreceni Egyetem

1.2.1. A környezeti rendszerek, mint anyagi rendszerek

Mindenekelőtt arról kell szólnunk, hogy a továbbiakban csak az anyagi rendszerekről tanulunk, s nem foglalkozunk az ún. szellemi (gondolati) rendszerekkel. A környezeti rendszerek ugyanis az anyagi rendszerekhez tartoznak.

A szellemi rendszerekkel kapcsolatban mindössze arra utalunk, hogy az anyagi rendszerekhez hasonlóan ezek is rendszerelemekből épülnek fel, amelyek egymással kölcsönkapcsolatban

vannak, de ezek a rendszerelemek fogalmak, gondolatok, állítások, logikai folyamatok. Közismert szellemi rendszerek pl. a tudományos elméletek.

Számunkra most az anyagi rendszerek főbb tulajdonságainak megismerése a feladat.

A Földön megfigyelhető tárgyak, természeti objektumok hatnak egymásra: a lehulló eső cseppjei ütést gyakorolnak a talajra, szilárd részecskéket ragadnak magukkal, s a felszínen lefolyó víz tovaszállítja őket a patakokba, folyókba; vagyis a *vízrendszer* elemei között kapcsolat van, ami példánkban *anyagszállításban* nyilvánul meg. Persze a víz jó hőraktározó képessége révén sok hőenergiát is magával visz, s annak egy részét lassan átadja környezetének. Fogalmazzuk meg mindezt általánosabban!

A rendszerben *egységek, elemek* sokasága kapcsolódik össze. Ezek lehetnek anyagok, tárgyak, mesterséges alkatrészek egyaránt. A rendszer *elemei* nem véletlenszerűen kapcsolódnak egymáshoz, valamilyen *egymásraépültség, kölcsönkapcsolat, működési kapcsolat* létezik közöttük. Ez egyben arra is utal, hogy a rendszerek *nem statikusak, működnek és változásokon mennek keresztül*. Ezek a mozgások *anyag- és energiaáramlással* járnak. A működés fenntartása valamilyen *külső hajtóerőt* vagy *belső energiaforrást* igényel.

Az anyagi rendszerek környezetünkkel valamilyen kapcsolatban vannak, s ez a kapcsolat működésükre is hatással van.

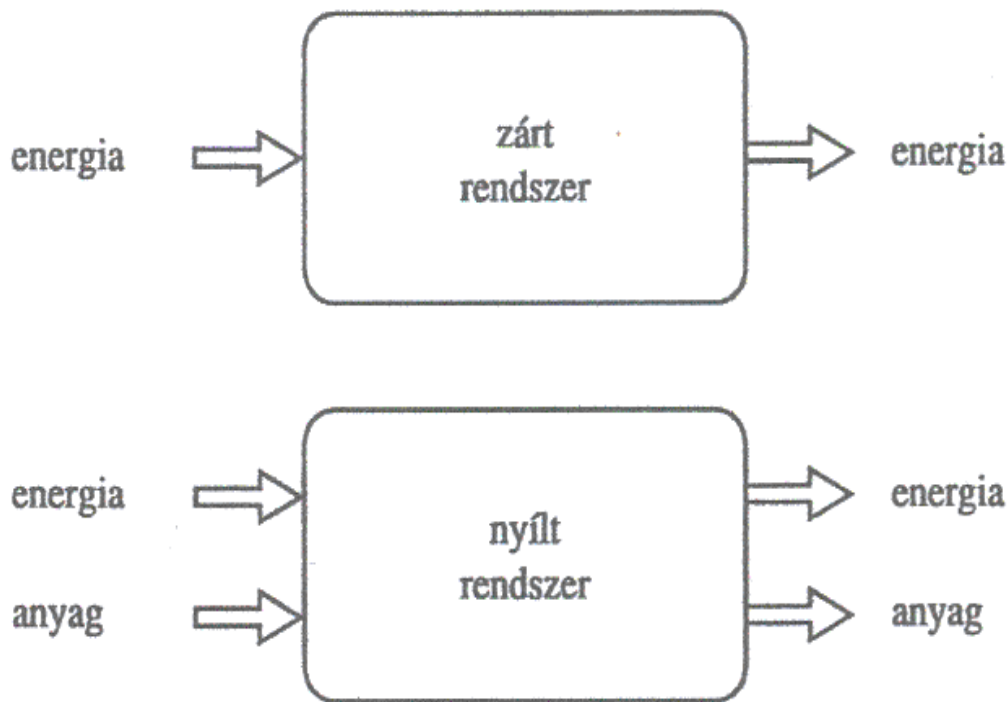
A rendszerek egyik típusa *energiát* vesz fel és ad le, de anyagot nem cserél a környezetével. Ezeket a rendszereket *zárt rendszereknek* nevezzük, amelyek ritkán fordulnak elő a Földön.

Maga a Föld azonban zárt rendszernek tekinthető, mivel igen nagy mennyiségű energiát vesz fel a napsugárzásból (ez tartja fenn az élő rendszereket), s közel azonos a visszasugárzás a világűrbe, míg az anyagbevitel és leadás elhanyagolhatóan kicsi. *Bemenetként* (inputként) jönnek számításba a becsapódó meteoritok, *kimenetként* (outputként) pedig a légkörből megszökő anyagi részecskék, újabban a világűrbe kijuttatott és vissza nem térő mesterséges égitestek is.

Ha tehát szigorúak akarunk lenni, akkor a Földet *kvázi zárt rendszerként értelmezhetjük*, ami némi anyagcserét is feltételez, de az energiacseréhez képest elhanyagolható mennyiségben (*I. ábra*).

A *nyílt (nyitott) rendszerek* és környezetük között mind *energiák*, mind pedig *anyagok* cseréje végbemegy. Az energiaáramlás túlnyomórészt anyagáramlással függ össze, vagyis a rendszerek között vándorló anyagok bizonyos mennyiségű energiát hordoznak. Ez lehet pl. adszorbeált hőenergia vagy potenciális kémiai energia. A nyitott rendszerekre a *szerkezet* főbb tulajdonságainak *fennmaradása* jellemző annak ellenére, hogy rajtuk keresztül anyag- és

energiaáramlás játszódik le. Az élőlények tipikusan ilyen rendszerek: anyag- és energiacseréjük során módosítják környezetüket, miközben saját szervezetük megőrzi fő funkcióit és alapvető szerkezeti tulajdonságait. A környezeti rendszerek ugyancsak nyílt rendszerek, amelyeket élő és élettelen elemek alkotnak. (A társadalom szerepéről a későbbiekben külön lesz szó.)



1. ábra. A zárt és nyílt anyagi rendszer különbsége

A rendszerek *működéséhez* mindig *szükség van energiára*. Ez az energia származhat a rendszeren kívülről. Ilyenek pl. az egyed feletti szerveződés eredményeként létrejövő élő rendszerek, amelyek alapvetően a napenergiát használják fel működésükhöz. Származhat az energia a rendszeren belülről is. A Föld belső hője pl. meghatározza a lemeztektonikai folyamatokat, a kőzetlemezek rendszerének mozgásait, s az ehhez szükséges energiát a radioaktív átalakulások biztosítják. Az anyag- és energiaáramlás *változásokat okoz a rendszerben*, ennek ellenére *megmarad minden lényeges tulajdonsága*.

A környezeti rendszerekben az *információk áramlása* is végbemegy. Ennek legkézenfekvőbb formája a genetikai információ. A DNS-ben hordozott információk nemcsak az élő rendszerek fejlődésében és szabályozásában játszanak szerepet, hanem közvetve (az élőlények anyagcseréjén keresztül) az élettelen rendszeralkotókra is hatást gyakorolnak.

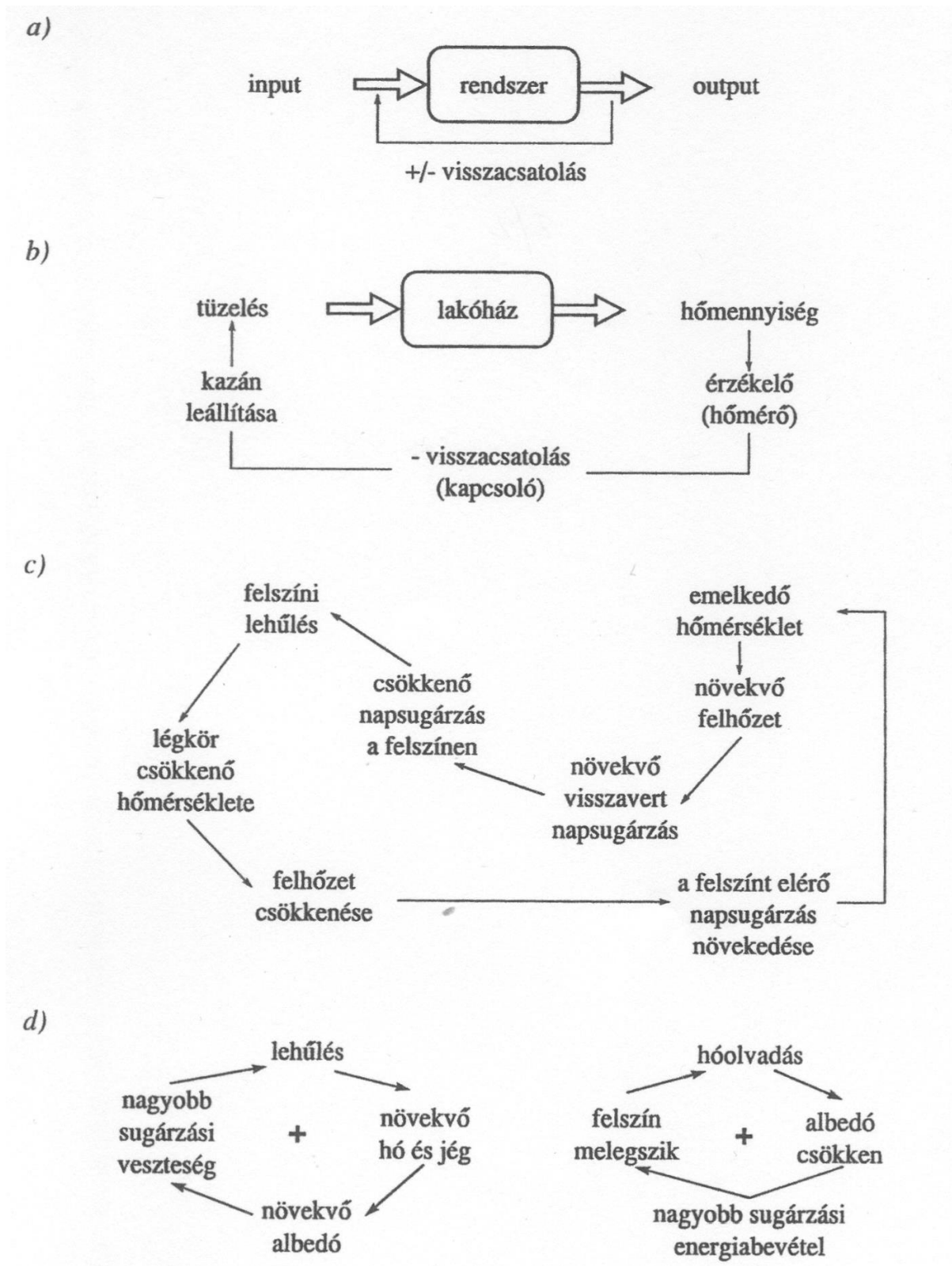
A környezeti rendszerekre jellemző, hogy fennállásuk jelentős részében *dinamikus egyensúlyi állapotban* vannak.

Ahhoz, hogy ez az állapot fennmaradjon, a rendszernek *ön szabályozó képességgel* kell rendelkeznie. Az ön szabályozás alapja a visszacsatolás, amely egészen egyszerű rendszerekben is működik. *A visszacsatolás azt jelenti, hogy a rendszer kimenetének egy részét hozzáadjuk a bemenethez. Negatív a visszacsatolás, ha a hozzáadás előtt az előjelet megváltoztatjuk, vagy másképpen fogalmazva: ha a kimenet egy részét a bemenetből levonjuk. (2. ábra)* A normális vagy *negatív visszacsatolás* olyan módosító hatást fejt ki a rendszerre, amelynek következtében korrigálja annak működését, fékezi vagy meggátolja a kiinduló állapotot módosító hatásokat.

Például a légkör felmelegedése fokozza a párolgást, ez a felhőképződést. A növekvő felhőzetről nagyobb arányban verődik vissza a napsugárzás a világűr felé, mint korábban, vagyis a földfelszín sugárzási veszteség éri, *megindul a légkör lehülése*. Az egyre alacsonyabb hőmérséklet a felhőzet csökkenését eredményezi, így idővel megáll a hőmérséklet csökkenése, sőt az egyre növekvő besugárzás miatt *újra hőmérséklet-emelkedés kezdődik*. E két negatív visszacsatolás eredményeként a légkör hőmérséklete csak egy bizonyos intervallumban változik, így az élővilág számára kedvező feltételek alakulnak ki. Mivel a negatív visszacsatolás a rendszert stabilizálja, szokták *stabilizáló visszacsatolásnak* is nevezni.

Ezzel ellentétes eredményre vezet a *pozitív visszacsatolás*, vagyis hatására a *rendszer instabillá válik*. Egy újabb éghajlattani példán figyeljük meg a hatásmechanizmusát. A légkör lehülése növeli a hó- és jégfelszínét. A fehér felszín hő- és fényvisszaverő képessége nagyobb, mint a talajfelszíné, így nagyobb lesz a felszín sugárzási vesztesége, ami viszont további lehüléssel jár. Ez a mechanizmus tehát erősíti a már beindult lehülési folyamatot, instabillá teszi a rendszert. Meg kell jegyeznünk, hogy példánkban a folyamat nem megy a végtelenségig. Ha ugyanis az adott területet teljes egészében hó- és jégfelszín fogja borítani, a pozitív visszacsatolási folyamat megáll. (Persze az élet szempontjából nem éppen kedvező egy olyan változás, amely hó- és jégfelszín eredményez.)

Környezeti szempontból *rendkívül veszélyes, ha a pozitív visszacsatolási folyamatok jutnak túlsúlyba*, mivel azok végső soron a rendszer minőségét változásához vezetnek, ami a *rendszer adott formájának pusztulását jelentheti*. A természetben a negatív (stabilizáló) és a pozitív visszacsatolások ezrei működnek egyidőben és egymás ellen kifejtve hatásukat. Ha a negatív visszacsatolások vannak túlsúlyban, a rendszer stabil marad. Bolygónk egészét figyelembe véve a negatív (stabilizáló) visszacsatolások dominálnak, ily módon a globális földi rendszer meglehetősen stabil.

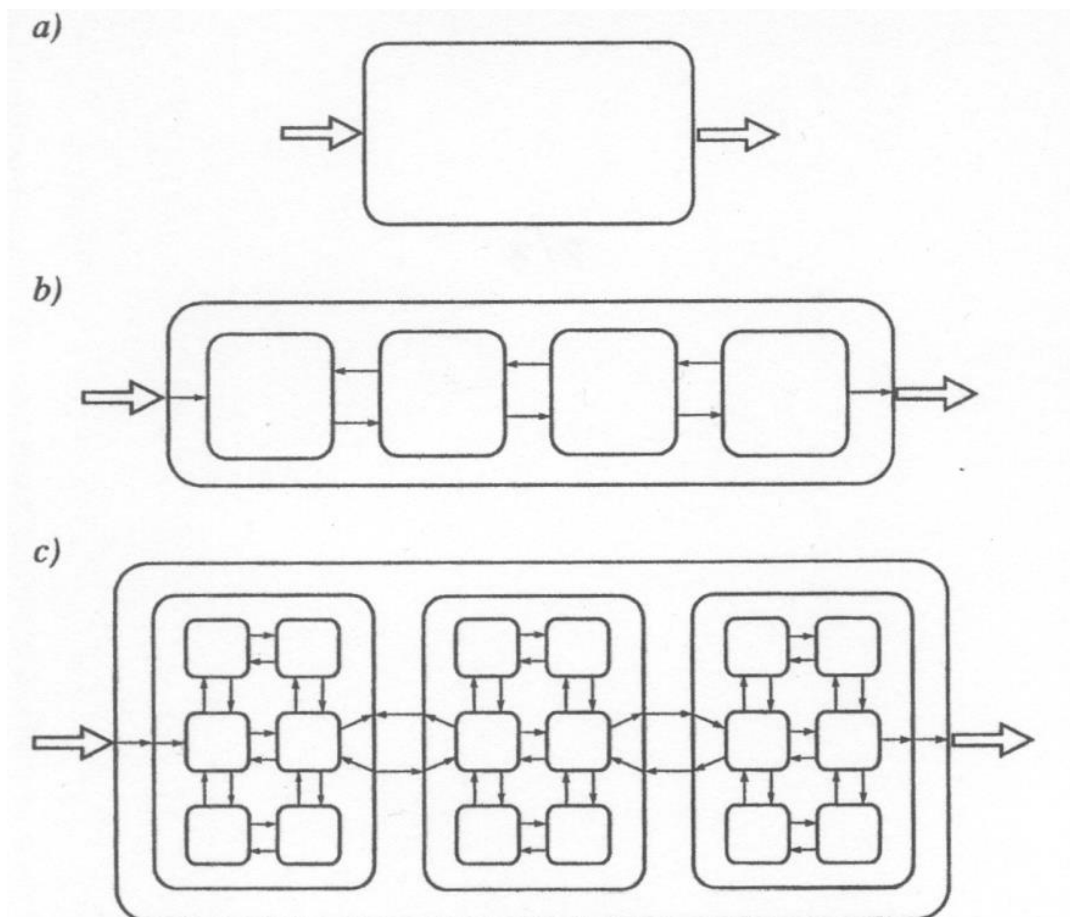


2. ábra. A negatív és a pozitív visszacsatolás elvi vázlatja (a) és néhány példája: b) egy lakóház fűtésszabályozójának elvi működése, c) a negatív visszacsatolás egyik éghajlati példája, d) a pozitív visszacsatolás két éghajlati példája

1.2.2. A rendszermodellek és a modellalkotás

Abból a célból, hogy a *környezeti rendszert* minél jobban tudjuk tanulmányozni, *idealizáljuk és egyszerűsítjük*, valamilyen formában ábrázoljuk, vagyis modellt alkotunk, hogy a *szerkezetét és a működését áttekinthetővé tegyük*. A jól megalkotott modell a rendszer lényeges elemeit, azok kapcsolatrendszerét hűen tükrözi, egyszersmind általánosít is.

A *modellnek tartalmaznia kell a rendszer elemeit, azok helyzetét, valamint egymáshoz való viszonyukat, kapcsolataikat*. A modell elemeit szimbólumokkal ábrázoljuk, térbeli helyzetüket a papír adta korlátok miatt (két dimenzió) inkább csak érzékeltetni tudjuk, mintsem reálisan ábrázolni. (Persze léteznek térmodellek is: pl. a kémikusok a molekulák szerkezetét ilyen modellek segítségével jelenítik meg.) A kapcsolatokat vonalakkal fejezzük ki, az anyag- és energiaáramlás irányait, valamint a kölcsönhatásokat nyilakkal (**3. ábra**).



3. ábra. Az egyszerű (a), az összetett (b) és a többszörösen összetett rendszer (c) általános modellje. A nyilak az anyag- és energiaáramlás irányait jelölik.

Vannak modellek, amelyek csak a rendszer szerkezetét kívánják bemutatni (statikus modellek), mások pedig a rendszeren belüli folyamatokra, anyag- és energiaáramlásokra helyezik a hangsúlyt (dinamikus modellek).

A rendszer szerkezetének bonyolultságát azok a statikus modellek tükrözik helyesen, amelyek az összetett rendszerek hierarchikus felépítését mutatják be (**3. ábra**). Azokat a rendszereket, amelyek már nem bonthatók egyszerűbbekre, *egyszerű rendszereknek* nevezzük. Ezekből épül fel az *összetett rendszer*.

Az összetett rendszerek is elemei lehetnek egy még bonyolultabb rendszernek, így *többszörösen összetett rendszerekről* is beszélhetünk (**3. ábra**). Az összetett és többszörösen összetett rendszerek alkotó rendszereit az adott vizsgálati szempontból *alrendszereknek* (ritkábban *részrendszereknek*) nevezzük. Ugyanazt a rendszert tehát – a vizsgálat céljától függően – kezelhetjük összetett vagy éppen alrendszerként. Az egyszerűtől a többszörösen összetett felé haladva nemcsak az elemek száma nő, hanem a közöttük fennálló kapcsolatoké is (**3. ábra**).

A modellalkotásnál alkalmazott szükségszerű egyszerűsítések különböző mértékűek lehetnek. Egy tankönyvbe általában úgynevezett *homomorf modellek* kerülnek, amelyek *a rendszernek csak a leglényegesebb elemeit, kapcsolatait, folyamatait ábrázolják*, így a valóságról tökéletlen képet alkotnak. Tudományos vizsgálatokban a kutatók arra törekednek, hogy a megalkotandó modellben a rendszer *minden eleme*, azok *kapcsolatai* és a rendszerben lejátszódó *folyamatok* egyaránt reálisan szerepeljenek, sőt a mérhető adatok mennyiségi viszonyai is tükröződjének. Ezeket a *tudományos pontosságú modelleket izomorf modelleknek* nevezzük.

A modellek megalkotásánál fontos a *lépték*, a felbontóképesség kérdése. Ha pl. az egész Föld vízrendszerét (hidroszféra) kívánjuk egy modellben leképezni, nyilván nem mehetünk olyan részletekbe, mintha egy sejt működésének modelljét készítjük el. Az is belátható, hogy a nagy földi rendszerek számos kisebb méretű rendszert foglalnak egységbe, így a *globális méretű modellek egyes elemei lehetnek önmagukban is összetett rendszerek*. Ebben az esetben nem fontos számunkra az egyes elemek mint rendszerek belső szerkezete. Megelégszünk a bemenet és a kimenet ismeretével, és a rendszert mint a magába foglaló összetettebb rendszer egy elemét *fekete dobozként (black box)* kezeljük. A modellalkotás céljától függően – ha a vizsgálódás szempontjából csak a bemenet és kimenet fontos – akár legbonyolultabb rendszer is kezelhető fekete dobozként.

Közepes felbontóképesség esetén az összetett rendszert alkotó elemek viszonyrendszere, az elemek között lejátszódó anyag- és energiaáramlás is fontos lehet, de még nem tárjuk fel a rendszer minden részletét. Az ilyen modelleket *szürke doboz* (*grey box*) modelleknek nevezzük. A rendszer minden részletének feltárására törekvő modelleket (valódi izomorf modellek *fehér doboz* (*white box*) modelleknek nevezzük. Ha a rendszerbeli folyamatok számszerűen is jellemezhetők, *matematikai modellek* formájában is megjelenhet a fehér doboz modell, s az adatok számítógépes feldolgozása nagyban meggyorsítja és pontosabbá teszi a rendszer működésével kapcsolatos számításokat. A környezettudományban a *kvantifikált modelleket* sikeresen alkalmazzák – többek között – az ún. világmodellek és a globális éghajlati modellek esetében is.

1.3. A globális földi rendszer egységes működésének bizonyítékai

Kerényi Attila – Papp Sándor

1.3.1. A Föld bolygó fejlődésének eltérő minőségű szakaszai

Kerényi Attila, Debreceni Egyetem

A Föld legalább 4,6 milliárd éves történetében három, egymástól eltérő minőségű szakaszt különböztetünk meg: 1. az élettelen bolygó formálódásának időszaka, 2. az élet megjelenésétől az emberi társadalom kialakulásáig terjedő időszak, 3. a társadalomba szerveződött ember környezetalakító tevékenységeivel jellemezhető időszak. E három időszak közül a második volt a leghosszabb (legalább 3,5 milliárd év), és a harmadik a legrövidebb (alig 10000 év). A változások intenzitása azonban ez utóbbiban – s különösen az elmúlt száz évben – nem marad el a földtörténet legnagyobb változásainak intenzitásától.

1.3.1.1. Az élettelen Föld

A Föld a csillagközi anyag szilárd részeinek egyesülésével keletkezett. A tömegvonzás irányította folyamat szilárd részek milliárdjainak ütközésével létrehozta az ősbolygó-kezdeményt, ami egyre nagyobb méretűvé nőtt. A nagyobb gravitációs terű bolygómag újabb és újabb szilárd meteoritdarabokat fogott be, az ütközések az egyre nagyobb tömeg miatt - egyre hevesebbekké váltak, s eközben a becsapódások energiája hőt termelt. A felmelegedő ősbolygó anyaga megolvadt (a számítások szerint kb. 4000°C-os lehetett az olvadt kőzetanyag), s ez lehetővé tette, hogy az olvadt anyag sűrűsége szerint rendeződjön a Föld belsejében.

4,6 milliárd évvel ezelőtt ez az állapot uralkodott bolygónkon. A kis sűrűségű olvadt ásványok a felszínen, ill. a felszín közelében helyezkedtek el, s amikor a gömbszerűvé formálódó bolygónk kívülről hűlni kezdett (a csillagközi tér ekkor már -273°C -ra hűlt le), ebből a szilíciumban gazdag, könnyebb anyagból szilárdult meg a *földkéreg*, majd alakultak ki a kéregnél vastagabb *kőzetlemezek*. A megszilárdulás nem egyszerre és nem egyenletesen mehetett végbe: először kisebb-nagyobb szilárd egységek, ún. *kratonok* jöttek létre, amelyek az első szárazföldek magjait képezték. Ezt a folyamatot 4,5 milliárd évvel ezelőtt egy hatalmas ütközés zavarta meg. Kutatók azt feltételezik, hogy az ősi Föld bolygó összeütközött egy Mars méretű égitesttel, amely hatalmas mennyiségű anyagot szakított ki a testéből. Ebből az anyagból képződhetett a Hold. (Az Apolló űrhajók által Földre hozott holdkőzetek vizsgálata ezt a feltételezést támasztja alá.)

A Föld belsejébe zárt hő ma is képlékeny állapotban tartja a *földköpeny* egy részét (az *asztenoszférát*), ahol a radioaktív bomlás is hozzájárul a magas hőmérséklet fenntartásához. A forró, helyenként olvadt kőzetanyag, a *magma* igen aktív vulkáni tevékenység során gyakran a felszínre tört, – s mint a vulkánkitörésekkor ma is – sokféle gázt és gőzöket is a felszínre hozott. A Föld mérete miatt elég nagy volt a tömegvonzása ahhoz, hogy a gázok és gőzök egy része ne szökjön ki a világűrbe, így megszületett bolygónk *első, kezdetleges légköre*. A becsapódó meteoritok között több jégmeteorit is lehetett, amelyek a forró légkörben elpárologva vízgőzzel vagy szén-dioxiddal gyarapították azt. A szén-dioxid, a nitrogén és a hidrogén voltak a légkör meghatározó alkotórészei, mellettük metán, az ammónia és a vízgőz is említésre méltó. A vízgőz mennyisége fokozatosan nőtt: kb. 460 millió év alatt gőzölgött ki a magmából az a mennyiség, amely később a világoceánt alkotta.

Csökken a légkör hőmérséklete, ami a vízgőz egyre nagyobb mértékű kiválásához, meleg esők lezúdulásához vezetett. Az egyenetlen földkéreg mélyedéseit kitöltötte a víz. Több millió év alatt kialakult az ősoceán. *A víz az élet számára alapvetően szükséges, de még nem elegendő feltétel volt.*

Miután a lehüléssel a kőzetlemezek egyre vastagabbak lettek, így a belső hő felszíni szerepe lecsökkent, a meteoritbecsapódásokból származó energia ugyancsak mérséklődött, a napsugárzás is jóval (kb. 25%-kal) kisebb energiájú volt, mint ma, szükségszerűen le kellett hűlnie a Földnek. Sőt, ha csak ezeket a felsorolt tényezőket vennénk figyelembe, a víznek jéggé kellett volna fagyania.

Az élet feltételeinek megteremtése szempontjából volt egy igen fontos, kedvező körülmény a légkörben. Az akkori alapvető gázok egy része az ún. üvegházhatású gázok közé tartozott.

Meghatározó volt a CO₂, amely 4 milliárd évvel ezelőtt a maihoz képest több-ezerszeres koncentrációban volt jelen, s a napsugárzásból származó hő jelentős részét csapdába ejtette. Ennek hatására melegebb volt a földfelszín akkor, mint napjainkban.

A viszonylag magas hőmérséklet, a víz és a légköri gázok jelenléte sokféle kémiai és fizikai folyamat számára biztosított kedvező feltételeket. Elektromos légköri kisülések (villámlások), a víz és a légkör szén-dioxidja közötti kémiai reakciók szinte folyamatosan végbementek. Az elektromos kisülések változatos nitrogénvegyületeket, a víz és szén-dioxid közötti reakciók szénsavat, ez utóbbinak a szilikátos kőzetekkel történő érintkezése pedig karbonátos kőzetek létrejöttét eredményezte. A légkörből a szén-dioxid így fokozatosan a földkéregbe vándorolt, az üvegházhatás mérséklődött. A felszíni hőmérséklet tovább csökkent, ami jótékonyan hatott az élet feltételeinek kialakulására.

A Nap ultraibolya sugárzása azonban még mindig igen erős volt. Nem létezett az ózonpajzs. Ez valószínűtlenné teszi, hogy az élet a szárazföldön keletkezett volna. A víz azonban némi védelmet nyújtott a gyilkos sugarak ellen. Kb. 10 m vastag vízréteg annyira megszűri az ultraibolya sugarakat, hogy ilyen mélységben már életben maradhatnak kezdetleges élőlények.

1.3.1.2. Az élő Föld

1.3.1.2.1. *Az élő anyag sajátosságai, élet a vízben*

A Föld fejlődésének minőségileg új szakasza kezdődött el az élet megjelenésével. Az élet kialakulására számos hipotézist alkottak meg a tudósok. Nem tartjuk feladatunknak, hogy ezeket ismertessük, mert számunkra az eredmény fontos: kb. 3,5–3,8 milliárd évvel ezelőtt megjelent bolygónkon az élet néhány primitív formája, s az élő anyag minőségileg másképp viselkedett, mint az élettelen. Környezeti szempontból a legfontosabb különbségnek az *aktív anyagcserét* tartjuk. Az élőlények az anyag instabil formáját képviselik, amely csak addig marad fenn, míg környezetéből anyagot és energiát vesz fel. A felvett anyagok egy részét minden élőlény átalakítás után beépíti testébe, más részéből energiát nyer, és azt felhasználja szervezete működéséhez. Végül a számára haszontalan anyagokat és némi „hulladék-energiát” visszajuttat a környezetbe. Tehát más anyagok kerülnek be az élő szervezetbe, mint amelyek elhagyják azt, így az szükségszerűen átalakítja környezetét. További környezetmódosítást eredményezhet az is (ez már nem minden élőlényről mondható el), ha az élőlény anyagcseretermékei maradandó vázanyagot alkotnak, amely az élőlény elhalása után tartósan fennmaradnak. Ilyenek pl. a tengerben élő mészvázás állatkák, amelyek tömeges elhalásával a

földtörténeti múltban egyes területeken olyan mennyiségben halmozódott fel a CaCO_3 , hogy az később felgyűrődött hegységek meghatározó kőzetanyaga lett.

Az élet több, mint 3,5 milliárd éve a vízben alakulhatott ki, s legalább 10 méter mélyen, mert csak ilyen vastag vízréteg védte meg a sérülékeny mikroszervezeteket a gyilkos ultraibolya sugaraktól. Az első fotoszintetizáló vízi szervezetek csekély mennyiségű szén-dioxidot vettek fel a vízben oldott gázok közül, és kevés oxigént juttattak a vízbe. Ez az oxigén azonban jelentős részben a vízben oldott állapotban lévő vassal reagált, és a vas-oxid leülepedésével ún. sávos vasérc jött létre. Kb. 2,7 milliárd évvel ezelőtt a jelenlegi oxigéntartalomnak csak mintegy 0,1%-a lehetett a légkörben. Ezt az oxigénszintet **Urey-pontnak** nevezzük.

1. táblázat. A földtörténeti korbeosztás

Millió év	Időszak	Kor	Idő	
0,01	Negyed-időszak	Holocén	Újidő	
		Pleisztocén		
1,8	Pliocén			
5,2	Miocén			
23	Oligocén			
34	Eocén			
55	Paleocén			
65	Kréta			Középidő
146	Jura			
208	Triász			
245	Perm		Óidő	
290	Karbon			
363	Devon			
409	Szilur			
439	Ordovícium			
510	Kambrium			
570	Prekambrium			
4600				

Amikor a vasércképződési folyamat lelassult, több oxigén oldódott a vízben, s onnan az ősléggel folytatott gázcsere során egyre több került a légkörbe. (A légkör és az óceánok hatalmas vízfelülete között mindig is folyamatos gázcsere zajlott, és jelenleg is zajlik.) A kambrium kezdetére a légkör oxigéntartalma 0,2%-ról 1%-ra emelkedett. Ezt az 1%-os szintet **Pasteur-pontnak** nevezzük. (A földtörténeti korbeosztást az *I.* táblázat tartalmazza.) Az élőlények ilyen légköri oxigéntartalomnál már áttérhettek a légzésre, amelynek során egy nagyságrenddel nagyobb energia szabadul fel, mint az eddigi fermentációval.

A vízi élővilág nagyon változatos lett. Fajok keletkeztek és kihaltak. Kialakultak a már elég bonyolultnak mondható táplálékláncok. Egyes időszakokban hirtelen sokkal nagyobb számú faj pusztult ki, mint amennyi a békés evolúcióban megszokott volt. Különösen sok faj tűnt el örökre a világóceánból az *ordovícium* végi jégkorszakok idején.

1.3.1.2.2. A szárazföldi élővilág és a kihalások

Az ordovícium végén lejátszódó jégkorszak(ok) elmúltával a világtenger szintje ismét megemelkedett, a hőmérséklet kellemesebbé vált. A szárazföldek alakja, mérete nemcsak a tengerszint emelkedése miatt változott, hanem az akkori kőzetlemezek lassú vándorlása, egyesek egyesülése, mások eltávolodása következtében is.

Az újra melegebbé váló környezetben az élővilág fejlődése ismét felgyorsult. A szilúr időszak legjelentősebb változása a növények gyors fejlődése és szárazföldi elterjedése volt. Ez megteremtette a szárazföldi állatvilág kialakulásának feltételeit is.

Az élővilágnak szüksége volt valamiféle védelemre a Napból érkező halálos ibolyántúli sugárzás ellen, csak így hódíthatták meg a szárazföldet. Ezt a védőpajzsot maga az élővilág teremtette meg. A fotoszintetizáló élőlények kialakulásuktól kezdve termelték az oxigént, amely eleinte a földkéreg anyagaival lépett reakcióba, kőzeteket, ásványokat alkotva. Ez a magyarázata, hogy nagyon hosszú ideig a légköri oxigéntartalom alig nőtt.

Amikor azonban az oxigén már mindent oxidált a földfelszínen, amit csak lehetett, mennyisége gyorsabb ütemben kezdett növekedni a légkörben. Az ultraibolya sugárzás ellen védelmet nyújtó ózon pedig a kétatomos oxigénmolekulákból származik: fény hatására a molekulák egy része elbomlik, s az egyedül maradni képtelen oxigénatom egy háromatomos, bomlékony molekulát alkot a kétatomos molekulához kapcsolódva. Ez az ózon, amely szüntelenül képződik és elbomlik, ily módon mégis állandóan jelen van a légkörben, máig a szárazföldi

élővilág védelmezője. Miután a fenti módon létrejött az **ózonpajzs**, minden feltétel biztosítva volt a szárazföldi élet számára.

Végső soron tehát az élővilág maga teremtette meg szárazföldi elterjedésének legfontosabb feltételét. Az egyre több növény egyre nagyobb mennyiségű oxigént juttatott a légkörbe. A szilur időszak végén a légkör oxigéntartalma már a mai érték 10%-a lehetett.

Az élettelen és élő természet kölcsönhatása abban is megnyilvánult, hogy a kőzetek felszíne, amely a növények szerves tápanyagait szolgáltatta, a gyökerek és a növénymaradványok hatására talajjá alakult. A *talaj* ismét új minőségű környezeti tényező, amely termékenyebb a kőzeteknél, és biztosítja a magasabb rendű növények megtelepedését.

A növényeket rövidesen az állatok követték a szárazföldön: az ízeltlábúak voltak a legsikeresebbek, de a növekvő légköri oxigéntartalom a tüdőshalak és a kétéltűek őseinek kialakulását is lehetővé tette.

A földtörténet során a karbon időszakban volt a legnagyobb mennyiségű oxigén a légkörben, akkor meghaladta a mai értéket is. A hatalmas növénytömegeből igen sok kőszén keletkezett. A szárazföldön is egyre bonyolultabb táplálékláncok, ökológiai rendszerek alakultak ki. *Teljessé vált a bioszféra abban az értelemben, hogy az élővilág benépesítette az egész Földet, és az élettelen környezettel sokoldalú kölcsönhatásban egységes élő rendszerré alakította.*

A földi élővilág fejlődése új és új fajok megjelenésével s egy idő után azok kihalásával jellemezhető. A keletkezés és kihalás legalább három és fél milliárd év óta folyamatosan, de nem egyenletesen zajlik. Hosszú időszakot elemezve arra a következtetésre kell jutnunk, hogy mindig több új faj keletkezik, mint amennyi elpusztul. De egyes rövidebb időszakokban a folyamat átmenetileg megfordul: geológiai értelemben rövid idő alatt (ez lehet néhány százezer év vagy annál hosszabb idő is) nagyon sok faj kihalt, s ilyenkor az új fajok kialakulása nem tud lépést tartani a pusztulással.

Az is megfigyelhető azonban, hogy egy-egy ilyen krízis elmúltával, mintha az élet pótolni akarná a veszteségeket, felgyorsul az élővilág differenciálódása, s nemcsak eléri a korábbi fajszaámot, hanem lényegesen meg is haladja azt.

Ez történt a perm végi – eddigi ismereteink szerint legnagyobb – kihalás után is. Az élővilág fokozatosan magához tért, s a földtörténeti középidőre (mezozoikum) az állatvilágban *a hüllők (a közismert dinoszauruszok) váltak uralkodóvá*. A földtörténeti középidő végére már sokkal több faj élt, mint a perm végén. Ehhez az is hozzájárult, hogy a globális éghajlat 100 millió éven át nagyon kedvező volt a hüllők számára.

A középidő végén (65 millió évvel ezelőtt) ez a tobzódóan változatos állatcsoport szinte uralkodásának csúcsán véglegesen eltűnt a Földről. Kevésbé közismert, de ekkor sok tengeri faj is kihalt: közöttük a több, mint 300 millió éven át létező puhatestű állatok, az ammoniteszek. Mi lehetett ennek az oka? Egyáltalán mi a magyarázata, hogy egyes időszakokban tömegesen pusztultak ki addig virágkorukat élő állat- és növényfajok?

Ma sok kutató Földön kívüli okokkal magyarázza ezeket a földtörténeti tragédiákat. Tudjuk, hogy a Naprendszerben vannak kisbolygók és üstökösök, amelyek időnként keresztezik a Föld keringési pályáját. Kézenfekvőnek látszott tehát a feltételezés: ha *égitestek becsapódása* okozza a nagy kihalásokat, akkor valamilyen szabályszerűség szerint kell, hogy bekövetkezzenek, hiszen az égi mechanika szigorú törvények szerint működik: a kisbolygók és üstökösök keringési ideje jól számítható, pályájuk meghatározható.

A kutatók tehát megvizsgálták a kihalások gyakoriságát. A **4. ábra** láthatjuk az elmúlt 550 millió év fajkihalásainak változását. Első ránézésre nem sok szabályosság fedezhető fel a diagramon. Az értékelés során azonban nem volt közömbös, hogy milyen élőlénycsoportok és mely fajok tűntek el a Földről, tengeriek vagy szárazföldiek stb. A szakemberek matematikai módszerekkel elemezték az ősmaradványok végleges eltűnését az egyes földtörténeti korokat jellemző rétegekből, ill. az ezzel kapcsolatos összes adatot.

Ma közel 150 becsapódási krátert ismerünk. Ez már elég nagy szám ahhoz, hogy statisztikai értékelést is elvégezzünk. Meg kell vizsgálnunk az alábbi kérdést: Van-e összefüggés a kihalások mértéke és a kráterátmérők között? Másképp fogalmazva: Kis meteorit hoz kis kihalás, nagy meteorit hoz nagy kihalás tartozik-e? A statisztikai számítás jó összefüggést mutatott, de ha a legnagyobb kihalás esetét konkrétan megvizsgáljuk, már kételkednünk kell a törvényszerű összefüggésben.

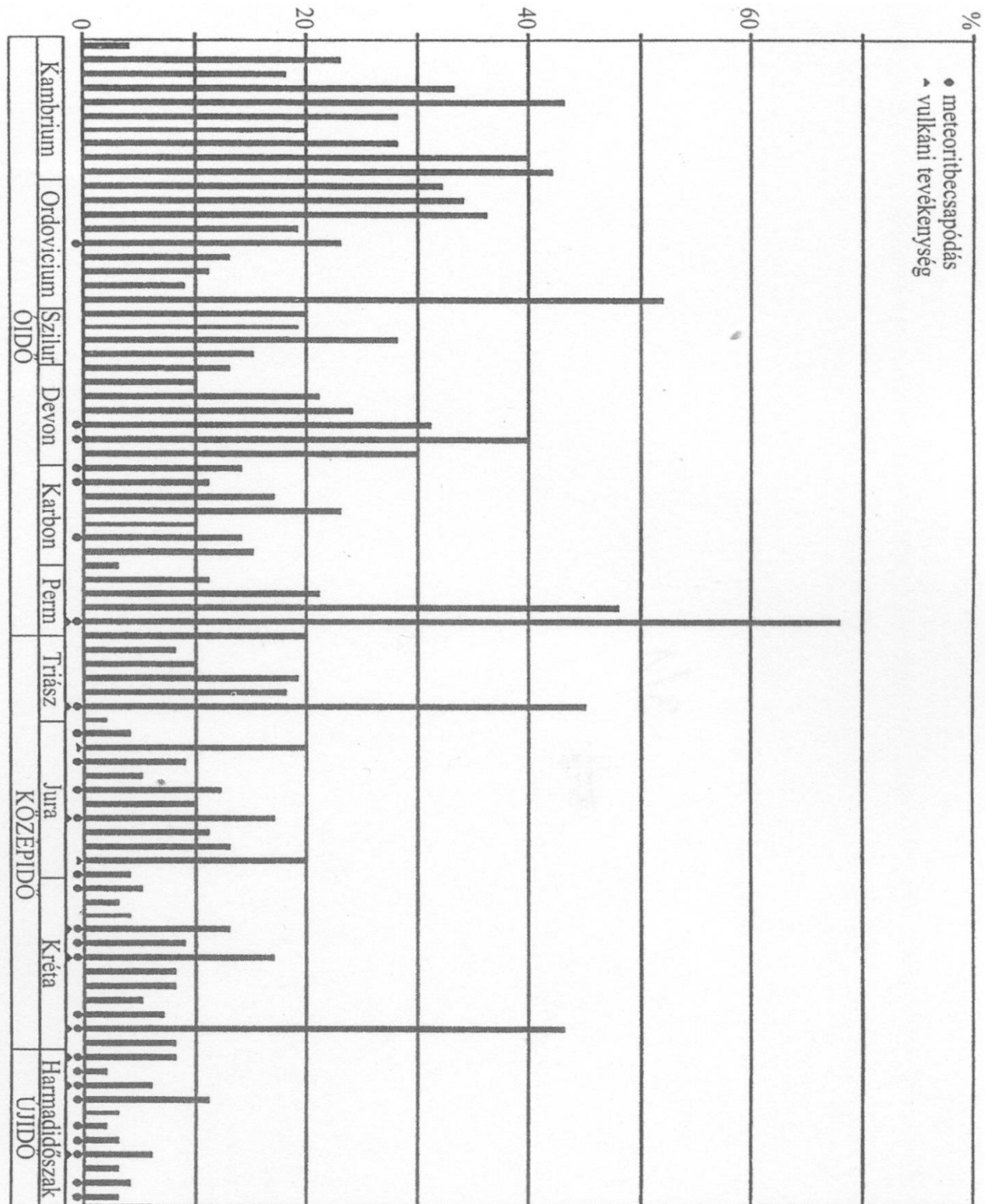
A perm elején – az óidő teljes időtartamával összehasonlítva – a legkevesebb faj pusztult ki, tehát nagyon békés időszakknak tűnik, a perm végén viszont a valaha észlelt legnagyobb krízis érte az élővilágot. Mindkét időszakhoz egy-egy kisebb és egy-egy nagyobb meteoritkráter társítható, vagyis hasonló külső hatások – ha egyáltalán ezek voltak a kihalás okozói – egészen más végeredményre vezettek.

Az ilyen ellentmondások sok kutatót arra ösztönöztek, hogy egyéb okokat is keressenek az élet fejlődését meg-megszakító lehetséges események sorában. Be kell látnunk, hogy a globális földi rendszer sokkal bonyolultabb annál, hogy csak egyetlen tényező jöhetne számításba az élet súlyos kríziseinek okaként.

A perm végi nagy kihálás a szibériai platóbazaltok képződésének idejére esik, s ha ehhez számítjuk hozzá a két nagyobb meteorit-bechapódás következményeit, akkor az *együttes hatások* már hihetőbben vezethetnek komoly kiháláshoz, hisz a vulkanizmus *hosszú ideig* intenzív volt, míg a meteoritok robbanása pillanatokon belül lejátszódott.

Számos egyéb tényezőt és kihálási mechanizmust is elemeztek a kutatók. Érdeemes szót ejtenünk az élővilág fejlődésének modern elméletéről. Az evolúció nagyobb külső hatások nélkül úgy működik, hogy a környezethez legjobban alkalmazkodott, jó génekkel rendelkező fajok túlélnek a kevésbé rátermetteket (rossz génekkel rendelkezőket), azaz ez utóbbiak kihálnak, az előzők tovább fejlődnek. Ez a fejlődési modell nem ad magyarázatot arra, hogy a legdrasztikusabb kihálások során miért éppen az addig virágzó csoportok tűnnek el (lehet, másokkal együtt) az élők sorából.

A rendszerszemléletű ökológusok egy része hajlik afelé, hogy *a kihálások fő okát magukban az élő rendszerekben keresse*. A rendszerek létezése és működése magában hordozza az összeomlás lehetőségét. Említettük már a táplálékláncokat, amelyek a fejlettebb ökológiai rendszerekben *táplálékhalózáttá* bővülnek. Az élővilág tagjai egymásra vannak utalva. Elképzelhető a fajok olyan mértékű egymásrautaltsága egy élő rendszerben, hogy a rendszer egyetlen elemének kiesése (egy faj kihálása) sok másik pusztulását okozza: a „rendszer összeomlik”. E felfogásnak nagyon lényeges mondanivalója van a jelenre nézve. Az ember egy-egy fajt, amely számára élelmiszerként vagy nyersanyagként fontos, olyan mértékben pusztít, hogy annak kihálását maga idézi elő. E fajnak a pusztulása az ökológiai rendszerben elfoglalt helyétől függően láncreakciószerű hatást is kiválthat, s ebben az esetben tömeges kihálás lehet a végeredmény.



4. ábra. A világ fajainak kihalása százalékban a kambriumtól a negyedidőszakig (Palmer, 2000 nyomán, módosítva)

A földtörténet nagy kihalási időszakai minden esetben jelentős környezetváltozásokkal esnek egybe, tehát az alapvető okokat a környezetben kell keresnünk. Biztosra vehetjük, hogy a tömeges kihalások nem vezethetők vissza egyetlen okra, hisz a Földön lezajló minden jelentős változás összefüggésben van sok egyéb változással: a vulkanizmus közvetlen pusztulást is okoz, de a kiszórt por és hamu, a légkörbe került CO₂ éghajlatváltozásokat, ez a tengervíz

szintjének ingadozását, ami a szárazföldek méretének változását eredményezi; a kén-dioxid pedig savas esők hullásához vezet. Mindez az ökológiai rendszerek érzékenységtől függően láncreakciószerű pusztulást idézhet elő az élővilágban, avagy stabil ökológiai rendszerek esetén a pusztulás kisebb mértékű lehet a vártnál.

Ez magyarázatot adhat arra, hogy néha drasztikusabb külső hatás kisebb pusztulással jár együtt, míg más esetben akár csekély külső hatásra is lavinaszerű összeomlás következhet be.

1.3.1.2.3. *Élet az újidőben, a mai ember elődeinek megjelenése*

Az újidő során a szárazföldeken a dinoszauruszok kihalásával újult erővel indult meg a harc az élőhelyekért. A sikeres állatcsoportok közül az *emlősök*, a *madarak* és egy alacsonyabb rendű osztály, a *rovarok* emelhetők ki. A növények közül a *virágos növények* váltak uralkodóvá. A tengerekben a csontos halak és a cápák lettek a domináns élőlények, és itt is megjelentek az emlősök: először a bálnák, majd a delfinek. Fokozatosan kialakult tehát a mai élővilág, de az ember csak a legutolsó szakaszban lépett a színre.

A megváltozott *tengeráramlások*, a *szárazföldek átrendeződése* a lemeztektonikai folyamatok hatására s nem utolsósorban az időnként meg-megerősödő *vulkanizmus* gyakran változó éghajlati feltételeket eredményeztek. A szárazföldek szétszakadása, majd más formában történő egyesülése a szárazföldi fajokat állandó alkalmazkodásra készítette, ill. hol elősegítette, hol akadályozta elterjedésüket.

Az emlősök közül eleinte a denevérek és a rágcsálók voltak sikeresek, de az ember kifejlődése szempontjából a főemlősök megjelenése a döntő. A fán élő lemurszerű főemlősök már 45–50 millió évvel ezelőtt éltek a trópusi erdőkben. A főemlősök képesek voltak hüvelykujjukat szembeállítani a többi ujjukkal, s ez eleinte csak a kapaszkodást segítette, később azonban az eszközhasználatot is lehetővé tette.

A harmadidőszak első felét ugyan még a meleg és nedves éghajlat jellemezte, de kb. 25 millió évvel ezelőtt Földünk hidegebb és melegebb időszakok váltakozásával mégiscsak hűlni kezdett. Az Antarktisz lassan a mai helyére vándorolt (leszakadt a korábbi, egységes kontinensről), és rajta jégsapka kezdett kialakulni. A jég képződéséhez szükséges víz az óceánokból származott, azaz a világóceán szintje fokozatosan süllyedt, a szárazföldek területe nőtt. A kialakult hegységrendszerek is hozzájárultak a klímamódosuláshoz, hisz a különböző hőmérsékletű légtömegek keveredését vagy akadályozták (Ázsia), vagy lehetővé tették (É-Amerika).

Az egyre hűvösebb klíma jellegzetessége volt, hogy a szélesedő mérsékelt övezetben *az évszakok egyre kifejezettebben elkülönültek egymástól*, a kontinensek belső területein pedig fokozódott a szárazság. A magas hegységek kialakulásával tovább gyarapodtak az eltérő adottságú élőhelyek s ez hozzájárult az élővilág további differenciálódásához.

A növényeknek fennmaradásuk érdekében “meg kellett oldaniuk” az egyszeri alkalommal történő virágzást és olyan magok létrehozását, amelyek képesek átvészelni a száraz és/vagy hideg évszakot. A fűfélék alkalmazkodása bizonyult a legsikeresebbnek: az erdők területe lényegesen csökkent, a füves puszták és a szavannák terjeszkedtek. Ez viszont a növényevő emlősöknek kedvezett: lovak, rinocéroszok, új kérődző növényevők, mint a szarvasok, tevék, különböző antilopok jelentek meg a füves élőhelyeken.

Az erdők visszahúzódása – feltételezések szerint – a főemlősök fejlődését is elősegítette, hisz egy részüknek a nyitott szavannákra kellett kimerészkedniük, s ott a két lábra állás sikeresebb alkalmazkodást jelentett, mivel a mellső végtagokkal egyéb feladatokat is végre tudtak hajtani, mint a helyváltoztatás. Ez is hozzájárulhatott az eszközhasználat terjedéséhez.

Mintegy 3 millió évvel ezelőtt az éghajlat egyre erősebben lehűlt. Ehhez hozzájárult Észak- és Dél-Amerika összekapcsolódása egyetlen kontinenssé. (Közép-Amerika csak ekkor emelkedett ki a tengerből.) A meleg trópusi áramlatok így nem tudtak eljutni az Atlanti-óceántól a Csendes-óceánba, hanem észak felé fordultak, és ott megnövelték a csapadék mennyiségét. Az általános lehülés miatt, amelyhez csillagászati okok is hozzájárultak, ennek egyre nagyobb része hó formájában hullott, ami növelte a hó- és jégfelszínt, ez pedig nagyobb arányban verte vissza a beérkező napsugárzást, így tovább fokozva a lehülést. Az ilyen hatássorozatot *pozitív visszacsatolásnak** nevezzük. Az Antarktiszon ugyancsak egyre vastagabb jégtakaró képződött, a két pólus felől tehát erősödött a hűtő hatás. Mindezek mellett csillagászati okokból csökkent a sarkok környékére érkező besugárzás, így a negyedidőszak kezdetére (1,8 millió évvel ezelőtt) *új jégkorszak* köszöntött be, s ez beszűkítette az addigra kialakult élővilág élőhelyeit. Európában például az egész Skandináviát és a kontinentális törzs északi részét összefüggő jégtakaró borította: legnagyobb kiterjedése idején Lipcse és Drezda vonaláig húzódott. A helyenként 3000 m vastag, lassan mozgó *jég könyörtelenül letarolt mindent*, ami korábban létezett kontinensünk északi részén. Nemcsak a növényzet, hanem a talaj is elpusztult a jéggel borított területen.

A jégkorszak idején sem volt azonban folyamatos a hideg: a hosszú jeges (glaciális) időszakokat rövidebb enyhébb időszakok (interglaciálisok) szakították meg, s ilyenkor az élővilág újra igyekezett meghódítani a felszabaduló élőhelyeket.

A jégtakaróktól távolabb a szárazföldi élővilág számára kedvező változások is végbementek: a világtenger szintje jó 100 méterrel alacsonyabbra süllyedt a maihoz képest, így a tengerek peremi részei szárazra kerültek, s egyes helyeken a szomszédos kontinensek vagy szigetek összekapcsolódtak. A földhidak közül az indonéziai (Ausztráliát keskeny, áthidalható tengersizoros választotta el Indonéziától) valamint az Ázsia és Észak-Amerika (Alaska–Czukcs-félsziget) közöttiek voltak igen fontosak az élővilág, s ezen belül emberelődjeink terjeszkedése szempontjából.

De az élőlények a jégtakarók peremén is eredményesen küzdöttek fennmaradásukért. A magasabb rendű állatok például vastag prémes bundát fejlesztettek, s az elviselhető nyári hónapokban zsírréteget raktároztak testükben, hogy a hideg ellen védekezzenek, illetve télire energiát biztosítsanak életben maradásukhoz. A gyapjas mamut, a gyapjas orrszarvú, továbbá a barlangi medve, az óriásszarvas és a pusztai oroszlán ennek a hideg környezetnek voltak a közismert képviselői.

Ebben a barátságtalan időszakban az egyik ragadozó olyan ügyesnek és életképesnek bizonyult, hogy még a nála hatvanszor súlyosabb mamutot is képes volt elpusztítani. Ez a ragadozó nem volt más, mint az ember. Több, mint 2 millió éve Kelet-Afrikában alakultak ki az első, *Homo*-nak nevezett elődeink. Már a névadásban is tükröződik, mit tartottak fontosnak az antropológusok: az “ügyes ember” (*Homo habilis*) még nem lehetett nagyon okos, hisz 750 cm³-es agytérfogata lényegesen elmaradt a néhány százezer év múlva megjelenő „felegyenesedett ember” (*Homo erectus*) 1000–1300 cm³-es agytérfogatától.

Ez utóbbi volt az első *Homo* faj, amely elhagyta Afrikát és eljutott Ázsiába, sőt Európába is. (Igaz, ide csak 1 millió év elteltével.) Ez az elődünk már kőeszközöket készített, sikeresen terjeszkedett (pekingi ember, jávai ember), mégsem őt tartjuk a közvetlen elődünknek, hanem a „bölcsh embert” (*Homo sapiens*), aki feltételezések szerint a *Homo erectus* egyik csoportjából fejlődhetett ki. A *Homo sapiens alfaja a modern ember* (*Homo sapiens sapiens*) valamennyi ma élő ember őse.

Fajunk legidősebb földi maradványa Afrikából került elő, s több, mint 180 000 évesnek bizonyult. A többiekhez képest a modern ember igen gyorsan elterjedt a Földön: 50 000 évvel ezelőtt már Ausztráliába is eljutott, és 40 000 évvel ezelőtt már Eurázsia csaknem minden részén megtalálható. Körülbelül 15 000 évvel ezelőtt a Bering-szoroson is átkelt (száraz lábbal!), 12 000 évvel ezelőtt pedig már Dél-Amerikában is jelen volt (Chile: Monte Verde).

Az ember idővel megtanult tüzet gyújtani, testét állati bőrökkel fedni, táplálékát megsütni. Az ember gondolkodott, képessé vált a világ megismerésére, és ismeretei révén saját életét

igyekezett könnyebbé tenni. A gondolkodás megjelenési formája, a *nyelv* s annak hallgató hangokkal történő megnyilatkozása, a *beszéd* az egymás közötti *kapcsolatteremtést* segítette, és ez többek között a vadászatot sikeresebbé tette, hisz csoportosan és összehangoltan támadhattak a kiszemelt vadra.

A „bölcsh ember” e képességei egyáltalán nem tették kíméletessé sem a táplálékul szolgáló állatfajokkal, sem pedig saját rokonaival szemben. A korábban egyes területeken elterjedt Homo-fajokat és alfajokat kiszorította vagy kiirtotta, hogy ő birtokolja a vadászterületeket. Valószínűleg így tűnt el Európából (és a Föld felszínéről) a neandervölgyi ősember. A Homo sapiens pedig töretlenül fejlődött és terjeszkedett tovább.

A kommunikáció magasabb szintje a *művészet*. Az életért és az élelemért folytatott hétköznapi küzdelem mellett elődeink valami olyasmit produkáltak, amelyre egyetlen más élőlény sem volt képes: tudatosan hoztak létre művészi alkotásokat. A rajzoknak, festményeknek jelentésük volt, a művész közölni akart valamit a társaival, s ehhez szimbólumokat használt. Franciaországban a La Baume Latrone barlangban mamutot, a Rouffignac-barlangban orrszarvút ábrázolt az ősi művész. Világhírűvé váltak a spanyolországi barlangok sziklafestményei, mint pl. Altamira és Alpera.

Alkotómunka és pusztítás: az ember kezdetektől fogva e végletek közt tevékenykedett. Eltérő ugyan a szakemberek véleménye arról, hogy milyen mértékben volt szerepe több állatfaj kipusztulásában, de kétségtelen tény, hogy amelyik kontinensen megjelent, előbb-utóbb több faj kipusztult.

Mielőtt a Homo sapiens termelő társadalmakba szerveződött volna, életére világszerte a *vadászó-gyűjtögető életmód* volt jellemző. A gyűjtögetés egyáltalán nem volt káros hatással a természeti környezetre, hisz a növényi részeket olyan mennyiségben fogyasztotta el, ami nem zavarta a természet megújulását. A vadászat azonban több állatfaj kipusztulásához járult hozzá.

A **2. táblázat** érdekesnek tűnik, hogy az eljegesedési időszakokban gyakoribb a mamutok jelenléte Európában, mint a felmelegedések idején. A sztyeppei mamut az utolsó két interglaciálisban már hiányzott, míg a riss eljegesedéskor még jelen volt kontinensünkön. Gyapjas mamut egyetlen interglaciálisban sem volt Európában, viszont az utolsó két eljegesedéskor bizonyítottan élt itt is. Ez a faj valószínűleg erősebben reagált az éghajlatváltozásra, mint a sztyeppei mamut. Az erdei elefánt végleges eltűnésében bizonyára az ember játszotta a fő szerepet, hisz minden melegebb időszakban élt Európában, de a holocén felmelegedést már nem érthette meg.

2. táblázat. Néhány nagytestű növényevő faj jelenléte vagy hiánya Közép-Európában az utolsó három eljegesedés és interglaciális idején (Forrás: BÜNZEL-DRÜCKE et al. 1994 és 1995)

Faj	Eljegesedések és interglaciálisok						Holocén
	Cromer interglaciális	Mindel	Holstein interglaciális	Riss	Eem interglaciális	Würm	
vadló	+	+	+	+	+	+++	(+)
vadszamár	-	-	+	+	+	+++	-
orrszarvú	+	+	-	-	-	-	-
erdei orrszarvú	+	-	+	-	+	-	-
sztyeppei orrszarvú	-	-	+	-	+	-	-
gyapjas orrszarvú	-	-	-	+	-	+	-
déli elefánt	+	-	-	-	-	-	-
erdei elefánt	+	-	+	-	+	-	-
sztyeppei mamut	+	+	-	+	-	-	-
gyapjas mamut	-	-	-	+	-	+	-

1.3.1.3. A társadalmasított Föld

1.3.1.3.1. Az emberi társadalom kialakulása és hatása a környezetre

Mindenekelőtt arra hívjuk fel a figyelmet, hogy az élőlények között több olyan faj is létezik, amely közösségekben él, és egyes csoportjai között („társadalmi”) munkamegosztás alakult ki. Ilyenek pl. a „rovartársadalmak” (méhek, termeszek, hangyák), amelyekben katonák, dolgozók, herék és a királynő más-más feladatot lát el. Anélkül, hogy a rovertársadalmak és az emberi társadalom közötti különbséget teljes mélységében elemeznénk, társadalmunk leglényegesebb sajátosságait, amelyek megkülönböztetik az állatvilág társadalmaitól, röviden összefoglaljuk. Míg az állati társadalmak az egyedekben genetikailag kódolt munkamegosztáson alapulnak, az emberi társadalom tudásra, képességekre, részben pedig társadalmi helyzetre épülő munkamegosztással jellemezhető. A tudás megszerzésében nélkülözhetetlen az írás és olvasás képessége, melyet az egyének a tanulás folyamatában sajátítanak el. Ez a képesség további, magasabb szintű tanulásra teszi alkalmassá az embert, így a generációkon át felhalmozott

információkhoz is hozzájuthat az egyén, ha kellően tehetséges és szorgalmas. Az információk saját agyunkon kívüli rögzítése írásjelekkel, s a jelrendszer „dekódolása” (olvasás) alapján a valóság törvényszerűségeinek megismerése különleges (mai ismereteink szerint egyedi) képességekkel ruházta fel az embert: többek között azzal, hogy a törvényszerűségek ismeretében tudatosan megváltoztassa környezetét, új anyagformákat, pl. műanyagokat hozzon létre stb.

Az emberi társadalom a felhalmozott ismeretekre építve képes tudatosan megszervezni a munkamegosztást, szabályokat kidolgozni az adott társadalmi rendszer működéséhez, intézményeket és sajátos érdekeltségi viszonyokat létrehozni. Ilyenek pl. a gazdasági érdekek, amelyek közvetítő intézménye a pénz. De a művészet, a kultúra is az állati társadalmak fölé emeli az emberi társadalmat.

Mindezek ismeretében a továbbiakban csak az emberi társadalommal fogunk foglalkozni, s ha jelző nélkül használjuk a társadalom fogalmát, mindig ebben az értelemben értjük. Látnunk kell, hogy a társadalom fentebb ismertett sajátosságai hosszú fejlődés eredményeként alakultak ki. Fejezetünkben ezt a folyamatot kívánjuk bemutatni a társadalom és környezete kölcsönkapcsolatát helyezve a középpontba.

Az emberi faj fejlődése, mint azt az előző fejezetben láttuk, majd társadalomba szerveződése az egyes emberek élettartamához képest hosszú időtartamot ölelt fel. A társadalom fejlődéséhez a pleisztocén jégkorszak utáni kedvező éghajlati feltételek nagyban hozzájárultak. Az enyhébbé vált éghajlat kedvezett a növénytermesztésnek.

12–10,5 ezer évvel ezelőtt már gabonaféléket termesztett az ember, további ezer év elteltével pedig borsót és lencsét is. Eszközeit fából és pattintott kövekből készítette egyéb növényi részek (pl. indák) felhasználásával. A vadon élő állatok egy részét házasította: a szarvasmarha, a disznó és a kecske élelemforrásként valamint ruháik alapanyagaként, a kutya a még mindig fontos vadászatban segítőtársaként szolgált.

Ezt az időszakot **mezőgazdasági forradalomként** szokták emlegetni, s tegyük hozzá: az ember és környezete viszonyában is minőségi változást hozott. Forradalmi volt a változás, mert a növénytermesztés az első igazi *termelő munka*. Ez tette lehetővé, sőt szükségessé kisebb-nagyobb emberi közösségek *letelepedését*: az ember a termőföld közelében *építette* az első állandó *településeket*, az ovális házakból álló falvakat, mint pl. Jerikót. (Korábban sátrakat, esetleg földbe ásott kunyhókat épített a cro-magnoni ember.) A településeken raktározni tudta a termést, el tudta vermelni az élelmiszert, vagyis fel tudta halmozni a megtermelt javakat.

Az a jelentéktelennek látszó, kőből készített eszköz, amellyel a “gyomnövényeket” kiirtotta, a talajt fellazította, a környezetre gyakorolt hatás szempontjából is *minőségileg újat hozott*. Tudatosan *pusztította* azokat az élőlényeket, amelyek számára *haszontalanok* voltak, és védte azt a néhányat, amely számára *hasznos* (fogyasztható, felhasználható) volt. Ezzel az emberi tevékenységgel *elkezdődött egy folyamat, amely ma is tart: az élővilág változatosságának csökkentése*. Ahhoz ugyanis, hogy *egyetlen növényfajt* természetesen egy kis területen, *néhány százat kellett elpusztítania* ugyanott. A szárazföldek felszínéhez képest ez eleinte nem jelentett nagy veszélyt az élővilágra, mert a fajok megszámlálhatatlanul sok képviselője élt másutt. Csakhogy az ember terjeszkedett, s mindig a legtermékenyebb talajokat kereste, így bizonyos növénycsoportok, s a hozzájuk társuló állatok egyre nagyobb veszélybe kerültek. Ugyanakkor a mezőgazdasági területek egyes fajok elterjedésének (pl. gyomok) tág teret engedtek, s így *helyenként és időnként a fajszám nőhetett is*.

Az ember azzal, hogy betakarította a termést, beleavatkozott egy másik természetes folyamatba, megzavarva azt. Természetes körülmények között ugyanis a mérsékelt övezet gyepes, füves területein, de a trópusok félszáraz övében is évente elhal a növények túlnyomó része, s a növénymaradványok a talajba, ill. a talajra kerülnek. Ebből lesz a *humusz*, amely a talaj termékenységének legfőbb hordozója. Mivel az ember *eltávolította* a nemkívánatos növényeket, a természetett növényt pedig ritkábban ültette, hogy jobban nőjön, továbbá szerves anyagának nagy részét élelemként elfogyasztotta, vagy más célra használta (pl. a szalmát alomnak), *a talajba sokkal kevesebb szerves anyag került vissza, mint természetes körülmények között*, így a *termőképessége fokozatosan csökkent*. A gyakori művelés a talaj szerkezetét is rombolta. A talajlakó élőlények egy része a kevesebb szerves anyag miatt, másik része a rendszeres bolygatástól pusztult el. Márpedig a talaj élővilágára ugyancsak szükség van a természetes termékenység fenntartásához! Mindezek hosszú távú következmények, amelyekből az ember eleinte semmit sem vett észre, de a természeti környezetre gyakorolt hatások ettől kezdve megállíthatatlanul gyarapodtak.

Mivel a növénytermesztés és az állattenyésztés biztosabb ellátást és több élelem előállítását tette lehetővé, mint a vadászat és a gyűjtögetés, *ugyanolyan kiterjedésű terület több embert tarthatott el*. Az állandó vándorlással szemben a biztonságosabb otthonok, a helyben lakás több gyermek születését tette lehetővé, s bár közülük sokan meghaltak, mégis gyorsabb ütemben szaporodott az emberiség, mint korábban.

A növénytermesztés és az élelmiszerek tartósítása, tárolása a korai technológiák fejlesztését igényelte. A *munkamegosztás* fokozatosan alakult ki: mesteremberek állították elő a

növénytermesztésben használatos szerszámokat, mások a tároláshoz szükséges agyagedényeket készítettek, voltak, akik a háziállatokkal foglalatostkodtak, megint mások ruhákat varrtak az állati bőrből. Minden mesterember igyekezett tudása legjavát nyújtani, és tökéletesíteni az általa előállított eszközöket. Kialakult a *cserekereskedelem* is, hisz csak így lehetett hozzájutni minden fontos eszököhöz.

Minden szempontból újat hozott a termelésben és az ember környezethez való viszonyában a fémek megmunkálása. Az Örmény-magasföldön és környékén, az Iráni-medencében, valamint Tháiföldön már 7-8 ezer évvel ezelőtt feltalálták a réz előállításának módját, majd viszonylag hamar rájöttek ötvözetének, a bronznak az előállítására. Kb. 3400 évvel ezelőtt sikerült Egyiptomban, Indiában és az araboknál az acél előállítása (“damaszkuszi kardok”). A “vaskor” beköszöntése azért volt fontos, mert ebből a fémből lehetett igazán hatékony fegyvereket és szerszámokat előállítani. A vasszerszámok új lendületet adtak a termelésnek.

A fémmegmunkálás számos durva környezeti beavatkozást tett szükségessé. Mindenekelőtt hozzá kellett jutni az érchez. Ezt akkor még csak *külszíni bányák* feltárásával lehetett megoldani, ami annyit jelentett, hogy a bánya területén és közvetlen környezetében *el kellett pusztítani növényt, talajt* egyaránt. Az érc olvasztásához sok energiára volt szükség. Ekkor még (és később is, még nagyon hosszú ideig) a fa volt az egyetlen energiahordozó. Eleinte szárított formában, majd elszenesítve (faszén) használták az ércek kiolvasztásához. Az ősi kohók környékén fokozatosan egyre nagyobb sugarú körben *kiirtották az erdőket*.

Az ércek olvasztása és a **fémek megmunkálása** az első olyan emberi tevékenységek, amelyek komoly **környezetszennyezést** okoznak. A mezőgazdasági eredetű hulladékok túlnyomó része lebomlik, átalakul, az állati trágyát a talaj termékenységének fokozására használják stb. Ilyen értelemben nem veszélyes szennyeződések. A fémmegmunkáláskor azonban mérgező gázok szabadulnak fel, és a mikroszkopikus fémrészecskék ugyancsak veszélyes környezetszennyezők.

A fémek megmunkálásával tehát az ember elkezdte a környezetszennyezést. Természetesen ezt ő nem akarta, ő csak többet akart termelni, jobban akart élni, mint elődei. A környezetkárosítás és önmaga veszélyeztetése (a “széngáz” elsősorban a közelben dolgozók szervezetét terhelte) a fémmegmunkálás szükségszerű mellékhatása volt.

Mintegy 6000 évvel ezelőtt a Nílus, a Tigris és az Eufrátesz, az Indus és a Sárga folyó mentén rabszolgatartó társadalmak szerveződtek, közigazgatással, szigorú társadalmi rétegződéssel. A papság különleges helyet foglal el a társadalomban: a világi hatalom fölé emelkedett, miközben a tényleges hatalmat a fáraó vagy más világi vezető gyakorolta. Létrejött az állam

erőszakszervezete, a katonaság. Ettől kezdve a társadalom működésének meghatározója a hatalom lett. E társadalmak *városokat* építettek, amelyek a közigazgatás, a kézműipar és a kereskedelem központjai, míg a kisebb települések, a falvak a mezőgazdaságban dolgozók lakóhelyei. A társadalmi munkamegosztás kezdetei óta kialakul a *tulajdon*, s a társadalom tagjai erősen differenciálódnak tulajdonuk szerint is.

A folyó menti kultúrák fejlődése a természeti környezet adottságaitól is erősen függött. Maga az a tény, hogy folyók mentén alakultak ki, mutatja a víz meghatározó szerepét a társadalom életében. Az ivóvíz biztosítása mellett a termékenységet növelő áradások és az öntözővíz egyaránt létkérdés volt a gyarapodó lakosság eltartása szempontjából: pl. a Nílus fekete áradása a humusz hordalék szétterítésével növelte a talaj termékenységét.

Az **öntözés** ismét *minőségi változást* hozott az ember környezethez való viszonyában. Tudjuk, hogy már ötezer évvel ezelőtt csatornákat ástak a földeken, és emelőkkel biztosították az öntözővíz utánpótlását a folyó(k)ból. A száraz és félszáraz – ugyanakkor meleg – környezetben ez óriási felfedezés volt, hisz a növények rendszeres vízellátásával nemcsak több termést lehetett betakarítani, hanem évente többször is arathattak, a termés nem függött a szeszélyes és igen gyér csapadéktól. Több generáció rendszeres öntözésének hatására következett be egyes helyeken a talajok „elsősodása”, amit ma másodlagos (emberi hatásra kialakult) szikesedésnek nevezünk. A sós talajok – a sók mennyiségétől és minőségétől függően – csökkent termékenységűek, vagy akár teljesen terméketlenné válhatnak.

Mindenesetre az embernek ekkor meg kellett (volna) tanulnia, hogy *cselekedeteinek, termelő tevékenységének néha vannak hosszú távú, nemkívánatos hatásai is.* A történelem azt bizonyítja, hogy *a előrelátó gondolkodás, a cselekvések távlatos hatásainak felmérése és figyelembe vétele a jelen tevékenységeinek tervezésénél mindmáig a legnehezebben megvalósuló kívánalmak közé tartozik.*

Az öntözés mellett a másik nagy mezőgazdasági találmánynak az *eke* bizonyult. Nagy területet viszonylag rövid idő alatt tudtak megművelni. Egyre újabb földdarabokat vontak művelés alá, ahol az eredeti növényzetet elpusztították, az élőhelyi adottságokat módosították. A természetes élőhelyek területe fokozatosan csökkent.

Az emberi megismerés a folyó menti kultúrákban igen magas szintre jutott. A társadalom szellemi elitje képessé vált a tudományos megismerésre. Őket még nem tudósoknak nevezték, a papok és az írástudók közül kerültek ki a tudománnyal foglalkozók. Persze a tudományos tevékenységeket leggyakrabban az élet, a termelés igénye ösztönözte újabb és újabb fejlődésre.

A periodikus természeti változások a szabályszerűségek felfedezéséhez vezettek. A Nap és a csillagok szabályos égi mozgásai, valamint a Nílus ugyancsak szabályos (de nem minden esetben törvényszerű) áradásai között valamiféle időbeli kapcsolat felfedezése gyakorlati haszonnal is járt: a termékeny elöntések időpontját előre lehetett tudni. Mivel a magántulajdonú földbirtokok határait az iszap évről-évre eltakarta, a földterületeket rendszeresen újra kellett mérni - mégpedig pontosan. Mindez a mérések és számítások elméletét és gyakorlatát egyaránt fejlesztette. Az ismereteket a mérnöki munkák során alkalmazni tudták.

A városok mérete egyre nagyobb lett, s a városi népesség lélekszáma is egyre nőtt. A társadalmi oldalról előnyös népességkoncentrációk környezeti szempontból közel sem jártak előnyökkel, sőt inkább komoly veszélyeket rejtettek magukban. *Rengeteg hulladék keletkezett mind az emberi fogyasztás során, mind pedig a termelés melléktermékeként.* A hulladékok és a szennyvíz elhelyezésére eleinte nem voltak megfelelő módszerek, és a betegségek terjedésének mibenlétével sem voltak tisztában az emberek. A járványok néha megtizedelték a lakosságot.

Az egyre nagyobb városokban már az ókorban megjelentek azok a tipikus környezeti gondok, amiket ma is a nagyvárosok alapvető környezeti problémáinak tartunk: a már említett hulladék- és szennyvízelhelyezés megoldatlansága mellett a „zajszennyezés” is előfordult, sőt néha a vízellátás sem volt egyszerű. A Római Birodalom fénykorában Róma lakóinak száma pl. elérte az 1 milliót. A mediterrán éghajlat sajátossága a nyári félév szárazsága, s ez a vízellátásban komoly fennakadásokat okozott volna, hisz a rövid folyókban ilyenkor alig csörgedezik a víz. Nagy mennyiségű víz tárolását kellett tehát megoldani, sőt mivel a folyók vize a mezőgazdasági területekről származó hordalékban gazdag volt, ivóvízként csak tisztítva lehetett felhasználni.

Nem véletlen, hogy a természetes ősi mediterrán erdők jelentős részét már az ókorban kiirtották, s a lejtőkről gyorsan lepusztuló talaj hiánya miatt a természetes növényzet nem tudott megújulni: helyén legtöbbször cserjés-bokros vegetáció telepedett meg. *A Földközi-tenger menti erdők jelentős részének elpusztítását a történelem addigi legnagyobb környezeti katasztrófájának tartjuk.*

Az emberiség lélekszáma folyamatosan emelkedett: a mezőgazdaság forradalmának idején kb. 10 millióan lehettek elődeink, időszámításunk kezdetére (tehát 8000 év alatt) 200-250 millióra nőtt a lélekszám. *Népességnövekedés, termelés, fogyasztás, természetpusztítás* – kulcsszavak az ember és környezete kapcsolatában. A történelmi ókor végére nemcsak létszámában, hanem „területhódításában” és a környezetre gyakorolt hatásában is olyan jelentőssé vált az emberi faj, hogy ettől kezdve joggal beszélhetünk „társadalmisított” Földről, hisz az emberi szükségletek

és igények által motivált termelés és fogyasztás a társadalomban egyre intenzívebbé vált, s környezeti hatása kiterjedt az egész bolygóra.

1.3.1.3.2. *A társadalom történetileg növekvő környezeti hatása*

Bár a történelmi középkor idején átmenetileg népességcsökkenés is előfordult, az emberiség környezetre gyakorolt hatása csak nagyon rövid ideig mérséklődött. A háborúk és járványok okozta népességcsökkenések idején a természetes ökológiai rendszerek gyors ütemben regenerálódtak. Ekkor mutatkozott meg először, hogy *az élővilág* – hacsak véglegesen el nem pusztítják – igen *nagy tűrőképességű*, s néha reménytelen helyzetekben is *megújulni képes*. Ez persze nem jelenti azt, hogy mindenütt visszaálltak az eredeti faji összetételű életközösségek – sőt ez nagyon kevés helyen következett be – de a fennmaradt élőlények képesek voltak újra benépesíteni a felszabaduló élőhelyeket. Az igen drasztikus pusztítások helyén (lepusztult mediterrán lejtők, külszíni bányák területe és környéke) ún. *másodlagos vegetáció** jelent meg: először *pionírnövények** népesítették be a csupasz kőzetfelszíneket, majd ezeket érzékenyebb fajok vastagabb, termékenyebb talajt igénylők követték. Átmenetileg néhány környezetkímélőnek tekinthető technikai találmány is mérsékelte a társadalom környezeti terhelését.

A 10–11. században már nagy mértékben hasznosították a *folyóvizek energiáját*. Igaz, hogy a 4. század óta működtek vízimalmok, de Európa egyes részein csak a 10. századtól terjedtek el igazán. Általában kis patakok vagy folyók vizét fogták munkára: leggyakrabban vízimalmokat működtettek velük, de a kézműipar sok más feladatára is alkalmasnak bizonyultak. Mindehhez nem volt szükség nagy duzzasztógátákra, nem hoztak létre hatalmas tavakat, így azok a kedvezőtlen ökológiai hatások, amelyeket ma a nagy vízlépcsők építésénél tapasztalunk, nem léptek fel.

Ugyanebben az időszakban építették meg az első *szélmalmost*, amelyek a 12–13. században terjedtek el, s ugyancsak környezetkímélő módon nyert energiát szolgáltatottak. Igaz, ezeket csak olyan helyeken volt érdemes működtetni, ahol igen gyakran fújtak a szelek, s lehetőleg irányuk is közel állandó volt. Nem véletlen, hogy a holland, dán és német tengerpartokon a tájkép részévé váltak.

A víz és a szél energiájának hasznosítása ugyan lokális szinten kedvező volt, de nem volt elegendő a társadalom energiaigényének kielégítéséhez. A fűtéshez, a fémipar ellátásához továbbra is a fát használták.

Valami új energiaforrásra is szükség volt a fémiparban, mert a faszén egyes területeken egyre nehezebben volt elérhető. Angliában már a 9. században volt külszíni *kőszénfejtés* fűtési céllal, a 12. században pedig a föld alatti szénbányászat módját is kidolgozták a mai Németország területén. A kőszén – minőségétől függően – mindig tartalmaz több-kevesebb kén, amelynek elégetésével kén-dioxid keletkezik, s ez a levegő páratartalmával savat alkot. A kőszéntüzelés a “savas esők” kialakulásának fő oka lett. A szén elégetésével sok korom, szén-dioxid, vagy ha az égés tökéletlen, az igen mérgező szén-monoxid kerül a levegőbe, s nagy mennyiségű szilárd salak marad a kályhában, kazánban, ami megnöveli a szilárd hulladék mennyiségét.

Eleinte a kőszén még kímélő hatással lehetett volna az erdőkre oly módon, hogy felváltja a fatüzelést, de a klasszikus ipari forradalom idején az emberiség újra növekvő lélekszáma, s a rohamosan növekvő energiaigénye, továbbá a fa sokoldalú hasznosítása az erdők visszaszorulásához vezetett. Európában ezer év alatt az erdőterületek fele, az Egyesült Államok területén háromszáz év alatt (az európai telepések terjeszkedése idején, 1620 és 1920 között) a természetes erdők négyötöde tűnt el a Föld színéről.

Az **ipari forradalom** alapvetően új vívmánya a *gépesített gyári nagyipar*. Ez vált a gazdaság meghatározó erejévé, s számos egyéb változást indított meg a társadalomban. Nagyarányú tőkefelhalmozáshoz vezetett, amihez fejlett kereskedelem és hitelrendszer párosult, felgyorsult az urbanizáció, új iparágak és szállítási formák alakultak ki. Rengeteg technikai találmány és újítás segítette a fejlett ipar és közlekedés létrejöttét. A megnövekedett energiaigényt James Watt *gőzgépe* elégítette ki (1765), amit aztán Robert Fulton a *gőzhajó* megépítéséhez (1807), George Stephenson pedig *gőzmozdony* elkészítéséhez (1825) használt fel. Óriási fejlődésen ment keresztül a textilipar (fonó- és szövőgépek), a fémipar (a koksolás feltalálása, kohászati és fémfeldolgozási újítások), sőt a bányászat is. A kőszén egyre sokoldalúbb hasznosítása azonban nem mentette meg az erdőket. A bányászat fejlődése miatt egyre több bányafára volt szükség (“bányaerdőket” jelöltek ki a faellátás zavartalansága érdekében), a vasútépítések során kemény talpfákat használtak, amikhez a síneket rögzítették, s a gőzgépeket is gyakorta fával fűtötték.

Az ipari forradalom klasszikusnak számító régiójában, *Közép-Angliában gyakorlatilag a teljes erdőállományt kiirtották az ipari fejlődés érdekében*, s a Pennine-hegység kopárságát máig sem sikerült megszüntetni. Európa számos fejlett ipari régiója – kis túlzással – holdbéli tájjá alakult, amit a bányászat meddőhányói, s a környékre hulló nagy mennyiségű por és korom okozott. Találó elnevezés Angliában a Black Country, amely az ipari termelés központja volt, de korántsem egészséges környezet az ott élőknek.

Az emberiség fejlődése számára mégiscsak meghatározó időszak volt a klasszikus ipari forradalom, hisz az európai központokból viszonylag hamar elterjedtek az új termelési módszerek kontinensünk más országaiban, de más kontinenseken is.

Az ipari forradalom – az említett környezeti hatások ellenére – kétségtelenül sok vívmányt hozott az emberiségnek. Tény, hogy a *születéskor várható élettartam* az iparosodó társadalmakban *megnőtt* ebben az időszakban. Mi okozta a javulást? Egyrészt a ragályos betegségek elleni küzdelem néhány sikere (pl. a himlőoltás felfedezése). Másrészt a csecsemőhalandóság visszaszorulása, a higiénés feltételek javulása. A gyermekágyi láz okának felfedezése és a megelőzés hatékony alkalmazása a 19. század folyamán éreztette kedvező hatását. A táplálkozás javulása, a változatosabb étrend növelte a lakosság ellenálló képességét. A fejlettebb közlekedésnek fontos szerepe volt az élelmezés javulásában, hisz távoli terményeket is elég hamar elszállítottak a szűkölködő régiókba, sőt a kontinensek közötti hajóút időtartama is lényegesen lerövidült a gőzhajó elterjedésével.

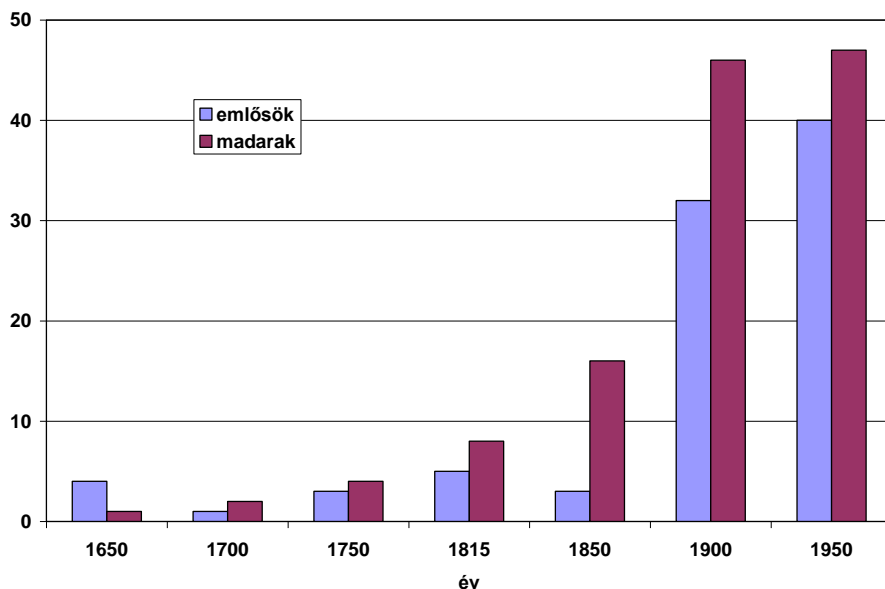
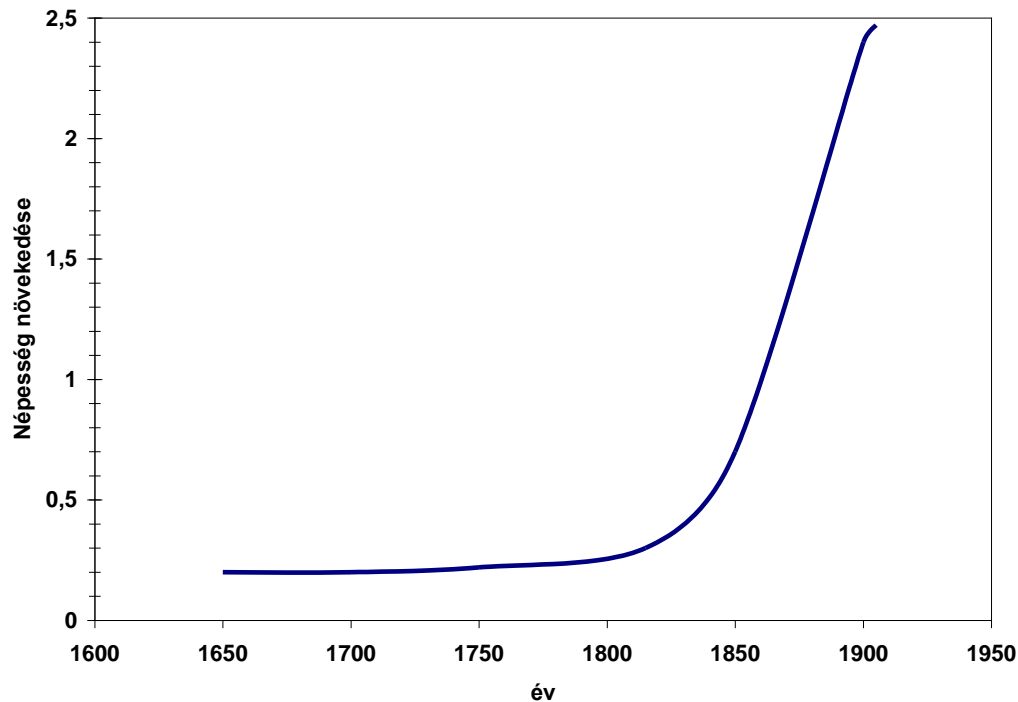
Az emberiség lélekszáma 1850-ben elérte az 1 milliárdot, s a 19. század végére meghaladta a 1,5 milliárdot. A 20. század végére pedig *több, mint 6 milliárd ember népesítette be bolygónkat*. Négyszer annyi, mint a század kezdetén! A 20. században a szaporodási ráta a 60-as években 2,5%-on tetőzött, a század vége felé közeledve némileg mérséklődött, 2005-ben 2% alatt van. Területileg nagy különbségek alakultak ki. A fejlődő országok közül pl. Szaúd-Arábia vagy Gambia szaporodási rátája a 70-es évektől a 90-es évek végéig a 4%-ot is meghaladta, míg a fejlett nyugat-európai országok közül néhányban megállt a népesség növekedése, sőt van, ahol csökkenni kezdett.

A gazdaságnak tehát globális méretekben rohamosan növekvő népességet kellett ellátnia. Pusztán a legalapvetőbb emberi igények (élelem, ruházat, lakás) kielégítéséhez is hatalmas termelésnövekedésre volt szükség. (A legalapvetőbb emberi igényeket a továbbiakban szükségleteknek nevezzük. Bővebben ld. az **1.3.1.3.3.**)

A lakóhelyek növekedése a városok javára tolódott el. Egyes városok óriásira duzzadtak (Mexikóváros, Rio de Janeiro, Sao Paulo), ami főleg a bevándorlással van kapcsolatban: a lakosság itt remél munkalehetőségeket, jobb életkörülményeket. Az építkezések nem tudtak lépést tartani a létszámnövekedéssel, így a fejlődő országok nagyvárosainak szerves tartozékai a nyomornegyedek, „bádogvárosok”.

A beton a század uralkodó építőanyaga lett. A hatalmas „doboz-lakótelepek” gyakran házgyárakban készültek, sokszor sivár környezetük nyomasztó lakóhelyet biztosított. Óriási mértékben megnőtt a beépített terület: utak, repülőterek, ipari létesítmények, raktárak,

vezetékek, autópályák a kiszolgáló létesítményekkel, szupermarketekkel... Mindez a sűrűn lakott országokban szétszabdalta a természet maradványait. A legsűrűbben lakott országokban 1 km²-en több, mint 800 ember szorong. Ezeken a helyeken a bioszféra maradványainak csekély a túlélési esélye. Világméretben is csökkent a természetes élővilág élettere, a fajok kihalása felgyorsult (5. ábra).



5. ábra. A népesség növekedése (fent), valamint a kipusztult emlősök és madarak száma (lent) 1650 és 1950 között (Goudie, 1990 nyomán, módosítva)

Az erdők túlzott kitermelése, különösen a 20. század második felében felgyorsuló *esőerdőirtások* a Föld leggazdagabb élővilágát tizedelik meg. Világszerte megnőtt a *környezetszennyezés*. A különböző élőlények különböző érzékenységek a változó hatású mérgező anyagokkal szemben, így kipusztulásuk szelektív. Az *intenzív mezőgazdasági termelés* számos vegyszer használatát teszi szükségessé. A *növényvédő szerek* nem mindig csak azokra az élőlényekre hatnak, amelyektől meg kívánjuk védeni a termést, hanem sokszor másokat is elpusztítanak. A táplálékláncok egyensúlyának megbontásával áttételes pusztító hatások is érvényesülhetnek. Mindezek eredőjeként *évente kb. 6000 faj tűnik el a Földről, s ezzel a földtörténet legnagyobb kihalásával vetekszik az ember okozta fajpusztulás.*

A 20. század tudományos és technikai fejlődése *minőségileg új energiaforrás* felfedezéséhez és alkalmazásához vezetett. A *nukleáris energiáról* van szó. A hagyományos energiahordozókban szegény, de atomerőműveket építeni és működtetni képes országok villamosenergia-termelésüket erre alapozták (Franciaország, Japán). Bármennyire is új és "tisztá" energiahordozó az atomenergia, a 20. században mégsem vált meghatározóvá. (Valójában az atomenergia sem tiszta; a radioaktív szennyezés más típusú környezeti hatásokat okozhat, mint a kémiai szennyező anyagok. Különösen nagy gondot jelentenek a nagy aktivitású radioaktív hulladékok, amelyek az atomerőművek normális működése során keletkeznek. Komolyabb üzemzavarok esetén pedig nagy területet szennyezhetnek el a környezetbe jutó izotópok.)

A 20. századot az *olaj* és a *földgáz* századának nevezhetjük. Óriási előnyük az atomenergiával szemben, hogy sokoldalúan használhatók a legkisebb motoroktól a legnagyobb erőművekig, s nemcsak energiahordozóként váltak be, hanem vegyipari alapanyagként is. Elégetésükkel széndioxidot és egyéb szennyező anyagokat (nitrogén-oxidok, kén-dioxidok, szénhidrogének) juttatunk a légkörbe.

Valamennyi gazdasági ágazat közül a *közlekedés* az, amely a legnagyobb arányban használja az olajszármazékokat. A 20. század "terméke" a *gépkocsi*, (annak ellenére, hogy már a 19. században feltalálták) amely meghatározó szárazföldi járművé vált: benzint és dízelolajat fogyaszt. A *légi közlekedés* teljesen új közlekedési ágazat. Ugyancsak e század szülötte: a gyors és nagy távolságokat legyőző személy- és teherszállítás eszköze. A repülőgépeket is olajszármazék, a kerozin hajtja. A *vízi közlekedésben* a dízelmotorok váltak uralkodóvá. Ha a felsorolt közlekedési ágazatokban környezeti szempontból közös vonást keresünk, akkor azt kell megállapítanunk, hogy valamennyi óriási energiafogyasztó, és az olajszármazékok

elégítésével hatalmas mennyiségű égéstermék jut a környezetbe: a már említett szennyező gázok mellett kormot és más aeroszol-részecskéket is.

A 20. század a *vegyipar* százada is. A kémia elméleti tudományágainak fejlődése magával vonta az alkalmazott kémia fejlődését, s a tudomány új felfedezéseit a vegyipar valósította meg. A műtrágyáktól kezdve, a növényvédő szereken és gyógyszereken át a műanyagokig elképzelhetetlenül széles a skála. A vegyipar a gazdaság igényeit elégítette ki, mikor műtrágyákat, növényvédő szereket stb.-t gyártott. Ezek nélkül elképzelhetetlen lett volna a 6 milliárd ember ellátása élelmiszerrel. Egyes ártalmatlannak tűnő vegyszerekről csak később derült ki, hogy veszélyesek, hisz végigvándorolnak a táplálékláncon, s a legvégén az embert mérgezik meg. Mindenesetre a vegyszerek használata sokkal nagyobb körültekintést és óvatosságot igényel az emberiségtől, mint eddig tapasztalhattuk. A kémikusok előtt új feladat áll: a környezet- és emberbarát (emberi szervezetre nem káros vegyszerek alkalmazása) vegyipar megvalósítása.

Az elmúlt század termékei a *mesterséges elektromágneses hullámok*. Ezek környezetünkben a természeteshez adódó többletként jelennek meg. Ilyenek a rádió- és a fényhullámok, a röntgen- és a gamma-sugarak. A rádiózás és televíziózás, a mobiltelefonok, a katonai és polgári célokra egyaránt alkalmazott radarkészülékek összességükben állandó elektromágneses hullámteret képeznek, tehát *az élet természetes és mesterséges elektromágneses sugarak keresztjében létezik a Földön*. Egyre többet, de még mindig keveset tudunk valódi környezeti, ill. emberre gyakorolt hatásairól.

Az eddigiek alapján foglaljuk össze, miben hoz újat, minőségileg mást az emberi társadalom a Föld életében a korábbi időszakokhoz képest.

A társadalomba szerveződött ember tervszerű, tudatos termelő tevékenységet folytat. Tudományos ismeretei alapján ezt a termelő tevékenységet egyre tökéletesíti, hatékonyabbá teszi, ami egyszersmind a földi környezetre gyakorolt (nem kívánatos) hatásokat is fokozza. A termelés során kiaknázza természetben található anyagokat (ásványkincsek, növényi és állati eredetű nyersanyagok) és átalakítja azokat. E tevékenységek során egyre nagyobb ütemben pusztítja az élővilágot. A pusztulás mértéke vetekszik a földtörténet legdrasztikusabb kihalási periódusának kihalási ütemével. Nem tudunk róla, hogy az ember előtt valaha is élt olyan faj a Földön, amelyik ekkora pusztítást okozott a természeti környezetben. A pusztítás és a saját művi környezetének létrehozása révén a társadalom átalakította és tovább formálja a földi környezetet. Ugyanakkor a társadalom „más minősége” abban is megnyilvánul, hogy az emberiség – éppen fejlett tudata révén – képes felismerni a társadalom által a földi

rendszerekben okozott károkat, és mind elméletileg, mind gyakorlatilag megvan a lehetősége a károk csökkentésére is. A társadalom egyes csoportjainak érdekeltségi viszonyai azonban sokszor ellene hatnak a környezeti károk mérséklésének.

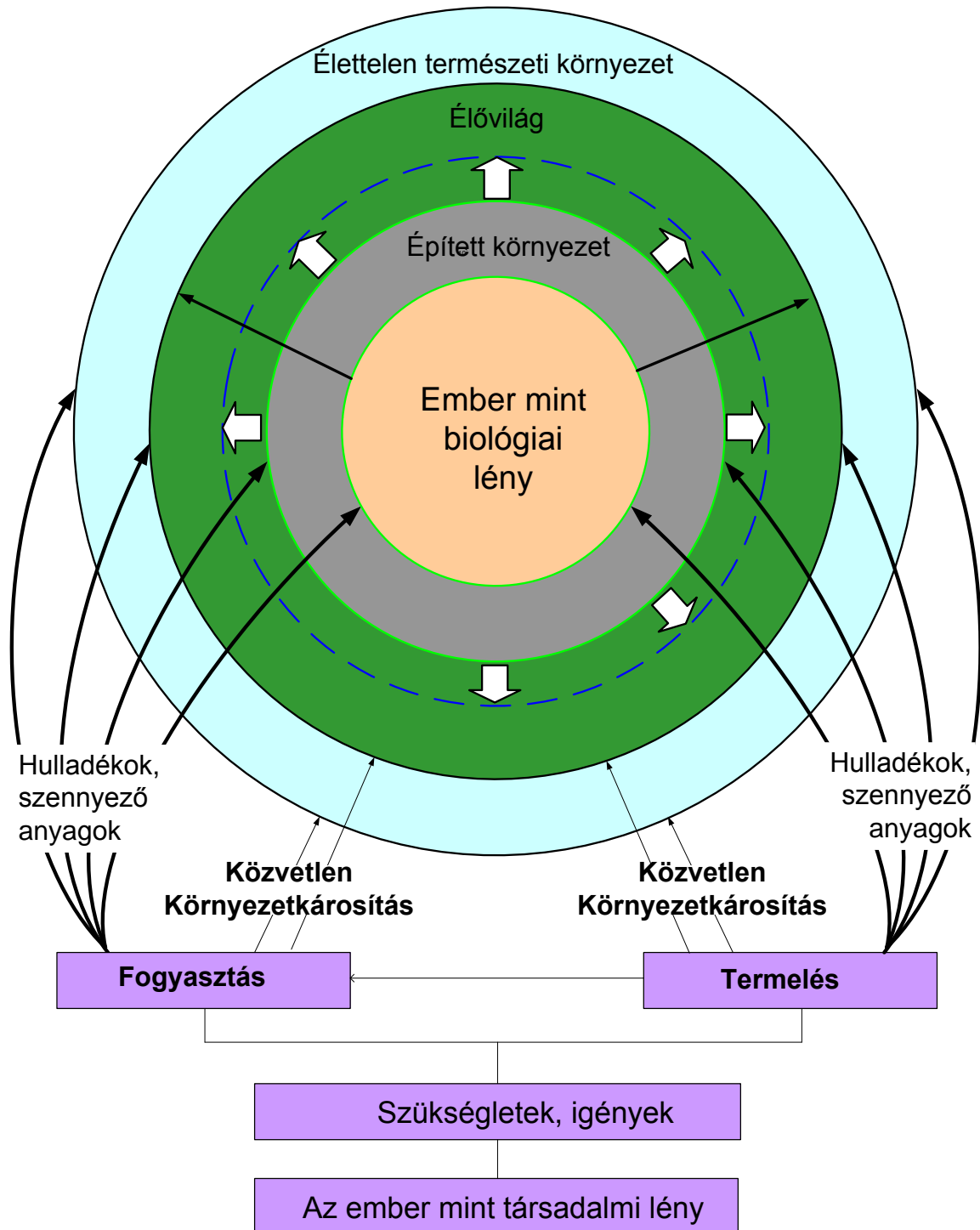
1.3.1.3.3. A környezeti alapprobléma és a fenntartható fejlődés

Az előző fejezetekben láthattuk, hogy amióta az ember társadalomba szerveződött, közösségekben, társadalmi tevékenységei révén tartja fenn magát. Biológiai és társadalmi létének fenntartásához szükséges két alapvető tevékenysége a **termelés** és a **fogyasztás**. A termelés során a természeti környezetéből anyagokat vesz el, ezeket feldolgozza, átalakítja, s ily módon hasznos tárgyakat, anyagokat hoz létre (biztosítja élelmiszerszükségletét, megfelelő lakhelyet épít magának, eszközöket készít a további termeléshez, gondoskodik a megtermelt javak elszállításáról, elosztásáról stb.). A **termelési tevékenység anyag- és energia-felhasználással és/vagy átalakítással jár együtt, amely szükségszerűen vezet hulladékanyagok és -energiák képződéséhez (6. ábra).**

Az emberiség lélekszámának növekedési üteménél gyorsabban nő az anyag- és energiafogyasztása, mivel egyre nagyobbak az emberi igények. Gondoljunk pl. egy múlt századi átlagos falusi család és háztartás eszközeire és energia-felhasználására, és hasonlítsuk össze gondolatban egy mai falusi család háztartásával. A 20. század második felétől egyre nagyobb mértékben kell számolnunk a reklámok hatására mesterségesen gerjesztett igényekkel is. Ezek még nagyobb fogyasztásra ösztönöznek, a termelőket pedig új és új termékek előállítására sarkallják.

Mindezek hatására az ember egyre növekvő ütemben termel és fogyaszt, s e két alapvető társadalmi tevékenység során óriási mennyiségű és igen változatos anyagi minőségű hulladék keletkezik. A környezetbe kerülő, különböző halmazállapotú hulladékok, amennyiben kifejtik káros hatásukat az élőlényekre (beleértve magát az embert is), az élettelen természeti és művi környezetre, akkor már szennyező anyagoknak minősítjük őket (6. ábra). A hulladékot mindaddig, amíg az ember zárt térben tartja, környezetétől elszigetelten kezeli (így bármilyen veszélyes az adott anyag, nem tudja kifejteni káros hatását), nem tekintjük szennyező anyagnak. A hulladék akkor válik szennyezővé, ha az élő és/vagy élettelen környezetre károsan hat: élettani elváltozásokat okoz, korrodálja a szerkezeti anyagokat stb.

A termelés és fogyasztás tehát *közvetve*, melléktermékei révén (szennyezővé váló hulladékanyagok és –energiák) károsítja az élettelen és élő természeti környezetet, az épített környezetet és magát az embert is mint biológiai lényt (**6. ábra**).



6. ábra. Az ember fontosabb társadalmi tevékenységeinek hatása az élettelen és élő természeti, valamint az épített környezetre és az emberre mint biológiai lényre (Magyarázat a szövegben)

Bizonyos termelő tevékenységek közvetlenül is károkat okoznak a környezetben. Egy külszíni bánya nyitásakor pl. elpusztítják az élő talajt s vele együtt az adott terület élővilágát, a kéreg anyagát részben megsemmisítve károsíthatják a geológiai értékeket, s beindítanak olyan kémiai folyamatokat, amelyek a beavatkozás előtt nem játszottak szerepet a környezet károsításában. A fogyasztás közvetlen környezetkárosítása kisebb jelentőségű, bár speciális esetekben súlyos lehet: pl. védett élőlények „elfogyasztása”, begyűjtése.

Az ember nem azzal a szándékkal termel, hogy környezetét (ezen belül elsősorban az élővilágot) elpusztítsa, hanem azért, hogy saját létét biztosítsa, igényeit kielégítse. A *környezetpusztítás és –szennyezés az ember termelő és fogyasztó tevékenysége során lezajló, nem szándékolt „mellékhatás”*. Az is jellemző azonban, hogy ezzel a mellékhatással tízezer évig nem törődött: sem az élővilág pusztulása, sem a nyersanyagok és energiahordozók jövője nem érdekelte, a számára természeti erőforrást jelentő anyagokat mindaddig oly módon aknázták ki, ahogyan azt gazdasági érdekei megkívánták.

Láthatjuk tehát, hogy az alapvető társadalmi tevékenységek okozzák mindazokat a gondokat, amelyeket környezeti problémáknak szoktunk nevezni. Ez kiegészül az *emberiség lélekszámának növekedéséből* és ezzel összefüggésben az *épített környezet térigényének fokozódásából* eredő káros hatással, amely az élővilág életterének visszaszorítását, ezzel fajok **pusztulását**, ezáltal a *faji változatosság (biológiai diverzitás)* csökkenését, **générozíót** és sok élettelen természeti érték pusztulását okozza. Ezt a hatást kívántuk érzékeltetni ábránkon az épített környezet felől az élővilág és az élettelen természeti környezet felé mutató nyilakkal. Úgy tűnik tehát, hogy *az emberi társadalom eddigi működése, fejlődésének tendenciái nincsenek összhangban a 4,6 milliárd év alatt kialakult egységes földi rendszer működésével*, s ez a disszonancia az emberiség történelmének utolsó száz évében szembetűnően fokozódott.

A környezeti alapprobléma az eddigiek alapján a következőképpen fogalmazható meg. Képes lesz-e az emberiség lélekszámának növekedését, termelő és fogyasztó tevékenységét úgy szabályozni, társadalmát úgy megszervezni, hogy az a milliárd évek során kialakult egységes földi rendszerrel összhangban működjön?

A probléma megoldása egyáltalán nem könnyű. Míg az élővilág 3,5 milliárd év alatt, fejlődéstörténete során fokozatosan alkalmazkodott az élettelen környezethez, miközben lassan szükségleteinek megfelelően alakította is azt, addig az emberi társadalom túl nagy és túl gyors változásokat okoz a földi rendszerekben, azokban működési zavarokat vagy éppen saját életfeltételeinek rosszabbodását idézi elő.

A társadalom egy önálló nyílt földi rendszerként is értelmezhető, amely a csak rá jellemző törvények szerint működik (társadalmi törvények). Fejlődése, az egyre magasabb szintű termelő és fogyasztó tevékenység azt a hamis képzetet keltette az emberben, hogy a társadalom a természettől függetlenül is képes működni.

A helyzet azonban az, hogy ez a látszólag független működés csak korlátozott ideig és korlátozott keretek között lehetséges.

A környezeti alapprobléma megoldásának kulcsa a társadalmi rendszer működésének megváltoztatásában van, ez pedig a rendszer vezérlésének kérdését veti fel. A kérdésre adandó választ rendkívül nehézé teszi, hogy az emberi társadalom mint a Földet átfogó rendszer sokféle részrendszer formájában működik. Ezek a részrendszerek (az egyes országokra specifikusan jellemző társadalmi berendezkedések) önálló nyílt rendszerekként is értelmezhetők, amelyek számos szállal kapcsolódnak egymáshoz, ilyen módon építik fel a Földet átfogó nagy rendszert. Alapvető problémának tartjuk, hogy a részrendszerek vezérlése sokkal célratörőbb és hatékonyabb, mint a nagy földi rendszeré. Ez egyáltalán nem jelenti azt, hogy a részrendszerben a céltudatosság és a hatékonyság környezetvédelmi szempontból kedvező, sőt egy erős központi vezérlés lehet kifejezetten környezetromboló hatású is. Gondoljunk a volt szocialista államok diktatórikus irányítására és az ennek eredményeként rohamosan degradálódó természeti környezetre.

Alapvető probléma továbbá, hogy az emberiség történelme során kialakult, társadalmi tevékenységeket összehangoló-vezérlő mechanizmusok (a termelés és fogyasztás állami szabályozása, a gazdaság piaci mechanizmusa, a fejlett és fejlődő társadalmakban egyaránt kialakuló, de környezeti hatásukban eltérő szokások) eltávolodtak az ember hosszú távú érdekeitől. Az ember sokáig nem érzékelte, hogy az ily módon vezérelt társadalom rossz irányban fejlődik: a környezeti krízis felé halad, sőt e fejlődés helyenként már saját populációit is közvetlenül, fizikai létében veszélyezteti. Az ember mindeddig nem volt képes összehangolni rövid és hosszú távú, valamint regionális és globális érdekeit.

Ezt felismerve **BROWN** (1981) írt először a fenntartható társadalomról. Művének egyik alapvető gondolata, hogy a környezetvédelmet nem lehet a társadalom különálló szektoraként kezelni, a környezeti gondok csakis a gazdasági és társadalmi kérdésekkel együtt oldhatók meg. Ebben a szellemben született meg az ENSZ Környezet és Fejlődés Világbizottsága, amelynek vezetését Gro Harlem Brundtland asszonyra bízta 1983-ban (ő később Norvégia miniszterelnöke lett), négy éven át foglalkozott az emberi társadalom és környezete közötti kapcsolatokkal.

A bizottság 1987-re készítette el jelentését, amelyet még abban az évben megtárgyaltak az ENSZ-közgyűlés 42. ülészakán. (A több mint 300 oldalas jelentés magyar nyelven is megjelent „Közös jövőnk” címmel.) Ebben a műben találjuk a fenntartható fejlődés fogalmának legismertebb (már-már „klasszikusnak” számító) meghatározását, amely az alábbiak szerint hangzik.

„A fenntartható fejlődés a fejlődés olyan formája, amely a jelen szükségleteinek kielégítése mellett nem fosztja meg a jövő generációit saját szükségleteik kielégítésének lehetőségétől.” (BRUNDTLAND, G. H.: Our Common Future, World Commission...238)

A jelentés részletesen taglalja a definíció egyes elemeit. A *fejlődéssel* kapcsolatban megállapítja, hogy a szegény országoknak joguk van fejlődni, azaz minél nagyobb tömegű árucikket előállítani, magasabb szintű szolgáltatásokat biztosítani, hogy nyomorban élő állampolgáraik ki tudjanak törni a szegénység béklyójából. A fejlődéssel kapcsolatos további szövegösszefüggések nyilvánvalóvá teszik, hogy a Brundtland bizottság a fejlődést azonosítja a gazdasági növekedéssel.

GYULAI (1999) ezzel kapcsolatban megjegyzi: „Ma már minden politikus a fenntartható gazdasági növekedésről beszél... Ez valóban nem sok jó érzésre ad okot, hiszen a fejlődés ezen tévhite az egyik nagy problémánk.” Gyulai észrevétele egyáltalán nem alaptalan: Meadows és munkatársai már az 1970-es évek elején rámutattak a növekedés hosszú távú tarthatatlanságára (MEADOWS and MEADOWS et al. 1972). A termelés alapjául szolgáló nem megújuló energiahordozók, egyéb ásványkincsek és nyersanyagok készletei végesek, s közülük néhány az emberiség történelmének léptékével mérve a közeljövőben ki fog merülni. A gyorsuló ütemű materiális növekedés a legtöbb környezetkutató szerint fenntarthatatlan (LÁSZLÓ E. 1998, VIDA G. 2001).

WACKERNAGEL (2001) azt állítja, hogy a fenntartható fejlődés körüli zavar egy része abban az általános hibában gyökerezik, hogy nem tudunk különbséget tenni igazi fejlődés és pusztán növekedés között.

A Brundtland jelentés nem teljesen következetes a fejlődés értelmezésében és használatában. Bár – mint említettük – megfogalmazza, hogy a szaporodó népességű fejlődő világot csak a termelés mennyiségi növekedésével lehet ellátni, ugyanakkor azt is kijelenti, hogy a „termelés növekedésének hagyományos gazdasági parancsát korlátozni kell.” Egyidőben korlátozni és növelni valamilyen folyamatot, természetesen képtelenség.

Van a meghatározásnak egy olyan tartalmi eleme, amellyel sem a jelentés készítői, sem a kritikusai nem foglalkoznak mélyebben. Ez az *időtényező*. A meghatározásban „a jövő

generációi” kifejezés utal a fenntarthatóság időbeli kiterjesztésére. Más fogalmazásban is találkozhatunk a fenntartható fejlődés definíciójával, ahol az időbeliséget „a Földet az unokáinktól kaptuk kölcsön” mondat foglalja magában. Szépek, hangzatosak és mindenki számára érthetők ezek a kifejezések, de mondanunk sem kell, hogy különböző értelmezésekre adnak lehetőséget. Mi ezzel kapcsolatban úgy foglalkozunk állást, hogy a fenntarthatóság időkorlát nélküli fogalom. Semmiképpen sem értelmezhető úgy, mint egy-két generációra érvényes megállapítás.

A fenntartható fejlődés tudományos definíciójában a fejlődés meghatározása tűnik nehezebbnek, hisz a „fenntartható” jelző valamely folyamat tartós (végtelen?) működését hivatott kifejezni.

NÁRAY-SZABÓ (2003) tudományos mélységben foglalkozik a kérdéssel, s ő is a fejlődés fogalmának elemzésére helyezi a hangsúlyt. Munkájának gondolati alapját az anyag történeti változásai (fejlődése) adják. *TEILHARD DE CHARDIN* (1980) meghatározását veszi kiindulási alapul, mely szerint az a rendszer fejlettebb a másiknál, amely *bonyolultabb*, nagyobb az *összetettsége*, azaz a *komplexitása*. Itt mellőzve az összetettség fogalmának eltérő értelmezéseit, ezzel kapcsolatban *LA PORTE* (1975) definícióját fogadjuk el: vagyis a rendszerek összetettségének fokát az alkotórészek (rendszerelemek) száma, kölcsönös függésük foka és változatossága határozza meg.

Náray-Szabó ezt azzal egészíti ki, hogy „minél összetettebb egy rendszer, annál több információt képes kicserélni környezetével”.

Ez a meghatározás élettelen és élő rendszerekre, sőt a társadalomra is értelmezhető.

Náray-Szabó a *fejlődést* (evolúciót) az ősrobbanástól az információs társadalomig követi nyomon, s a **7. ábra** bemutatott minőségi változásokat különbözteti meg.

A fejlődési szintek a világ folyamatos fejlődését, az összetettség növekedését bizonyítják. Az élő rendszerek és a társadalom (társadalmi csoport) fennmaradásának (elő)feltétele az anyag, az energia és az információ folyamatos be- és *kiáramlása* a rendszerbe, ill. rendszerből, *Náray* szerint *fogyasztása*.

A fejlődés korlátaira éppen a túlfogyasztással kapcsolatban mutat rá. Elemzi a fogyasztói társadalomban lejátszódó folyamatokat, s végül arra a következtetésre jut, hogy „egyes területeken és helyeken csökken a komplexitás”, a társadalomban szükséges együttműködés helyett a verseny válik egyeduralmódóvá (bár a versenyt nem minden szempontból tartja rossznak), és sokszor nem őrizzük meg a bevált, az új körülmények között is szükséges, jól működő „régit”, hanem eltöröljük azt.

Náray-Szabó fentebb vázolt elemzése a fejlődésről teljes mértékben megfelel a tudományosság követelményeinek. Mégis úgy gondoljuk, hogy a társadalom fejlődésének egy olyan vetületével nem foglalkozik az általánosítás szintjén, amely éppen a társadalom jelenlegi globális működésének fenntarthatatlanságára világít rá.

Az információs társadalom bármennyire is fejlett (az evolúció legfejlettebb szintje), része maradt egy „befogadó” rendszernek, a Föld bolygónak. *Bizonyított ismereteink* szerint ez az egyetlen olyan égitest (nem zárjuk ki, hogy lehet akár sok ilyen is a világmindenségben), amelyen együtt vannak jelen élettelen, élő és társadalmi rendszerek. E rendszerek között sajátos függőségi viszony alakult ki a földtörténet során.

Az élettelen Föld fizikai és kémiai paraméterei viszonylag szűk intervallumban változhatnak csak, hogy a jelenlegi magasabb rendű élővilág életben maradjon. Maga az ember, mint *biológiai lény* ugyancsak alapvetően függ az élettelen természeti környezettől. Pl. csak bizonyos oxigénszint mellett marad életben, a sztratoszférikus ózonréteg is létszükséglet számára, a külső hőmérsékletnek is szűk intervallumban kell maradnia létezésünkhöz, tiszta ivóvíz nélkül sem maradnánk életben stb. Mindezeket az élettelen természeti feltételeket a Föld bolygó bonyolult, visszacsatolásokkal működő komplex rendszere biztosítja.

Az ember, mint biológiai lény meglehetősen sérülékeny, és léte függ az élővilágtól is. Végző soron az élőlényekből állítjuk elő élelmiszereink túlnyomó részét, gyógyszereink egy részét, élőlények élnek velünk szimbiózisban a bőrünkön, a bélrendszerünkben.

De az ember, mint társadalmi lény is az élő és élettelen környezet függvénye. A társadalom termelő és fogyasztó tevékenységeihez az élő és élettelen környezetéből veszi el a nyersanyagokat és energiahordozókat: eközben szükségszerű rombolást végez a Föld rendszereiben. A bányászat lokálisan elpusztítja az élővilágot és a talajt, a földművelés terjeszkedése fajok kipusztulásához és talajdegradációhoz vezet, az ipari termelés, a közlekedés és számos más tevékenység szennyező anyagokat bocsát a környezetbe stb. (Könyvtárnyi irodalma van már ezeknek a környezeti hatásoknak.)

Földünk tehát egy olyan sokszorosán összetett rendszer, amelynek egyik (önmagában is bonyolult) részrendszere, *az emberi társadalom szisztematikusan rombolja és átalakítja a többi részrendszert* (élő és élettelen rendszerek), *zavarja természetes működésüket, miközben a léte ezektől függ.* Régóta tudjuk, hogy a társadalom működésének vannak környezeti korlátai. Ezek olyan zárt rendszerekben jelentkeztek először, mint a szigetek. (*NÁRAY-SZABÓ [2003]* és *VÉGH [2005]* is a Húsvét-sziget esetét hozza fel példaként, ahol egy virágzó társadalom pusztult el a túlhasználat következtében.)

ÖSTOJÁS
↓
kvantumokból részecskék
↓
GÁZFELHŐK
↓
Részecskékből atomok
↓
CSILLAGOK
↓
atomokból molekulák
↓
BOLYGÓK
↓
molekulákból sejtek
↓
BIOLÓGIAI RENDSZEREK
↓
sejtekből élő szervezetek
↓
ÉLŐ SZERVEZETEK
↓
élő szervezetekből közösségek
↓
KÖZÖSSÉGEK
↓
közösségekből civilizációk
↓
CIVILIZÁCIÓK
↓
információs társadalom?

7. ábra. Az evolúció legfontosabb lépéseinek sematikus ábrázolása Náray-Szabó (2003) szerint

Azt is tudjuk, hogy az egész földi környezetnek is vannak hasznosítási korlátai, és ezek nem mindig és kizárólag mennyiségi kérdések, ill. „másképp” kvantitatívak. Egy példával megvilágítva állításunkat: elég pontosan tudjuk, hogy a trópusi esőerdőkben mennyi faanyag áll rendelkezésre, sőt az is számítható, hogy egy kiirtott erdőterület faanyagát mennyi idő alatt lehet ültetvényes fatelepítéssel újratermelni. De senki sem tud ma még arra válaszolni, hogy milyen következményei lennének a trópusi esőerdők teljes kiirtásának, holott elméletileg ezek is számszerűsíthetők: pl. hány faj pusztulna ki, hány °C-kal változna meg a trópusi és a globális hőmérséklet, mennyi talaj pusztulna el véglegesen, milyen kiterjedésű sivatag képződne az erdők helyén stb.

Azért nem tudunk ezekre a kérdésekre válaszolni, mert nem ismerjük eléggé a globális földi rendszer működését. Éppen ezért azt sem lehet megítélni, hogy hol vannak a regionális és a globális földi rendszer módosulásának határértékei. Csak azt tudjuk, hogy vannak ilyenek. Ha kizárólag az emberiség önös érdekeit nézzük, az alapvető kérdés tulajdonképpen nem az, hogy a globális földi természeti rendszer mit bír ki, (valószínűleg sokkal többet, mint mi), hanem az, hogy az ember, mint biológiai lény milyen terheléseket képes elviselni, és hogy az emberi társadalom működésének mik a korlátai.

Milyen társadalmi következménye lenne pl. 2–3 m-es tengerszint-emelkedésnek? (Hollandia, Banglades, Kína stb.) Milyen következménnyel járna új régiók elsivatagosodása? Mit eredményezne a vízhiány növekedése egyes sűrűn lakott országokban? Milyen háborúkat indítana el az energia- és nyersanyaghiány? (Vagy ilyenek már ma is léteznek?)

Mindezek után mi a *fenntartható fejlődés* lényegét az alábbiakban foglaljuk össze.

Az emberiségnek úgy kell termelnie és fogyasztania, oly módon kell fejlesztenie társadalmát, hogy ne változtassa meg lényegesen az élő földi rendszer struktúráját és működését, hosszú távon (évezredek távlatokkal) biztosítsa az élővilág egésze számára a létfeltételeket, saját maga számára pedig a létfeltételeken túl az alapvető emberi szükségletek kielégítését is.

A fejlődés fogalma a struktúrák bonyolultságán, összetettségén kívül a társadalom tagjainak jobb ellátását (elegendő jó minőségű terméket, színvonalas szolgáltatásokat) és az egészségesebb életkörülményeket is magában foglalja. A társadalmi fejlődés elsősorban nem mennyiségi, hanem minőségi kérdés. A fenntartható fejlődés során biztosítanunk kell a társadalom tagjai számára a mainál lényegesen jobb életminőséget, miközben meg kell őriznünk Földünk természeti potenciálját (biológiai változatosság, tiszta levegő, víz, talaj, az egész emberiség számára elegendő ásványkincs).

A fenntartható fejlődést célszerű úgy értelmezni, mint olyan törekvést, amely a gazdasági és társadalmi fejlődést kísérli meg összehangolni a globális földi környezet érdekeivel. Ez pedig csak hosszú távon valósítható meg, és az ehhez vezető út meglehetősen göröngyösnek ígérkezik. Mindenesetre reménykednünk kell, hogy az emberiség előbb-utóbb megtalálja társadalmának olyan működtetését, amely a fenntarthatóság kritériumainak megfelel. Csak ez jelenthet végleges megoldást.

1.3.1.3.4. *A fenntartható fejlődési stratégiákról*

Az ENSZ első környezetvédelmi világértelmezése óta (1972, Stockholm) lényeges fejlődés ment végbe a környezetvédelem nemzetközi és nemzeti intézményrendszerében. Létrejött, és azóta is működik az ENSZ Környezeti Programja (UNEP), az egyes országokban nemzeti környezetvédelmi törvényeket hoztak; továbbá minisztériumok, valamint más adminisztratív szervezetek és hatóságok alakultak a törvények betartatása céljából.

A „környezet-ügyet” gondozó szervezeti rendszer legtöbb országban ugyanolyan ágazati jelleget öltött, mint a mezőgazdaság, az ipar vagy a közlekedés. Amikor azonban a gazdasági ágazatok érdekei a környezeti érdekekkel szembekerültek, nagyon gyakran a gazdasági érdekek győztek, és sok országban ez ma is így van.

A gazdasági érdek egy-egy fontos kérdésben olyan erős lehet, hogy az az emberiség globális érdekét is háttérbe szoríthatja. Így pl. az USA nem csatlakozott sem a nemzetközi biodiverzitás-egyezményhez, sem a kiotói klímajegyzőkönyvhöz saját gazdasági érdekeire hivatkozva (SZABÓ, 2002).

Az 1990-es években egyre gyakrabban hangoztatott fenntartható fejlődés gondolata olyan mértékben elterjedt a világon, hogy a 2002-ben Johannesburgban megtartott ENSZ konferencia már a *Fenntartható Fejlődés Világtalálkozó* címet viselte. Ezen a résztvevők a társadalmi fejlődéssel és feszültségekkel kapcsolatos teendőket a környezetvédelemmel együtt tárgyalták. E kétségtelenül előremutató megközelítés mellett számos hozzászóló megállapította, hogy *a globális társadalom ma még nem fenntartható módon fejlődik.*

Úgy gondoljuk, mégsem szabad lemondani arról, hogy a társadalmat a fenntartható fejlődés felé tereljük. Valószínű, hogy ez hosszú folyamat lesz. Ennek első lépései (lehetnek) azok *a fenntartható fejlődési stratégiák*, amelyek több fejlett országban már elkészültek, és várható, hogy további országok – közöttük hazánk is – kidolgozzák ezeket a közép- és hosszú távú tervezést igénylő dokumentumokat.

A már elkészült és működő stratégiák közös vonása, hogy a fenntartható fejlődés legalább három pillérével foglalkoznak: a *környezetvédelemmel*, a *gazdasággal* és a *társadalmi kérdésekkel*. Egyes nemzeti stratégiák egy negyedik faktort is figyelembe vesznek, mégpedig az intézményrendszer fejlesztését.

Tizenegy, különböző mértékben fejlett ország fenntartható fejlődési stratégiáját áttanulmányozva (*KERÉNYI-CSORBA et al. 2003*) néhány általánosítható tapasztalatot az alábbiakban foglalunk össze. (A vizsgált országok: Németország, Nagy-Britannia, Hollandia, Írország, Görögország, Lengyelország, Csehország, Szlovákia, Amerikai Egyesült Államok, Kanada, Dél-Afrika. Meg kell jegyeznünk, hogy a felsorolt országok közül nem mindegyik stratégiája viseli címében is a fenntartható fejlődés kifejezést, de a vizsgált dokumentum tartalmában fenntartható fejlődési stratégiának tekinthető.)

A nemzeti stratégiák elemzéséből kitűnik, hogy a különböző országok más-más „pillért” tartottak fontosnak a fenntartható fejlődés szempontjából. Általában jellemző, hogy a legfejlettebb országok többet foglalkoznak a környezeti vagy a társadalmi kérdésekkel, mint a gazdaság fejlesztésével, míg a kevésbé fejlett országok a gazdasági növekedésre helyezik a hangsúlyt. Egy-két kivétel azonban akad. A felsorolt országok között szereplő Szlovákia pl. nem hangsúlyozza túl a gazdaságot, azt egyenrangúnak tekinti a társadalmi és környezeti problémákkal. Az Egyesült Államok pedig – kiemelkedő fejlettségű gazdasága ellenére – a gazdaság fejlesztését a legfontosabb területek között tartja számon.

A környezeti kérdéseknek Csehország és Hollandia tulajdonít az átlagosnál nagyobb jelentőséget.

Nagy-Britannia fenntartható fejlődési stratégiájában a kiemelt prioritások között a legtöbb társadalmi jellegű: az öregedő társadalom problémái, az egészségügyi helyzet, a szegénység és munkanélküliség elleni harc, a nők helyzete stb. Említésre méltó a gazdasági növekedés kérdésének brit megközelítése: a stratégia készítői ugyanis *minőségi gazdasági növekedésről* írnak. Ez többé-kevésbé megfelel a *Náray-Szabó* által emlegetett *dematerializált gazdasági fejlődésnek* (*NÁRAY-SZABÓ, 2003*).

A deklaráció szintjén a lengyel stratégia nem tesz különbséget a gazdaság-környezet-társadalom triáda egyes elemei között, a dokumentumból azonban kiderül, hogy az energiagazdálkodás, a közlekedés fejlesztése és a demográfiai gondok megoldása kiemelt prioritást élvez, s ezek környezeti vetületéről alig esik szó.

Dél-Afrika társadalmi viszonyait ismerve nem meglepő, hogy a nemzeti stratégiában a szociális kérdések a leghangsúlyosabbak.

A fenntartható fejlődés nemzeti stratégiáinak közös vonása a megvalósításhoz ajánlott *módszerek nagymértékű hasonlósága*. Minden országban különböző *jogi eszközöket* helyeznek kilátásba egy-egy részfeladat megoldásához. A törvények, rendeletek mellett egyes országokban a kormány és a gazdasági ágazatok vagy egyes nagyvállalatok közötti egyezmények, szerződések a puhább jog kategóriájába tartoznak (pl. Németország, Lengyelország).

Ugyancsak gyakori a *gazdasági szabályozás* különböző eszközeinek alkalmazása: adócsökkentések és -kedvezmények, kedvezményes kölcsönök, mint ösztönző módszerek; új adók, bírságok, mint „büntető” eszközök. Általánosnak tekinthető a *szennyező fizet elv* alkalmazása, és egyes stratégiákban megjelenik az emisszió-kereskedelem, mint a kibocsátások szintentartásának eszköze. (E módszer kritikusai éppen azt kifogásolják, hogy az nem ösztönöz kibocsátás-csökkentésre, csupán a szintentartást lehet elérni vele.)

A legfejlettebb országok stratégiái fontosnak tartják a vállalati környezeti menedzsment-rendszer széleskörű elterjesztését, fejlesztését.

Kevés stratégia foglalkozik érdemben a nemzetközi környezetvédelmi egyezményekkel és a nemzetközi környezetvédelmi intézmények támogatásával. Pozitív példának tekintjük ebből a szempontból Svájc fenntartható fejlődési stratégiáját.

A nemzeti stratégiák nemzetközi összehangolása még várat magára. Az Európai Unión belül jó esély van arra, hogy ez középtávon megtörténik, annak ellenére, hogy egyelőre a 25 ország kb. felének, köztük hazánknak sem készült el (de készülöben van) ez a fontos dokumentuma.

A globális problémák megoldása azonban világméretű együttműködést igényel ezen a téren is. Bár számos nemzetközi egyezményre támaszkodhat(ná)nak a nemzeti stratégiák, ezek mérsékelten jelennek meg az írott anyagokban.

A nemzeti stratégiák ugyancsak gyenge területe a keresztkapcsolatok, a szinergiák vizsgálata. Arról van szó, hogy legtöbb országban a szektorális szemlélet uralkodik, és azzal viszonylag keveset foglalkoznak, hogy egy-egy szakterületen hozott intézkedés milyen áttételes hatásokat okozhat más területen: kedvezőeket vagy kedvezőtleneket. Csak egy példát említünk: az energiapolitika célkitűzései nem választhatók külön a bányászat és az erdőgazdálkodás célkitűzéseitől. A környezetkímélő energiatermelés befolyásolja a szén- és szénhidrogén-bányászatot, de hatással van az erdőgazdálkodásra is, hisz az erdők „szennyelők”, egyszersmind a biomasszából nyerhető energia legfontosabb objektumai. Ugyanakkor az erdők a biológiai diverzitás szempontjából is meghatározók, és fontos szerepet töltenek be a levegőminőség fenntartásában.

Ezzel az utalásszerű példával csak fel akartuk hívni a figyelmet a szektorok keresztkapcsolatainak fontosságára. Ezek részletes kidolgozása igen nagy munka. Számos forgatókönyvet kellene készítenie a szakembereknek, hogy a legkedvezőbbet ki lehessen választani a fenntartható fejlődés megvalósítása érdekében. Ilyen típusú átfogó elemzéseket egyetlen nemzeti stratégiában sem találtunk.

A nemzeti stratégiák érvényességi ideje meglehetősen változó. Említettük, hogy a stratégiák általában közép és/vagy hosszú távra készülnek. Ennek években való kifejezése azonban eléggé eltérő az egyes országokban. Az Európai Unió országai az Unió 6. Környezetvédelmi Programjához igazodnak, és általában 2010-ig fogalmazzak meg célkitűzéseket. Ettől is vannak azonban eltérések. Hollandia pl. 2030-ig terjedő távlati célokat is említ, Lengyelország pedig készített egy hosszú távú stratégiát 2025-ig (Poland 2025). Ebben rövid- (2 év), közép- (10 év) és hosszú távú (25 év) határidőket is megszabnak. Svájcnak 6 évre szóló stratégiája van, Kanada ezzel szemben csak 3 évre készít ilyen dokumentumot, de azt 3 év letelte után újabb 3 évre kidolgozza.

Mindezek ismeretében is azt tartjuk a legfontosabbnak, hogy van-e megfelelő eszköz a stratégiákban megfogalmazott célok elérésének, feladatok teljesítésének ellenőrzésére, a hiányosságok pótlására, a téves elképzelések módosítására. Ezek az önellenőrző mechanizmusok nagyon változó színvonalúak.

Nagy-Britanniában pl. a kormány minden évben értékeli a tapasztalatokat, amelyeket több mint 40 indikátor alapján fogalmazzak meg. Ugyancsak évente tartanak beszámolót a fenntartható fejlődés terén elért eredményekről Kanadában.

Németországban a kormány két évente írásos jelentést köteles készíteni a Szövetségi Parlament (a Bundestag) számára. Hollandiában a kormány négy évente vizsgálja felül az előrehaladást.

Több országban nincs rendszeres időszakokhoz kötve az önellenőrzés, kissé „elkenik” ezt a kérdést. Konkrét időpontok vagy időtartamok helyett ilyeneket olvashatunk egyes fenntartható fejlődési stratégiákban: „megvalósulását időnként meg kell vizsgálni”, „rendszeres időközi jelentéseket kell készíteni”, „a minisztériumok rendszeresen jelentést készítenek” stb.

Az eddigiek alapján érzékelhető, hogy a nemzeti fenntartható fejlődési stratégiákban kitűzött célok változó színvonalon valósulnak meg. Mégis az a véleményünk, hogy ezek a dokumentumok szükségesek, fontosak, mert az állami intézményrendszert működtető politikusokat, hivatalnokokat rákényszerítik olyan jellegű stratégiák kidolgozására, amelyek a fenntartható fejlődés irányába mutatnak. *Távol vagyunk ugyan attól, hogy a globális társadalom fenntartható módon működjön, de az ehhez való közeledés fontos eszközei a nemzeti*

fenntartható fejlődési stratégiák. Még fontosabb az abban foglaltak megvalósítása, a folyamatos kontroll és az állandó törekvés a társadalom belső viszonyainak javítására, valamint a természeti környezet kíméletes hasznosítására.

A nemzeti stratégiák globális elterjedése és nemzetközi szintű összehangolása közelebb vihet minket a fenntartható fejlődéshez, de annak megvalósításához még hosszú időre lesz szükség.

2. BIOGEOKÉMIAI KÖRFOLYAMATOK ÉS ANTROPOGÉN MÓDOSÍTÁSUK

Papp Sándor ny. egyetemi tanár

2.1. Bevezetés

Földünk ökológiai rendszereinek állapotát az emberi aktivitás – különösképpen a 20. század második felének kezdete óta – korábban nem tapasztalt mértékben és egyidejűleg kiszámíthatatlanul módosítja. A változásokat elsősorban a nem megújuló nyersanyagok és energiahordozók lelőhelyeinek kimerülése, másfelől a környezetbe juttatott technológiai, illetve fogyasztási hulladékok növekvő mennyiségei jelzik. Ez a beavatkozás – a többi között – jól nyomon követhető a kémiai elemek biogeochemiai körforgásának változásában is, amely ciklusok a földi életet és a globális éghajlatot meghatározó módon befolyásolják.

A kémiai elemeknek és vegyületeiknek számos lehetőségük van arra, hogy a természeti környezetben biotikus vagy abiotikus partnerekkel kölcsönhatásba lépjenek. A sokféle környezeti tényező és átalakulási lehetőség miatt azonban ezek a reakciók jóval nehezebben áttekinthetők, mint amelyeket laboratóriumokban vagy kémiai technológiai folyamatokban hajtunk végre.

Egy kémiai elem biogeochemiai körforgásán – definíció szerint – a következőket értjük:

az adott elem milyen mennyiségben, koncentrációban és mely vegyület (részecskefajta) formájában van jelen az egyes ökológiai rendszerekben (rezervoárookban);

az egyes rezervoárok között milyen mértékű az anyagtranszport;

melyek azok a kémiai, biológiai és fizikai (geológiai) mechanizmusok, amelyek az anyagtranszportot szabályozzák;

a természeti vagy antropogén anyagtranszport milyen környezeti változásokat hoz létre;

az utóbbiak hatására a természetben létrejövő, kiegyenlítő mechanizmusok.

A biogeochemiai folyamatok vizsgálata nemcsak a természetről, annak komplexitásáról kialakított tudományos ismereteinket bővíti, hanem számos gyakorlati kérdés megoldása szempontjából is kulcsfontosságú. Ezek:

- élelmiszertermelés szárazföldi és vízi környezetben, annak függése éghajlati tényezőktől, a szükséges tápanyagok elérhetősége, toxikus anyagok jelenléte;
- a globális éghajlat természeti és antropogén tényezői;
- a savas ülepedés hatása az ökológiai rendszerekre, a jelenség antropogén összetevői;

- a sztratoszféra ózontartalmának hatása a biotikus és abiotikus környezetre, a jelenség antropogén módosítása;
- növényvédő szerek és szintetikus anyagok globális jelenléte, terjedésük, illetve spontán lebomlásuk a természetben.

A biogeokémiai körfolyamatok megértése, természetének felderítése – összetett voltuk miatt – számos diszciplína integrációját feltételezi. Ha a tudományos közösség a diszciplínák integrációjára nem fordít kellő figyelmet, számos társadalmi kérdés megoldása – az imént vázolt gyakorlati feladatokat tekintve – kétségessé válik.

2.2. Körfolyamatok a természetben

A Föld fizikai (geológiai), kémiai és biológiai állapotát olyan transzport-, illetve átalakulási folyamatok összességével jellemezhetjük, amelyek közül számos körfolyamatként írható le. Ezen körfolyamatok jellemzésére alapvetően két paramétert használhatunk: (1) az egyes rezervoárokból található elem-, illetve vegyület-mennyiségek; (2) a rezervoárok közötti anyagtranszport mértéke. Alapvető kérdés – a ciklusok jellemzését tekintve –, hogy a rezervoárok közötti anyagtranszport sebessége milyen módon függ a bennük található anyagmennyiségtől, továbbá más, külső tényezőktől. Sok esetben az adott komponens rezervoáron belüli eloszlásának figyelembe vételétől eltekinthetünk.

A földi környezet spontán folyamatainak (transzportfolyamatok) körfolyamatként történő leírása abból a tényből kiindulva, hogy a Föld ún. zárt rendszer, azaz környezetével, a csillagközi térrel – ellentétben az intenzív energiacserevel – csupán jelentéktelen anyagcserét folytat, elvileg kézenfekvő. A körfolyamat közelítés számos előnnyel jár, ám a kezelésmódnak kritikus pontjai is léteznek. Az előnyök a következők:

- meghatározható a rezervoárok anyag tartalma, megadhatók a rezervoárok közötti anyagáramok és a tartózkodási idők;
- megalapozza a körfolyamatok kvantitatív modellezését;
- lehetőséget ad a természeti, illetve antropogén anyagáramok mértékének megbecslésére;
- megadható, hogy adott rezervoár anyagmennyiségét mely folyamatok növelik, illetve a rezervoárból a kérdéses komponens közvetlenül hová távozik;

- adott kémiai elem körforgásával kapcsolatban segít rámutatni a hiányzó ismeretekre (még feltételezhető, nem ismert rezervoárok, pontatlan anyagáramok, stb.)

Kritikus pontként a következő tényezőkre utalhatunk:

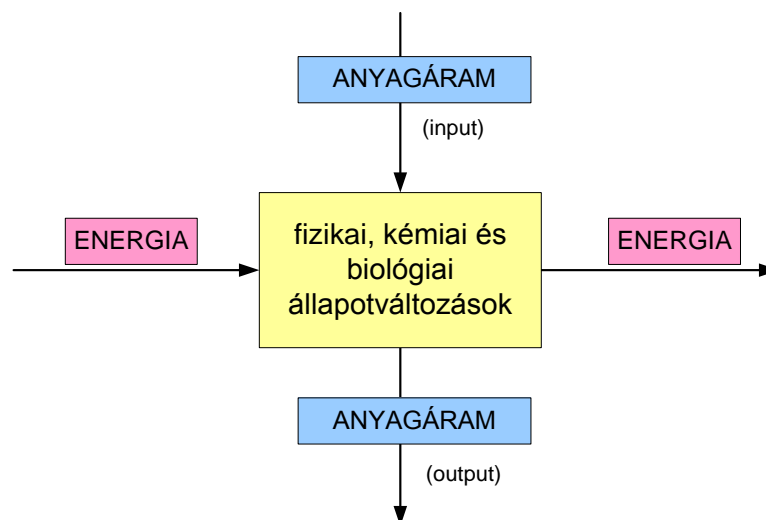
a természeti rendszerek vizsgálata – összetettségük és „nyitott rendszer” voltuk miatt – szükségképpen közelítő adatokat szolgáltat (kevés felvilágosítást kapunk pl. a rezervoárokból lejátszódó folyamatokról, továbbá a rezervoárok közötti anyagáramok természetéről).

a körfolyamat – közelítés adott esetben lehetőséget ad arra, hogy két rezervoár közötti anyagáramot ne közvetlenül, hanem az anyagmérlegből különbséggént határozzunk meg, ami komoly bizonytalanságot hordoz magában;

a körfolyamatokban a rezervoár átlagos anyagkoncentrációjával számolunk, amelyet gyakran nehéz megadni a koncentráció-eloszlás változásai valamint más tényezők miatt.

2.2.1. Az ökológiai rendszerek dobozmodellje; definíciók

Földünk bármely önkényesen választott, természetes vagy csupán elvi határokkal rendelkező része a folyamatos anyag- és energiaáramlás alapján nyitott rendszernek tekinthető, amelyben szigorú értelemben véve kémiai egyensúly nem alakul ki. Ezek a rendszerek tehát ún. kvázi egyensúlyi rendszerek (flow equilibrium). Tetszőleges térfogatú rész vagy tetszőleges szféra ún. dobozmodellként kezelhető (8. ábra), amelybe anyag és energia áramlik (input), ezt követően fizikai (geológiai), kémiai, illetve biológiai állapotváltozások játszódnak le, majd a térből anyag és energia távozik (output).



8. ábra. Az ökológiai rendszerek dobozmodellje

Bármely, a rendszerben tartózkodó, véges koncentrációjú anyag számára a stacionárius rendszer meghatározott kapacitású **rezervoárt** jelent. A rezervoár tehát adott mennyiségű anyaghalmoz, amelyet meghatározott fizikai (geológiai), kémiai és biológiai sajátosságok jellemeznek, és amelyet sajátos körülmények között ésszerűen homogén eloszlású halmaznak tekinthetünk (pl. oxigén az atmoszférában; az óceánok felületi rétegében található élő szerves anyag karbónium-tartalma; kén az üledékes kőzetekben, stb.). Ha a rezervoárt fizikai határainak méretével adjuk meg, akkor anyagtartalmát mennyiségével (M) jellemezzük (tömeg vagy mólszám).

Mindazon fizikai vagy kémiai folyamatok, amelyek primer módon egy anyag koncentrációjának növekedéséhez vezetnek, **forrásként** (Q) tekintendők, megfordítva, bármely folyamatot, amely az anyag koncentrációját csökkenti (kémiai átalakulás, anyag kiáramlás) **nyelőnek** (S) nevezzük. (A Q , illetve S jelölés a német Quelle és Senke szavakból származnak.) Az anyagáram nagyon gyakran arányos a rezervoárban lévő anyagmennyiséggel:

$$S = k \cdot M,$$

bár attól független is lehet. (Néhány esetben $S = k \cdot M^\alpha$, ahol $\alpha > 1$).

Az **anyagáram** (tömeg·idő⁻¹; kg s⁻¹, mol s⁻¹) egy komponens azon mennyiségét jelöli, ami időegység alatt belép a rendszerbe, vagy távozik a rendszerből, míg az **anyagáram sűrűsége** a felületegységre vonatkoztatott anyagáramot mutatja be (tömeg·idő⁻¹·felület⁻¹; kg s⁻¹m⁻²; mol s⁻¹m⁻²). Globális léptékű anyagáram esetében tömegegységként általában a teragram (Tg) mennyiségegységet használják, ami a technikailag használatos megatonna (Mt) egységgel számszerűleg megegyezik:

$$1Tg = 10^{12} g \hat{=} 1Mt = 10^6 t$$

Tetszőleges anyagfajta **tartózkodási ideje** az ökológiai rendszerekben a másodperc törtrésze és évezredek közé eshet. A tartózkodási időt matematikai szempontból – nem tekintve a kémiai reakciót mint lehetséges forrást vagy nyelőt – **átlagos áthaladási időként** definiálhatjuk, τ (turnover); reciproka pedig az **áthaladási sebesség**:

$$\tau_i = \frac{\text{az } i\text{-edik komponens mennyisége } (M_i) \text{ a rendszerben}}{\text{az } i\text{-edik komponens anyagárama } (Q_i, S_i)}$$

Az átlagos áthaladási idő az az idő, ami alatt a rezervoár anyagkoncentrációja nullára csökken, ha $Q=0$, és a nyelő (S) anyagárama állandó marad. Stacionárius állapotban egy kémiai komponens koncentrációjára, c_i a következő összefüggés érvényes:

$$\frac{dc_i}{dt} = Q - S = 0$$

Ciklusról olyan rendszerek esetében beszélünk, ahol két vagy több rezervoár kapcsolódik össze, s ennek során körfolyamat jelleggel nagy mértékű anyagcsere játszódik le. Ha az anyagtranszport teljes egészében a rendszeren belül játszódik le, akkor zárt rendszerről beszélhetünk. A csatolt rezervoárokból a transzport gyakran egyirányú, ily módon a lánc végén néhány rezervoár akkumulatív jellegű.

A **biogeokémiai körfolyamat** megnevezést alapvetően a biológiai szempontból eszenciális elemek – C, O, N, P, S, H – globális, illetve regionális körforgásának leírására alkalmazzuk, az atmoszféra, a hidroszféra, a litoszféra (talaj, üledékek) és az élő organizmusok között. (Megjegyzendő, hogy a hidrogén esetében, minthogy környezeti transzportja szorosan kapcsolódik a szóban forgó többi eleméhez, külön hidrogén-ciklust nem vizsgálunk.)

A ciklusok a legfontosabb rezervoárokat és anyagáramokat tüntetik fel. Az anyagmérlegek és a ciklusok a valódi környezetet tekintve térben nagyon eltérő léptékűek lehetnek (globális, regionális). A választás a vizsgálat céljától függ, ez határozza meg a rezervoár nagyságát, de fontos szempont lehet a vizsgált rendszer homogenitása is. A karbónium körforgását tekintve pl. az atmoszféra egyetlen rezervoárként kezelhető, minthogy a CO_2 eloszlását benne jó közelítéssel homogénnek tekinthetjük. Ezzel szemben az óceánok karbóniumtartalma nagy térbeli változatosságot mutat, ésszerű tehát a felszíni, illetve a mélyebb rétegeket elkülönülten kezelni. Hasonlóan, számos nitrogén-, valamint kénvegyület az atmoszférában a Föld különböző régióiban jelentősen eltérő koncentrációkban van jelen. Ilyen esetekben a regionális mérleg jobban használható, mint a globális.

A biogeokémiai körfolyamatok modellezése, azaz a csatolt rezervoárok viselkedésének matematikai leírása a rezervoárok jellegétől függően lineáris, illetve nem lineáris rendszerként közelíthető meg. Előbbiek esetében a rezervoárok közötti anyagáram lineárisan függ a

rezervoárban lévő anyagmennyiségtől. A második esetben az összefüggés ezt tekintve bonyolultabb. Jó példa erre a CO₂-csere az atmoszféra és az óceánok felületi rétege között, minthogy a szén-dioxid fizikai oldódását kémiai átalakulás követi. Az előzőre viszont példaként említhetjük a foszfátérczek ipari kitermelésének növekedését a foszforciklusban.

Egy kémiai elem (vegyület) ökológiai viselkedésének leírásához a globális vagy regionális anyagmérleg megadása egyedül – természetesen – nem elegendő. Fontos, hogy az ökológiai rendszer mindenkori feltételei között lehetséges átalakulási és lebomlási mechanizmusokat ismerjük, s ezáltal a kiindulási anyagok, a köztitermékek és a végtermékek koncentrációjának időbeli változását felderíthessük. A nehézfémek pl. a természeti környezetben jellegzetes hatást mutatnak, s transzportjuk, biológiai hozzáférhetőségük és ökológiai hatásuk a konkrétan előforduló individuális kémiai részecskefajtáuktól (speciáció) függ.

2.3. A biológiailag esszenciális elemek biogeokémiai körforgása

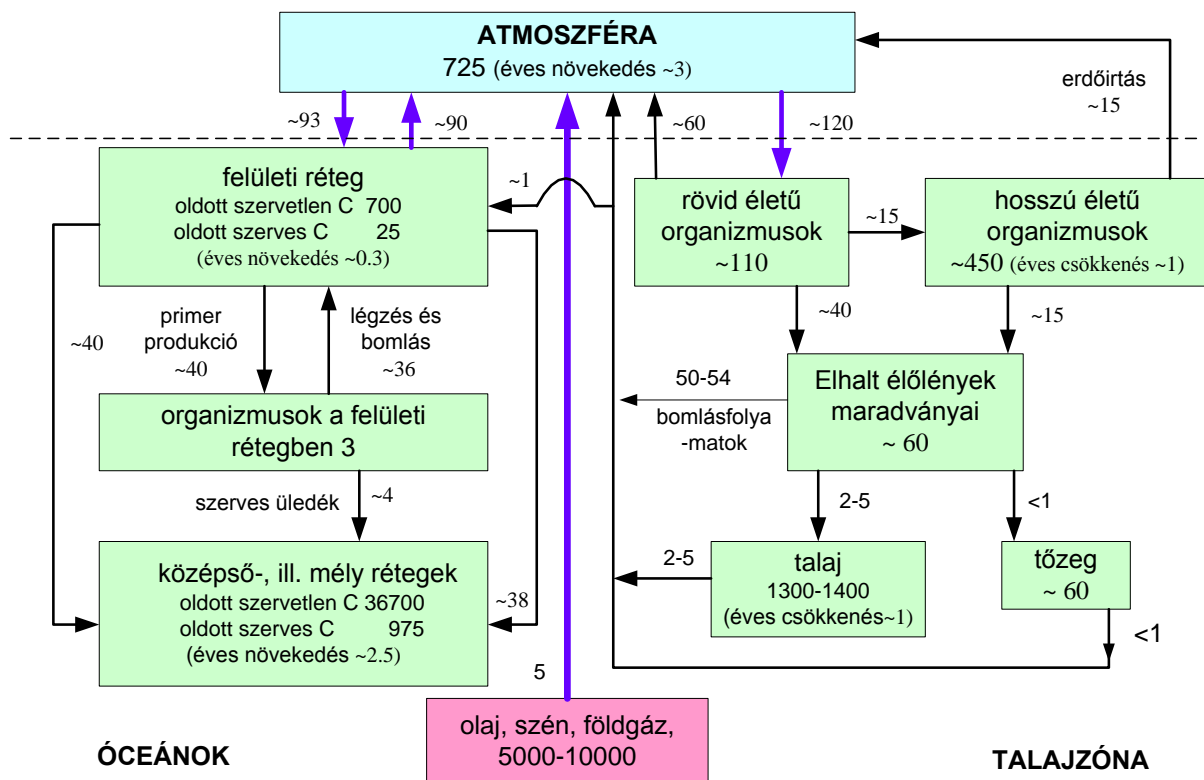
2.3.1. Karbóniumciklus

Bár az élővilágban számos kémiai elem játszik fontos szerepet, a szén, mint meghatározó elem ebben a tekintetben kivételes helyet foglal el. A karbónium a bioszféra valamennyi folyamatának résztvevője, hiszen a földi organizmusokat éppúgy magában foglalja, mint a szervetlen karbonát-rezervoárokat, továbbá a közöttük fennálló komplex kapcsolatokat is tükrözi. Ettől függetlenül ezen bonyolult rendszer feltárása napjainkra mélyrehatóan megtörtént, s nem túlzás azt állítani, hogy feltehetőleg ezt a ciklust ismerjük a legjobban. Az elmondottakhoz hozzáfűzhetjük még, hogy a szén-dioxid globális klímadestabilizációban játszott szerepének felismerése óta a szén körforgásával kapcsolatos kutatások még intenzívebbé váltak.

A szén globális biogeokémiai körforgását a lehetséges karbónium-rezervoárokkal és az ismert anyagáramokkal a **9. ábra** mutatja be. A ciklus időskálája tág határok között változik, a földkéreg mozgásának millió évekig tartó folyamataitól az atmoszféra-hidroszféra karbóniumcsere, továbbá a fotoszintézis órákig, illetve másodpercekig tartó lejátszódásáig bezárólag.

Az ismert szénvegyületek száma több mint egy millió, közöttük több ezerre tehető a biológiai szempontból fontos vegyület. A változatosság oka a szénatom azon képessége, hogy sokféle kötés kialakítására képes. Az elemi szén gyémánt, grafit és amorf szén formájában fordul elő a

természetben. Érdekességként kell megemlítenünk, hogy az elemi állapotú szén a körforgásban nem játszik szignifikáns szerepet. A karbónium oxidációfoka +4 és -4 között változik, legjellegzetesebb oxidációfoka a +4 (szén-dioxid, karbonátok). Karbonát a természeti környezetben két rezervoárban fordul elő: a hidroszférában mint oldott karbonát (H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-}), a litoszférában pedig karbonátos ásványok (CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, FeCO_3) formájában. A szén-monoxid, amelyben a szén oxidációfoka +2, nyomnyi mennyiségben az atmoszférában fordul elő.



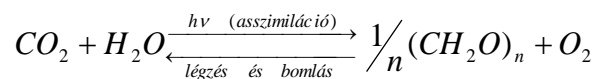
9. ábra. Rezervoárok és anyagáramok a karbóniumciklusban (1015 gC; 1015 g a-1), Bolin (1986)

A karbónium fotoszintézis során lejátszódó asszimilációja (asszimilatív redukció) hozza létre a földi redukált karbóniumot (CH_2O)_n, amelynek számos formáját ismerjük. A metán és más nyomgázok az atmoszférában úgy képződnek, hogy a karbóniumot anaerob baktériumok redukálják, vagy a redukció kémiai folyamatok eredménye.

A szén az atmoszférában túlnyomóan CO_2 , kis mennyiségben CH_4 , CO és más nyomgázok formájában van jelen (pl. nagyobb szénatomszámú szénhidrogének). A tengervíz karbóniumtartalma négy formában fordul elő: oldott szervetlen karbónium, oldott szerves karbónium, szerves kolloidok és a tengeri élővilág összessége. Bár az utóbbi viszonylag kis mértékű karbóniumforrás, számos elem tengervízben történő eloszlását illetően meghatározó

szerepet tölt be. A fotoszintézis zónában lejátszódó primer biomassza-produkció a szerves karbonium óceánvízbe történő bejutásának meghatározó forrása.

A szárazföldi ökológiai rendszerekben található karbonium mennyisége igen nagy, és az atmoszféra, a szárazföldi élőlények továbbá a talaj között lejátszódó karboniumcsere gyors folyamat. A körforgást tekintve primer folyamat az atmoszférából a biológiai rendszerekbe irányuló karbonium-transzport. A fotoszintézis során az autotróf organizmusok a CO₂-ot szerves anyagokká alakítják át. A komplex folyamatot bemutató egyszerű egyenlet a következő:

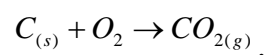


A szárazföldi biomassza az előfordulás formáit és a rezervoárokat tekintve igen nagy változatosságot mutat. A tartózkodási idők is jelentősen különbözhetnek egymástól. Meg kell jegyeznünk, hogy a szárazföldi élőanyag karboniumtartalmának mintegy 90%-át az erdők teszik ki.

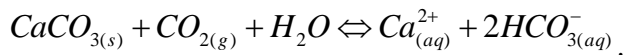
Bár a földi karbonium legnagyobb lelőhelye a litoszféra, mégis azt mondhatjuk, hogy az anyagcsere a litoszféra, másfelől az atmoszféra, a hidroszféra és a bioszféra között csekély mértékű. Ez egyben azt is jelenti, hogy a karbonium tartózkodási ideje a litoszférában nagyságrendekkel hosszabb, mint a többi rezervoárban. A fosszilis tüzelőanyagok elégetése az a folyamat, amelynek során a litoszférában található redukált állapotú karbonium óriás mennyiségeit juttatjuk az atmoszférába, szignifikánsan megváltoztatva ezzel a rezervoárok közötti anyagtranszportot. A földkéreg karboniumtartalmának mintegy 75%-a karbonát-karbonium. Különböző vegyületek és módosulatok ismeretesek, közöttük a kalcit és az aragonit a meghatározó (CaCO₃-módosulatok). Jelentős még a dolomit – CaMg(CO₃)₂ – mennyisége is.

2.3.1.1. A körforgás kémiája

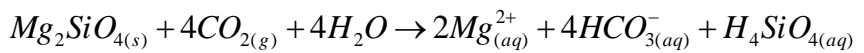
A karbonium transzportjának egyik meghatározó lépését a **mállásfolyamatok** képezik. A kémiai mállásfolyamatok révén az atmoszféra karboniumtartalma egyaránt növekedhet és csökkenhet. Az elemi-, illetve a szerves karbonium oxidációja révén pl. szén-dioxid jut az atmoszférába:



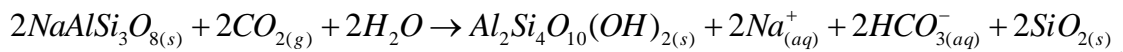
míg a szén-dioxid és a karbonátok reakciója víz jelenlétében fordított irányú transzportfolyamatot idéz elő:



A szilikátásványok, pl. a Mg-olivin hasonlóképpen viselkednek:



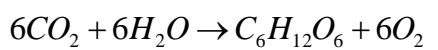
A földpátok (pl. albit) mállása pedig montmorillonit-típusú agyagásvány képződéséhez vezet:



Az említett folyamatok szempontjából a víz szerepe külön hangsúlyozandó, hiszen azon túl, hogy az erózióban meghatározó szerepet játszik, a szárazföldről az óceánokba jutó karbónium 90%-át a folyóvizek szállítják.

A karbonátokkal és a szilikátokkal lejátszódó mállásfolyamatok fő CO₂-forrása a talajatmosfera. A szerves anyagok lebomlása továbbá a gyökerek légzésfolyamatai kapcsán a talajatmoszférában jelentékeny CO₂-parciális nyomás alakul ki. Meg kell még jegyeznünk, hogy a mállásfolyamatok révén a litoszférába jutó karbónium mennyisége nagyobb, mint ami oxidáció révén az atmoszférába visszajut.

A bioszféra és az atmoszféra közötti karbóniumcsere szempontjából a CO₂ és a CH₄ játszik szerepet, bár az utóbbi a cserében csupán 1%-kal vesz részt. A metán anaerob úton rizsföldek iszapjában, édesvízú tavakban, mocsarakban és ingoványos területeken képződik, míg a CO₂ a fosszilis tüzelőanyagokból és a növényekből származik. A **növényi fotoszintézis** – mint láttuk – a legjelentősebb biokémiai reakció a természetben. A reakció lényege az, hogy a szén-dioxid a vizet külső energia felhasználásával oxidálja, s eközben a sugárzó energia kémiai energiává alakul át. A fotoszintézis bruttó egyenlete az elmondottaknak megfelelően:

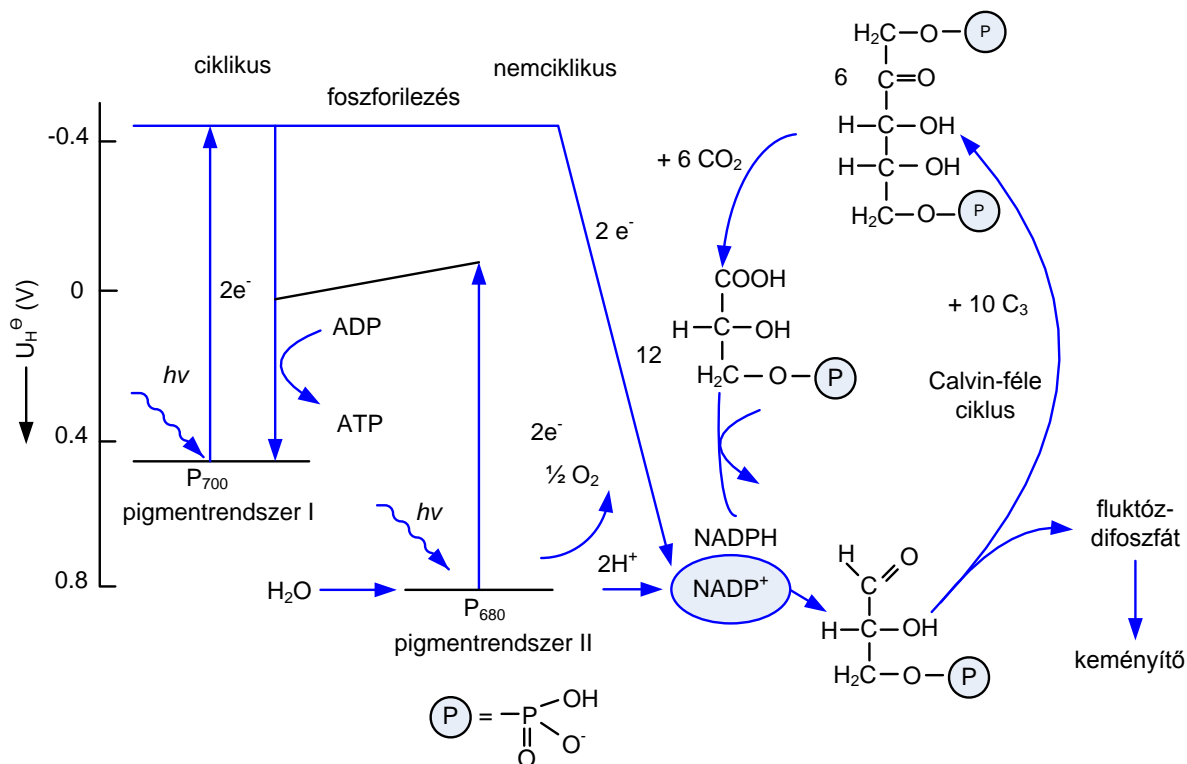


Ez az egyenlet komplex reakciólánc részreakcióit összegzi (**10. ábra**). A reakciósor alapvetően három fő folyamatból áll:

ciklikus fotofoszforilezés,

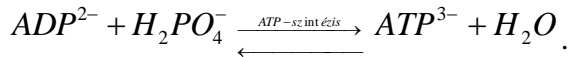
nemciklikus fotofoszforilezés (vízfotolízis),

szén-dioxid asszimiláció.

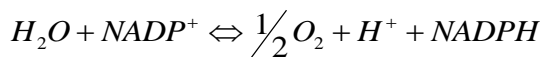
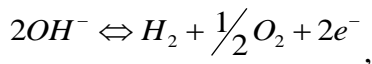
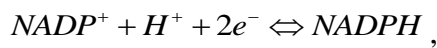


10. ábra. A fotoszintézis mechanizmusának sematikus ábrázolása

Míg az első két folyamat reakciói adott energiájú fénkvantumok abszorpcióját igénylik (fotokémiai reakció), a szén-dioxid asszimilációjához (CALVIN-féle ciklus) fényenergia nem szükséges (sötétreakció). A fotofoszforilezéshez ezzel szemben fotoszintézis-pigmentek (karotinoidok, klorofill, stb.) jelenléte nélkülözhetetlen, amelyek képesek arra, hogy a fényenergiát abszorbeálják, és a tárolt energiát a fotokémiailag aktív centrumokra (pigmentrendszer I, illetve pigmentrendszer II) átvigyék. A klorofill magnéziumtartalmú porfirinszármazék, amelynek elektronrendszere könnyen gerjeszthető. A gerjesztett elektronok alapállapotba történő visszajutása során felszabaduló energia azután az adenzin-difoszfát (ADP^{2-}) foszforilezésére szolgál, s mint biológiailag „lehívható” energia (adenozin-trifoszfát, ATP^{3-}) tárolódik (ciklikus foszforilezés):

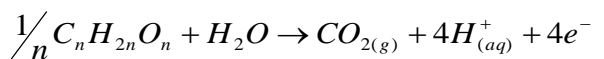


A nemciklikus foszforilezésnél az elektronfölséggel rendelkező vastartalmú fehérje, a ferredoxin mint erős redukálószer a koenzim nikotinsavamid-adenin-dinukleotid-foszfátot (NADP⁺) reverzibilisen redukálja. Ehhez kapcsolódva a pigmentrendszer II-ből fotoaktiválás (elektronleszakítás) útján keletkező erős elektronakceptort a vízből származó hidroxidionok redukálják. A víz fotolízisének bruttó reakcióegyenleteit egyszerűsített formában a következőképpen adhatjuk meg:



A CO₂-asszimiláció enzimkatalizált körfolyamat, amely fényenergiát nem igényel, s számos lépésen át szénhidrátok képződéséhez vezet.

Oxidáló környezeti körülmények között valamennyi szerves vegyület átalakulása széndioxiddá termodinamikailag kedvezményezett. Heterotróf mikroorganizmusok képesek a szénvegyületek, a **biomassza oxidatív lebontására**, ami asszimilációs (tápanyagfelvétel) és disszimilációs (energianyerés légzés útján) folyamatokon keresztül megy végbe. A tiszta glükóz bruttó összetételének megfelelő biomassza teljes oxidációja pl. a következő egyenlet szerint megy végbe:



A folyamat hajtóereje a szerves szubsztrátum biokémiai lebomlása energianyerés céljából, heterotróf organizmusok segítségével. A reakció redoxipotenciálja a glükóz és a CO₂ standardállapotára vonatkoztatva pH=7-nél U_H=-0,425V. Ez azt jelenti, hogy az oxidáció csak olyan elektronakceptorok jelenlétében megy végbe, amelyek pH=7 esetén pozitívabb redoxipotenciállal rendelkeznek (**3. táblázat**).

3. táblázat. A biomassza oxidatív lebomlása – az elektronakceptor redoxipotenciálja

Folyamat/reakció	$U_H(V)$
Aerob légzés	0,81
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \Leftrightarrow 2H_2O$	
Denitrifikáció (nitrátlégzés)	0,75
$NO_3^- + 6H^+ + 5e^- \Leftrightarrow 0,5N_2 + 3H_2O$	
Mangán-dioxid-redukció	0,46
$MnO_{2(s)} + 4H^+ + 2e^- \Leftrightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	
Ammóniaképződés	0,36
$NO_3^- + 10H^+ + 8e^- \Leftrightarrow NH_4^+ + 3H_2O$	
Vas(III)-oxid-redukció	-0,10
$FeO(OH)_{(s)} + 3H^+ + e^- \Leftrightarrow Fe^{2+} + 2H_2O$	
Alkoholos erjedés	-0,18
$\frac{1}{n} C_n H_{2n} O_n + 2H^+ + 2e^- \Leftrightarrow 0,5C_2H_5OH + 0,5H_2O$	
Deszulfurikáció (szulfátlégzés)	-0,22
$SO_4^{2-} + 9H^+ + 8e^- \Leftrightarrow HS^- + 4H_2O$	
Metánképződés	-0,24
$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \Leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$	
Hidrogénképződés	-0,41
$2H^+ + 2e^- \Leftrightarrow H_2$	
Glükózoxidáció	-0,425
$CO_2 + 4H^+ + 4e^- \Leftrightarrow \frac{1}{6} C_6H_{12}O_6 + H_2O$	

A legfontosabb oxidációs folyamat az aerob légzés (az oxigénmolekula az elektronakceptor), amelyet a redoxipotenciálok különbségének csökkenése szerint az anaerob légzés és az erjedés különböző típusai követnek. Az anaerob légzés (nitrátlégzés, szulfátlégzés) során az oxigén csekély parciális nyomása miatt a szerves anionok (NO_3^- , SO_4^{2-}) oxidálóképessége kerül előtérbe. Az erjedés formálisan a biomassza diszproporcionálódását jelenti, minthogy ebben az esetben a szerves szubsztrátumok egyszerre szerepelnek elektronakceptorként, illetve – donorként. A mangán(IV)-oxid és a $FeO(OH)$ redukciója kémiai úton megy végbe. Ennek a

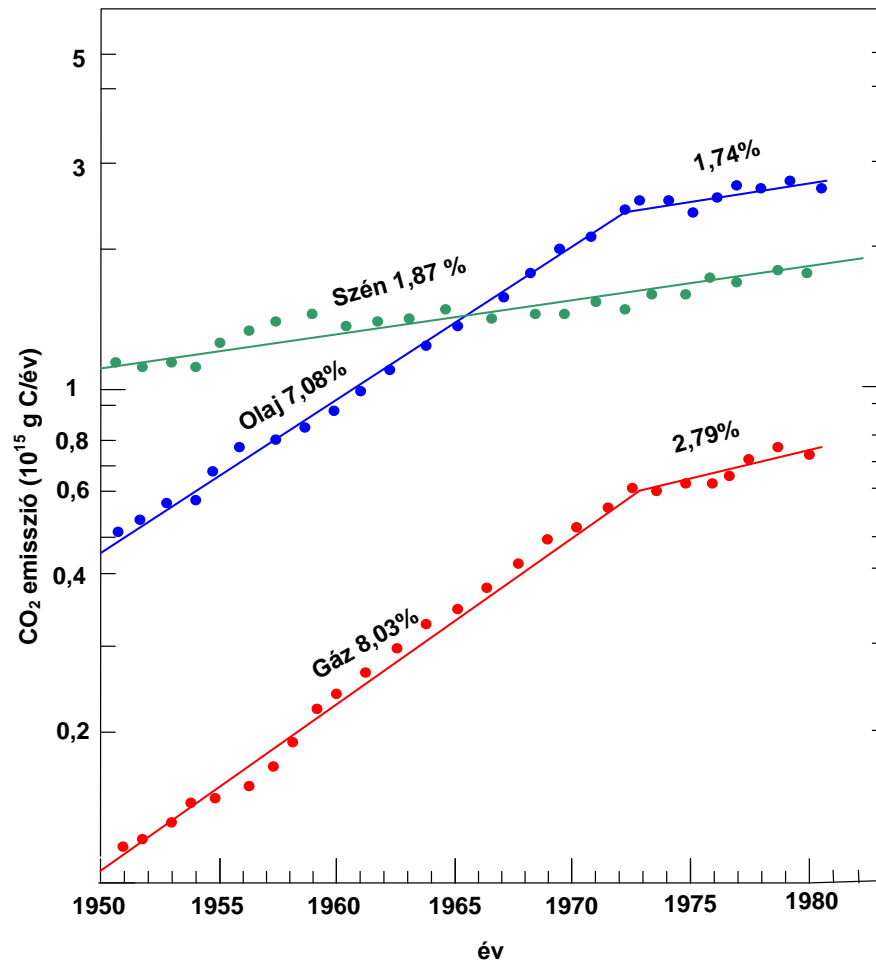
folyamatnak a talaj kémiája szempontjából van jelentősége, minthogy a mangán- és vasvegyületek oldhatósága csökkenő oxidációfokkal együtt növekedik. A metanogenezis (metánképződés) és a hidrogénképződés ún. metanogén baktériumok működéséhez kapcsolódik, mivel a metán képződése csak acetátok hasítása vagy a CO₂ hidrogénnel történő reakciója útján játszódhat le. Az átalakulás ugyanis a szén-dioxid szerves vegyületekkel történő reakciójával nem megy végbe. A bevezető lépcső ebben az esetben a hidrogén képződése acetogén baktériumok segítségével.

2.3.1.2. Az emberi tevékenység hatása a szén ciklusra

A szén biogeokémiai körforgása kapcsán, miként az a többi elemre is érvényes, abból indulunk ki, hogy a viszonyok „állandósult állapotként” (steady-state) közelíthetők meg a legjobban. Az ipari- és az agrárforradalom előtt a karbónium-ciklus a feltételezések szerint kvázi-egyensúlyi állapotban lehetett. Azonban ezen, antropogén tevékenység által még nem zavart környezetben is voltak természeti változások. Az ún. „kis jégkorszak” 300-400 évvel ezelőtt pl. befolyást gyakorolhatott a karbónium körforgására. A sarkvidéki jégbe zárt légbuborékok CO₂-koncentrációja azt mutatja, hogy az atmoszférában a szén-dioxid parciális nyomása 20 ezer évvel korábban, tehát a legutolsó jégkorszak vége felé 200 ppm lehetett. Ha az atmoszférikus CO₂-mennyiség változását az elmúlt 40 ezer évben vizsgáljuk, az utolsó 10 ezer évre vonatkozó adatok meglepő állandósága alátámasztani látszik a „steady-state” felvetésen alapuló megközelítéseket.

A fosszilis tüzelőanyagok elégetése jellemző összetevője az antropogén karbónium-emisszióknak, bár ezt tekintve nem feledkezhetünk meg az erdőtüzekhez és a termőföldhasználathoz kapcsolódó emisszióról sem. Az ipari forradalom kapcsán a kibocsátás növekedése a 19. század korai szakaszában indult meg. 1860 körül ez az érték mintegy 100TgC a⁻¹ volt. Ettől kezdve a növekedés napjainkig folyamatos, bár sebessége az elmúlt több, mint egy évszázad során változott. 1860 körül még csupán ásványi szenet használtak, azonban a század végén már az ásványolaj is felhasználásra került, amit azután a 20. század első évtizedében a földgáz követett. A teljes emisszió 1860 és az I. Világháború között évi 4%-kal emelkedett, s a kibocsátásból az ásványi szén 90%-kal részesedett. A következő 30 évben (1914-1945) az éves növekedés 1% körüli, ami az ezt követő periódusban (1945-1973) ismét 4%-ra emelkedik. A **11. ábra** 1950-től mutatja be az emisszió mértékének változását. 1973-tól

a kibocsátás növekedése 2%-nyi, s az ábrán jól látható a felhasznált tüzelőanyagok arányában bekövetkezett módosulás is.



11. ábra. A CO₂ emisszió változása tüzelőanyag-fajtánként 1950-től kezdődően

A szén-dioxid emisszió jövőbeni alakulását tekintve számos bizonytalansági tényezőt kell figyelembe vennünk. Mint láttuk, a kibocsátás sok esetben ingadozást mutat, másfelől a fosszilis tüzelőanyag-készleteket nem ismerjük elegendő pontossággal. A legjobbnak látszó becslés szerint mintegy $5 \cdot 10^6 - 10^7$ TgC az a mennyiség, ami a jelenlegi technikákkal gazdaságosan kitermelhető. Minthogy a fosszilis tüzelőanyagok nem megújuló energiahordozók, fogyásuknak megfelelően a felhasználást tekintve hanyatlással számolhatunk, ami egyben a CO₂-kibocsátás mértékét is meghatározza.

A fosszilis tüzelőanyagokból származó atmoszférikus karbónium idővel az óceánvízben oldódhat, vagy beépülhet a szárazföldi bioszférába. Az óceánokban történő oldódás kapcsán általában azt feltételezik, hogy az antropogén emisszió kerekén 40%-a az óceánvízben halmozódik fel. Minthogy a teljes emisszió mintegy 50%-a a mérések szerint az atmoszférában megtalálható, kézenfekvő az a feltételezés, hogy léteznie kell egy még nem ismert nyelőnek a

körforgás folyamatában. Feltételezhető, hogy a hiányzó mennyiséget a szárazföldi biomasszában kell keresnünk. Az idevágó kutatások jelenleg is folyamatban vannak. Az bizonyosnak látszik, hogy a szárazföldi élővilág nem képes az atmoszféra növekvő CO₂-tartalmának nagyobb hányadát felvenni.

Az atmoszféra szén-dioxid-tartalma a Föld hőmérlege szempontjából is figyelmet érdemel, ami az éghajlat alakulását tekintve meghatározó fontosságú. Az infravörös tartományba eső sugárzást abszorbeálni képes molekulák mennyiségének növekedése az atmoszférában megnövelni ezen utóbbi energiaforgalmát, ami az időjárási rendszereket véletlenszerűen befolyásolja (a determinisztikus rendszerek véletlenszerű viselkedése). Minthogy az antropogén mennyiségek nagyságrendileg azonosak a természeti forrásokból származó mennyiségekkel, ily módon az emberi tevékenység az atmoszférikus szén-dioxid mérlegre meghatározó befolyást gyakorol. Ha viszont azokat a gazdasági, politikai és szociális érdekeket tekintjük, amelyek a fejlett és a fejlődő országokban egyaránt meghatározó szerepet játszanak, ijesztően nagy feladatnak látszik, hogy az antropogén emissziót energiatakarékosság, másik oldalról a szén-dioxid kibocsátással nem járó energia-előállítási módszerekkel, továbbá a trópusi erdők kiirtásának megakadályozásával csökkentjük.

Nagy bizonytalanság forrása az is, hogy ma még kevésbé ismerjük a biológiai rendszerek választását a változó hőmérsékleti értékekre, valamint a CO₂-koncentrációjának növekedésére. Bár vannak adatok arra, hogy a CO₂-mennyiségének növekedése a fotoszintézist gyorsítja, megjósolhatatlan, hogy más esetekben milyen változás, illetve faj-helyettesítés következik be a megváltozott éghajlati viszonyok között. Amennyiben szerves anyag formájában több karbónium tárolódnék, akkor ez a negatív visszacsatolás csökkenthetné az antropogén emisszió éghajlatra gyakorolt hatását. Azonban elképzelhető pozitív visszacsatolás is; pl. a növekvő hőmérséklet gyorsítja a szerves anyag aerob elbomlását, ily módon az atmoszférába jutó CO₂ mennyisége növekednék.

Az elmondottak egyértelművé teszik, hogy az emberi tevékenység a karbónium globális körforgását számos tekintetben módosította. Bár ismereteink az elmúlt évtizedekben jelentősen gyarapodtak, tudásunk ma még több szempontból korlátos. És nem feledkezhetünk meg arról sem, hogy a pontosabb kép kialakításához elengedhetetlenül szükséges a karbóniumciklus más kémiai elemek (N, P, stb.) körforgásához való kapcsolódásának felderítése is.

2.3.2. A nitrogén körforgása

A nitrogénciklust számos fontos biológiai és abiotikus folyamat alakítja, amelyekben gáz, folyadék és szilárd formában nagy számú vegyület vesz részt. A nitrogén az élő szervezetekben más elemekkel – C, P, S, H, O – együtt a biomolekulák meghatározó komponense. Szervetlen és szerves vegyületei az atmoszférában, a hidroszférában és a pedoszférában lejátszódó kémiai reakciók szempontjából egyaránt fontosak. Az emberi tevékenység természeti környezetre gyakorolt hatásában is jelentős szerepet játszik, hiszen a fotokémiai füstköd, a savas ülepedés, a talajvíz nitrátok által történő szennyeződése mind nitrogénvegyületekhez kapcsolódik. Az ammónia pedig jelentős szerepet játszik a légköri aeroszolok kialakulásában.

2.3.2.1. Nitrogénvegyületek a természeti környezetben

A nitrogén vegyértékheján öt elektron található, ennek megfelelően oxidációfoka -3 és +5 között változhat. A természeti környezetben található vegyületeinek jelentős részében a nitrogén a szénhez vagy a hidrogénhez kapcsolódik, ennek megfelelően ezekben oxidációfoka negatív, ami annak következménye, hogy Pauling-féle elektronegativitása nagyobb, mint az említett elemeké. (Ha a hidrogénatom vegyületeiben oxigénhez kapcsolódik, akkor oxidációfoka pozitív.) A nitrogén kémiája szempontjából a molekula (N_2) nagy disszociációs energiája ($E_D=942 \text{ kJ mol}^{-1}$) meghatározó jelentőségű, s a nagy energiaigény miatt a disszociációs lépést követő energiakompensáció csak korlátozott számú reakcióban lehetséges. A **salétromsav** a természetben a troposzférában lejátszódó folyamatok révén keletkezik, amelyekben a fotokémiai úton képződő szabad gyökök – HO_2 , RO_2 , OH – meghatározó szerepet játszanak. Az ily módon keletkező salétromsav a savas ülepedés egyik komponense. A salétromsav tiszta állapotban folyadék, amelynek gőznyomása nagy (20°C -on 47,6 torr), ily módon az atmoszféra alsó rétegeiben gázállapotban fordul elő, másfelől aeroszol formájában vagy esőcseppben oldva is kimutatható. Bázikus anyaggal (pl. NH_3) reagálva nitrátok képződnek, amelyek kondenzációs magként (csapadékképződés) szerepelhetnek.

A nitrogén-dioxid szobahőmérsékleten vörösbarna gáz, kisebb hőmérsékleten színtelen N_2O_4 -dá dimerizál, ily módon a városi atmoszférában 0°C körüli hőmérsékleten – kis koncentrációban – a dinitrogén-tetroxid is előfordul. A NO_2 erősen mérgező hatása, a nitrogén-monoxid (NO) oxidációja során keletkezik, ily módon a két gáz koncentrációja az atmoszférában egymás függvénye. Minthogy a nitrogén-monoxid a tapasztalatok szerint

valamennyi égésfolyamat során képződik, a két gáz a városi atmoszférában sokkal nagyobb koncentrációban van jelen, mint a természeti környezetben. Ez a tény a fotokémiai füstköd kialakulása szempontjából meghatározó körülményt jelent.

4. táblázat azokat a leggyakoribb nitrogénvegyületeket tekinti át, amelyek a természeti környezetben előfordulnak, és pedig a nitrogén oxidációs állapota szerint. Tartalmazza továbbá a forráspontokra vonatkozó adatokat is.

A salétromsav a természetben a troposzférában lejátszódó folyamatok révén keletkezik, amelyekben a fotokémiai úton képződő szabad gyökök – HO₂, RO₂, OH – meghatározó szerepet játszanak. Az ily módon keletkező salétromsav a savas ülepedés egyik komponense. A salétromsav tiszta állapotban folyadék, amelynek gőznyomása nagy (20°C-on 47,6 torr), ily módon az atmoszféra alsó rétegeiben gázállapotban fordul elő, másfelől aeroszol formájában vagy esőcseppben oldva is kimutatható. Bázikus anyaggal (pl. NH₃) reagálva nitrátok képződnek, amelyek kondenzációs magként (csapadékképződés) szerepelhetnek.

A nitrogén-dioxid szobahőmérsékleten vörösbarna gáz, kisebb hőmérsékleten szintelen N₂O₄-dá dimerizál, ily módon a városi atmoszférában 0°C körüli hőmérsékleten – kis koncentrációban – a dinitrogén-tetroxid is előfordul. A NO₂ erősen mérgező hatású, a nitrogén-monoxid (NO) oxidációja során keletkezik, ily módon a két gáz koncentrációja az atmoszférában egymás függvénye. Minthogy a nitrogén-monoxid a tapasztalatok szerint valamennyi égésfolyamat során képződik, a két gáz a városi atmoszférában sokkal nagyobb koncentrációban van jelen, mint a természeti környezetben. Ez a tény a fotokémiai füstköd kialakulása szempontjából meghatározó körülményt jelent.

4. táblázat. A természetben előforduló leggyakoribb nitrogéntartalmú részecskefajták

Oxidációfok	Vegyület	Forráspont (°C)
+5	N ₂ O _{5(g)}	11
	HNO _{3(g)}	83
	Ca(NO ₃) _{2(s)}	
	HNO _{3(aq)}	
+4	NO _{2(g)}	21
	N ₂ O ₄	
+3	HNO _{2(g)}	
	HNO _{2(aq)}	
+2	NO _(g)	-152

+1	$N_2O_{(g)}$	-89
0	N_2	-196
-3	$NH_{3(g)}$	-33
	$NH_4^+_{(aq)}$	
	$NH_4Cl_{(s)}$	
	$CH_3NH_{2(g)}$	

A nitrogén-monoxid (NO) szobahőmérsékleten színtelen gáz, a városi atmoszférában gázfázisú egyensúlyi reakciókban elemi nitrogénből és oxigénből keletkezik. A dinitrogén-oxid (N_2O) hasonlóképpen színtelen gáz, sok tekintetben a szén-dioxidra emlékeztető molekula, egyképpen reakciórenyhék, izoelektronosak, és mindkettő lineáris szerkezetet mutat. Ám a CO_2 vízzel szemben jóval reakcióképesebb, benne jobban oldódik, és reagál vele. A N_2O kisebb reakcióképesége miatt a troposzférában hosszú élettartamú, ily módon a sztratoszférába juthat, ahol – a feltételezések szerint – az ózon ciklus módosításában szerepet játszik. A természeti környezetben a N_2O denitrifikációs, illetve nitrifikációs folyamatokban egyaránt keletkezhet.

A dinitrogén (N_2) színtelen, gázhalmazállapotú, kétatomos, stabilis molekula. Az atmoszféra nitrogéntartalma – mint tudjuk – kereken 78 tf%. Nempoláris jellegének megfelelően vízben rosszul oldódik, de az atmoszférában mérhető nagy parciális nyomása miatt az óceánvízben a molekuláris nitrogén az uralkodó nitrogén-részecskefajta.

Az ammónia színtelen gáz, bázikus jellemű, vízben oldódik, és meglehetősen reakcióképes vegyület. A globális ipari termelés kereken $13Mt\ a^{-1}$, amelyet többségében salétromsav, illetve műtrágya- valamint robbanószer-gyártásra használnak fel. A cseppfolyós ammónia (fp. $-33^\circ C$) műtrágyaként talajba történő injektálása azért lehetséges, mert savanyú és nedves talajok esetén az ammónia, még mielőtt elpárologna, ammóniumvegyületté alakul át. Azonban elterjedtebb a szilárd ammóniumsók (NH_4NO_3 , NH_4Cl) valamint a különböző nitrátok (pl. $Ca(NO_3)_2$) felhasználása. Az atmoszférában az ammónia az egyetlen, nagyobb mennyiségben előforduló, bázikus jellemű anyag, ily módon az atmoszféra „kémhatásának” beállításában meghatározó szerepet játszik. Ez azt jelenti, hogy az atmoszféra redukált nitrogéntartalmának meghatározó hányada ammóniumvegyület formájában van jelen. Az ammónia irritáló szaga és kis koncentrációban is mérgező vegyület.

Az aminok az ammónia szerves származékai ($R-NH_2$, R_2NH , R_3N), ahol az ammónia egy vagy több hidrogénjét szerves (pl. alkil) csoport helyettesíti. Közülük a legegyszerűbb a metil-amin (CH_3-NH_2). Az ammóniához hasonlóan bázisok, és jó protonmegkötő képességgel

rendelkeznek. Az oszló haltetemek jellemző szaga aminoktól származik, ez egyben atmoszférába történő transzportjuk egyik lehetséges módját is jelzi. Az aminok a bioszférában széles körben előfordulnak, valamennyi alkaloida, az aminosavak és bizonyos vitaminok $-NH_2$ funkciós csoportokat tartalmaznak.

A természetben az ún. amidok is gyakori vegyületek. A $CO(NH_2)_2$ (karbamid) pl. fontos nitrogénátvivő vegyület a növények és az állatok között. Az állatok anyagcsere-folyamataiban a proteinek és az aminosavak átalakulása során nagy mennyiségű karbamid keletkezik. A növények a karbamidot ammóniává alakítják át, amelyet azután hasznosítani képesek. Az állati ürülék és a karbamid műtrágya – a feltételezések szerint – jellegzetes forrása az atmoszférikus ammóniának.

A proteinek hasonlóan fontos nitrogénvegyületek, a sejtmagok nagy részének építőanyagai, és az organizmusok valamennyi típusában megtalálhatók. A proteinek – mint ismeretes – kémiaiilag az aminosavak polimerjei. A proteinek sokféleségének oka, hogy mintegy húsz különböző aminosav kombinációjából jönnek létre.

A természetben az említettek mellett kis mennyiségben még más szerves nitrogénvegyületek is előfordulnak, amelyek közül néhány nagyon toxikus, illetve karcinogén hatású. Ezek a nitrogénvegyületek bizonyos csoportjait, a cianovegyületeket, illetve a nitrozaminokat foglalják magukban.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a mobilis nitrogén fő forrása a levegőben lévő molekuláris nitrogén. A litoszférában és a hidroszférában található nitrogén megoszlásáról és a biogeokémiai körforgásban részt vevő mennyiségekről meglehetősen pontatlan adatokkal rendelkezünk. A teljes mennyiségnek csupán 0,01%-a található az élő és elhalt biomasszában, amihez még hozzá kell fűznünk, hogy az élő mikroorganizmusok, a növények és az állatok nitrogéntartalma megközelítőleg két nagyságrenddel kisebb.

2.3.2.2. A nitrogénvegyületek biológiai átalakulása

A molekuláris nitrogén biológiai átalakulása a szárazföldi és óceáni ciklusban a primer nitrogéntranszport alapvető lépése. Bár a nitrogén ciklus bemutatása kapcsán általában a fő globális rezervoárok (atmoszféra, hidroszféra, litoszféra/talaj, bioszféra) közötti anyagtranszport áll a figyelem középpontjában, hangsúlyoznunk kell, hogy ezek az anyagáramok csupán kis hányadát jelentik a bioszféra-talaj, illetve a bioszféra-hidroszféra

rendszereken belül kialakuló nitrogénáramoknak. Ezek az ún. „belső nitrogénciklusok” – egy feltételezés szerint – az anyagáramot tekintve a teljes körforgás mintegy 95%-át teszik ki.

A nitrogén biológiai átalakulásának fontosabb lépéseit a **12. ábra** foglalja össze. Az ábrán feltüntetett egyes lépések a következők:

Nitrogénfixálás: a legáltalánosabb megfogalmazás szerint ez a lépés azt jelenti, hogy az atmoszférában lévő N_2 valamilyen nitrogénvegyületté alakul át. A biológiai nitrogénfixálás enzim-katalizált reakció, amelyben a molekuláris nitrogén ammóniát, ammónium-, illetve szerves nitrogénvegyületet eredményez.

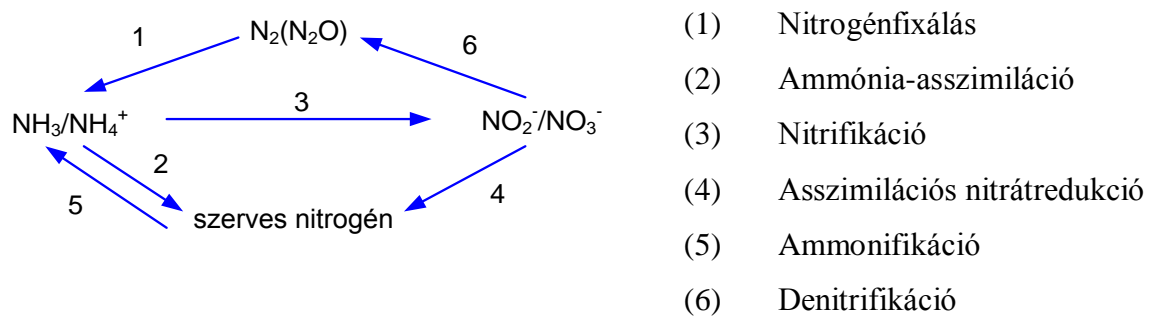
Ammónia-asszimiláció: az a lépés, amelynek során az ammónia-, illetve ammónium-nitrogént egy organizmus szerves nitrogénvegyület formájában saját szervezetébe beépíti.

Nitrifikáció: az ammónia-, illetve ammónium-nitrogént az organizmus energianyeres céljából nitríté, illetve nitráttá oxidálja.

Asszimilációs nitrátredukció: a nitrát redukciója oly módon, hogy a nitrogén beépül az organizmus szervezetébe.

Ammonifikáció: a szerves nitrogénvegyület átalakulása ammóniává vagy ammóniumvegyületté.

Denitrifikáció: a nitrát redukcióját jelenti, valamilyen gáz halmazállapotú (N_2 , N_2O) vegyületté.



12. ábra. A nitrogén biológiai átalakulásának fontosabb lépései

A bemutatott folyamatok a mikroorganizmusok különböző fajtáinak közreműködésével játszódnak le. Néhány közülük energiatermeléssel jár együtt, mások pedig egyéb organizmusokkal szimbiózisban mennek végbe.

A nitrogénciklus legfontosabb lépésének a nitrogénfixálást kell tartanunk, hiszen a nitrogén technikai fixálását (HABER-BOSCH-szintézis) eltekintve, ez az egyetlen út, amelyen át a nitrogén a természetes biológiai rendszerekbe bejuthat. A fixálást több baktérium és alga képes megvalósítani, egyedül vagy szimbiózisban, bár valószínű, hogy mennyiségileg ezen utóbbi a meghatározó. A biológiai nitrogénfixálásnak két alapvető limitáló tényezője van. Az egyik a

hármaskötés felhasításához szükséges nagy aktiválási energia, ami miatt csak a hatékony katalitikus rendszerekkel rendelkező organizmusok képesek a megkötésre. A másik tényező azzal függ össze, hogy a folyamat redukciót jelent, így módon nagyon érzékeny az oxigén jelenlétére, tehát csupán anaerob körülmények között élő, vagy az ilyeneket megteremteni képes organizmusok végezhetik el a fixálást.

Szárazföldi ökológiai rendszerekben a fő nitrogén megkötő a szimbiózisban élő Rhizobium-baktériumtörzs. Ezek a baktériumok elsősorban a pillangósvirágúak gyökérgümőiben élnek, s a mezőgazdaság ezt a lehetőséget a talaj nitrogéntartalmának növelésére ki is használja. Felszíni édesvizekben élők közül a cyanobaktériumok javára írják a megkötött nitrogén mintegy 78%-át. Ez a szimbiózisban élő baktérium aktivitását tekintve szezonális ingadozásokat mutat, s megjelenése gyakran megelőzi az algavirágzást. A tengeri ökológiai rendszerek nitrogénmegkötő képességéről keveset tudunk. Mivel a cyanobaktériumok széles körben elterjedtek, feltételezhető, hogy globális mértékben ezek adják a legnagyobb nitrogénfixáló kapacitást.

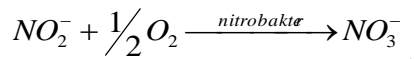
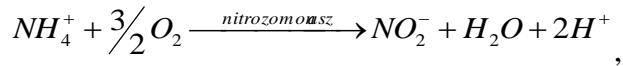
A nitrogénmegkötő szervezetek az átalakításhoz a nitrogenáz enzimet használják, amelynek vizsgálata hosszú idő óta intenzíven folyik, hiszen esetleg alkalmazni lehet a nitrogén ipari megkötésében is. Az organizmusok a vizsgálatok szerint két fémproteint tartalmaznak: (1) Mo-Fe-protein, ami a nitrogénmolekulát az enzimhez köti, feltételezhetően a fém-centrumhoz; (2) Fe-protein, amely a redukció elektronforrásaként szerepel. Oxigénre mindkét anyag rendkívül érzékeny. Érdeemes megjegyeznünk, hogy míg az organizmusok a nitrogén megkötésére az atmoszférában lévő nitrogén parciális nyomásán és 20°C-on képesek, addig az ipari fixálás legalább 250 atm-át és 400°C-ot kíván meg. Az antropogén nitrogén megkötés három területet foglal magában: (1) ammónia, illetve salétromsav ipari előállítás; (2) NO és NO₂ képződése égésfolyamatok során; (3) biológiai nitrogénmegkötés mezőgazdasági eljárásokkal.

Mennyiségileg az egész nitrogén ciklust tekintve az első két folyamatban lejátszódó átalakulást ismerjük a legjobban. Az anyagáram ebben az esetben 60TgN a⁻¹, ami összemérhető a biológiai fixálás során megkötött mennyiséggel (140TgN a⁻¹). Ezen utóbbiban a mezőgazdasági technikákkal megkötött hányadot ismerjük nagy pontossággal.

A talajban, illetve az édesvizekben ammónia vagy ammónium-vegyület formájában lejátszódó nitrogén megkötést két fő folyamat követheti: (1) nitríté vagy nitráttá történő oxidáció; (2) ammónia-asszimiláció. Az utóbbi lépés számos organizmus számára fontos nitrogénforrás. Az erre képes élőlények azokkal szemben amelyek nitrogénforrásként nitrátot használnak,

kompetitív előnnyel rendelkeznek, hiszen a közvetlen ammónia-asszimiláció jelentős energia-megtakarítással jár együtt.

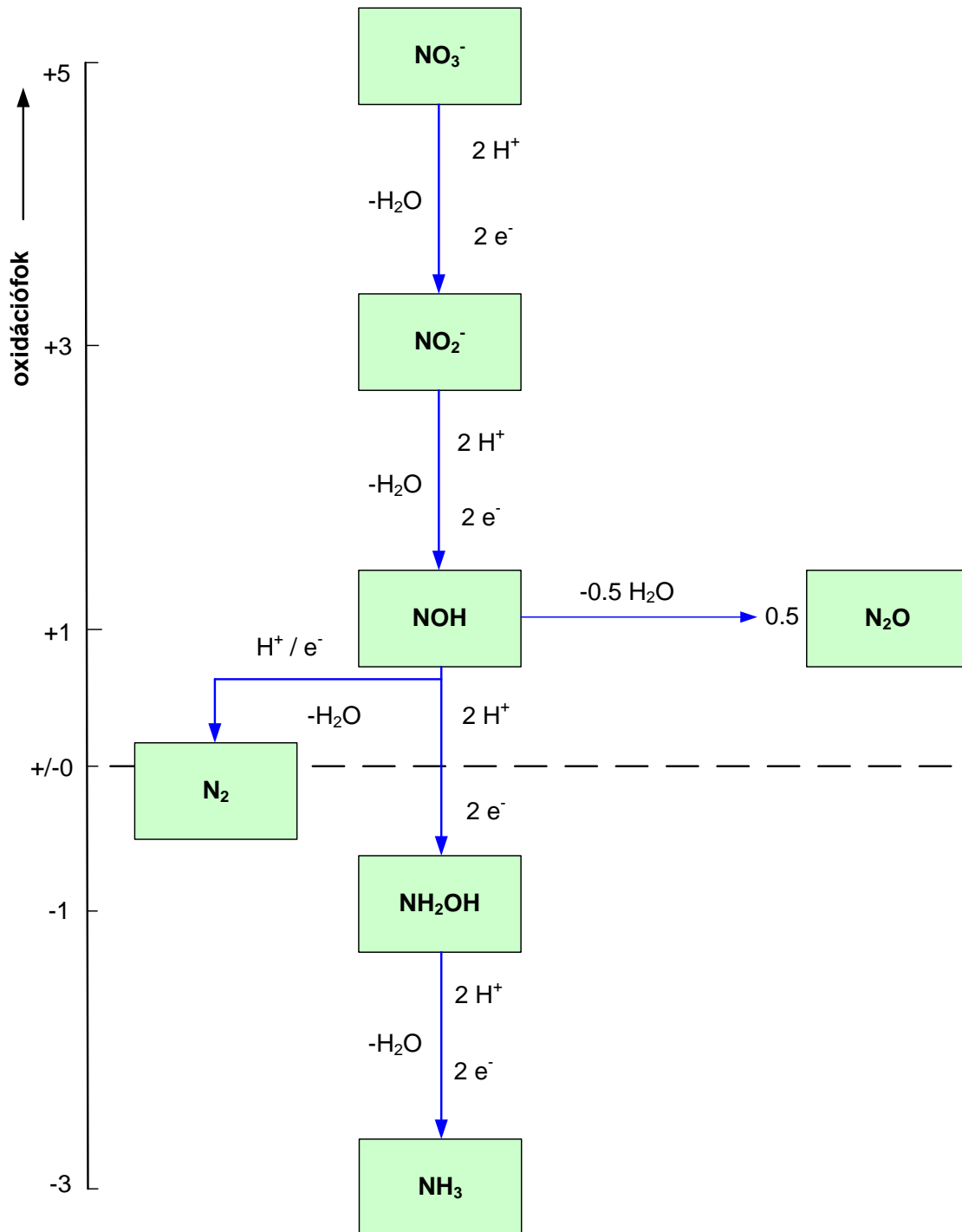
A nitrifikáció két energiatermelő lépésből áll: (1) az ammónia oxidációja nitritté; (2) a nitrit oxidációja nitráttá:



A nitrifikáció számos baktérium esetében energiaforrásként szolgál, s a nitrozomonasz és a nitrobakter egyaránt autotróf organizmus, amelyek karbonium-forrásként CO₂-ot használnak, az ehhez szükséges energia pedig az ammónium-nitrogén oxidációjából származik. A mikrobiológiai nitrogén körforgás meghatározó lépéseit a **13. ábra** mutatja be.

A nitrátion a talajban és a vízi ökológiai rendszerekben két úton alakulhat át. Anaerob körülmények között elektronakceptorként szerepelhet (oxidálószer) másfelől redukciója során az organizmusok szervezetébe beépülő vegyületté alakul át (asszimilációs nitrát-redukció). Ezen utóbbi folyamat anaerob körülmények között játszódik le.

A denitrifikáció az a folyamat, amelynek során a végtermék molekuláris nitrogén a biológiai nitrogénciklusból távozik. A biológiai nitrogénfixálást alapvetően ez a lépés egyenlíti ki.

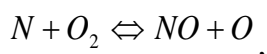
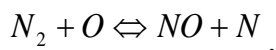


13. ábra. A biokémiai nitrátredukció mechanizmusa és az egyes oxidációs lépcsők

A szárazföldi ökológiai rendszerek denitrifikációs folyamataival ellentétben az óceánokban lejátszódó átalakulás részleteit kevésbé ismerjük.

2.3.2.3. Abiotikus folyamatok a nitrogénciklusban

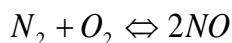
A nitrogén atmoszféra-kémiája szempontjából a legfontosabb szerepet oxidjai (NO, NO₂) játsszák. Nitrogén-monoxid jelentős mennyiségben keletkezik elektromos kisülés közben, továbbá égésfolyamatokban. A reakciósor a dinitrogénmolekula termikus bontásával indul, ami gyökös reakciópartner hatására játszódik le (ZELDOVIČ-féle mechanizmus):



vagy



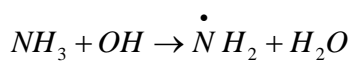
A bruttó reakció:



konvenziója (egyensúlyi állandója) széles hőmérséklet tartományban csekély értéket mutat, s a nitrogén-monoxid képződése $T > 2500\text{K}$ értékeknél jelentős. A képződés erősen függ a hőmérséklettől, a tartózkodási időtől, és az oxigén parciális nyomásától. Az energia előállítás során az NO_x képződést a tüzelőanyag nitrogéntartalmának parciális oxidációja, továbbá a szén tartalmú gyökök molekuláris nitrogénnel történő reakciója és az ezt követő oxidáció idézi elő. NO-forrás továbbá a troposzférában lévő N₂O fotokémiai átalakulása is. A NO oxidációja NO₂-dá molekuláris oxigénnel lassú reakció, ózonnal és peroxid-gyökkel gyorsan végbemegy. Hasonlóan gyorsan alakul át OH-gyökkel lejátszódó reakcióban.

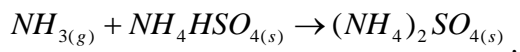
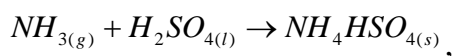
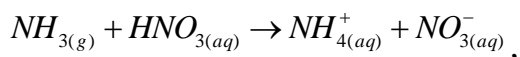
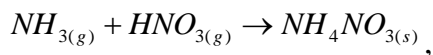
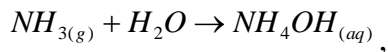
A nitrogénoxidok átalakulása végső soron salétromsavat (HNO₃) és szénhidrogén gyökök jelenléte esetén peroxiacetilnitrátot – CH₃C(O)O₂NO₂ – eredményez, amely utóbbi a fotokémiai füstköd (Los Angeles szmog) jellegzetes komponense.

Az ammónia az egyetlen, nagyobb mennyiségben az atmoszférába kerülő bázikus jellemű vegyület, amelynek több mint 80%-a savas komponensek semlegesítésére használandó el. Ezt követően mintegy 1 napos tartózkodási idővel, főként nedves ülepedéssel ammóniumion formájában visszakerül a földfelszínre. Kisebb hányada oxidatív átalakuláson (≤5%) megy keresztül. Az ammónia elsődleges reakciópartnere ezt tekintve az OH-gyök:



A további reakciókban az amingyök azután – a reakció-partnerektől függően – molekuláris nitrogénné, nitrózaminná (H_2N-NO) vagy nitramiddá (H_2N-NO_2) alakulhat át.

Az atmoszférában található gázhalmazállapotú nitrogénvegyületek számos, fázisátmenettel járó reakcióban vehetnek részt. Az ammónia pl. vízzel vagy szervesetlen savakkal reagálhat:



A keletkező vegyületek vízben jól oldódnak, ily módon az esőcseppbe vagy a vízpárába kerülhetnek, másfelől ezek a reakciók az aeroszolok jelentős forrását képezik. Az ammóniát, illetve az ammóniumiont tekintve a teljes atmoszférikus mennyiség mintegy kétharmada kondenzált fázisban van jelen, míg a salétromsav és a nitrátok esetében az arány éppen fordított.

2.3.2.4. A globális nitrogénkörforgás

A globális nitrogénkörforgás röviden gyakorta nitrogénciklusnak nevezzük, minthogy benne együtt tüntetjük fel azokat a folyamatokat, amelyek a biológiai és abiotikus tényezők kölcsönhatásának eredményeként jönnek létre. Azonban tudatában kell lennünk annak, hogy ezek a biológiai és abiotikus folyamatok önmagukban is zárt kört képeznek, s ily módon külön is beszélhetünk a biológiai-, ammónia- vagy pl. a fixálás-denitrifikáció ciklusról.

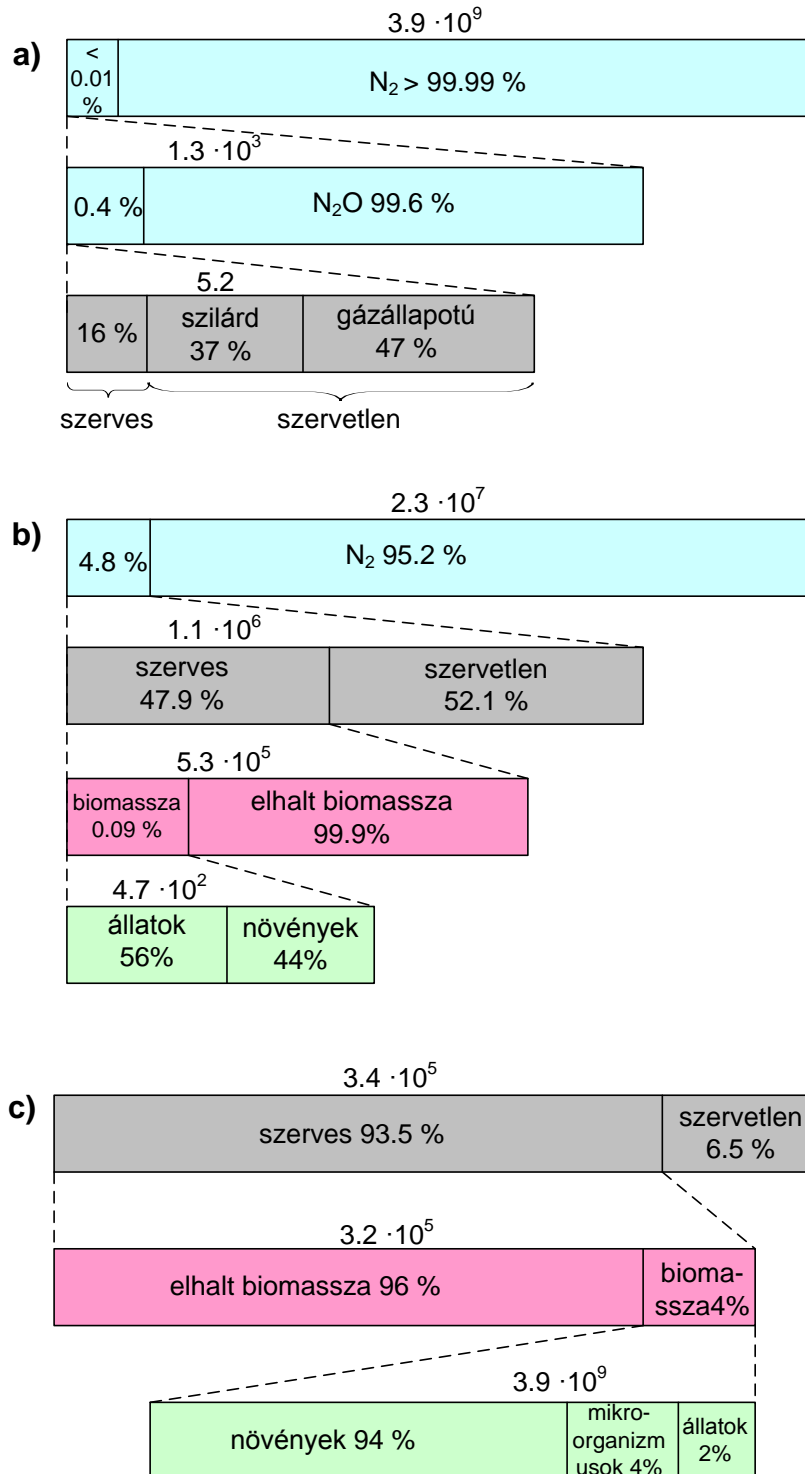
A nitrogén legfontosabb rezervoárjait a következő sorrendben vizsgáljuk: földkéreg, szárazföld, óceánok és atmoszféra. Az eddig ismert irodalmi adatokat tekintve azt mondhatjuk, hogy az egyes rezervoárokból található nitrogénmennyiségeket tekintve az összhang nagyobb, mint a közöttük kialakuló anyagáram mértékét illetően. Minthogy a földkéreg nitrogéntartalmát nem tekintve a többi nitrogén 99,96%-a molekuláris nitrogén formájában az atmoszférában található, gyakran tapasztaljuk, hogy a kondenzált fázisokban a nitrogén limitáló tápanyagként szerepel.

A szárazföldi ökológiai rendszerekben a nitrogén jelentős hányadban elhalt organizmusok maradványainak formájában van jelen a talajban. Ehhez társul az élő szervezetekben lévő mintegy 4%-nyi, s a kereken 65%-ot kitevő szerves nitrogén. Számos rezervoárt, amelyek a nitrogént szerves vegyületek formájában vagy élő szervezetekben tartalmazzák, a talaj és a biomassza karbónium tartalmának meghatározása kapcsán azonosították. Megjegyzendő, hogy a szerves nitrogénvegyületek mennyiségét jóval kisebb pontossággal ismerjük.

Az óceánvízben oldott nitrogén teljes tömegének 95%-át a fizikailag oldott molekuláris nitrogén teszi ki. A maradék többsége szerves nitrát, illetve az elhalt állati és növényi maradványokban található szerves nitrogén. A tengervíz tartalmazza a globális N_2O mintegy 15%-át is. Az óceánban oldott szerves nitrogénvegyületek meghatározása a széntartalom és a szén-nitrogén arány alapján végezhető el. Az atmoszférában – mint már láttuk – a fő komponens a molekuláris nitrogén, s a nitrogéntartalom fennmaradó hányadának kereken 99%-a N_2O formájában van jelen. A nyomvegyületek tartózkodási ideje – reakcióképességük és a távozásukat előidéző hatékony mechanizmusok miatt – kisebb, mint egy év, és ennek megfelelően koncentrációjuk az atmoszférában csekély. Az ammónia – a már bemutatott okok miatt – csupán a földfelszín közeli atmosféra-rétegekben van jelen. A rezervoárokat és a nitrogénmennyiségeket a **14. ábra**, míg a globális nitrogénciklust a **15. ábra** szemlélteti. Az utóbbi a rezervoárok közötti anyagtranszportot mutatja be. Látható pl., hogy az atmoszférából nettó nitrogénáram ($81TgN a^{-1}$) irányul a szárazföldi, az óceáni rendszerekbe és a földkéregbe. Az óceánvíz nitrogéntartalmának növekedése ($69TgN a^{-1}$) az a jelenség, amely a nitrogéntranszport globális képét jelentősen megváltoztathatja. Hatása az lehet, hogy az óceánokból kiinduló N_2O -emisszió megnövekedik és ez változásokat okozhat azon régiókban, ahol a nitrát a limitáló tápanyag, de befolyással lehet a részecskefajták elosztására is.

Az elmondottak alapján megállapíthatjuk, hogy a nitrogénciklust tekintve az antropogén anyagáramokat a legtöbb esetben jó közelítéssel ismerjük, ám a természetes anyagtranszportokat tekintve a megbízható adatok az esetek jó részében ma még hiányoznak.

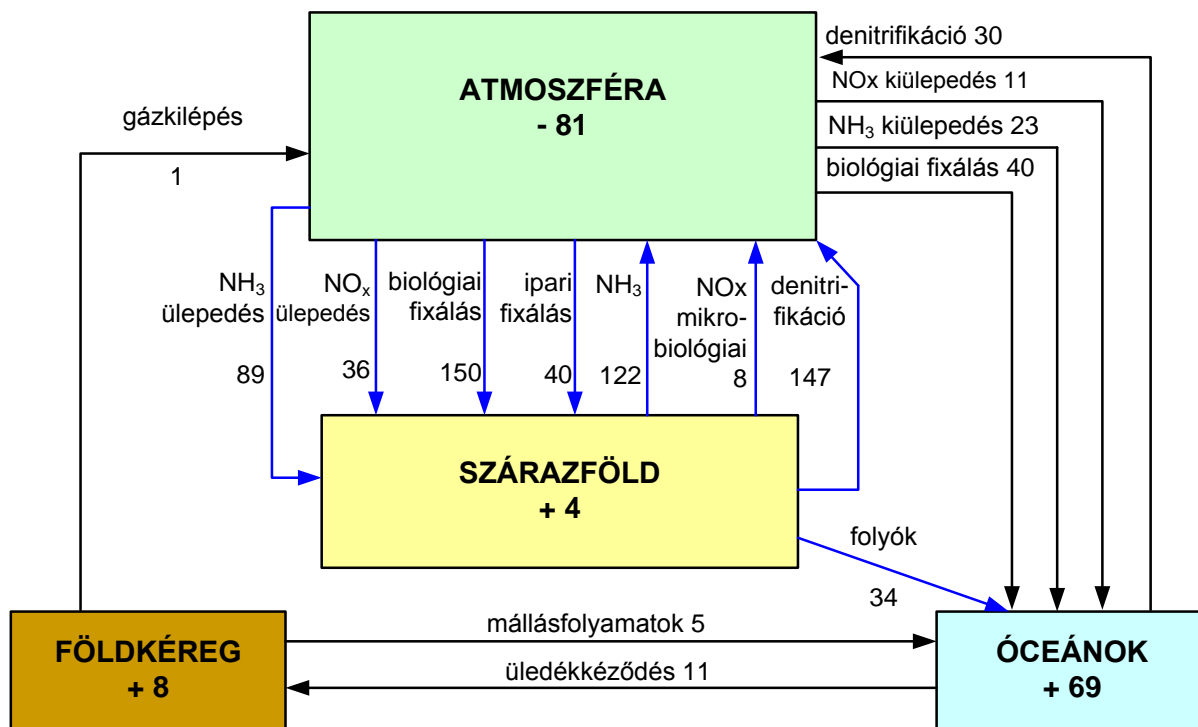
Azok a biológiai (egészségügyi) problémák, amelyeket a különböző nitrogénvegyületek feldúsulása okoz gázalmazállapotú, illetve folyadékfázisú anyagáramokban, tudományos-technológiai beavatkozásokkal jórészt kezelhetők. Ezek az intézkedések a képződési folyamatokat céltudatosan befolyásolják, másrészt arra irányulnak, hogy a nitrogénvegyületeket kémiai, fizikai vagy biotechnológiai eljárásokkal a körfolyamatokba visszavezessék, illetve ökológiai szempontból veszélytelen terméké alakítsák át.



14. ábra. Az atmoszférában (a), a hidroszférában (b) és a szárazföldi ökológiai rendszerekben (c) található nitrogénmennyiségek (T_g)

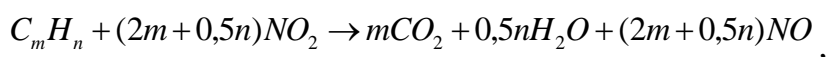
Az égésfolyamatok során keletkező nitrogén-oxidok (NO_x) mennyiségének csökkentése két úton lehetséges: (1) a keletkezés folyamatának technológiai ellenőrzése (elsődleges beavatkozás); (2) a keletkezett NO_x eltávolítása a véggázokból kemiszorpcióval vagy kémiai reakcióval (másodlagos beavatkozás). Az égési hőmérséklet csökkentése, alacsony

hőmérsékletű és kis mennyiségű oxidálószer (elsősorban levegő) alkalmazása, fluidizációs égetés és gőzbefúvás jó eredményt ad, hiszen ily módon elérhetjük, hogy az O_2 -molekula disszociációja során keletkező oxigénatomok túlnyomórészt a fölöslegben lévő tüzelőanyag-szemcsékkel reagáljanak.



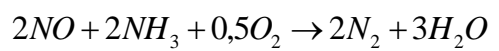
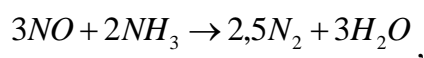
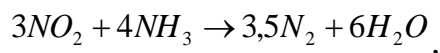
15. ábra. A teljes nitrogénciklus transzportfolyamatai (Tg a-1 N)

A másodlagos beavatkozás lehetőségei közül meg kell említenünk a termikus utóégetést, a füstgáz mosását, az adalékanyagok alkalmazásán alapuló módszereket vagy a katalitikus, illetve nem katalitikus redukációs eljárásokat. Ezek a véggázok NO_x -tartalmát kémiai utókezeléssel csökkentik. A NO nem katalitikus, szelektív reakciója elemi nitrogénné NH_2 -gyök hatására már 10^{-3} s időtartományban teljesen lejátszódik. A katalitikus NO_x -redukció nem szelektív és szelektív reakcióúton egyaránt lejátszódhat. A nem szelektív folyamat lényege szénhidrogének folyamatos reakciója nitrogén-oxidokkal több funkciójú katalizátoron nitrogénné, vízzé és szén-dioxiddá:



A szénhidrogén, a szén-monoxid és a nitrogén-oxidok koncentrációjának egyidejű csökkentése mindenekelőtt a kipufogógázok egészségre káros hatásának mérséklése szempontjából jelentős. A megfelelő katalizátorok platinafémekből (Pt, Pd, Rh), továbbá más fém-oxidokból és γ - Al_2O_3 -rétegből állnak, amelyeket kerámia vagy monolit fémhordozóra visznek fel. Jellemző sajátosságuk a nagy fajlagos felület.

Szelektív folyamatok esetében az NO_x -tartalom csökkentésére ammóniát alkalmaznak. A legfontosabb reakciók a következők:



A bemutatott reakciókat nemesfém-hordozó katalizátor, nehézfém-oxid vagy molekulaszűrő katalizátorok meggyorsítják.

A NO_x -ok eltávolítására abszorpciós folyamat segítségével számos eljárást javasoltak, amelyek az abszorpciós lépést oxidációval kombinálják. A cél ebben az esetben valamilyen hasznos termék előállítás.

A nitrogéntartalmú vizek kezelésére általában kétféle utat választanak: (1) a nitrogéntartalmú komponens leválasztása és koncentrálása; (2) elemi nitrogénné történő átalakítás és visszajuttatás az atmoszférába. Mivel a nitrogénfixálás – mint láttuk – energiaigényes folyamat, a második módszert, amely a felhasználható nitrogént valójában „megsemmisíti”, hosszú távon csupán híg oldatok kezelésére célszerű alkalmazni.

Összefoglalóan megállapíthatjuk, hogy a globális nitrogénciklust az emberi aktivitás kémiai fixálás (égésfolyamatok, energia előállítás, belsőégésű motorok), ipari fixálás (ammónia-, illetve salétromsav-, valamint műtrágyagyártás) továbbá a közlekedési emisszió kapcsán a fotokémiai füstköd kialakulása révén módosítja. Ezen folyamatok eredője, hogy denitrifikálatlan nitrogénmennyiségek halmozódnak fel a természeti környezetben, minthogy utóbbi nem rendelkezik az antropogén fixálás eredményeként kialakuló nitrát-nitrogén átalakításához szükséges denitrifikáló kapacitással. Ez pedig – végső soron – növényi tápanyag felhalmozódást jelent a természeti környezetben.

2.3.3. A kén körforgása

A kén a földkéreg elemeinek gyakorisági sorrendjében a 14. helyet foglalja el; átlagosan a földkéreg minden háromezredik, s az emberi test minden nyolcszázadik atomja kénatom. A földi környezet számos fontos folyamatának a kén meghatározó résztvevője. Redukált formájában az élő szervezetek fontos építőköve. A maximális oxidációfokú kénatomot tartalmazó szulfátion a folyóvizekben a HCO_3^- -ion, a tengervízben pedig a kloridion után a második leggyakoribb anion. Oxidjainak savas jelleme miatt a kén kulcsszerepet játszik az ásványok és kőzetek mállásfolyamataiban, és a savas ülepedésnek is egyik meghatározó tényezője. A szulfátaeroszolok az atmoszférában a leggyakoribb kondenzációs magként szerepelnek. Ily módon a kén befolyást gyakorol a globális sugárzó energiamérlegre, s ennek kapcsán a víz körforgását is érinti.

Az emberi tevékenység a kén körforgását jelentősen befolyásolja. A feltételezések szerint ennek során a természeti folyamatok anyagáramával közel azonos mennyiségű kén jut az atmoszférába.

A természeti környezetben a kén oxidációfoka -2 és +6 között változhat, ily módon a redoxireakciók környezeti kémiájában is fontos szerepet játszanak. Ennek – a többi között – fontos geokémiai konzekvenciái lehetnek. Ha pl. a tengervízből mikroorganizmusok hatására a nagyon rosszul oldódó FeS_2 (pirit) válik ki, akkor a kén az üledékben százmillió év nagyságrendű tartózkodási időt mutathat. Ezen állapota megszűnését biológiai vagy vulkáni tevékenység idézheti elő, s ekkor H_2S vagy SO_2 formájában szabaddá válik.

2.3.3.1. Kénvegyületek a természeti környezetben

A természeti környezetben előforduló kénvegyületekről azok oxidációfoka és előfordulási helye szerint az **5. táblázat** ad áttekintést. A -2 oxidációfokú kén az aeroszolok kivételével mindenhol előfordul, függetlenül attól, hogy az atmoszférában, az óceánokban és a szárazföldi felszíni vizekben molekuláris oxigén van jelen.

5. táblázat. A természetben előforduló leggyakoribb kéntartalmú részecskefajták

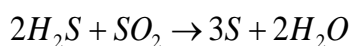
Oxidációs állapot	Gáz	Aeroszol	Vízben oldott	Talaj	Ásvány	Biomassza
-2	H ₂ S, RHS, R ₂ S, COS, CS ₂		H ₂ S, HS ⁻ , S ²⁻ , RS ⁻	S ²⁻ , HS ⁻ , MS	S ²⁻ , HgS, CuS, stb.	CH ₃ S(CH ₂) ₂ CHNH ₂ (methionin) HSCH ₂ CHNH ₂ CO OH (dicisztin)
-1	RSSR		RSSR	S ₂ ²⁻	FeS ₂	
0	CH ₃ SOCH ₃ ⁺			S ₈	S ₈	
+2	SO		S ₂ O ₃ ²⁻			
+4	SO ₂	SO ₂ ·H ₂ O, HSO ₃ ⁻	H ₂ SO ₃ , HSO ₃ ⁻ , SO ₃ ²⁻ , CH ₂ O·S O ₂	SO ₃ ²⁻		
+6	SO ₃	H ₂ SO ₄ , HSO ₄ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , (NH ₄) ₂ SO ₄ , Na ₂ SO ₄ , CH ₃ SO ₃ H	SO ₄ ²⁻ , HSO ₄ ⁻ , CH ₃ SO ₃ ⁻	CaSO ₄ 4	CaSO ₄ ·2H ₂ O MgSO ₄	

A vízben oldott H₂S kivételével ezek a részecskefajták lassan oxidálódnak. A kénhidrogén esetében a gyors átalakulást az magyarázza, hogy az elektrolitos disszociáció során keletkező HS⁻-ionok molekuláris oxigénnel gyorsan reagálnak. Ily módon, noha oxigénnel telített vízben jelen lehetnek RHS vagy R₂S összetételű szerves szulfidok, amelyek az atmoszférába távozhatnak, a kénhidrogén esetében erre nem kerülhet sor. A vízi környezetből az atmoszférába jutó kénhidrogén az anaerob üledékekből, illetve iszapokból származik. A -2 valamint a -1 oxidációfokú kén főként ásványokban fordul elő. Mintegy 95, fémekkel, félfémekkel, másodfajú fémekkel képzett szulfidos ásványt ismerünk: Ag, Fe, Cd, Hg, Mn, Te, Se, As, Sn, Cu, Pb, Pt, Sb, Co, Ni, Mo, W. Közülük a pirit (FeS₂) a leggyakoribb.

A kéntartalmú aminosavakban a kén oxidációfokát a szulfidokéval azonosnak vehetjük, minthogy ezekben rendszerint szén- vagy hidrogénatomokhoz kapcsolódik. A kén elsődleges biológiai szerepe abban nyilvánul meg, hogy a proteinmolekulán belül az aminosavak között – S–S– kapcsolat létrehozására képes, ami a proteinek háromdimenziós szerkezete szempontjából meghatározó. A methioninban lévő kén pedig a biológiai metileződési reakciókban játszik döntő szerepet.

A kén mennyisége az élő szervezetekben változó, de nagyságrendileg a foszforéval azonos; ez szárazsúlyra számítva mintegy 0,25%-ot jelent. A tengervízben található kénmennyiség mintegy 29 mmol kg⁻¹, s ez olyan érték, hogy a kén – szemben a foszforral vagy a nitrogénnel – a biológiai növekedés limitáló tényezőjeként soha nem szerepel. A maximális oxidációfokú kén (+6) a szulfátionban fordul elő, az atmoszférában kénsav (H₂SO₄) vagy ammónium-szulfát formájában. Az óceánvízben hidratált szulfátionokat vagy ionpárokat találunk. Az üledékes kőzetekben evaporit-ásványként – olyan ásványok, amelyek a tengervíz elpárolgása során keletkeznek – főként CaSO₄·2H₂O van jelen. A +4 oxidációfokú kén – ezzel szemben – csupán átmeneti formaként található meg az atmoszférában és az atmoszférába irányuló vulkáni és ipari emisszióban. A gázhalmazállapotú SO₂ vízben oldódik, és HSO₃⁻, illetve SO₃²⁻-ionokat képez. Ezen utóbbiak aerob körülmények között szulfáttá oxidálódnak. A kén-dioxid oxidációja – mint látni fogjuk – erős oxidáló ágensek hatására (pl. OH-gyök) gőzfázisban is lejátszódik.

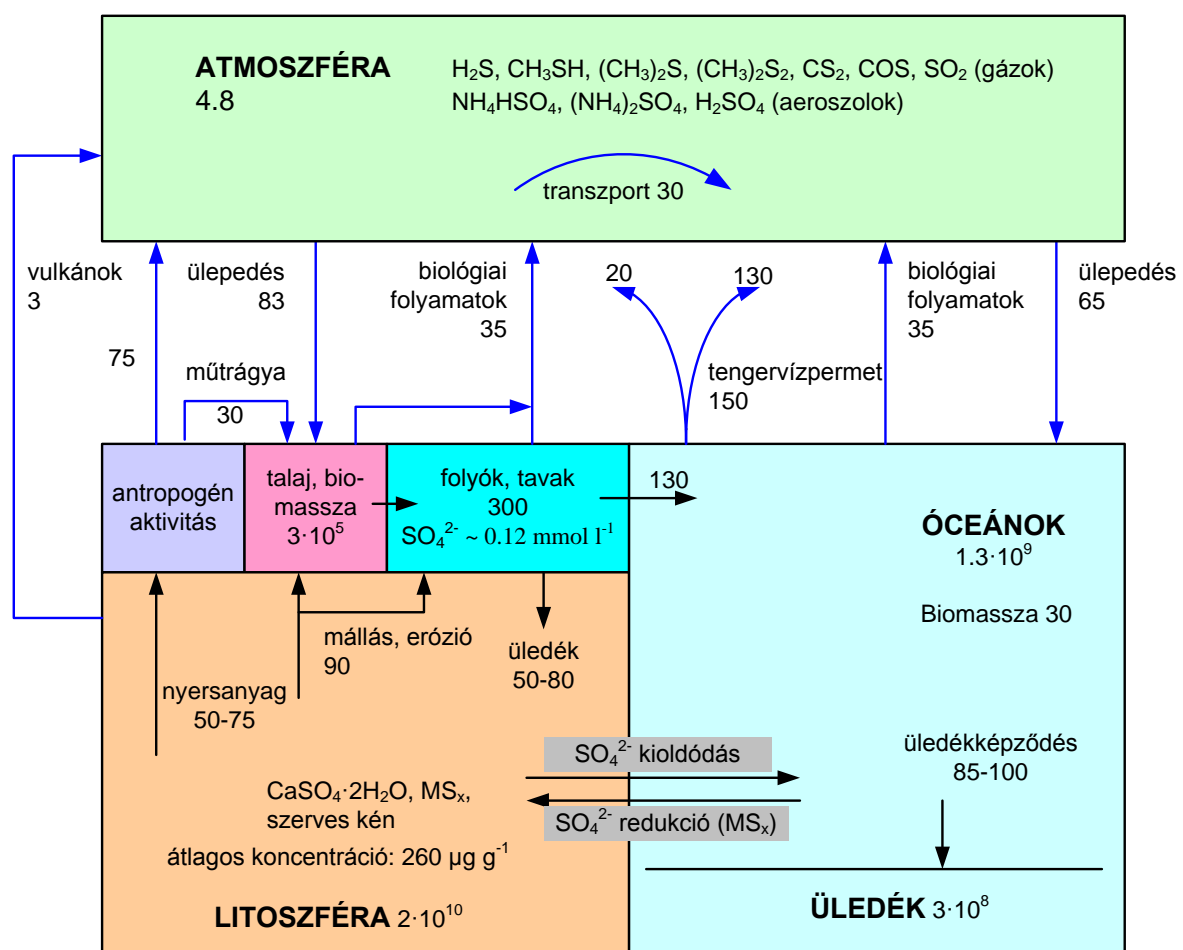
Elemi kén a természetben mind biológiai, mind kémiai folyamatban keletkezhet, a szulfidok oxidációjának köztitermékeként, illetve pozitív oxidációfokú ként tartalmazó vegyület és szulfid reakciójában (konproporcionálódás). A szulfátredukáló baktériumok több fajtája ismeretes, közülük kettő – desulfovibrio, desulfotomaculum – különösképpen gyakori. Ezek a szulfátot elektronakceptorként használva kénhidrogént állítanak elő, ami vassal reagálhat, és ezen az úton FeS₂ képződhet. Más folyamatokban a H₂S elemi kénné alakul át; pl. a következő reakció a vulkáni gázokban gyakran lejátszódik:



Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a kénvegyületek gázhalmazállapotban, aeroszolként, vízben oldva, talajban, ásványokban és biológiailag fontos molekulákban egyaránt előfordulnak. Az atmoszférában -2 és +4, míg a hidroszférában elsősorban a +6 oxidációfokú kén a gyakori. A -2 oxidációfokú ként tartalmazó szerves vegyületek gőznyomása elég nagy ahhoz, hogy a hidroszférából az atmoszférába kerüljenek. A szulfátion oldatban viszonylag

inert, s transzportja a víz áramlásával következik be, másfelől a víz elpárolgásával – mint már láttuk - evaporitok keletkeznek, A szulfátásványok vízben – bár különböző mértékben – oldódnak, míg a szulfidok oldhatósága igen csekély.

A kén fő rezervoárjait és az azokban található kénmennyiségeket a **16. ábra** mutatja be. A litoszférában található hatalmas mennyiségű kén transzportja elhanyagolható, míg az atmoszférában, a hidroszférában és a bioszférában élénk cserefolyamatok játszódnak le. Ilyen folyamat pl. a fosszilis tüzelőanyagok antropogén égetése (SO_2 -forrás), valamint a tengervíz szulfáttartalmának fitoplankton szervezetek által történő redukciója, ami $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ (dimetil-szulfid) keletkezéséhez vezet.



16. ábra. A kén biogeokémiai körforgása (anyagmennyiség: Tg S; anyagáram: Tg a-1 S)

A következőkben a kén biogeokémiai körforgását két részre bontva mutatjuk be: (1) az atmoszférában, illetve (2) az óceán-földkéreg rendszerben lejátszódó folyamatok. Bár az atmoszféra kéntartalma adott időpontban csekély, az anyagáramok – minthogy a legfőbb kénvegyület tartózkodási ideje viszonylag rövid – mégis jelentős mértékűek. Az óceáni szulfát

transzportja viszont jóval kisebb sebességgel játszódik le, s a kölcsönhatás elsősorban a földkéreggel valósul meg.

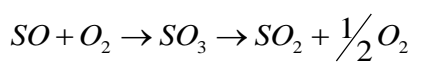
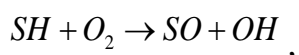
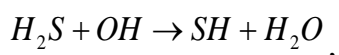
2.3.3.2. A kén ciklus kémiája

A kén körforgásában az oxidációs reakcióknak meghatározó szerepük van. A feltételezések szerint gázalmazállapotban a hidroxilgyök, míg vizes fázisban a H_2O_2 , az O_3 és a hidroxilgyök a fő oxidáló ágens. Az átalakulás számos reakciólépésen át megy végbe, s a folyamat részleteit tekintve ismereteink ma még hiányosak. A sebességi adatokkal is csupán félkvantitatív mennyiségeknek tekinthetjük. Az egyes rezervoároknak található kénmennyiségeket viszont sokkal pontosabban ismerjük, mivel azok közvetlenül meghatározhatók. Bár ebben az esetben is bizonytalanságot okoz az atmoszférában lévő kénvegyületek véletlenszerű eloszlása és rövid tartózkodási idejük.

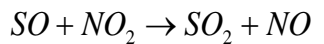
Az antropogén anyagáramok közül a SO_2 -emisszió valamint az esővíz által a földfelszínre juttatott szulfátmennyiség a legjobban ismert. Kevésbé pontos az a kénmennyiség, ami a redukált kénatomot tartalmazó gázok óceáni emissziójából származik.

Az atmoszférán át lejátszódó anyagáram fő jellemzője, hogy alacsony oxidációfokú kénatomot tartalmazó gázok jutnak a levegőbe, és onnét szulfát formájában az esővízzel távoznak. Minthogy az oxidációfok változással együtt fázisállapot-változás is bekövetkezik, a kén tartózkodási idejét az atmoszférában az oxidációs reakciók kinetikája valamint a felhő- és esőképződés egyaránt befolyásolja. Mint arról már szó esett, a teljes átalakulás gyors (néhány nap), ily módon az atmoszférikus kén ciklus regionális jelenség, s csaknem valamennyi kén tartalmú részecskefajta globális eloszlása egyenetlen.

A -2 oxidációfokú kénatomot tartalmazó vegyületeket az atmoszférában elsősorban a hidroxilgyök (kevésbé az oxigén) támadja meg, és a reakció köztitermékeken át kén-dioxidot eredményez:

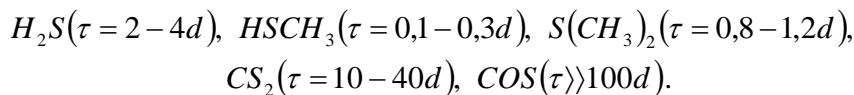


A kén-monoxid (SO) oxidációja nitrogén-dioxiddal is lejátszódik:



A szén-diszulfid (CS_2), a karbonil-szulfid (COS) továbbá a szerves szulfidok oxidációja lényegében véve hasonló úton megy végbe. Utóbbiak esetében a C–S-kötés oxidatív felhasad, és aldehidek képződnek. A CS_2 és COS oxidatív átalakulásában – nagy valószínűséggel – fotogerjesztett ($\lambda < 300$ nm) részecskefajták is részt vesznek.

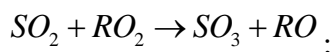
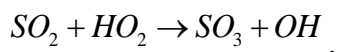
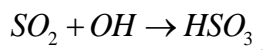
A bemutatott reakciók eredményeként ezeknek a vegyületeknek az átlagos tartózkodási ideje az atmoszférában különbözik egymástól:



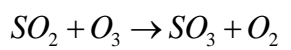
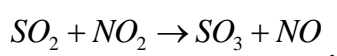
A szén-diszulfid és a karbonil-szulfid hosszú tartózkodási ideje arra enged következtetni, hogy a két gáz a sztratoszférába diffundál, ahol oxidatív elbomlásuk bekövetkezik, s ily módon jelentősen hozzájárulnak a 18 km magasságban található szulfátréteg kialakulásához.

A kén-dioxid további sorsát az atmoszférában kénsavvá, illetve szulfátokká történő átalakulása, továbbá az ülepedési folyamatok (száraz, illetve nedves ülepedés) határozzák meg. A +4 oxidációfokú kénatom további oxidációjára számos mechanizmust javasoltak:

a fotogerjesztett ($\lambda < 390$ nm) SO_2 -molekula reakciója molekuláris oxigénnel;
oxidáció hidroxil-, hidroperoxi- és alkilperoxi gyökkel:

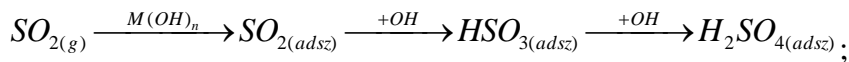


oxidáció nitrogén-oxidokkal, illetve ózonnal:

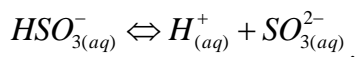
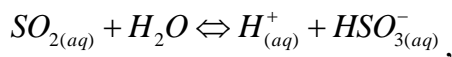
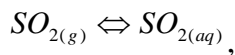


Feltételezik, hogy a nitrogén-oxidok segítségével lejátszódó oxidáció a kis sebességi állandók miatt mint kén-dioxid fogyasztó a troposzférában nem játszik jelentős szerepet.

szilárd lebegő részecskéken (szén, fém-oxid, illetve -hidroxid) adszorbeálódott kén-dioxid oxidációja:

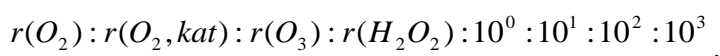


vízcseppekben lejátszódó folyadékfázisú oxidáció:



Vizes fázisban az oxidáció molekuláris oxigénnel – nagy valószínűség szerint – gyökátviteli mechanizmussal játszódik le, amelynek során peroxo-monoszulfát-gyök, illetve anion keletkezik. Az ózon és a hidrogén-peroxid a kén-dioxidot vizes oldatban hasonlóképpen oxidálja. Az oxidáció sebessége pH-függő. 4 < pH < 7 között maximumot mutat.

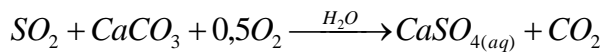
MÖLLER vizsgálatai (1980) alapján a különböző mechanizmusok szerint lejátszódó oxidációs reakciók sebessége a következő arányban áll egymással:



Ha az egyes reakciók várható részvételét mérlegeljük az atmoszférikus SO₂ oxidációjában, akkor arra a következtetésre juthatunk, hogy csupán a hidroxilgyök segítségével lejátszódó folyamatot valamint a folyadékfázisú oxidációt kell figyelembe vennünk. A SO₃ és kénsav a nedves levegőben részben semlegesített kénsav-aeroszol formájában transzportálódik.

A nem oxidált SO₂ visszajutása a földfelszínre (pedoszféra, hidroszféra, bioszféra) száraz (adszorpció, abszorpció vizes fázisban, felvétel a vegetáció révén) és nedves ülepedéssel (abszorpció a felhő- és esőcseppekben) mehet végbe. A szulfát ülepedése viszont elsősorban nedves úton következik be.

A csapadékvíz savas komponensei a homokkővet és a márványt korrodálják:



Az atmoszférában tartózkodó kén-dioxid globális léptékben négy fő folyamatban képes eltávozni: (1) folyadékfázisú oxidáció (19%); (2) oxidáció hidroxilgyök segítségével (26%); (3) nedves ülepedés (10%); (4) száraz ülepedés (45%). Az átlagos tartózkodási idő erősen függ a troposzféra nedvességtartalmától, és átlagosan 0,5-1,0 nap között változik. A kén körforgása következtében a gáz-halmazállapotú kénvegyületek jelentős mennyisége az óceánokban nyelődik el.

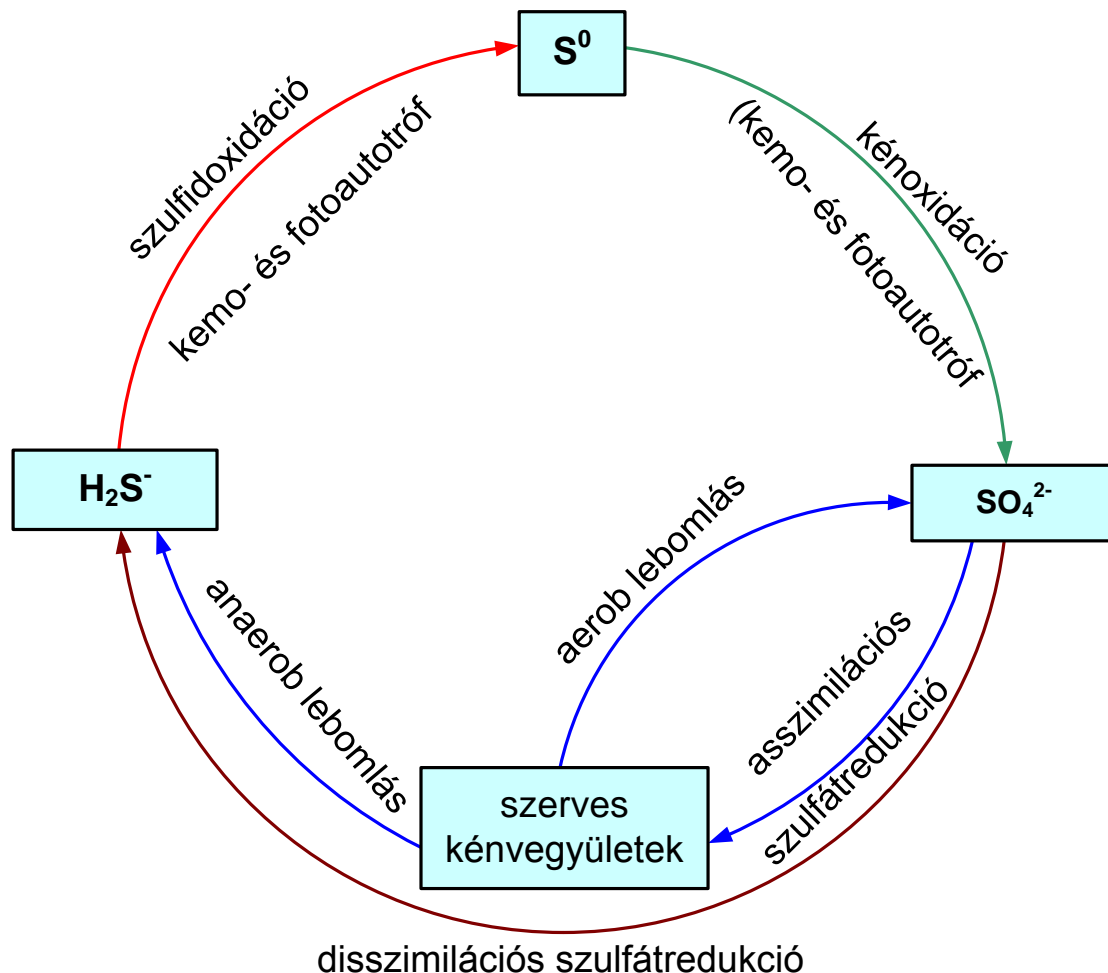
Az óceánok a hidroszféra kénkörforgásában meghatározó szerepet játszanak, minthogy a földkéreg fő kénlelőhelyei az óceáni üledékképződési folyamatokkal szoros kapcsolatban állnak. A földfelszín legfontosabb kénlelőhelyei a következők: (1) szulfidkén az üledékrétegekben; (2) szulfátkén az evaporit-lerakódásokban; (3) szulfátok a tengervízben. A három rezervoár közötti anyagtranszport szorosan kapcsolódik az óceánokba irányuló és onnét távozó kénmozgáshoz amelynek mértékét – a hidroszféra más komponenseihez viszonyítva – az emberi tevékenység jelentős mértékben megváltoztatja. A kéntranszport egyik formáját a szulfát tengervízpermettel az atmoszférába történő bejutása, majd gyors kiülepedése jelenti. A nagyobb és lassúbb ciklus mállásfolyamatokkal kezdődik, ahol a szulfát a folyóvízzel az óceánokba kerül, majd geológiai folyamatok révén a kontinensekre jut vissza (közetciklus).

Geológiai időskálát tekintve valószínű, hogy az óceánvíz koncentrációja meglehetősen állandó, hiszen a folyók által szállított mennyiségek egyensúlyban vannak a kiülepedő anyagmennyiségekkel. Azonban a távozó és érkező kénmennyiségeket tekintve az adatok ma még bizonytalanok és ellentmondásosak.

Az üledékrétegekben redukáló körülmények között gyakran keletkezik FeS_2 , különösen akkor, ha ezek a rétegek nagy biológiai aktivitású víztest alatt foglalnak helyet. Ebben az esetben ui. az elhalt biomassza lebomlása következtében oxigénhiány lép fel, amely diffúzió révén nem képes kiegyenlítődni, tehát a közeg redukálónak válik. Ily módon a $Fe(III)$ -hidroxid és a szulfátanion, a szervesanyag átalakulása kapcsán elektronakceptorként viselkedik, s a képződő $Fe(II)$ - és a HS^- -ion reakciójában pirit keletkezik. Ma még nem tisztázott egyértelműen, hogy ez a folyamat domináns szerepet játszik-e a kén tengervízből történő távozását illetően.

Az elmondottakhoz még hozzá kell fűznünk, hogy a pirit oxidációja szulfáttá és $Fe(III)$ -hidroxiddá a földfejlődés folyamán jelentős oxigénfogyasztó reakció volt. A mai atmoszféra

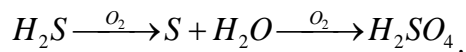
oxidáló körülményei között a szulfátok nem antropogén redukciója kisebb oxidációfokú kénatomot tartalmazó vegyületekké csakis biológiai úton mehet végbe. Ebben a folyamatban a biomassza oxidációja révén szén-dioxid keletkezik, ami a növényi vegetáció fotoszintézis-mechanizmusán keresztül az atmoszféra oxigéntartalmát növeli.



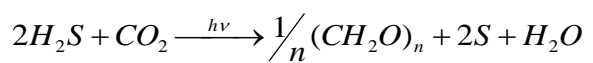
17. ábra. A mikrobiológiai kénkörforgás

A kén biológiai körforgásának legfontosabb lépéseit sematikusán a **17. ábra** mutatja be. Anaerob és heterotróf baktériumok (desulfóvibrio) egész sora használja a szulfátot elektronakceptorként és alakítja át kén-hidrogénné (disszimilációs szulfátredukció, deszulfurikáció). A képződött H_2S a légzési láncot mérgezi, és a felszíni vizekben erős oxigénfogyasztó. A kéntartalmú szerves vegyületek (a fehérjék alkotói, mint pl. a cisztein vagy a methionin) asszimilációs szulfátredukció során keletkeznek, és aerob oxidáció (szulfátképződés), illetve anaerob rothadás (H_2S -keletkezés) során bomlanak el. A rothadási folyamatok a kén-hidrogén biológiai képződéséhez globálisan csupán mintegy 5%-ban járulnak hozzá.

A kén-hidrogén oxidációja kénné, illetve szulfáttá kemoszintézis vagy fotoszintézis révén egyaránt bekövetkezhet. *Tiobacillus* fajták a H₂S oxidációját az asszimiláció energiaforrásként használják:



Fotoautotróf baktériumok (kéntartalmú baktériumok) a szénhidrátok szintéziséhez a napenergiát fotoszintézissel analóg reakcióban hasznosítják:



Mint hogy a képződött kén biokémiai reakciókon keresztül (S → SO₄²⁻ → H₂S) végül ismét redukálódik, ezen az úton lehetőség van szervesanyag folyamatos szintézisére. A lokális kénfölösleg kicsapódik, és kéntelepeket hoz létre.

A kén körforgása a biogeokémiai és az antropogén anyagáram kapcsolódásának figyelemreméltó példáját mutatja. Az atmoszférába jutó kénmennyiségnek – ha a tengervíz-permettől eltekintünk – jelenleg valamivel több mint a fele antropogén eredetű. Az energiaelőállításához kapcsolódó globális SO₂-emisszió az utóbbi két évtizedben kénre vonatkoztatva évente mintegy 2Mt-val növekedett. A jelenlegi kedvezőtlen helyzet megváltoztatására csak akkor van remény, ha a füstgázok kéntelenítésére sokkal hatékonyabb módszereket alkalmaznak, másfelől az energiatermelésben az alternatív technológiák nagyobb szerephez jutnak. A kénciklus antropogén módosításának jól érzékelhető következménye a savas üledés, mint regionális környezeti probléma, másfelől a természeti környezet szulfátredukáló kapacitása elégtelen az antropogén folyamatokban keletkező szulfát átalakításához.

A füstgázok kéntelenítésére, amely a geokémiai körforgás bioszférával és technoszférával történő összekapcsolódása miatt ökológiai egyben gazdasági szükségszerűség, számos tudományos-technikai megoldás ismeretes. A kén-dioxid sajátos kémiai viselkedése lehetőséget ad arra, hogy a füstgázokból szelektíven eltávolítsuk. Elvileg és gyakorlatilag elsősorban bázikus jellemű anyagokkal történő reakció kínál megoldást, amelyet gyakran oxidációval kapcsolnak össze (szulfátképződés). A művelet nedves, félszáraz és száraz eljárás formájában valósítható meg. Leggyakrabban a következő anyagokat használják: CaO,

$\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , Na_2CO_3 , NH_3 , stb. Hosszabb távon nyilvánvalóan azok az eljárások nyerhetnek teret, amelyek a ként felhasználható vegyület formájában teszik hozzáférhetővé. A bakteriális szulfátredukció technikai felhasználása is kutatás tárgyát képezi, amelynek célja elemi kén, illetve kén-hidrogén kinyerése.

2.3.4. A foszfor körforgása

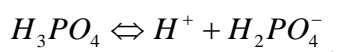
A foszfor az élet számára nélkülözhetetlen elem, amely a földkéreg elemeinek gyakorisági sorában a tizedik helyet foglalja el. A foszfortartalmú részecskefajták előfordulását tekintve megállapíthatjuk, hogy a többi, biológiai szempontból fontos eleméhez képest eltérések tapasztalhatók. Az egyik fontos tény, hogy gázhalmazállapotú foszforvegyületek a természeti környezetben számottevő mennyiségben nem fordulnak elő. Ebből ered, hogy bár adott foszformennyiség por- és füst részecskék révén az atmoszférába kerül, és ott a pára- és esőcseppekbe beoldódhat, a foszfor globális körforgásában az atmoszféra csekély szerepet játszik. Az elmondottak kapcsán azonban megjegyzendő, hogy ez a foszfor-forrás bizonyos régiókban jelentős szerepet játszhat (pl. az óceánok partvidéktől távol eső területeinek felszíni vízrétege, ahol a foszforkoncentráció csekély, és az ideirányuló transzport lassú).

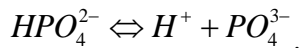
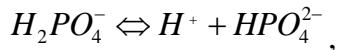
A másik különbség abból ered, hogy a foszfor oxidációfoka a természeti környezetben előforduló vegyületeiben kizárólag +5 lehet (eltekintve rövid élettartamú köztitermékek átmeneti előfordulásától), ily módon környezeti kémiájában a redoxireakciók gyakorlatilag nem játszanak szerepet. Ezek a vegyületek stabilitásukat a foszfor-oxigén kötés nagy kötési energiájának ($E_D > 500 \text{ kJ mol}^{-1}$) köszönhetik. A természetben található foszfátok – szerves és szervetlen foszfátok egyaránt – a tetraéderez szerkezetű PO_4^{3-} -anionból vezethetők le, a foszfor körforgása ily módon a foszfátok körforgását jelenti.

Végül hangsúlyoznunk kell azt is, hogy a természeti környezetben gyakorlatilag csupán a $^{31}_{15}\text{P}$ -nuklid fordul elő.

2.3.4.1. Foszforrezervoárok, részecskefajták

A környezetben található valamennyi foszforvegyület a hárombázisú foszforsav (H_3PO_4) származéka, amelyből a PO_4^{3-} -anion teljes deprotonálódás során keletkezik:





Az édesvizek szokásos pH-tartományában (közelítőleg pH=6-7) a domináns részecskefajta a $H_2PO_4^-$. A tengervízben mérhető nagy ionerősség és olyan kationok – Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ – jelenléte, amelyek a PO_4^{3-} -anionnal ionpárokat képeznek, a foszforsav disszociációját jelentős mértékben megváltoztatják. Ily módon a tengervízben mérhető pH-értékeknél (8,1-8,4) a HPO_4^{2-} -anion a domináns részecskefajta. Az ionpárképződésnek megfelelően a szabad PO_4^{3-} -anionok mennyisége a tengervízben csekély. A foszfátion sav-bázis, illetve komplexképződési reakciói nem csak a tengervízben, hanem a talajvízben és az édesvizekben is fontos szerephez jutnak.

Az ortofoszfátokból vízvesztéssel ún. kondenzált foszfátok – $H_{n+2}P_nO_{3n+1}$ – keletkeznek főként láncszerű, bizonyos esetekben gyűrűs szerkezettel. Bár ezek a részecskefajta a mennyiségeket tekintve a természetes vizekben nem jelentősek, nagy reakcióképességük miatt, továbbá mivel ipari és kereskedelmi termékként széles körben használatosak, mindenképpen figyelmet érdemelnek. Számos kationnal oldható komplexet képeznek, ezért vízlágyítóként is használatosak.

A foszfor átlagos koncentrációja a földkéregben 0,1%, és számos ásvány, illetve kőzet alkotórészeként szerepel. A PO_4^{3-} -anion mintegy 300 ásványban fordul elő, ezen túlmenően nyomnyi mennyiségben számos más ásvány is tartalmazza. A leggyakoribb foszfátásvány az apatit, a földkéreg foszfortartalmának 95%-a ebben a formában van jelen: $Ca_{10}(PO_4)_6X_2$, ahol $X=F^-$, Cl^- vagy OH^- -ion. Az apatit az élő szervezetekben is előfordul (fogak, csontok, pikkelyek, páncélzat, stb.).

Az élőlények elpusztulása után az apatit a talajba vagy az üledékbe kerül. A vulkáni kőzetek apatittartalma mellett az üledékes foszfátásványok (foszforit, $Ca_3(PO_4)_2$) fedezik a globális szükséglet több mint 80%-át. A madár-, illetve denevérürülék átalakulása révén létrejövő guano napjainkban csupán lokális jelentőséggel rendelkezik.

A fő foszfáttelepek tengeri eredetűek, és rétegvastagságuk néhány centimétertől a több méteres vastagságig terjed. Az üledékbe kerülő szerves anyagok elbomlása során foszfortartalmuk PO_4^{3-} formájában a tengervízbe vagy az üledék pórusvizébe kerül, s az utóbbi foszfát tartalma beépülhet az apatitba. Ez az átalakulás biológiai és kémiai lépések által vezérelt bonyolult folyamat, amelynek mechanizmusát még nem ismerjük. A ma lejátszódó képződésfolyamatok

vizsgálata arra utal, hogy a foszfáttelepek létrejötte elsősorban a kontinensszegélyeken, felfelé áramló tengervíz-régiókban, nagy biológiai aktivitás és produktivitás esetén kedvezményezett. A biológiai szempontból fontos vegyületek – foszfátészterek formájában – jelentős számban foszfort tartalmaznak. Ezek között a nukleinsavak – DNS, illetve RNS – kiemelkedő szerepet játszanak. A nukleinsavakban a foszfát révén – a szóban forgó bázis összetételének függvényében – kovalens kötéssel polimer szerkezetek alakulnak ki, amelyek a genetikai információkat tárolják.

Szerves foszfátok meghatározó szerepet játszanak a sejtekben a kémiai energia átvitelét és szabályozását illetően is, elsősorban az adenzin-trifoszfát (ATP) terminális foszfátészter-kötésének hidrolízise révén. De fontos megemlítenünk azt is, hogy a foszfor-lipidek biológiai membránok lipid-kettősrétegének létrehozói. Ha ehhez hozzávesszük, hogy a fogak és a csontok apatitot tartalmaznak, akkor nyilvánvaló, hogy a foszfor körforgása a biológiai folyamatokhoz szorosan kapcsolódik. Az organizmusok foszfor nélkül nem létezhetnek, és ez egyben azt jelenti, hogy az élő szervezetek a foszfor eloszlását a természetben jelentős mértékben szabályozzák. A tengeri mikroorganizmusok 105-125 szénatomra 1 foszforatomot tartalmaznak, a szárazföldi növények esetében ez az arány 800:1.

Szerves foszforvegyületek oldott állapotban eutrofizálódott felszíni vizekben is előfordulnak, ahol koncentrációjuk a szervesen oldott foszfátokét túllépheti. Az anyagáramot tekintve ez a labilis frakció a leggyorsabban mozgó tengeri foszfor, ily módon a fitoplankton szervezetek számára fontos foszfor-forrás, ha azt tekintjük, hogy a tengervízbe külső forrásokból a foszfor bejutása véletlenszerű lehet.

2.3.4.2. Foszfociklusok, a körforgás kémiája

A foszfor szárazföldi ökológiai rendszerekben lejátszódó transzportját az jellemzi, hogy az a kőzetek mechanikai és kémiai mállásával indul, majd az oldott, illetve lebegő szilárd részecskéket a folyóvíz az óceánokba szállítja. Ezt a mozgást a foszfortartalmú anyagok biológiai valamint mineralógiai rendszerekkel történő kölcsönhatása időnként és véletlenszerűen fékezi. Az erózió során keletkező kis méretű részecskék foszfortartalma biológiai ciklusba nem képes belépni, az oldott foszfor viszont részévé válik a biológiai ciklusoknak. A talajvíz foszfortartalma a talajalkotó szervesen komponensekkel léphet kölcsönhatásba.

A talaj oldott foszfortartalmát a növények felveszik, amihez hozzá kell fűznünk, hogy a foszfor rendszerint a növekedés limitáló tényezője. Ily módon a foszfor számos esetben más elemek körforgását is szabályozza. Az élő szervezetek elhalásával a foszfor visszakerül a talaj-talajvíz rendszerbe, ahol a szervesanyagok egymással lejátszódó reakciói szabályozzák a talajoldatban lévő foszfor koncentrációját.

A foszfát adszorpciója ásványok (agyagásványok, alumínium(III)-, vas(III)-oxidhidroxid) felületén különösen a savas pH-tartományban előzményezett, míg a bázikus tartományban deszorpció játszódik le. A szervesanyag-talajvíz-ásvány rendszerben a csere a foszfor óceán felé tartó útján többször lejátszódhat.

A foszfor tavi ökológiai rendszereken át történő transzportjának megértéséhez szükséges, hogy a nyári időszakra, mérsékelt égövi tavakban egy hipotetikus koncentráció- és hőmérséklet-profil definiáljunk. Ezekben a nyári felmelegedés során meg kell különböztetnünk egy kisebb sűrűségű felületi és egy nagyobb sűrűségű, mélyebben fekvő vízréteget. A fotoszintézis-zónában a foszfor beépül a növényekbe, vagy lebegő szilárd részecskéken adszorbeálódva az átmeneti réteg (metalimnion) alá süllyed, ahonnét csak nagyon lassan képes a felszíni rétegbe visszajutni. A foszfor ezen az úton folyamatosan távozik a felszíni rétegből, s ezáltal a biológiai produkció limitáló tényezőjévé válik. Ennek alapján könnyen érthető, hogy milyen következményekkel járhat, ha antropogén úton a felszíni zónába foszfortartalmú szennyezőanyagok kerülnek. A biomassa mennyiségének növekedése fokozza a szervesanyag terhelést a mélyebben fekvő rétegben, ahol ezáltal oxigénhiány lép fel. Szélsőséges esetben anoxikus körülmények is kialakulhatnak, ami halpusztulást idéz elő. Ősszel a lehülés keveredést idéz elő a vízrétegek között, s így módon a felső réteg foszforban gazdagabbá válik. Ennek megfelelően a mérsékelt égövi tavakban télen a biológiai aktivitást inkább a fény, mint a tápanyag hiánya szabályozza. A felső és a mélyebb réteg keveredése a tavaszi hőmérsékletnövekedés hatására is bekövetkezik.

A folyók révén az óceánokba jutó foszfortartalmú lebegő részecskék gyors ülepedéssel az óceáni üledékbe kerülnek. Az oldott foszfor pedig a felületi vízrétegben a fotoszintézis kapcsán belép a biociklusba.

Az óceánok – a meglehetősen állandó reakciókörülmények ($\text{pH}=8,1$; $\text{pCa}=2$) miatt – a foszfátió számára jó lehetőséget adnak a csapadékképződésre. Elméleti foszforkoncentrációjuk – hidroxipatitra számolva: $3 \cdot 10^{-8} \text{ mol l}^{-1}$, illetve $1,1 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$. Az oldott foszfátmennyiség vertikális eloszlását, továbbá a hőmérsékletprofil adott óceáni régióban a **18. ábra** szemlélteti. Az ábra bemutatja azokat a fő folyamatokat is, amelyek a kialakult

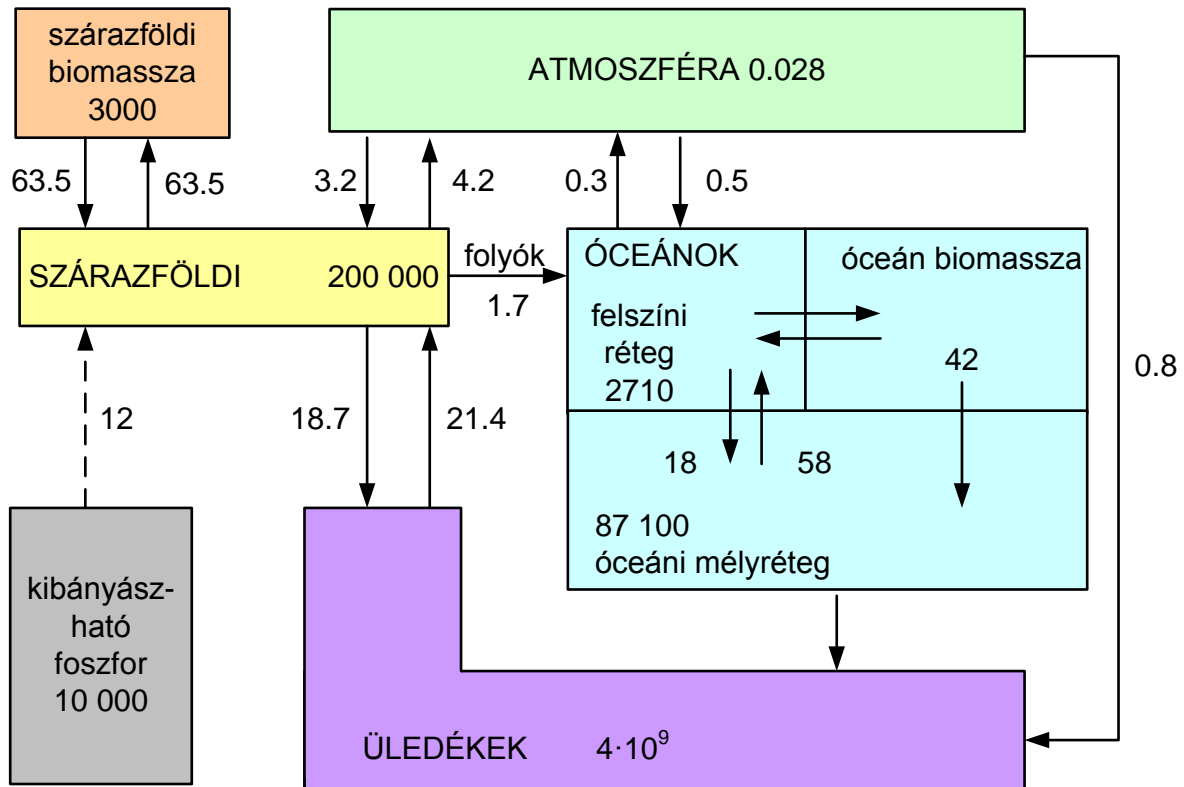
koncentráció eloszlásért felelősek. Látható továbbá, hogy a valóságos foszforkoncentráció lényegesen nagyobb az elméletileg számított értéknél, amit azzal magyarázhatunk, hogy a foszfor egy része kolloidális állapotban van jelen.



18. ábra. Koncentráció- és hőmérsékletprofil a Csendes Óceán adott régiójában (MURRAY); a foszfortranszport legfontosabb lépései

Az oldott foszfor mennyisége a fotoszintézis-zónában csaknem kimutathatatlan. Ez a zóna a legfelső, 20-100 m mélységű rétegre terjed ki. A koncentráció azután 1000 m mélységben eléri az 1-3 μmol kg⁻¹ értéket. Kialakulását több folyamat együttes hatásával magyarázhatjuk: (1) a foszfor beépülése az élő szervezetekben; (2) a foszfor bejutása az üledékbe; (3) a felszín felé irányuló vízmozgások.

A globális foszforciklust a **19. ábra** mutatja be. A ciklus vizsgálatánál figyelemmel kell lennünk arra, hogy a kutatások ezt tekintve még korántsem azonosítottak minden rezervoárt, és várható, hogy újabb anyagáramok létre is fény derül. Az ábrán feltüntetett szárazföldi foszforrezervoár a talaj felső, 60 cm-es rétegére vonatkozik. Ezt a meglehetősen keskeny sáv-választást az indokolja, hogy a talajnak ez a réteg áll más rezervoárokkal a legintenzívebb kapcsolatban. A növények foszforszükségletüket innen fedezik, s foszfortartalmuk ide jut vissza elhalásuk után. Végül, a felhasznált foszforműtrágyák is legnagyobb mértékben ebbe a rétegbe kerülnek.



19. ábra. A globális foszforciklus (anyagmennyiség: Mt P; anyagáram: Mt a-1 P)

A mélyebb talajrétegekben és a kőzetövekben lévő foszformennyiségeket együttesen az üledékek tartalmazzák (**19. ábra**). Az itt található foszfor cseréje más rezervoárokkal igen lassú. A szárazföldi élővilágot tekintve a fő forrást az erdei ökológiai rendszerek jelentik, ami mellett a vízi élővilág csekély mértékű foszformennyiséget képvisel. Fontos megjegyeznünk ezt illetően, hogy bár az emberi tevékenység a tavi és a folyami foszformennyiségeket jelentősen módosíthatja, ez a forrás viszonylag csekély a talaj és a szárazföldi növénytakaró foszfortartalmával összevetve, így módon a globális ciklusban (mérlegben) nem szerepel.

Az óceáni ökológiai rendszer három, jól definiált rezervoárra osztható. A 300 m-ig terjedő felületi rétegben épül be fotoszintézis révén a foszfor az élő szervezetekbe, s itt játszódnak le a bomlásfolyamatok, továbbá a kiülepedő szerves anyag foszfortartalmának kioldódása is. Így módon ez a zóna a színtere az élővilág és az oldott állapotú foszfortartalmú részecskefajták közötti cserének. A felszíni 300 m-es zóna nagyjából addig az átmeneti rétegig terjed, amely megakadályozza a felső réteg és az óceáni mélyréteg vizének keveredését. A folyók által szállított oldott foszfát is ebbe a rétegbe kerül. Az óceáni élővilág is a felszín közeli zónában található, többségében a fotoszintézis zónában (fitoplankton szervezetek), bár élőlények az óceánvízben bármely mélységben előfordulhatnak. Az óceánokban található foszformennyiség azonban mindössze 1/30-a a szárazföldi organizmusok foszfortartalmának. Ennek oka az, hogy

az előbbieket főként rövidéletű élőlényekből állnak, míg a szárazföldi biomasszában a hosszú élettartalmú erdőségek részaránya a meghatározó.

Az ún. óceáni mélyvíz 300-3300 m között foglal helyet, és az oldott foszfor legnagyobb lelőhelye. Itt a fotoszintézis lejárásának a valószínűsége csekély, s az oldott foszfor tartózkodási ideje nagy. A foszfor fotoszintézis-zónába történő bejutása ebből a fázisból vertikális vízmozgás, illetve diffúzió révén valósulhat meg.

A **19. ábra** szereplő üledék-rezervoár mindazon foszformennyiséget tartalmazza, ami nincs jelen a 60 cm-es talajzónában, valamint kibányászása nem lehetséges. Magában foglalja tehát az óceáni és édesvízi meg nem szilárdult üledékeket (iszap), továbbá az üledékes, metamorf és vulkáni kőzeteket. Az itt található foszfor transzportja csak geológiai időtartamok alatt következhet be.

Az atmoszféra foszfortartalma – minthogy a szilárd lebegő részecskék tartózkodási ideje rövid – a többi rezervoárhoz képest csekély.

Az egyes rezervoárok közötti anyagforgalom megállapítása nem könnyű, amihez hozzá kell vennünk, hogy a természetes anyagtranszportot az emberi tevékenység is jelentősen módosítja. Mint korábban már láttuk, a foszfor az egyes rezervoárokból túlnyomóan nem biológiailag aktív, hanem oldhatatlan formában van jelen, így módon a szerves rezervoárok és a biomassza továbbá a folyóvízben oldott foszfor közötti anyagcsere nagy mennyiségű inaktív foszfor, mint háttér előtt játszódik le. Ez egyben azt is jelenti, hogy a „háttér”-rel lejátszó esetleges kis mértékű foszforcseré az előzőekben vázolt anyagáramokat jelentősen befolyásolhatja.

A foszfor gázhalmazállapotú vegyületek formájában történő transzportja az atmoszférában jelentéktelen, miként az édesvízi ökológiai rendszerek élő organizmusai és az óceánok között sem létezik jelentős foszforcseré. A szárazföldi-édesvízi biológiai rendszerek valójában tehát – a foszforciklus szempontjából – zárt rendszerek, s csupán kétirányú anyagcserében (élőlény↔talaj, élőlény↔vizes fázis) vesznek részt.

A szárazföldi foszfor a folyóvizek révén (oldott szerves és szerves foszfor, szilárd lebegő részecskék) jut az óceánokba. Az oldhatatlan foszforvegyületek a mélyrétegen át viszonylag gyorsan az üledékbe kerülnek, így módon a szárazföldi rezervoár és az óceáni üledék közötti közvetlen anyagáramról beszélhetünk.

A globális ciklusban a legnagyobb anyagtranszport az óceánok felszíni zónája és a benne lévő élő szervezetek között játszódik le. Itt a biológiai produkció igen jelentős, s az organizmusok rövid élettartama miatt a beépült foszfor az óceánvízbe gyorsan visszajut. Az utóbbi

mennyiséget csökkenti, hogy az elhalt organizmusok maradványaiban található foszfor mintegy 4%-a még a lebomlást megelőzően kiülepedik a felszíni rétegből.

A globális foszforciklust bemutató ábrán feltűnő lehet, hogy a kibányászható foszfátérceket ábrázoló rezervoár irányában anyagtranszport nincs feltüntetve. Ez – kétségkívül – nem pontos közelítés, ám ha az emberiség történetének időskálájában gondolkodunk, ehhez képest a művelhető foszfáttelepek kialakulása túlságosan lassú folyamat.

A foszfor globális eloszlását számos tényező befolyásolja; közülük leginkább az emberi tevékenység hatása a szembetűnő. Ezt tekintve a foszforműtrágyák, a mosószeradalékok és az ipari tevékenység során a környezetbe kerülő foszforvegyületek játszanak elsődleges szerepet. Mennyiségüket legpontosabban a kibányászott foszfátércek kapcsán becsülhetjük meg. Noha az édesvizetekbe jutó foszforszennyezés számos esetben eutrofizációt okoz, s így a figyelem középpontjában áll, fontos hangsúlyoznunk, hogy ennek hatása a globális ciklusra nem számottevő. A műtrágyázás során a növényekbe kerülő foszformennyiség pedig viszonylag kicsi a talaj foszfortartalmához képest. Nagyobb módosulást okozna a foszfor körforgásában, ha a kibányászott foszfátérc mennyisége gyorsan növekednék, s a folyók által az óceánokba szállított oldott foszfor ennek arányában egyre növekvő értéket mutatna. Minthogy a ciklusban geológiai időskála alatt természetes ingadozások is felléphetnek (glaciális-interglaciális), ezek ismerete feltétlenül szükséges ahhoz, hogy az emberi tevékenység hatását pontosan megítélhessük.

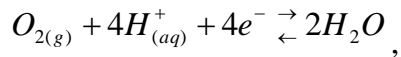
A foszfor élővilágban játszott szerepe miatt körforgása szorosan kapcsolódik más elemek biogeokémiai ciklusaihoz. Ennek érdekes példája lehet az óceáni mélyrétegek foszfor-, illetve az atmoszféra szén-dioxid tartalmának kapcsolata. Amennyiben a foszfor a biológiai produkció limitáló tényezője, az meghatározza az oldott szerves karbonium, s ezzel együtt a felszíni rétegben az oldott CO₂ mennyiséget, hosszabb távon tehát az atmoszféra szén-dioxid tartalmát is. A ciklusok kapcsolatának vizsgálata ezért különösen fontos kutatási feladat.

2.3.5. Az oxigén körforgása

Az oxigén körforgása a bioszférán keresztül szoros kapcsolatban van a karbonium és a víz körforgásával. A biomassza – mint ismeretes – túlnyomóan szerves vegyületekből áll, amelyek száma mintegy 3 millió és ezek közül több ezer tartalmaz oxigént. Becslések szerint az élő anyagokban lévő atomoknak mintegy negyede oxigénatom. Az oxigént tartalmazó szerves

vegyületek többsége a litoszférában található, bár az óceánok oldott formában a szervesetlen sókat szintén nagy mennyiségben tartalmazzák.

Az oxigén a következő reakcióegyenletre számított standard-redoxipotenciál, $U_H^\theta = 1,229$ V alapján:



egyike a természeti környezetben található legerősebb oxidálószernek. A földi atmoszféra nagy oxigéntartalma valójában kozmikus anomáliát fejez ki, hiszen környezetünkben egyidejűleg a redukáló anyagok széles köre, nagy mennyiségben van jelen. Az oxigénkoncentráció növekedése az atmoszféra kialakulása során az autotróf organizmusok megjelenéséhez kapcsolódik, amelyek az elektronakceptor szerves anyagokat (főtermék) és oxigént (melléktermék) képesek előállítani, megteremtve ezzel a lehetőséget az aerob organizmusok életműködéséhez. Ezek a tények ismételtelen aláhúzzák, hogy az oxigén és a szén körforgása szorosan kapcsolódik egymáshoz. A Földön uralkodó nem egyensúlyi állapotot bizonyítja az is, hogy az ionoszférától a földmag felé haladva lépcsőzetes átmenetet tapasztalunk az erősen oxidáló állapottól az erősen redukáló állapot felé.

2.3.5.1. Oxigénrezervoárok, atmoszféránk oxigénháztartása

Az oxigén a természeti környezetben elemi állapotban és vegyületeiben egyaránt előfordul. A négy fő rezervoárban – földkéreg, atmoszféra, hidroszféra, biomasz – található oxigénmennyiség egymástól nagyságrendekkel eltér (6. táblázat).

A ma egységesen elfogadott vélemény szerint a Földön található elemi oxigén csaknem teljes mennyisége fotoszintézis során jött létre. Minthogy 1 mol CO₂ fotoszintézis során lejátszódó átalakulásában 1 mol oxigén keletkezik, a Földön található biológiai eredetű anyag 8·10⁹ Mt-t kitevő karbóniumtartalma kerekén 21·10⁹ Mt oxigénnek felel meg, ami csaknem 18-szorosa a jelenlegi atmoszférában található oxigénmennyiségnek. Ez arra utal, hogy az elemi oxigén legnagyobb része a földtörténeti korokban lassan lejátszódó reakciók során a földkéreg anyagának oxidatív átalakítására elhasználódott. A potenciális redukálószernek közül elsősorban a vas(II)vegyületeket, a szulfidokat és az alacsony oxidációfokú karbóniumot

tartalmazó vegyületeket kell figyelembe vennünk. Ezek oxigénigénye jó közelítéssel megbecsülhető: $1,4 \cdot 10^{11} \text{Mt}(\text{Fe}^{2+})$; $1,8 \cdot 10^{10} \text{Mt}(\text{S}^{2-})$; $1,0 \cdot 10^{11} \text{Mt}(\text{C})$.

6. táblázat. A Föld globális oxigénlelőhelyei

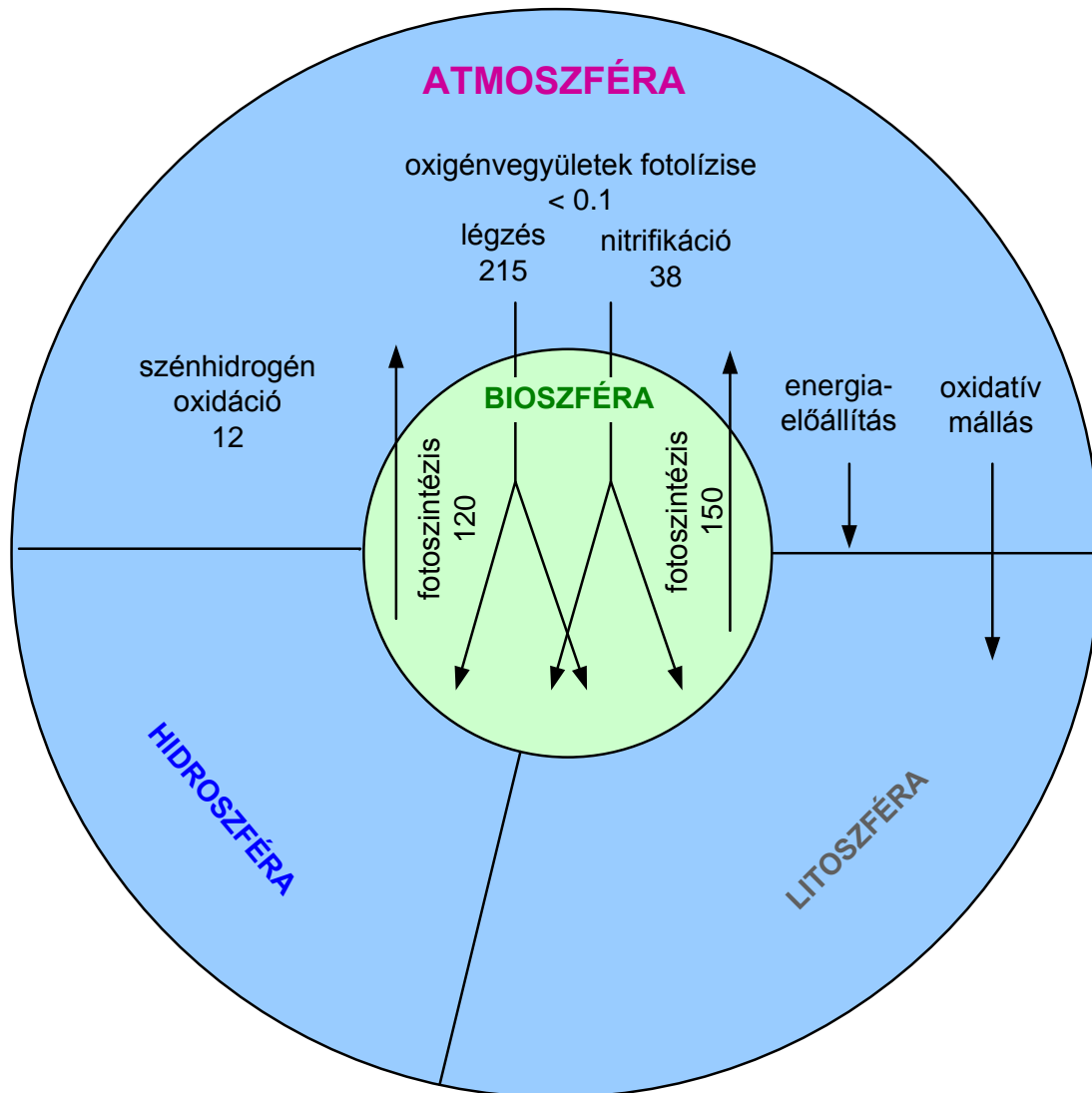
Rezervoár			Mennyiség (Mto)
Földkéreg			$1,7 \cdot 10^{15}$
Hidroszféra (H ₂ O formájában és oldva)			$1,2 \cdot 10^{12}$
Atmoszféra			$1,2 \cdot 10^9$
Biomassza			$14,1 \cdot 10^6$
	élő	biomassza	$1,38 \cdot 10^6$
(szárazföld)			
	élő	biomassza	$0,03 \cdot 10^6$
(óceánok)			
	élettelen	biomassza	$2,14 \cdot 10^6$
(szárazföld)			
	élettelen	biomassza	$10,56 \cdot 10^6$
(óceánok)			

A **20. ábra**, az oxigén körforgásának kémiai és biológiai eseményeit mutatja be vázlatos formában. A vízmolekulában lévő oxigén atmoszféra és hidroszféra között – a víz globális körforgása során – bekövetkező transzportját az ábrán nem vettük figyelembe. Az atmoszféra oxigénkoncentrációját hosszú távon két tényező határozza meg:

az oxigénmennyiség növekedése, ami abból származik, hogy a fotoszintézissel képződött biomassza csekély hányada (<0,1%) a biológiai körforgásból kilép, és átmenetileg anaerob körülmények között tárolódik;

az oxigénmennyiség csökkenése a földkéreg redukáló anyagaival lejátszódó redukció révén.

A **7. táblázat** az atmoszféra oxigéntartalmának legfontosabb forrásait és nyelőit tünteti fel. Az összeállításból jól látható, hogy az oxigénciklus két meghatározó mechanizmusa a fotoszintézis és a légzés. Megállapíthatjuk továbbá azt is, hogy redoxireakciók lejátszódásához természeti körülmények között az oxigénnek számos reakciópartner áll a rendelkezésére. A fotoszintézist tekintve az oxigénmolekula átlagos tartózkodási ideje az atmoszférában 4500 év, míg egy vízmolekuláé a hidroszférában mintegy 500 ezer év.



20. ábra. Az oxigén biokémiai körforgása (anyagáram: 103 Mt a⁻¹ O)

Az oxigént fogyasztó reakciók között az antropogén energia-előállítás a légzést és az ammónia biológiai oxidációját követően a harmadik helyen áll. Ez azonban az atmoszféra oxigéntartalmát gyakorlatilag nem befolyásolja, minthogy a növekvő CO₂-koncentráció meggyorsítja a fotoszintézist, s ezzel az oxigén mennyisége növekedik.

A szénhidrogén-oxidáció fotokémiai és mikrobiológiai úton megy végbe. Az oxidatív mállásfolyamatok kapcsán pedig – mint korábban már láttuk – végtermékként vas(III)vegyületek, szulfátok és szén-dioxid keletkezik. Azonban meg kell jegyeznünk, hogy ezt illetően sem a folyamatok mechanizmusát, sem az ennek révén létrejövő anyagtranszportot kellő pontossággal még nem ismerjük.

Az oxigén reakciói a környezetben szorosan kapcsolódnak számos más elem körforgásához. Bár ez a tény az egyes folyamatok mennyiségi leírását megnehezíti, másfelől hozzájárul az ökológiai rendszerek önszabályozásához.

7. táblázat. Az atmoszféra oxigéntartalmának forrásai és nyelői

Források	Mennyiség (Mta ⁻¹ o)	Nyelők	Mennyiség (Mta ⁻¹ o)
fotoszintézis	268500	aerob légzés	215000
N ₂ O fotolízis	11	biológiai nitrifikálás	38000
H ₂ O fotolízis	<1	antropogén energiaelőállítás	14000
		szénhidrogének oxidációja	12000
		kémiai mállásfolyamatok	
		Fe ²⁺	42
		C	240
		(mineralizáció)	
		S ²⁻	122
		kénvegyületek oxidációja	176
		vulkáni gázok oxidációja	45
		ózonreakciók	770
		nitrogénoxidáció	190
Σ O-tartalom	0,27·10 ⁶		0,28·10 ⁶

2.3.6. Néhány fém környezeti kémiája, fémciklusok

Adott fém kémiai viselkedését és biológiai hatását a természeti környezetben sajátosságainak kombinációja határozza meg, amelyek közé elsősorban leggyakoribb sójának oldhatósága, redoxisajáttsága, komplexképző hajlama és biológiai felvehetősége sorolható. Az alkálifém- és alkáliföldfém-ionok, amelyek jól oldódó sókat képeznek, elsősorban oxigén-donoratomokat tartalmazó ligandumokkal alakítanak ki gyenge elektrosztatikus kölcsönhatást, s az organizmusokban az iontranszportot és a ligandumcserét közvetítik. Ezen túlmenően hidrolízis folyamatokban is részt vesznek. Nitrogén-, illetve kén-donoratommal rendelkező ligandumok

nehézfémkationokkal – Co^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} stb. – stabilis kelát-komplexeket képeznek, közülük több bizonyos enzimekben (metalloenzimek) központi szerepet játszik. A különböző ligandumok és fématomok között egymással versengő, komplexképződéssel járó reakciók játszódhatnak le.

Egyes fémek, amelyek a környezetben uralkodó kémiai feltételek mellett több stabilis oxidációfokkal rendelkeznek (Fe, Cu, As, Mn, stb.), a biológiai rendszerekben redoxireakciókban vesznek részt. Ezek a reakciók egyben a mikroorganizmusok védekező reakciói is, emennyiben a fémionokat önmaguk számára kevésbé mérgező vegyületek formájába igyekeznek átalakítani. Ilyen esetekben gyakran bekövetkezik a nagyobb oxidációfokú fémek akkumulációja.

A fémek a biológiai rendszerekben elsősorban szerves ligandumokkal képzett komplexeik formájában tárolódnak. Néhány fém (Hg, Sn, Pb stb.) alkilszármazékokká alakul át. A megoszlási hányados az organizmusok (plankton szervezetek) és abiotikus környezetük (tengervíz) között igen jelentős lehet. Értéke a következő határok között változhat:

$<10^0$ (Na^+ , Mg^{2+}) és $>10^4$ (Cr^{3+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+}).

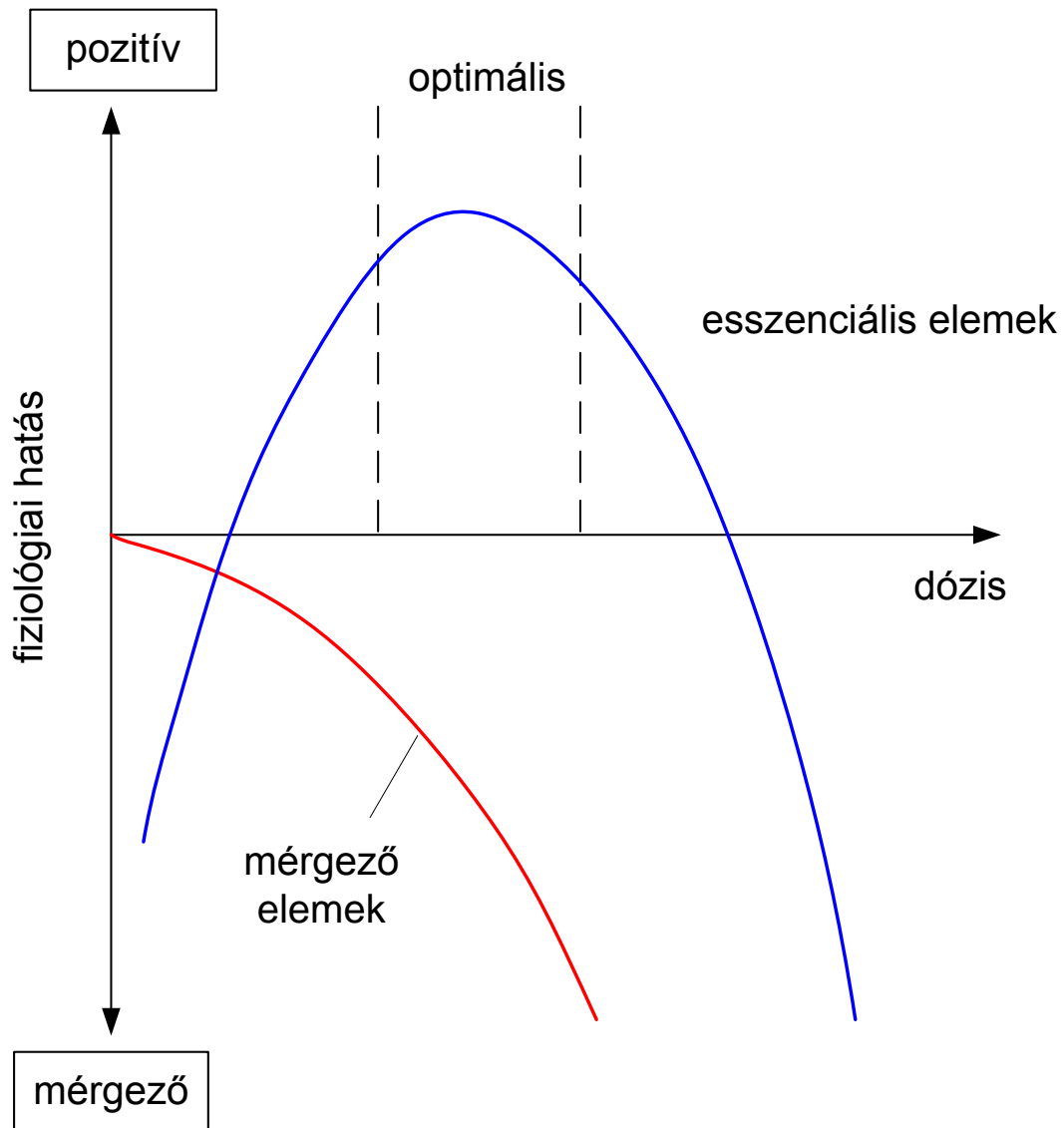
A fémek és vegyületeik a legtöbb biológiai folyamatban jelentős szerepet játszanak. Toxicitásuk és biológiai hozzáférhetőségük alapján három csoportba sorolhatók (WOOD). Az ún. esszenciális (létfontosságú) nehézfémek adott optimális dózishatáron túl az élő szervezetekre mindkét irányban káros hatást gyakorolnak: kis mennyiségben hiánybetegséget okoznak, a nagy mennyiségek pedig intoxikációhoz vezetnek (**21. ábra**).

Létfontosságú elemek: H, Li, Na, K, Rb, Mg, Ca, Sr, B, Al, C, Si, N, P, O, S, F, Cl, Br, Fe.

Biológiailag könnyen hozzáférhető, mérgező elemek: Be, Tl, Sn, Pb, As, Sb, Bi, Se, Te, V, Mo, Co, Ni, Pd, Pt, Cu, Ag, Au, Zn, Cd, Hg.

Biológiailag nehezen hozzáférhető (rosszul oldódó vagy ritka) mérgező elemek: Ba, Ga, La, Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, W, Re, Rh, Ir, Ru.

A fémek – eltérően számos szintetikus szerves vegyülettől – részt vesznek a természetben lejátszódó biogeokémiai folyamatokban. Az emberi tevékenység a természetes átalakulást az egyes rezervoárok közötti anyagtranszport sebességének módosításával, másfelől az eredeti vegyületforma megváltoztatása révén képes befolyásolni. Az antropogén beavatkozás fémkörforgásra gyakorolt hatását különböző indexekkel jellemezhetjük (**8. táblázat**).



21. ábra. A fémek biológiai hatása

8. táblázat. A fémek körforgásának antropogén módosítása

Elem	I _{Geo}	I _{gEF}
Pb	3...5	3
Cd	3...5	3
Cu	0...4	2
Zn	1...4	1,5
Cr	0...2	1
Hg	1...5	0

$$I_{Geo} = {}^2\lg \frac{C_E}{1,5B_E} \text{ geoakkumulációs index (MÜLLER)}$$

C_E =elemkoncentráció a folyami üledékekben

B_E =geokémiai elemkoncentráció a prebiotikus üledékekben

$$E_F = \frac{\left(\frac{C_E}{C_{Al}} \right)_{atm}}{\left(\frac{C_E}{C_{Al}} \right)_{kéreg}} \text{ légköri dúsulási tényező}$$

Az egyes indexek a következők:

globális interferencia-faktor (IF), az adott elem atmoszférába irányuló antropogén anyagtranszportjának arányát adja meg a természetes anyagáramokhoz viszonyítva;

technofilitási index (NIKIFOROVA, SZMIRNOVA), az adott elem antropogén úton mobilizált éves mennyiségét a CLARKE-féle számhoz (az elem átlagos koncentrációja a földkéregben) viszonyítja;

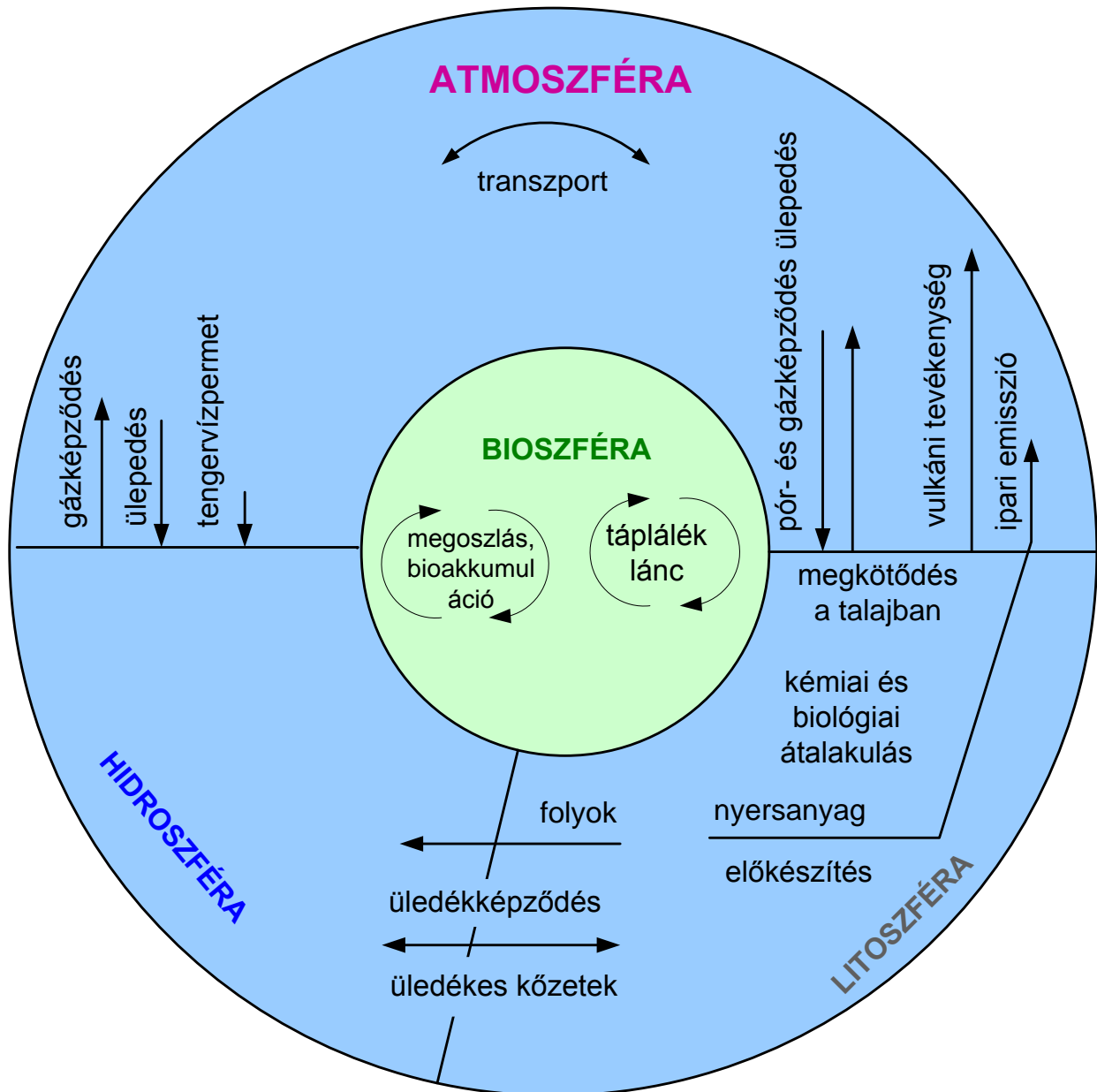
geoakkumulációs index (I_{Geo}), az elem reális folyami és prebiotikus üledékekben mért koncentrációviszonyának logaritmus (MÜLLER);

légköri dúsulási tényező (EF), a kérdéses elem (E) atmoszférában és a földkéregben mért relatív koncentrációjának viszonyát adja meg az alumínium koncentrációjára vonatkoztatva.

Mint ahogy a nehézfémek koncentrációja a környezetben általában csekély, lokális feldúsulásuk drasztikus változásokat idézhet elő az ökológiai rendszerekben. A fémek biogeokémiai körforgását a legfontosabb anyagáramok feltüntetésével a **22. ábra** mutatja be.

A fémek perzisztenciája a környezetben igen nagy, mivel biológiai vagy kémiai úton nem lebonthatók, éppen ezért transzportjuk az atmoszférában vagy a hidroszférában nagy távolságokra bekövetkezhet. A folyamat során mindössze az történik, hogy egyik vegyületük egy másik vegyületté alakul át, s eközben toxicitásuk megváltozhat, vagy a talajba, illetve üledékbe kerülhetnek (immobilizáció).

A talaj öntisztulása ily módon nem játszódik le, mivel az agyagásványok, illetve a humusz a fémeket megköti, s azok vízzel kilúgozhatatlanná válnak. A megkötött fémionok csupán különböző reakciók révén válhatnak szabaddá (**9. táblázat**), s ennek következtében a talajvízbe kerülnek. Néhány reakcióban a hidrogénionok is részt vesznek, s ez a hatás különösen kifejezetté válik, ha a talaj pH-ja antropogén hatásra erősen csökken (pl. savas ülepedés). A pH változása a komplexképződést is jelentősen befolyásolhatja.



22. ábra. A globális fémkörforgás meghatározó anyagáramai

A fémek nagy perzisztenciájának egyik következménye, hogy a tápláléklánc mentén feldúsulnak (biomagnifikáció), s a lánc végén a fémkoncentráció több nagyságrenddel nagyobb lehet, mint az atmoszférában vagy a hidroszférában mért érték. Ebben az esetben az illető növény vagy állat emberi táplálékként nem jöhet számításba.

9. táblázat. Fémionok cseréje a talajban és az üledékben

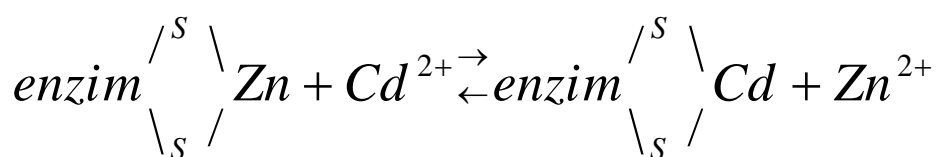
Az előfordulás formája	Cserereakciók
Ionos-kicserélhető (agyagásványok)	$(A)^{2-} M^{2+} + M_1^{2+} \rightleftharpoons (A)^{2-} M_1^{2+} + M^{2+}$ $(A)^{2-} M^{2+} + 2H^+ \rightleftharpoons (A)^{2-} (2H^+) + M^{2+}$ $(A)^{2-} M^{2+} + nL \rightleftharpoons (A)^{2-} + ML_n^{2+}$
Adszorpció révén kötött (pl. vas-oxidok felületén)	$(A)M^{2+} \rightleftharpoons (A) + M^{2+}$ $(A)M^{2+} + nL \rightleftharpoons (A) + ML_n^{2+}$
Rosszul oldódó vegyületek	$\left. \begin{array}{l} MCO_3 \\ MS \\ M(OH)_2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \xrightarrow{H^+} M^{2+} + \dots \\ \xrightarrow{nL} ML_n^{2+} + \dots \end{array}$
Szerves ligandumokkal képzett komplex	$ML_n \xrightarrow{H^+} M^{2+} + \dots$

A: talaj-, vagy üledékrészecske; L: ligandum

2.3.6.1. A cink és a kadmium

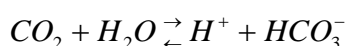
A cink és a kadmium a természetben a higannyal együtt fordul elő. A cink gyakorisága a földkéregben 76 ppm, a kadmiumé 0,16 ppm. A kalkofil elemek közé tartoznak, ily módon a földkéreg megszilárdulása során uralkodó redukáló atmoszférában a szulfidos fázisban különültek el, azaz a legfontosabb ásványaik a szulfidos ércek. A kőzetek ezt követő mállása során a cink részben kioldódott, és karbonát-, szilikát- vagy foszfátvegyületként vált ki ismét. Ennek megfelelően a legfontosabb cink- és kadmiumércek oxidok, szulfidok, illetve karbonátok.

Míg a cink biológiai szempontból esszenciális elem, és igen sok enzim lényeges alkotórésze, a kadmiumvegyületek mérgezőek. A szulfidkénhez való nagy affinitásuk miatt a cinktartalmú enzimekből a cinkiont kiosztják, és ezáltal az enzimet dezaktiválják:

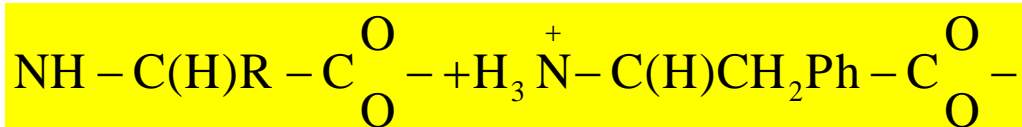
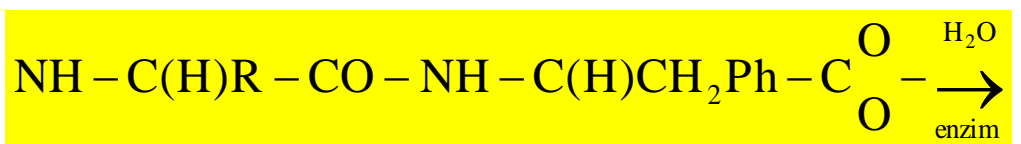


A kadmium biológiai rendszerekben lejátszódó transzportja és feldúsulása szempontjából a fémproteineknek és a citoplazma proteineknek (móltömeg 10^4, ciszteintartalom 30% és fémtartalom 6-11%) döntő szerepe van.

A cink szinte valamennyi emberi sejtben megtalálható, s mivel a felnőtt emberi szervezet csupán mintegy 2 g cinket tartalmaz, koncentrációja csekély. A két legismertebb cinktartalmú enzim a szénsav-anhidráz és a karboxipeptidáz-A. A szénsav-anhidráz a következő reakció katalizátora:



A felső nyíl irányába mutató reakció akkor játszódik le, amikor a vér a szövetekben szén-dioxidot vesz fel, a fordított irányú pedig a tüdőben, a szén-dioxid leadása során. A bemutatott reakciók sebességét az enzim 10^6 -szorosára növeli. A karboxipeptidáz-A enzim a fehérjék C-terminális peptidkötéseinek a hidrolízisét katalizálja az emésztési folyamatban:



Bár a folyamat pontos mechanizmusa nem ismeretes, a vizsgálatok alapján nagy valószínűséggel feltételezhető, hogy az első lépés a cinkion >C=O- csoport révén bekövetkező koordinációja.

A

10. táblázat néhány környezeti régió átlagos cink- és kadmiumkoncentrációját mutatja be.

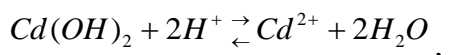
A kadmium mintegy 2/3 része a cink és a réz feldolgozása során kerül az atmoszférába. További antropogén források: hulladékégetés, foszfátműtrágyák előállítása, egyéb nagy hőmérsékletű folyamatok.

A kadmium a felszíni és a mélységi vizekbe elsősorban a cinkérc-kitermelés és más ipari folyamatok (felületi kezelés, festés) során kerül.

10. táblázat. Jellemző cink- és kadmiumkoncentrációk a környezetben

Tartomány	Koncentrációegység	Zn	Cd
földkéreg	mgkg ⁻¹	75	0,11
mélytengeri üledék	mgkg ⁻¹	165	0,42
folyami üledék	mgkg ⁻¹	350	1
talaj	mgkg ⁻¹	60	0,6
folyóvíz	µgl ⁻¹	20	0,4
tengervíz	µgl ⁻¹	30...120	0,1...0,6
tengervíz (felszíni réteg)	ngl ⁻¹	7	1
levegő (városi-ipari)	ngkg ⁻¹	300	3
levegő (átlag)	ngkg ⁻¹	10	1
ipari szennyvíz	mg l ⁻¹	5000	1000
algák	mgkg ⁻¹	250	2
főzelékfélék	mgkg ⁻¹	300	0,2...1,2
halhús	mgkg ⁻¹	5	0,05

A cink- és kadmiumvegyületek mobilitását a hidroszférában hidroxidjaik, karbonátjaik és szulfátjaik oldhatósága, s az oldhatóságnak a pH-változás és komplexképződés hatására bekövetkező módosulása határozza meg. Rosszul oldódó kadmiumvegyületekből – CdCO₃, Cd(OH)₂, CdS – pH-csökkenés hatására a kadmium a következő egyensúlyoknak megfelelően mobilizálódik:



Az óceánok felületi rétegében, aerob körülmények között klorokomplexek keletkeznek: CdCl⁺, CdCl₂, CdCl₃⁻, CdCl₄²⁻, illetve Cd(OH)Cl stb. Redukáló körülmények között CdS csapódik ki:



ami oxigén jelenlétében mikrobiológiai úton szulfáttá oxidálódik, s ez – minthogy a szulfát jól oldódik – a fém remobilizációjához vezet. A kadmium-hidroxid oldhatósága a pH

függvényében változatos képet mutat. Lépcsőzetes komplexképződés során a következő részecskefajták alakulnak ki: $\text{Cd}(\text{OH})^+$, $\text{Cd}(\text{OH})_2$, HCdO_2^- és CdO_2^{2-} .

Vizes fázisban a kadmium mobilitását a karbonátionok csökkentik. (A karbonátmentes rendszerben $\text{pH}=8,3$ -nál mért 637 mg l^{-1} kadmium-koncentráció $0,11 \text{ mg l}^{-1}$ -re csökken, ha a teljes CO_2 - és karbonátkoncentrációt $5 \cdot 10^{-4} \text{ mg l}^{-1}$ -re növeljük.)

A kötött kadmium mobilizálásában szerves és szervetlen ligandumok – citrát-, nitrilotriacetát-, továbbá kloridionok – jelentős szerepet játszanak. Míg a Cd^{2+} -ionok szulfidkénnel olyan stabilis komplexet képeznek, mint a Cu^{2+} -, Hg^{2+} és a Pb^{2+} -ionok, addig a kadmium karboxilátokomplexének stabilitása kisebb, mint sok létfontosságú nehézfém hasonló komplexéé.

Mivel a kadmiumvegyületek melegvérűekre igen mérgező hatást fejtenek ki, továbbá a biológiai szennyvízkezelés eleve szajpájában kifejezett kadmiumfeldúsulás figyelhető meg, a szennyvizek kadmiumtartalmának eltávolítására jelentős erőfeszítéseket tesznek.

2.3.6.2. A higany

A higany az egyetlen fém, amely szobahőmérsékleten folyékony. Sűrűsége $13,59 \text{ g cm}^{-3}$. Nagy gőznyomása miatt a higannyal telített levegőben szobahőmérsékleten $\sim 30 \text{ mg m}^{-3}$ fém található. Valamennyi fém közül a legillékonyabb, és -39°C -os fagypontját tekintve is határesetet jelent a fémek között. A higanyban – amalgámképződés közben – számos fém oldódik.

A higany az a fémes elem, amelynek mérgező hatását a legalaposabban vizsgálták. Az elmúlt évtizedek során több esetben tapasztaltak igen súlyos higanymérgezést, s ezért ma a legveszélyesebb fémszennyezőnek tartják. Korábban u.i. azt feltételezték, hogy a fém a természeti vizek üledékeiben kizárólag oldhatatlan HgS formájában van jelen. Ezt a felfogást azonban megváltoztatta az a megfigyelés, amely szerint adott körülmények között a higany biometiléződik, másfelől a vizsgálatok rámutattak arra is, hogy a HgS oldhatósága nagyobb, mint ami az oldhatósági szorzata alapján számítható. Ennek oka az, hogy az oldatban nemcsak Hg^{2+} -ionok, hanem különböző komplex részecskefajták is jelen vannak. Savas közegben $[\text{Hg}(\text{SH})_2]^-$, míg lúgosban $[\text{HgS}_2]^{2-}$ komplex képződik. A



rendszer redoxipotenciáljából következik, hogy a környezetben a higany elemi formában is előfordul. A természetben leggyakrabban előforduló ásványa a cinóber, HgS.

A fémhigany és a higanyvegyületek technikai alkalmazása széles körű (klór-alkáli-elektrolízis, katalizátorok, biocid anyagok), az éves higanytermelés globálisan mintegy 10 kt (**11. táblázat**).

11. táblázat. A globális higanyfelhasználás megoszlása (a teljes felhasználás mintegy 10 kta-1)

Alkalmazási terület	Részarány (%)
klóralkáli-elektrolízis	35
elektrotechnika/elektronika	26
biocidok (csávázószer, fungicid)	12
katalizátor-előállítás	2
fogászat	5
gyógyszer	1
egyéb	19

A higany biogeokémiai körforgását a **23. ábra** mutatja be, míg az egyes rezervoárokból található, feltételezett higany mennyiségeket az átlagos higanykoncentrációkkal és a globális anyagáramokból becsült közepes tartózkodási idővel együtt a **12. táblázat** tünteti fel. Az atmoszférába irányuló higanyemisszió közel 30%-a antropogén eredetű. A kondenzált fázisból (hidroszféra, litoszféra, talaj) a higany fém, illetve metil-higany-vegyületek formájában kerül az atmoszférába. Az atmoszféra, a hidroszféra és a litoszféra között cserélődő higanyvegyületek pontos mennyisége ma még nem ismeretes.

A rendelkezésre álló adatok csupán néhány kvalitatív megállapítást engednek meg: (1) a kontinensekről kiinduló emisszió nagyobb, mint az óceánoké, s a mélytengeri üledékekben a higany mennyisége igen jelentős; (2) a szárazföld és az óceánok közötti, a folyók révén közvetlenül megvalósuló transzport jóval kisebb, mint az atmoszféra/szárazföld-, illetve atmoszféra/óceán-anyagcsere; (3) az atmoszféra és a szárazföld, illetve az óceánok közötti természetes higanycsere kiegyensúlyozott, azonban az antropogén hatás az atmoszférába irányuló nettó higanyáramot hoz létre; (4) a folyók révén az óceánokba jutó higany mennyiség (oldott állapotban, illetve lebegő részecskék formájában az emberi tevékenység hatására többszörösére növekedett, s ez azért veszélyes, mivel a megnövekedett anyagáram egyenlőtlenül oszlik meg; (5) a higany átlagos tartózkodási ideje az atmoszférában, a talajban,

az óceánokban és az óceáni üledékekben rendre, megközelítőleg 11 nap, 1000, 3200, illetve $2,5 \cdot 10^8$ év.

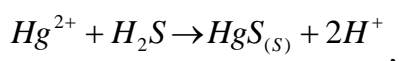
12. táblázat. A Föld globális higanyrezervoárjai

Rezervoár	Mennyiség (kt)	Átlagos koncentrációk	Tartózkodási idő (év)
atmoszféra	1,2	$0,5 \dots 50 \text{ mgm}^{-3}$	0,03
biomassza (szárazföld)	310	$0,02 \text{ mgkg}^{-1}$	
biomassza (tenger)	200		
érctelepek	30000		
talajok	21000	$0,5 \text{ mgkg}^{-1}$	1000
talajvíz	0,2		
édesvíz	2		
édesvízi üledékek	200		
óceánok	42000	$0,03 \dots 0,3 \text{ gm}^{-3}$	3200
óceáni üledékek	$300 \cdot 10^6$	$0,2 \text{ mgkg}^{-1}$	10^8

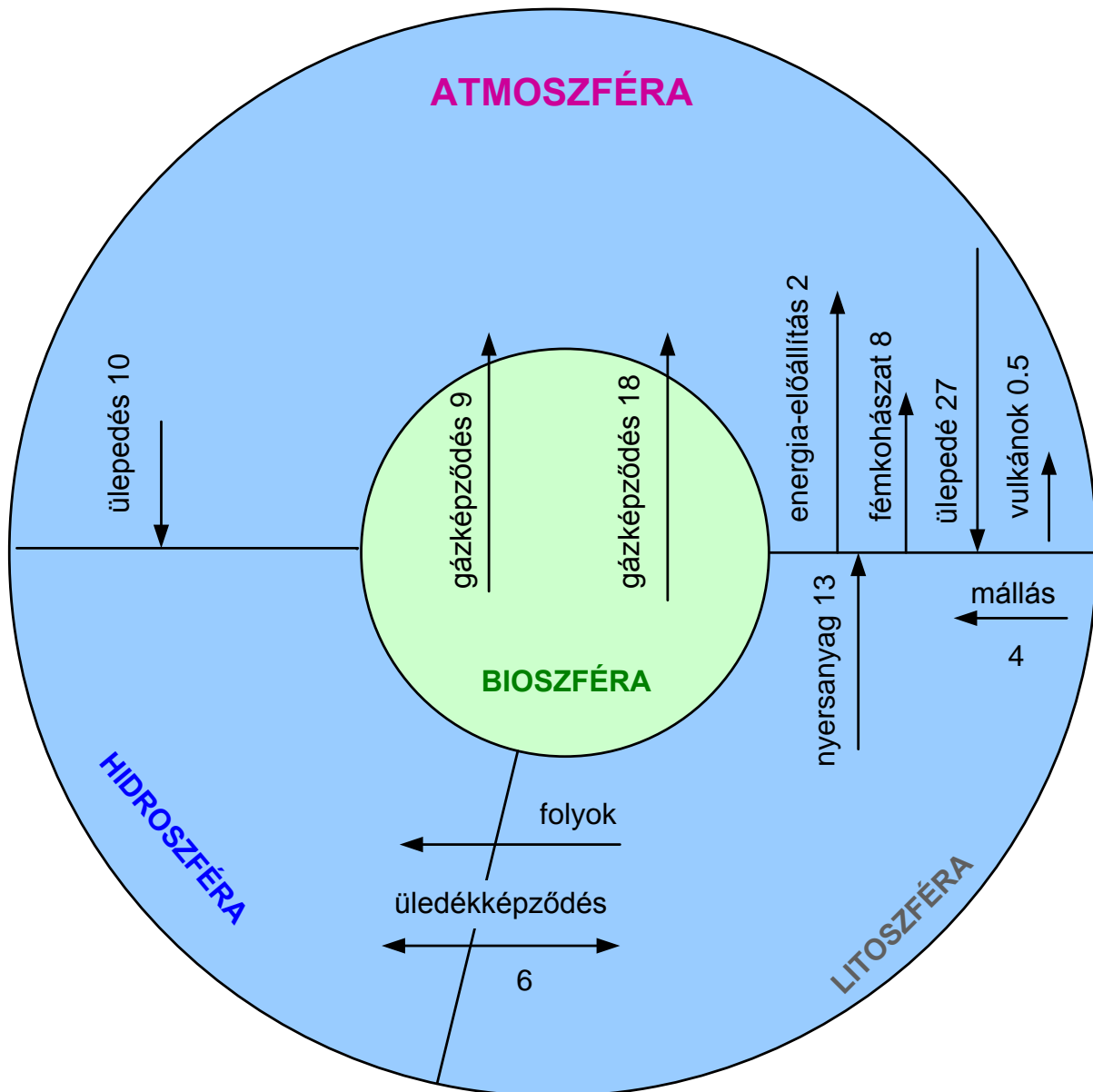
A litoszférában a higany főként szulfid formájában van jelen, amiből a fém lassan szabadabbá válik. A folyamat bakteriális redukcióval (pseudomonasz) kezdődik, amelynek során a HgS-ből fémhigany keletkezik, s ezt a lépést viszonylag gyors folyamatban a metileződés követi.

Levegővel telített felszíni vizekben a higany Hg^{2+} -ionok, mérsékelten oxidáló, illetve gyengén redukáló közegben Hg^0 vagy Hg^{2+} -ionok, redukáló körülmények között pedig Hg^0 , illetve anionos szulfido-komplex, HgS_2^{2-} formájában van jelen. A Hg_2^{2+} -ionok a környezetben csupán közti-termékként fordulnak elő. A tengervízben az egyes részecskefajták aránya a pH-tól és a kloridion-koncentrációtól függ, ahol elsősorban HgCl_2 , HgCl_3^- , HgCl_2Br^- , $\text{HgCl}_3\text{Br}^{2-}$ és HgCl_4^{2-} jelenlétével számolhatunk.

A felszíni vizekben a fémhigany oxidációja higany(II)vegyületekké oldott oxigén hatására megy végbe, és az oxidáció komplexképzők jelenlétében kedvezményezett. A Hg(II)ionok biológiai redukciója viszont ellentétes körülmények között játszódik le, s a földkéregből származó higanykigőzölég ezen az úton jön létre. A Hg(II)vegyületek kén-hidrogénnel igen rosszul oldódó szulfidot adnak:



amiből a higany a szulfidkén szulfáttá történő bakteriális oxidációja révén ismét mobilizálódik.

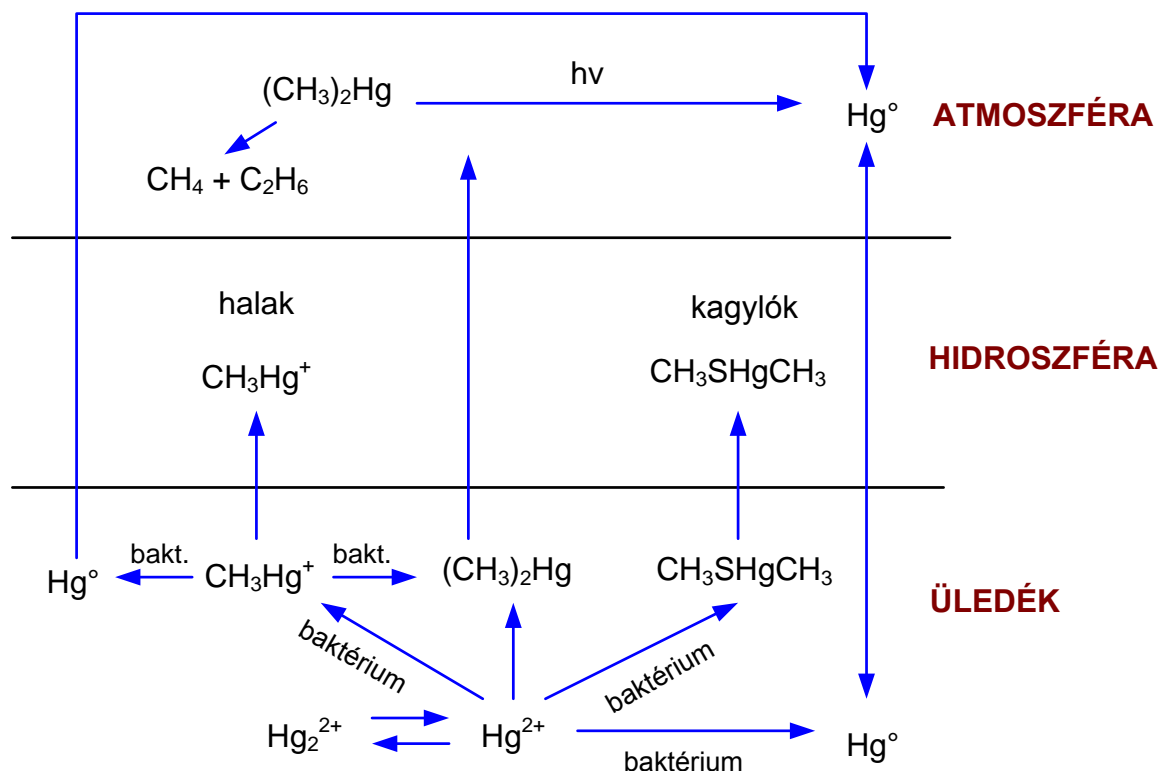


23. ábra. A higany biogeokémiai körforgása (anyagáram: kt a-1 Hg)

Minthogy a higanyvegyületek erősen mérgezőek, a természetben lejátszódó biológiai metileződésük különös figyelmet érdemel. A keletkező metil-higany-vegyületek ui. lipofil tulajdonságúak, és ennek megfelelően a vízi élőlényekben erősen feldúsulhatnak. A biometileződés anaerob körülmények között a metilkobal-amin segítségével játszódik le, aerob feltételek mellett pedig a sejtekben a metionin szintéziséhez hasonlóan megy végbe.

A 24. ábra a higany körforgásának legfontosabb kémiai és biokémiai reakcióit mutatja be. Az üledékben és a hidroszférában lejátszódó mikrobiológiai folyamatok során a higany(II)ionok redukciója fémhigannyá és a metilszármazékok képződése egyaránt bekövetkezik. Az utóbbiak

a tápláléklánc mentén egyre nagyobb koncentrációban halmozódik fel. Diszproporcionálódás vagy további metileződés révén dimetil-higany keletkezik, ami jelentékeny gőznyomása következtében (gázhalmazállapotú vegyület) az atmoszférába kerül, ahol fotodisszociációja bekövetkezik. A higany(II)szulfid képződésével járó reakció a természetes vizekben csupán átmenetileg csökkenti a higany(II)ionok koncentrációját.



24. ábra. A higanyciklus kémiai és biokémiai folyamatai

A higanyvegyületek toxicitása miatt a fém ipari felhasználását csökkenteni igyekeznek, illetve egyre erősebb az a törekvés, hogy a technológiai folyamatokban hatékonyabb visszaforgatási módszereket valósítsanak meg. Egy becslés szerint a hulladékba kerülő higanynak ma mintegy 75%-át megfelelő technológia alkalmazásával visszanyerik.

2.3.6.3. Az ón és az ólom

Az ón(II)/ón(IV)-rendszer redoxipotenciálja $-U_H^\ominus = 0,14V$ – alapján megállapíthatjuk, hogy az Sn^{2+} -ionok a természeti környezetben redukálószerként viselkednek. Ennek tulajdonítható, hogy az elem elsősorban ón(IV)oxo-, illetve hidroxovegyületek formájában található a természetben. Legfontosabb érce az ónkő (kassziterit, SnO_2), ami mellett az ón még a fosszilis

tüzelőanyagokban és egész sor ásványban is előfordul. Ezekből a feldolgozás továbbá a mállásfolyamatok során válik szabaddá. Az SnO_2 vízben rosszul oldódik és szívesen képez kolloid oldatot.

A **13. táblázat** a természeti környezet egyes rezervoárjaiban mért ónkoncentrációkat mutatja be. Mint az a táblázatból megállapítható, a fito-, illetve a zooplankton szervezetekben, valamint az erősen szennyezett ipari területek fölött az atmoszféra aeroszoljaiban jelentős koncentrációnövekedés mutatható ki. Az ón átlagos tartózkodási ideje a tengervízben 10^5 év.

13. táblázat. Az ón átlagos koncentrációja a környezetben

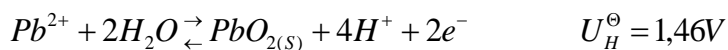
Rezervoár	Koncentráció
Szilárd fázis	
vulkáni kőzetek	2...4 mgkg ⁻¹
agyagpala	4...6 mgkg ⁻¹
homokkő, mészkő	0,5 mgkg ⁻¹
talajok	5...100 mgkg ⁻¹
Felszíni vizek	
édesvíz	9 mgm ⁻³
tengervíz	4 mgm ⁻³
Atmoszféra	10 mgm ⁻³
Ipari porok	1000 mgkg ⁻¹
Élőlények	
tengeri növények	1 mgkg ⁻¹
szárazföldi növények	0,3 mgkg ⁻¹
tengeri állatok	0,2...20 mgkg ⁻¹
szárazföldi állatok	0,15 mgkg ⁻¹

A világ éves óntermelése mintegy 250 kt. Ebből kerekén 5%-ot szerves ónvegyületek előállítására használnak fel, amelyek mennyisége 1950-1980 között több mint 700szorosára nőtt. Dialkil-ónvegyületeket a műanyaggyártásban adalékként, trialkil-ónvegyületeket pedig mint biológiailag aktív anyagokat kiterjedten használják. A trimetil- és trietil-származékok meglehetősen mérgezőek, de a természeti környezetben néhány nap alatt – elsősorban hidrolízis révén – elbomlanak. A hidroszférába jutó óntartalmú biocidok mennyisége megközelítőleg 0,5 kta⁻¹. Vízrel, az Sn-C-kötés felhasadása közben, gyorsan reagálnak.

Az Sn(IV)vegyületeket bizonyos pszeudomonasz-törzsek dimetil-, illetve trimetil-ón-kloridokká alakítják át. Vas(III)-, illetve kobalt(III)ionok jelenlétében az ón(II)sókat biológiai rendszerekben a metilkobalamin gyökös mechanizmus szerint –hasonlóképpen – metil-ón-vegyületekké alakítja át.

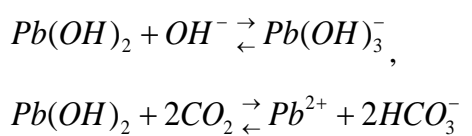
A szerves ónvegyületek emberre gyakorolt mérgező hatása sokkal kisebb, mint az ólom-, arzén- vagy kadmiumsóké. Az ón pl. patkányok számára esszenciális elem. A legtöbb ónvegyület csekélyebb oldhatóságával magyarázható az is, hogy az ón körforgását a természetben eddig kevésbé behatóan vizsgálták, mint más fémekét.

Az ólom gyengén elektropozitív elem, oxidációfoka +2 és +4 lehet. A Pb(II)/Pb(IV)-redoxipotenciál a következő egyenletnek megfelelően:



nagy, így módon az ólom(II)ionok csak igen erős oxidálószerekkel oxidálhatók. Affinitásuk az oxigén- és kénszulfidokhoz nagy, ezért az ólom az enzimekben a kötés kialakítására képes koordinációs helyeket elfoglalhat. Az ólom-szén kötés kovalens, s ez a tény a négyes koordinációjú ólomorganikus vegyületek viselkedését egyértelműen meghatározza.

A legtöbb szerves ólom(II)vegyület – szulfid, karbonát, szulfát, hidroxid – vízoldhatósága csekély, ennek megfelelően a talajvíz ólomkoncentrációja kicsi. Az ólom(II)ion számos anionos koordinációs vegyület – hidroxo-, karbonáto-, szulfáto- és karboxiláto-komplexek – kialakítására képes, amelyeket a hidroszférában ki is mutattak. Az ólom(II)hidroxid oldhatósága a pH valamint a folyadékfázis CO₂-koncentrációjának növekedésével egyre nagyobbá válik:



A természetben található legfontosabb ólomércsek a következők: PbS (galenit), PbCO₃ (cerusszit) és PbSO₄ (anglezit).

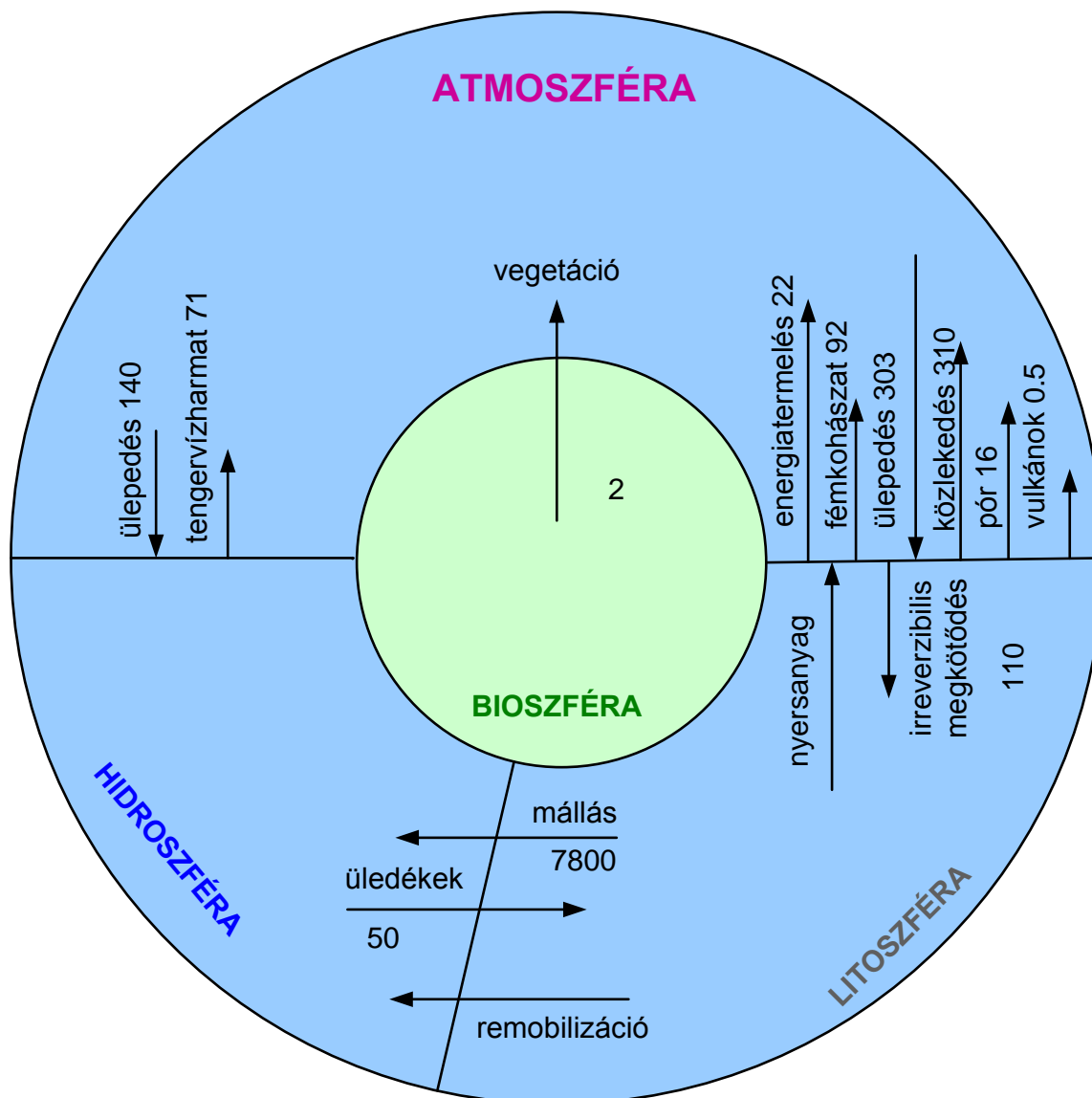
A **14. táblázat** a legfontosabb ólomlelőhelyeket mutatja be. A földkéreg átlagos ólomkoncentrációja 16 mgkg⁻¹; az agyagpaláé maximálisan 80 mgkg⁻¹; a szennyezett talajoké 200 mgkg⁻¹; a bioiszapé pedig 3000 mgkg⁻¹-ot is elérheti. A kontinensek és a tengerek biomasszája összességében a becslések szerint 5000 kt ólomot tartalmaz, amiből <5% az élő

szervezetekben található. A 25. *ábra* a globális ólomkörforgást szemlélteti. A adatok egyértelműen arra utalnak, hogy az atmoszférába jutó ólom túlnyomóan (~95%) antropogén forrásokból származik. A vulkáni tevékenység, a tengeri permet és a növényi váladék csupán jelentéktelen mértékben járul hozzá az ólom mobilizálásához.

14. táblázat. A Föld globális ólomrezervoárjai

Rezervoár	Mennyiség (kt Pb)
Litoszféra	$0,4 \cdot 10^{12}$
talaj	$4,8 \cdot 10^6$
édesvízi üledékek	$140 \cdot 10^3$
mélytengeri üledékek	$48 \cdot 10^9$
Hidroszféra	$30 \cdot 10^3$
óceánok	$27 \cdot 10^3$
édesvíz	900
talajvíz	82
Atmoszféra	18
Biomassza	4700
élő biomassza	83
(szárazföld)	
élő biomassza	0,8
(óceánok)	
elhalt biomassza	2100
(szárazföld)	
elhalt biomassza	2500
(óceánok)	

Az emberi tevékenység hatására az atmoszféra korábbi $0,6 \text{ ngm}^{-3}$ ólomkoncentrációja napjainkban $3,7 \text{ ngm}^{-3}$ értékre növekedett. Az ólom átlagos tartózkodási ideje a levegőben $\tau = 14$ nap, ülepedés során ezt követően a földfelületre, illetve az óceánokba jut vissza.



25. ábra. Az ólom biogeokémiai körforgása (anyagáram: kt a-1 Pb)

A hidroszférában az ólom hidratált ólom(II)ion, oldható komplexek valamint szuszpendált vagy adszorbeálódott ólomvegyületek formájában van jelen. A környezetben előforduló és felhasználásra kerülő vizek ólomtartalmát a következő tényezők határozzák meg: (1) komplexképződés szervetlen és szerves ligandumokkal; (2) az ólom(II)vegyületek oldódása, illetve kicsapódása; (3) adszorpció kolloidális oxidszemcséken vagy szerves kolloidokon; (4) átalakulás a biomasszában; (5) koagulálás és csapadékzárvány képződése.

A talajvizek ólomtartalma kevesebb, mint $10 \mu\text{g l}^{-1}$, a tengervízé $0,03 \mu\text{g l}^{-1}$ és az ivóvízbe ólomból készült csővezeték esetén több mint $100 \mu\text{g l}^{-1}$ juthat. Az oldott vagy szuszpendált ólomvegyületeket a tengeráramok szállítják, jelentős részüket az élő szervezetek veszik fel vagy az üledékekbe jutnak. Az édesvizek túlnyomóan karbonato-, a tengervíz pedig

klorokomplexeket tartalmaz, míg a talajvízben az ólom huminsav-, illetve fulvosav-komplexek formájában van jelen.

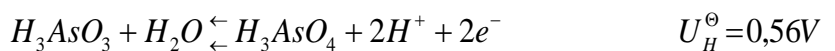
Az ólom biogeokémiai körforgása az egyik legjobb példa arra, hogy adott elem körforgását az antropogén beavatkozás hogyan módosítja. Az ólomércsek feldolgozása ui. a civilizációs fejlődéssel egyre fontosabb szerepet kapott. Az egy főre eső ólomfelhasználás az antik Rómában (4 kga^{-1}) a modern ipari államok felhasználásának nagyságrendjébe esik. A grönlandi jég ólomtartalmának vizsgálatából az derült ki, hogy az újkorban két jelentős ólomemisszió-növekedés következett be: a 18. század közepén az ólom ipari kohászatának indulásakor, illetve 1940 táján, az ólomtartalmú hajtóanyagok fogyasztásának ugrásszerű megnövekedése idején.

A szerves ólomvegyületeket – mindenekelőtt az ólom-tetraetil – belsőégésű motorokban kopogásgátló adalékként alkalmazták. Az ily módon kialakult jelentős környezetszennyezés olyan eljárások kidolgozását kényszerítette ki, amelyek a hajtóanyag összetételének javításával, az égésfolyamatok optimalizálásával és ólommentes kopogásgátló anyagok alkalmazásával a szerves ólomvegyületek felhasználását fölöslegessé tették.

A szervetlen ólomvegyületek biológiai metilézésének lehetőségére vonatkozó laboratóriumi vizsgálatok eddig nem hoztak egyértelmű eredményeket. Azonban tekintettel arra, hogy halakban alkil-ólmvegyületeket mutattak ki, a feltételezés nem alaptalan. Valószínű, hogy az illékony ólom-tetrametil trimetilvegyületek – $(\text{CH}_3)_3\text{PbCl}$ vagy $(\text{CH}_3)_3\text{PbOCOCH}_3$ – diszproporcionálódásával jöhet létre.

2.3.6.4. Az arzén

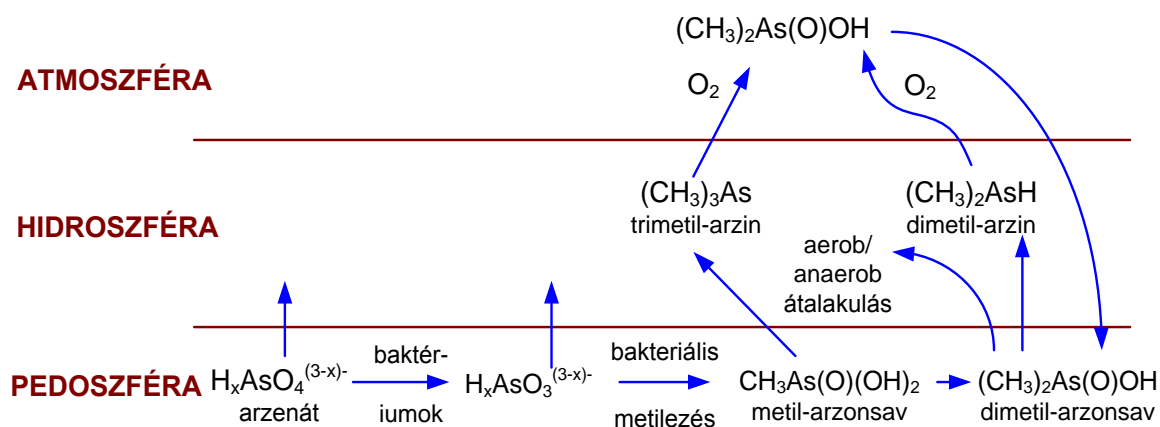
Az arzén a periódusos rendszer ötödik főcsoportjában foglal helyet, oxidációfoka vegyületeiben ennek megfelelően +3 és +5. A redoxiegyenlet a következő:



Koncentrációja a földkéregben 2ppm körüli érték, míg a talajé 2-10 mgkg^{-1} között változik. Az elem foszfátércsekben gyakran fordul elő, s ezek feldolgozása során a foszforműtrágyákba és a foszfáttartalmú mosószerekbe kerül. A leggyakoribb arzénásványok a következők: As_2S_3 (auripigment), FeAsS (arzenopirit) és As_2O_3 (arzenit). Az arzénvegyületeket erős mérgező hatásuk miatt rovarölő és növényvédő szerként már hosszú idő óta használják. Arzénvegyületeket az I. Világháborúban vegyi fegyverként alkalmaztak: $\text{ClCH}=\text{CH}-\text{AsCl}_2$,

(C₆H₅)₂AsCl, illetve (C₆H₅)₂AsCN. A középkorban „oly divatos” mérgezésekhez szintén arzéntartalmú anyagokat használtak. Az arzén(III) toxikus hatása azzal magyarázható, hogy a HS-csoporthoz nagy affinitást mutat, ezáltal a tiolcsoportot tartalmazó enzimeket irreverzibilisen blokkolja.

Az atmoszférába jutó antropogén eredetű arzénemisszió fő forrása az ércek kohósítása (50 kta⁻¹), az energiaelőállítás (5 kta⁻¹) és a cementipar (3,2 kta⁻¹). Ennek következtében az atmoszférában található aeroszolok arzénkoncentrációja mintegy háromszázszor nagyobb, mint a földkéregé. Az AsO₃³⁻ és az AsO₄³⁻ formájában kiülepedő részecskék megnövelik a talaj arzénkoncentrációját.



26. ábra. Az arzén környezeti átalakulása (WOOD)

Az arzén természetes folyamatok során (mállás, transzport a folyóvizek révén) bekövetkező mobilizációjának mértéke kerekén 20 kta⁻¹. Az arzén(V)vegyületeket a mikroorganizmusok erősebben mérgező arzén(III)vegyületekké redukálják, majd penészgombák, illetve baktériumok révén metileződési reakciók játszódnak le. A metileződés – a feltételezések szerint – környezeti körülmények között különböző mechanizmusok szerint játszódhat le. A keletkező di- és trimetil-arzin (illékony és erősen mérgező anyagok) az atmoszférába diffundál és ott kakodilsavvá (dimetil-arzinsav) oxidálódik. A körforgás ezzel a lépéssel zárul (26. ábra).

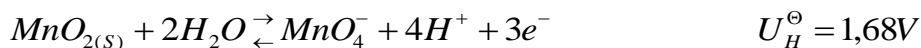
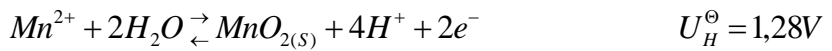
2.3.6.5. A mangán

A mangán biológiai szempontból létfontosságú elem, koncentrációja a földkéregben 1060 ppm, ezzel az elemek gyakorisági sorrendjében a 12. helyet foglalja el. Az átmenetifémek közül a gyakoriságot tekintve csak a vas és a titán előzi meg. Mintegy 300 ásványa közül csupán

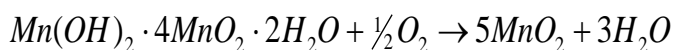
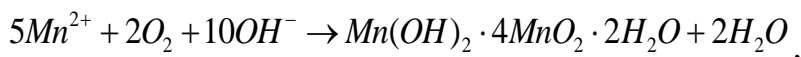
tizenkettő rendelkezik gyakorlati jelentőséggel. Kémiai jellemének megfelelően az elsődleges üledékekben szilikátok formájában található (un. „kemény sav” kation). A gyakorlati szempontból fontos másodlagos üledékek ezen utóbbiak mállásfolyamatai során képződtek. Ezek a következők: MnO_2 (barnakő vagy piroluzit), Mn_3O_4 (hauszmannit) és $MnCO_3$ (mangánpát vagy rodokrozit).

A tengervíz meglepően nagy mangán-koncentrációja ($165 \mu\text{g m}^{-3}$ a felületi és $55 \mu\text{g m}^{-3}$ a mélyebb rétegekben) eróziós folyamatok és tenger alatti vulkánkitörések eredménye. Az óceánokban gyengén oxidációs reakciókörülmények között mikrobiológiai hatásra mangán(IV)-oxidhidrát válik ki, ami olykor 1 kg tömegű rögöket képez. Ezek agyagból, kőzetmaradványokból vagy organizmusok vázanyagaiból álló magot tartalmaznak, amelyre mangán(IV)- és vas(III)-oxidhidrát rakódik rá. Az oxidhidrát rétegben egyes fémionokat M^{2+} -kationok (Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} stb.) helyettesíthetnek. A rögök akár 20% mangánt, 20% vasat és 1-3% nikkelt, kobaltot és rezet tartalmazhatnak, ily módon potenciális fémlelőhelynek tekinthetők. A becslések szerint mintegy 10^{12} tonna ilyen üledék lehet az óceánok fenekén, és mennyisége évenként további mintegy 10^7 tonnával gyarapodhat.

A természeti körülmények között előforduló mangánvegyületekre elsősorban olyan redoxireakciók a jellemzőek, amelyek közepes pH-értékek esetén elsősorban mangán(IV)részecskefajták keletkezéséhez vezetnek:



Anaerob, illetve redukáló közegben a mangán hidratált mangán(II)ion formájában fordul elő. Ennek lépcsőzetes oxidációja a tengervízben oldott oxigén segítségével pH=8-nál a következő egyenletek szerint bakteriális hatásra játszódik le:

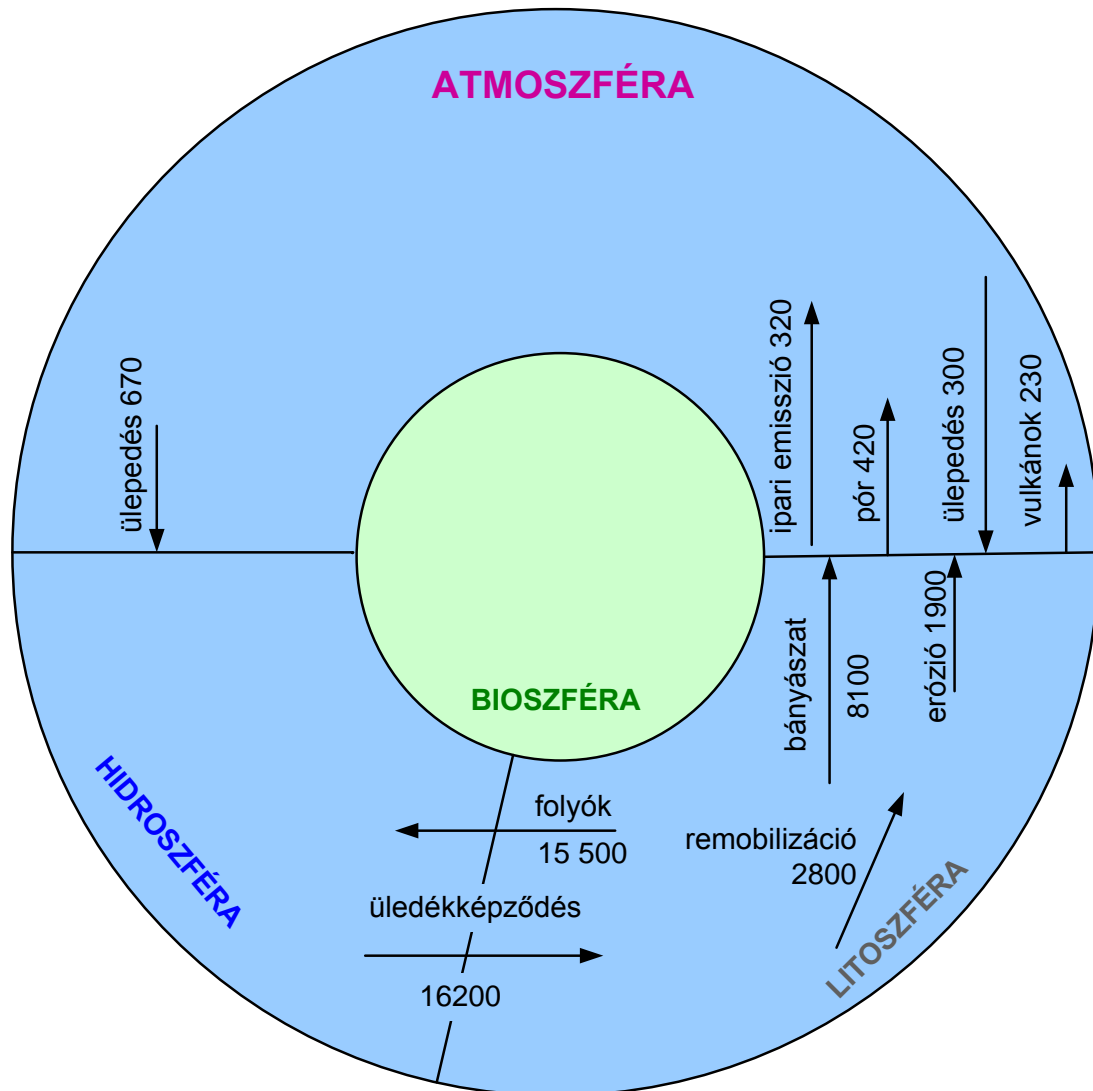


A bruttó reakcióegyenlet pedig:



A mangán nyomnyi mennyiségben számos növényben és baktériumban előfordul, s az egészséges, felnőtt emberi szervezet 10-20 mg mangánt tartalmaz. A mangántartalmú proteinekben a mangán általában +2 oxidációfokkal fordul elő, és az aktivitás elvesztése nélkül magnézium(II)ionnal gyakran helyettesíthető. Azonban legfontosabb biológiai funkciója a fotoszintézis folyamatában a víz oxidációja kapcsán játszott szerepe.

A **27. ábra** a mangán biogeokémiai körforgását mutatja be a valószínű transzportfolyamatokkal együtt.



27. ábra. A mangán körforgása (GARRELS, MACKENZIE és HUNT szerint);

2.3.6.6. A vas

A vas atommagja – az egy nukleonra jutó kötési energiát tekintve – az elemek között a legstabilisabb, ami kifejezetten nagy kozmikus gyakoriságát eredményezi. A feltételezések szerint a földmag fő alkotórésze, továbbá az ún. vasmeteoritoknak is fő komponense. A

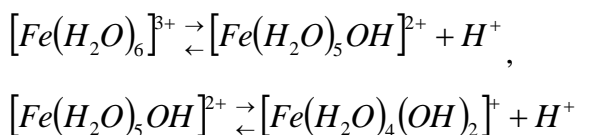
földkéregben a negyedik leggyakoribb elem, átlagos koncentrációja 4,7%, míg ez az érték a talajban kerekén 4%. Oxidos és karbonátos ércei egyaránt elterjedtek, amelyek között a leggyakoribbak a Fe_2O_3 (hematit), a Fe_3O_4 (magnetit), a $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (limonit) és a FeCO_3 (sziderit). A FeS_2 (pirit) szintén gyakori. A vas eloszlását a földkéregben a különböző mállásfolyamatok alapvetően befolyásolják. A szulfidos és szilikátos ércek, illetve kőzetek átalakulása során a vas FeSO_4 , illetve $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ formájában jelenik meg a talajban. A vizes fázisban azután gyors oxidáció játszódik le, és enyhén lúgos közegben vas(III)-hidroxid csapadék válik ki.

Környezeti körülmények között a vas +2 és +3 oxidációfokkal képez stabilis vegyületeket:

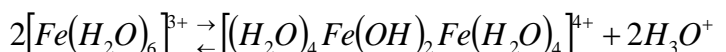


A környezetben uralkodó redoxi körülmények és pH-értékek mellett egyértelműen a vas(III)vegyületek a stabilisak, míg a +2 oxidációfokú állapotot bizonyos kelátligandumok koordinációja stabilizálja (vas-porfirinkomplexek).

Megfelelően nagy savkoncentrációjú vizes oldatokban a vas(III) hidratált Fe^{3+} -kationokat képez, amelyekben a Fe-O-kötések erősen kovalens jellegűek. A koordinált víz az O-H-kötés megnövekedett polaritása miatt savassá válik, és a következő disszociációs egyensúlyok alakulhatnak ki:



A hexaakvo-vas(III)kationok ennek megfelelően savak, amelyek deprotonálódása során aggregációs folyamatok is lejátszódhatnak:

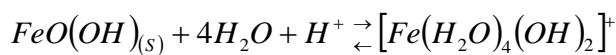


A folyamat összetett, és az egyidejűleg lejátszódó deprotonálódás továbbá dehidratálódás oligomerek kialakulásával jár együtt, amelyek összetétele a vizes fázis vastartalmától, illetve a pH-tól függ. Végtermékként nagy polimerizáció-fokú vas(III)-hidroxidnak nevezett vegyület

keletkezik. Azonban a $\text{Fe}(\text{OH})_3$ képlet az összetételt csupán közelítőleg írja le, minthogy a frissen leváló csapadék sztöchiometriai összetétele változó lehet. A csapadék öregedése során $\text{FeO}(\text{OH})$ keletkezik, ami hidroxo- és oxohidakat tartalmazó polimer. A hidrolízis során kolloidális köztitermékekkel számolhatunk, amelyeket szerves ligandumok (huminsavak) stabilizálhatnak. Becslések szerint a folyókon át a tengerekbe jutó globális vasmennyiség mintegy 10^3Mta^{-1} , amelynek több mint 95%-a jó adszorpciós képességgel rendelkező diszperziós kolloid formájában van jelen. A kolloidális vas(III)-hidroxid felületén található OH-csoportok a pH függvényében protonálódnak vagy deprotonálódnak, s ily módon fémionok, anionok vagy komplex kationok reverzibilis megkötésére képesek, az utóbbi esetben vegyesligandum komplexek kialakulása közben (**28. ábra**).

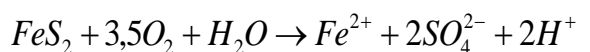
A $\text{Fe}(\text{OH})_3$ oldhatósága sokkal kisebb, mint a $\text{Fe}(\text{OH})_2$ -é. Ez a megállapítás más vasvegyületek, pl. a foszfátok esetében is érvényes, ily módon az anaerob (redukáló) körülmények a felszíni vizekben, az üledékekben és a talajokban a vasionok, illetve a Fe^{2+} , Fe^{3+} -ionokkal csapadékot képező anionok mobilizációjához vezetnek. Oxigénnel telített vizekben a Fe^{2+} -koncentráció igen csekély.

Természeti vizekben általában a Fe^{3+} -koncentráció sem túlságosan nagy. A következő reakcióból kiindulva:



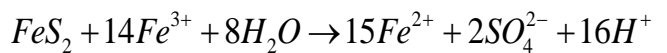
a Fe^{3+} -ionok koncentrációja a tengervízben (pH=8,1) maximálisan $3 \cdot 10^{-11} \text{ mol l}^{-1}$ lehet. Szerves ligandumokkal bekövetkező komplexképződés, továbbá a kolloidképződésre való erős hajlam miatt a valóságos koncentrációk azonban 10^{-6} - $10^{-8} \text{ mol l}^{-1}$ között változnak.

Vas(II)vegyületek a földkéreg redukáló tulajdonságú zónáiban fordulhatnak elő, ahol jelentős mennyiségű FeS_2 található. A pirit, illetve a fosszilis tüzelőanyagok pirittartalma levegővel és vízzel érintkezve lassan oxidálódik, és ennek során savas bányavizek keletkeznek:

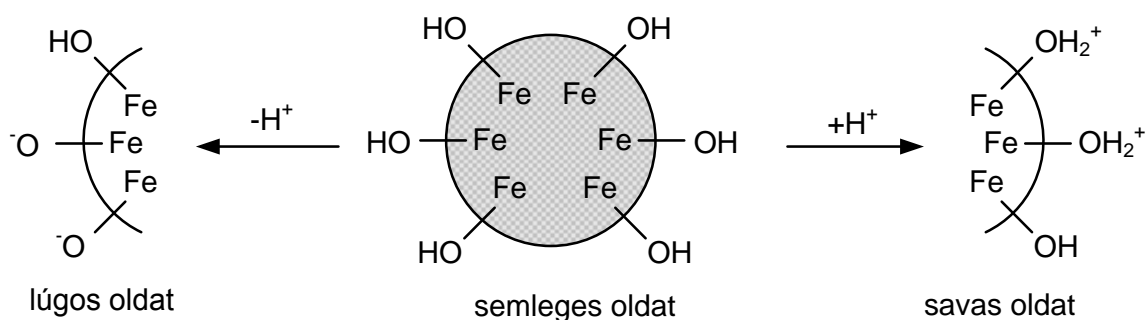


A szulfidkénből tehát kénsav keletkezik, a képződött Fe^{2+} -ionok pedig aerob körülmények között oxidálódnak. A pirit oxidációját baktériumok gyorsítják, mivel a reakció egyébként igen lassan megy végbe. Az oxidációs reakció végeredménye tehát vas(III)-hidroxid és savas

kémhatású bányavíz. Tekintettel arra, hogy a vas(II)→vas(III) oxidáció lassú, a folyamat a felszíni vizekben hosszú ideig tart. Amennyiben a képződött vas(III) a még oxidálatlan pirittel reagálhat, újabb reakció megy végbe:

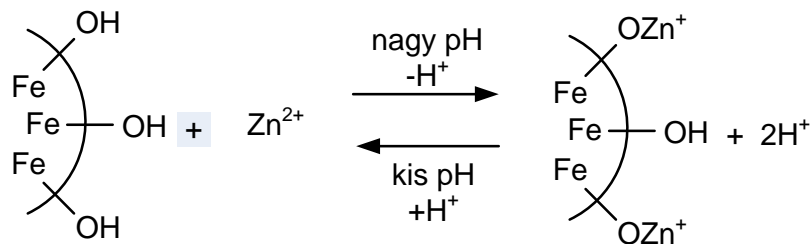


a)



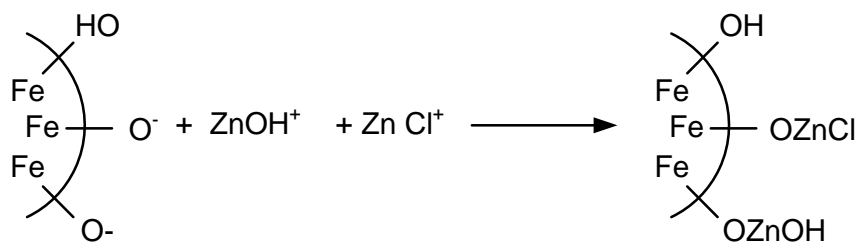
sav-bázis reakciók

b)



szabad ion megkötése felületi-komplexben

c)



vegyesligandum felületi-komplex képződése

28. ábra. A vas(III)-hidroxid adszorpciós sajátosságai

A vas a természeti vizekben gyakori komponens, ahol kolloidálisan oldott vas(III)vegyület vagy szerves ligandumokkal képzett komplex formájában van jelen. Nagyobb mennyiségben a

hatásuk. Mivel a fémek, illetve vegyületeik gyors és változatos átalakulásokat mutatnak, a természetben mindhárom halmazállapotban és igen nagy számú vegyület formájában megtalálhatók. Az átalakulással járó folyamatok jól mutatják a fémek (fémionok) elektrofil jellegét, és ennek megfelelően affinitásukat magános elektrópárral rendelkező donoratomokhoz (O, S, N).

A ciklusszabályozó fő folyamatok a következők:

párolgás (a vizes- és a gázfázis közötti anyagcsere);

adszorpció/csapadékképződés/oldódás (anyagcsere a vizes és a szilárd fázis között);

komplexxképződés (átalakulás a fém különböző oldott formái között).

A legtöbb fémre a gázhalmazállapotú anyagtranszport – a nagy hőmérsékletű környezet kivételével – nem jellemző. A higany és néhány más fém esetében viszont, a fém nagy tenziója vagy illékony metil-fémvegyületek képződése miatt, adott környezeti rendszerben a gázhalmazállapotú transzport meghatározó lehet. Aeroszokok képződése is hozzájárul ahhoz, hogy az illető fém a kibocsátás helyszínétől nagy távolságban is megtalálható.

Vizes oldatban vagy szuszpenzióban az anyagáramlás elsősorban a szárazföld→óceán irányú fémmozgást határozza meg, miként az óceáni üledékbe történő bekerülést is. Az oldott állapotú fémeket akvokomplexek, illetve szerves és szervetlen ligandumokkal képzett komplexek formájában találjuk meg. Az ércekből a fémek a hidroszférába mállásfolyamatok révén kerülhetnek be, ahol a fémionok jelentős részben szuszpendált szilárd részecskék felületén adszorbeálódva vesznek részt a transzportfolyamatban. Ilyen, nagy fajlagos felülettel rendelkező részecskék az Al, Fe, és Si oldhatatlan oxidjai, valamint a szilárd szerves anyagok köréből kerülhetnek ki.

A fém megoszlását vizes fázisban az oldat- és a szilárd fázis között – mint már láttuk – csapadékképződés és adszorpció, valamint az oldódás és oldható komplexek képződése közötti versengés határozza meg. Ezen reakciókra vonatkozó termodinamikai adatokkal rendelkezünk, ily módon félkvantitatív információk az „egyensúlyban” létező részecskefajták számára és milyenségére vonatkozóan megállapíthatók.

A fémek az élő rendszerekre – mint ismeretes – hatást gyakorolnak, másfelől környezeti viselkedésüket a biológiai tényezők befolyásolják. Az organizmusok, minthogy a talajra, a vízre, az üledékekre hatással vannak, jelentősen hozzájárulhatnak a fémvegyületek oldódásához vagy komplexek képződéséhez. Egyes organizmusok – működésük során – fémorganikus vegyületek képződését is lehetővé teszik. Megfordítva, a fémek segíthetik vagy akadályozhatják a biológiai aktivitást. Ebben a tekintetben a különböző kémiai formák

(részecskefajta) meghatározó szerepet játszanak. Számos esetben a hidratált fémionok vagy az egyszerű szervetlen ligandumokkal képzett komplexek szerepe mindkét irányban sokkal inkább meghatározó, mint a nagy térfogatú szerves ligandumokkal képzett komplexeké vagy az adszorbeált fémionoké.

A fémek környezeti rendszerekben mutatott viselkedésének és környezeti hatásának vizsgálata viszonylag új keletű, sokat ígérő kutatási terület.

2.4. Az emberi tevékenység hatása a biogeokémiai körfolyamatokra

A kémiai elemek biogeokémiai körfolyamatait, a természetes anyagáramokat az emberi tevékenység különböző mértékben befolyásolja. A környezeti problémák számos társadalmi összefüggésben megjelennek, s ezek kezelése, illetve megoldása elkerülhetetlenül megköveteli a biogeokémiai ciklusok megértését és integrált megközelítését. Az egyes elemek körfolyamatait kapcsán már utaltunk az emberi beavatkozás következményeire. Itt most ezeket a kérdéseket együttesen, összefüggéseikben vizsgálva mutatjuk be, hogy a ciklusok antropogén anyagáramok révén bekövetkező módosulásait nyomon követhessük.

2.4.1. A globális éghajlatváltozás

A földi éghajlat alakulása számos tényező – fizikai, kémiai, biológiai, geológiai – együttes hatásának következménye. Ezek közül néhányat az emberi aktivitás mára jól érzékelhetően megzavart. A tényezők egy részét kvantitatíve kezelni tudjuk, másokról eddig csupán kvalitatív képet alakítottunk ki, és bizonyára vannak olyanok is, amelyekről ma még nincs tudomásunk. Ezzel együtt a tényezők nagy száma és együttes hatása miatt az éghajlat alakulását meghatározó folyamatok csupán a determinisztikus rendszerek véletlenszerű viselkedését (káosz) leíró törvényszerűségek segítségével közelíthetők meg, ily módon matematikai leírásuk – a klasszikus determinisztikus rendszerekétől eltérően – rendkívül nehéz.

A környezeti elemeket tekintve az éghajlat alakulása szempontjából különösen az atmoszféra érdemel figyelmet, hiszen a Nap-Föld, illetve a Föld-csillagközi tér energiatranszport rajta keresztül játszódik le. Ily módon az atmoszféra fizikai állapota és kémiai összetétele a beeső sugárzó, másfelől a távozó hőenergia tekintetében az energiafluxust (áthaladás, reflexió, abszorpció) alapvetően meghatározza. A kétirányú energiaáramlás mértéke pedig döntő a földfelszín hőmérséklete szempontjából. Mivel a kén biogeokémiai körforgása az atmoszféra

aeroszoltartalmának kialakulásában és a felhőképződésben meghatározó szerepet játszik, továbbá a szén- és a nitrogénciklus, amelyekben az energiaabszorpció szempontjából fontos nyomgázok vesznek részt, központi helyet foglalnak el az atmoszféra tulajdonságainak alakításában, antropogén megzavarásuk nyilvánvalóan magában rejti az éghajlat módosulásának lehetőségét. Ennek alapján egyértelmű, hogy a kémiai ciklusok az éghajlatot két folyamat révén érintik: (1) melegházhatás; (2) aeroszolképződés.

Az infravörös tartományba eső sugárzást abszorbeálni képes molekulák természeti (H_2O , CO_2 , CH_4 , nitrogén-oxidok, stb.) és antropogén (CO_2 , nitrogén-oxidok, fluor-klór-szénhidrogének, stb.) forrásból egyaránt származhatnak. A természeti forrásból származók előidézte melegházhatás tette lehetővé a földfelszín jelenlegi, az élet létrejöttét és fenntartását megengedő hőmérsékletének kialakulását. Enélkül a földfelszín közeli atmoszféra átlaghőmérséklete kerekén 30K-nel kisebb értéket mutatna. (Ez $-15^\circ C$ átlaghőmérsékletet jelentene.)

A felsorolt gázok a víz, a karbónium és a nitrogén körforgását befolyásolják, s energiaabszorpció révén hatást gyakorolnak a globális hőmérsékletre. A másik klímabefolyásoló tényező az aeroszolképződés, amelyet meghatározó mértékben a kén-ciklus szabályoz. A kén-dioxid atmoszferikus oxidációja révén vízgőz jelenlétében kénsav keletkezik, amelynek az atmoszféra ammónia-tartalmával történő reakciója ammónium-szulfát aeroszol részecskéket eredményez. Ezek a beeső sugárzó energiát reflektálni képesek, másfelől kondenzációs gócként szerepelhetnek, és felhőképződés révén az albedót (a Nap sugárzó energiájának közvetlenül reflektált hányada) megnövelik. Az elmondottak szerint tehát az atmoszféra-sugárzó energia kölcsönhatást a kén-ciklus rövid távon, míg a víz, a karbónium és a nitrogén körforgása hosszú távon befolyásolja.

Azonban fontos szem előtt tartani azt a tényt, hogy a vázolt ciklusok egymásra is hatást gyakorolnak. A fosszilis tüzelőanyagok elégetése pl. egyszerre befolyásolja a szén-, illetve a kén-ciklust, a denitrifikáció, azaz a N_2O képződése összekapcsolódik a CO_2 -képződéssel a légzés-, illetve bomlásfolyamatok során, és a példák felsorolását még folytathatnánk.

A melegházhatást kifejtő komponensek infravörös abszorpciós spektrumából jól látható, hogy a **vízpára** a meghatározó „melegház-gáz”. Bár az atmoszféra víz-gőztartalmára globális szinten az emberi aktivitás hatása meglehetősen csekély, azt – közvetett úton – az emberi tevékenység által más módon indukált klímaváltozás mégis befolyásolja. Az emberi beavatkozás lokális vagy regionális szinten (erdőirtás, mocsárlecsapolás) sokkal jelentősebb lehet. Az atmoszféra vízgőztartalma térben és időben szélsőséges változásokat mutathat, azonban az átlagos globális relatív nedvességtartalom (humiditás) jó közelítéssel 1% körüli érték.

A víz hatása kettős. A növekvő globális melegedés révén megnövekedik az atmoszféra vízgőztartalma, ami pozitív visszacsatolást jelent, másfelől a troposzférában bekövetkező felhőképződés révén mind az energiareflexió, mind az energia abszorpció megnövekedik, tehát a földfelszín kevesebb napenergiához jut, ami negatív visszacsatolást eredményez.

Végül tekintettel kell lennünk arra, hogy – elvileg – minden olyan atmoszféra komponens melegház-gázként veendő figyelembe, amely a kérdéses infravörös tartományban elnyelést mutat. A klímaváltozás szempontjából azonban csak azok szerepe meghatározó, amelyek – koncentrációjuk és elnyelésük határfokát tekintve – észrevehető változásokat idéznek elő.

A **szén-dioxid** a víz után az infravörös sugárzás abszorpcióját tekintve a második helyet foglalja el. Koncentrációja az atmoszférában az ipari forradalom kezdeteitől (270 ± 10 ppm) állandóan növekedik, nagysága kerekén 380 ppm. Növekedése tehát az elmúlt 150 évben több mint 30%-os. A koncentráció a fotoszintézis mértékének megfelelően szezonális ingadozást mutat. A hosszú távú tendencia azonban egyértelműen növekedést jelez; az emberi tevékenység – égésfolyamatok, erdőirtás – növekedésére gyakorolt hatása kétségbevonhatatlanul bizonyítható. A mezőgazdasági földhasznosítás miatti erdőirtás befolyását nehéz számszerűsíteni, mivel nem csupán az erdőégetés eredményez szén-dioxidot, hanem a talaj szerves anyagainak ezt követő fokozott lebomlása is.

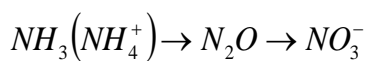
A klimadestabilizációt tekintve súlyponti kérdés, hogy az antropogén CO₂-emisszió nagyságrendileg megközelíti a természeti forrásokból származó nettó mennyiségeket, így módon az emberi tevékenység az atmoszferikus szén-dioxid mérlegre rendkívüli hatást gyakorol. Nagy bizonytalanság forrása az is, hogy ma még kevésbé ismerjük a biológiai rendszerek válaszát a növekvő hőmérsékleti értékekre valamint a CO₂ koncentrációjának növekedésére.

A vízgőz és a szén-dioxid után a globális klímaváltozást tekintve a legnagyobb hatást a **metán** gyakorolja. Infravörös abszorpciójának mértéke hússzorosa a szén-dioxidénak. A metán globális koncentrációja az atmoszférában 1,7-1,8 ppm, és ez az érték éves átlagban mintegy 1,5 %-kal növekedik. A metán a természetben szerves anyagok anaerob bomlása során keletkezik. A fő forrást a mocsaras területek és a tőzegtelepek jelentik, mivel ezek hatalmas mennyiségű szerves anyagot tartalmaznak. A lebomlás soklépcsős, összetett folyamat. A metán melléktermékként antropogén folyamatokban is keletkezik. Az ásványolaj szállítása és feldolgozása, továbbá szennyvizek és hulladékok szerves anyagainak anaerob átalakulása során metán jut az atmoszférába. Ez azonban viszonylag kisebb mennyiséget jelent, összevetve a kérődző állatok gyomrában vagy a rizsföldek iszapjában keletkező metán tömegével.

Jelenlegi ismereteink nem adnak kielégítő választ arra a kérdésre, hogy mi az oka a metán atmoszférikus koncentrációja gyors növekedésének. A klímaváltozást mai ismereteink szerint elsősorban a metán természeti forrásai befolyásolják, s hatásuk pozitív visszacsatolásban nyilvánul meg. Az északi félteke mocsaras területei nagyobb hőmérsékleten több metánt bocsátanak az atmoszférába, ami viszont ismét csak a hőmérséklet növekedéséhez vezet. A természeti környezetben a metán jelentős rezervoárját jelenítik meg az ún. metán-hidrátok (klatrátok), amelyek a kristályos jégéhez hasonló szerkezetű víz-metán rendszerek. Ezek az egész évben fagypon alatti területeken (tundra) és bizonyos tengeri üledékek alatt foglalnak helyet, amelyekből növekvő földi átlaghőmérséklet következtében metán válik szabaddá.

A **dinitrogén-oxid** – az előző gázokhoz hasonlóan – természeti és antropogén forrásból egyaránt származhat. A legnagyobb forrás a nitrogén biogeokémiai körforgásához kapcsolódó természeti forrás, de N_2O égésfolyamatok során is keletkezhet. A dinitrogén-oxid a troposzférában stabilis molekula, de a sztratoszférában fotokémiai átalakulás során ózonfogyasztó nitrogén-monoxiddá (NO) alakul át. A dinitrogén-monoxid abszorpciójának mértéke az infravörös tartományban kétszázszorosa a szén-dioxidénak, és atmoszférikus koncentrációja növekvő értéket mutat.

A szárazföldi és a vízi ökológiai rendszerekből származó N_2O döntő többsége nitrifikációs, illetve denitrifikációs folyamatok eredménye. A nitrifikáció – mint arról már szó esett – az ammónia oxigén jelenlétében kemoautotróf baktériumok révén nitráttá történő oxidációját jelenti, N_2O köztiterméken keresztül:



A baktériumok az ammónia oxidációja során felszabaduló energiát felhasználják arra, hogy a szén-dioxidot szerves anyaggá redukálják (kemoszintézis), amint azt a zöldsővények a napenergia segítségével teszik (fotoszintézis). A folyamat során, amely a nitrogénciklus és a szőnciklus kapcsolódását jelenti, az ammónia, illetve ammóniumion dinitrogén-oxiddá átalakuló mennyisége rendszerint 1% alatt marad, s a konverziót a pH és az oxigén koncentráció erősen befolyásolja. Az átalakulás mértéke kis, de nem nulla oxigén koncentráció esetén ($<0,01$ atm) maximális. A természeti környezetben képződő N_2O mennyiséget az emberi tevékenység a nitrogénműtrágyák használata révén befolyásolja. Bizonyos feltételezések szerint az atmoszféra N_2O tartalmának növekedése ezen utóbbi számlájára írható. Azonban meg kell jegyeznünk, hogy a dinitrogén-oxid képződése ezen az úton igen kiterjedt és nem összefüggő

területen, továbbá időben változó módon játszódik le, tehát a műtrágyázás során szabaddá váló N_2O mennyiségének meghatározása rendkívül bizonytalan.

A denitrifikáció lényege, hogy bizonyos organizmusok oxidálószerként nitrátot használnak fel a szerves anyagok lebontásához. A N_2O ezen folyamatokban köztiterméként keletkezik. Képződését a kis pH-érték, alacsony hőmérséklet és a nagy nitrátkoncentráció elősegíti. Ezek a tényezők viszont nem kedvezőek a denitrifikáció befejező lépésére, a molekuláris nitrogén (N_2) keletkezése szempontjából. A mezőgazdasági gyakorlat a denitrifikáció mértékét is jelentősen befolyásolhatja.

A sztratoszférába jutó **klór-fluor-szénhidrogének** ózontartással kapcsolatos szerepét a későbbiekben külön tárgyaljuk. Itt most azt mutatjuk be, hogy ezek a vegyületek, amelyeknek infravörös elnyelése abba a tartományba esik, ahol az eddig bemutatott gázok abszorpciót nem mutatnak, milyen szerepet játszanak a globális éghajlatváltozás előidézésében. Hatásuk tisztázása különösen azért fontos, mivel tartózkodási idejük az atmoszférában feltűnően hosszú, 20-380 év. Hangsúlyoznunk kell még azt is, hogy a többi melegház-gáztól eltérően a CH_3Cl kivételével (bizonyos tengeri organizmusok állítják elő) természetes forrásuk nem létezik. Kettő közülük – CCl_3F , CCl_2F_2 – széles körben használatos hűtőközegként és habképző anyagként, továbbá permetekben (spray) hajtógázként. Feltételezzük, hogy csupán ez a két gáz a későbbi hetvenes évektől kezdődő évtizedben a szén-dioxidénak harmadával járult hozzá a globális felmelegedéshez.

A probléma igazi súlyát az jelenti, hogy hozzájuk hasonlóan alkalmazható, olcsó és sok szempontból biztonságos vegyület az említett célokra nehezen található. Helyettesítésükre olyan klór-fluor-szénhidrogénekkel próbálkoznak, amelyek hidrogénatomot is tartalmaznak (HCFC), s ennek következtében oxidatív lebomlásuk a troposzférában lejátszódik. Azonban mivel bizonyos mértékig ezek is melegház-gázok, másfelől a sztratoszféra ózontartalmának elbomlásához szintén hozzájárulnak, hosszú távon nem adhatnak megoldást. Mindezeket felül az egészségre is ártalmasak.

Másik potenciális helyettesítőként a flour-szénhidrogének (HFC) vehetők számításba, amelyek – mivel klórt nem tartalmaznak – nem járulnak hozzá az ózon elbomlásához. Azonban stabilitásuk miatt évtizedeken át jelen lehetnek az atmoszférában. Bár ezen utóbbiak infravörös abszorpciója nagyságrendekkel kisebb, mint a flour-klór-szénhidrogéneké, hozzájárulásuk a globális felmelegedéshez nem elhanyagolható.

Bár a flour-klór-szénhidrogének használatát nemzetközi egyezmény szabályozza, az ezekkel működő hűtőgépek és légkondicionálók üzemképtelenné válása további környezeti kockázatot jelent.

A globális felmelegedéssel kapcsolatos klímastabilizáció megértéséhez a jelenségek két szinten történő vizsgálatára és értelmezésére van szükség. A mikrofizikai (molekuláris) szintű közelítés kapcsán a kérdés arra irányul, hogy a CO₂-molekula, illetve a többi melegház-gáz az atmoszférában képes-e a földfelszínről a csillagközi tér felé irányuló hőenergia-áramlást energiaabszorpció révén akadályozni, késleltetni. Erre a kérdésre az illető gázok infravörös abszorpciós spektrumának vizsgálata egyértelmű választ ad, hiszen elnyelést mutatnak abban a hullámhossz-tartományban amelyben az energia áramlás történik. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy az energiaabszorpció révén az atmoszféra energiatartalma megnövekedik és pedig annál jobban, minél nagyobb ezeknek a gázoknak a mennyisége az atmoszférában. Ez a megnövekedett energiatartalom azután – és itt térünk át a makrofizikai szintű értelmezésre és közelítésre – **véletlenszerűen** befolyásolja az időjárási rendszereket. A makrofizikai értelmezés ellentmondásai és bizonytalanságai pedig abból származnak, hogy az ún. determinisztikus rendszerek véletlenszerű viselkedésének (káosz) kvantitatív megragadása igen nehéz, bizonyos értelemben elvileg meg sem oldható (lásd a meteorológiai előrejelzések időben egyre növekvő bizonytalansága), ily módon egyedi hőmérsékleti adatok korábban mért értékekkel való összevetése nem ad kielégítő választ, ha ezenközben bizonyos folyamatokat és tendenciákat figyelmen kívül hagyunk.

A mikrofizikai közelítés annyit biztos állíthat, hogy – az elmondottakat tekintve – nem megnyugtató (hosszútávon komoly veszélyeket rejtő), ha a melegház-gázok koncentrációja az atmoszférában antropogén forrásokból állandóan növekedő tendenciát mutat.

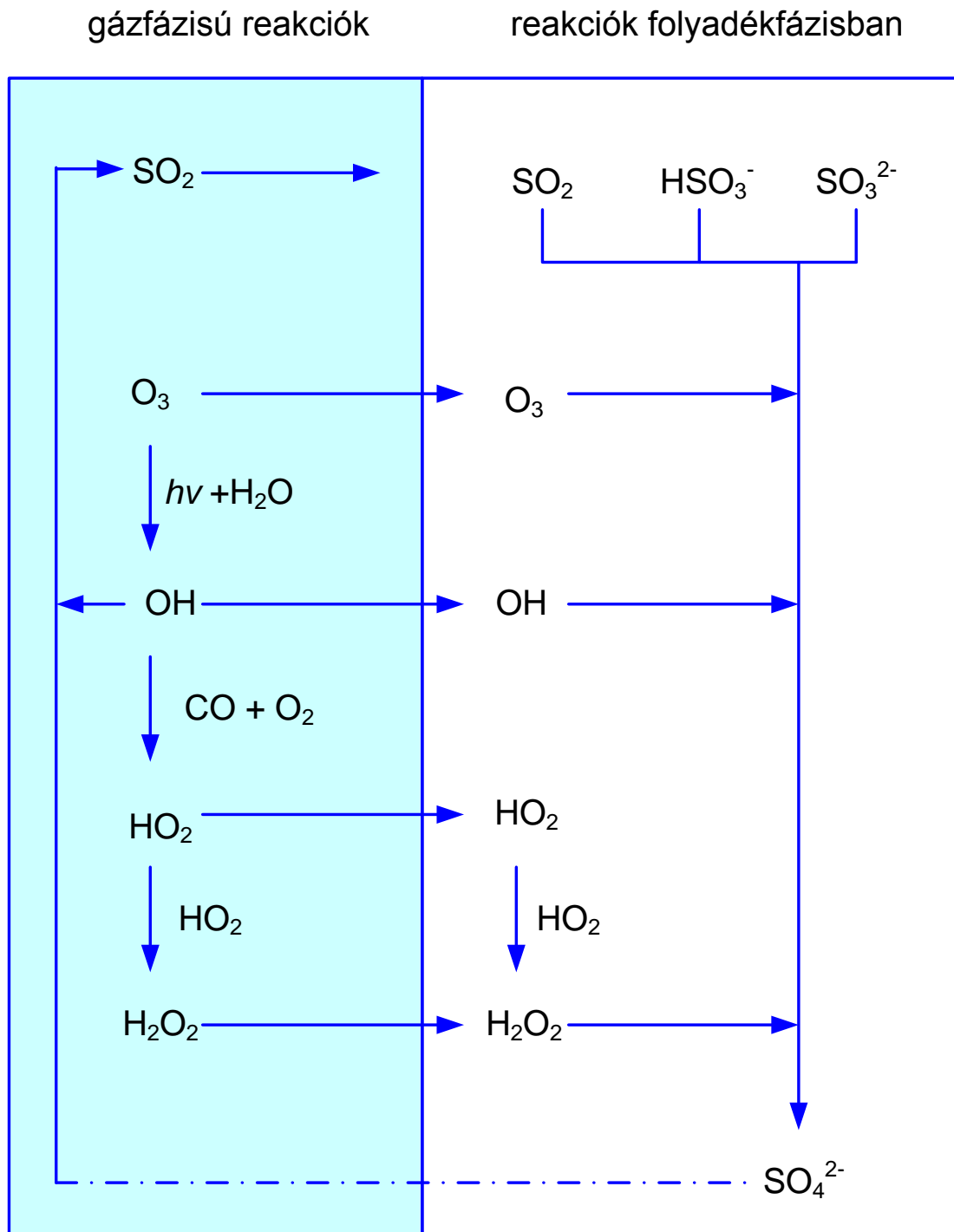
2.4.2. Savas ülepedés

A fosszilis tüzelőanyagok elégetése és ennek kapcsán az atmoszferikus nitrogén oxidációja az égéstérben a szén, a nitrogén és a kén atmoszféra-ciklusát jelentősen befolyásolja. Függetlenül attól, hogy az atmoszféra szén-dioxid koncentrációjának változása a csapadékvíz összetételére elhanyagolható hatást gyakorol, a kén- és a nitrogén oxosavai az esővíz és a hó összetételét jelentősen módosíthatják. Ezen túlmenően számos fontos elem, pl. az alumínium környezeti viselkedésére is hatással vannak, elsősorban a kőzetek és ásványok mállásfolyamatai kapcsán. Savas ülepedésnek azt a folyamatot nevezzük, amelynek során savas jellemű anyagok jutnak az atmoszférából a földfelszínre (talaj, felszíni vizek). Az ún. savas eső kis pH-jú esővizet jelent

amelyet a 20. század nyolcvanas éveiben bizonyos régiókban (az egyesült Államok északkeleti területei, Dél-Skandinávia) észleltek először, és az édesvizekre, a halászatra, az erdőgazdálkodásra, a szerkezeti anyagokra, a mezőgazdasági termelésre és az emberi egészségre gyakorolt káros hatását kimutatták. Közép-Európában részben a savas ülepedés rovására írják az elmúlt két évtizedben kialakult komoly erdőkárokat. A savasodás foka és a felszíni vizek kémiájában ezáltal kialakult változások mértéke közötti kvantitatív összefüggés kérdése napjainkban is tudományos viták tárgyát képezi. Mivel a savas ülepedést előidéző antropogén emisszió csökkentése komoly forrásokat igényel, a vitában gazdasági, sőt politikai szempontok is szerephez jutnak, és ennek következtében a vélemények erős polarizációja figyelhető meg. Nem célunk, hogy ebben a vitában állást foglaljunk, sokkal inkább azokat a transzportfolyamatokat és kémiai átalakulásokat kívánjuk áttekinteni, amelyek a jelenség kialakulásához vezettek.

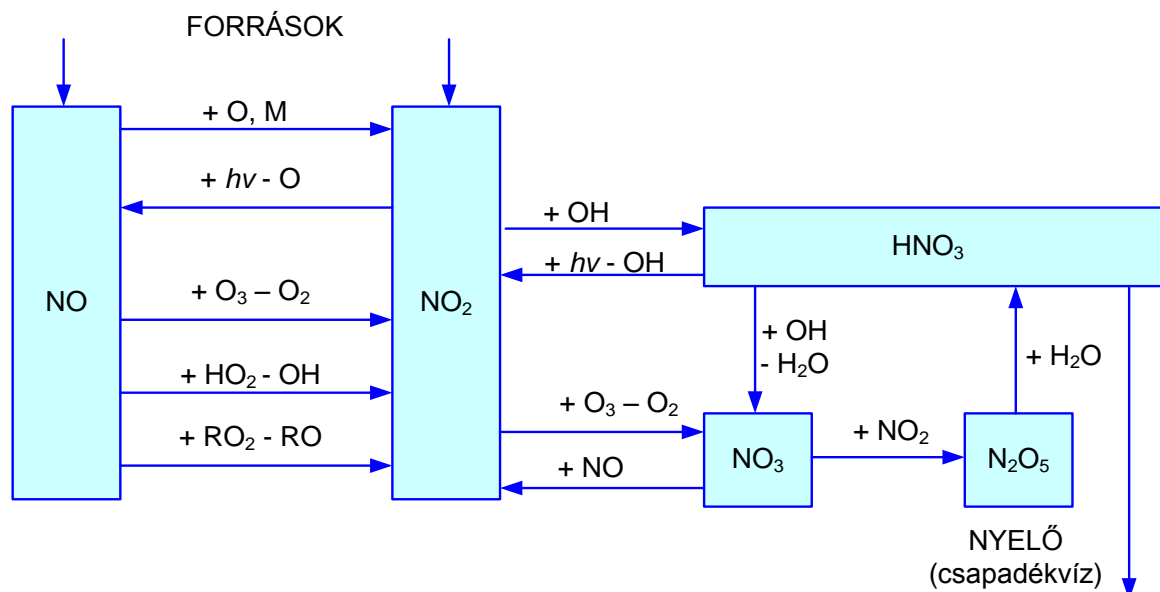
Az atmoszférából a földfelszínre irányuló savas ülepedéshez elsősorban a kénsav és a salétromsav járul hozzá, bár a környezeti mintákban sósav és számos szerves sav is előfordul. A savak többsége ún. prekursorformában, tehát SO_x -, illetve NO_x -ként jut az atmoszférába, ahol azután oxidáció és vízzel történő reakció során a megfelelő sav képződik. A kénoxidok antropogén forrása a fosszilis tüzelőanyagok (ásványi szén, fűtőolaj, üzemanyagok) elégetése. Ennek során a tüzelőanyag kénszennyezései kénoxidokká (SO_2 , SO_3) alakulnak át. A nitrogénoxidok kétféle forrásból származnak: (1) a tüzelőanyagok nitrogén tartalma; (2) az égéstér magas hőmérsékletén a levegőben lévő molekuláris nitrogén átalakulása (erőművek, belsőégésű motorok, lakossági fűtés). A kétféle oxid azon túlmenően, hogy savas ülepedés kiváltói, mérgező, illetve irritáló hatású szennyező anyag is.

A kénszennyeződést tartalmazó tüzelőanyagok égése során elsősorban SO_2 keletkezik, bár az is valószínű, hogy a tüzelőszerkezetekben csekély mennyiségben SO_3 , illetve H_2SO_4 képződik. Az atmoszférában jelenlévő oxidálószerkezetek – elsősorban OH-gyökök – a kén-dioxidot kén-trioxidá alakítják át, s az utóbbi vízzel kénsavat ad (**29. ábra**). A kénsav azután a csapadékvízbe kerülve távozik az atmoszférából. (RAINOUT → a sav a felhőzónában oldódik be a vízcseppbe; WASHOUT → a sav a felhőzóna alatt a földfelszín felé mozgó esőcseppekben oldódik.) A tapasztalatok szerint az oxidáció főként a vízcseppben lejátszódó folyamat. Az esőcsepp kénsav-koncentrációja olykor meglepően nagy lehet. Savas köd völgyekben és hegyoldalokban egyaránt képződhet, s pH-ja 3 vagy ennél kisebb is lehet. Ilyen magasban képződő savas ködöknek tulajdonítják, hogy az erdőkárok nagyobb magasságokban kifejezettebbek, minthogy a faállomány hosszabb ideig állhat a felhőkben.



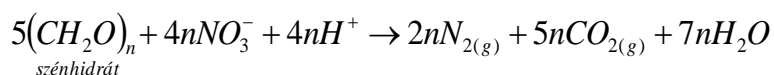
29. ábra. Kénsav képződése az atmoszférában

Az atmoszférikus salétromsav nitrogén-oxidok – N_2O , NO , NO_2 – oxidációjával jön létre, a kénsav keletkezéséhez hasonlóan. Az oxidáció ebben az esetben homogén fázisú (30. ábra).



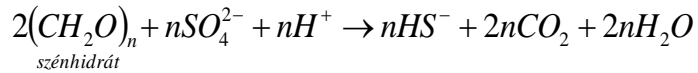
30. ábra. Az atmoszferikus salétromsav képződése; Források: közlekedés, biomassza-égetés, villámlás, stb.

Az erdők és a felszíni vizek savas terhelésének megállapítása nehéz, hiszen a savak, illetve prekursoraik kiülepedése a nehezen kvantifikálható ún. „száraz ülepedéssel” is megtörténhet. A nedves ülepedés együttes aránya kereken 50%. A salétromsav száraz ülepedése magában foglalja az ammónium-nitrát aeroszol kiülepedését is. Hasonlóan, a kénsav esetében jelentős hányadot ad a szulfát-aeroszol. A salétromsav száraz ülepedése mértékének meghatározása azért nehéz, mivel adott ökológiai rendszerben számos más nitrogénforrás is létezhet, másfelől a nitrogéntartalmú részecskefajták egymásba való átalakulása több úton lehetséges. A salétromsav száraz ülepedésének arányát pl. módosíthatja, hogy a nitrát élő szervezetekbe beépülhet, másfelől denitrifikáció révén – főként N₂, kis mennyiségben N₂O formájában – az atmoszférába visszakerülhet:



A savas jellemű vegyületek viselkedése és átalakulása a természeti környezetben két alapvető kérdést fogalmaz meg: (1) mi történik az atmoszférából kiülepedett savas kémhatású anyagokkal; (2) az ülepedés milyen mértékben változtatja meg a felszíni vizek, illetve a talajok pH-ját? A válasz – a rendelkezésre álló mérési adatok szerint – összetett, annak megfelelően, hogy régióról-régióra, vízgyűjtőről-vízgyűjtőre haladva a viszonyok eltérőek. Bizonyos

esetekben pl. a szulfát a talaj vas(III)-oxid-hidroxid szemcséin kémiaiilag megkötődik, más területeken viszont jelentékeny adszorpció nélkül tovamozog a talajban. A szulfát-adszorpció a jelenség szempontjából kiemelkedően fontos szerepet játszik, minthogy a nagy adszorpciós kapacitású talajon átáramló vízben a pH jelentős csökkenése nem mutatható ki, míg fölös szulfát megjelenése a talajvízben a pH csökkenésével jár együtt. A szulfát a talajvízből bakteriális redukció útján, szerves anyag oxidációjához kapcsolódva is eltávozhat:



Azonban figyelemmel kell lennünk arra, hogy pl. az anoxikus üledék kiszáradása nyomán a levegő oxigénje révén a keletkezett szulfid ismét szulfáttá oxidálódhat.

A salétromsav és a nitrátion viselkedése az ökológiai rendszerekben még összetettebb. A nitrát – mint ismeretes – gyakran limitáló növényi tápanyag, és maga a sav is jelentős környezeti szerepet játszik. Azokban az ökológiai rendszerekben, ahol a nitrát beépül a növényekbe, nem idézi elő a pH csökkenését az illető rendszerben vagy a hozzá kapcsolódó felszíni vizekben. Ha a talajban vagy a felszíni vizekben jelentős nitráttartalom mutatható ki, akkor ez savas ülepedésre utalhat. A nitrát természetesen ezekben az esetekben nitrifikációs folyamatok eredménye is lehet. Az is bekövetkezhet, hogy a bejutó HNO_3 megváltoztatja a belső nitrogénciklust és ez indirekt módon vezet a nitráttartalom megnövekedéséhez a szóban forgó ökológiai rendszerben. (Van tapasztalat arra nézve is, hogy a savas ülepedés vízi környezetben eutrofizációt okozott.)

A savas talajvíz átszivárgása különböző talajrétegeken olyan változásokat idézhet elő, amelyek a káros hatást csökkenthetik. A pH csökkenése pl. gyorsítja a mállásfolyamatokat, ily módon a sav a talaj bázikus kőzeteivel reagálva átalakul. Karbonátos kőzetekkel reagálva ezen az úton szén-dioxid válhat szabaddá, ami az atmoszférába kerülve hozzájárulhat az atmoszférikus CO_2 -mennyiség növekedéséhez. A folyamat kvantitatív leírása meglehetősen nehéz, hiszen a talajokban lejátszódó mállásfolyamatokról meglehetősen keveset tudunk.

A savas ülepedés a fémes szerkezeti anyagokat és az ásványi építőanyagokat (homokkő) korrodeálja, ennek következtében az antik kulturális értékeket, különösen a mögöttünk hagyott évszázadban, fokozódó károsodás érte. A savas ülepedést kapcsolatba hozzák az elmúlt évtizedekben fellépő, nagy kiterjedésű erdőpusztulással is. Ezt a feltételezést alátámasztani látszik az a tény, hogy a túlevelű fák növekedése a kén-dioxid koncentráció növekedésével fordítottan arányos. Újabb megfontolások szerint valószínű, hogy az erdőpusztulás különböző

okok együttes, komplex hatásának a következménye, amelyek egymást kölcsönösen erősítik.

Az okok a következők lehetnek:

ózon és más fotooxidánsok koncentrációjának növekedése fotokémiai füstköd és nitrogén-oxidok képződése következtében;

Al^{3+} - és Mn^{2+} -ionok toxikus hatása a fák hajszálgökeire, amelyek a talaj immisziótól függő savanyodása révén oldatba jutnak;

esszenciális tápanyagok (Mg^{2+}) hiánya;

vírusok vagy sejtfal nélküli baktériumok (mikoplazmák) támadása;

a monokultúrák növekvő védtelensége a kórokozókkal szemben;

egymást követő szokatlan klímaterhelés (fagy, szárazság);

a teljes füst- és poremisszió.

A jelenlegi ismereteink szerint nagyon valószínű, hogy a felsorolt tényezők primer hatásának következményeként a faállomány kártevőkkel és klímahatásokkal szembeni általános rezisztenciája csökken. Az erdőpusztulás okainak felderítésére ez látszik a leghasználhatóbb munkahipotézisnek.

2.4.3. Ózonnépződés és -bomlás a sztratoszférában

Az ózon az atmoszféra egyik alapvető komponense. A Nap sugárzásának jelentős hányadát abszorbeálja, s a magasabb atmoszféra-tartományokban az energiatárolás révén döntő mértékben hozzájárul az időjárás alakulásához. Ezenkívül az ózon képződése és bomlása az oxigénciklus egyik fontos lépése.

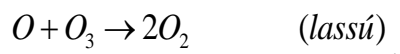
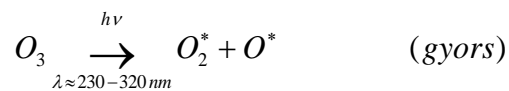
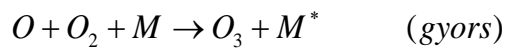
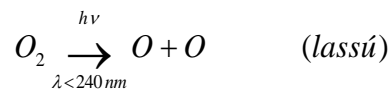
Az ózon UV-tartományban mutatott abszorpciója pedig a földi élet megóvását tekintve meghatározó. Biológiai szempontból az UV-spektrumrészt három tartományra osztjuk fel:

UV-A→315-400 nm; a látható tartománnyal határos sáv, a teljes napenergia mintegy 7%-a. Ez a tartomány az organizmusok számára nem különösebben káros.

UV-B→280-315 nm; a teljes fluxus 1,5%-át teszi ki. Ez a tartomány a növények és az állatok számára egyaránt veszélyes, különösen hosszabb ideig tartó behatás esetén (csak részben jut el a földfelszínre).

UV-C→ <280 nm; a teljes sugárzó energia 0,5%-a. Minden organizmus számára gyors károsodást okoz (ez a tartomány az atmoszféra magasabb régióiban elnyelődik).

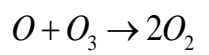
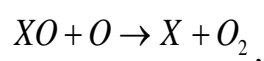
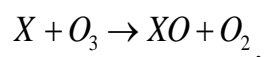
Az ózon molekuláris oxigénből történő képződését, illetve az ózonomolekula bomlását az atmoszférában elsőként CHAPMAN írta le, és a teljes folyamatot négy, különböző sebességű elemi reakciólépéssel jellemezte. A folyamatot a napenergia iniciálja:



ahol M az a reakciópartner – a sztratoszférában rendszerint N_2 vagy O_2 – amelyik az ózonomolekula képződése során felszabaduló energiát abszorbeálja. A sztratoszféra felső rétegében a nagy energiájú ultraibolya fotonok jelenléte miatt a molekuláris oxigén élettartalma rövid (50 km-es magasságban kb. 1 óra), ily módon az atomos oxigén/molekuláris oxigén arány nagy, ezért az ózonképződés korlátozott (hiányzik a molekuláris oxigén mint reakciópartner). A sztratoszféra alsó rétegében viszont csökken az energiadús fotonok száma, ezért a molekuláris oxigén disszociációjának valószínűsége is kisebb. Mintegy 20 km-es magasságban a molekuláris oxigén élettartalma kerekén 5 év. Ezért a maximális ózonkoncentráció a közepes magasságú atmoszféra-rétegben (mintegy 25-30 km) alakul ki, és értéke évszakok és földrajzi szélességek szerint változik.

Noha a felvázolt reakciólépések helyesen adják vissza az ózonképződés mechanizmusát, az ily módon kiszámított érték majdnem kétszerese a mért koncentrációnak. Ez azt jelzi, hogy a ciklusban más ózontartó folyamatok is lejátszódnak a már felvázoltak mellett.

Az ózon elbontásához hozzájáruló részecskefajták részben természeti, részben antropogén forrásból származnak. Ezen átalakulási folyamat általános sémája a következő:

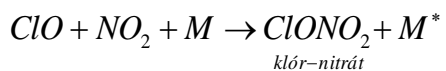
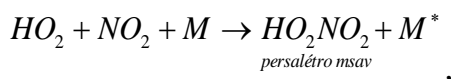
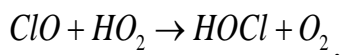


ahol X valamilyen katalizátorként működő részecskefajta. Három lehetséges csoportot jelöl: (1) HO_x (H, HO, HO₂); (2) NO_x (NO, NO₂); (3) ClO_x (Cl, ClO). A bontást előidéző részecskefajta, mint az képletükből jól látható –, valamennyien reakcióképes gyökök. A magasság és az ózonkoncentráció függvényében valamennyi képes az ózon elbontására. Rendszerint a troposzférában lévő, kevésbé reakcióképes, természetes vagy antropogén forrásból származó molekulák (N₂O, H₂O, CH_n, H₂, CO, CH₃Cl) és gerjesztett oxigénatomok (¹D) reakciójában keletkeznek. Ezek a molekulák a sztratoszférába diffundálva a gerjesztett oxigénatommal gyökátvitel közben reagálnak.

A sztratoszférában az ózon legnagyobb mennyiségben az egyenlítői területek fölött képződik, ahol a napsugár intenzitása a legnagyobb. Azonban a globális koncentrációelosztás – az atmoszféra transzport folyamatainak következtében – változatos képet mutat. Az ózon – valójában – nem képez valamiféle réteget, hanem a sztratoszféra széles tartományában jellegzetes koncentráció-eloszlást mutat.

A sztratoszféra ózontartalmának csökkenésére utaló első jeleket közel három évtizeddel ezelőtt tapasztalták, és azt a következtetést vonták le, hogy a folyamatban az antropogén freonkibocsátás (CF₂Cl₂, CFCl₃) meghatározó szerepet játszik.

Az utóbbi időben több olyan részecskefajta azonosítottak, amelyek a sztratoszférában a klórgyök illetve a nitrogén-oxidok rezervoárjaként szerepelnek:



Ezek a vegyületek a reakcióképes részecskefajta tárolására szolgálnak, amíg fotokémiai disszociációjuk révén az aktív részecskefajta újra nem képződnek, illetve amíg a rezervoár-vegyületek nem jutnak be a troposzférába.

2.4.4. Fotokémiai füstköd

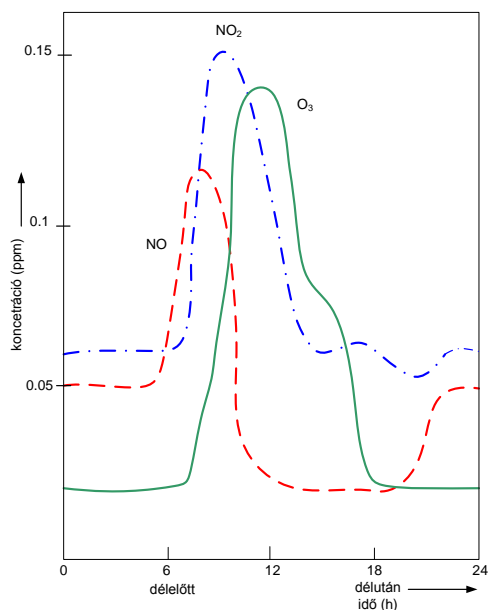
A szén biogeokémiai körforgásába történő antropogén beavatkozás azon túlmenően, hogy a fosszilis tüzelőanyagok elégetése révén megnöveli az atmoszféra szén-dioxid tartalmát, a

belsőégésű motorok használata révén a levegőbe jutó részben elégett vagy el nem égett szénhidrogének miatt egy másik sajátos – lokális – környezeti gondot is előidéz.

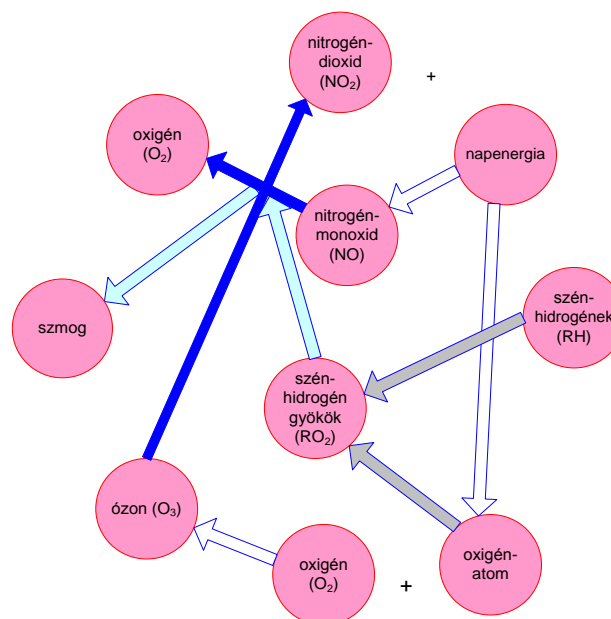
A füstköd (szmog) a nagyvárosok és az ipari területek fölött hőmérsékleti inverzió kapcsán létrejövő, füstből, porból és kémiai aktív komponensekből álló szennyeződés. Az atmoszféra földközeli régióiban található savas kémhatású anyagok meghatározó komponensei a füstköd kialakulásának. Az uralkodó mechanizmus szerint kétféle füstködöt különböztetünk meg. Az ún. redukáló füstköd (London-típusú füstköd) alacsony hőmérsékleten, por- és koromszemcsékkel szennyezett tengeri levegőben megfigyelhető jelenség, amely viszonylag magas kén-dioxid koncentrációt és kénsav-aeroszlok kialakulását feltételezi. Maró hatású, a sejtmembránok nagyobb permeabilitását okozza, és gátolja a fotoszintézist.

Az oxidáló füstköd (Los Angeles-típusú füstköd) lényegét tekintve fotokémiai körfolyamatok eredménye, amelyet mozdulatlan levegőrétegekben figyelhetünk meg. A domináló reakciópartnerek a következők: ózon, nitrogén-oxidok és szénhidrogének. Ezek a füstköd kialakulása során megnövekedett koncentrációban vannak jelen (pl. forgalmas utak mentén, erős UV-sugárzás esetében). A fotokémiai füstköd jellegzetessége, hogy benne az egyes oxidálóanyagok koncentrációjának maximuma időben eltolva jelentkezik. Az ózon és nitrogén-oxidok mellett a szemet irritáló peroxi-acetil-nitrát (PAN), peroxi-benzoil-nitrát (PBN), salétromsav, dialkil-peroxidok, alkil-hidro-peroxidok és hidrogén-peroxid szintén komponensei a fotokémiai füstködnek. Ha a PAN koncentrációja nagyobb mint 0,02 ppm, órákon belül károsítja a vegetációt, mivel a fiziológiailag fontos merkaptofunkciót (-SH) oxidálja, illetve acilezi. A koncentráció-profilok napi változása gyakran a **31. ábra** bemutatott módon megy végbe. A füstködben lévő ózont az éjszaka folyamán az atmoszféra redukáló tulajdonságú anyagai elbontják. A napkelte idején keletkező ózon a nitrogén-monoxidot nitrogén-dioxiddá oxidálja; növekvő erősségű UV-sugárzás az ózonkoncentráció növekedését idézi elő, majd a redukáló komponensek okozta ózonfogyás kerül előtérbe. Fotokémiai füstködben mint maximális értéket már 0,1 ppm ózonkoncentrációt is mértek. A fotokémiai füstköd a szerkezeti anyagokat és az egészséget egyaránt károsítja, mivel a kémiai kötések oxidatív felhasítására képes.

A fotokémiai füstköd kialakulásának sematikus vázlatát a **32. ábra** mutatja be.



31. ábra. A fotokémiai füstköd komponensei koncentrációjának időbeni változása



32. ábra. A fotokémiai füstköd kialakulásának folyamata

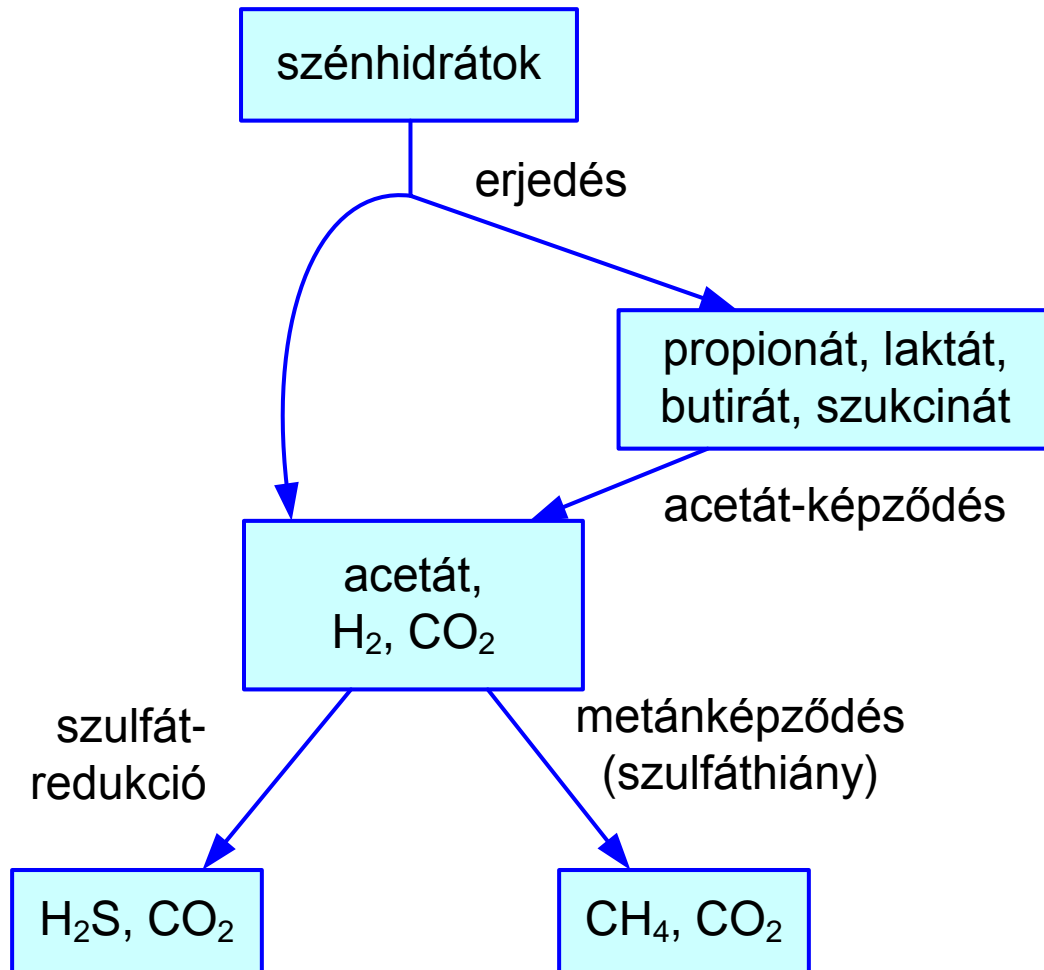
2.4.5. Az eutrofizáció

Növényi tápanyagok – foszfátok, nitrátok, stb. – bejutása az élővizek felső, fénytől átjárt rétegébe (epilimnion) azok eutrofizációját okozzák. Ez a növényi biomassza (algák) mennyiségének mértéken felüli megnövekedését jelenti, ami ezen vizek biológiai egyensúlyának megbomlásához vezet. A biomassza növekedését rendszerint a foszfát limitálja, ily módon a folyamatot kommunális szennyvizek, továbbá a foszfortartalmú mosószerek nagy mennyiségben történő alkalmazása jelentősen felerősíti. A foszfát-foszfor 1 g-ja szárazanyagra számítva mintegy 100 g biomassza fotoszintézissel történő létrejötték teszi lehetővé. A folyamat egésze pedig a nitrogén és a foszfor biogeokémiai körfolyamatait egyaránt érinti.

Az elhalt algák azután a mélyebb vízrétegbe (hypolimnion) kerülnek, és az oxidatív mineralizációhoz lényegesen több oldott oxigént fogyasztanak el, mint ami diffúzió útján az atmoszférából az élővízbe juthat. Az aerob lebomlás oxigénszükséglete mintegy 150 g oxigén 100 g szárazanyagra számítva. Ennek megfelelően lokálisan – különösen az üledékréteg közelében – az oxigénhiány olyan nagy lehet, hogy a redukálóanyagok (H_2S , NH_3) koncentrációja megnövekedik, és a redukálóra (anaerob) forduló közegben redukációs reakciók indulnak be.

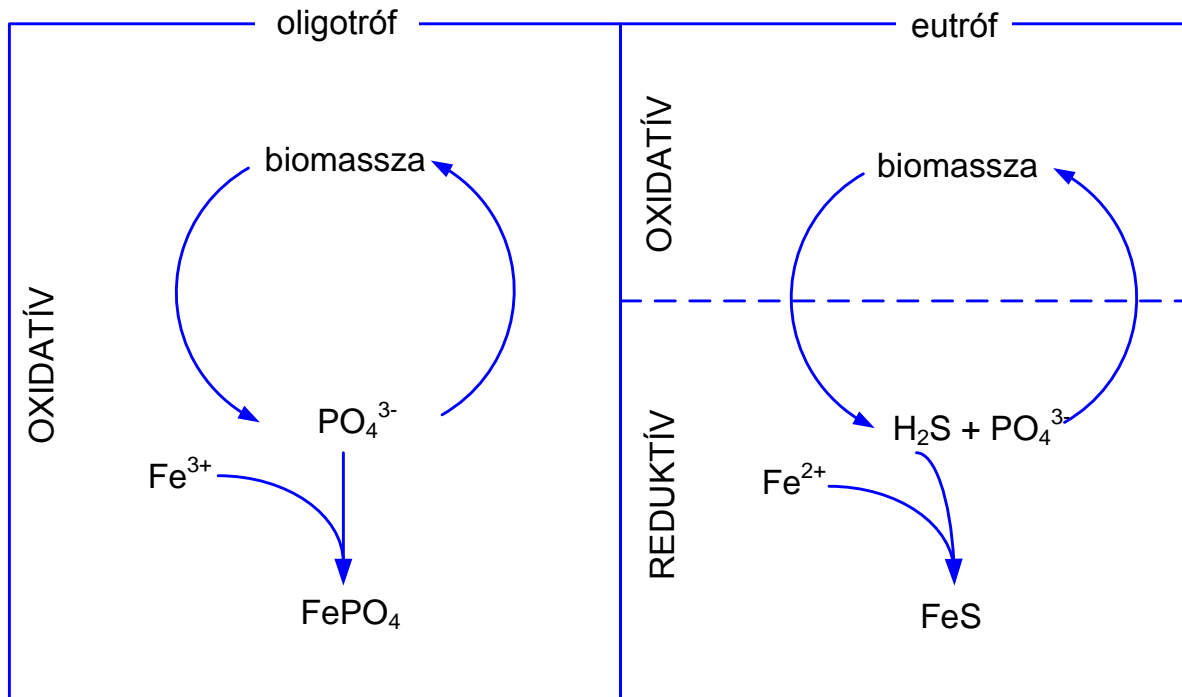
Az anaerob lebomlás két típusát különböztetjük meg annak megfelelően, hogy az élővíz szulfátkoncentrációja mekkora. Szulfáthiányos esetben metán és szén-dioxid keletkezik

(metanogenézis), míg növekvő szulfátkoncentráció kapcsán a szulfátredukció ($\text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2$) válik domináló reakcióvá (33. ábra).



33. ábra. Elhalt biomassza anaerob lebomlása szulfát jelen-, illetve távollétében

Ha az üledékben redukáló körülmények alakulnak ki, a nehezen oldódó vas(III)-foszfát jobban oldódó vas(II)-foszfáttá alakul át, s ennek révén a foszfát az üledékből HPO_4^{2-} -ionok formájában remobilizálódik (34. ábra). Míg a metalimnion (határréteg) kialakulása az oxidáló felszíni réteg és a redukáló, mélyebben fekvő rétegek keveredését megakadályozza, a tavasszal és ősszel bekövetkező cirkuláció újabb tápanyagokat juttat a biológiailag aktív felszínközeli zónába. Ez azzal a következménnyel jár, hogy az entrofizációtól már érintett felszíni vizekben a kedvezőtlen folyamatok pótlólagos tápanyagbejutás nélkül is tovább zajlanak, s ez végső soron az élővilág kihalásához vezethet az érintett vizekben



34. ábra. A foszfát remobilizációja anaerob körülmények között

2.4.6. A földi élet és a biogeokémiai körfolyamatok

A földi élet kialakulása és fejlődése általa vált lehetővé, hogy a szükséges tápanyagok az abiotikus környezetben rendelkezésre álltak. Az organismusok viszont, másfelől ezen tápanyagok hozzáférhetőségét és transzportját alapvetően befolyásolják; ezért fontos számunkra, hogy a biogeokémiai folyamatok természetét minél pontosabban megismerjük. Nem meglepő, hogy a Földön található kémiai elemek közül csupán 20 található meg a különböző élőlényekben, s a legtöbbjük a leggyakoribb elemek közül kerül ki. A ritka elemeket az organismusok csupán extrém kis koncentrációkban, speciális feladatkörben hasznosítják. Erre jó példa a nitrogén fixálásban fontos szerepet játszó nitrogénáz enzimben lévő molibdén. Minthogy az élő szervezetek felépítésében hat, ún. esszenciális elem játszik meghatározó szerepet, nyilvánvaló, hogy az organismusok ezek körforgására gyakorolják a legnagyobb hatást.

A környezetben található elemek felvétele energiaigényes feladat. Az élő szervezetek hatékony mechanizmusokat fejlesztettek ki, hogy a tápanyagokat a kőzetekből, a talajból, a vízből és a levegőből fölvegyék. Ezen túlmenően még azt is hangsúlyoznunk kell, hogy a legtöbb anyagot visszaforgatják, többé-kevésbé körfolyamat kialakítása közben. Ebből a ciklusból azok az

elemek kiesnek, amelyeknél a visszaforgatás energiaigénye nagyobb, mint az új tápanyag-molekula befogadásával járó energiaigény. Lombhullató növények esetében ily módon pl. aminosavak és szénhidrátok esnek ki a körfolyamatból, mivel ezen molekulák elbontása és újrahasznosítása nagy energiamennyiséget igényel. Ez azonban nem jár együtt azzal, hogy az illető ökológiai rendszerből kieső anyagmennyiség is nagy, hiszen a mikroorganizmusok és a növények gyökerei a lehullott és elbomló szerves anyagokat gyorsan felszívják, illetve hasznosítják.

Az organizmusok – az előzőek mellett – hatékony mechanizmusokat fejlesztettek ki a mérgező anyagok eltávolítására, nem mérgező kémiai formává, illetve tápanyaggá történő átalakítására. Erre jó példa a $S^{2-} \rightarrow SO_4^{2-}$, illetve a $NO_2^- \rightarrow NO_3^-$ oxidáció. Az evolúció során az ilyen és ehhez hasonló átalakulások első példája, ahol a toxikus anyagok környezetben történő átalakulása következik be, az aerob anyagcsere. Itt egy különös „méreg”, a molekuláris oxigén alakul át szén-dioxid képződése és energia-felszabadulás közben. Ez a lépés a biológiai produktivitást jelentős mértékben fokozta, és hozzájárult az atmoszféra mai oxigéntartalmának kialakulásához.

A társadalmak jólétét mindenekelőtt az élelem- és a vízkészletek határozzák meg. Az élelmiszertermelést – annak bármilyen formáját – az időjárás erősen befolyásolja. Ugyanígy, döntő az alapvető tápanyagok elérhetősége szükséges mennyiségben a növekedési periódusban, mérgező anyagok jelenléte vagy távolléte, továbbá a talaj fizikai, kémiai és mikrobiológiai állapota. A tápláléktermelés szempontjából a szén, a nitrogén, a foszfor és a kén biogeokémiai körforgása meghatározó. Természetesen a mikrotápanyagok jelentőségét is hangsúlyoznunk kell, különösen bizonyos talajféleségek esetében.

Az élelmiszertermelést a biogeokémiai folyamatok, a csapadékviszonyok, az esővíz oldott anyagai és az általuk a talajban előidézett változások közvetlenül befolyásolják. Ha pl. a csapadékvíz NO_x -tartalma megnövekedik, akkor ezzel együtt pozitív irányban változik a nitrogén hozzáférhetősége is, ami a legtöbb mezőgazdasági területen a növekedés limitáló tényezője. Hátrányos viszont, hogy egyidejűleg csökken a talaj pH-ja. A két folyamat eredőjét a talaj típusa és az éghajlati tényezők határozzák meg. Ennek felderítéséhez azonban jelenlegi ismereteinknél sokkal többet kellene tudnunk a csapadékvíz összetételéről és a talajjal való kölcsönhatásáról. Csak ily módon lesz képes a mezőgazdaság alkalmazkodni azokhoz a változásokhoz, amelyeket az emberi aktivitás idéz elő a biogeokémiai körfolyamatokban.

A mezőgazdaság az időjárás változásaira mindig érzékeny volt és az is marad. Szárazság és áradások gyakran kényszerítettek korábban gazdag termőterületek elhagyására, de több

alkalommal pl. sikerre vezetett a szárazságnak ellenálló növények nemesítése. Más esetekben viszont az alkalmazkodás jelenthette a megoldást.

A változások előrejelzése nehéz, hiszen a globális felmelegedés fő okozója, a szén-dioxid egyben a fotoszintézis kiindulási vegyülete is. Az atmoszféra növekvő CO₂ tartalma elvileg tehát növeli a biológiai produkciót. Laboratóriumi vizsgálatok arra utalnak, hogy 300-ról 600 ppm-re növelve a CO₂-koncentrációt, a kukorica esetében 20%-kal, a búza esetében 60%-kal növekedett a fotoszintézis mértéke (AKITA, MOSS). A mérések során azt is tapasztalták, hogy nagyobb CO₂ mennyiségek esetében a gyökérzet erősödött és a vízfelhasználás határfoka is növekedett.

Erről azonban arra következtetni, hogy a gyakorlatban mi várható, rendkívül nehéz. A laboratóriumi kísérleteket ui. idealizált körülmények – megfelelő tápanyagmennyiség és víz, optimális hőmérséklet – végezték, ahol a kísérleti növények egyedei között versengés nem lépett fel. Ezek a körülmények szántóföldi környezetben ritkán valósulnak meg, s bár annyi biztosnak látszik, hogy terepkörülmények között is tapasztalható bizonyos növekedés, a mezőgazdasági termelésre gyakorolt hatás felderítésére további intenzív vizsgálatok szükségesek.

A teljes bioszféra ember által előidézett klímaváltozásra adott válasza ma még nem becsülhető meg. Az valószínűnek látszik, hogy a növekvő CO₂-koncentráció a fotoszintézis mértékét a mérsékelt égövben és nyári időszakban a sarkvidék felé növelni fogja. Erre utalhat az a tény, hogy nagyobb földrajzi szélességek felé haladva a CO₂-koncentráció fluktuációjának amplitudója megnövekedett.

Ha az antropogén CO₂-kibocsátás mérsékelt és lassú lesz, akkor van esély arra, hogy a bioszféra képes lesz a kiegyenlítésre. A gyors növekedés viszont valószínűleg meghaladja a bioszféra kiegyenlítő képességét, és az éghajlati övek eltolódására is sor kerülhet, amit a növénytakaró nem képes követni. Ez pedig az állatvilágot is érintheti, bár az utóbbi alkalmazkodó-képessége jóval nagyobb.

Noha a Föld ökológiai rendszereinek megismerésében kiterjedt ismerethalmazra tettünk szert, az egyes elemek közötti kapcsolatok és a lehetséges visszacsatolások mértéke tekintetében ma még a kezdeteknél tartunk. A kérdéskört a maga teljes komplexitásában a KÖRNYEZETTUDOMÁNY ragadja meg, ami természetesen a redukcionista diszciplínák eredményeire és módszereire támaszkodva, a tudományos kutatások új szerkezeti modelljének – heterogén, mellérendelt – kialakítása közben juthat a legmesszebbre természeti környezetünk folyamatainak megértésében.

Az, hogy ezen új tudományterület milyen mértékben fejlődik, attól függ, hogy a társadalmak mennyire érzékenyek a globális változásokra. Fontos hangsúlyoznunk, hogy a jelenlegi, az emberi aktivitás által előidézett változások a természeti változásokhoz képest nagyok, s ez akkor is megfontolásra kell, hogy készítsen bennünket, ha tudjuk, hogy a természet maga is állandóan változik. Sikerre csak akkor számíthatunk, ha ez a felismerés új közelítésmódhoz és a gyakorlathoz vezet el bennünket.

Irodalom:

Papp Sándor: Biogeokémia – körfolyamatok a természetben, Veszprémi Egyetemi Kiadó 2002;
továbbá az ott felsorolt összefoglaló, illetve eredeti források

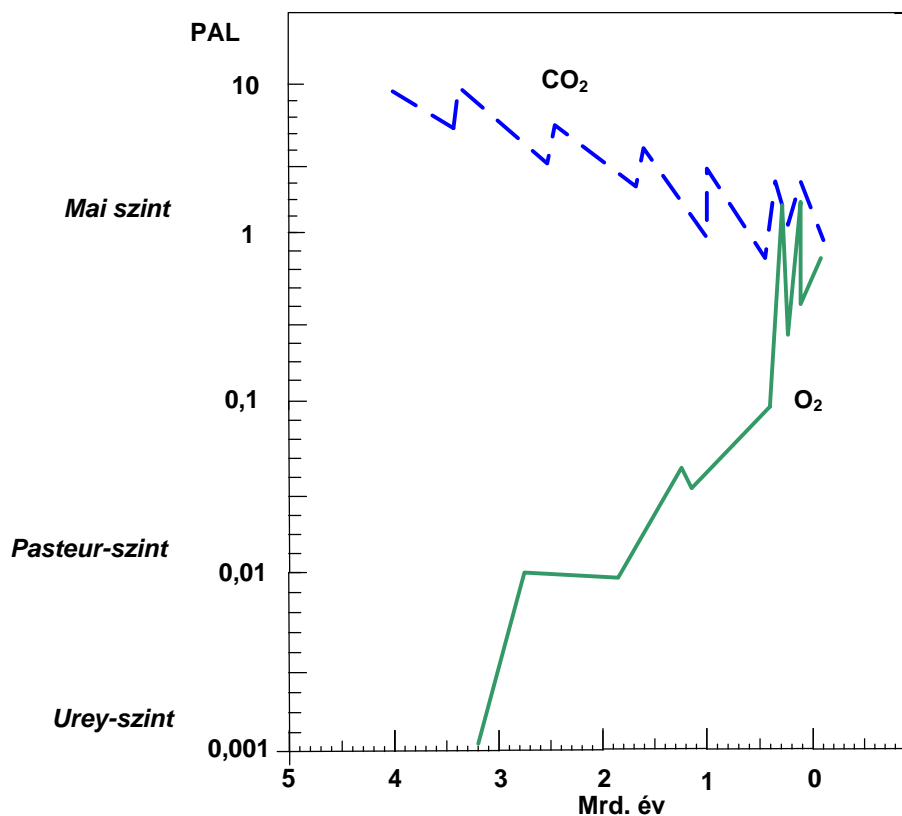
2.5. A légkör szerepe a földi élet szemszögéből

A légkör csak egy milliomod része a Föld egész tömegének, a geoszférák közül kiemelt szerepet tölt be a földi élet kialakulása szempontjából. A légkör anyaga és a Föld Naptól való távolsága tette azt lehetővé, hogy az élet kezdeti formái kialakulhassanak bolygónkon, majd azok hathatós közreműködésével alakultak át a környezeti feltételek úgy, hogy az már a fejlettebb élővilág számára is alkalmassá vált. A légkör egykor magasabb vízgőz- és a széndioxidtartalma az üvegházhatás „mechanizmusával” (a Naptól való távolságból következőnél) magasabb hőmérsékletet biztosított. Később a növekvő oxigéntartalom lehetőséget teremtett a káros sugárzásoktól védő ózonréteg kialakulására. A légkör összetétele az élettelen természet és az élővilág közötti visszacsatolós folyamatok eredményeként érte el mai állapotát, melyet már az emberi tevékenység is aktívan befolyásol.

2.5.1. A légkör összetétele és szerkezete

A Földünk ma ismert száraz légkörének összetétele (nitrogén: 78,08 %, oxigén: 20,95 %, argon: 0,93 %, széndioxid: 0,03 %) hosszú változás eredményeként alakult ki. A földtörténet kezdeti időszakában az atmoszféra főként hidrogénből és héliumból állt, később (amikor a Föld a könnyű gázok jelentős részét elvesztette) az ammónia, a metán, a nitrogén, a vízgőz és a széndioxid aránya megnőtt, de az oxigén sokáig alárendelt szerepet játszott. A mai légköri összetételhez vezető úton fontos lépés volt az, hogy a vízgőzből a Napsugárzás hatására oxigén szabadult fel (fotodisszociáció), amiből a Nap UV-sugárzása elindította az ózon (O₃) képződést, majd az ózon (UV-sugárzást szűrő szerepe) tette lehetővé azt, hogy az egyszerűbb élőlények a világtengerek felszínközeli részeit is meghódítsák. Hozzávetőlegesen 900 millió évvel ezelőttre a légkör oxigéntartalma elérte a mai egy ezredét (az ún. Urey-szintet), ami szükséges volt ahhoz, hogy az UV-szűrő hatás kellően hatékony legyen. A fotoszintetizáló élőlények meggyorsították az oxigéntermelés folyamatát. Így, mintegy 600 millió évvel ezelőtt a légkör oxigéntartalma elérte a mai szint (present atmospheric level – PAL) századát (Pasteur-szint). Ez már lehetővé tette az anyagcserében a légzést, és felgyorsította az élővilág fejlődését, térhódítását, ezzel együtt a légkör összetételének további változását. Hatására kb. 300 millió éve kialakult a maihoz hasonló oxigénszint. A fenti folyamat eredményeként az egykori redukáló jellegű légkör oxidáló jellegűvé változott.

Az élővilág szerepe azonban nem merült ki az oxigénszint alakításában, hiszen a növényvilág légzése során a széndioxidot (CO_2) is hasznosítja. Az élővilág anyagcseréje jelentős mennyiségű CO_2 -ot vont ki a légkörből, ami jórészt széntelepek és karbonátos kőzetek (mész, dolomit) formájában halmozódott fel. Ez a folyamat nem történt zavartalanul, benne rövidebb időszakokra ellentétes irányú folyamatok is kialakultak (például a vulkánosság CO_2 termelése, vagy egy meteorit becsapódás hatására kialakuló légköri sugárzásváltozás, illetőleg az élővilág károsodása miatt), napjainkig azonban döntően természeti folyamatok befolyásolták (35. ábra). Az ember tevékenysége alapvetően megváltoztatta ezt; nemcsak azzal, hogy a természetes anyagok körforgását módosítja, hanem a természet által „nem is ismert” anyagok légkörbe juttatásával is.

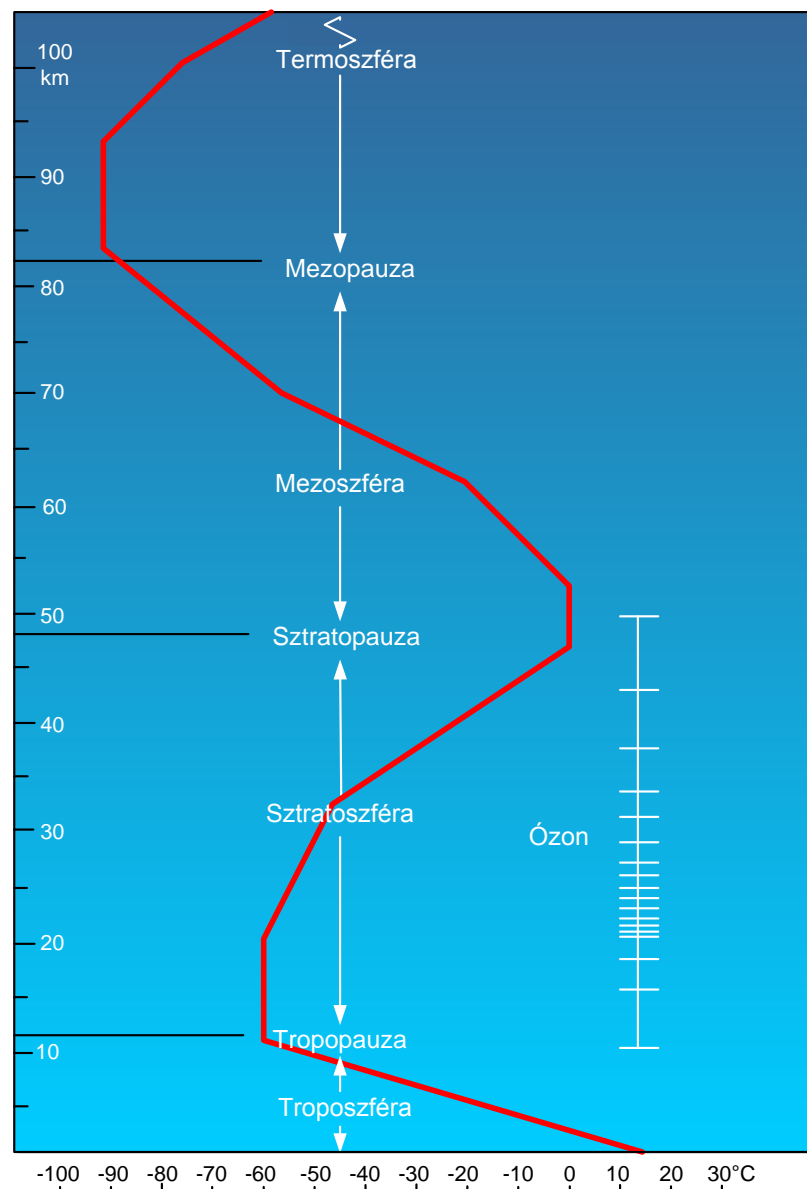
A légkör O_2 tartalma

35. ábra. A légkör oxigén és széndioxid tartalmának változása a földtörténet során (Rutten 1971 után, egyszerűsítve)

A légkör a Föld gravitációs terének „engedelmeskedve” gömbhéjas szerkezetű. A gázokra vonatkozó exponenciális jellegű összefüggés miatt a légköri nyomás a felszíntől távolodva kb. 5,5-6 km-enként a felére csökken, s benne a magasság növekedésével a kisebb molekulatömegű komponenseknek kellene feldúsulniuk. A fő alkotógázok százalékos aránya azonban a légköri áramlások miatt közel állandó mintegy 90-100 km magasságig, ezért ezt az alsó réteget

homoszférának nevezzük. E magasság fölött a gázok aránya már változik a magassággal (fotokémiai reakciók zajlanak, az összetevők molekulasúlyuk szerint rendeződnek), így *heteroszférának* nevezik.

Amíg a légkörben a nyomás többé-kevésbé egyenletesen változik a magassággal, a hőmérséklet vertikális alakulása elég változatos képet mutat, hiszen annak gradiense háromszor is irányt vált (**36. ábra**). Ez alapján a légkört négy fő részre oszthatjuk: troposzférára, sztratoszférára, mezoszférára és termoszférára. A levegő hőmérsékletének alakulását három „bevételi” forrás (a Naptól érkező ultraibolya sugárzás elnyelése, a hőtermelő kémiai reakciók és a Földről kisugárzott hosszú hullámú sugárzás) és a kisugárzás egyenlege szabályozza. Ezek szerepe magassági tartományonként igen különböző.



36. ábra. A légkör vázlatos hőmérsékleti profilja és szférái

A légkör felszínhez közeli rétege a *troposzféra*. Vastagsága 10-12 km, de földrajzilag és évszakosan is változik (Magyarországon átlagosan 11 km, de télen csak 8-10 km, míg nyáron 12-14 km körül alakul). Ebben a rétegben zajlik az időjárási folyamatok többsége, jelentősek a függőleges áramlások, itt keletkeznek a felhők, itt található a vízgőz legnagyobb része. A troposzféra üvegházhatású gázai elnyelik a felszín felől érkező hosszuhullámú sugárzást, így a levegő alulról melegszik (üvegházhatás), s a rétegben normális körülmények között a hőmérséklet a magasság növekedésével csökken (100 méterenként 0,65 °C-ot). Jól érzékelhetjük a jelenséget egy-egy repülőút során. A troposzféra tetején ez a csökkenés megáll, s a hőmérséklet értéke egy szakaszon nem változik (kb. -56 °C körül alakul). Ez a zóna a *tropopauza*.

A troposzférát követő réteg a hőmérsékletnövekedéssel jellemezhető *sztratoszféra*, ami kb. 50 km magasságig tart. A sztratoszférában helyezkedik el az ún. ózonréteg. Ez a valóságban nem egy szűk réteg, hanem egy több tíz kilométeres tartomány, melyben az ózon maximuma a 15-30 km közötti magasságban van. Mennyiségét jellemzi, hogy felszíni nyomáson csak 3-4 mm vastagságú lenne. Az O₂ molekula két szakaszban ózonná (O₃) történő alakulása a rövidhullámú Napsugárzás elnyelésével hőtermelő folyamat, ami sztratoszférában a hőmérséklet emelésével jár, így annak tetején (sztratopauza) 0 °C körüli hőmérséklet alakul ki. (Az ózon termodinamikailag kis kötési energiája miatt nem stabil, így képződés hiányában gyorsan elbomlik – lásd később *ózonlyuk*.)

A sztratoszféra fölött elhelyezkedő *mezoszférában* a hőmérséklet a magassággal csökken a kb. 85-90 km között található *mezopauzáig* (itt akár -120 °C is kialakulhat). Az ezután következő *termoszférában* az ibolyán túli elnyelés miatt kb. 1000 °C-ig növekszik a hőmérséklet, s a gázok egy része ionizált állapotba kerül (ezért a mezoszféra felső és a termoszféra alsó tartományában rádióhullámokat visszaverő *ionoszféra* is kialakul több réteggel). Meg kell jegyezni, hogy a levegő ritkasága miatt ez a hőmérséklet csak igen kis hőmennyiséggel párosul. Kb. 800 km-es magasság fölött a hőmérséklet állandósul (*termopauza*), majd a légkör fokozatosan átmegy a bolygóközi térbe (*exoszféra*).

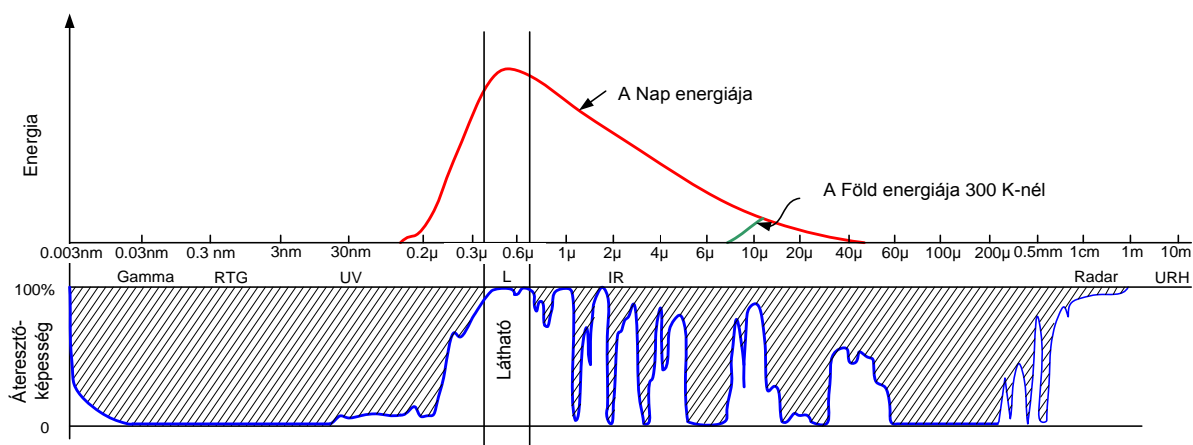
Az egyes szférák magassági határai, hőmérsékleti adatai évszakok, napszakok, vagy akár a Naptevékenység függvényében is változhatnak, így nem szabad azokat merevnek tekinteni!

2.5.2. Az üvegházhatás

2.5.2.1. Az üvegházhatás oka és az üvegházgázok

A Föld légköre egyfajta energiacsapdaként működik, ahhoz hasonlóan, amint az üvegházak is. Ha ennek fizikai okát keressük, akkor arra a kérdésre kell válaszolnunk, hogy mi az üvegházhatás lényege?

A légkört alkotó gázok tulajdonságuknak megfelelően nem minden sugárzást engednek át: hullámhosszuktól függően egyeseket visszavernek, van amit elnyelnek, s vannak olyanok, amelyeket továbbengednek. A jól látható (37. ábra), hogy az igen rövid hullámhosszú elektromágneses sugárzást (így például a röntgensugárzást), vagy az UV-sugárzás nagyobb részét a légkör nem, vagy csak korlátozottan engedi tovább, míg a Nap sugárzásának jelentős részét kitevő fénysugárzást szinte akadálytalanul keresztülbocsátja. A felszínre érkező sugárzás azonban – az ott lévő anyagokkal kölcsönhatásba kerülve – hosszú hullámú hősugárzássá alakul (ezt érezhetjük a bőrünkön is), amit már csak korlátozottan enged át a légkör (lásd az ábrán a Föld kisugárzási tartományát). Az így keletkező hőtöbblet az, ami az élet számára kedvező feltételeket terem bolygónkon. A számítások szerint e nélkül mintegy 33 °C-kal alacsonyabb, azaz –18 °C lenne Földünk hőmérséklete. (A Vénuszon a nagy gáztartalom 480 °C körüli állandó hőséget eredményez, míg a Marson lévő igen ritka légkör miatt nem tud az üvegházhatás kellően érvényesülni, és ott tartós hideg alakult ki.)



37. ábra. A légkör átteresztőképessége a hullámhosszak függvényében

Az elmúlt évmilliók során egy igen törekeny egyensúly közeli állapot alakult ki bolygónkon, melyben a légköri gázok mennyisége, arányai, azt eredményezték, hogy a Föld középhőmérséklete csak szűkebb tartományban változott. Az emberi tevékenység azonban az

utóbbi 200-250 évben egyre fokozódó mértékben alakítja a légkör összetételét, a legfontosabb üvegházhatású gázok mennyiségét (**15. táblázat**).

15. táblázat. A fontosabb üvegházhatású gázok szerepe, és antropogén hatású változása (a vízgőz nélkül) (Mika J. 2002, az Environmental Health Center és a NOAA adatai felhasználásával)

Üvegházhatású gáz	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC-11	CFC-12
Koncentráció az iparosítás előtt	278 ppm	700 ppb	275ppb	0	0
Jelenlegi koncentráció (2006)	383 ppm	1178ppb	320ppb	258 ppt	530 ppt
Évenkénti növekedés (1997-2006, %)	0.5	0.02	0.2	-0.5	0
Hatékonysági potenciál (CO ₂ =1)	1	23	296	4600	1700
Légköri tartózkodási idő (év)	50-200	8-12	120	45	12
Szerep az üvegházhatásban (%)	50	19	4	15	

Bár a légkör abszorpciójának éghajlatra gyakorolt hatásáról már a 19. században is több cikk jelent meg azt, hogy az üvegházhatásnak (illetve ebben az emberi tevékenységnek) milyen jelentősége is lehet életünkre, csak néhány évtizede ismerték fel. Bizonyítja ezt, hogy lexikonjaink (köztük a hatkötetes Természettudományi Lexikon is) még az 1970-es években sem szerepeltetik címszóként.

Az emberi beavatkozások hatékony jövőbeli alakítása érdekében alapvető jelentőségű, hogy tisztában legyünk azzal, hogy hogyan alakult a múltban az üvegházhatású gázok mennyisége, és a változásokban feltárjuk az antropogén hatások mértékét.

A 19. században még csak a széndioxidot (pontosabban szénsavat) illetve a vízgőzt tartották üvegházhatású gáznak, ma már tudjuk a kisebb koncentrációjú, főként 8-12 μm hullámhossztartományban abszorbeáló gázok is részt vesznek a folyamatban. Tudománytörténetileg érdekes, hogy Fourier (a neves matematikus) már 1824-ben felvette a CO₂ gáz sajátos szerepét, majd a 19. század végén Arrhenius már azt is kiszámolta, hogy a légköri szénsav különböző koncentrációja évszakonként és földrajzi szélességenként milyen hőmérsékletnövekedést okozna¹. Neumann János légköri modelljében (1955) már utal az antropogén okokra az éghajlati változásokban.

Ha fontosság szerint sorba vesszük az üvegházhatás kialakításában részt vevő gázokat, akkor a legjelentősebb a *vízgőz!* Mivel azonban a hozzávetőlegesen 13 billió tonna vízgőz mennyisége

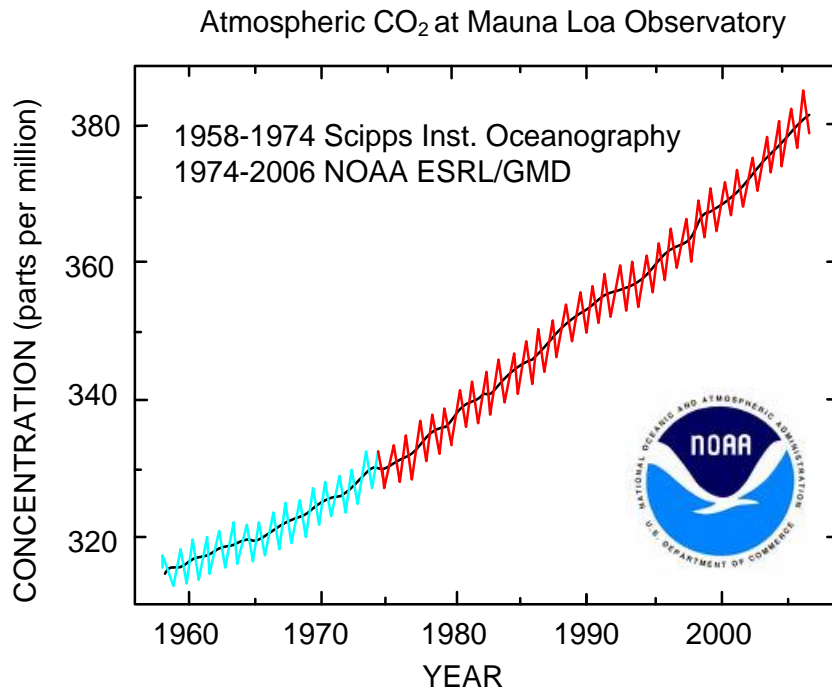
¹ Lásd a <http://www.kfki.hu/~/cheminfo/hun/olvaso/histchem/arrheni.html> címen.

alig emberfüggő, hatásaival eddig kevésbé foglalkoztak. Tény azonban, hogy a felszín és a növényzet átalakításával, az öntözéssel, a jéggel borított felszínek (közvetett hatásra bekövetkező) csökkenésével, stb. az eddig nem jelentős emberi befolyásoltság, a vízgőz esetében is változhat.

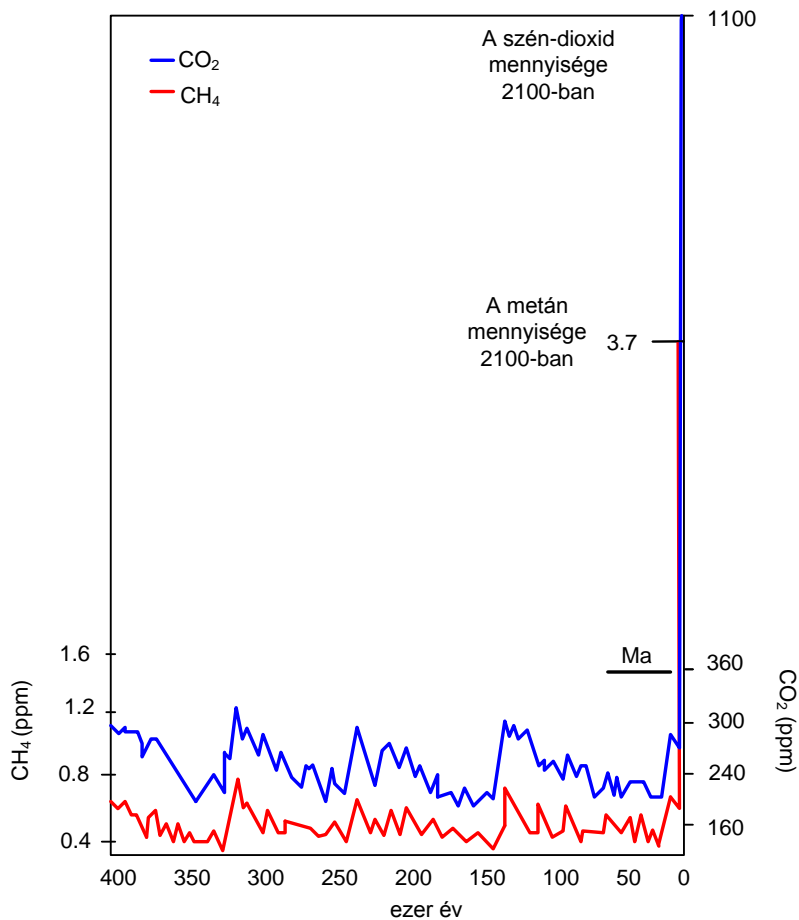
A levegő CO_2 -tartalmának átfogó mérése az 1957/58-as Nemzetközi Geofizikai Év keretében Roger Revelle kezdeményezésére indított vizsgálatokkal kezdődött (az általa vezetett oceanográfiai intézetben ugyanis rájöttek, hogy a világtengerek nem képesek korlátlanul elnyelni ez a gázt). Az 1990-es évtized során a műszeres vizsgálatok már lehetővé tették, hogy (antarktiszi és grönlandi jégminták gáztartalmának elemzésével) régebbi időszakokra is elvégezzék a méréseket.

A hosszabb időszakra kiterjesztett értékelések azt mutatják, hogy a múltban is voltak számottevő ingadozások, ezek azonban mindig egy tartományban (az utóbbi 400 ezer év során 180 és 280 ppm között) maradtak, és szoros kapcsolatban voltak a klímaváltozásokkal. A CO_2 mennyisége még az 1800-as évek elején is csak 280 ppm volt, majd a részletes mérések kezdetén (1950-es évek végén) évszakosan 310 és 318 között változott, az ezredfordulón pedig már meghaladta a 370-et, 2005-ben pedig már 381 ppm volt, azaz kb. harmadával nőtt, aminek nagyobb része az utóbbi fél évszázad alatt következett be (**38. ábra**). Komolyan elgondolkodtató lehet ebben a növekedésben, hogy az egyre növekvő értékek már túllépnek a korábbi – tisztán természeti okokra visszavezethető – változások mértékén (**39. ábra**).

A változások eredetét vizsgálva megállapítható, hogy a CO_2 természetes forrása az élővilághoz kapcsolódó légzés, illetve a szerves anyagok bomlása, antropogén forrása pedig a fosszilis tüzelő anyagok elégetése, az erdőégetés, az erdőhiány miatti lekötés csökkenése és a mészkő felhasználás. Becslések szerint az ezredfordulón évente 20 milliárd tonna széndioxid-többletet eredményeznek a fosszilis energiahordozók, további 4-7 milliárd tonnát az erdőégetések. Bár ez a tetemes mennyiség csak kb. 4 %-a a biológiai körforgalomban résztvevő mennyiségnek, mégis jelentős. Hatására 3 évenként mintegy 1%-kal csökken a kisugárzás. A 21. század végére mennyisége a prognózisok szerint elérheti a 500-1200 ppm-et, ami számottevő hőmérsékletnövekedést (például 720 ppm-nél várható 4,5 W/m² energiatöbblet a Föld egészére vetítve akár + 3 °C hőmérsékletváltozást) eredményezhetne.

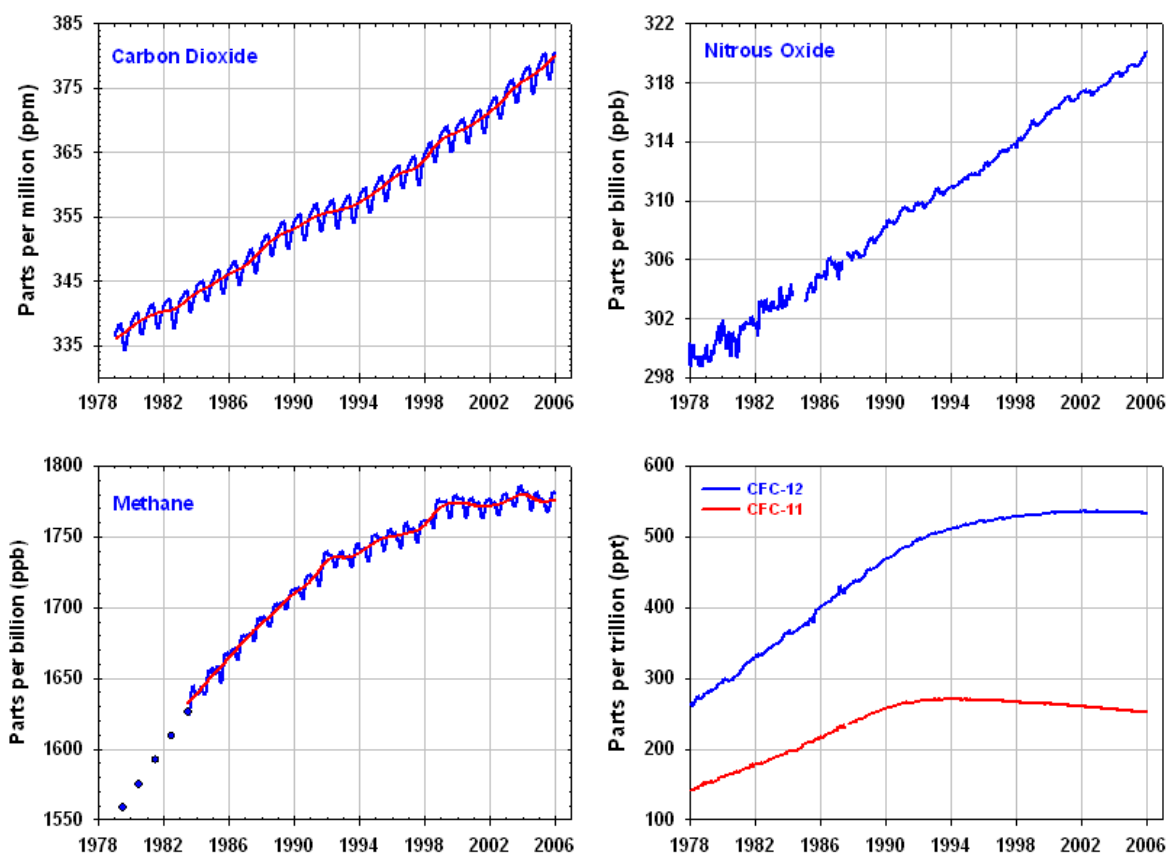


38. ábra. A légkör CO₂ koncentrációjának növekedése az 1950-es évek vége óta (Forrás: IPCC)



39. ábra. A CO₂ és CH₄ koncentrációjának változása a légkörben az utóbbi 400 ezer év során és várható alakulás (Forrás: IPCC)

A metán (CH_4) esetében még a széndioxidnál is gyorsabb, emberi hatástól függő növekedés figyelhető meg, ugyanis az elmúlt 200 évben mintegy kétszeresére nőtt. Bár koncentrációja jóval kisebb (1990-ben 1,70 ppm, 2006-ban 1,78 ppm körül alakult), hatékonysága miatt különös figyelmet érdemel, hiszen egy metán molekula 23-szor, tömegét tekintve pedig 95-ször hatékonyabb, mint a „fő ellenségnek” tartott CO_2 . Hosszú léptékű változása a széndioxidhoz hasonló, és napjainkra ugyanúgy kilépett a természetes ingadozási tartományból, mint az előbbi (lásd 39. ábra). A metán természetes keletkezési módja a bomlás és a fermentáció (erjedés), antropogén forrása pedig a rizstermelés (a vízborítás miatti rothadás), a bányászat és az ipar. Biztató jelnek tekinthető, hogy növekedési üteme az utóbbi évtizedben lelassult (40. ábra).



40. ábra. A legfontosabb üvegházgázok mennyiségének alakulása a légkörben (1978-2006) (Forrás: NOAA/CMDL)

A nitrogénoxidok (N_2O és NO_2) szintén jelentős szerepet kaphatnak a fokozódó üvegházhatásban. Antropogén forrásuk a közlekedés, a fosszilis tüzelőanyagok és biomassza égetése, valamint a legfontosabb termésfokozó nitrogénműtrágyák. Így az elmúlt fél évszázadban teljesen megváltozott a természetes és mesterséges nitrogén megkötés aránya.

Mennyiségük töretlenül növekszik a légkörben (lásd **40. ábra**). Ezeért a nitrogénoxidok üvegházhatás-fokozó szerepe akár 0,5 °C is lehet az évszázad végére.

A freonok (freon 11: CFCl_3 , freon 12: CF_2Cl_2) hosszú légköri tartózkodási idejük és igen hatékony szerepük (lásd **15. táblázat**) miatt az üvegházhatás fokozódásában is jelentős veszélyt jelentenek. A gázok „karrierjüket”, mint kémiaiilag veszélytelen hajtógáz, hűtőközeg, főként az 1950-es és 1980-as évek között futották be. Később veszélyességük bebizonyosodott nemcsak az üvegházhatás fokozásában, hanem az ózonréteg roncsolásában is. Bár használatukat nemzetközi egyezmények korlátozzák (lásd később), a fejletlenebb régiókban ma még nem lehet hatékonyan fellépni alkalmazásuk visszaszorítása érdekében.

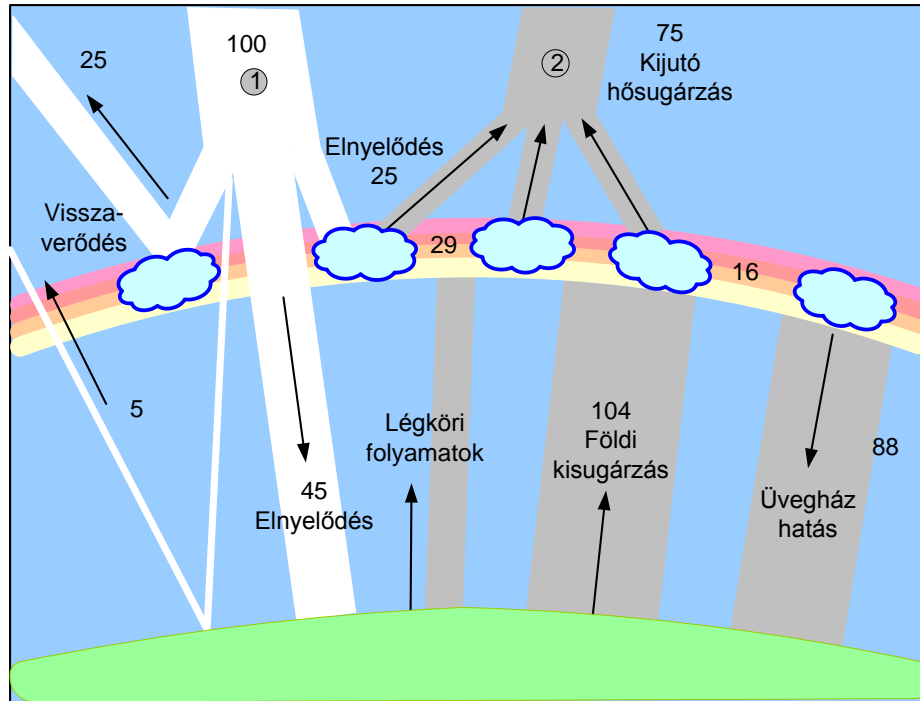
Az üvegházhatást fokozó gázok között említést érdemel még a felszínközeli (troposzférikus) ózon, a HCFC-22, a CFC-113, a szénmonoxid és a széntetraklorid. Keletkezésük jórészt a közlekedéshez és az iparhoz kötődik.

2.5.2.2. A Föld sugárzási egyenlege

Az elmúlt évmilliók során a Földre érkező sugárzásmennyiség egy egyensúlyihoz közeli állapotot ért el. A Napból érkező rövid hullámú sugárzás 30%-a rövid hullámú sugárzásként visszaverődött (25% a légkörről és a felhőzetről, 5% pedig a felszínről), 70% pedig hosszuhullámú sugárzássá alakult (25% a légkörben, 45% a felszínen). A hosszuhullámúvá alakult energiából 16 % közvetlenül a földfelszínről, a többi pedig a légkörből sugárzódott vissza a világűrbe (**41. ábra**).

Jelenleg 2005-ig állnak rendelkezésünkre adatok az egyes üvegházgázok szerepére a földi energiamérlegben (**16. táblázat**). A külön kiemelt öt üvegházgáz az összhátás 97%-áért felelős.

A külső energiaegyensúly fennmaradásához, ha az üvegházgázok növekvő koncentrációja az alsó légkör melegedését idézi elő – és benne nem változnak olyan lényeges elemek, mint a felhőzet (magassága, mennyisége, szerkezete), a felszín állapota, a növényzet, vagy a jégtakaró – akkor a magas légkörnek le kellene hűlni. Ezt a korábban csak elméleti felvetést az 1990-es évek végére már meg is határozták a Coloradói Egyetemen. A mezoszférában 50-90 kilométeres magasságban évente egy fok körüli csökkenést mértek, ami kb. tízszerese a vártnak. Ezt a Föld éghajlatváltozásának komoly bizonyítékaként tartják

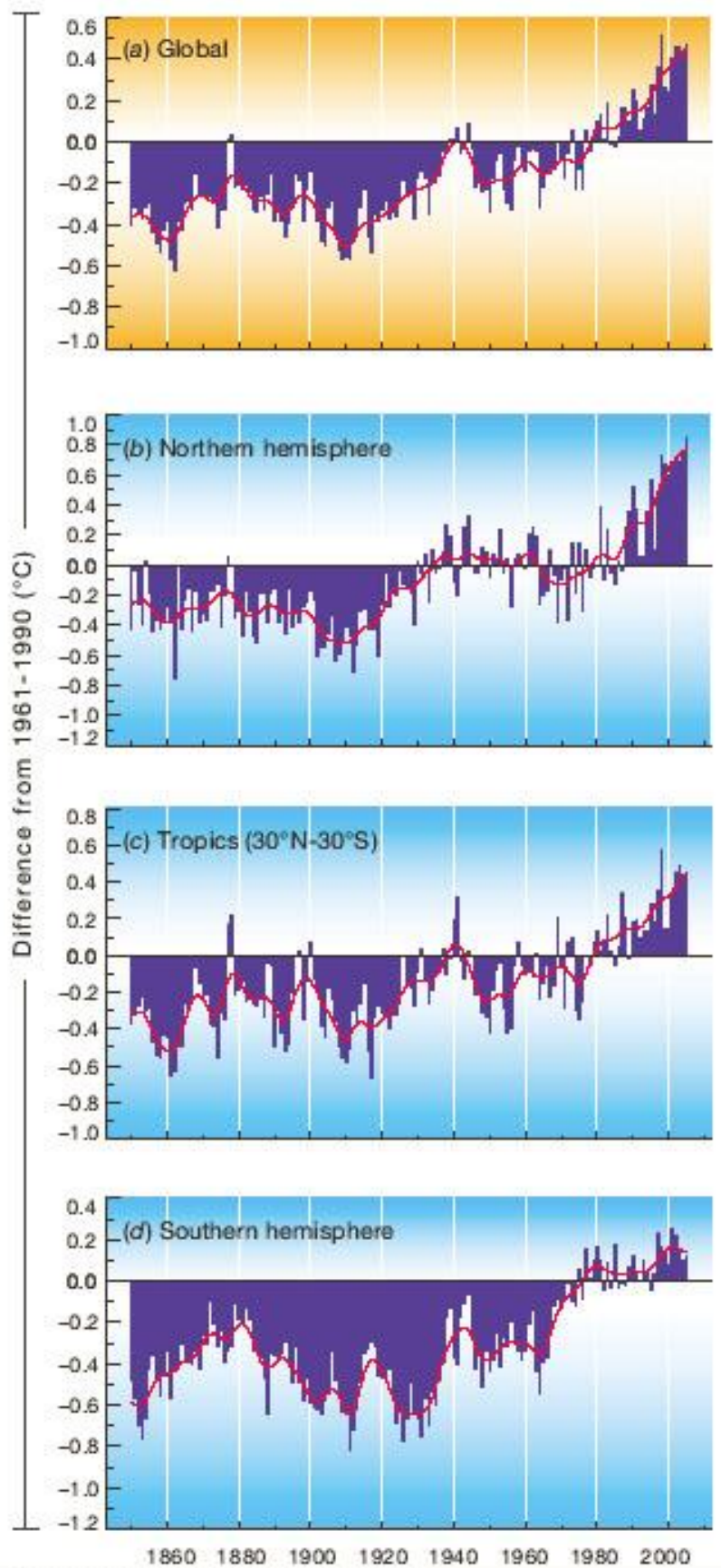


41. ábra. A Föld sugárzási egyenlege (Forrás: Iowa State University 2000)

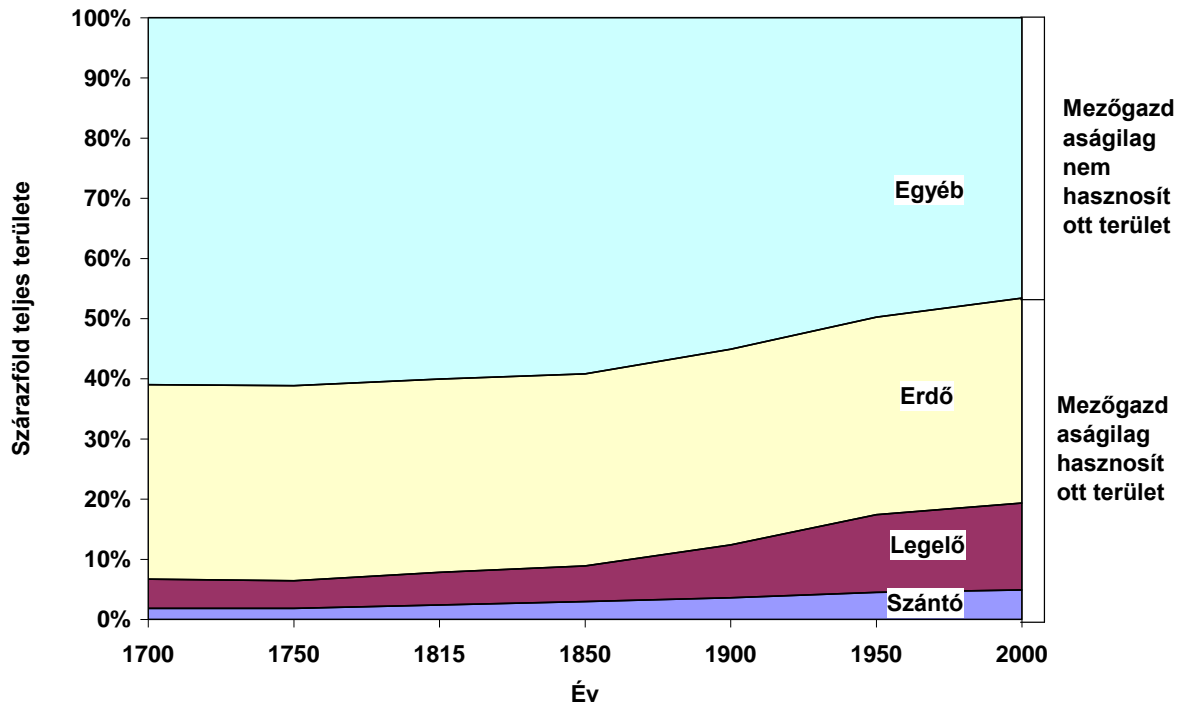
Valójában azonban annak is tanúi vagyunk, hogy ezek a felsorolt elemek tendenciózus változást mutatnak, rajtuk keresztül magában az alsó légkörben is számos visszacsatolós folyamat látszik beindulni. A klímaváltozásokkal foglalkozó kutatások nehézsége, bizonytalansága többek között abban van, hogy nagyon nehéz megbecsülni az egymással ellentétesen ható folyamatok nagyságát. Jellemző példa lehet erre, hogy a légköri *aeroszok* és a következményként jelentkező nagyobb felhőképződés, egy ideig kompenzálták, később pedig tompítják az egyre növekvő üvegházgázok hatását (**42. ábra, 17. táblázat**). Ugyanígy a területhasználati változások (**43. ábra**) nyomán bekövetkező erősebb visszasugárzás (más néven *albedó-változás*) is a légkör felmelegedése ellen hat. Ezen ellentétes folyamatok együttes hatása hozzávetőleges 1 °C hőmérsékletcsökkenést okozna. Mégis egyre több konkrét mérés, regisztrált folyamat van, ami az alsólégkör felmelegedésének következménye: a Föld átlaghőmérsékletének növekedése hosszabb és rövidebb időszakok adatai alapján egyaránt (**44. ábra** és **45. ábra**), a jeges területeken tapasztalható olvadások, sivatagosodás, stb.

16. táblázat. Az átlagos üvegházgáz-index (AGGI) alakulása 1979-2005 (a NOAA CMDL adatai)

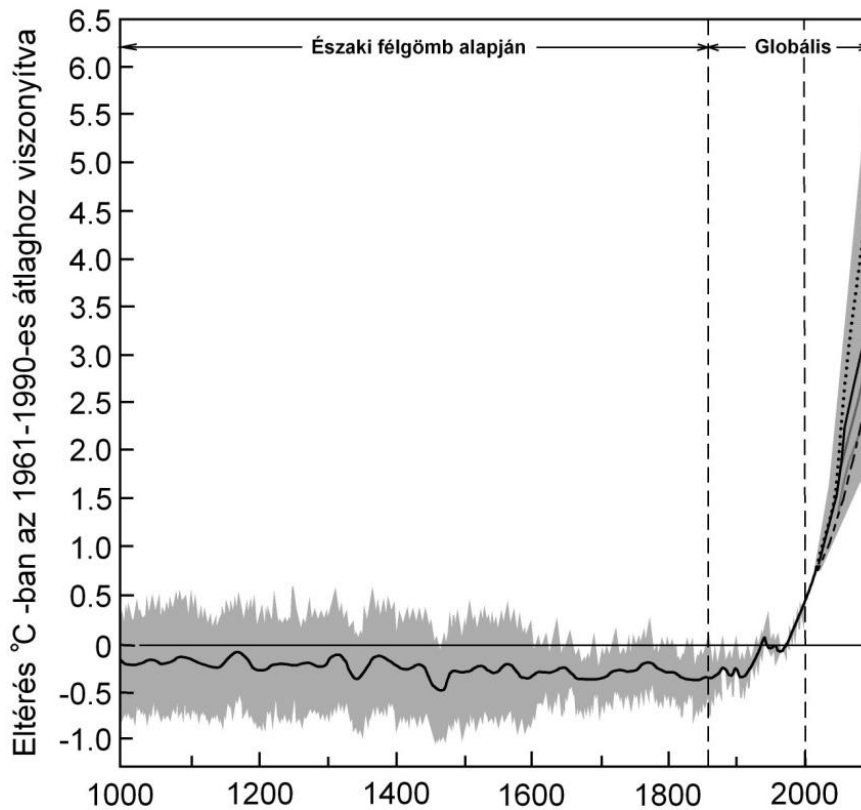
Év	Globális sugárzási erő (W m ⁻²)							AGGI 1990=1	Éves változás %
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC12	CFC11	10 Minr	Total		
1979	1.026	0.412	0.101	0.091	0.039	0.029	1.699	0.783	
1980	1.056	0.418	0.102	0.096	0.041	0.032	1.745	0.804	2.76
1981	1.075	0.425	0.106	0.102	0.043	0.034	1.785	0.822	2.27
1982	1.086	0.432	0.109	0.108	0.045	0.036	1.816	0.837	1.73
1983	1.112	0.438	0.111	0.113	0.048	0.039	1.860	0.857	2.44
1984	1.137	0.446	0.113	0.117	0.050	0.041	1.903	0.877	2.31
1985	1.160	0.451	0.114	0.124	0.053	0.044	1.945	0.896	2.21
1986	1.182	0.456	0.118	0.131	0.055	0.048	1.990	0.917	2.30
1987	1.208	0.460	0.119	0.136	0.058	0.051	2.033	0.937	2.18
1988	1.247	0.464	0.122	0.141	0.061	0.055	2.090	0.963	2.78
1989	1.272	0.469	0.125	0.147	0.063	0.059	2.135	0.984	2.14
1990	1.290	0.472	0.129	0.152	0.065	0.062	2.170	1.000	1.67
1991	1.311	0.476	0.132	0.156	0.066	0.064	2.206	1.016	1.63
1992	1.321	0.480	0.133	0.160	0.067	0.069	2.230	1.028	1.12
1993	1.332	0.481	0.135	0.162	0.067	0.071	2.249	1.036	0.81
1994	1.354	0.483	0.137	0.165	0.067	0.072	2.277	1.049	1.28
1995	1.381	0.485	0.135	0.166	0.067	0.073	2.311	1.065	1.50
1996	1.407	0.486	0.142	0.167	0.067	0.075	2.344	1.080	1.40
1997	1.423	0.487	0.144	0.169	0.067	0.076	2.366	1.090	0.96
1998	1.463	0.491	0.147	0.170	0.066	0.077	2.415	1.113	2.05
1999	1.494	0.494	0.151	0.170	0.066	0.078	2.453	1.130	1.57
2000	1.512	0.494	0.153	0.171	0.066	0.079	2.475	1.140	0.91
2001	1.535	0.494	0.155	0.171	0.065	0.081	2.501	1.152	1.05
2002	1.564	0.494	0.157	0.171	0.065	0.082	2.533	1.167	1.29
2003	1.600	0.496	0.159	0.171	0.064	0.084	2.574	1.186	1.62
2004	1.626	0.496	0.161	0.171	0.064	0.085	2.603	1.199	1.11
2005	1.656	0.496	0.163	0.171	0.063	0.086	2.635	1.215	1.25



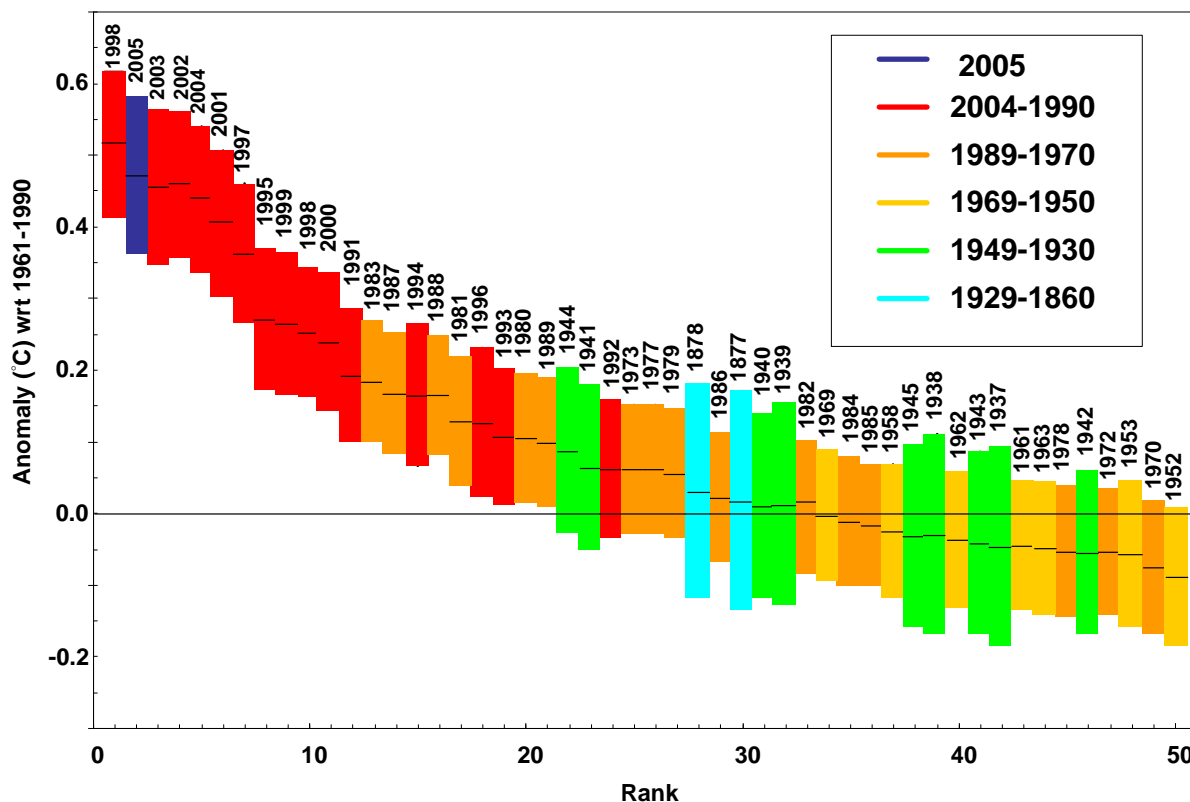
42. ábra. A Föld átlaghőmérsékletének alakulása 1880 óta (Forrás: WMO)



43. ábra. A területhasználat változása a Földön (Forrás:UNEP)



44. ábra. A Föld hőmérsékletének változása az utóbbi ezer év során, illetve különböző előrejelzések a 21. század végére (Forrás: IPCC)



45. ábra. A legmelegebb évek rangsora 1860 óta (Forrás: WMO)

17. táblázat. A legfontosabb antropogén hatások becsült következménye a Föld sugárzási egyenlegében 1750 óta (Mika J. 2002 alapján)

Elem, hatás	Elsődleges sugárzási hatás (W/m^2)	Bizonyosság mértéke
CO ₂	1.46	magas
CH ₄	0.48	magas
NO ₂	0.15	magas
Összes CFC és HCFC	0.34	magas
Troposzférikus ózon	0.35	közepes
Sztratoszférkus ózon	-0.15	közepes
Direkt aeroszolok	-0.50	alacsony
Direkt ásványi aeroszolok	-0.6 - +0.4	igen alacsony
Indirekt aeroszolok	-2.0 - 0	igen alacsony
Repülési csík	0.04	igen alacsony
Földhasznált (albedó) változás	-0.2	igen alacsony
Napállandó	0.3	igen alacsony

2.5.3. Az ózon kettős szerepe a légkörben

Az ózon sajátos szerepet tölt be a Föld légkörében. A sztratoszférában található ózon (az összes ózon kb. 9/10-e) uv-sugárzás szűrő szerepe szinte nélkülözhetetlen az élővilág számára. A magas légköri ózon teljes egészében kiszűri az élővilágra káros UV-C sugárzást (hullámhossz <290 nm), és jelentősen csökkenti a még szintén veszélyes UV-B sugárzás (290-320 nm) erősségét. A troposzférikus ózon azonban agresszív, oxidáló hatású üvegház gáz, a nagyvárosi szmog jellegzetes összetevője, azaz napjainkban növekvő mennyisége káros.

Az ózon fotokémiai reakciók hatására alakul ki, és igen gyorsan bomlik (20 °C-on 3 napos felezési idővel). Mindenkori mennyiségét a keletkezés, a szállítódás és a bomlás együttes szerepe határozza meg.

2.5.3.1. A sztratoszférikus ózon és az ózonlyuk

Az ózon függőleges eloszlása a légkörben azt mutatja, hogy legnagyobb sűrűsége éves átlagban a 25-30 km közötti magasságban alakult ki, azonban éven belül igen nagy különbségeket mutat. A sztratoszféra ózontartalmának mérésre a Dobson egységet² használják (a Földre jellemző átlag kb. 300 Dobson). Mivel az ózonképződés az intenzív UV-sugárzástól függ (a Föld tengelyferdesége miatti éves besugárzási változásokat is figyelembe véve), a képződés fő területe a trópusi területek feletti sztratoszféra. Ez elméletben azt eredményezné, hogy a legvastagabb ózonréteg az Egyenlítő környéki területek felett alakul ki. A valóságban azonban a légköri áramlások elszállítják az ózon egy részét. Így a trópusi területek felett 250-260 Dobson, ugyanakkor az Északi-pólus felett a tavaszi maximum idején márciusban 440 Dobson, a Déli-sarkvidék felett pedig (szintén a tavaszi maximum idején) 300 Dobson körüli értéket mértek. Ez azért meglepő kissé, mert a pólusokon télen nincs, illetve alacsony a sugárzás, így az lenne várható, hogy az ózon mennyisége ekkor lesz minimális. A látszólagos ellentmondást az oldja fel, hogy a trópusokon keletkező ózon a télvégi, tavasz eleji heves légmozgásokkal a magasabb földrajzi szélességek felé szállítódik (s ott területileg is összetorlódik). Az északi félgömbön az áramlások

² 1 Dobson azt jelenti, hogy normál nyomáson, tengerszintre vonatkoztatva a légréteg ózontartama 0,01 mm-nek felel meg.

el is szállítják azt a sarkvidékig, a déli félgömbön azonban az 50-60 szélességi foknál domináns nyugati szelek erősen korlátozzák az ózon eljutását az Antarktiszig.

A kutatók mind elméleti oldalról, mind számos részletes mérés³ segítségével keresték a területi és időbeli változások magyarázatát. Bár először felvetődött a lehetősége annak, hogy csupán egy légköri elkeveredési problémáról van szó – ezt azonban rövid idő alatt elvetették, és egyre inkább előtérbe került az ózontartás szerepe a változásokban.

Egyes kutatók (Molina és Rowland⁴) már az 1970-es évek elején rájöttek, hogy erős UV-sugárzás hatására a normál körülmények között olyan nem reakcióképes és nem tűzveszélyes klórvegyületek, mint az emberi tevékenység által nagy mennyiségben kibocsátott CFC-k⁵, ózontpusztító hatásúak, de ennek akkor még nem tulajdonítottak jelentőséget. Az első riasztó adatok 1983-ból származtak, amikor októberben 180 Dobsonnál kisebb értéket mértek az Antarktiszon (**46. ábra**). A „bomba” akkor robbant, amikor brit tudósok (Farman, Gardinar és Shanklin) a Nature 1985. májusi számában publikálták azokat a műholdas adatokat, amelyek az Antarktisz feletti ózonlyuk kialakulását mutatták be. Bár rövid ideig a NASA ezt még mérési hibának tartotta, a későbbi vizsgálatok az ózonzékonyodás tényét nemcsak megerősítették, de több évre visszamenőleg is kimutatták.

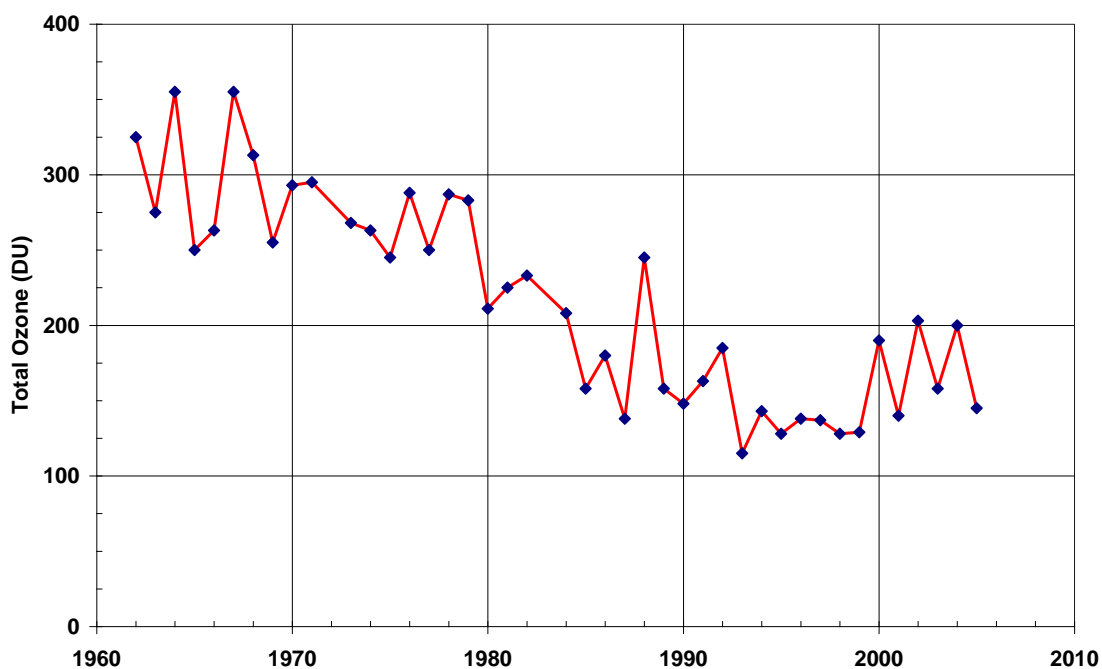
A kutatók bebizonyították, hogy a magaslégköri ózon bontásában a poláris sztratoszférikus felhők (PSZF) három fő csoportja játszik fő szerepet. Két felhőtípus esetében a kondenzációs magokra víz, azaz jég csapódik ki -87°C alatti hőmérsékleten. Ezek közül – ha gyors lehűlés során nagyobb jégkristályok képződnek – jellegzetesek a gyöngyházfelhők (nevüket sajátos fénytörésük nyomán kialakult színükről kapták). Másik csoportjuk esetén a lehűlés lassú, és igen apró jégkristályok alkotják, a felszínről alig észlelhetőek. Harmadik csoportjuk a salétromsav-trihidrát ($\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) felhők, amelyek megjelenéséhez már -78°C -os hideg is elég. A PSZF-k közül csak a gyöngyházfelhőket könnyű felismerni, a másik két fajtájuk inkább csak műszerekkel mutatható ki. Ezek a felhők nem rendkívüli jelenségek (a gyöngyházfelhőkről már évtizedek óta hírt adtak), jelentőségük azonban akkor nőtt meg, amikor a légköri átkeveredés során a sztratoszférába ózonkárosító anyagok is kerültek. Ezekben az igen

³ A légköri ózon mennyiségének felszíni vizsgálata 1956-ban az Antarktiszon indult (Halley-öböl), műholdas mérése az 1970-es évek elején kezdődött, majd ez 1978-ban a Nimbus-7 műhold üzembeállításával lett világméretű.

⁴ Molina, Rowland és Crutzen 1995-ben kémiai Nobel-díjat kaptak az ózon réteg pusztulásának elméleti tisztázásáért.

⁵ Ezeket a veszélytelennek tartott anyagokat 1928-tól gyártották és 1930-tól hűtőberendezésekben kereskedelmi hasznosításukra is sor került. Később spray-k hajtógázaként lettek népszerűek, s 1988-as felhasználásuk meghaladta az 1 millió tonnát.

alacsony hőmérsékletű felhőkben ugyanis, mint gyűjtőkben felhalmozódnak azok a klór és bróm⁶ vegyületek, amelyek a hőmérséklet tavaszi emelkedésekor felszabadulnak a fagyott jégkristályokból, majd az UV-sugárzás hatására átmenetileg felbomlanak, és miután részt vettek az ózon bontásában – eredeti állapotukba visszaalakulnak, azaz csak katalizátorként vesznek részt az ózon elbontásában⁷.



46. ábra. Az ózontartalom csökkenése az Antarktiszon október 15-31. közötti átlagok alapján (Forrás: NOAA CMDL)

Mint az előbb ismertettük, a PSzF-k kialakulásához igen alacsony hőmérséklet szükséges, s ez tartósan leginkább a nagy jégtömeggel rendelkező Antarktisz felett (a téli időszakban) tud kialakulni. A felhőkben felszabaduló vegyületek ózombontása azonban elindít egy visszacsatolási folyamatot is: mivel az ózon elnyeli a napfényt, ezáltal melegíti is a légkört, ha viszont csökken az ózonréteg a légkör lassabban melegszik föl, tovább fennmaradhatnak a PSzF-k, azaz nagyobb mértékű lehet hatásuk is. Jól mutatja ezt a 2006-os év, amikor a

⁶ A brómvegyületek főként tüztöltő készülékekből származnak, s együttes hatásuk kb. ötöde a klórkészítményeknek.

⁷ Az ózombontás részletes kémiai hátterét sok szakirodalom is leírja. Jó áttekintés kapható például O. B. Toon és R. P. Turco tollából a Tudomány c. azóta megszűnt folyóirat 1991. augusztusi számában, megtalálható a <http://www.sulinet.hu/tananyag/97410/on/mkm/abc/fuggelek/cikkek/fogyo.htm> címen, s jól használható a <http://www.nas.nasa.gov/About/Education/Ozone/chemistry.html> is.

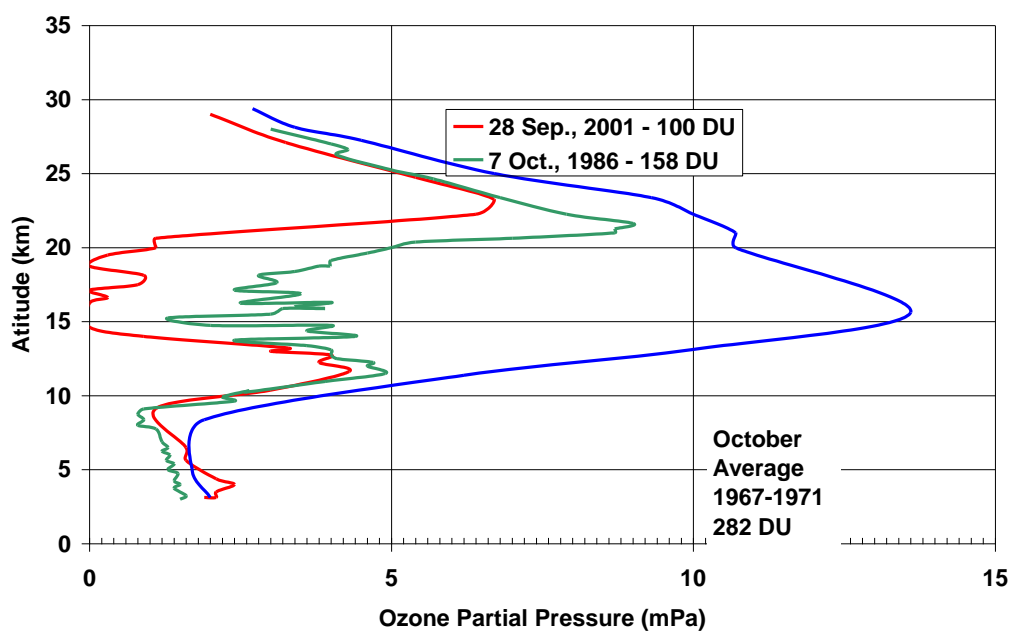
korábbiaknál később indult meg az ózonbontási folyamat, de így rekord méretű ózonlyukat (bővebben lásd később) eredményezett.

Ha megvizsgáljuk az ózonkoncentráció időbeli és vertikális változását, illetve azok kapcsolatát a hőmérséklet alakulásával, meggyőződhetünk a PSzF-nek tulajdonított szerep fontosságáról. A Déli-sarkra 2001-ből rendelkezésre álló napi adatok⁸ azt mutatták, hogy az ózontartalom maximuma a nyári időszakban (december, január) alakult ki (280 Dobson körül), s a legnagyobb koncentrációja 18-23 közötti magasságban fordult elő – ekkor a hőmérséklet mínusz 40°C-nál melegebb volt a 10 km-nél magasabb tartományban. Az ősz és a tél folyamán, a besugárzás csökkenésével igen lassan csökkent az ózontartalom (a csökkenés a felsőbb régiókból folyamatosan az alsóbbak felé haladt), de még a déli félgömb tavaszának kezdetekor is 220 Dobson körül alakult. Időközben a hőmérséklet jelentősen csökkent a 12-15 km-nél magasabb légrétegekben, s legalább 4 hónapig a mínusz 90 és mínusz 70 °C közötti tartományban maradt. A tavasz kezdetén a hőmérséklet gyorsan emelkedni kezdett a 15-30 km-es tartományban, s ez drámai gyorsaságú változásokat indított el az ózontartalom csökkenésében. Alig több mint két hét alatt az ózommennyisége 220-ról 120 Dobsonra esett, majd azután lassabb ütemben csökkent tovább, miközben a 15-20 km-es magasságban teljesen meg is semmisül. Ebben az időszakban szabadultak fel a PSzF-rezervoárokban a korábbi hónapok során felhalmozódott ózonbontó gázok. A növekvő besugárzás hatására növekedett az ózonképződés, és a nyár elejére már 250 Dobson körüli érték alakult ki. Az éves változási tendenciában több alkalommal megfigyelhetők voltak olyan rövid időszakos változások, amelyek a trópusi területek felőli ózonszállításra utalnak.

A mérések azt mutatják, hogy az ózoncsökkenés fent leírt folyamata csak az 1980-as évek óta következik be ilyen drámai mértékben (**47. ábra**). Ez volt az az időszak, amikorra az ózonbontásban szerepet játszó antropogén szennyezőanyagok nagyobb mennyiségben feljutottak a sztratoszférába. Az ábrán is látható (és számtalan mérési adat is bizonyítja⁹), hogy a földi élet szempontjából legfontosabb 15-25 km-es magasságban már olyan mértékű fogyás is rendszeresen előfordul, ami az ózon teljes mennyiségének eltűnéséhez vezet ebben a tartományban.

⁸ Lásd: http://www.cmdl.noaa.gov/ozwv/ozsondes/spo/ozone_anim2001.html

⁹ A <http://www.cmdl.noaa.gov/ozwv/ozsondes/spo/> oldalon a vertikális ózonváltozás profiljai tanulmányozhatók 1997 óta, s animáltan is 1999-től kezdődően.



South Pole Ozone at Maximum Depletion

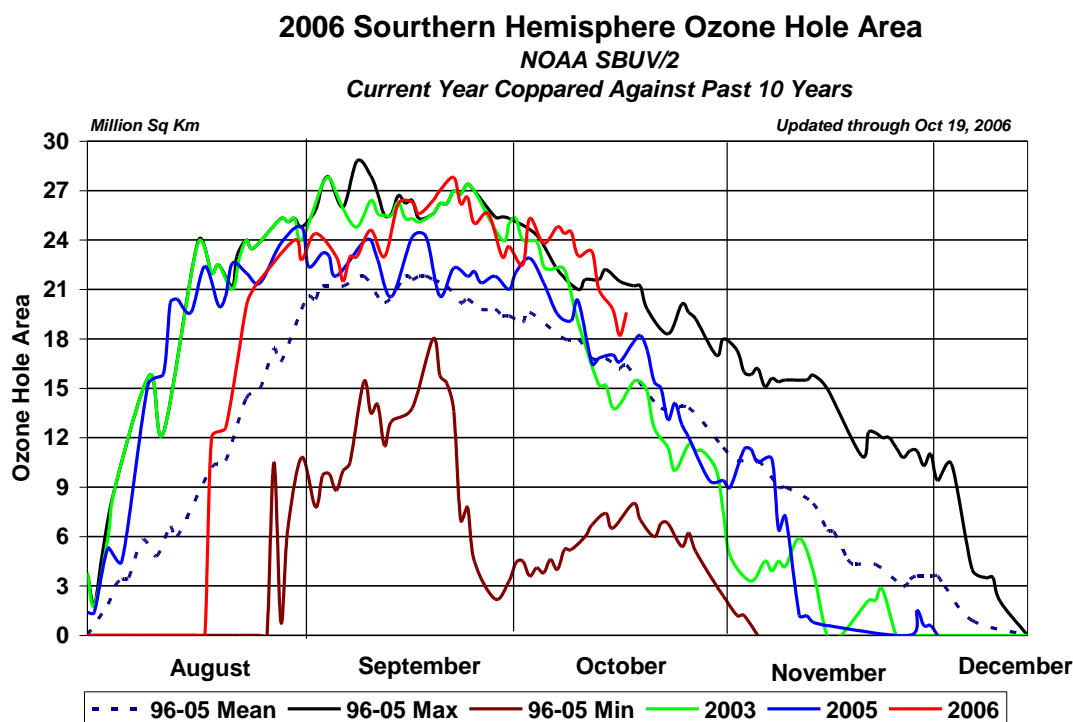
47. ábra. Az ózon-eloszlás vertikális profiljának változása a Déli Sarkon (NOAA CMDL)

Az ózonréteg jelentős elvékonyodását ózonlyuknak nevezik. Ez azonban nem jelenti az ózonréteg teljes hiányát, csak annak nagy mértékű csökkenését. *Jelenleg a kutatók a gyakorlatban a 220 Dobsonos érték alatti területeket tekintik ózonlyuknak.*

A 2000-es évek elején úgy tűnt, hogy az ózonkárosító anyagok nemzetközi egyezményekben rögzített (lásd később) kibocsátásának csökkenése közel két évtized után meghozta a kedvező eredményt, és csökkent az ózonlyuk kiterjedése valamint időtartama is. Néhány – ingadozásokkal jellemezhető év után azonban egyre inkább úgy tűnik, a kedvező jelek csak átmenetiek voltak (**48. ábra**). Erre utal, hogy a Déli-sark körüli területeken az eddig megfigyelt legnagyobb kiterjedésű ózonlyuk 2006-ban képződött, területe mintegy 29 millió km² volt (a korábbi maximum 1998-ban 26 millió km²), az ekkor mért 85 Dobson minimum érték a valaha észlelt második legkisebb. Az ózon változásának folyamatát ma már napra készen követhetjük¹⁰.

¹⁰ A <http://www.antarctica.ac.uk/met/jds/ozone/#data> internetes címen 1997/1998-as adatoktól kezdődően megtalálhatók az éves ózonlyuk-kialakulási animációk. A <ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/images/> címen archív napi térképi adatokat találhatunk.

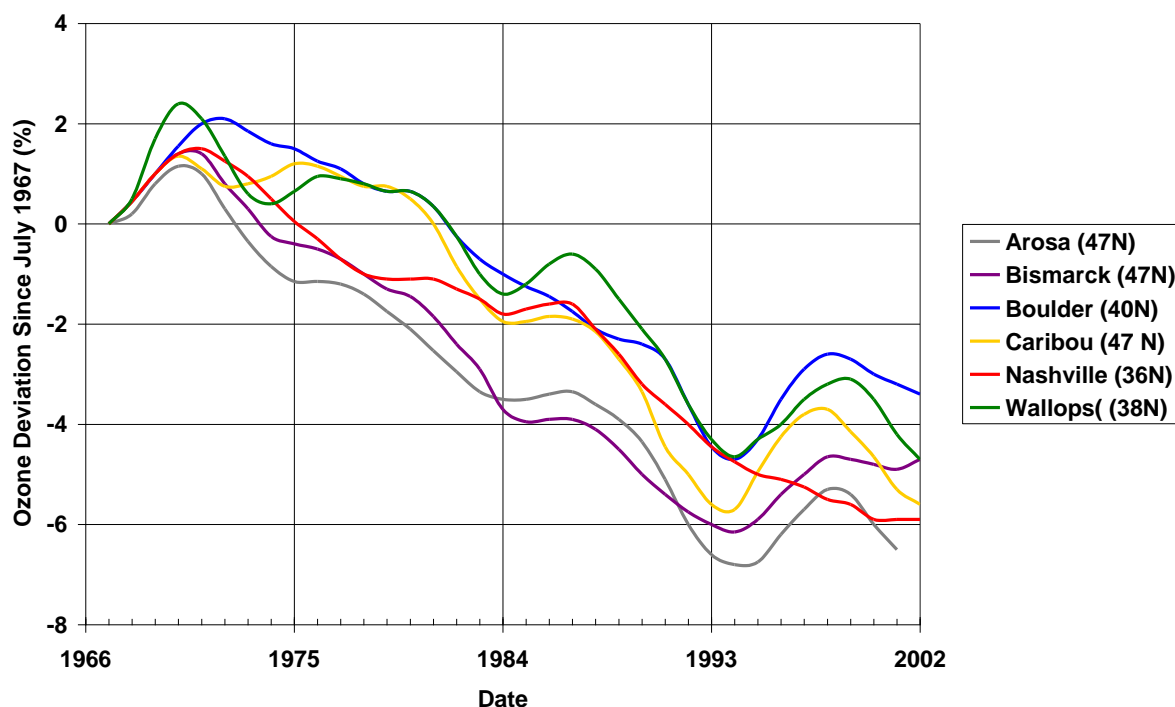
Feladat: Állapítsa meg az elmúlt évi ózonlyuk hozzávetőleges nagyságát és időtartamát, és készítsen friss ábrát az ózon területi eloszlásáról! (A megjelölt internetes források használatával)



48. ábra. Az ózonlyuk nagysága és időbeli kialakulása a Déli Sark környezetében

Az Északi-pólus környezetében – miután itt a lehülés némileg elmarad az antarktiszitól – csak rövidebb ideig figyelhetők meg PSzF-k. Így hiába keletkeznek az északi féltekén az ózonkárosító anyagok nagyobb része, azok a sztratoszférában itt kevésbé tudnak megkötődni, s ezért juthatnak el a déli tájakra is. Ez az oka annak, hogy bár az ózonréteg vékonyodása az északi félgömbön is megfigyelhető (**49. ábra**), sőt akár ózonlyuk kialakulhat időnként, annak mind kiterjedése, mind a vékonyodás mértéke és időtartama elmarad az Antarktisz fölöttitől.

Az Északi-sarkvidék fölött sokáig nem volt jellemző az ózonréteg drámai elvékonyodása. A tudományos közvéleményt éppen ezért érte váratlanul a 2004 tavaszán tapasztalt 60%-os, az északi félgömbön rekordméretű ózonfogyatkozás. Igaz korábban (1995-96 igen hideg télén) már regisztráltak nagy, az északi félgömb 45%-ra kiterjedő ózonvékonyodást. Ekkor 1996 februárjában csökkent 37%-kal az ózonréteg vastagsága az Arktisz felett, az európai rekordot pedig – 47%-os ózonritkulással – Nagy-Britannia fölött mérték. A gond azonban itt az, hogy egy antarktiszhoz hasonló ózonlyuk több mint 700 millió embert tenne ki veszélyes mértékű UV-sugárzásnak!



49. ábra. A sztratoszférikus ózon csökkenése az északi félgömb közepes földrajzi szélességein (Forrás: NOAA CMDL)

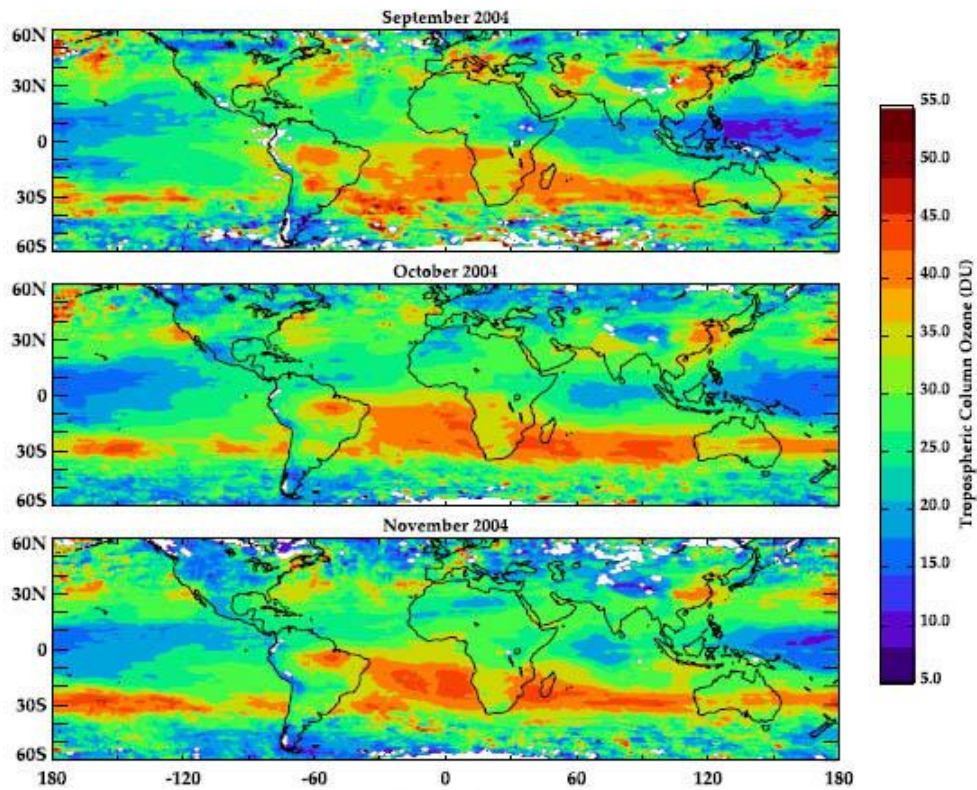
2.5.3.2. A troposzférikus ózon

A felszínközeli légrétegekben (a troposzférában) a napsugárzás, illetve egyes szennyezőanyagok kémiai reakciói során szintén képződik ózon. Azonban az általánosan elterjedt felfogással szemben („kellemes ózondús levegő”) a troposzférában az ózon agresszív, oxidáló anyag, és azon kívül üvegházhatású gáz is, azaz káros légköri összetevő. Kimutatták, hogy az olyan fotokémiai oxidánsok, mint az ózon, már $0,5 \text{ mg/m}^3$ koncentrációban is komoly fizikai- és szellemi teljesítménycsökkenést okozhatnak.

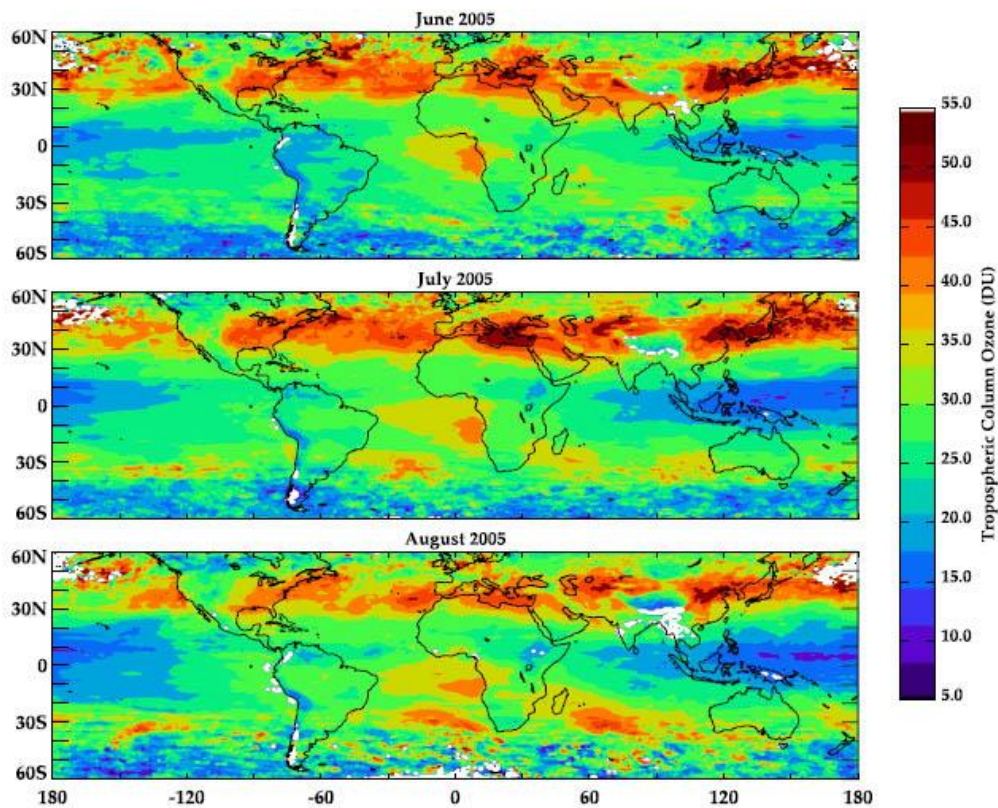
A napsugárzás szerepe miatt az ózon keletkezésében kimutatható egy éves (földrajzi szélességtől függő Nap magassági változás – **50. ábra**) és egy napos (nappalok és éjszakák) periódussal jellemezhető ciklikus változás (**51. ábra**, **52. ábra**, **53. ábra** és **54. ábra**). Az **51. ábra** az is jól látható, hogy a mindenkori felhőzet némileg módosíthatja az értékeket, de annak jellemzője lényegesen nem változik. Ezen túlmenően a közlekedésből és ipari szennyeződésekkel szembeálló ózonszennyezés még akár kialakíthat harmadlagosan egy heti periódust is.

A részletes adatok azt mutatják, hogy a troposzférikus ózon mennyisége (főként urbanizáltabb területek környezetében) növekvő tendenciát mutat (lásd **52. ábra** és **54. ábra**).

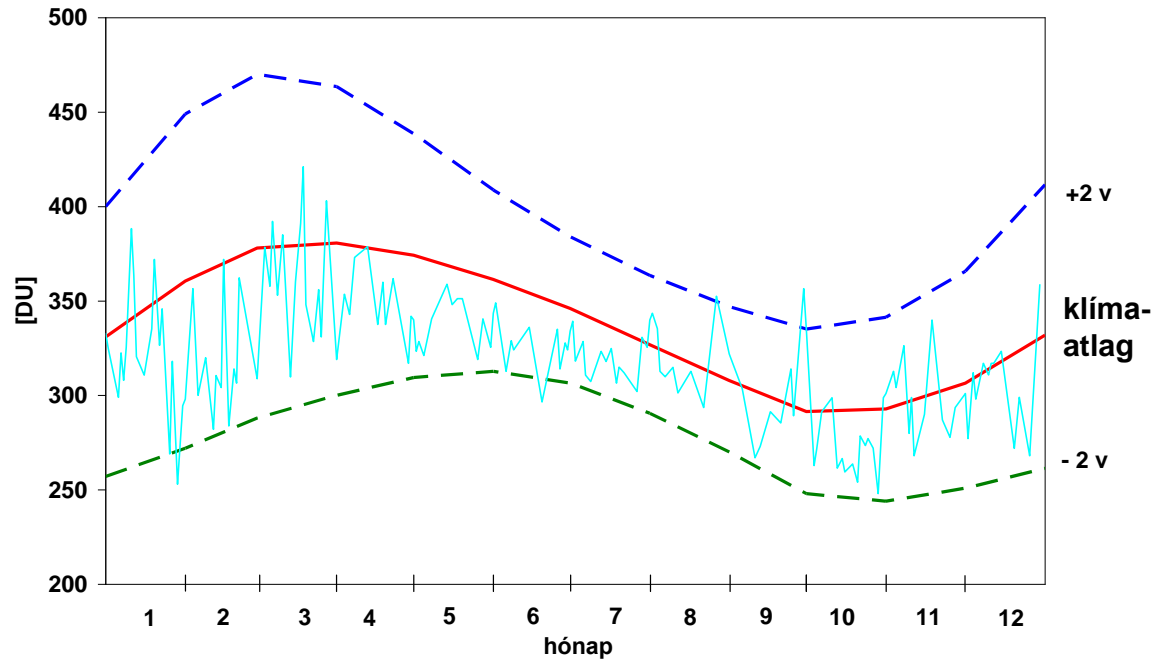
a)



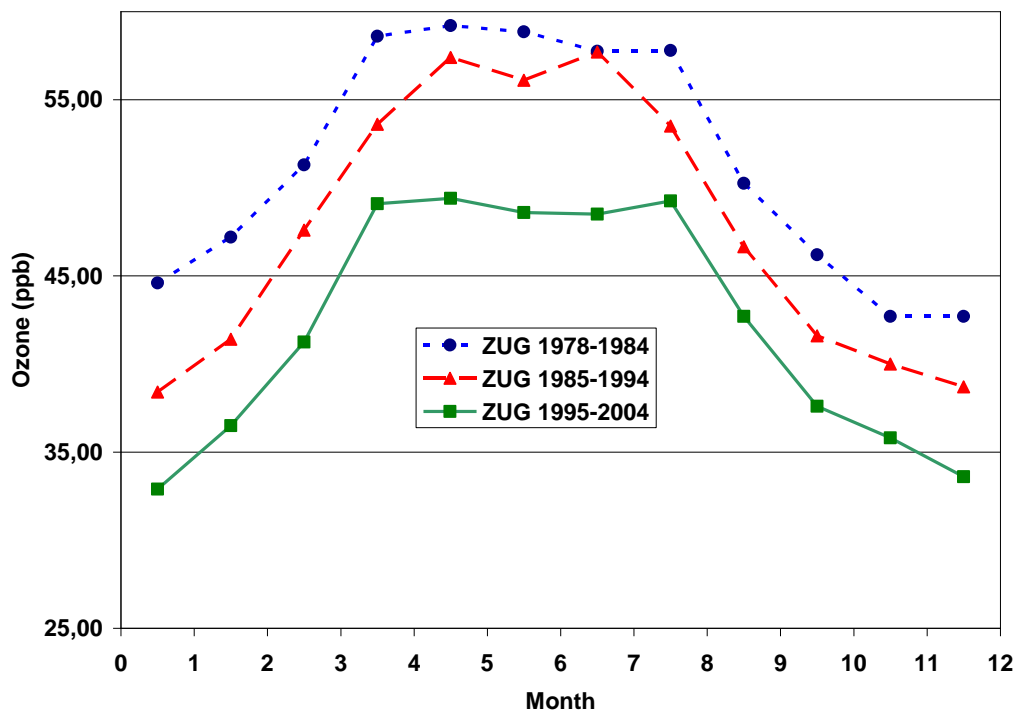
b)



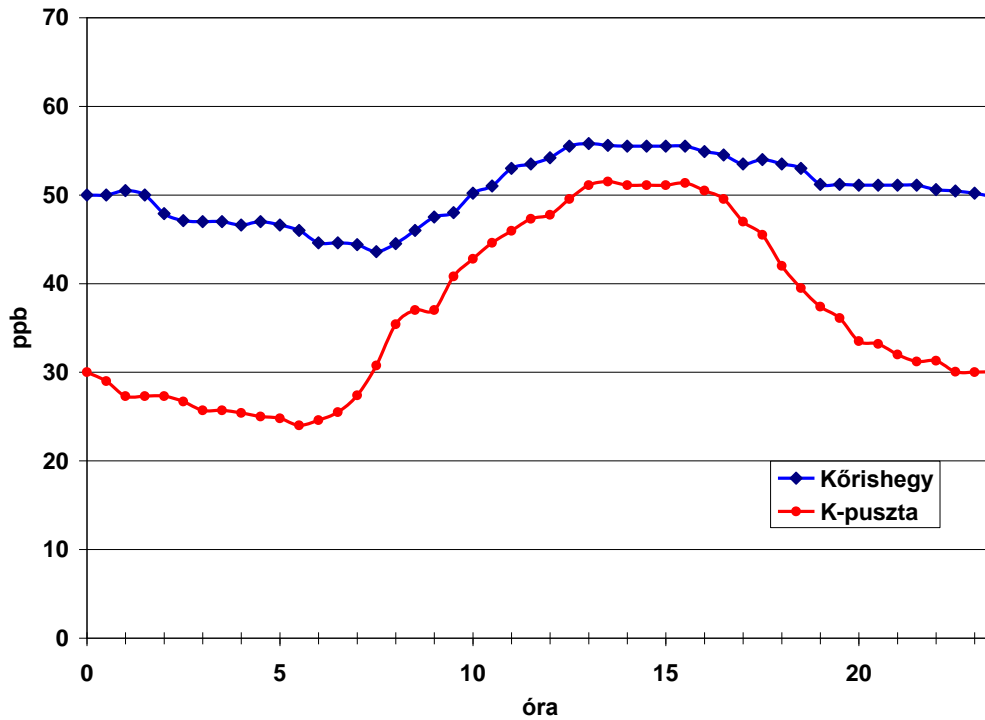
50. ábra. A troposzférikus ózon mennyiségének változása évszakosan (a Nap magasságtól függően)(Ziemke at al 2006)



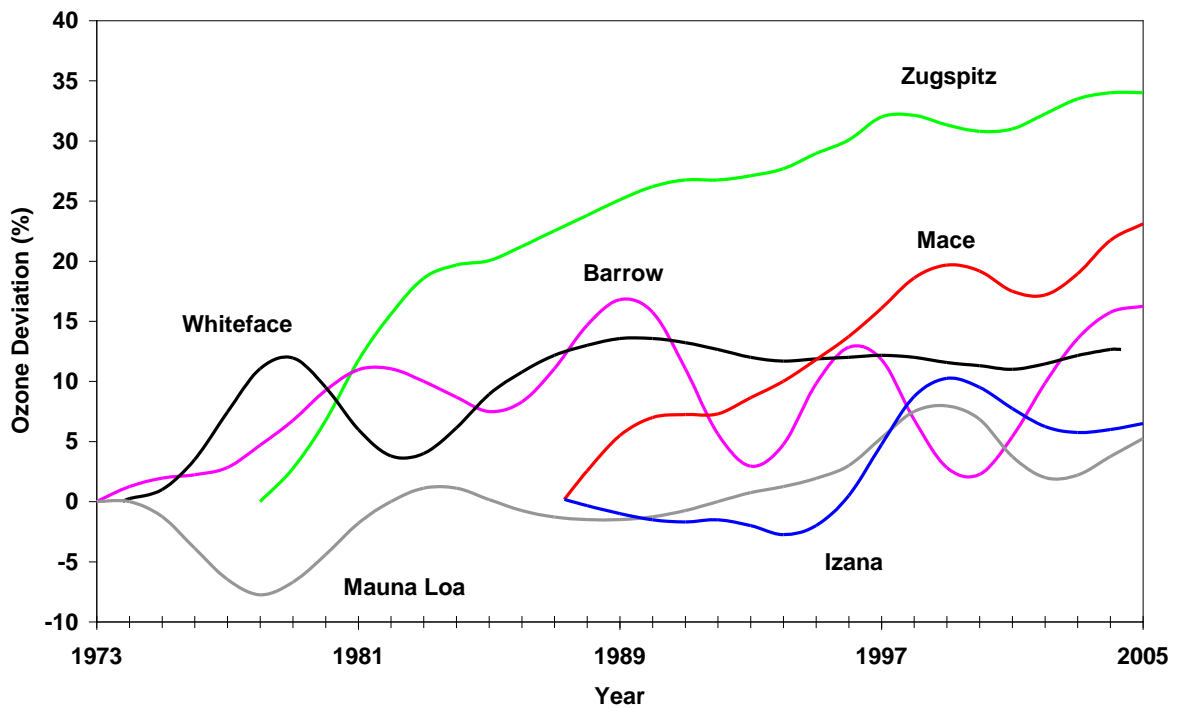
51. ábra. A troposzférikus ózon változásának évi jellege Budapesten (1995) (Forrás: Tóth Z. 1996)



52. ábra. A troposzférikus ózon változásának évi jellege és évtizedes trendje a Zugspritze mérőállomáson (Oltmans at al 2006)



53. ábra. A troposzférikus ózon változásának napi menete két hazai mérőállomáson (2003. április) (Forrás: Sándor V. 1996)



54. ábra. A troposzférikus ózon változása az északi félgömb mérőállomásain (Oltmans at al 2006)

2.5.4. A légkör, mint szennyezés szállító közeg, savas esők

A levegő a legmobilabb szállító közeg, benne gyorsan, nagy távolságra, és terjedésében csak alig korlátozva szállítódnak a szennyező anyagok. Ennek egyik fontos következménye, hogy a légkörbe kerülő szennyezést nem feltétlenül a kibocsátó „élvezi”. Egy másik következmény, hogy a hosszú légköri tartózkodású légszennyezők elkeveredve a levegőben, globális léptékűvé változtathatják a helyi és regionális hatásokat (lásd üvegházgáz, vagy ózon probléma).

A légszennyezések terjedése jól mérhető és sokszor látványosan be is mutatható úrfelvételek segítségével. Ilyenek lehetnek nagy szelek porszállításai, a vulkánok tevékenysége, erdőtüzek, vagy akár egy-egy területet tartósan „megülő” szmogok. Nagy vulkáni kitörések¹¹ közvetlenül is a sztratoszférba juttatnak szennyező anyagokat (főként kéndioxidot), így azok hatása a Föld sugárzásegyenlegében jelentős hatást okoz (ezek az aeroszolok akár 1-2 évre is csökkenthetik a besugárzást).

Miután az emberiség életminősége jelentősen függ a levegő minőségétől, nagy jelentősége van annak is, hogy a felszín közeli légszennyezések változásáról, annak térbeli összefüggéseiről megbízható információink legyenek. Jól szolgálják ezt műholdas mérések¹² és a felszíni mérőállomások¹³ rendszere.

A troposzférában lezajló szennyeződések szállításához köthető a *savas esők* problémája. A jelenség a világ számos táján érzékelhető, mégis több elemében lényegesen különbözik az eddig bemutatott globális légköri problémáktól. Az egyik az, hogy nem egységes globális probléma, hanem olyan hatalmas területekre kiterjedő regionális problémák együttese, amely nem érinti a világ minden táját (inkább csak az ipari és urbanizált területek tágabb környezetében jelentkezik). A másik különbség, hogy a savas esők kialakulását inkább olyan gázok eredményezik, amelyeknek légköri tartózkodási ideje rövidebb, jellemzően az alsó légkörre, a troposzférára korlátozódik hatásuk.

Egyes iparosodott területeken már a 17. században felfigyeltek a savas légszennyezésekre. A légkörben található kénvegyületek káros hatásaira már a 19. század második felében felhívták

¹¹ A légszennyezésekre vonatkozó vulkáni adatbázis (<http://toms.umbc.edu>) jelenleg (2006 vége) a 1979-2003 közötti időszakból 70 vulkán 274 kitöréséről tartalmaz adatokat

¹² A http://toms.gsfc.nasa.gov/aerosols/aerosols_v8.html címen látványos tematikus (por, füst, hamu) példák mellett napi aeroszol adatokat is beszerezhetünk 1978-tól kezdődően.

¹³ Jól eső érzéssel tapasztaljuk, hogy a referencia állomások között ott szerepel a Kecskemét melletti K-puszta is (igaz kissé elírva). Lásd <http://www.cmdl.noaa.gov/aero/net/index.html>

a figyelmet, később az 1950-es évek elején néhány extrém nagyvárosi légszennyezés során a kutatók már vizsgálták a csapadékok kémiai tulajdonságait, mégis a savas esők problémája csak az 1970-es évek második felében robbant a köztudatba. Jelenleg használt nevén csak 1978-tól említik a jelenséget, majd az 1980-as évek közepén már cikkek ezrei foglalkoznak vele.

Mit is értünk a savas esők fogalmán? A normál csapadék pH-ja 5 és 6,5 között változik, ezért azokat a csapadékokat tekintjük savas esőknek, amelyeknek értéke 5-nél kisebb (a tengervíz átlagos pH-ja 8,6). Az esők savasságát okozó gázok (kén- és nitrogénoxidok) elsősorban a fosszilis tüzelőanyagok elégetése és ipari tevékenységek során kerülnek a levegőbe. Ezek a gázok a felhőkben levő vízgőzzel kénsavat, illetve salétromsavat képezhetnek, s így megváltoztatják a lehulló csapadék pH-ját. Kezdetben a savas esők megjelenését (illetve például az általuk kiváltott erdőpusztulásokat) természetes jelenségnek gondolták, s csak a részletesebb vizsgálatok derítették ki valódi természetüket. (Az igazsághoz persze hozzátartozik, hogy a vulkánok által levegőbe juttatott kén természetes úton is előidézi a savas esőket.)

Globálisan a savas esők 60-70%-áért a kén tartják felelősnek – s ennek kb. 9/10-e emberi beavatkozás következménye. A felhasznált kőszénekben általános a 2-3 %-os kén tartalom, ami az égetés során SO_2 formájában a levegőbe kerül. A második legfontosabb kénforrás a fémkohászat, a harmadik – már természetes szennyezőként – a vulkánosság, majd a szerves anyagok bomlása említhető. A salétromsav képződéséhez szükséges nitrogénoxidok levegőbe juttatásáért kb. 95%-ban felelős az emberi tevékenység. A legfontosabb NO_x források: a szén, a kőolaj és a földgáz felhasználás (égetés, közlekedés, vegyipar), a műtrágyázás, a talajbaktériumok és az erdőtüzek.

Az imént felsorolt fő szennyező források is mutatják, hogy miért éppen az ipari és nagyvárosi térségek azok, ahol leginkább jelentkezik a savas esők hatása. Szélsőséges esetekben az esők pH-ja akár 2-2,5-ig csökkenhet, ami valójában néhányezerszerese a természetes esők savasságának. A szennyezések hatásterülete a fő szélirányoknak megfelelően alakul ki. A kéndioxidok akár 1500-3000 km-ig jelentős hatást okoznak, a nitrogénoxidok pedig vélhetően még nagyobb távolságokra is eljutnak. Ez az oka annak, hogy a skandináviai országok savas esőieért jórészt a brit szennyezések felelősek, illetve a Japánban jelentkező kénszennyezés mintegy harmadrészben Kína területéről származik.

Az, hogy milyen mértékben lesz savas a csapadék, a levegőben levő anyagok koncentrációján túl, a meteorológiai körülményektől is függ. Mivel az esőben oldott anyagok savak mennyisége függ az esőcseppek méretétől, élettartamától és hőmérsékletétől, általában az figyelhető meg,

hogy a felhő savasabb, mint az eső, az eső savasabb, mint ha hó formájában hullik le a csapadék, egy nyári zivatar pedig savasabb, mint a csendes eső.

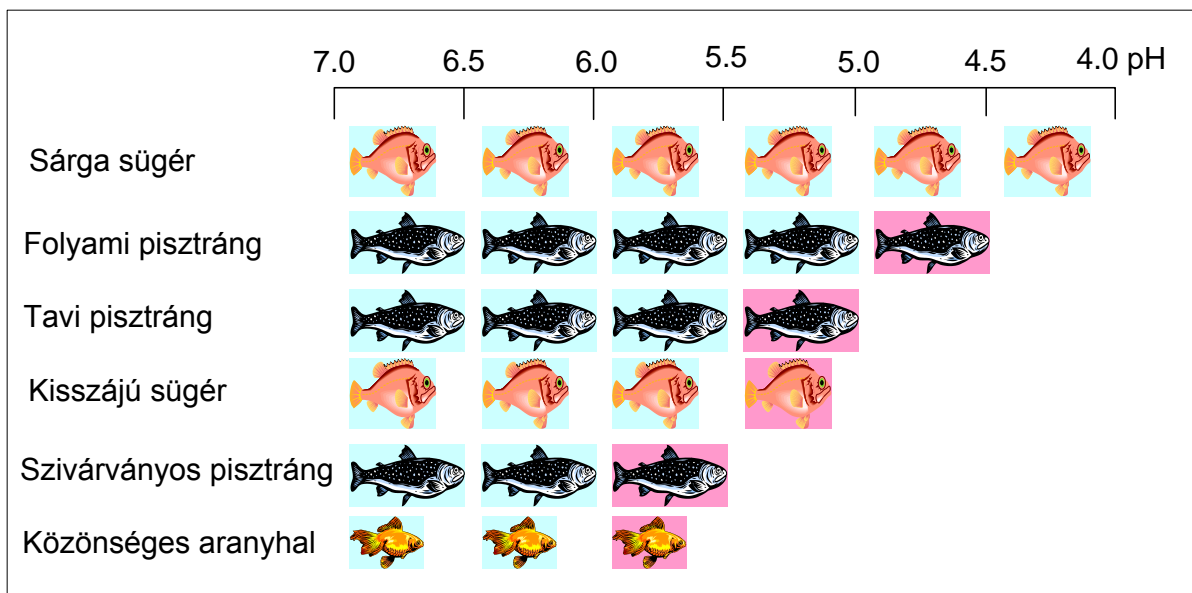
A savas esők sajátos, de nem ritka esete az ún. *száraz ülepedés*. Ilyenkor a levegőben levő savanhidridek, a légkör szárazsága miatt, nem tudnak közvetlenül savvá alakulni, hanem a levegőből kiülepednek, és később nedvességhez jutva fejtik ki savas hatásukat. Jelen sorok írójának 2001 tavaszán meghökkentő „találkozása” volt ezzel a jelenséggel. Mexikóvárosba érkezve fél nap után véres váladék jött az orromból, s rövidesen kiderült társaim is hasonlóan jártak. Ekkor döbrentem rá, hogy ez nem másnak, mint a száraz ülepedésnek következménye. A világváros ugyanis nagyon szennyezett levegőjű, s a száraz évszakban jelentős szmog alakult ki, a savanhidridek ott lebegtek a levegőben, majd ezek orrunk nyálkahártyáján jutottak nedvességhez, s itt alakultak erős savakká. A problémánk Mexikó City-t elhagyva megoldódott, de máig meg maradt a kellemetlen érzés: az ott (illetve a hasonló körülmények között) élőknek mennyit vesz el az életéből ez a rendszeresen ismétlődő állapot. És ez csak egy volt a savas esők változatos következményei közül.

Furcsa ellentmondásnak tűnhet, pedig igaz: sokszor a levegőben levő szennyező anyagok csökkenthetik a savas esők hatását. Ismét saját tapasztalatot ismertetve. 2006 nyár elején Pekingben jelentős méretű szmog ülte meg a várost és környezetét, és ekkor mégsem tapasztaltam a Mexikóvárosban jelentkezett tüneteket. Ennek magyarázata, hogy a belső-kínai löszterületek felől érkező finom por mésztartama a levegőben reakcióba lép a savanhidridekkel, így azok csak részben tudják kifejteni „klasszikus” hatásukat. (A tapasztalt szmog mérete számomra kérdésessé tette, vajon helyesen választották-e meg a következő olimpia színhelyét?) A savas esőkkel foglalkozó kutatások ugyan feltárták, hogy (a széndioxidon túl) főként a kén és a nitrogén oxidok a felelősek a savasságért, de a helyi körülmények függvényében tovább bővíthető a „bűnösök” listája. Néhány szénfajta klórt is tartalmazhat, amiből sósav képződhet, intenzív állattenyésztést folytató területeken a trágyából ammónia szabadulhat fel, ami később nitrogénoxidokká alakulhat, az iparhoz vagy a közlekedéshez kapcsolódva pedig illékony szerves vegyületek szabadulhatnak fel. A fák károsodásáért sokszor a fotokémiai szmogban képződő ózon tehető felelőssé (egyes becslések szerint Európa faállományának negyede leveleinek legalább 25%-át veszítette így el).

A savas esők közvetlenül és közvetett módon is fejtik hatásukat. *Közvetlenül* úgy (az iménti példákon túl), hogy lehullva (kiülepedve) károsítják a növényeket, építményeket. Hatásukra jelenős erdőterületek szenvednek kárt vagy pusztulnak ki, építmények (illetve díszítéseik) roncsolódnak. Mexikóban például egyes maja romoknál azt tapasztalták, hogy 12 évente akár

1 mm is lemaródhat azok felszínéről. A vizes területekre hulló savas csapadék pedig, akár olyan mértékben meg tudja változtatni egy tó pH-ját, hogy annak élővilága részben kipusztul. Kanada mintegy 300 ezer tavából, több mint 14 ezernek változott meg oly mértékben a vízminősége a savas esők hatására, hogy halállományuk szignifikánsan megváltozott (**55. ábra**).

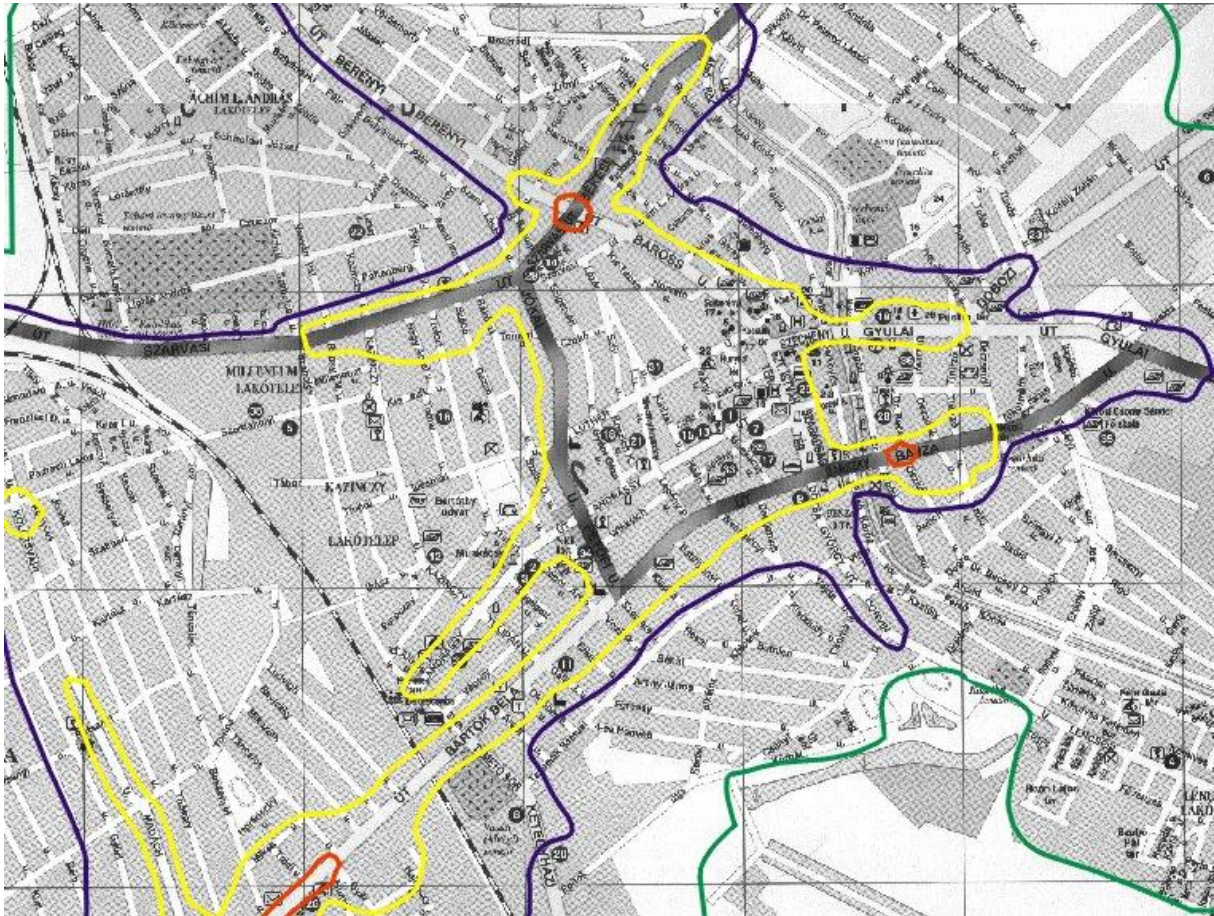
Közvetett módon a legjelentősebb károkat a talajok károsításával okozzák a savas esők. A talajok pH-jának csökkenése során előbb a – növények fejlődése szempontjából fontos – kalcium- és magnézium sók oldódnak ki, a pH további csökkenése során azonban már oldatba kerülhetnek olyan az élővilágra veszélyes ionok is, mint az alumínium vagy a kadmium. A pH-változással együtt elpusztulnak a talajbaktériumok és a talajlakó férgek, csökken a talajok biológiai aktivitása, a felszínre kerülő szerves anyagok lebontása lelassul, miközben jelentős tápanyag kerül ki a természetes körforgásból. Komoly problémát jelent, hogy a folyamat sokáig rejtve maradhat, s csupán apró jelei észlelhetők. Az erdő ugyanúgy zöld marad, de benne csökken a fák növekedési üteme, esetleg csak a pH változásra kevésbé érzékeny fajokra korlátozódik, s lassú változás kezd kialakulni a fajösszetételben. Példaként említhető, hogy az Appalache-hegységben (USA) a tölgyfák pusztulási aránya 1960 és 1990 között duplájára nőtt. Németországban főként a fenyők, Magyarországon az 1980-as években pedig a lombos erdők (különösen a kocsánytalan tölgy) szenvedtek jelentősebb károkat.



55. ábra. Néhány halfaj alkalmazkodóképessége a víz pH-változásához (USEPA)

Mivel egyes élőlények (növények) érzékenyen reagálnak a légszennyezés változásaira, bioindikátorként is használhatóak. Például a városi légszennyezettség mértékének jó indikátorai a zuzmók, amelyek főként a kénszennyezettségre érzékenyek. Elterjedésük vizsgálatával mintegy vázlatos képet kaphatunk egy-egy nagyváros levegőminőségének területi részleteiről,

változásának tendenciáiról (56. ábra). A dohánylevél a troposzférikus ózon estén használható indikátorként.



56. ábra. Békéscsaba zuzmó-térképe 2002-ben (SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Készítette: Kalmár G.)

Jelmagyarázat: piros: zuzmó sivatag, sárga: erősen károsodott terület határa, kék: mérsékelt károsodott terület határa, zöld: károsítatlan területek.

2.5.5. Nemzetközi egyezmények a légkör védelmében

A légkörben bekövetkezett kedvezőtlen változások ráirányították a figyelmet az emberiség közös felelősségére ezekben a folyamatokban. A tudományos kutatások több területen feltárták a konkrét összefüggéseket is, mégis az átfogó, nemzetközi megállapodásokon nyugvó cselekvés – főként gazdasági okokra hivatkozva – igen különböző mértékben valósul meg. Jól mutatja ezt, hogy az üvegházhatású gázok növekedésének várható következményeit már több mint száz éve leírták, a megoldáshoz vezető közös cselekvés mégis igen vontatottan zajlik

(elfogadott megállapodás ellenére is). Ugyanakkor az ózonlyuk regisztrált felismerése gyors megállapodáshoz vezetett, aminek kedvező „kézzel fogható” eredményeit is tapasztalhatjuk

2.5.5.1. Egyezmények az üvegház hatású gázokról

A 20. század utolsó harmadában a két fontos dolog kiderült a Föld alsó légköréről: első sorban az emberi tevékenységek következtében az üvegházhatású gázok mennyisége lényegesen megnőtt, másrészt a hőmérséklet az utóbbi száz év alatt kb. 0,6 °C-ot emelkedett. Ezeket a tényeket kevéssé lehet vitatni, ugyanakkor a két jelenség közötti oksági kapcsolatot – a sok nehezen számszerűsíthető visszacsatolási folyamat miatt – nehéz volt egyértelműen bizonyítani. A számtalan figyelmeztető jel mégis elindított egy globális együttgondolkodási és cselekvési folyamatot.

Ennek első látványos eredménye az 1992-es *Riói Konferencián elfogadott ENSZ Éghajlatváltozási keretegyezmény*. Előzetesen a világ közvéleménye azt várta, hogy egy olyan egyezményt fogadnak el, amely konkrét célok megjelölésével garantálni fogja a legfőbb bűnösnek tartott szén-dioxid csökkentését. Az elfogadott egyezmény végül egy sajátos kompromisszum lett a kibocsátás stabilizálását (2000-ig) 1990-es szinten vállaló Európai Közösség és az ezt határozottan elutasító Egyesült Államok álláspontja között. Ez az oka annak, hogy ekkor konkrét határidő és határértékek helyett a korábbi szinten való stabilizálás szükségességére utal az egyezmény. Úgy gondolták, hogy a tényleges kötelezettségvállalásokat majd a keretegyezményhez kapcsolódó külön jegyzőkönyvek tartalmazzák. A fejlődő országok ugyanakkor fenntartásaikat hangoztatták, mert attól féltek, hogy gazdasági fejlődésük, és ezen keresztül életszínvonaluk javulása veszélybe kerül, ha kötelezettséget vállalnak a szén-dioxid kibocsátás stabilizálására. Így a kompromisszum része az is, hogy nem kötelezi a fejlődő országokat konkrét vállalásra (elismerve a fejlődők sajátos helyzetét és a további fejlődésre vonatkozó igényeiket), de nem jelölt ki csökkentési arányokat a fejlett országoknak sem. A volt szocialista országok engedményeket kaptak az üvegházhatású gázok csökkentésének ütemezésében. Az egyezmény tartalmazza „a közös, de megkülönböztetett felelősség elvét” valamint azt, hogy a fejlett országoknak kell vezető szerepet játszaniuk az éghajlatváltozással összefüggő problémák megoldásában. A keretegyezmény sürgette, hogy a fejlődő országok kapjanak nagyobb pénzügyi és technológiai támogatást a széndioxid-kibocsátás minimalizálásában. Végül, bár az egyezményhez az ENSZ tagállamainak döntő többsége csatlakozott, csak 37 fejlett és átalakuló gazdaságú ország vállalt elvi kötelezettséget.

A keretegyezmény elindított egy folyamatot. Az 1995-ös *berlini klíma konferenciára* már valami megmozdulni látszott. A biztosítási ágazat komolyan felvetette a globális klímaváltozás szerepét a szaporodó természeti katasztrófákban, az óceáni szigetországok pedig egyre határozottabban fogalmazták meg félelmeiket a világtenger szintjének növekedésében. Ugyanakkor egyre élesebben vetődött fel a fejlett országok megosztottsága (a többség nem vállalja fel az USA önző álláspontját).

A tétova kezdethez viszonyítva forradalminak tűnő változást hozott az ENSZ Éghajlat-változási keretegyezményéhez kapcsolódó *Kiotói Jegyzőkönyv*¹⁴ elfogadása (1997). Ebben már 38 önálló ország valamint az Európai Unió konkrét kötelezettségvállalásokat tett, s elsősorban az USA kezdeményezésére speciális rugalmassági szabályokat is elfogadott. Általános elvként elfogadták, hogy a kibocsátás-csökkentés bázis időpontja 1990¹⁵ és az emisszós korlát hat gáz együttesére (CO₂, CH₄, N₂O, HFC-k, PFC-k, SF₆) vonatkozik¹⁶, ezeket együttesen CO₂ egyenértékre számolják át (global warming potential), és a vállalással rendelkező országok kibocsátási jogokat is kapnak. A rugalmasabb megvalósítást öt mechanizmus biztosítja:

Időbeli rugalmasság. Ez azt jelenti, hogy a teljesítést nem egy kiválasztott év során, hanem öt év átlagában kell teljesíteni.

Emissziós rugalmasság. A hatféle gáz belső emissziós arányai tetszőlegesen változhatnak, csak a teljes emissziós egyenérték betartása szükséges.

„Nyelők” kérdése. Ez azt jelenti, hogy az emisszió csökkentés nemcsak tényleges kibocsátás-csökkentéssel érhető el, hanem például a CO₂ levegőből való lekötése (a biomassa gázelnyelése) által is. Ennek leghasználhatóbb megvalósítása az erdősítés.

Együttes megvalósítás és emisszió kereskedelem. Ennek lényege, hogy két konkrét vállalással rendelkező ország között lehetőség van arra, hogy az egyik ország (vagy annak akár magán cége) egy másik országban emisszió-csökkentéssel járó beruházást végezzen, és annak meghatározott részét saját eredményként ismertesse el. Az ilyen vállalással rendelkező országok között a kibocsátási jog a kereskedelem tárgya is lehet. Az együttes megvalósítás esetén a 2000 után elvégzett beruházások által 2008 és 2012 között elért csökkenés eredménye számolható el, a kereskedelem pedig, 2008-tól indulhat. Aki azonban figyelemmel kíséri a napi

¹⁴ Angol nyelvű szövegét lásd: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>

¹⁵ Az átmeneti gazdaságú, azaz a volt szocialista országok ennél kedvezőbb bázist (így például Magyarország az 1985-1987-es időszakot) is választhattak.

¹⁶ A három utóbbi esetében 1995-öt is lehetett bázisévnek választani.

sajtót, már ezeket a mechanizmusokat figyelembevevő híradásokat, hirdetéseket is találhat, sőt az EU-ban napi árfolyama is van a kibocsátásnak¹⁷.

Tiszta fejlesztési mechanizmus. A vállalást tevő országoknak lehetőségük van arra is, hogy vállalást nem tevő (azaz gazdaságilag fejletlenebb) országokban is létesítsenek emisszót csökkentő beruházásokat, és azt saját teljesítésként ismertessék el. Azaz ezáltal a fejlett országok mintegy ösztönözve vannak a határaikon túli környezetvédelmi beruházásokra.

Az elvek szépek és világosak. Mégis számtalan kisebb és nagyobb baj van vele. Az országok vállalásai igen „puhák” lettek. Ahogyan közeledett a Kiotói Konferencia ideje, az országok vállalásai látványosan csökkentek (az előző pontokat végigolvasva ennek oka nyilvánvaló). Ez az oka annak, hogy a 2008-12 közötti időszakra vállalt 5,2 %-os csökkentésből 2000-re már 4,6 teljesült. Az egyezmény kiskapukat is hagyott felmentésekkel (például Ausztrália, Izland, Norvégia nem csökkentést, hanem csak növekedés-korlátozást, Új-Zéland, Oroszország és Ukrajna pedig szinten tartást vállalt). Külön kérdés lett az egyezmény ratifikációja. Miután az USA 2001 tavaszán elvette az egyezményt (mondván az igazságtalan, mert csak e fejletteknek vannak benne kötelezettségei), veszélybe került életbelépése. Az egyezményt szerint ugyanis csak akkor lép életbe, ha a csatlakozó országok összes kibocsátása eléri a káros gázok kibocsátásának 55 százalékát. Éppen ezért fontossá vált, hogy a nagy kibocsátókat (Japánt és Oroszországot) meggyőzzék az egyezmény jelentőségéről. Végül Oroszország 2005. február eleji döntésével átlépték a szükséges határt, azaz ekkortól lépett hatályba a megállapodás. Ha pedig valaki az igazi okokra kíváncsi, vajon mi is motiválta az Egyesült Államokat, amikor „kiszállt” az egyezményből, annak elég rápillantani az **57. ábra**. Jól látható, az USA emissziója úgy folytatódott a Kiotói Jegyzőkönyv aláírása után is, mintha mi sem történt volna. A biztató az USA elutasító politikája ellenére talán az lehet, hogy mégis számolnak a kibocsátás (később várható) növekvő költségeivel.¹⁸

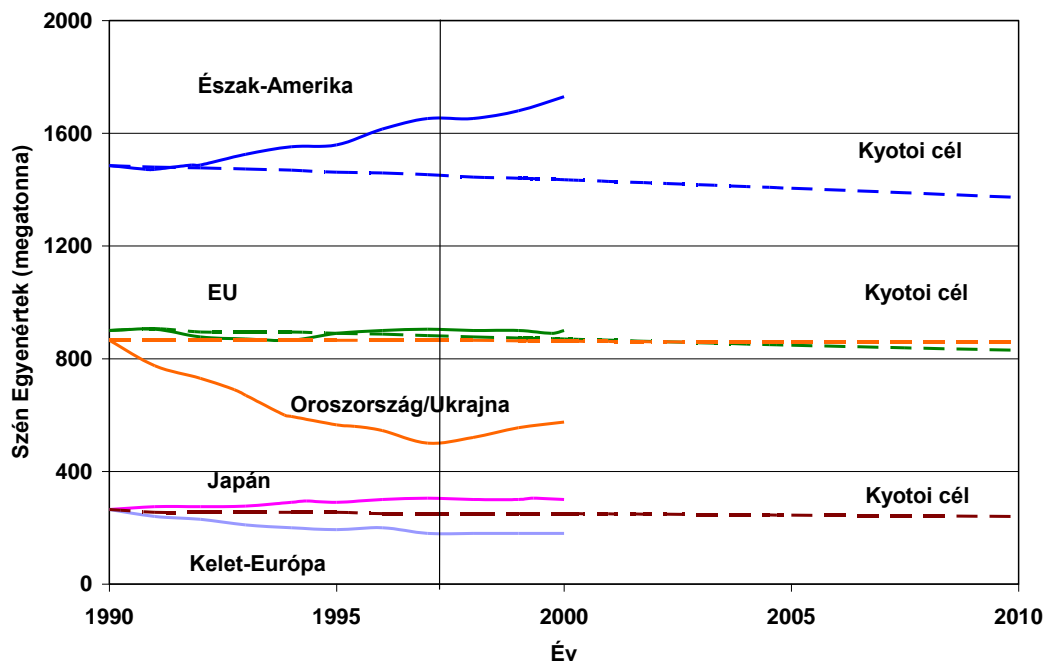
A késlekedés hatása jól látható az üvegházgázok együttes növekedésében (**58. ábra**): a bázis évnek választott 1990-es adatnál 25%-kal nagyobb értéket regisztráltak az egyezmény életbe lépésekor. Ahogyan már korábban is láthattuk, a legnagyobb arányban előforduló és leginkább növekvő a széndioxid. Komoly szerepet játszik ebben a növekedésben az igen gyorsan növekvő

¹⁷ Lásd: <http://www.climatecorp.com/pool.htm>

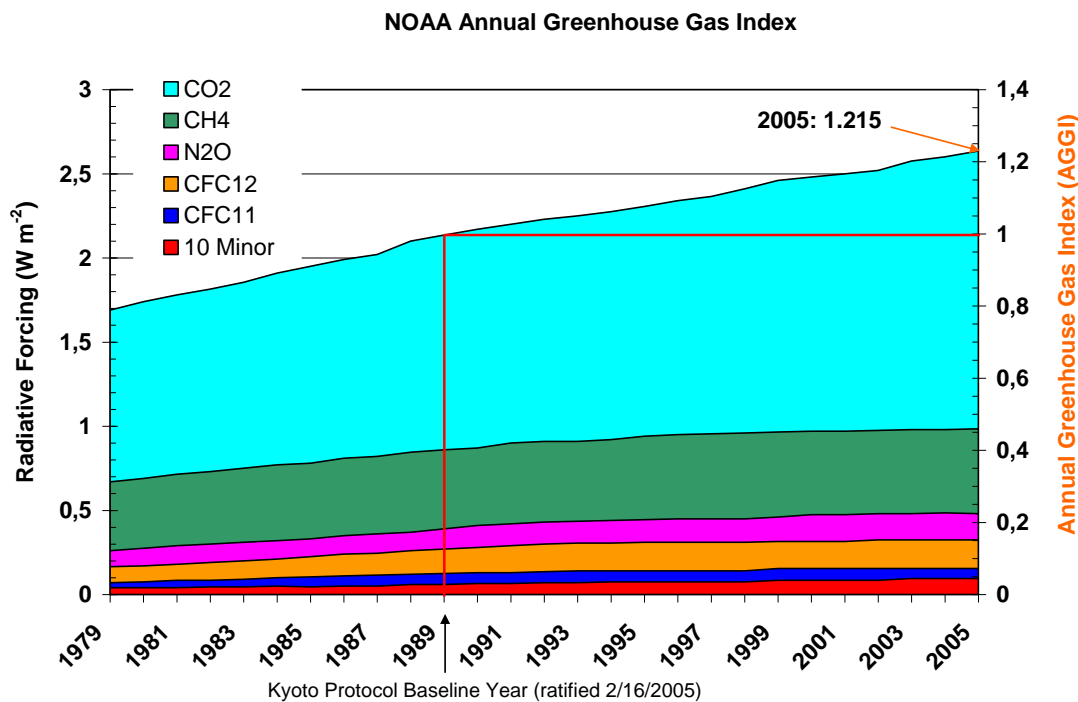
¹⁸ Lásd az Energy Information Administration (EIA) tanulmányát:

[http://www.eia.doe.gov/oiaf/servicerpt/economicimpacts/pdf/sroiaf2006\(03\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/servicerpt/economicimpacts/pdf/sroiaf2006(03).pdf)

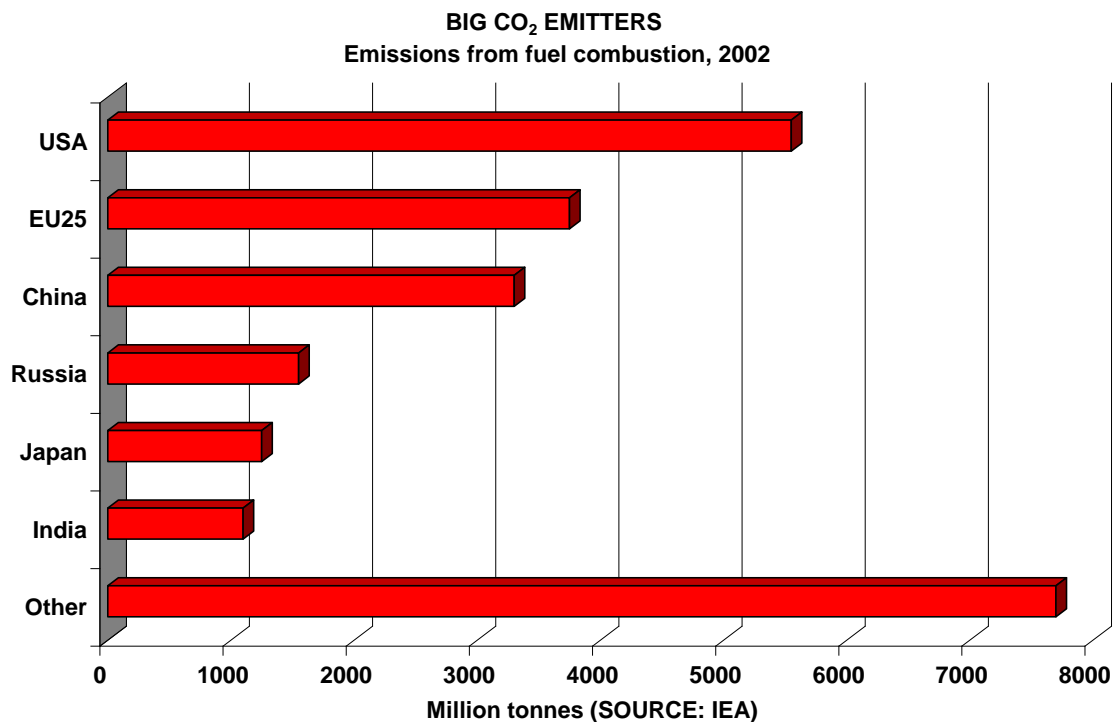
gazdaságú Kína és India, melyek „fejlődő országként” mentességet kaptak, miközben kibocsátásuk nagysága már ma is világtényező (59. ábra).



57. ábra. A CO₂ kibocsátás és a Kiotóban meghatározott célok (Eredeti forrás: Energy Information Administration in: ENSZ 2002)



58. ábra. Az üvegházgáz-index alakulása és a gázok szerepe az energiamérlegben (1997-2005) (NOAA)



59. ábra. A Föld legnagyobb CO₂ kibocsátói 2002-ben (forrás: IEA)

2.5.5.2. Az ózon egyezmények és következményeik

Amint korábban már utaltunk rá, az ózonréteg nagyarányú károsodása nemcsak a kutatókat lepte meg, hanem a politika is gyorsan rádöbrent az esetleges következményekre, és szinte azonnal nemzetközi egyezményt alkotott az ózonkárosító anyagok korlátozásáról. Az első keretegyezményt 1985-ben Bécsben írták alá. Ez még csak önkéntes csökkentéseket, mérések és kutatások összehangolását jelentette. A bécsi megállapodás nem is eredményében, hanem tényében volt nagy jelentőségű: ez volt az *első átfogó egyezmény, ami egy globális környezeti problémában megállapodásra vezetett, még mielőtt annak konkrét káros hatását elszenvedte volna az emberiség*. (Érdekességként megemlíthető, hogy az USA-beli Oregon állam már 1975-ben betiltotta a CFC-hajtógáz spray-k forgalmazását.) Ezt követte Montreali Jegyzőkönyv¹⁹ 1987-ben, amely már konkrét kötelezettségeket jelentett: öt freon-vegyület esetében az 1986-os szintben való korlátozást, s 1993-ig 20, 1998-ig pedig 50%-os csökkentési kötelezettséget jelentett, ezen kívül három halon-vegyületre is meghatározott enyhébb korlátozást. A montreali határértékeket rövidesen újabb és újabb szigorítások követték. 1990-ben Londonban bővítették

¹⁹ Lásd: <http://ozone.unep.org/pdfs/Montreal-Protocol2000.pdf>

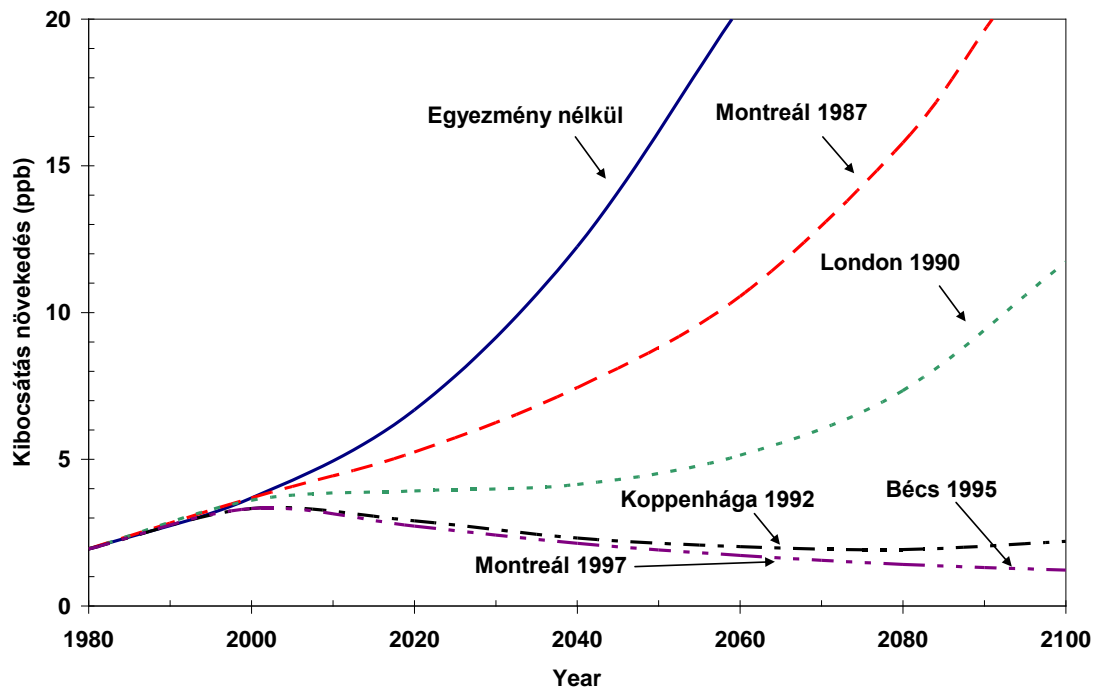
a korlátozásba vont anyagok körét a metil-bromoformmal és a széntetrakloriddal, s előrébb hoztak korlátozási határidőket. 1992 végén Koppenhágában már meghatározták, hogy a halonokat 1994-ig, s további ózonkárosítókat (CFC, CTC, MCF) 1996-ig ki kell váltani, emellett tovább bővült a korlátozandó anyagok köre (HCFC, HBFC, metilbromid). Az eddig felsorolt megállapodások alól a fejlődő országok különböző felmentéseket kaphattak, azonban az 1995-ös bécsi, majd az 1999-es pekingi kiegészítések már rájuk is érvényes határidőket (igaz nem túl közeli) határoznak meg, de egyúttal egy 440 millió \$-os alapot is létesítettek számukra a célok teljesítéséhez.

Az ózoncsökkenés felismerését követő gyors intézkedések, és az azokban megszabott drasztikus kibocsátás-csökkentés kézzel fogható eredményeket hozott²⁰. Megállt, majd csökkenésnek indult az ózonveszélyeztető anyagok kibocsátása (**60. ábra** és **61. ábra**), és 1994-től az ózont leginkább veszélyeztető anyagok légköri koncentrációja is (**62. ábra**). Ekkor úgy tűnt, hogy az intézkedések megkezdése után másfél évtizeddel, az ezredforduló táján már mérhető eredménye is lett a kibocsátás-csökkentésnek. Több éven át csökkenő tendenciát mutatott az ózonlyuk mérete és időtartama. Különösen látványos javulás volt tapasztalható 2002-ben, amikor is az ózonminimum csak 140 Dobson körül alakult az Antarktisz fölött.

Az eredmények azonban átmenetinek és csalókanak tűntek. Néhány ingadozást mutató év után 2006-ban minden korábbinál nagyobb ózonlyuk alakult ki, rekordközeli ózon minimumokkal (lásd korábban). Beteljesedni látszanak azok a félelmek, hogy néhány fejlődőnek minősített (de jelentős növekedést mutató) országnak nyújtott felmentés veszélyes lehet. Ezek az országok gyors gazdasági növekedésüket minimális környezeti „odafigyelés mellett” érték el: felfutó fogyasztás, növekvő környezetszennyezés.

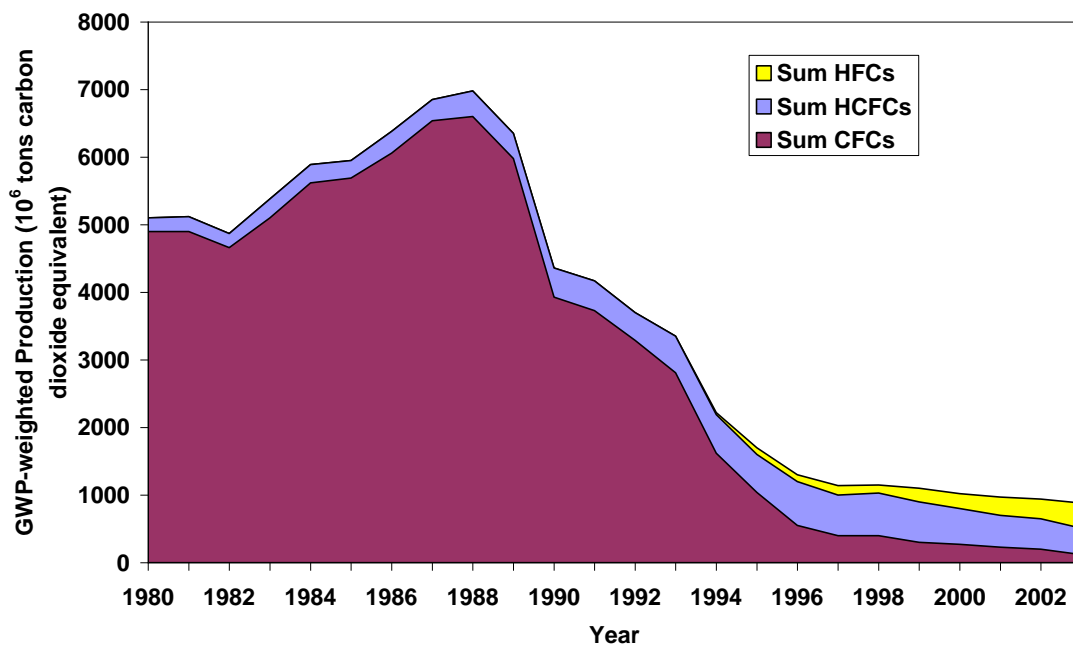
Egy természeti oldalról veszélyt jelentő tényező a vulkánosság (éppen ezért az ózon monitorozó kutatások komoly figyelmet fordítanak rá). A korábban tárgyalt PSzF-k esetében ugyanis a jégkristályok kondenzációs magját leggyakrabban kénvegyületek adják, s egy-egy nagyobb vulkánkitörés alkalmával könnyen nagy magasságba kerülhet tetemes mennyiségű kén. Az elmúlt évtizedekben két nagyobb következményekkel járó ilyen kitörés történt (**63. ábra**). A fülöp-szigeteki Pinatubo vulkán 1991. évi kitörésekor mintegy 20 millió tonna kéndioxid lökődött a sztratoszférába, egészen 25 km magasságig. Egy ilyen méretű kitörés 1-2 éven át megnövelheti a PSzF-k kialakulásának gyakoriságát, de hosszú távú hatása mégis kisebb.

²⁰ A <http://afeas.org/> címen igen részletes adatokat találhatunk.

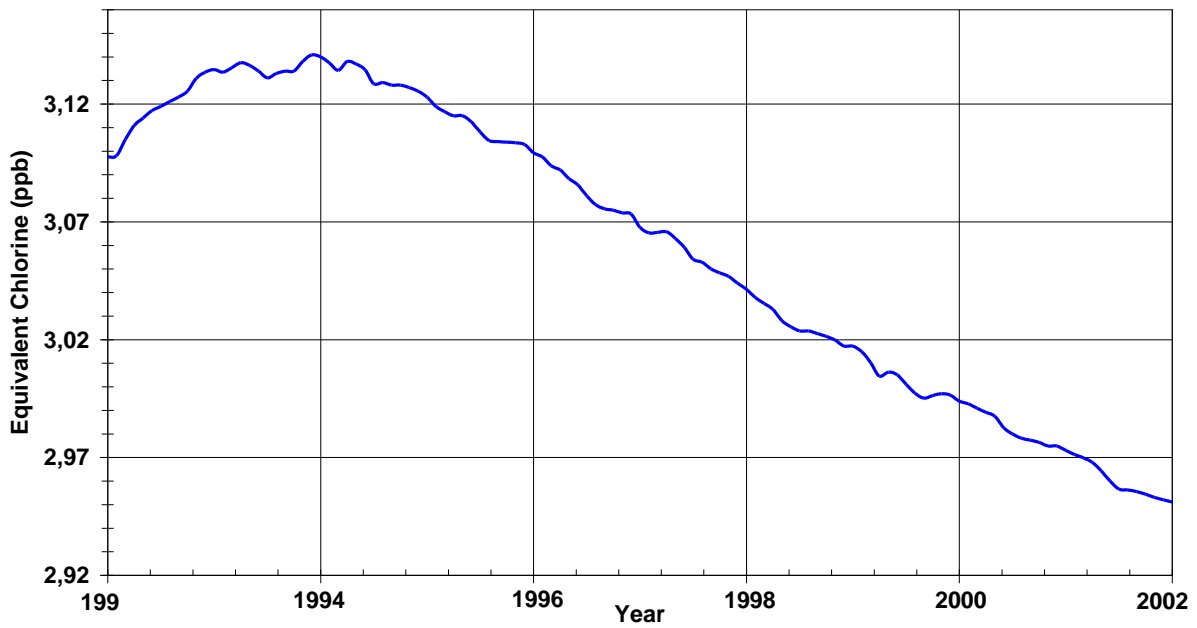


60. ábra. Az ózonkárosító gázok kibocsátása a nemzetközi egyezmények függvényében (Forrás: UNEP Ozone Secretariat)

GWP-Weighted Fluorocarbon Production 1980-2003

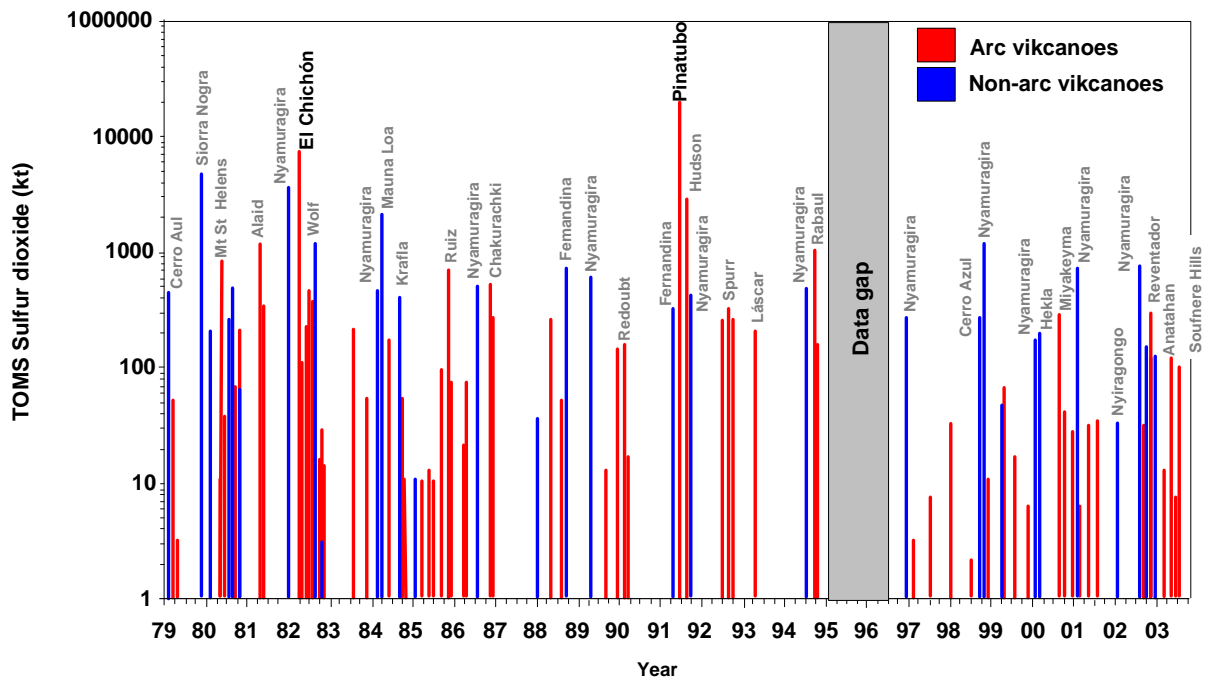


61. ábra. A legfontosabb ózonkárosítók termelése (1980-2003) (Forrás: AFEAS)



Global equivalent atmospheric chlorine (all chlorine and bromine compounds), now decreasing because of the Montreal Protocol.

62. ábra. Az atmoszférikus klór és bróm koncentrációjának változása a légkörben (Forrás: NOAA CMDL)



63. ábra. A vulkánosság során levegőbe került kéndioxid mennyisége (1979-2003) (Forrás:TOMS)

2.5.5.3. Egyezmények, programok a levegőminőség javításáról

Miután nyilvánvaló lett, hogy egyes légszennyezések a határokon átjutva nemcsak a szennyezést kibocsátó országot károsítja, az ENSZ Gazdasági Bizottsága kezdeményezésre egy átfogó egyezményt hoztak 1979-ben Genfben „az országhatárokon áterjedő, nagy távolságra eljutó légszennyeződésekről” (LRTAP)²¹. Az egyezmény a savas esők szempontjából legfontosabb légszennyezők (először csak a kén és a nitrogénvegyületek) kibocsátásának csökkentését, rendszeres adatszolgáltatást és a szennyezőanyagok mérését, monitorozását írta elő. Az egyezményt 2003-ig összesen 8 jegyzőkönyvvel egészítették ki (valójában konkretizálták), és folyamatos szigorítással a szabályozott anyagok kibocsátását csökkentették, illetve a szabályozott elemek körét bővítették.

1984-ban fogadták el a programot az Európai Monitoring és Értékelési Program (EMEP) finanszírozásáról. Ennek keretében három fő komponens, a kén, a nitrogén és az illékony szerves vegyületek kibocsátási adatainak gyűjtése, a levegő és a csapadék minőségének mérése és elterjedésük légköri modellezését határozták meg. 2003-ig 38 ország és az EU ratifikálta, és összesen mintegy száz mérőállomást működtetnek keretében (Magyarországi mérőállomások helyei: a (már említett) Kecskemét közeli K-pusztá, valamint Farkasfa, Nagyiván és Nyírjes). Az 1985-ben, Helsinkiben elfogadott jegyzőkönyv a kénkibocsátások 30%-os csökkentését írta elő. Ez azt tartalmazta, hogy az országok 1993-ig az 1980-as kibocsátási szintjükhöz viszonyítva hajtják végre a csökkentést.

Szófiában, 1988-ban a nitrogénoxidokról hoztak határozatot, miszerint 1994-re azok kibocsátása nem haladhatja meg az 1987-es szintet.

Az illékony szerves vegyületek (VOC) kibocsátásának szabályozásáról 1991-ben Genfben döntöttek. Az ide tartozó anyagok főként az üzemanyagok és az oldószerek párolgásából származnak (pl. benzin, acetón, benzol, xilol, formaldehid, stb.), az egészségre veszélyesek, s jelentősen hozzájárulnak a fotokémiai szmog kialakulásához. A szabályozás szerint ezek mennyiségét 1999-ig 30%-kal csökkenteni kell egy 1984-1990 közötti bázisévhez viszonyítva, vagy azt a csökkentést kell végrehajtani amit az ózonegyezményben vállaltak, vagy az 1988-as szintet nem szabad túllépni (hazánk a három lehetőség közül az utóbbit választotta).

²¹ Az egyezmény és azt kiegészítő 8 jegyzőkönyv megtalálható a http://www.unece.org/env/lrtap/status/lrtap_s.htm címen. Az egyezményt 2006. végéig 49 ország és maga az Európai Unió külön is ratifikálta. Az országok köre döntően Európára terjed ki, rajtuk kívül az USA és Kanada, valamint a Szovjetunió néhány közép-ázsiai utóállama írta alá, így csak nagy jóindulattal tekinthető világméretű egyezményeknek.

1994-ben a kénkibocsátások további szerkezeti pontosítását és ütemezett szigorítását eredményezte az Oslói Jegyzőkönyv.

Felismerve azt, hogy a légköri aeroszolok a gáznemű anyagok mellett nehézfémeket tartalmazhatnak szükségesnek látták ezek korlátozását is. 1998-ban a dániai Aarhusban elfogadott jegyzőkönyv főként az ólom, a kadmium és a higany kibocsátásának csökkentését írta elő. Az országok nem léphetik túl kibocsátásaikban az 1990-es szintet, vagy egy 1985 és 1995 közötti bázisév adatát. A jegyzőkönyv külön kitér arra, hogy a lehető legjobb technológia alkalmazásával el kell érni az üzemanyagokban az ólom, a szárazelemekben a kadmium, az elektromos berendezések, higanygőz lámpák, a fogászati anyagok, peszticidek és a festékek esetében pedig a higany kiváltását.

Ugyanekkor született jegyzőkönyv a hosszú élettartamú (perzisztens) szerves anyagok korlátozásáról. Ezen az anyagok között több zsírban oldódik, és felhalmozódik az élő szervezetekben, s tapasztalatok szerint jelentős egészségügyi problémákat okoztak olyan halat nagyobb mennyiségben fogyasztó országokban, mint Kanada vagy a skandináv államok. Az egyezmény egyebek mellett például tervbe vette a DDT, a HCH-k és a PCB-k szigorú megsemmisítését, és előírta olyan veszélyes anyagok, mint a dioxinok, a furánok, a PAH és HCB vegyületek 1990-es szinten való korlátozását.

Az 1999-ben Gothenburgban (Svédország) alkotott jegyzőkönyv a savasodás, az eutrofizáció és a felszínközeli ózon csökkentésével foglalkozott. Maximálták négy anyagcsoport (kén, nitrogén-oxidok, a VOC-k és az ammónia) kibocsátását. Ennek során Európában 2010-ig együttesen csökkenteni kell a kibocsátásokat (az 1990-es szinthez viszonyítva) kén esetében 63%-kal, a NO_x-nál 41, a VOC-knál 40, az ammóniánál 17 %-kal. Külön felhívja a figyelmet olyan tevékenységek veszélyeire, mint a növényégetés, az elektromos termelés, a vegytisztítás, és a közlekedés. Megemlíti, hogy a beavatkozások következtében az Európában savasodással érintett terület az 1990-es 930 ezer km²-ről 15 ezerre zsugorodik, az eutrofizációval érintett területek nagysága 1,65 millió km²-ről 1,08 millió km²-re csökken, a fokozott ózonkárosításnak kitett növényzet aránya az 1990-es érték 44%-ra esik vissza, és évente mintegy 47,5 ezerrel csökken a légszennyezések okozta halálozás.

A légszennyeződési jegyzőkönyvek folyamatosan bővülő tartalma jól mutatja, hogy a technika lehetőségeinek és a jobb tudományos megismerésnek köszönhetően hatékonyan lehet fellépni a légszennyezések és következményeik csökkentése területén a gazdasági fejlődés akadályozása nélkül. A 2006. augusztusában megjelent összegzés (az 1990-2004 közötti

időszakról²²) már jelentős eredményekről is be tud számolni. Az országok nagyobb része jól halad a vállalások betartásával, egy részük (például Magyarország is) már a 2010-re a tervezett emisszió-csökkentést (az ún. Gothenburg protocolet) is túlteljesítette (**18.** táblázat), aminek eredményei a levegőminőség javulásában látványosan tapasztalható is (**64. ábra**).

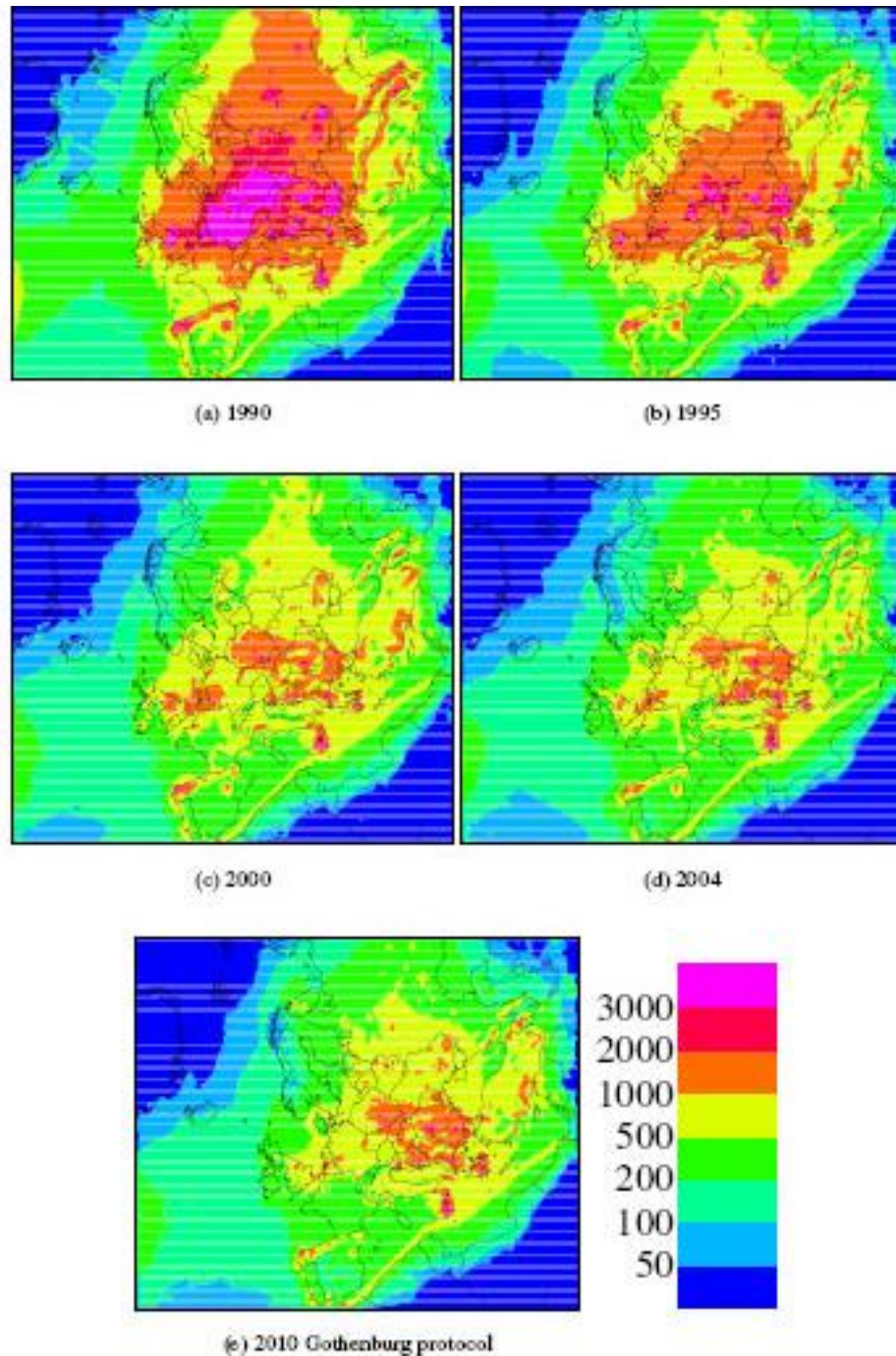
²² Lásd: http://www.emep.int/publ/reports/2006/status_report_1_2006_ch.pdf

18. táblázat. A levegőminőség javítása érdekében vállalt kibocsátás-csökkentések helyzete (2004) (Forrás: EMEP 2006)

Party/ Component	SO ₂				NO _x				NH ₃				VOC			
	2004	2010 GP	2004 - 1990	2010 GP	2004	2010 GP	2004 -1990	2010 GP	2004	2010 GP	2004 -1990	2010 GP	2004	2010 GP	2004- 1990	2010 GP
Units	Gg SO ₂	Gg SO ₂	%	%	Gg NO ₂	Gg NO ₂	%	%	Gg NH ₃	Gg NH ₃	%	%	Gg VOC	Gg VOC	%	%
Bulgaria	929	856	-54	-57	216	266	-40	-26	54	108	-63	-25	130	185	-40	-15
Czech Republic	227	283	-88	-85	328	286	-40	-61	70	101	-55	-35	203	220	-54	-49
Denmark	24	55	-86	-70	181	127	-34	-55	98	69	-27	-43	116	85	-30	-52
Finland	84	116	-68	-55	205	170	-32	-43	33	31	-12	-11	140	130	-37	-38
Germany	559	550	-89	-90	1554	1081	-46	-60	639	550	-16	-28	1268	995	-65	-69
Latvia	4	107	-96	-10	39	84	-43	-10	13	44	-72	0	63	136	-36	-11
Lithuania	42	145	-81	-35	55	110	-65	-30	33	84	-60	0	67	92	-38	55
Luxembourg	x	4		-73	x	11		-52	x	7		0	x	9		-62
Netherlands	66	50	-65	-75	360	266	-35	-54	134	128	-46	-43	216	191	-56	-37
Norway	25	22	-52	-58	215	156	-4	-28	23	23	12	0	265	195	-10	-68
Portugal	203	170	-36	-53	271	260	11	-25	64	108	17	10	287	202	5	-15
Romania	x	918		-30		437		-20	x	210		-30		523		-6

Party/ Component	SO ₂				NO _x				NH ₃				VOC			
	2004	2010 GP	2004 - 1990	2010 GP	2004	2010 GP	2004 -1990	2010 GP	2004	2010 GP	2004 -1990	2010 GP	2004	2010 GP	2004- 1990	2010 GP
Units	Gg SO ₂	Gg SO ₂	%	%	Gg NO ₂	Gg NO ₂	%	%	Gg NH ₃	Gg NH ₃	%	%	Gg VOC	Gg VOC	%	%
Slovakia	97	110	-82	-80	98	130	-56	-42	26	39	-59	-37	85	140	-38	-5
Slovenia	54	27	-72	-86	58	45	-9	-27	17	20	-28	-17	46	40	5	-39
Spain	x	774		-65	x	847	-24		x	353		1		669		-54
Sweden	47	67	-60	-44	197	148	-35	-56	56	57	3	-7	255	241	-42	-51
Switzerland	17	26	-60	-40	87	79	-44	-52	58	63	-14	-13	98	144	-63	-53
United Kingdom	833	625	-77	-83	1621	1181	-45	-56	336	297	-12	-11	1024	1200	-57	-57
European Community (EU15)	x	1059		-75	x	6671		-49	x	3129		-15		6600		-56
Total Parties GP	3213	3209	-79	-79	5484	4389	-11	-52	1650	1722	-27	-23	4264	4196	-54	-56
Armenia *	x	73		0	x	46		0	x	25		0	x	81		0
Austria*	29	39	-61	-57	227	107	7	-45	64	66	-7	-19	172	159	-39	-55
Belgium*	161	106	-55	-72	298	181	-22	-47	74	74	-34	-31	213	144	-40	-56
Croatia*	x	70		-61	x	87		0	x	30		-19	x	90		-14
France*	484	400	-64	-68	1219	860	-33	-54	742	780	-5	-4	1367	1100	-43	-63
Greece *	529	546	9	7	317	344	6	0	x	73		-9	332	261	18	-30

Party/ Component	SO ₂				NO _x				NH ₃				VOC			
	2004	2010 GP	2004 - 1990	2010 GP	2004	2010 GP	2004 -1990	2010 GP	2004	2010 GP	2004 -1990	2010 GP	2004	2010 GP	2004- 1990	2010 GP
Units	Gg SO ₂	Gg SO ₂	%	%	Gg NO ₂	Gg NO ₂	%	%	Gg NH ₃	Gg NH ₃	%	%	Gg VOC	Gg VOC	%	%
Hungary*	248	550	-75	-46	185	198	-22	-17	74	90	-40	-27	157	137	-23	-33
Ireland *	71	42	-62	-76	119	65	-2	-43	114	116	2	-8	63	55	-43	-72
Italy*	x	500		-70	x	1000		-48	x	419		-10	x	1159		-48
Poland*	1241	1397	-61	-56	804	879	-37	-31	317	468	-38	-8	888	800	7	-4
Republic of Moldova*	15	135	-91	-49	38	90	-71	-10	26	42	-58	-14	33	100	-73	-36
Total Signatories GP	2278	3215	-59	-53	3207	2724	-29	-39	1411	1636	-20	-10	3227	2756	-30	-49
Belarus**	95	480	-85	-25	148	255	-48	-11	121	158	-44	-28	324	309	-39	-42
Cyprus**	45	39	-1	-15	18	23	2	28	6	9		29	12	14		-22
Ukraine**	1042	1457	-82	-48	510	1222		-35	225	592	-59	-19	396	797	-71	-42
Total Non- Signatories GP	1189	1976	-66	-43	160	278	-45	-8	347	750	-63	-21	720	1106	-62	-42
Grand Total	7180	8400	-72	-67	8857	7391	-37	-47	3414	4108	-32	-18	8211	8058	-45	-52

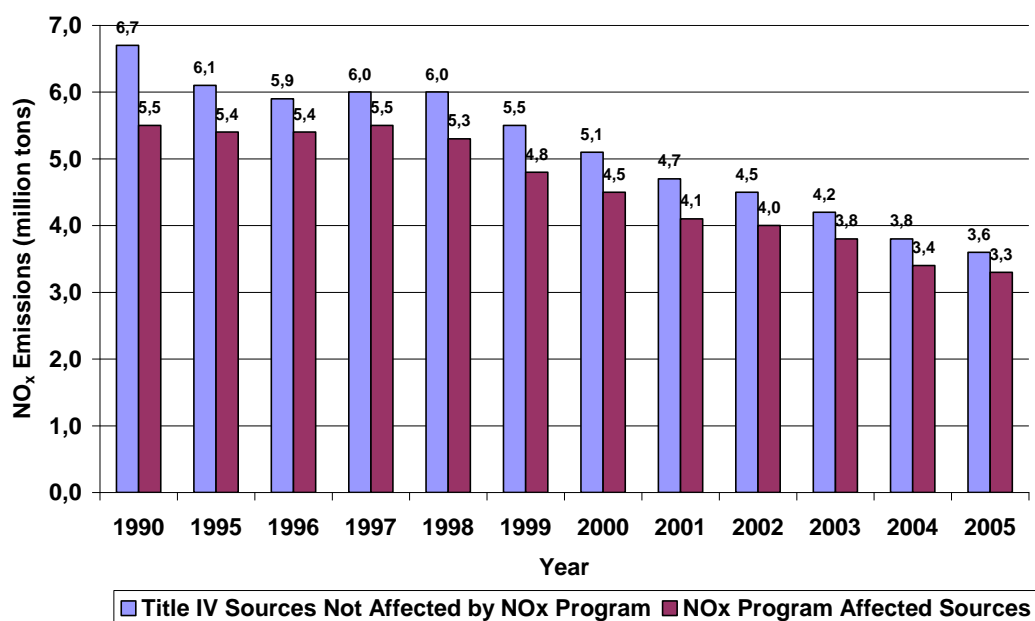


64. ábra. A levegő kéntartalmának változása Európában (mg/m^2) (Forrás: EMEP 2006)

Az előbbi egyezmények súlypontja Európára koncentráldott, azonban az 1980-as évek során Észak-Amerikában már oly mértékben okozott problémát a savasodás, hogy az külön program indítását indokolta. Az 1990-ben indított „Savas eső program” az Egyesült Államokban célul tűzte ki, hogy az évi kéndioxid- és nitrogénoxid-kibocsátást 10, illetve 2 millió tonnával

csökkentésük 2010-ig, és így az 1980-as szint alá kerüljenek (a programba Kanada is bekapcsolódott). A legjelentősebb emisszió-csökkentést a leginkább szennyezett területeken és a legnagyobb termelőegységeknél sikerült elérni. A 2005-ig elkészült összegzés²³ jelentős eredményeket mutat. Ennek hatására az USA-ban 15 év alatt (1990-2005) mintegy 35%-kal (15,7 millió tonnáról 10,2 millió t-ra) csökkent a kén, és 46%-kal (6,7-ről 3,6 millió tonnára – **65. ábra**) a nitrogénoxidok kibocsátása. A csökkenő emisszió hatására jelentősen csökken a szennyezőanyagok mennyisége a levegőben (**66. ábra**). S bár az Egyesült Államok szerepe az összes légköri emisszióban továbbra is meghatározó, igen látványosnak mondható a gazdasági teljesítményhez mért környezeti hatás. Miközben 1970 és 2005 között az USA GDP-je közel megháromszorozódott, az energiafelhasználás és a népesség közel felével nőtt, a légkörbe kibocsátott szennyezések felére csökkentek (**67. ábra**).

Figure 12: NO_x Emission Trends for Acid Rain Program Units, 1990-2005
(Source: EPA, 2006)



65. ábra. Az NO_x-kibocsátások alakulása az USA-ban (1990-2005) (Forrás: EPA 2006)

²³ Lásd: <http://www.epa.gov/airmarkets/cmprpt/arp05/2005report.pdf>

Figure 17a: Annual Mean Ambient Sulfur Dioxide Concentration, 1989–1991*

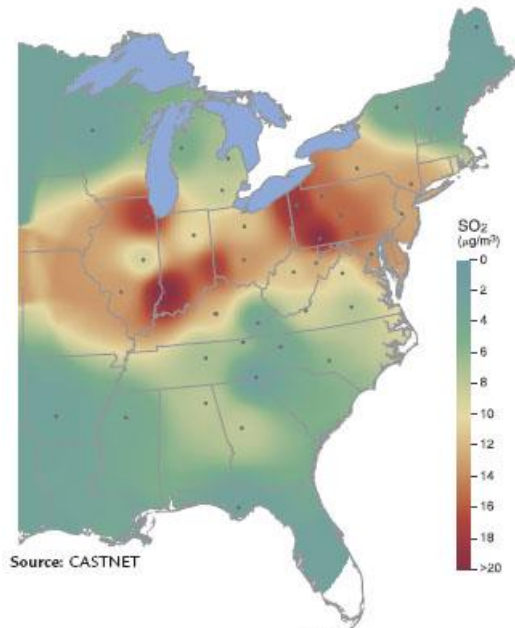
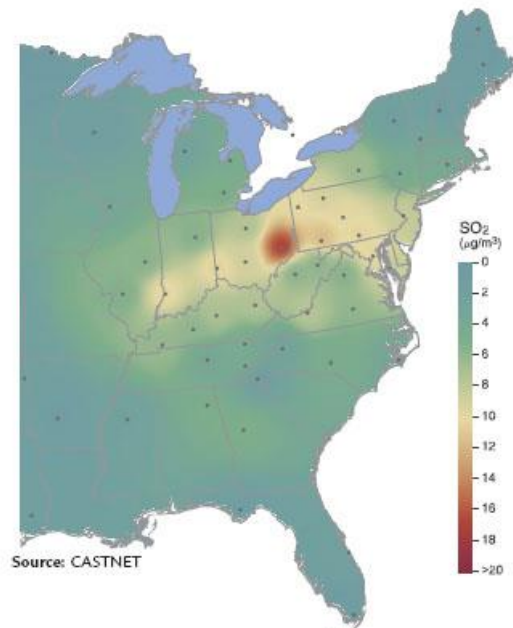
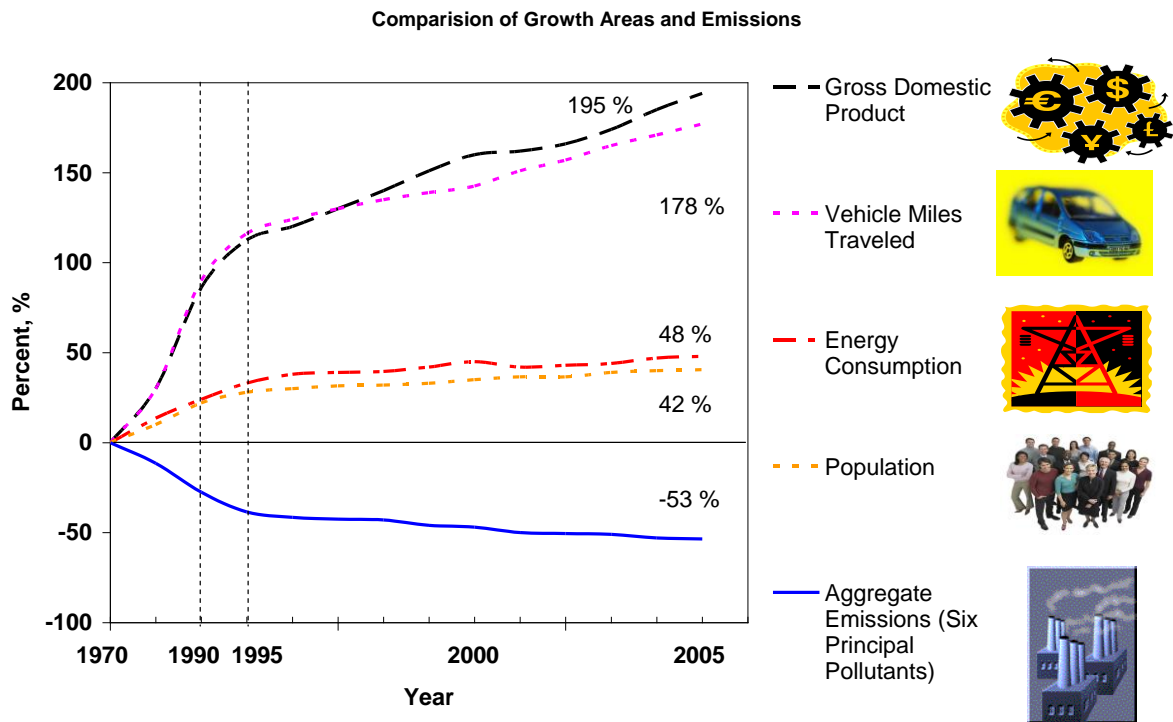


Figure 17b: Annual Mean Ambient Sulfur Dioxide Concentration, 2003–2005



*Dots on all maps represent monitoring sites. Lack of shading for southern Florida on Figures 17a, 18a, and 19a indicates lack of monitoring coverage.

66. ábra. A légkör kéndioxid-szennyezettségének változása az USA-ban (EPA 2006 alapján)



67. ábra. A gazdasági növekedés néhány mutatójának kapcsolata a szennyezőanyagok kibocsátásával az USA-ban (Forrás: EPA 2006)

A vázolt változások jól szemléltetik, hogy a környezetkárosító anyagok hatásának felismerésével, az ennek nyomán végrehajtott jelentős beavatkozásokkal jelentős

környezetállapot-javulás érhető el – a gazdasági teljesítmények csökkenése nélkül. Az intézkedések nyomán a légszennyezési problémák súlypontja Észak-Amerika és Európa helyett Ázsiába tevődött át. Egy 1999-es összehasonlítás szerint Ázsiában található a Föld 15 legszennyezettebb városa. Ha csak a kéndioxid koncentrációt nézzük, akkor is a négy (illetve 19-ből 15) legnagyobb szennyezetséggű nagyváros itt található. Az ázsiai városok rossz légszennyezetségi helyzete az elmúlt években sem javult. A legszennyezettebb levegőjű városok rangsorában Új-Delhi, Peking, Kathmandu, Dakka a sorrend, ezekben a tíz legjelentősebb légszennyező mennyisége 2003-ban 130-150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ között alakult, ami mintegy háromszorosa az egészségügyi határértékeknek²⁴. A helyzetet az súlyosbítja, hogy Ázsiában nincsenek kibocsátási egyezmények, nemzeti ellenőrzés is csak kialakulóban van. A központi igazgatások erőtlen kezdeményezéseit legyűrik az erősebb helyi érdekek. Igen nehéz helyzetben van Japán, melynek területe ki van téve a gyorsan növekvő és jelentős kínai szennyezések hatásának.

2.6. A vízburok jelentősége az élővilág és a társadalom számára

Jelenlegi tudományos ismereteink szerint a víz elengedhetetlen feltétele az életnek, meghatározó szerepet játszott az élővilág kialakulásában, az egyes élőlények anyagcsere-folyamatainak döntő tényezője. Nem véletlen tehát az, hogy amikor a Földön kívüli élet potenciális előfordulási helyei után kutatnak, az leginkább a légkör és a víz előfordulásának tisztázásával kezdődik.

A víz azonban nemcsak az élővilág életjelenségeiben fontos, de az élettelen természet folyamataiban is kiemelt jelentősége van. Befolyásolja az ásvány- és kőzetképződést (akár alkotóként is), meghatározó szerepe van a felszínen zajló anyagforgalomban (pl. eróziós és anyagszállítási tevékenység), a felszín geomorfológiájában (a víz és jég eróziós és akkumulációs formái) és az éghajlati folyamatokban (csapadék mennyisége, éven belüli eloszlása).

A fentieken túl a víz a gazdasági tevékenységben is nélkülözhetetlen (pl. hűtővíz, alap- vagy segédanyag), de még a tudomány is több mértékegységet köt a víz valamilyen tulajdonságához (legismertebb például a hőmérséklet és a víz halmazállapot-változásai).

²⁴ Az EU-s ajánlás 40, az USA határérték 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Gyakorlati megközelítésben a Föld vízkészletét két részre bontjuk: a világtengerek sós, illetve a szárazföldek (döntően) édes vizére. Az előbbi arányaiban jóval nagyobb (**19. táblázat**), az utóbbi viszont a Föld jelenlegi élővilága szempontjából sokkal fontosabb.

19. táblázat. A Föld vízkészletének megoszlása

Készlet helye, minősége	Mennyiség (ezer km ³)	Arány a teljes készletből (%)	Arány az édesvízi készletből (%)
Óceánok, tengerek és tengeröblök	1338000	96,5	-
Jégsapka, gleccserek, állandó hótakaró	24064	1,74	68,7
Felszín alatti vizek	23400	1,7	-
Ebből: édesvíz	(10530)	(0,76)	30,1
sósvíz	(12870)	(0,94)	-
Talajnedvesség	16,5	0,001	0,05
Felszíni jég és állandóan fagyott talajban tárolt	300	0,022	0,86
Tavak	176,4	0,013	-
Ebből: édesvíz	(91,0)	(0,007)	0,26
sósvíz	(85,4)	(0,006)	-
Légköri nedvesség	12,9	0,001	0,04
Lápok, mocsarak	11,47	0,0008	0,03
Folyók	2,12	0,0002	0,006
Biológiai vízkészlet	1,12	0,0001	0,003
Összesen	1385984	100	100

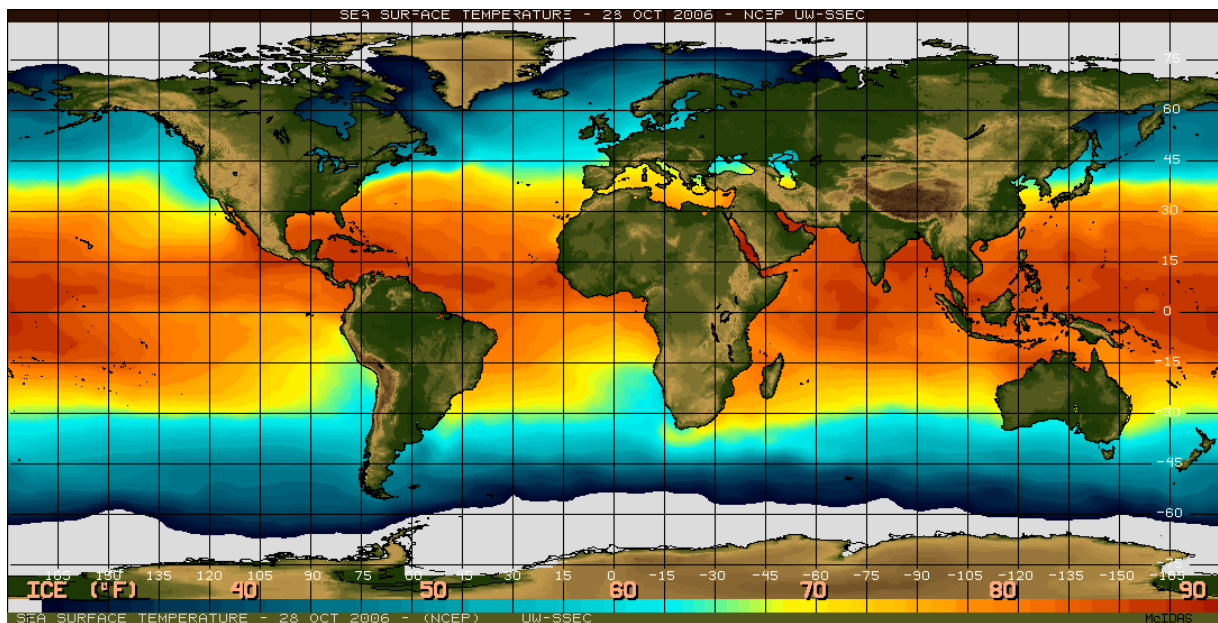
2.6.1. A világoceán

2.6.1.1. A világtenger szerepe a földi klíma alakulásában

A Föld felszínének mintegy 70,8 %-át borítják az óceánok és tengerek. Ez az óriási vízfelület a levegővel való kölcsönkapcsolatán keresztül jelentős klímaformáló tényező. Ez a hatás globális időskálán, mind a hosszú távú, mind a rövid távú folyamatokban kimutatható. A hosszú időtartamú változások közül a legjelentősebb a tenger és a tengeri élővilág szerepe a légköri CO₂ csökkenésében. A tengerekben, karbonátos kőzetek formájában (pl. mészkő, dolomit) megkötött üvegházgáz légköri koncentrációjának csökkenése, jelentős áttételes hatással volt a globális hőmérséklet csökkenésére. (Emlékeztetőül: a Vénusz légkörében napjainkban is igen nagy az üvegház gázok aránya, s ennek eredményeként kb. 480 °C körüli hőmérséklet alakult ki.)

Tengeráramlások

A földtörténeti időskálán rövidebb időtartamú változások a tengeráramlások. Ezek az áramlások jelentős szállított hőmennyiségükkel a klímaalakítás fontos tényezői. Mozgásukban (a kontinensek mindenkori elhelyezkedésén túl) a légköri nagy szélrendszereknek kiemelt szerepe van. A felszíni tengervíz hőmérséklete jól mutatja az áramlások hőmérséklet-módosító hatását (68. ábra)²⁵. Az ábrán jól láthatóak a Dél-Amerika, illetve Dél-Afrika nyugati partjain kialakult hideg áramlások (Humboldt és Benguela) anomáliái, amelyek nem annyira közvetlen hőmérsékleti következményeikkel, hanem csapadékcsökkentő hatásukkal okoznak nagyobb klímabefolyásolást. Már ezen az október végi ábrán is látható a Golf-áram és annak folytatásaként az Észak-atlanti meleg áramlás hőmérsékletnövelő hatása Skandinávia partjainál.



68. ábra. A világtengerek hőmérséklete 2006. október 28-án

Feladat: Keressen további területeket az ábrán, ahol valamelyik áramlás hatása jól láthatóan érvényesül!

²⁵ A http://www.ssec.wisc.edu/data/sst/latest_sst.gif címen megtekinthetően a mindenkori aktuális adatok.

Az El Niño

A világoceánban kialakuló, több hónapos (vagy esetleg éves) időtartamú hőmérsékleti anomáliák is okozhatnak majdnem az egész Földre kiható klimatikus változásokat. Ha az utóbbi két évtizedben, ha valamilyen nagyobb területre kiterjedő éghajlattal összefüggő „rendellenességet” (szárazság, árvíz, hurrikán, rendkívüli hideg, stb.) tapasztaltak, rendszeres bűnbakként elhangzott a bűvös szó: El Niño. Mi is ez általános bűnös, s milyen köze lehet ezekhez a katasztrófákhoz, s kialakulásának van-e köze a globális klímaváltozáshoz? A következőkben ezekre a kérdésekre próbálunk választ találni.

Az El Niño a (Csendes) óceán és a légkör természetes kölcsönhatásaiból származó anomália jelenség, melynek rendszeres előfordulását már évezredekre visszamenőleg sikerült kimutatni. *Átlagos körülmények* között (a földi nagy légkörzés és a vele szoros kapcsolatban álló tengeráramlások eredményeként) egy jelentős légnyomáskülönbség képződik: a délkeleti Csendes-óceánon magas nyomás, Indonézia és Észak-Ausztrália térségében pedig alacsony légnyomás alakul ki. Ilyen körülmények között a két központ közti nyomáskülönbség az Egyenlítő mentén keleti passzátszeleket kialakulásával jár együtt. A szelek folyamatosan meleg vizet szállítanak a nyugat csendes-óceáni térségbe, miközben mintegy 40 centiméterrel megemelik a tengerszintet is. A meleg tengeráramlással szállított vizek eközben mintegy 200 méter mélységbe szorítják a meleg felszíni és az alatta levő hideg víz közötti határt a nyugati térségben. Ezzel szemben Dél-Amerika partjai előtt, ahonnan a passzátszelek a felszíni vizet elsodorják, a különböző hőmérsékletű vizek közötti határ sekélyen van, miután itt hideg víz áramlik fel az elszállított helyére. Indonézia környékén a passzát találkozik a nyugati szelekkel, emiatt a meleg paradús levegő fölemelkedik, és heves esőzések alakulnak ki. Majd a levegő nagy magasságban kelet felé áramlik, és a középső és keleti Csendes-óceán fölött alásüllyedve ott száraz időjárást okoz. Normál helyzetben, decemberben a Csendes-óceán keleti partjának vize 8 °C-kal hidegebb, mint a nyugati tájon Indonéziában.

Rendszertelen időközönként azonban a két nagy térség között lecsökken a légnyomáskülönbség. A keleties szél legyengül, esetenként meg is fordul. Ennek következtében a tengervíz hőmérséklete a keleti partok előterében magasabb lesz a szokásosnál, nyugaton pedig alacsonyabb. Ezt a helyzetet nevezik *El Niñonak*²⁶. Ilyenkor meleg és a szokottnál sokkal

²⁶ Az El Niño kifejezés perui halászoktól származik, akik az 1800-as évek végén figyeltek fel a karácsony táján jelentkező meleg áramlatra (innen van a Kisded vagy Gyermeke Krisztus elnevezés. A tudományos szakirodalom ma már inkább az ENSO kifejezést (El Niño and Southern Oscillation) használja, ezzel is utalva arra, hogy itt egy a légköri folyamatokkal

sósabb víz jut Dél-Amerika partjaihoz, elrontva ezzel a halászat kedvező lehetőségeit. Miután az aktív időjárási jelenségek az Egyenlítő közelében a meleg tengerfelszínhez kötöttek, az átlagosnál keletebbre alakulnak ki a trópusi viharok (tájfún, hurrikán) is. Amerika nyugati partjainál ugyanakkor változékonyabbá válik az idő, sokszorosára növekszik a hurrikánok gyakorisága²⁷. Mindeközben Délkelet-Ázsiában és Ausztrália északi részén nagy szárazságok alakulnak ki, gyakoriak lesznek az erdő- vagy bozóttüzek. (Ez persze azt is jelenti, hogy a nagy szárazságok ellenére az El Niño-s évben sem hullik kevesebb csapadék, csak nem ott, ahol várható lenne: árvizeket okoz távoli tájakon, illetve az óceán fölött esik le.) Az El Niño hatása azonban – az általános földi légkörzés kapcsolatrendszeré miatt – a világ nagy részén észlelhető. Az amerikai meteorológusok szerint az El Niño hatásai az USA mérsékelt éghajlati területein is érezhetőek: El Niño idején az északi államokban a tél enyhébb, a déli államokban pedig hidegebb az átlagosnál. Az El Niño hatása évszakosan is eltérő (*Error! Reference source not found.*).

A műholdas távérzékelési technikák, ma már jól követhetővé teszik a folyamatot²⁸, így időben fel lehet készülni a „kisedés” csínytevéseire. Ez a fejlett technikai háttér segítette azt is kideríteni, hogy az El Niño-nak van egy La Nina-nak nevezett jelenség-párja. Ennek megjelenésekor Dél-Amerika partjainál az átlagosnál jóval hidegebb a tengervíz, viszont Indonézia környezetében átlag feletti hőmérsékletű lesz a tengervíz, ami intenzív csapadékhullást okoz. Az így kialakult fordított állapot (hideg viszonyok) erősebb a passzátszéllel járnak és a trópusi monszun is több csapadékot szolgáltat.

Az *El Niño* tehát egy jól megfigyelhető természeti jelenség, változásai egykori koralltelepeken is jól kimutathatóak. A hosszú idősoros kutatások azonban az mutatják, hogy *soha nem volt olyan erős, mint az utóbbi évszázadban* (eddig 1982-83-ban és 1997-98-ban volt a legerősebb). Természetesen mindenki tudni akarja, van-e kapcsolat a szélsőségesebbé váló időjárás és a

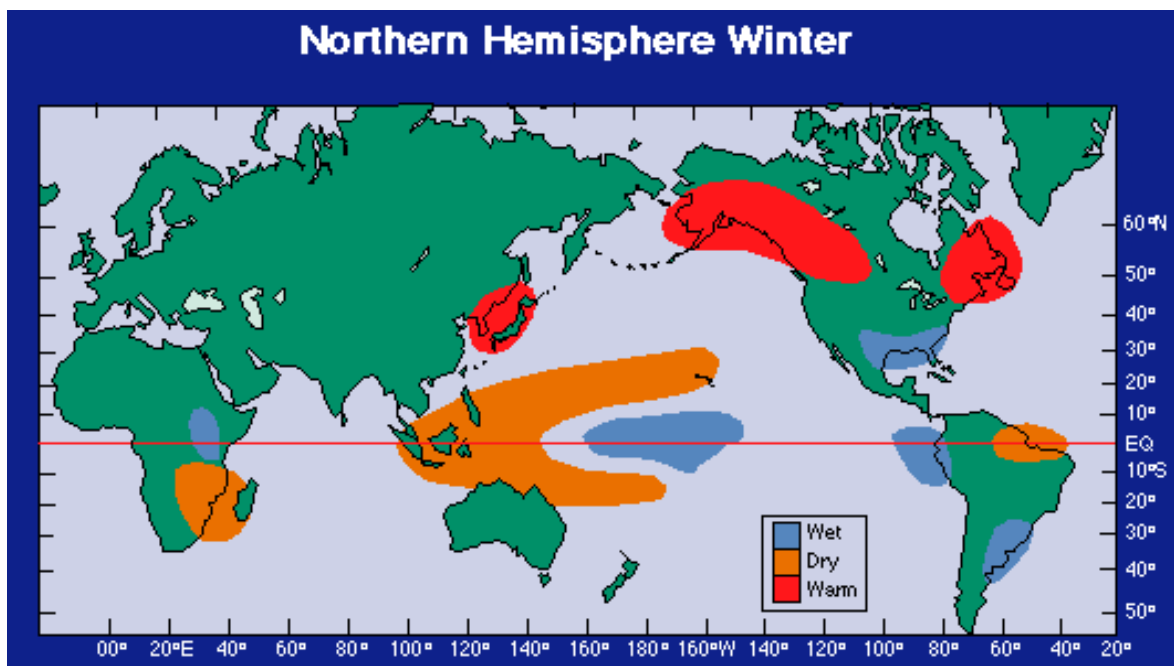
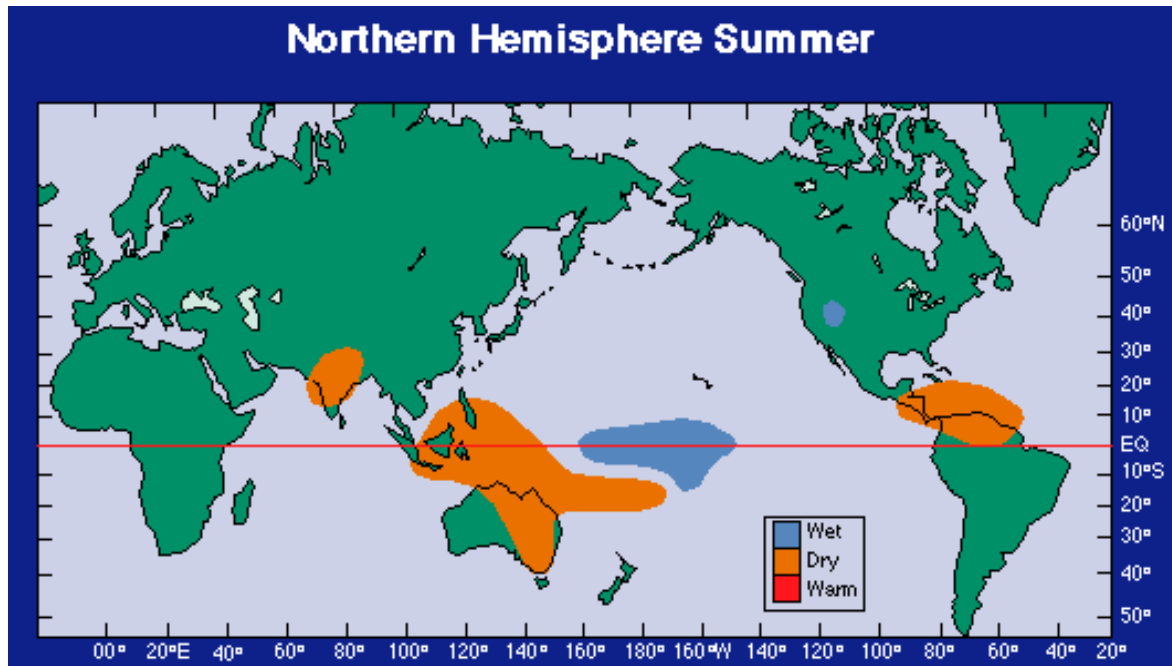
kapcsolatos áramlásról van szó. Az eddigi tapasztalatok szerint a jelenség 2-10 évenként fordul elő, és akár tizenkét hónapig is tarthat.

²⁷ Az El Niño jelenség fontossága miatt a NOAA külön internetes oldalon foglalkozik annak hatásaival: <http://www.elnino.noaa.gov/> (NOAA El Niño page). Itt nem csak bővebb aktuális információkhoz juthatunk a folyamat megértéséhez, hanem konkrét értékeléseket is arról, milyen következményei vannak annak például az USA éghajlatára.

²⁸ Az interneten a megértést segítő animációk is elérhetőek, anyagunk leadásakor például a http://www.cdc.noaa.gov/map/clim/sst_olr/sst_anim.shtml címen.

Korábban a <http://www.pmel.noaa.gov/tao/vis/explorer/t-dyn-med.html> címen látványosabb animáció is volt (ez a kézirat leadásakor hiányos volt), helyette ajánlható a <http://www.pmel.noaa.gov/tao/elnino/el-nino-story.html#ani> cím.

globális felmelegedés között. A feltárt adatok azt mutatják, hogy a Csendes-óceán viselkedése az elmúlt száz évben nem volt tipikus, azonban még nem mutatható ki egyértelműen, hogy mely tényezők befolyásolják. Vélhetően nem az El Niño okolható minden éghajlati jelenségre visszavezethető természeti katasztrófáért (bár erre még a 2002-es nagy Közép-európai árvizek esetében is voltak célzások), azonban mint a nagy léghőmérséklet-folyamatok részese, változásaira már jelentősen hathat a globális felmelegedés.



69. ábra. A nyári és a téli El Niño következményei (Forrás: NOAA)

A Broecker-féle óceáni „szállítószalag” jelentősége

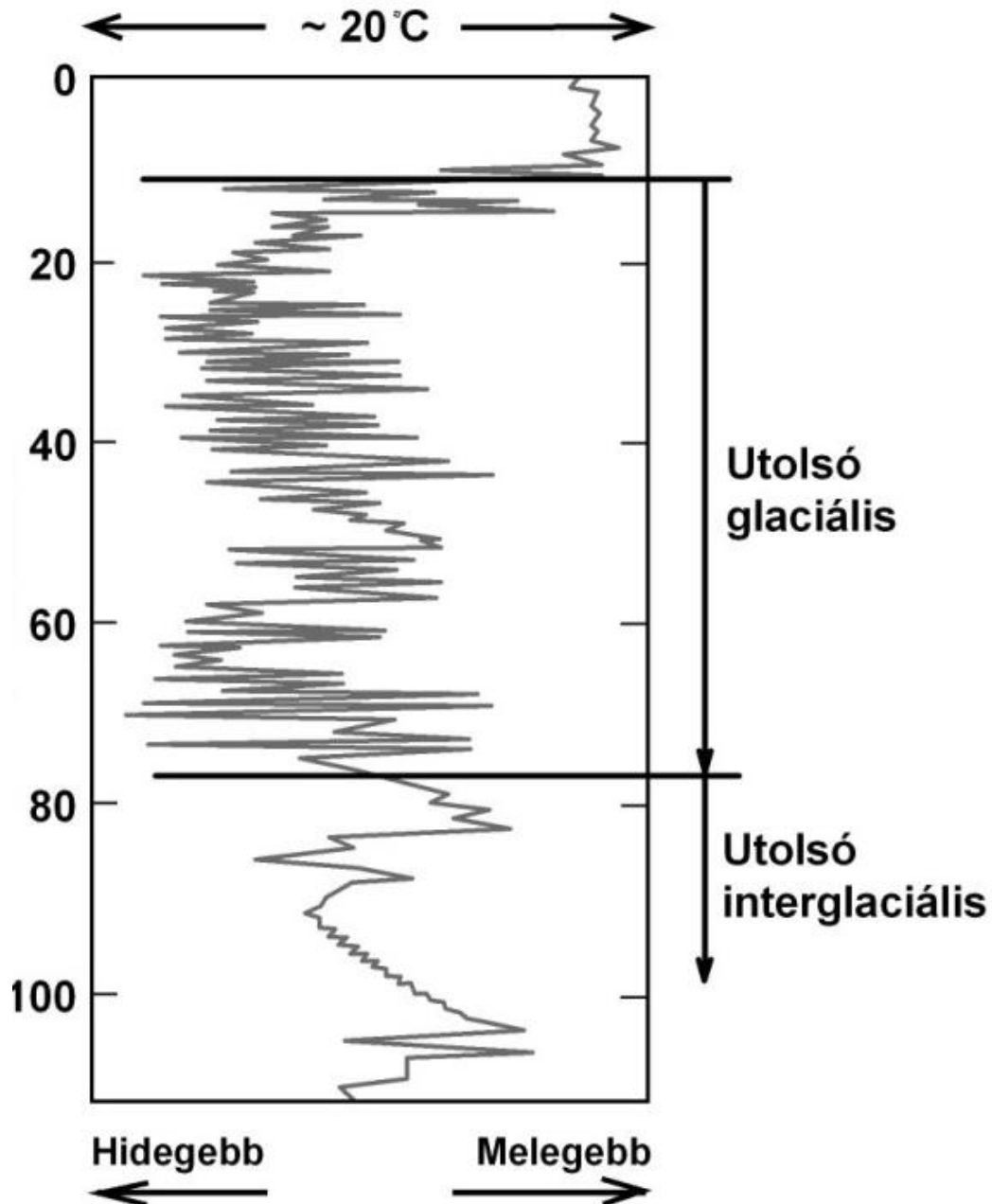
A felszíni (hideg és meleg) tengeráramlások rendszere már évszázadok óta ismert (napjainkban is általános iskolai tananyag), azonban az 1990-es években olyan tágabb kapcsolatait is sikerült feltárni, ami a múltbeli klímaváltozásokra (jégkorszakok) is magyarázatot adhat, illetve fontos lehet a jövőbeli éghajlatváltozások előrejelzésében.

A földtörténet közeli múltjában jelentős éghajlati ingadozások zajlottak, melyek során hideg glaciális és melegebb interglaciális időszakok váltogatták egymást (az Alpokban megfigyelt eljegesedési változások alapján négy nagy jégkorszakot különböztettek meg). Az 1990-es évek elején a grönlandi jégtakaróba mélyített két 3000 méteres fúrás jégmintái azonban nagyon pontos (45 ezer évre visszamentően évenkénti) hőmérsékleti adatokat szolgáltatottak az elmúlt 110 ezer év klímájáról. Ekkor derült ki, hogy az éghajlati ingadozások sokkal gyakoribbak és gyorsabbak voltak, mint azt korábban gondolták. A mintákat vizsgáló svájci kutatók hívták fel Broecker amerikai óceán- és klímakutató figyelmét arra, hogy ezek a gyors változások olyanok, mint amelyek két állapot között kialakult oszcillációnak felelnek meg. Ekkor vetődött fel Broeckerben, hogy ezek a Grönland körüli események az óceáni cirkuláció változásának következményei lehetnek. Más paleoklimatológiai adatok és óceánáramlási vizsgálatok alapján sikerült felderíteni, hogy a nagy óceáni medencék között egy folyamatos – felszíni és mélytengeri – áramláskör alakult ki („the oceanic conveyor belt” – vagy egyszerűen csak Broecker-féle szállítószalag). Ez a napjainkban 20 millió m³/sec vízzállítású áramlás (ami egyenlő a globális csapadékintenzitással, vagy 100 Amazonas vízhozamával) az észak-atlanti térségben mintegy 5-10 °C-os pozitív hőmérsékleti anomáliát jelent, azaz leállása jelentős lehűlést okozna a tájon. Vélhetően ennek az áramlásrendszernek az időnkénti leállása, majd újraindulása okozta azokat a gyors éghajlati változásokat, amiket a grönlandi jégminták mutatnak (**70. ábra**). De mi okozhatta az óceáni szállítószalag leállításait és újraindulásait, hol van ennek kapcsológombja?

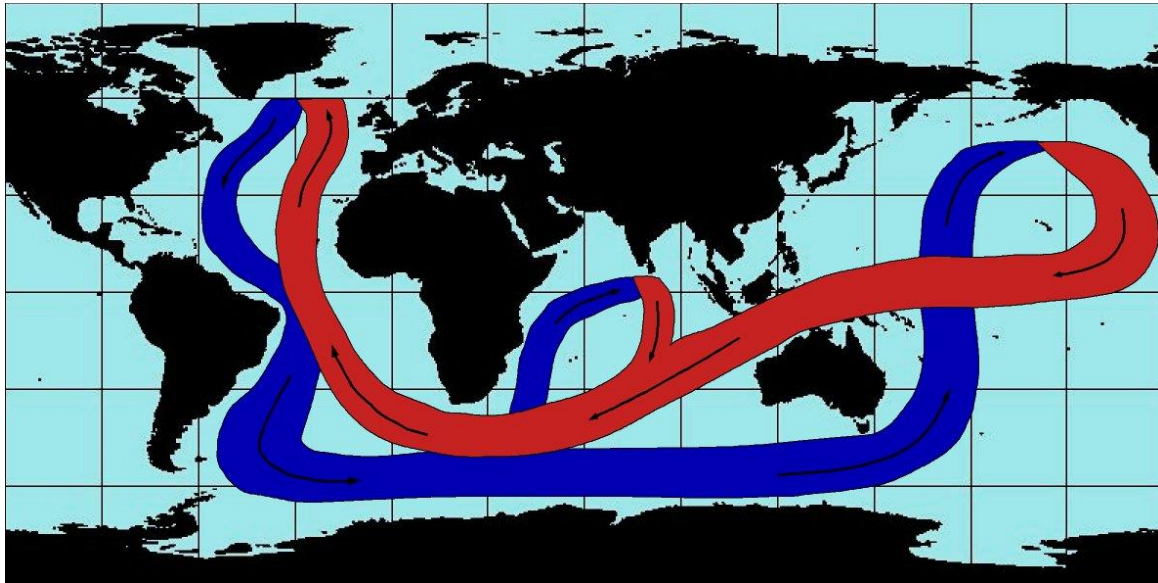
Az áramlásrendszer elemzése feltárta, hogy *a szállítószalag az óceánvíz változó hőmérséklete és sótartalma által működtetett (termohalin) áramlás*. Az Atlanti-óceán északi része felé haladó meleg áramlat (Észak-atlanti áramlás), amely Izland felé közeledve még 12-13 °C-os, a hideg légáramlatok és az erős párolgás²⁹ miatti hőveszteség nyomán 2-3 fokra hűl, miközben sótartalma megnövekszik. Ezáltal sűrűsége nehezebb lesz, mint a mélytengeri vizeké, így a mélybe süllyed, és déli irányban áramlik tovább. A közel egyenletes hőmérsékletű mélytengeri

²⁹ Ebből származnak azok a ciklonok, amelyek Európa csapadékviszonyainak kialakításában meghatározó jelentőséggel bírnak.

hideg víz az Atlanti- és az Indiai-óceán déli medencéjén át a Csendes-óceáni térségbe kerül, ahol a hideg áramlás a felszínre jut (okát lásd majd az El Niño jelenségnél), és nyugati irányban haladva, felmelegedve zárja a rendszert (71. ábra). Az egész folyamat legkritikusabb, legsebezhetőbb szakasza az Atlanti-óceán északi térsége. Itt ugyanis aránylag kis sótartalomkülönbség mellett következik be a felszíni vizek mélybe bukása. Ha ebben a térségben valamilyen felszíni édesvízpótlás felhígítja az óceán vizét, akkor leállhat az áramlás.



70. ábra. Az elmúlt 110 ezer év hőmérsékleti változásai (Broecker 1997 alapján)



71. ábra. A Boecker-féle szállítószalag (Broecker 1997 alapján)

Boecker három elvi lehetőséggel számolt ami lecsökkentheti a sótartalmat: a) növekvő csapadék, b) a térségbe közvetlen vizet juttató (kanadai és szibériai) nagy folyók nagyobb vízhozama, c) az arktikus területek olvadása (ez utóbbi közvetlenül is szoros kapcsolatban lehet az üvegházhatás változásával). A kutató elmélete szerint, ha egy felmelegedés megindítja a poláris területen az olvadást, akkor az így bekerülő édes vizek felhígítják az áramlás vizét, következésképpen az nem éri el azt a kritikus sótartalmat, hogy lesüllyedjen, és leáll a szállítószalag. Ennek hatására rohamosan csökken a térség hőmérséklete (hiszen megszűnik a melegáramlás hőmérsékletnövelő hatása), ami leállítja az olvadást, sőt megindul a jégtakaró felhalmozódása – majd ennek következményeként előbb-utóbb annyira megnő újra sótartalom, hogy elindulhat az áramlás (azaz, mintha bekapcsolná valaki a szállítószalagot). Ez a folyamat többszörösen ismétlődhet, mint ahogyan vélhetően ismétlődött is (lásd 6.3. ábra). A folyamat eredőjeként a szárazföldeken jelentősen csökkent a hóhatár. A gleccserek előrenyomulása és visszahúzódása a gyors változásokat kevésbé tudta nyomon követni, ezért azok inkább csak egy-egy tartósabb lehülés alatt tudták kialakítani azt a formakincset, ami alapján eddig az eljegesedési szakaszokra következtettünk.

A Broecker kutatásának van egy nagyon fontos következménye: *ha bekövetkezik az óceáni szállítószalagnak leállása, akkor azt nagyon gyors éghajlati változás követi.* Az akár 5-10 fokos (negatív és pozitív) hőmérsékleti ugrások komoly ökológiai és gazdasági következményekkel járnának. Éppen ezért a kutatások napjainkban már fokozott figyelmet fordítanak az észak-atlanti térség áramlásaira, folyamatosan mérik azok sebességét. (A témában rejtlő veszélyre, már tudományos fantasztikus film is figyelmeztet.)

2.6.1.2. A világóceán ökológiai forrópontjai

A világtenger a földi élet bölcsője. Hosszú évmilliókon át, csak ez a közeg szolgáltatott olyan feltételeket, ahol az élővilág élni, fejlődni tudott. A víz volt az a közeg, amely lehetőséget adott arra is, hogy egyes mobilis fajok rövid idő alatt meghódíthassák az egész világóceánt. Az ilyen fajok fennmaradt kövületei a geológusok számára a kormeghatározás fontos elemei.

Egyes élőlények igen érzékenyen reagálnak a környezeti feltételek változására: ha azok jobb lehetőségeket kínálnak számukra, akkor elszaporodnak, ha rosszabbat, akkor megritkul állományuk, vagy akár el is pusztulhatnak. A földtörténet során mindkettőre számos példát ismerünk. Az utóbbi évtizedekben azonban már rövidebb időszakok alatt is tanúi lehettünk ilyen változásoknak.

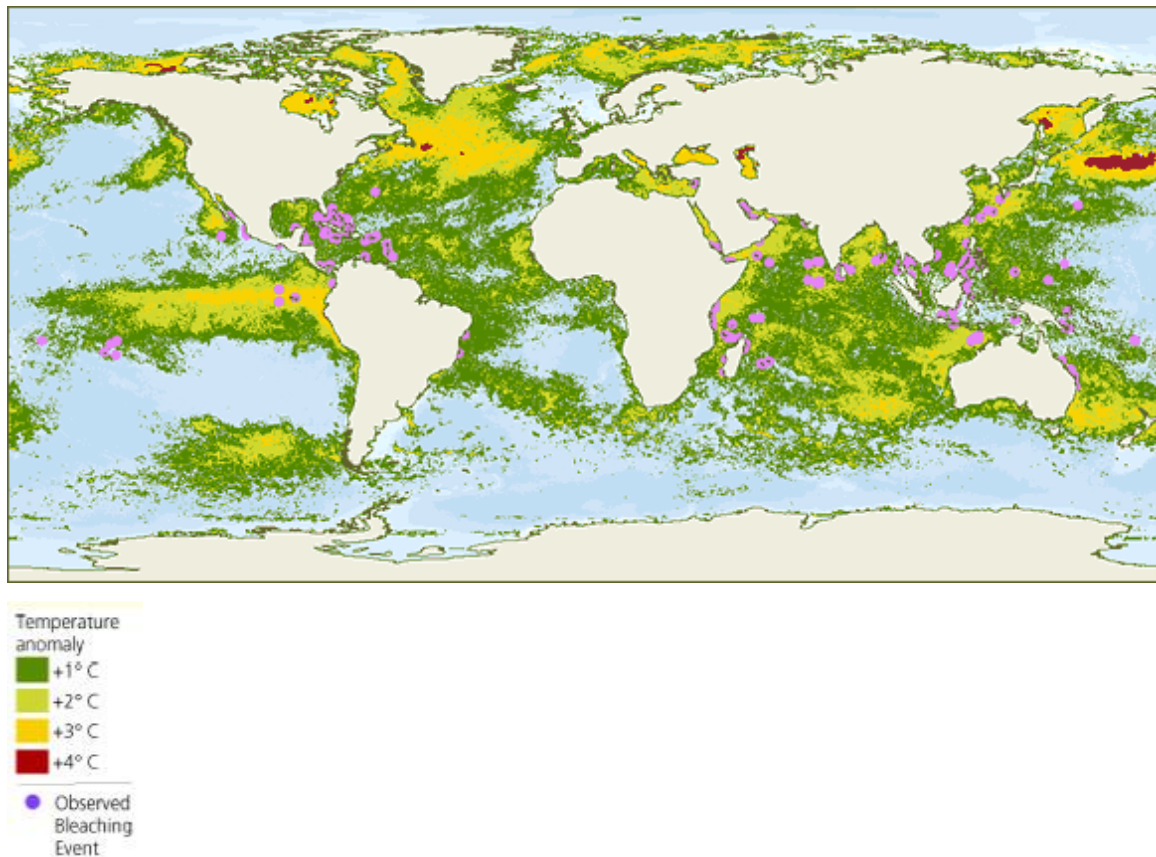
A korallak környezetindikátor szerepe

A korallzátonyok az esőerdők után a második, az óceánokban pedig a leggazdagabb ökológiai rendszert jelentik. Bár a korallós területek a világtengereknek csak 0,3%-át foglalják el, mégis itt él a fajok negyede, a tengeri halfajok 2/3-a.

Maguk a korallak helyhez kötött életet folytató mészvázú állatkák, amelyek szimbiózisban élnek mikroszkopikus algákkal. A korallak porózus mészváza védelmet nyújt az algáknak, az algák pedig szerves anyaggal és a fotoszintézisükből származó oxigénnel látják el azokat „cserében”. De a korallak nagyon érzékenyek a külső körülmények változásaira, s ha a környezet valamilyen megváltozása miatt stresszes állapotba kerülnek, nem képesek együttműködni szimbiotikus partnerükkel. Algák nélkül azonban a korallak növekedése lelassul, majd megszűnik, s a koralltelep elpusztul. Megfigyelték, hogy ha a meleg évszakban a tengervíz felszíni hőmérséklete meghaladja a 28°C-ot, a korall-polip „megszabadul” s rajta élő algáktól, és szemmel is érzékelhetően kifehéredik³⁰. Magát a jelenséget ugyan már az 1870-es években leírták, azonban a Csendes-óceánban az 1980-as években tömeges méreteket öltött. A folyamat az 1990-es években még inkább fokozódott. A felszíni hőmérséklet (néhol már a 30 fokot is meghaladó) további emelkedése az Indiai-óceán hatalmas sávján (Afrikától Dél-

³⁰ Kutatások bizonyították, hogy ha a korallak környezetében a vízhőmérséklet az évi szokásos hőmérsékleti maximumot 1-2 °C-kal meghaladja, már elkezdődik a kifehéredés, de például 4 °C-kal melegebb víz esetén már néhány óra alatt akár az állomány 90%-a is elpusztulhat.

Indiáig) a korallak 60-70%-ának elpusztulását okozta (**72. ábra**). 1998 és 2000 vége között a Föld korall-telepeinek 27%-a (!) pusztult el. Legnagyobb károkat az 1998-as, eddigi legnagyobb El Niño-La Nina változás okozta, ugyanis ehhez a 9 hónapos eseményhez köthető a pusztulás 16%-a.



72. ábra. A világtengerek hőmérsékleti anomáliái és a nagy korallpusztulások helyszínei 1997-ben (Forrás: WRI PAGE 2000)

Miután a korallak több százmillió év alatt magasabb hőmérsékleti értéket is elviseltek, a tudósok jelenleg a korábbiaknál gyorsabb változásnak tulajdonítják leginkább a pusztulásukat. A kifehéredési folyamat nem csak a korallakat érinti, hanem más, az algákkal szimbiózisban élő fajokra is kiterjed.

A változások területileg igen differenciáltak – leggyorsabb a pusztulási folyamat az Indiai-óceán területén (**20. táblázat**)³¹.

³¹ Részletes és aktuális területi adatokat a

http://ccma.nos.noaa.gov/ecosystems/coralreef/coral_report_2005/ címen található az anyag elkészítése idején.

20. táblázat. A világtengerek korall-telepeinek pusztulása (%) (az UNEP 2001. évi adatai alapján)

Régió	1998 előtt	1998	2-10 éven belül várható	10-30 éven belül várható
Arab régió	2	33	6	7
Indiai-óceán	13	46	12	11
Ausztrália, Pápua Új-Guinea	1	3	3	6
DK és K-Ázsia	16	18	24	30
Csendes-óceán	4	5	9	14
Karibi térség	21	1	11	22
A Föld egésze	11	16	14	18

A koralltelepek pusztulásában azonban a szárazföldekhez közeli területeken az emberi beavatkozások szerepe közvetlenül is bizonyítható. A trópusi erdők irtása során megnőtt talajerózió helyenként olyan sok hordalékot juttatott a tengerbe, hogy a partközeli korallós életközösségek nem jutottak elegendő fényhez, és ez okozta pusztulásukat. Máskor a mezőgazdasági eredetű szennyezők (főként a nitrogén és a foszfor) által okozott „algavirágzások” okoznak oxigénszegény és rosszabb fényviszonyokat. Ugyancsak komoly károkat okoznak a korall-telepekben az olajszennyezések, a robbantásos halászat, vagy akár a hajók horgonyai is.

Mélytengeri halálzónák

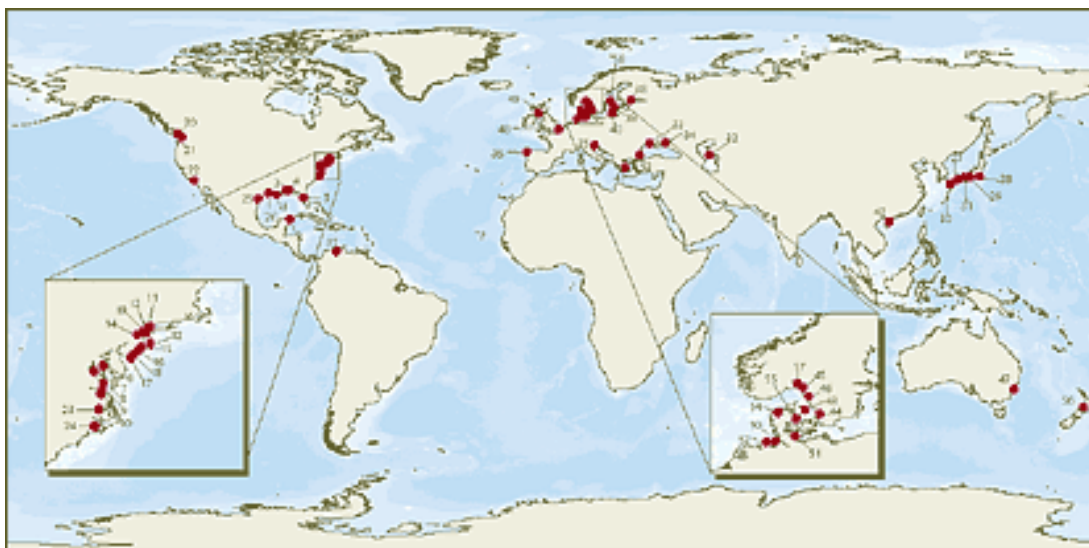
1990 óta megduplázódott és már elérte a százötvenet azoknak a mélytengeri övezeteknek a száma, amelyekből a környezetet szennyező anyagok hatására eltűnt az oxigén (az oldott oxigén mennyisége 2 mg/l alatt van), így azok valóságos hal- és növénytemetővé váltak. Az ENSZ Környezeti Programjának (UNEP) 2003-as összegző kötete olyan új problémaként vetette fel a mélytengeri halálzónák számának gyors szaporodását, ami százmilliók élelmezését veszélyezteti.

A „halálzónák” kialakulásának első számú okozójának a műtrágyázással összefüggő nitrogénszennyezést tartják. A talajból ugyanis a felgyülemlett nitrogént a csapadék a folyókba, onnan pedig a tengerekbe, óceánokba szállítja (évente kb. 160 millió tonna kerül a tengerekbe), ahol az algák robbanásszerű elszaporodását idézi elő. Amikor az algák elpusztulnak és a tengerfenékre süllyednek, ott bomlásnak indulnak, és elvonják a víz oxigéntartalmát. A halálzónák mérete időjárástól is függ, és a melegebb nyári időszakokban alakul ki, s akár az ősz közepéig is eltarthat.

A legnagyobb ismert „halálzónák” (73. *ábra*) elérhetik akár a 70 ezer négyzetkilométeres kiterjedést is. Ilyen nagy kiterjedésű „halálzónák” első sorban Európában, Észak-Amerikában

és Délkelet-Ázsiában alakulnak ki: a legnagyobb a Fekete-tengerben, de jelenős méretűek a Balti-tengerben, az Adriai-tengerben, a Mississippi deltában, az Egyesült Államok keleti partjai mentén, a Jangce és a Gyöngy folyók torkolatánál is. (A World Resources Institute 2000. évi összeállítása összesen 57 ilyen „hypoxia”-s területet sorol fel.³²⁾

Érdekes megfigyelés, hogy például a Mexikói öbölben a cápatámadások növekedését is összefüggésbe hozták a jelenséggel.



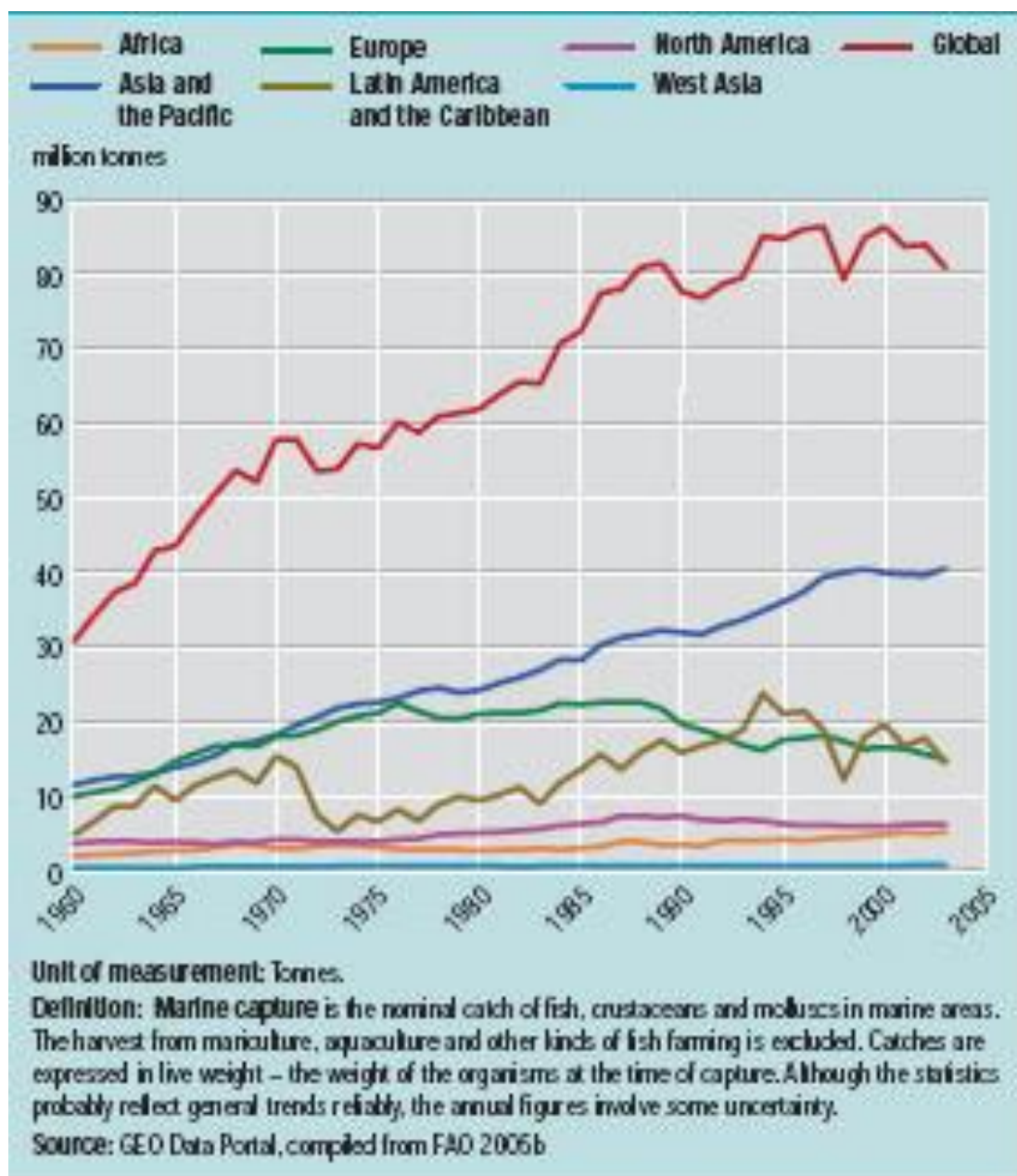
73. ábra. Mélytengeri halálzónák a világtengerekben (Forrás: WRI-PAGE 2000)

2.6.1.3. A világtenger, mint korlátozott táplálékforrás

A víz nem csak a természeti népek ételmezésében, de az emberiség mai ételmezésében is fontos szerepet tölt be. A világtengerekben sokáig csak a halászháló mennyisége szabott határt a kifogott halak mennyiségének, az 1990-es évek közepére azonban már elértük (sőt egyes tengerrészekben már túl is léptük) a fenntartható módon halászható mennyiség maximumát. Az 1950-ben még csupán 21 millió tonnás fogás ekkorra meghaladta a 90 millió tonnát, és megközelítette azt a FAO becslést, amely már az 1970-es években 100 millió tonna körül becsülte az elérhető legmagasabb értéket. Az 1950-es és '60-as években látványosan nőtt a kifogott mennyiség, köszönhetően a növekvő és egyre jobban felszerelt halászflokkoknak. A

³² A megnevezett területek (1. Dead Zone,) 2. Nichupti Lagoon, 3. Mobile Bay, 4. Perdido Bay, 5. Hillsborough Bay, 6. Chesapeake Mainstem, 7. Potomac River, 8. Rappahannock River, 9. York River, 10. Pagan River, 11. Long Island Sound, 12. NY/NJ Bight, 13. Flushing Bay, 14. Raritan Bay, 15. Barnegat Inlet, 16. Mullica River Estuary, 17. Townsend-Hereford Inlet, 18. Great Egg Harbor River, 19. New York City, 20. Puget Sound, 21. Saanich Inlet, 22. Los Angeles, 23. Pamlico River, 24. Cape Fear River, 25. Corpus Christi Bay, 26. Freeport, 27. Seto Inland Sea, 28. Tokyo Harbor, 29. Mikawa & Ise Bays, 30. Omura Bay, 31. Osaka Bay, 32. Caspian Sea, 33. Black Sea NW Shelf, 34. Sea of Azov, 35. Gulf of Trieste, 36. Rias Baixas, 37. Fosa de Caraico, 38. Gulf of Finland, 39. Baltic Sea Central, 40. Bornhol, Basin, 41. Elefsis Bay, 42. Tolo Harbor, Hong Kong, 43. Kattegat, 44. Laholm Bay, 45. Byfjord, 46. Gullmarsfjord, 47. Port Hacking, 48. Sommone Bay, 49. Lough Line, 50. German Bight, North Sea, 51. Kiel Bay, 52. Wadden Sea, 53. Marmara Sea, 54. Limfjorden, 55. Arhus Bay, 56. New Zealand, 57. Oslofjord, 58. Stockholm Inner Archipelago

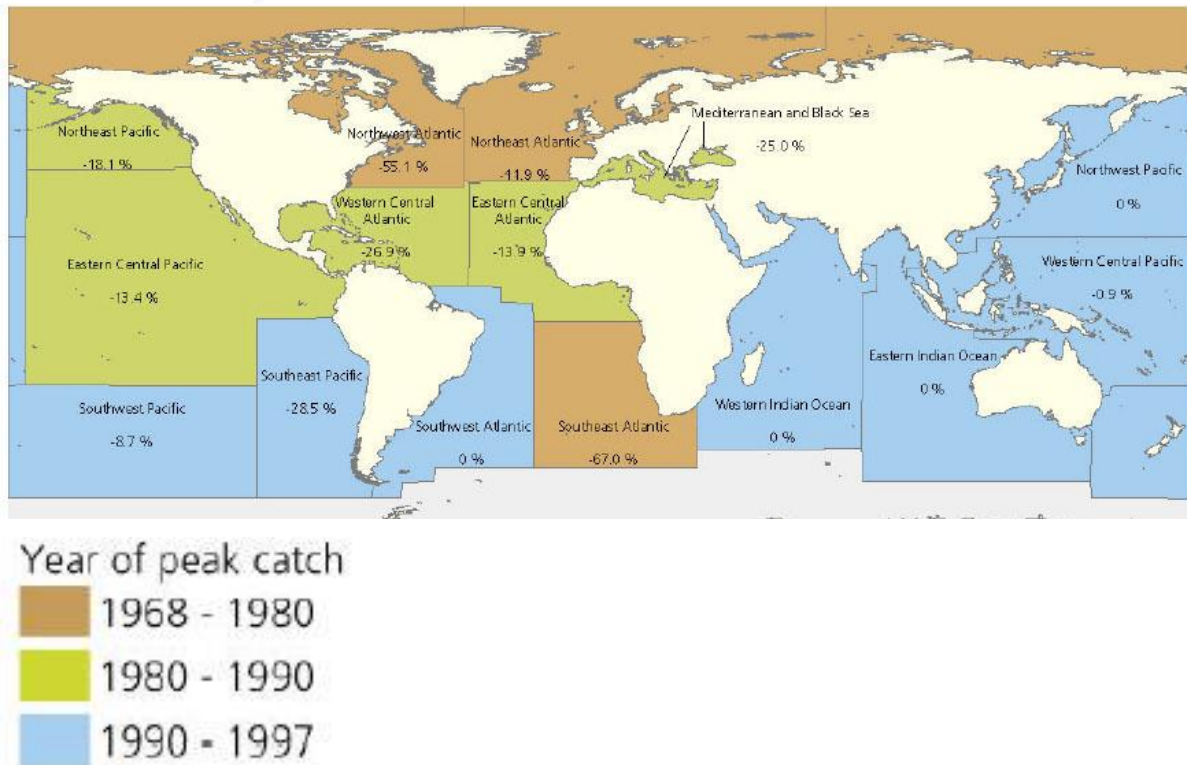
halászat ebben az időben már nem a szerencse műve volt, hanem a technikai fejlettség határozta meg: lehetővé vált fajokként vonuló rajokat halászni. A nagy mértékű növekedést előbb az 1970-es évek elejétől a kitermelés ütemének csökkenése, majd az 1990-es években már a stagnáló eredmény mellett látványos problémák követték. Igaz, a globális tengeri halfogás – főként Kína itt is látványos növekedése miatt – 2003-ban is az 1980-as évek végének szintjén volt (74. ábra), de a halászterületek többségét a kimerülés fenyegeti, a túlhalászás jelei mindinkább nyilvánvalóbbak. Külön említést érdemel, hogy Európa és Észak-Amerika halászat bő másfél évtizede csökkenő tendenciájú.



74. ábra. A világtengerekből kifogott hal mennyisége főbb régióként és globálisan 1960-2003 (a FAO 2005-ös adatai alapján)

A Föld legjelentősebb 15 halássterülete közül 11 visszaesőben van, s a legjelentősebb halfajok 2/3-ának állománya hanyatlik. A legnagyobb visszaesés a DK-atlanti és az ÉNy-atlanti térségben tapasztalható, ahol kevesebb, mint egyharmadára, illetve felére esett a fogások mennyisége a csúcsidezshoz (1968-1980) képest (75. ábra).

Periods of Peak Fishery Catches and Declines Since the Peak Year



75. ábra. A 2000. évi halfogás mennyisége a legsikeresebb évhez viszonyítva a Föld nagy halássterületein (a legnagyobb fogású időszak feltüntetésével) (Forrás: WRI – PAGE 2000)

Jól mutatja a probléma nagyságát, hogy például a tőkehal-fogás az Atlanti-óceánban az 1969-es csúcstről 1992-re 69%-kal esett vissza, a nyugat-atlanti tonhal pedig 1970 és 1993 között 80%-kal. A folyamatot jól példázza az Északi- és a Balti-tenger esete is, ahol az 1960-as években vált általánossá a nagyteljesítményű hajók által végzett vonóhálós halászat, amivel szinte kopaszra söpörték a tengerfeneket. 1960 és 1965 között a fogási eredmények megkétszereződtek, de például a heringet sikerült annyira megritkítani, hogy fogását 1977 és 1982 között teljesen abba kellett hagyni, s azóta sem állítható normálisan vissza. A heringektől függő tőkehalállomány halászatát is az összeomlás fenyegeti. Látványos változáson ment át Peru szardella halászata is. 1950 és 1970 között a semmiből 13,1 millió tonnára nőtt (ez akkor a világ halfogásának ötöde volt), majd 1974-ig 2, 1984-re pedig 0,8 millió tonnára esett vissza, hogy utána jelentősen növekedni tudjon (a korábbi csúcsmennyiség 2/3-ára 1995-re).

Jellemző változás, hogy egyes halfajok populációinak visszaesése után *a korábban kevésbé értékesnek tartott fajok is sorra kerültek*. E folyamatban a nyílt tengeri fajok részaránya növekedett, az 1990-es évek közepén már elérte a teljes fogás felét, miközben az 1980-as évek során a növekedés közel $\frac{3}{4}$ -ét öt csekély értékű faj tette ki. A közép-atlanti térségben, az 1960-as években domináns tonhal csökkenése után a '70-es években már a kardhalat, majd újabb évtized múltán a tengeri pisztrángot halászták. Az amerikai partoknál néhol a korábbi halfajokat egyre gyakrabban váltották fel a ráják vagy a kis macskacápa. A túlhalászásnak más szembeötlő jelei is jelentkeztek, például *csökkentek a kifogott halak méretei*. A csalizott kardhalak átlagos mérete 120-ról 30 kg-ra csökkent, jól mutatva a populáció nagyságának visszaesését.

A kifogott halak minőségi romlásával csak átmenetileg lehetett a mennyiséget fokozni vagy tartani. Mára egyes területeken már látványos visszaesés következett be. Az Atlanti-óceán északnyugati térségében az 1970-es évek óta 40, a délkeleti területein 50%-os visszaesést regisztrálhattunk az 1990-es évek közepéig, a Fekete-tengeren pedig már 80%-kal zuhant a halfogás.

Külön is érdemes szólni a világtengerekben folytatott bálnavadászatról, ami az állatok mérete miatt sokkal inkább az emberek látószögébe került. A bálnahalászat mérete oly mértéket ért el, hogy azt – előbb csak környezetvédő szervezetek tiltakozása, majd államok határozott fellépése nyomán (a Nemzetközi Bálnavadászati Egyezményben) – gyakorlatilag meg kellett tiltani (bővebben lásd később). A tilalmat azonban néhány ország (leginkább Japán) trükkökkel kijátssza, legutóbb 2006. őszén Izland is újraindította korábban megszüntetett bálnavadászát (ígaz csak szolid mértékben).

Hosszan sorolhatóak lennének azok a példák, amelyek jól mutatják, hogy a tengeri halászat terén az emberiség elérte a fenntarthatóság határát. Ezen kívül azonban a halászatnak további jelentős globális összefüggései is vannak.

Az ökológiai szempontokat sokáig teljesen nélkülöző halászati rablógazdálkodás fajok sokaságát pusztította ki, vagy sodorta a kipusztulás közelébe. Például az egykor többszázrezes bálnafajok néhány ezresre csökkentek. A specializálódott halászati tevékenység számos nem „cél állat” állományát is értelmetlenül pusztította.

A halászatot sújtó problémák nagyon eltérő módon érintik a különböző fejlettségű térségeket. A jobb technikai felkészültségű, nagyobb gazdasági erővel rendelkező országok látszólag töretlenül folytatni tudják tevékenységüket, míg a partközeli vizekben, kezdetlegesebb technikával dolgozó szegényebb halászoknak egyre gyéresebb a fogásuk. A túlterhelt vizekről a szegényebb országok vizeire áttelepülő halászflokkok ugyanis ki tudták használni a technikai

különbségeket, és az ellenőrzés gyengeségeit. A szűkülő halászati lehetőségek és a növekvő ár, a fejlett országok javára alakítja a fogyasztási arányokat. Ez az egyenlőtlen fejlődés azt eredményezi, sok olyan szegényebb országban, ahol a hal korábban a népélelmezés része volt, ma már alig kerül asztalra.

2.6.1.4. A világtenger, mint erőforrás

A világtengert hosszú időn keresztül közlekedési pályaként, illetve élelemforrásként használta az emberiség, a 20. század második felétől azonban új perspektívák nyíltak meg, és ma már mint nyersanyagforrásként ugyanolyan fontos lett, a benne rejlő óriási (ma még alig hasznosított) hő és mozgási energia a jövőben egyre inkább felértékelődhet.

Légi közlekedés hiányában évezredekken keresztül a vízfelület jelentette a viszonylagosan szabad közlekedés lehetőségét a nagyvilágban. A hajózás nagy árú mennyiségek nagy távolságra történő szállítását tették lehetővé. Azok a népek, amelyek tudtak élni ezzel a természeti adottsággal jelentős gazdasági előnyt szerezhettek, ezek egy része máig érezheti hatását. Az ókorban Perzsia, Kréta, a görög városok, majd később a Mediterránium városállamai (közülük is kiemelhető Velence) tengeri erőfölényüket hatalmi és gazdasági célból is ki tudták használni. Később a nagy földrajzi felfedezések nyomán Anglia, Franciaország, Spanyolország, Portugália, vagy Hollandia tudott jelentős világhatalmi pozíciókat szerezni, gyarmati birodalmakat kiépíteni. Történelmi tanulmányainkból ismert, hogy ezekért a pozíciókért folytatott vetélkedés meghatározó szerepet játszott a világháborúk kirobbanásában is.

A 2. világháborút követő gazdasági fellendülés, a technikai fejlődése és az energiahordozók iránti egyre fokozódó igény a világtengerek újabb hasznosítási lehetőségét indította el. Amikor kiderült, hogy a szárazföldek mentén található self területek óriási kőolaj- és gáztelepeket rejtenek ismét felértékelődött tengerek szerepe. Ennek is meghatározó szerepe volt az ún. nemzeti felségvizek – nemzetközi megállapodásban rögzített (lásd később) – kiterjesztésében. Az olaj új államokat emelt a világ gazdaság kedvezményezettjei közé, s közülük többen tengerparti területeiknek köszönhetik meggazdagodásukat (pl. a Perzsa öböl vidéke).

A világtenger közlekedésben játszott szerepe is újabb lendületet kapott a hatalmas méretű olaj-tankerek megjelenésével. A nagy tankerek megjelenése azonban igazi ökológiai katasztrófák veszélyét is magával hozta – mint ahogyan az élet sajnos többször bizonyította is. A fő tengeri útvonalakat egyébként is jól kijelölték az olajos szennyezések, a nagyobb tanker-katasztrófák

azonban koncentráltan okoznak hatalmas károkat nemcsak a tenger élővilágában, hanem a partok mentén is. Az óceánokba, tengerekbe kerülő olajos szennyezések mennyisége elérheti évente akár a több millió tonnát is (ezeknek kb. harmadáért felelősek a tankerek és a tengeri olajkutak).

Az óceánok és tengerek a szénhidrogéneken kívül számos nyersanyagot rejtnek. A világtengerek vizében oldott formában óriási mennyiségű só található, hiszen átlagos sótartalma 33-35‰ körül alakul.³³ A só összetételében a kloridok a dominálnak (főként a konyhasó), részesedésük 88,6%, és a szulfátoknak van még nagyobb szerepük (10,8%). A földtörténeti múltban számtalanszor előfordult, hogy egy-egy tenger, vagy tengerág elzáródott a víz-utánpótlástól, és a víz elpárolgása után hatalmas (akár ezer méter vastagságot is meghaladó) sótelepek maradtak vissza. Ezeket a világ sok táján ma is hasznosítják.

Az 1970-es években bekövetkezett nyersanyag árrobbanás nyomán nagyobb figyelem irányult a világtengerekre³⁴. A kontinensek partjainak közelében szerte a világon jelentős érctelepek vannak. Ezeket a szárazulatok (vulkáni eredetű kőzeteinek) lepusztulása során a folyóvizek szállították a tengerekbe, s az érc vagy a vízben való szállítás során, vagy a tengerek hullámzásának hatására dúsult fel az üledékben. Legfontosabb ilyen ércek: króm, titán, cirkon, ólom, cink, platina, arany, réz, vas.

A nyílt óceánok mélyén a vízből kicsapódó konkréciók halmozódhatnak fel. A legismertebbek a több fajta fémeket is tartalmazó, burgonya nagyságú mangángumók. Bár ezek az ércgumók számos egyéb fémeket is tartalmaznak és mennyiségük is tetemes (becslések szerint több mint 1600 milliárd tonna), azonban több ezer méteres mélységben vannak az óceán fenekén, így egyelőre inkább csak az emberiség tartalékának tekinthetők.

Az előbbieken túl a világtengerek számos gazdasági hasznosítási lehetőséget kínálnak az emberiség számára. Így például az ár-apály jelenség folyamatosan hatalmas víztömegeket mozgat meg, s a megújuló energia egyik típusának tekinthetjük. A benne rejlő hatalmas

³³ A mindenkori sótartalom főként a csapadék és a párolgás hatására alakul, amit a partok közelében a beömlő folyókból, a hidegebb vidékeken pedig a jégolvadásból származó víz jelentősen módosíthat. Ezen hatások miatt a tényleges sótartalom széles tartományban (0-42‰) között változik. A Vörös-tengeren a vízpótlás hiányában és a nagy párolgás miatt a 40‰-et is meghaladja.

³⁴ A nyersanyag problémák felvetődése nyomán az „Aktuelle JRO Landkarte” már 1978-ban külön számot szentelt a világtenger nyersanyag szerepének (8/1978: Das Ringen um die Weltmeere).

lehetőségek ellenére energetikai hasznosítása még gyermekcipőben van, az elkészült erőművek legfeljebb aránylag kis kapacitásúak³⁵.

2.6.1.5. A világtenger, mint az emberiség szemetese

A szárazföldről a tengerekbe ömlő folyók természetes körülmények között is rengeteg üledéket szállítottak a part menti vizekbe, az emberi tevékenység azonban nemcsak felgyorsította ezt a folyamatot, de rengeteg szennyező anyaggal ki is egészítette azt. Ezek a hatások a világ sok táján gyökeresen átalakították a tenger élővilágát.

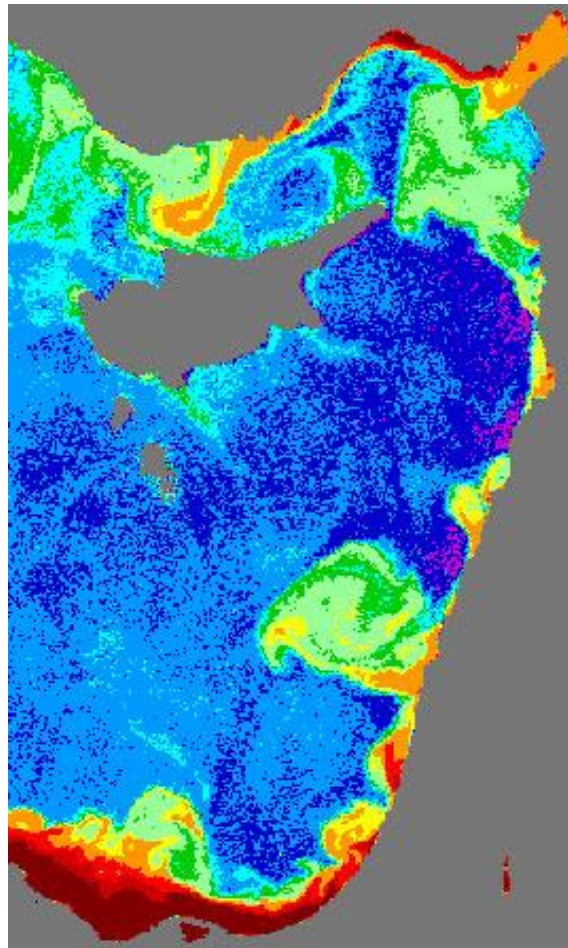
Ha a világóceán élővilágának szerepét vizsgáljuk, az két, többé-kevésbé elkülönülő részre bontható. A kontinensektől távolabbi területek kevésbé változatosak ugyan, de az ezeket a tisztább, nyílt vizeket (ami az óceánok 9/10-ét teszik ki) uraló fitoplanktonoknak köszönhető a tengeri termékenység 4/5-e, s ez a vízfelület a természetes biológiai (CO₂) pumpa fő mozgatója. A szárazfölkörnyezete ugyanakkor a bemosódó tápanyagok miatt sokkal gazdagabb és változatosabb élővilágot vonz. Az óceáni áramlások nyomán a fitoplanktonok is feldúsulnak itt, s a szárazfölkörnyezetében vannak a nagy óceáni feláramlási zónák is, amelyek szintén tápanyag-gazdag területek. Ezek az okai annak, hogy a part menti vizek a halászat legfontosabb területei, s a halzsákmány 90%-a ezen tájak harmadáról származik, s a kereskedelmi értékű fajok 2/3-a életének kezdeti szakaszát szintén itt tölti. Az emberi tevékenység hatása viszont éppen ez utóbbi, az élővilág szempontjából (de végső soron az ember számára is) legfontosabb területeket károsítja.

2002-ben a Föld lakosságának több mint fele 100 kilométernél közelebb élt a tengerpartokhoz³⁶, és 2025-re ez az arány eléri a ¾-et. Így azután nem meglepő, hogy a világtengerekbe kerülő szennyezések ¾-éért az emberi tevékenység felelős. A folyók a gyakran helytelen mezőgazdasági tevékenység, a fokozódó és az ipari tevékenységek nyomán egyre több hordalékot, tápanyagot (trágyázás, szennyvizek) és mérgező elemet szállítanak a tengerekbe. Ezek a szennyeződések megzavarják az élővilág természetes fejlődését, jelentősen megritkíthatja egyes élőlények populációját, felhalmozódhatnak az állatok szervezetében, majd emberi táplálékként akár mérgezőes halált is okozhatnak. Egy az 1990-es évek elején végzett

³⁵ A legismertebb ár-apály erőmű a franciaországi St Malo és Dinard között épült (1961-1967 között) 240 MW teljesítménnyel, de 26 év után üzemi problémák miatt leállították.

³⁶ A http://earthtrends.wri.org/pdf_library/maps/1-4_m_Popdistcoast.pdf címen közzétett térkép jól mutatja, a népsűrűség a partok mentén nagy területeken meghaladja az 500 fő/km²-t.

kutatás szoros kapcsolatot talált a gazdasági aktivitás és a tengerekbe jutott szennyeződés mértéke között. A Rajna vízgyűjtőjén például tízszer akkora a népsűrűség, mint a Mississippiben, és tízszer annyi tápanyagot szállít a tengerbe is, annak ellenére, hogy az utóbbi vízgyűjtője tizennégyszer nagyobb. A bejutott szennyeződések, tápanyag-feldúsulások sokszor időszakos algavirágzásokat okoznak (76. ábra)³⁷ a városok part menti övezeteiben és előidézhetik a korábban már bemutatott biológiailag halott zónákat. A partvidéki területek rendezése is számos veszélyt jelent az élővilágra. Sokfelé a mangrovésok, a part közeli mocsarak teszik lehetővé az utódok felnevelését. Az USA atlanti-óceáni partjainál az egykor bőséges állományú menhaden (a szardíniával és a heringgel rokon faj) negyedével fogyatkozott meg tíz év alatt a tengerparti mocsarak visszaszorulása miatt.



76. ábra. A Földközi-tenger keleti medencéjének szennyezettsége 2001. május 15-én (Forrás: UNEP-DEWA)

³⁷ Az ábrán jól látható, hogy a part menti részeken tapasztalható barna és zöld színű területek algafeldúsulása a nagyvárosokhoz és a mezőgazdasági területek felől beömlő folyókhoz köthető.

A tengerparti területekhez kötődik a modern ipari környezetszennyezés egyik legsúlyosabb katasztrófája az ún. Minamata-ügy volt. Az 1950-es évek elején Japán egy kis falujában, Minamatában tömegesen tapasztaltak idegrendszeri elváltozásokat, születési rendellenességeket, amelyről kiderült, hogy higanymérgezésre vezethető vissza. Feltárták, hogy egy műanyagokat előállító vegyi gyár, katalizátorként higany tartalmú vegyületet használt. Azt gondolták, hogy a vízben rosszul oldódó higany-szulfát a tengerbe vezetve az üledékben „örökre” eltemetődik. Nem számoltak azzal, hogy az üledékben található baktériumok elbonthatják azt. A folyamat során erősen toxikus metil-higany képződött, ami ugyan csak nagyon alacsony koncentrációban volt a vízben, de tulajdonságai alapján feldúsult a táplálékláncban: előbb a halak és kagylók, majd az azokat elfogyasztó emberek szervezetében. Több ezren betegedtek meg és néhány száz (esetleg ezret meghaladó) haláleset is bekövetkezett. A halhúsban felhalmozódott a higany még 15 év múlva is mérgezést okozott, ezért 1974-ben védőhálóval zárták el az öblöt a halak elől. A szennyezés után negyven évvel lett újra megfelelő minőségű a víz, s az 1990-es évek vége felé felszedték a védőhálót. A minamata-ügy ugyanakkor felhívta az Egészségügyi Világszervezet (WHO) figyelmét a mikroszennyezőkre, s ennek hatására készítették el az ilyen veszélyes anyagok listáját (nehéz fémek, DDT, PCB, PAH, stb.).

Az eddig bemutatott hatások inkább csak az emberiség tevékenységének közvetett hatásaként értékelhető. Azonban egészen az 1980-as évekig (bár már 1972 óta nemzetközi egyezményben tiltott volt – lásd később) bevett gyakorlat volt a veszélyes hulladékok tengerbe süllyesztése. Így például az Atlanti óceán egyes térségei, vagy a Novaja Zemlja körüli vizek a radioaktív hulladékok rendszeres lerakó helyei voltak. Ma még megbecsülni sem tudjuk, mekkora veszélyt jelenthetnek ezek a világtengerekben „szőnyeg alá seprött” veszélyes anyagok.

2.6.1.6. A világóceán, mint veszélyforrás

Az emberiség élete – ahogyan már a korábbi fejezetekben is láttuk – sokban függ a világtengerektől. Használja, esetenként kihasználja annak értékeit, és akarva, akaratlanul jelentős hatást gyakorol az ott zajló folyamatokra. A természet azonban számtalanszor bebizonyította már, hogy bár az ember sok mindenre képes, bizonyos természeti hatások ellen védtelen. Ma már sejthető, hogy a Biblia özönvíz „sztorija” valós eseményekre utalhat,

(születtek már rá tudományos magyarázatok), de az utóbbi évezredek során is okozott hatalmas pusztításokat a tenger – sőt időnként még a történelem menetébe is beavatkozott.

Cunami, szökőár³⁸

Egy-egy erős földrengés, vagy vulkánkitörés által elindított cunami óriási víztömegével hatalmas pusztításokat képes okozni. Média irányította világunkban tipikusnak mondható, hogy a jelenség a 2004. decemberi, indonéziai cunami³⁹ után lett mindenki számára ismert, hiszen a 300 ezret megközelítő halálos áldozat kiemelten irányította rá az eseményre a figyelmet. Valóságban azonban sokkal természetesebb a folyamat, mind gondolnánk: csak Japánban (a szó is japán eredetű) 684 óta közel 200 cunamit írtak le, azaz itt kevesebb mint 7 évente előfordul. A pusztítást 2004-ben egy kiemelkedően erős tenger alatti földrengés⁴⁰ indította el, s a rendelkezésünkre álló források szerint az emberiség történetében ez volt a legtöbb emberáldozatot követelő cunami⁴¹.

A történelmi időben a legnagyobb hatású a Szantorin szigeti vulkán i.e. 1550-1600 táján bekövetkezett felrobbanása nyomán kialakult szökőár pusztítása volt. Ez semmisítette meg a Földközi tengeren akkoriban uralkodó krétai hajóhadat, s ez vezetett a birodalom hanyatlásához.

Trópusi ciklonok (hurrikán, tájfun)

Az óceánok a szülőhelyei a Föld legpusztítóbb légköri folyamatainak is. Összefoglaló nevük „trópusi ciklon”, de valójában a ciklonokkal csak forgási irányukban mutatnak hasonlóságot, kialakulásukban és a környezetre gyakorolt hatásaikban óriási különbség van közöttük. A világ

³⁸ Eredetileg a szökőár fogalmát a Nap és Hold együttállása nyomán kialakuló maximális méretű dagály eseményére használták. Ez rendszeresen ismétlődő, előre jól jelezhető, azaz nem hirtelen kialakuló jelenség. Az utóbbi időben azonban már elterjedtebb a geológiai okokra visszavezethető cunami szinonimájaként való használata. Ez ugyan nem helyes, de a köznyelvben oly mértékben elterjedt, hogy a szakzsargon is kénytelen vele megbarátkozni.

³⁹ Egy internetes enciklopédia animációja (http://en.wikipedia.org/wiki/2004_Indian_Ocean_earthquake) jól szemlélteti milyen hatalmas területen fejtette ki hatását.

⁴⁰ A kezdeti mérések a Richter skála szerint 9-es erősségűnek határozták meg, és a 4. legerősebb regisztrált rengésnek tartották, az utólagos értékelések szerint akár 9,3-as is lehetett, ami már a 2. helyre rangsorolja.

⁴¹ Az utóbbi évszázadokban további tíz cunami követelt legalább tízezer áldozatot (lásd a http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_disasters_by_death_toll#Tsunami címen)

különböző területein más-más néven nevezik a jelenséget: Amerikában hurrikán, Dél-Kelet Ázsiában tájfun, Ausztráliában pedig willy-willy a neve.

A trópusi ciklonok kialakulásának feltétele a legalább 27 °C-os tengervíz, így keletkezési helyük aránylag jól behatárolható (**77. ábra**). Az ilyen területek fölött meginduló felhőképződés során felszabaduló látens hő egy önmagát erősítő folyamatot generál, aminek következtében felfelé áramló légörvény fejlődik ki. Középpontjában az egyre intenzívebb feláramlás miatt megindul a légnyomás csökkenése, s ott egy nyomási depresszió jön létre, amelyben a légtömegek forgása egyre gyorsul. Ha forgási sebesség túllépi a 60 km/h-t trópusi viharról, ha viszont már a 120 km/h-t is, akkor hurrikánról vagy tájfunról beszélünk. A környező területek nyomásviszonyai által befolyásoltan ezek az aktív légköri képződmények továbbhaladnak, s meleg óceánok fölött energiájuk tovább fokozódik. A legpusztítóbb hurrikánokban 250 km/h-t meghaladó szélsőségek is kialakulhatnak (de mértek már 320 km/órás értékeket is). Legtöbbször csak a szárazföldet elérve szűnik meg az energia utánpótlódása, s miközben ott hatalmas pusztításokat okoz, a parttól távolodva egyre lassul, majd viharrá „szelídül” (**78. ábra**). Mivel a 27 °C-t meghaladó óceáni vízhőmérsékletek csak nyár végére alakulnak ki nagyobb területeken, a trópusi ciklonok születésének időszaka az év egy részére korlátozódik. Az USA DK-i részein augusztus-szeptember folyamán rendszeresen végigvonuló hurrikánok miatt, ezt az időszakot a hurrikánok szezónjának is szokták nevezni. Egy-egy szezónban akár 15-20 hurrikán is kialakulhat az Észak-atlanti térségben, de 2005-ben számuk szokatlanul magas (27) volt, nem meglepő tehát, hogy a WMO 2005. évi összegző jelentésének borítóján erről közöl grafikont (**79. ábra**).

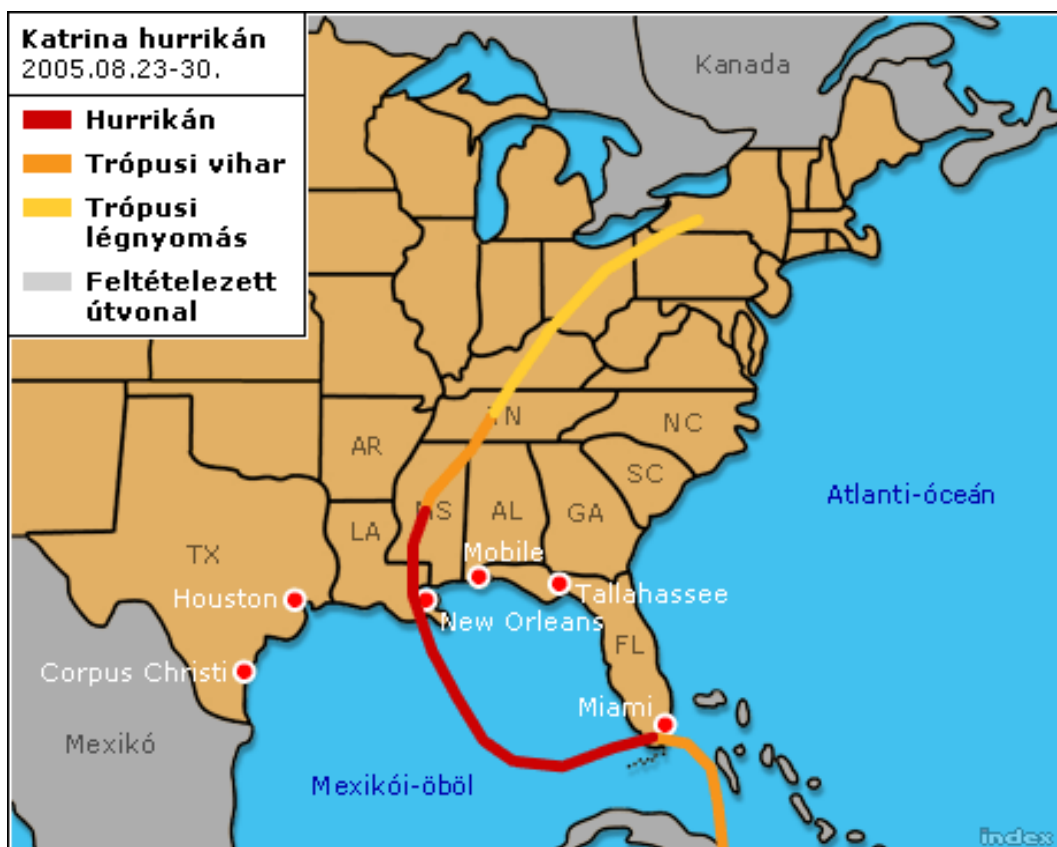
A viharossá erősödő trópusi ciklonokat évente (és térségenként) keletkezésük ideje szerint, ABC sorrendben névvel látják el.

A trópusi ciklonok óriási károkat okozhatnak, vagy komoly emberáldozatokkal járhatnak. A Bhola tájfun 1970-ben mintegy fél millió ember halálát okozta Bangladesben⁴², az USA-ban pedig eddig a legnagyobb kárt (118 milliárd dollár) a Katrina hurrikán okozta 2005-ben. A károk csökkentése érdekében napjainkban már jól működő előrejelző rendszer működik az érintett területeken. Ezek segítségével azonban inkább csak az emberáldozatok számát lehet mérsékelni, az anyagi károkat már kevésbé – ahogyan a Katrina példája is mutatja.

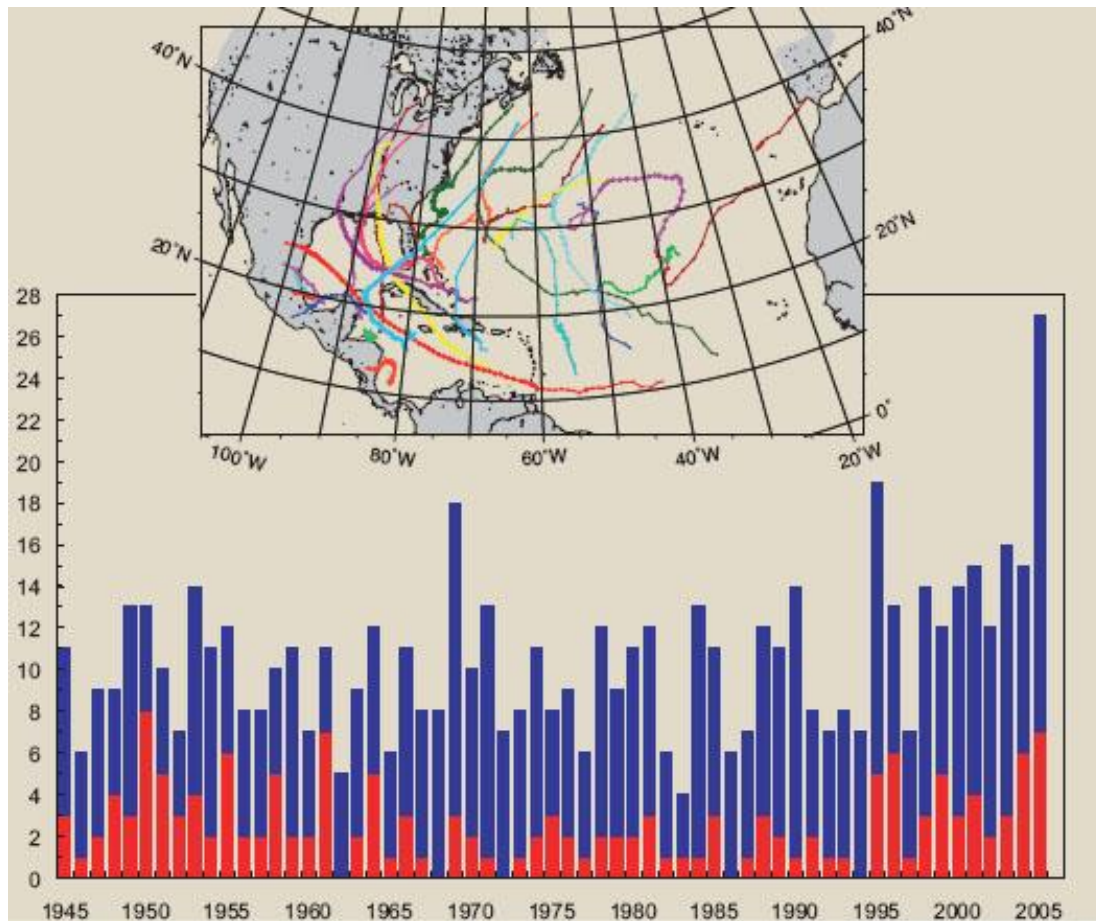
⁴² A http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_disasters_by_death_toll címen bővebb lista is található, ezen természeti katasztrófák áldozatairól.



77. ábra. A trópusi ciklonok keletkezési területei (Forrás:Sulinet)



78. ábra. A Katrina hurrikán útvonala és erőssége 2005. augusztusában (Forrás: Index)



79. ábra. *Nevet kapott viharok (kék) és hurrikánok (piros) Észak-Amerikában (1945-2005), valamint a jelentősebbek útvonalának feltüntetésével (Forrás: NSDC NOAA)*

A világtenger szintváltozása

Az előbb ismertetett természeti katasztrófák gyors lefolyásúak. Van azonban egy lassú, de nagy területeket veszélyeztető folyamat, a világóceán szintjének emelkedése. Ez a folyamat kétféle módon is bekövethet (abszolút vagy relatív vízszint-emelkedéssel).

A földtörténet során geológiai okokból a világtengerek szintje többször jelentősen megemelkedett, illetve visszahúzódott (transzgresszió és regresszió). A Föld légkörének felmelegedése – ami a szárazföldeken (különösen az Antarktison) felhalmozódott jég olvadásával jár – szintén megemelheti a tengerszintet. Ez a folyamat valamennyi szárazföld partvidékét veszélyeztetheti, de különösen a világóceánból alig kiemelkedő szigeteket.

Egyenlőre úgy tűnik, hogy az Északi Sarkot jelentősebben érinti a fölmelegedés, mint a délit. Ennek valószínű oka, hogy az Antarktisz szárazföldjén felhalmozódott vastagabb jégtakaró lassabban válaszol a hőmérsékleti változásokra, valamint az is, hogy ott nem érvényesülhet a mélyből a meledő víz hatása.

A világtenger szintjének változása az utóbbi száz év során 10-25 cm-re tehető. De már ez a kis változás már mintegy 50 millió embert veszélyeztet a Földön. Félméteres emelkedés már 92 millió embert űzne el lakóterületéről, 1 méteres vízszintnövekedéskor azonban Bangladesnek már 18%-át, a Marshall-szigeteknek viszont 4/5-ét borítaná el a víz, a Nílus-deltában pedig 4500 km²-ről több mint 6 millió embernek kellene elköltöznie. (Nem véletlen tehát, hogy az ilyen katasztrófától tartó kis szigetországok különösen aktívak voltak az 1995-ös berlini klímakonferencián.)

Vannak azonban olyan tengerpart menti területek, ahol geológiai okok miatt a szárazföld süllyed, s ezért relatív tengerszint növekedés tapasztalható. Az ilyen területen élők folyamatos küzdelmet folytatnak az emelkedő tengerrel. A legismertebb ilyen terület Hollandia és környezete. Hollandiában gátrendszerek építésével, a mélyen fekvő területek folyamatos vízmentesítésével, feltöltésekkel védekeznek az emelkedő tengerszint támadása ellen. Ennek sikere a technikai fejlettség mellett azonban a természeti erők nehezen kiszámítható (esetlegesen kumulálódó) hatásaitól is függ.

2.6.2. Édesvizek

Bár arányát tekintve az édesvíz csupán 2,5%-kal részesedik a vízkészletekből, az élővilág jelentős része, illetve az ember számára létfontosságú. Hosszú évezredek óta a természetes készletek minden mennyiségi és minőségi korlátozás nélkül kielégítették az igényeket, emiatt a vizet sokáig nem is tartották számottevő erőforrásnak a világ nagy részén. A gyors népességnövekedés, a jelentősen megnőtt környezetszennyezés hatására bekövetkező óriási minőségi romlás, valamint a vízfelhasználás iránti gyorsan növekvő igények együttesen azt eredményezték, hogy az édesvíz mára már stratégiai jelentőségű „nyersanyag” lett.

A vízzel kapcsolatos problémák az 1960-as évektől egyre súlyosabban jelentkeztek. Globális problémaként való jelentkezését mutatja, hogy az 1980-as éveket az ENSZ „*az ivóvíz és a csatornázás évtizedének*” nyilvánította. Később önálló ENSZ konferencia (Dublin, 1992) foglalkozott vele, de ennek ellenére egyre inkább nyilvánvaló lett, hogy az élelmezés mellett a víz az emberiség jövőjének másik „szűk keresztmetszete”.

A vízproblémának mind a két oldala, a mennyiségi és a minőségi is egyre feszítőbb. A vízfelhasználás mindenütt a világon nő. Az emberiség a harmadik évezred elején a rendelkezésre álló édesvíznek már mintegy 54%-át használja, ami 2025-re várhatóan 70%-ra nő (ha azonban az egy főre jutó felhasználás mértéke az utóbbi évek ütemének megfelelően

emelkedik, akár a 90%-ot is elérheti). A minőségi gondokat mutatja, hogy mintegy 2,3 milliárd fő van veszélyeztetve a rossz minőségű vizek miatt, és évente több mint 5 millió ember hal meg vízhez kapcsolódó fertőzésekben (ez utóbbi tízszerese a háborúkban elesettek számának). A gyermekhalandóság mintegy 60%-ban összefügg a vizekkel. 2001-ben 1,96 millió fő, azaz naponta több mint ötezer (közte 1,3 millió öt év alatti gyermek) halt meg – döntően a fertőző ivóvizek miatt – vérhasban. Olyan népes országokban, mint Kína, India vagy Indonézia, kétszer annyian halnak meg vérhasban, mint AIDS-ben. A vizes élőhelyekhez kapcsolódó betegségek között a malária a legjelentősebb, évente több mint egy millió ember halálát okozva (ennek 90%-a Afrika Szaharától délre elhelyezkedő területein).

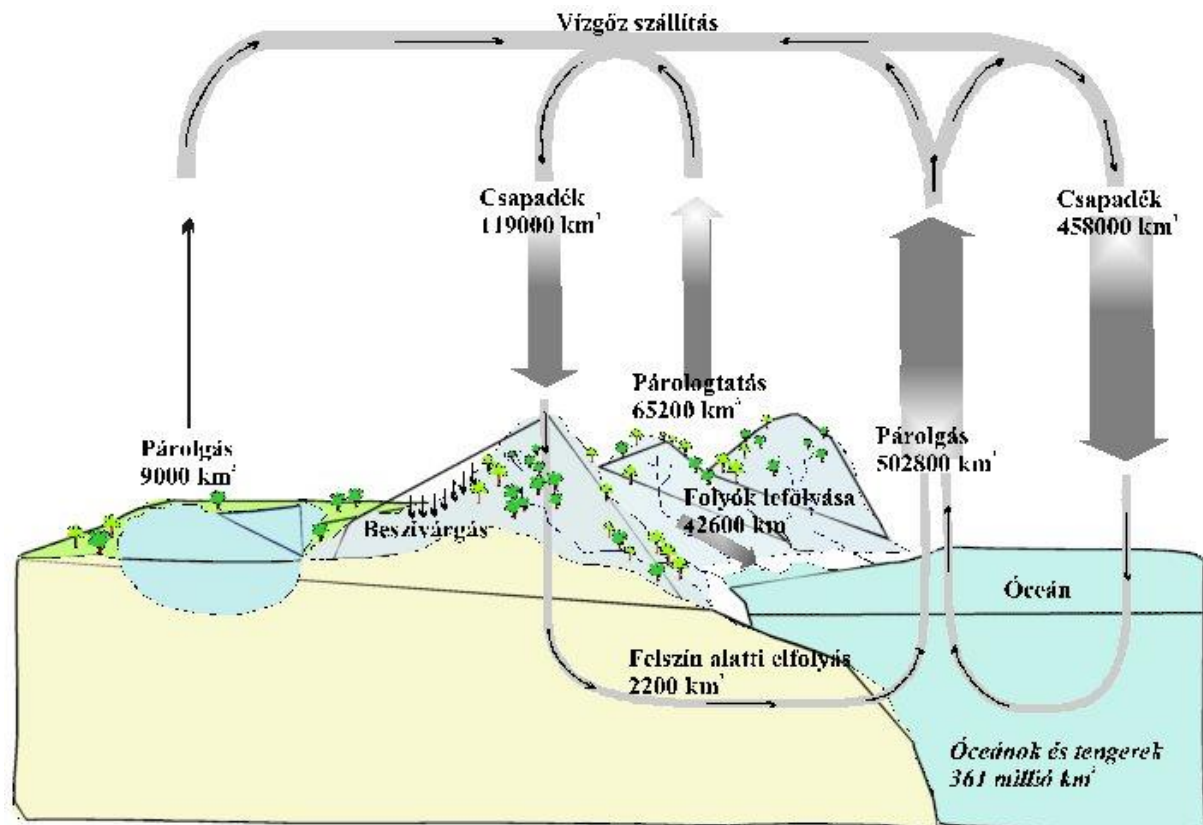
A folyóvízi ökoszisztémák szinte mindenhol veszélyeztetettek a nem fenntartható fejlődés és az édesvízi erőforrások túlhasználata miatt. A Föld ötszáz legnagyobb folyójának fele nagyon szennyezett és túlhasznált, van, ahol kiszáradás fenyeget. Olyan nagy folyók, mint a Sárga-folyó, a Colorado, a Nílus, a Ganges, az év hosszabb-rövidebb szakaszában már nem érik el a tengert. 1998-99-ben mintegy 25 millió *környezeti menekült* hagyta el a már további életre alkalmatlan folyómenti területeket.

Azt, hogy az egészséges ivóvízhez jutás egyre nagyobb gond szerte a világon két nemzetközi esemény is bizonyította az utóbbi időben. A világ környezetpolitikája szempontjából fontos Johannesburgi Konferencia 2002 őszén egyik céljául éppen azt tűzte ki, hogy csökkenteni kell azok számát akik nem jutnak egészséges ivóvízhez, az ENSZ pedig 2003-at a „tiszta víz évének” nyilvánította.

2.6.2.1. Az édesvízkészletek

Mint ahogyan a 6.1. táblázatban láthattuk az édesvíz-készletek nagyobb része jég formájában van felhalmozódva, így nem vesz részt a víz körforgásában (**80. ábra**). Az évente elpárolgó, majd csapadék formájában lehulló vízmennyiség hozzávetőlegesen 577 ezer km³, ennek azonban 4/5-e nem a szárazföldekre jut, így gyakorlatilag nem hasznosul. A **19. táblázat** az is jól látható, hogy a jégben tárolt édesvíz készleteken (összesen 69,55%) kívül a felszín alatti vízkészletek aránya a legnagyobb (30,06%), míg az ember számára jól látható készletek (tavak, folyók, csapadék) aránya elenyésző (0,31%). Éppen ezért veszélyes, hogy a vízszennyezések jelentős része ezeket a készleteket terheli.

A vízkészletek területi megoszlása és a csapadékok lefolyási aránya földrészenként igen változó (**21. táblázat**).



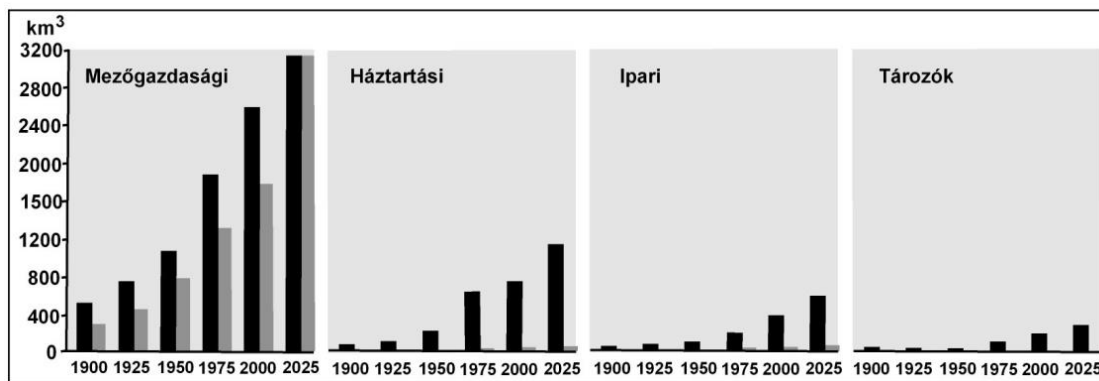
80. ábra. A globális vízkörforgás (Forrás: UNEP 2002 Shiklomanov után)

21. táblázat. Az édesvízkészletek és a csapadékok területi megoszlása. (Az UNEP adatainak felhasználásával)

Földrész	Állandó jég	Felszín alatti víz	Felszíni vizek (folyók, tavak, vizes élőhelyek)	Éves csapadék	Párolgás-lefolyás arány
Afrika	0,2	5500000	31776	22300	80/20
Ausztrália, Óceánia	180	1200000	221	7080	65/35
Ázsia	60984	7800000	30622	32200	55/45
Európa	18216	1600000	2529	8290	65/35
Eszak-Amerika (+Grönland)	90000	4300000	27003	18300	55/45
Dél-Amerika	900	3000000	3431	28400	57/43
Antarktisz	30109800				

Az emberiség vízfelhasználása a népességnövekedés ütemét meghaladóan növekszik. A 20. század során a mezőgazdasági vízfogyasztás ötszörösére, a városi 19-szeresére, az ipari 25-szörösére nőtt. 2000-es adatok alapján világviszonylatban a legnagyobb vízfelhasználó a mezőgazdaság (69%), amit az ipar követ (23%), a kommunális felhasználás, bele értve az ivásra használt mennyiséget is csupán 8% (81. ábra). Óriási különbségek vannak azonban térségenként. Afrikában 88/5/7%, Európában viszont 33/54/13% ez az arány (mg/i/k). A

hagyományos vízhasználatok mellett a 20. század második felében egyre nő a víztározókban felhalmozott készletek mennyisége is. A legnagyobb fogyasztó a mezőgazdaság, ennek fontos sajátossága, hogy a használt vizet – a másik két fő szektorral ellentétben – általában el is használja (az ipar és a kommunális szektor – igaz szennyezett formában – a használt vizet „visszaszolgáltatja”). Ráadásul a mezőgazdaság évente legalább 160 milliárd m³ nem megújuló felszínalatti vizet is felhasznál. Az élelemtermelés vízigenyességét mutatja, hogy egy kg rizs előállítása 1-3, egy kg búzáé pedig 1 m³ vizet igényel. A termelés sokfelé, csak öntözéssel biztosítható. Komoly gondot okoz azonban, hogy a rossz öntözési gyakorlat miatt az öntözött területekből (271 millió ha) kb. 30 millió hektár elszikesedett, további 80 millió hektáron pedig a sófeldúsulás elmocsarasodással kombinálódik.



81. ábra. A globális vízfelhasználás alakulása a fontosabb ágazatokban (1950-2000) és várható változása (Forrás: UNEP⁴³ Shiklomanov után)

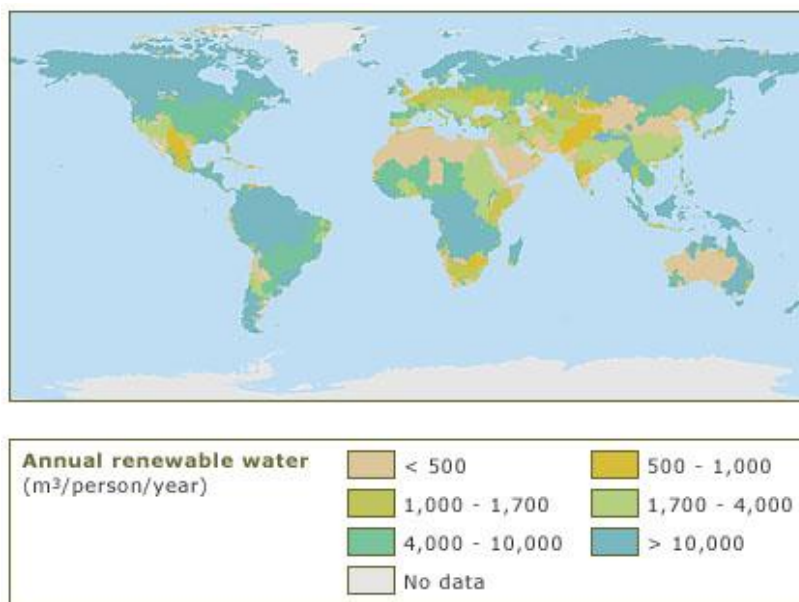
Az éghajlati adottságok, a gazdasági szerkezet és fejlettség hatalmas különbségeket okoz a vízfelhasználás országokénti szerkezetében. Olyan száraz területeken, ahol jelentős mezőgazdasági termelést folytatnak, a mezőgazdaság részesedése meghaladhatja a 80-90%-ot is, de az egyenletes csapadékú, óceáni éghajlatú országokban akár 1% körül is alakulhat (22. táblázat). A óriási különbségek alakultak ki az egy főre jutó felhasználásban is. A fejlődő országokban az átlagos egy főre jutó napi vízhasználat 60-150, a fejletteknél pedig 500-800 liter.

⁴³ Az UNEP ábráján az ipari és a háztartási vízhasználat felcserélődött, itt helyesen közöljük.

22. táblázat. A vízfelhasználás szerkezete néhány országban (%) (az Aktuelle Landkarte 1994/3. alapján)

Ország	Mezőgazdaság	Ipar	Kömmunális
India	93	4	3
Mexikó	88	7	5
Ausztrália	78	6	16
FAK országai	63	31	6
Japán	50	33	17
USA	41	49	10
Kanada	11	71	18
Nagy-Britannia	1	78	21
Németország	<1	88	12

Az emberiség jelentős része vízhiányos⁴⁴ területeken él (82. ábra). Benjamin Franklin mondásának igazságával, miszerint „amikor a kút kiszárad, akkor ismerjük meg igazi értékét”, egyre több felé szembesülnek. Az ezredfordulón 31 ország mintegy 460 millió lakosa nézett szembe krónikus vízhiánnyal – zömmel Észak-Afrikában és Ázsiában (23. táblázat). Olvashattunk azonban olyan adatokat is, miszerint 1990-ben kb. egy milliárd ember nem jutott hozzá az alapvetően szükséges (ivás, egészségügy, mosdás, étkezés) napi 50 liter vízhez sem.



82. ábra. A megújuló vízkészletek területi eloszlása (Forrás: Earth Trends 2006. aug.)

⁴⁴ A nemzetközi gyakorlatban vízhiányosnak tekintik azokat a területeket, ahol az egy főre jutó megújuló vízkészletek nagysága 1000 m³/év-nél kevesebb, vízstressz által érintettek pedig azokat, ahol ez az érték 1000-1700 m³/év/fő. Egy másik megközelítés a vízigények és rendelkezésre álló megújuló készletek arányával jellemzi a vízhiányt, és vízhiányosnak azokat tartja, ahol az arány kisebb 0,4-nél.

23. táblázat. Példa a vízhiányos országokra⁴⁵ (Források: Világ helyzete 1993* és az ENSZ WWDP)**

Ország	Megújuló vízkészlet (m ³ /fő/év)		
	2000**	1992*	2010*
Leginkább vízhiányos országok			
Kuwait	10	0	0
Egyesült Arab Emírátságok	58	120	60
Bahama-szigetek	66		
Katar	94	40	30
Maldív-szigetek	103		
Líbia	113	160	100
Szaúd-Arábia	118	140	70
Málta	129	80	80
Szingapúr	149	210	190
Egyéb vízhiányos országok			
Algéria		730	500
Barbados		170	170
Botswana		710	420
Egyiptom		30	20
Izrael		330	250
Jemen		240	130
Jordánia		190	110
Kenya		560	330
Szíria		550	300
<i>Belgium</i>		<i>840</i>	<i>870</i>
<i>Hollandia</i>		<i>660</i>	<i>600</i>
<i>Magyarország</i>		<i>580</i>	<i>570</i>

A **23. táblázat** szereplő országok zöme ténylegesen jelentős vízhiánnyal küzd. Ezek nagyobb részben a sivatagos, félsivatagos térségekben találhatók, ahol nincs vagy kevés a csapadék. Az is jól látható, hogy jelentős részük a magas népességnövekedés miatt egyre nehezebb helyzetbe kerül. A táblázat alsó részében szereplő három ország (közte hazánk is, ahol a folyók vízkészletének mintegy 95%-a határokon túlról származik) helye kissé megtévesztő. Ezek olyan földrajzi környezetben vannak, hogy területüket jelenős vízhozamú folyók szelik át, így csak részben tekinthetők vízhiányosnak. A Földön legalább 14 olyan ország van, amelyek felszíni vízkészleteit tekintve legalább 2/3-részben a külföldről származó készletektől függ (**24. táblázat**).

⁴⁵ Nem szerepel a táblázatban a politikai függetlenséggel nem rendelkező Gázai-övezet 52 m³-es adatával és Bahrein, ahol a Világ helyzete c. kiadvány „0” értéket közöl, az ENSZ statisztika pedig nem említi.

24. táblázat. Néhány ország függése a külföldről érkező felszíni vizektől (Forrás: A világ helyzete 1996)

Ország	Határon túlról érkező felszíni vizek aránya (%)	Ország	Határon túlról érkező felszíni vizek aránya (%)
Türkmenisztán	98	SzírIA	79
Egyiptom	97	Szudán	77
Magyarország	95	Niger	68
Mauritánia	95	Irak	66
Botswana	94	Banglades	42
Bulgária	91	Thaiföld	39
Uzbekisztán	91	Jordánia	36
Hollandia	89	Szenegál	34
Gambia	86	Izrael	21
Kambodzsa	82		

Vannak ugyanakkor olyan hatalmas országok, amelyek országos szinten nem vízhiányosak, mégis területük komoly hányada annak tekinthető (USA, Kína, Ausztrália, India, Mexikó), éppen ezért a valós vízhiányról csak részletesebb elemzések adnak pontosabb képet. A növekvő vízigények egy egyszerű számítással is jól megbecsülhetőek. Egy tonna gabona előállításához kb. ezer m³ vízre van szükség, s egy személynek átlagosan 300 kg gabonára van szüksége (beleértve azt is, hogy ennek egy része előbb állati takarmánnyként hasznosul, majd a húst fogyasztja el az ember). Ez alapján egy személy ételmezéséhez 300 m³ víz szükséges évente. Az évente 90 millióval szaporodó emberiség 27 milliárd m³ új vízigényt jelent, ami egy 856 m³/sec-os folyó vízhozamának felel meg, s ezt figyelembe véve 20 évente egy teljes Mississippi vízmennyisége szükséges újonnan.

2.6.2.2. Az édesvizeket fenyegető veszélyek

Az előzőekben már láthattuk, hogy az édesvíz – bár az emberiség számára nélkülözhetetlen – egyre korlátozottabb mennyiségen áll rendelkezésre. Ebben az egyre növekvő igények mellett mind nagyobb szerepe van az emberi tevékenység vízkészleteket veszélyeztető tevékenységére. Évezredekken keresztül az édesvizeket az emberiség különösebb veszély nélkül tisztítás nélkül fogyasztotta. Azt, hogy ez mára gyökeresen megváltozott lépten-nyomon tapasztalhatjuk. Például folyóink vize sok helyen már fürdőzésre sem használható a szennyeződések miatt, a néhány évtizede még általánosan használt ásott (talajvíz) kutak ma ivásra alkalmatlanok. A sorok írója 2004 nyarán az Amazonas, ember által alig érintett rengetegekben tett egy hetes túrát, amelyhez indián vezetőnk gondoskodott zacskós ivóvízről, mert már a háborítatlan őserdők területén sem biztonságos a felszíni ivóvíz.

Felszíni vízszennyezések

Az édesvizeket leginkább veszélyeztető tényező maga az azt használni akaró ember. A vizek legkülönbözőbb fajtájú elszennyezésével folyamatosan csökken az egyébként is szűkös vízkészlet. A felszíni vizek elszennyezése a Föld egyes régióiban elképesztő méreteket öltött. Az 1950-1970-es évek során Európa több nagy folyója is inkább szennyvízcsatorna minősítést érdemelt volna. Bár itt az utóbbi évek környezettudatossága már látható eredményeket hozott, a probléma napjainkban is aktuális.

A vízzel kapcsolatos problémák alaposan átértékelik az évszázadok bölcsességével megfogalmazott olyan közmondásokat, mint „úszik, mint hal a vízben”, „szegény ember vízzel főz”, vagy „vizet prédikál - bort iszik”. A tiszai ciánszennyeződésre gondolva, vagy arra, hogy ma már sokfelé a világban a vásárolt ivóvíz is jelentős költséget jelent, aligha kérdéses milyen mértékben változott meg a természetes vizek állapota. Az ipari évente 300-500 millió tonna nehézfém, mérgező anyagot juttat a felszíni vizekbe, a mezőgazdaság pedig nemcsak a legnagyobb vízfelhasználó, de annak szennyezéséért is felelős. A szennyezett víz számos betegségért felelős (évente több millió halálesetet okozva), de alapvetően elszegényíti a vizes élőhelyeket, sok faj kipusztulását is okozva. Egykoron az ellenség elleni harc hatékony eszköze volt a kutak megmérgezése, napjainkban azonban az emberiség akaratától függetlenül vette át ezt az eszközt – s gyakorlatilag önmaga ellen fordítja. Számos példa mutatja „elég jó eredménnyel”, hiszen sokszor csak évekkel, évtizedekkel később derül ki egy-egy probléma igazi oka.

A tengerparti vízszennyeződésnél említett minamata ügryhöz hasonlóan Japánhoz kötődik egy másik nehézfém, a kadmium által kiváltott környezetszennyezés. A Kamiska bányavidékről a Jintsu folyó által elvezett nehézfémeket (Pb, Zn, Cd) is tartalmazó vizet rizsföldek öntözésére használták. A kadmium így került a táplálékláncba, később súlyos csontelváltozásokat okozva. A betegség során a csontok elvesztették tartásukat, szinte összeroppantak. A fájdalom során a betegek jajgattak, ezért a kór az „itai-itai” nevet kapta (a jajgatás japán megfelelője). A betegséget főként idősebb, többgyerekes nők kapták meg. A betegséget 1957-ben diagnosztizálták.

Bár emberéleteket nem veszélyeztetett, mégis az egyik legjelentősebb folyóvizekhez kapcsolódó vízszennyezési katasztrófa az 1986. novemberi, Rajnát ért szennyezés. A folyó az 1970-es évekig „rangos helyet vívott ki magának” a legszennyezettebb folyók rangsorában, azonban hatékony nemzetközi megegyezéssel vízminőségét az 1980-as évekre sikerült normalizálni. Ekkor következett be egy svájci vegyipari nagyvállalatnál (Sandoz, Bazel) egy

olyan tüzeset, amelynek oltása során (a levegőbe jutott szennyezéseken túl) mintegy 30 tonna mezőgazdasági vegyszer és higanytartalmú vegyület (kb. 200 kg) került a folyóba. A mérgezés hatására sok száz tonna hal pusztult el, de a szennyezéssel leginkább sújtott Baden-Württembergben a vízi élővilág 80%-a megsemmisült, a torkolat közelébe jutva azonban már jelentősen felhígult a víz, így ott kevesebb kárt okozott. A különböző mezőgazdasági vegyszerek rövidebb-hosszabb idő alatt lebomlanak, igazi tartós veszélyként így a szervezetekben akkumulálódó higanyt tartották (a Minamatában tapasztaltak nyomán). 1987-ben újabb Rajna-akcióterv indult a folyó vízminőségének javítására.

A felszíni vizekhez kapcsolódó vízszennyezési példák sorában előkelő helyre kívánkozik a 2000-es tiszai ciánszennyezés. A szennyezés a Nagybánya (Románia) környéki bányavidékről indult, ahol egy ausztrál-román érdekeltségű cég, a kisebb fémtartalom miatt korábban meddőként felhalmozott anyagból ciános feltárással színesfémeket nyert ki. A kellő körültekintés nélkül elhelyezett, erősen szennyezett zagy egy jelentősebb csapadék hatására elszabadult a tárolóból, és a Szamoson majd a Tiszán levonulva jelentős kárt okozott a folyók élővilágában – a megfelelő tájékoztatás miatt szerencsére megbetegedést és halált nem okozott. A 2000. január 30-án elindult szennyezés koncentrációja Nagybányánál az egészségügyi határérték 800-szorosa volt, és veszélyességét jól érzékeltetheti, hogy az összesen 105-110 tonnára becsült cián kb. 500 millió ember elpusztításához „elegendő” lett volna⁴⁶.

A felszíni vízkészletek elszennyezésének általános példája az, amikor a kommunális szennyvizet⁴⁷ tisztítás nélkül engedik a folyókba, tavakba. A vízhasználat furcsa ellentmondásos példája az, amikor az így elszennyezett vizet közvetlenül használják étkezéshez, mosdáshoz, mosáshoz – a jelentős egészségügyi kockázattal nem törődve. (Ezt tapasztalta a sorok írója az Amazonas melletti Iqitosban.)

⁴⁶ A szennyezés komolyabb következményeit szakszerű beavatkozással sikerült elkerülni. Időben sikerült lezárni a Keleti-főcsatorna (Debrecen vízellátása) és a szolnoki vízkivételi művet. Igazi vízkormányzási bravúrral megakadályozták, hogy a keresztül folyó víz elszennyezze a Tisza-tavat (a cián érkezése előtt felduzzasztották a vízszintet, majd megérkezésekor csökkentették a vízszintet, így a tóból kifelé folyt a víz, és a nagyobb vízmennyiség csökkentette a koncentrációt is). Összességében a ciánszennyezés jelentős ökológia kárt, és főként pszichés hatásával hatalmas idegenforgalmi hátrányt okozott a Tisza mellett.

⁴⁷ A kommunális célú vízfelhasználás látványos változáson ment keresztül az elmúlt másfél évszázad, de különösen az utóbbi ötven év során. Az angol WC 19. század elején kezdett népszerű lenni, majd a hozzá kapcsolódó járványos betegségek századközépi leküzdése után egyre gyorsulón elterjedt. Ez, valamint a tisztálkodási kultúra megváltozása egyre több vizet igényelt, de egyre több szennyvizet eredményezett.

A felszíni vízkészletek szennyezésében a mezőgazdaság is alaposan kiveszi a részét azzal, hogy egyre több vegyszert, műtrágyát használ, valamint jelentős talajeróziót okoz.

Felszín alatti vizek szennyezése

A felszín alatti vizeket tározódási módjuk és elhelyezkedésük szerint célszerű csoportosítani. A vizek tárolódhatnak a szemcsés kőzetek (pl. kavics, homok) pórusaiban, vagy karsztos és repedezett kőzetek üregeiben, repedéseiben. A porózus kőzetekben elhelyezkedő vizek közül azokat amelyek közvetlenül kapcsolatban vannak (lehetnek) a felszínnel talajvizeknek nevezzük. Ezek az első vízzáró réteg felett gyűlnek össze, és a hazai gyakorlatban húsz méternél kisebb mélységben találhatóak. Az első vízzáró réteg alatt elhelyezkedő vizek a rétegvizek (ide tartoznak például az artézi vizek és a hévizek is). Felhasználói megközelítésben használják a parti szűrésű vizek megnevezést is. Ezek olyan talajvizek, amelyek közvetlenül a folyók medréből kapják az utánpótlásukat, és a kitermelés során a folyó kavicsos és homokos környezete természetes szűrőként megtisztítja azt.

Amíg a felszíni vizek szennyezése aránylag jól nyomon követhető, a felszín alatti vizek esetében a következmények általában lassabban érvényesülnek és nehezebben átláthatóak. A hatásmechanizmusok különbsége miatt három esetet célszerű megkülönböztetni.

Karsztos (vagy egyéb hasadékos kőzetekben előforduló) felszín közeli rendszerekben a vizek mozgása aránylag gyors, a felszín felől érkező szennyezések szinte azonnal eléri a vízkészleteket. Az ilyen készletek hasznosításakor a szennyezés rövid idő alatt jelentkezik (lásd a 2006 nyarán tapasztalt Tihany környéki ivóvízszennyezést).

Vannak azonban olyan elrettentő példák, amelyek jól mutatják az emberiség felelőtlenségét a rendelkezésünkre álló erőforrások használatában. Mexikóban a Yucatán-félsziget erősen karsztosodott mészkövén helyezkedik el az egymillióhoz közelítő lakosságú Merida. A városban nincs csatornázás. A házakból elvezetett szennyvíz szinte akadálytalanul jut el a korábban kiváló minőségű karsztvízbe, gyakorlatilag használhatatlanná téve azt: az ürülekéből származó coli-baktériumok száma 10-40 ezer literenként, a WHO 10 alatti határértékével szemben. Egy ilyen területen valójában nem történik más, mint azért nincs egészséges ivóvíz, mert az egész város abba végzi a dolgát. Merida problémája nem egyedi, de látványosan mutatja a környezeti probléma bezárulását.

A talajvíz készletek elszennyezése szerte a világban, és sajnos hazánkban is általános. Ezek a vizek a felszín felől, a készleteknek természetes utánpótlást adó beszivárgó vizektől, illetve a

rossz szennyvíz-elhelyezési gyakorlat⁴⁸ miatt károsodnak. Miután a talajvíz a kőzetek szemcséi közötti részt tölti ki és mozgását a Darcy-törvény⁴⁹ szabályozza. (Hazai talajvizeinkben ez azt jelenti, hogy a horizontális vízmozgás jellemzően évente tíz méter alatt marad.) Ennek az a következménye, hogy az ilyen szennyezésekre lassabban derül fény, s a következmények is csak hosszú idő alatt, nagyon költségesen⁵⁰ számolhatóak fel. Szomorúan állapíthatjuk meg azt is, hogy hazai talajvíz-készleteinket kevesebb, mint fél évszázad alatt „sikerült” elszennyeznünk.

A rétegvizek esetében a felszín felől érkező szennyezés általában már nem jelent közvetlen veszélyt, hiszen azt a vízzáró réteg megakadályozza. A gyakorlat azonban sajnos itt is komoly veszélyekre derített fényt.

A vízigények kielégítésére a világban sokfelé a rétegvizeket is bekapcsolták. Az ilyen vizek kitermelése természetesen együtt jár a rétegekben való vízmozgással. Ebben az esetben azonban a víztartókban levő természetes eredetű szennyeződések is elmozdulnak a vizekkel együtt. Ez a probléma leginkább az arzénos vizek „megjelenésével” lett ismert. Hazánkban a legnagyobb, beavatkozást is igénylő ilyen terület a Dél-Alföld.⁵¹ Az igazi problémával azonban DK-Ázsiában kell szembe nézni. Egyes szakértők szerint ennek mérete a csernobili katasztrófa hatásain is túlnőhet. Az oka, hogy a „biztonságos” ivóvízellátási program (korábban a szennyezett folyókból nyert ivóvíz okozott tömeges fertőzéseket) során létesített kutak (általában sekélyebbek 200 méternél) nagy mértékben – természetes módon – arzéntől szennyezettel. Bár az első jelzések már 1983 táján jelentkeztek Nyugat-Bengáliában (India), ahol legalább 200 ezer arzénmérgezéses gyanú merült fel, az ügy mégis csak 2002 táján került reflektorfénybe. Ekkor derült ki ugyanis, hogy Banglades 125 milliós lakosságának akár fele (akkor 35-77 millió fő) is érintett lehet a mérgezésben. Az egyelőre nehezen felbecsülhető számú haláleset mellett, legalább százezren szenvednek a mérgezéssel összefüggő bőrelváltozásokban. „Arzén a vízcsapban”, ez a címe egy 2003. február végi értékelésnek –

⁴⁸ A legutóbbi időkhöz általában elterjedt volt hazánkban is, hogy a falusi, kisvárosi, sőt nagyvárosi csatornázatlan területeken ún. emésztőkben szivárogtatták el a kommunális szennyvizet.

⁴⁹ A Darcy-törvény szerint két pont közötti vízmozgás sebessége egyenesen arányos a két pont magasságkülönbségével és fordítottan a pontok távolságával, ezenkívül függ a kőzet áteresztőképességétől.

⁵⁰ Egy olajos szennyeződések felszámolásával foglalkozó vállalat reklámanyagában szerepel, hogy egy 3 millió Ft értékű gázolaj elszivárgása által okozott kár mentesítési költsége kb. 350 millió Ft.

⁵¹ A területen több, mint 200 milliárd (!) Ft-os költséggel regionális vízellátó rendszer kiépítésre a következő években.

teljes joggal. Az aktuális elemzések feltárták ugyanis, hogy a WHO által javasolt 0,01 mg/l-es határérték helyett nagy területeken 2,7 mg/l-t meghaladó értékek vannak. A problémát fokozza, hogy sok olyan kút, amely korábban nem volt arzénos (és a korábbiak kiváltására használatba vették) szintén mérgezetté vált. Egy későbbi vizsgálat szerint a bengáliai deltavidéken kb. 36 millióan fogyasztják a szennyezett vizet, és további 150 millióan ki vannak téve a szennyezés kockázatának.

A gyorsan elvégzett áttekintő vizsgálatok azonban még súlyosabb gondokat is felszínre hoztak: kiderült, hogy a Himalája egész előtere, Észak-India, Nepál is érintett a problémában. Sőt! Miután a Föld közelebbi és távolabbi tájain (Kína, Thaiföld, Tajvan, Argentína, Chile, Mexikó, az USA, és ahogyan említettük Magyarország is) szintén problémát okoz *a felszínalatti vizek magas arzéntartalma, ez már globális problémának tekinthető*. Banglades most kiderült problémája ugyanakkor arra is felhívja a figyelmet, mennyire kiszolgáltatottak a szegény országok a környezeti problémáknak. Megfelelő környezetvédelmi szervezet, műszerek és szabályozás hiányában nem képesek a lakosság biztonságos ellátását kielégíteni. Furcsa módon itt a rövid és a hosszú távú érdekek is keverednek: a fertőzött felszíni vizektől kapható gyors lefolyású betegségek helyett, a felszínalatti vizektől kapható lassú elmúlást „választják” (ui. a fentebb említett 200 ezer arzénmérgezéses beteg is kevés volt arra, hogy a problémára érdemben odafigyeljenek).

2.6.2.3. A mennyiségi problémák néhány környezeti vetülete

Az édesvíz mennyiségének csökkenése több típusú környezeti problémát okoz szerte a világban. A legirracionalisabb vízhasználatot Szaúd-Arábia mutatta be. Az ország vízhasználatának $\frac{3}{4}$ -e nem megújuló vízkészletből, hanem ún. *fosszilis vízből* történik. Ebből a vízkészletből – állami támogatással – sivatagi, félsivatagi környezetben olyan volumenű gabonatermelésbe fogtak, hogy 1984-re az ország önellátó lett, később pedig *jelentős gabonaexportőr (!)*. Az 1990-es évek végére azonban már nyilvánvalóvá vált, hogy ez a módszer nem tartható fenn tartósan a készletek belátható időn belüli kimerülése nélkül, ami az állami támogatás és ezzel együtt termelés csökkenéséhez vezetett.

A világ más tájain szintén gondokat okoz már a felszínalatti vizek túlhasználata. Izrael kb. 15%-kal többet használ fel, mint ami megújul. Indiában (főként Radzsasztan-ban), Thaiföldön, Mexikóban és Észak-Afrikában szintén hasonló problémákkal küzdenek. Leginkább Indiában okoz gondot, hogy az egyre mélyebbre süllyedő talaj- és rétegvizek kitermelésére csak jobb

szivattyúkkal van lehetőség, amit a szegényebb gazdálkodók már nem tudnak megfizetni, így még inkább elszegényednek. Ugyancsak Indiában a mélyebbre szálló talajvizek és az öntözési lehetőségek szűkülése miatt olyan helyeken, ahol korábban *évi három termés begyűjtésére is mód volt, ez kettőre esik vissza* – s ennek olyan következménye van, mintha a művelt területek nagysága 2/3-ra csökkenne⁵². ÉK-Kína kiterjedt területein (ahol kb.100 millió fő él) 2-3 évtized alatt a felszínalatti víz szintje 30 métert csökkent.

Ha ilyen mértékű süllyedés hazánkban nem is tapasztalható, jelentős gondot okoz a Duna-Tisza közén tapasztalt regionális léptékű talajvízszint-csökkenés. A szárazabbá váló éghajlat csökkenő beszivárgása, és a csapadékhiányt talajvízből történő öntözéssel pótoló gazdák tevékenysége (egyéb hatásokkal kiegészülve) jelentős talajvízcsökkenést eredményezett (**25. táblázat**). Az 1970-es évek első feléhez képest akár 7 métert is elérő csökkenés főként a homokhátsági területeken alakult ki. Napjainkban úgy tűnik, hogy folyamat 1000-1500 km²-en a folyamat természetes módon visszafordíthatatlan.

25. táblázat. A becsült vízhiány mértéke a Duna-Tisza közén

Év	Vízhiány (km ³)
1980	1,15
1985	2,32
1990	4,08
1995	4,80
2000	2,84
2003	4,81

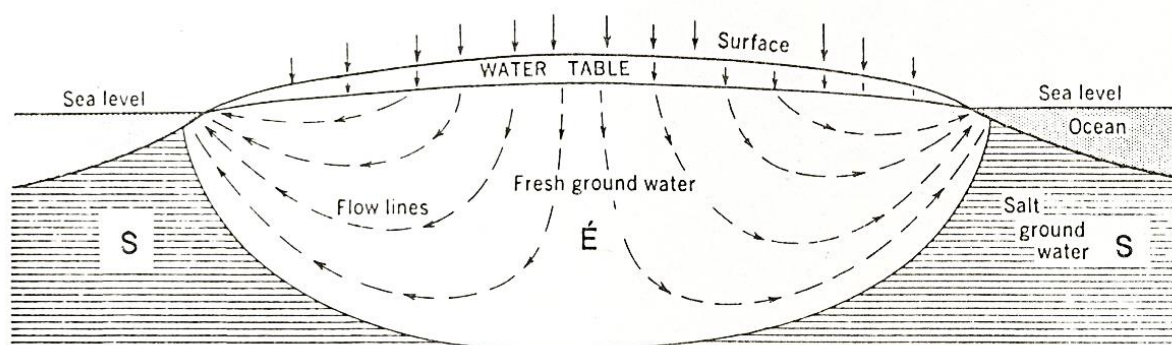
A talajvíz mélysége meghatározó módon befolyásolja a talajtípusok kialakulását, azok esetleges változását, ezen keresztül pedig követően a természetes növényzet átalakulását is, ami akár látványos tájváltozást is okozhat. Ilyen jellegű változásokat hazánk több táján is megfigyelhetünk.

Földünk egyes területein óriási igény van a folyók vízkészleteire, ami helyenként azok „túlhasználátát” eredményezik, jelentős környezeti problémákat okozva. A *Nílus* vízhozamának ma már csak 10%-a éri el a Földközi-tengert, az is nagyon szennyezett, ráadásul a csökkenő édesvíz pótlás hiánya miatt a folyó deltájába benyomult a sós tengervíz is (az okot

⁵² A meleg éghajlati övben az eredményes gazdálkodásnak igazán csak a víz szab határt. Öntözési lehetőség esetén a termelési ciklusok elég szabadon alakíthatók. Jáva szigetén a sorok írója is láthatta egymás mellett a rizsültetést, a fejlődésben levő gabonátáblákat és a betakarítást is.

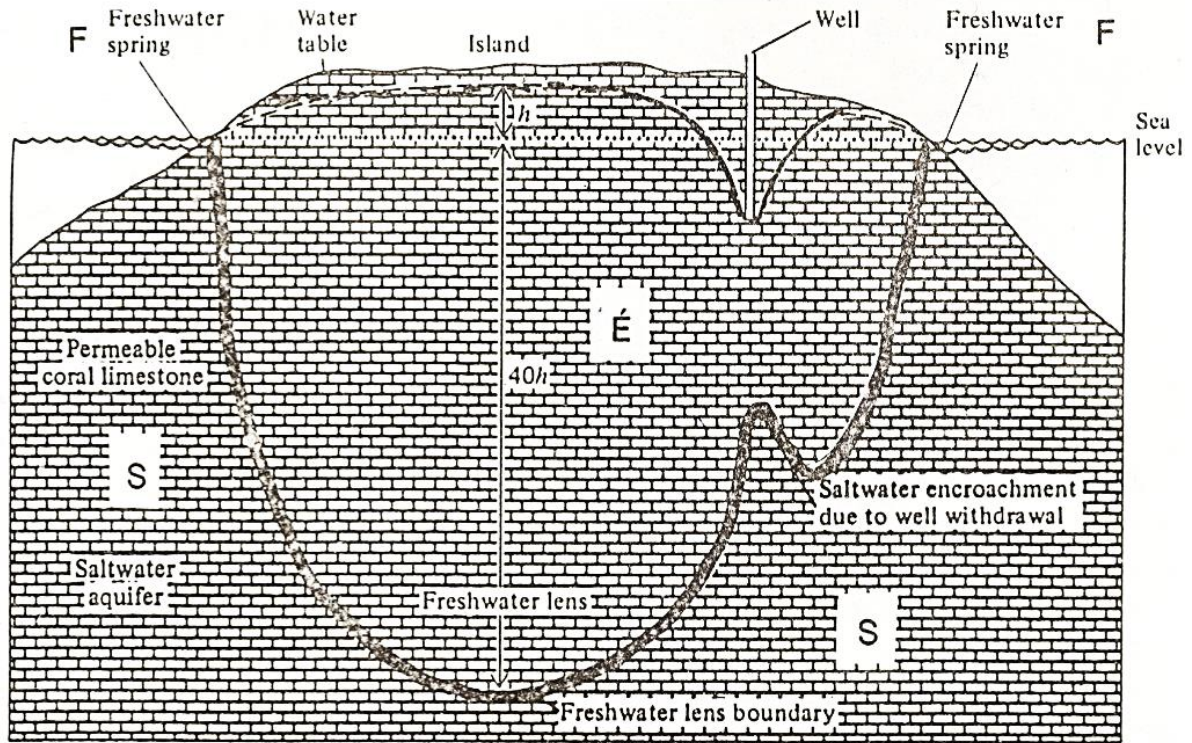
lásd később). Mindezek hatására ott a halászat a felére csökkent, s a 30 évvel korábbi 47 kereskedelmi halfajból mára csak 17 maradt, a többi kipusztult, vagy annak határán van. A *Sárga-folyó* (miközben a térképeken vastag vonallal van ábrázolva) az utóbbi évtizedben átlagosan 3-4 hónapig *nem éri el a tengert*, de az 1997-es száraz évben 226 napos “rekordot” produkált. Bár az 1990-es években egyszer félelmetesen megáradt, az utolsó 600 km-es hosszán többnyire csak csörgedezik – komoly környezeti hatásokat is kiváltva. A folyó egyre gyérülő vize ugyanis a bele vezetett anyagok miatt egyre szennyezettebb, s gyakran magas nehézfém-tartalma ellenére ezt használják fel még öntözésre.

A tengerparti területeken a fokozódó édesvízigény miatt egy inkább több figyelmet kellene szentelni az ún. sós víz – édes víz problémára, ugyanis a talajvizek túlzott használata esetén a sós vizek „betörésével” azok hasznosíthatatlanná válhatnak. A jelenség megértéséhez tudnunk kell, hogy az édes víz könnyebb, azaz elkeveredés hiányában „úszik” a sós vízen. Kb. 41 méteres édesvíz-oszlop 40 méteres sós víz-oszloppal van egyensúlyban. Egy sós óceánban fekvő sziget példáján (**83. ábra**) jól tanulmányozható, hogy az édes víztest lencseszerű alakot formál a sós vízen. Ilyenkor a tenger szintje felett 1 méterrel elhelyezkedő édesvíz felszín alatt kb. 40 méter mélységig még édesvizet találunk. Ha azonban az édesvizet egy kúttal elkezdik kitermelni, akkor annak hatására a sós víz határa is emelkedni fog (**84. ábra**), mégpedig 1 méteres vízszint-csökkenésnél 40 métert. Amennyiben a vízkitermelés tovább folytatódik, az édesvíz és sós víz határa annyira eltolódhat, hogy a kútból már csak sós víz nyerhető⁵³ (**85. ábra**). Éppen ezért kis relatív magasságú szigeteken, vagy tengerpartokon különös figyelmet kell a vízkitermelést végezni, sőt lehetőség szerint arról is gondoskodni kell, hogy a lehulló csapadék ne lefolyjon a területéről, hanem beszivároghatva emelje az édes talajvíz szintjét (lásd Szingapúr példáját a következő fejezetben).

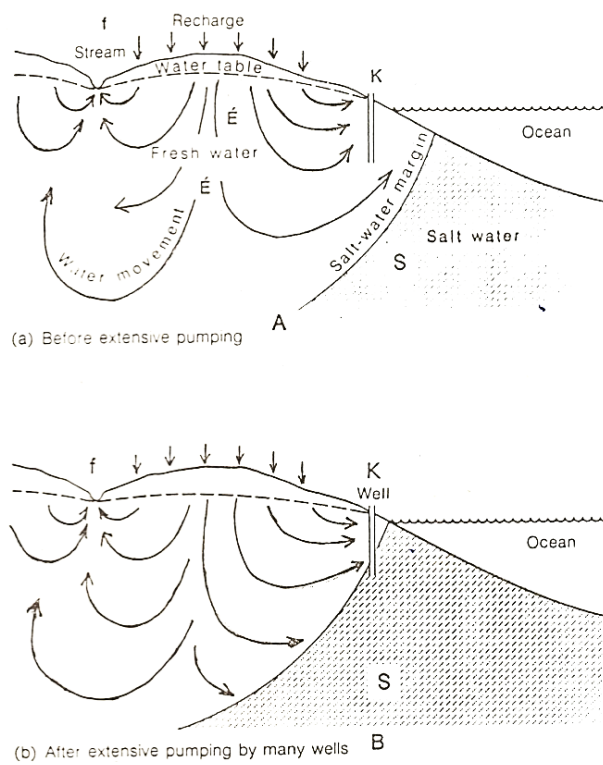


83. ábra. A sós (S) és édesvízű (É) talajvíz viszonya egy szigeten (Strahler 1971 in Báldi 1994)

⁵³ Bővebben lásd Báldi T. 1994: Elemző (általános) földtan II. kötet 493-494. old.



84. ábra. Az édes talajvíz kitermelése esetén a sósvíz szintje megemelkedik (Lundman – Coch 1982 in Báldi 1994)



85. ábra. Az édes és sós talajvíz határa egy intenzív kitermelés előtt (A) és után (B) (Press – Siever 1982 in Báldi 1994)

2.6.2.4. A vízhasznosítás forrópontjai (vízhiány és vízháborúk kockázata)

Az emberiség rendelkezésére álló édesvízkészletek mennyisége – a növekvő vízhasználatok és a bemutatott szennyezések miatt – folyamatosan csökken, ami egyre gyakrabban jelent konfliktusforrást. Ez lehet egy országon belül ágazatok közötti feszültség, vagy akár háborús konfliktus országok között. Érdekes itt megemlíteni, hogy a rivális szó eredete is a vízproblémához kapcsolódik – olyan személyeket jelöl, akik egy folyóból nyerik a vizet.

Az országon belüli vízmegosztási probléma típuspéldájaként az USA DNY-i területeit említhetjük, ahol jelentős nagyságú öntözött területeken kellett a gazdálkodást abbahagyni, mert úgy ítélték meg, hogy arra kommunális célból nagyobb szükség van. Például el kellett dönteni, mi a fontosabb: Las Vegas vízfogyasztása (beleértve a sivatagban épült város szökőkútjait és növekvő fajlagos vízhasználatát), vagy a félsivatagi környezetben termelt gabona. Az idegenforgalom könnyebben elviselte a víz áremelését, mint a mezőgazdaság, azaz ebben az esetben a közgazdasági szabályozás működött.

Egy másik fajta közgazdasági szabályozás működik például Omán egyes területein, ahol a vizet árverésen osztják el a gazdálkodók számára. A vízhasználatok igazságos elosztása érdekében Valencia környékén egy hosszú múltra visszatekintő vízbíróság működik. Ausztráliában három szövetségi állam 15 évi tárgyalás után állapodott meg (1989-ben) a Murray-Darling vízgyűjtő készleteinek megosztásáról, lehetővé téve akár a vízkereskedelmet is.

Az igazi problémát azonban a több országot érintő folyók jelentik. Bár törekvések vannak rá, hogy általánosan szabályozzák az ilyen folyók vízkészlet-megosztását, az alapvető érdekellentétek miatt ez eddig nem sikerült. Így azután országok közötti egyedi megállapodások, kieroszakolt egyezmények, az „erősebb kutya elve” egyaránt szerepet kap a vízkészletek megosztásában, de több esetben fennáll a víz miatt kirobbanó háború veszélye is. A vízgyűjtők felsőbb részén levő országok természetesnek tartják, hogy a készletek őket illetik, azonban az ökológia és gazdasági stabilitás megbomlása a folyók alsóbb szakaszán, nem jelenthet sikert ezen országok számára sem – hiszen a következmények könnyen továbbgyűrűzhetnek.

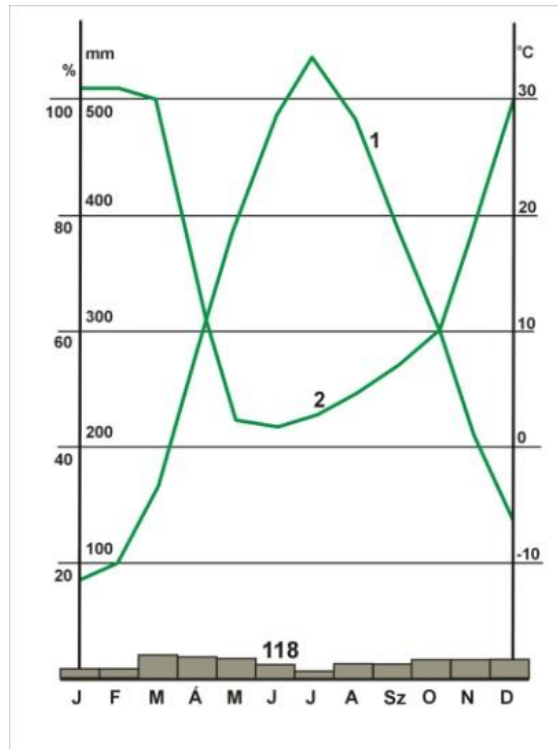
2002-ben 263 jelentősebb határon átnyúló vízgyűjtőt tartottak számon a világon, ezek között 19 olyan volt, ami legalább öt országot érintett (legtöbb ország a Duna vízgyűjtőjén osztozik, összesen 18). Az utóbbi ötven év során ezeken a vízgyűjtőkön 1831 határon átnyúló „esemény” történt (együtműködés vagy konfliktus), melyek közül 7 erőszakkal végződött, több mint ötszázban pedig „akadályok” merültek fel.

A vízháború valódi veszélye akkor alakul ki, ha korlátozott vízkészletű vízgyűjtő alsó és felső szakaszán igen eltérő gazdasági és katonai erejű országok osztoznak. Ilyenkor nagy a kísértés arra, hogy az erősebb hatalmi eszközökkel kényszerítse ki a megállapodást. Ilyen helyzet reálisan kialakulhat a Nílus esetében Egyiptom és Szudán, a Közel-Keleten Izrael és szomszédai, vagy Törökország és Irak között.

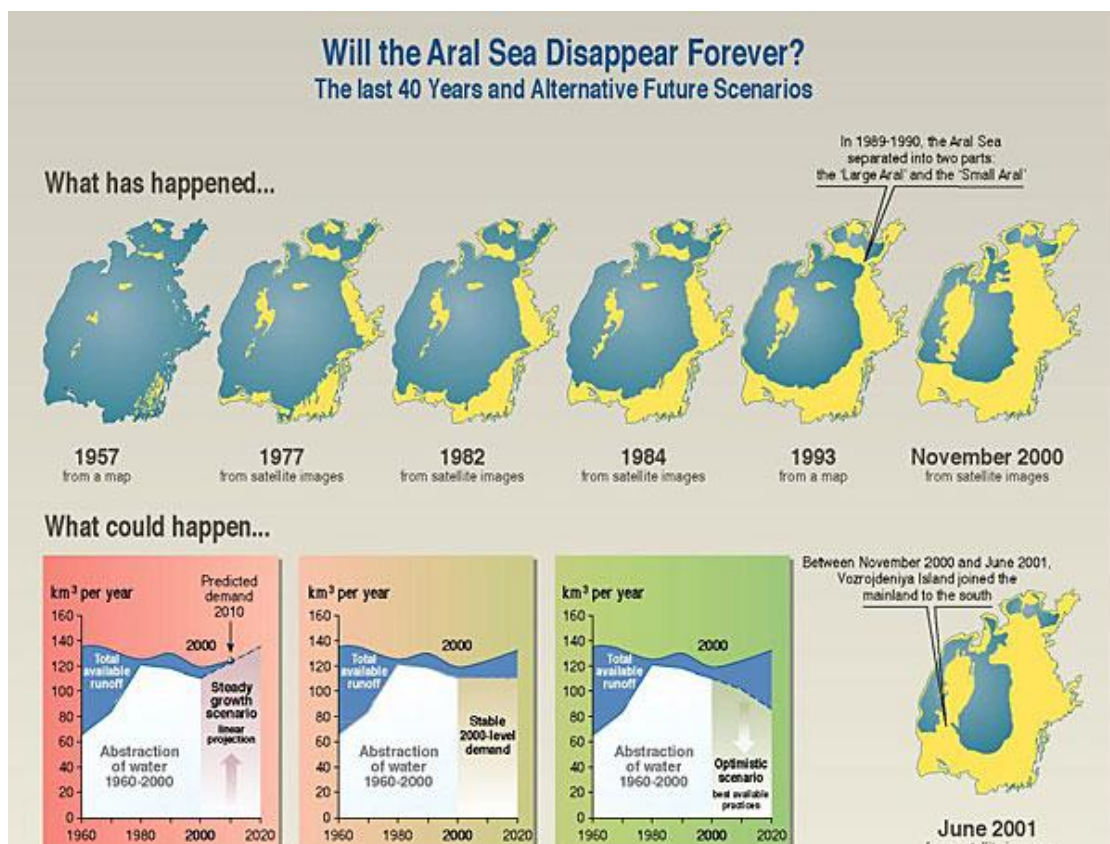
Vannak azonban a Földön olyan területek, ahol már ma is kritikus helyzetek, ún. forrópontok alakultak ki.

Aral-tó

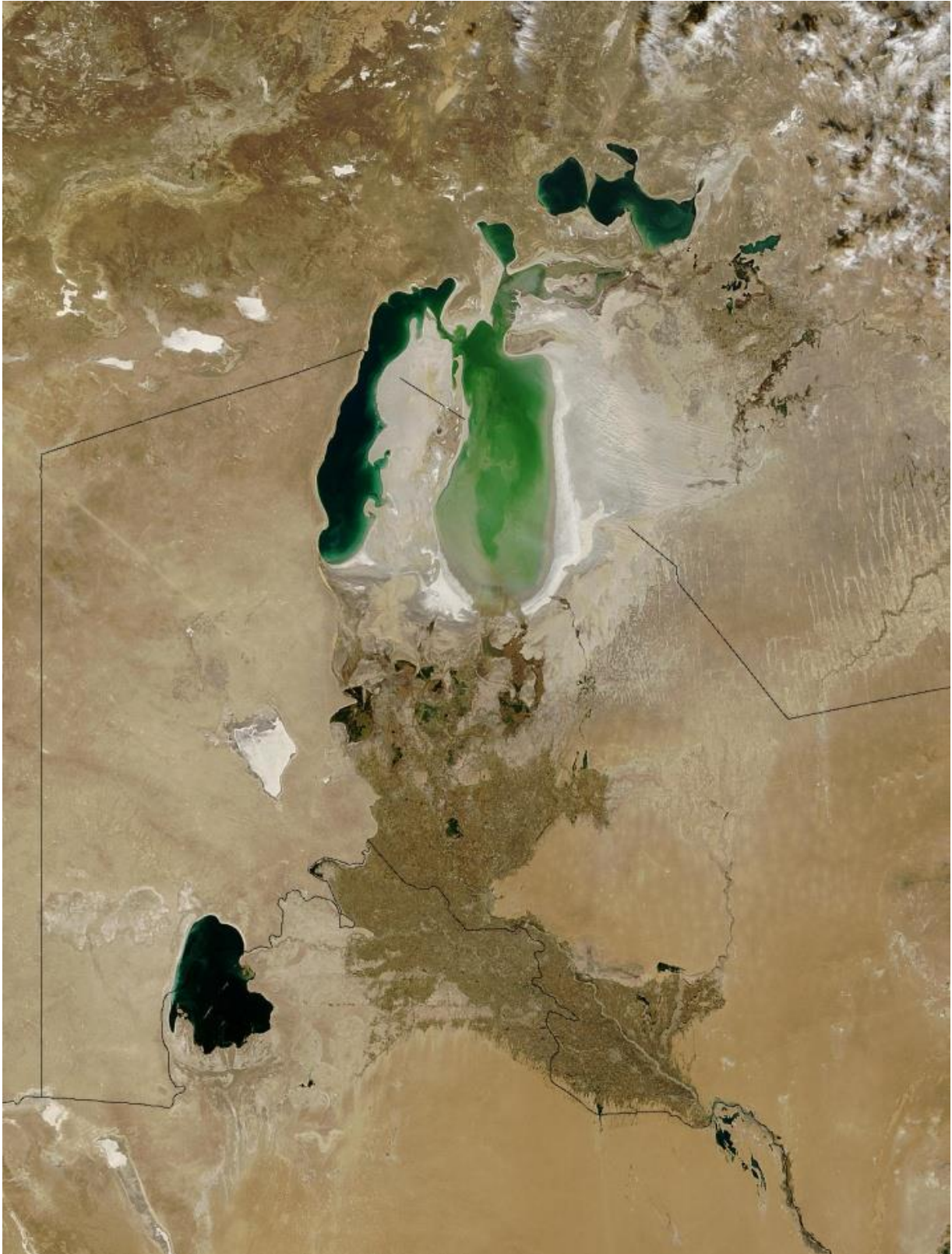
Az utóbbi 40 év egyik legösszetettebb vízi környezeti változása a közép-ázsiai Aral-tó vidékén történt, s akár egyfajta „állatorvosi lónak” is tekinthető. A tó egy belső, kontinentális sivatagi területen fekszik, párolgása az év egészében meghaladja a csapadékot (**86. ábra**), így vízháztartását szinte kizárólag a beletorkolló folyók szabályozzák. A tavat a Tiensan-hegységéből (jelentős részben olvadásból) táplálkozó két folyó, az Amu- és a Szir-Darja táplálta. A 2. világháborút követően egyre intenzívebb gyapot- és rizstermelésbe fogtak a folyók mentén kiépített öntözőrendszerek segítségével. Ennek hatására jelentősen csökkent a tó vízutánpótlása, vízszintje csökkenni kezdett az 1960-as évek elejétől. 1963-ban a tó területe még 66100 km² volt, átlagos mélysége 16, legnagyobb mélysége pedig 68 méter, sótartalma pedig ekkor csupán 1% körül alakult. Az 1960-as évek során azonban már a folyók vízhozamának 90%-át fordították öntözésre. Korábban a tó a folyókból (42-56 km³) és csapadékból (8 km³) összesen átlagosan 50-64 km³ vízpótlást kapott, s ez állt szemben a 63-64 km³-nyi párolgással. Az 1970-85 közötti időszakra az utánpótlódás 22,9 km³-re csökkent (16,3+6,6), a folyók az év egy részében már nem érték el tavat, a párolgás viszont csak kissé változott (56,2). A tó területe ettől fogva látványos, és jól dokumentálható csökkenésen ment át (**87. ábra**), felülete negyedére, vízkészlete harmadára csökkent, s 1993 óta megkezdődött feldarabolódása is (**88. ábra**). A betöményedő víz sótartalma az egykori 1,0%-ról 2004-re már 4,5% nőtt (és folyamatosan emelkedik), amivel „sikerült” az egykori élővilág nagyobb részét is kipusztítani.



86. ábra. Az Aral-tó vidékére jellemző klímadiagram: a hőmérséklet (1), a párolgás (2) és csapadék havi átlagai Kazalinszkban (Forrás: Atlasz Mira)



87. ábra. Az Aral-tó területének csökkenése (1957-2001)(Forrás:GRID Arendal)



88. ábra. Az Aral-tó 2003-ban (Forrás:Wikipedia)

Ez a környezeti és ökológiai változás jelentős gazdasági és társadalmi változásokat is magával hozott. Az egykor jelentős halászat (évi 40-50 ezer tonna) megszűnt, a sekély vízben egykor

megfeneklett halászhajókat ma már sivatag fogja közre, s mintegy 60 ezer halász vált munkanélkülivé. A 200 ezer tonnára becsült só és a gyakran vegyszerekkel szennyezett homok⁵⁴ legalább 300 km-es körzetben okoz napi problémát.

A Szovjetunió környezeti hagyatéka öt utódállamra szállt, tovább bonyolítva egy átfogó megoldás kidolgozását. 1995 szeptemberében az öt érintett közép-ázsiai köztársaság egy megállapodást kötött az Aral-medence fenntartható fejlődéséről, majd 1997-től az ENSZ Környezeti Programja is támogatást ad a helyzet javításához és szerepel a Világ Bank által támogatott programok között is. A változtatási szándékok elindítottak valamit, de kevésnek tűnnek. Kissé csökkent a vízfelhasználás és javult az öntözés hatásfoka, de tovább nőtt az öntözött területek nagysága (**26. táblázat**). A jelentős népességnövekedés miatt (az öt köztársaság együttes népessége 1950 és 2006 között 11 millióról 58,4 millióra nőtt) nem tudják a vízfogyasztásukat lényegesen mérsékelni, így a tó nagy párolgásával a vízpótlás nem tud lépést tartani, területe az elhatározott beavatkozások ellenére tovább zsugorodik. Az eredmény talán nem is olyan meglepő, ha azt hasonlítjuk össze, hogy miközben mintegy 35 millió ember közvetlenül függ az öntözéstől, „csupán” 3,5 millió szenved az Aral-tó csökkenésének következményeitől.

A 2005-ben elkészült Kokaral-gáttal a megmaradt tófelületet két részre osztották, így az északi tavat időnként elérő Szir-Darja kissé megemelte annak szintjét, és ott valamelyest a sótartalom is csökkent.

26. táblázat. Az Aral-tó vízgyűjtőjének néhány vízfelhasználási mutatója

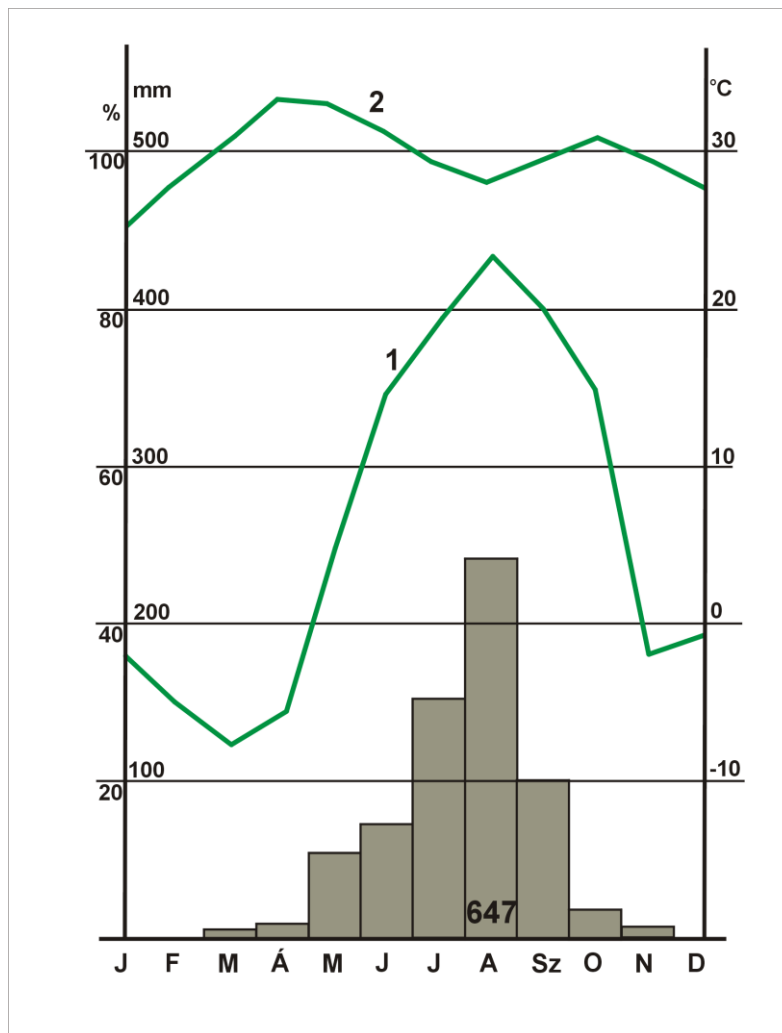
	1960	1970	1980	1990	1999
Öntözött terület (ezer hektár)	4510	5150	6920	7600	7900
Vízfelhasználás (km ³ /év)	64,7	83,5	120,7	118,1	107,6
Ebből öntözésre (km ³ /év)	55,2	74,0	108,5	106,0	96,3
Az öntözővíz felhasználása (m ³ /hektár)	12240	14370	15680	13950	12190

A Csád-tó

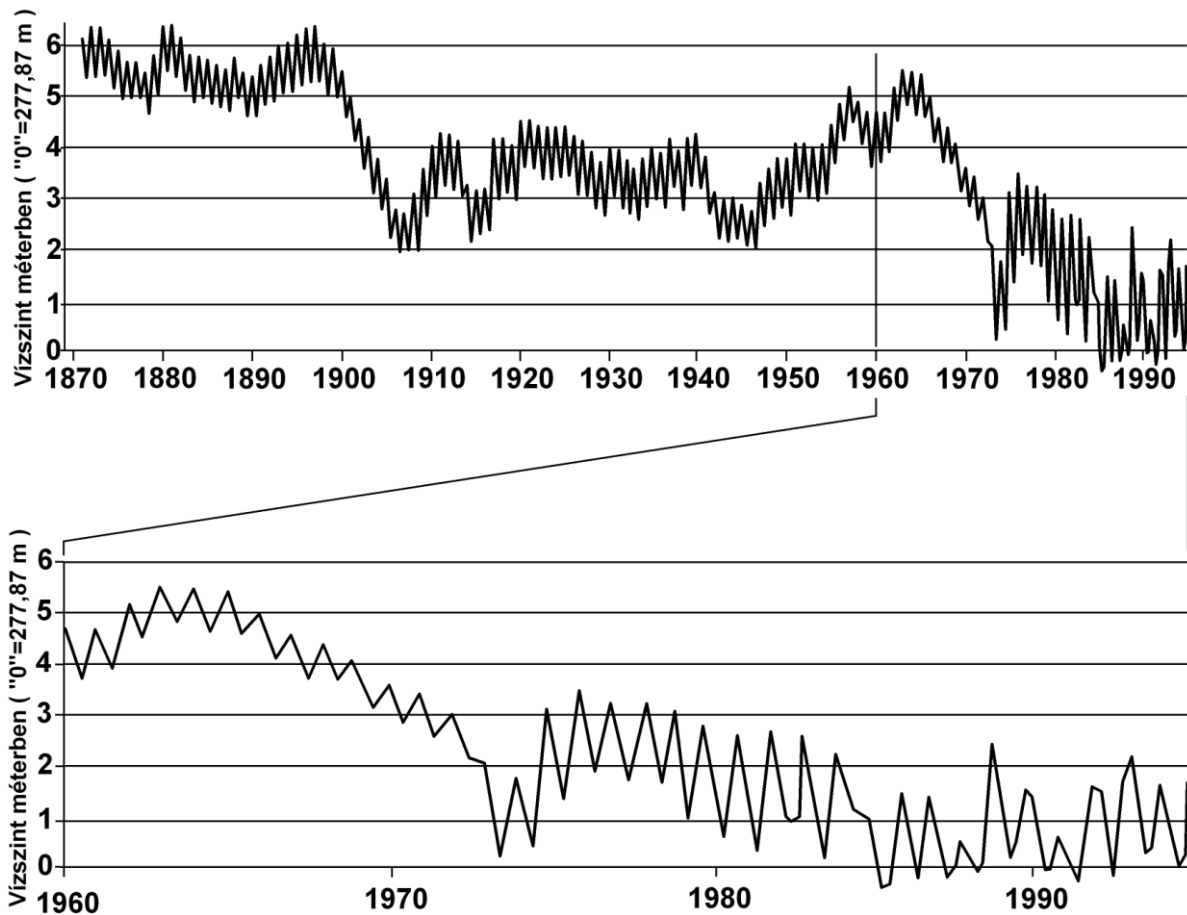
A Szahara déli pereme mentén található Csád-tó az Aralhoz hasonlóan krízishelyzetben van. Bár a megfigyelhető folyamatok mutatnak egyezést, számos lényeges eltérés is felfedezhető. A Csád-tó egy zonális sivatag közelében található, de szigorú értelemben környezete nem

⁵⁴ A szennyezés oka az, hogy a mezőgazdaságban (sokszor túlzott mennyiségben) használt vegyszerek is bekerültek az Aralt tápláló két nagy folyóba, azonban a csökkenő vízmennyiség miatt ezek már erősen feldúsultak a vizekben.

tekinthető sivatagnak. A csapadék a száraz ÉK-i parton is 300 mm felett van (Bol városában 1954-1972 között 125 és 565 mm között változott, az átlag pedig 315 mm volt), a DK-i részeken azonban lényegesen magasabb (N'Djamenában – az egykori Fort Lamyban – már átlagosan 650 mm körül alakul – **89. ábra**). A csapadék azonban a nyári monszun időszakában (zömmel július és augusztus) hullik, ilyenkor 1-2 hónapig mértéke a potenciális párolgást is meghaladhatja, míg az év nagyobb része csapadékmentes. A tó vízmennyiségét tehát döntően ennek a rövid időszaknak a csapadéka határozza meg, és ezért jelentős szezonális vízszint-ingadozást mutat (**90. ábra**), ami erősen összefügg sekély voltával (normál időszakban sem volt mélyebb 5-8 méternél). A Csád-tó több mint száz évre visszamenőleges szintváltozásai, jól mutatják a csapadékban megmutatkozó különbségeket is. Vízkészletének 90%-a délről a Chari/Logone folyórendszerből érkezik. Maximális kiterjedése a korábbi nedvesebb időszakban 25,9 ezer km² körül alakult.



89. ábra. Az Csád-tó déli előterére jellemző klímadiagram: a hőmérséklet (1), a párolgás (2) és csapadék havi átlagai N'Djamenában (Forrás: Atlasz Mira)

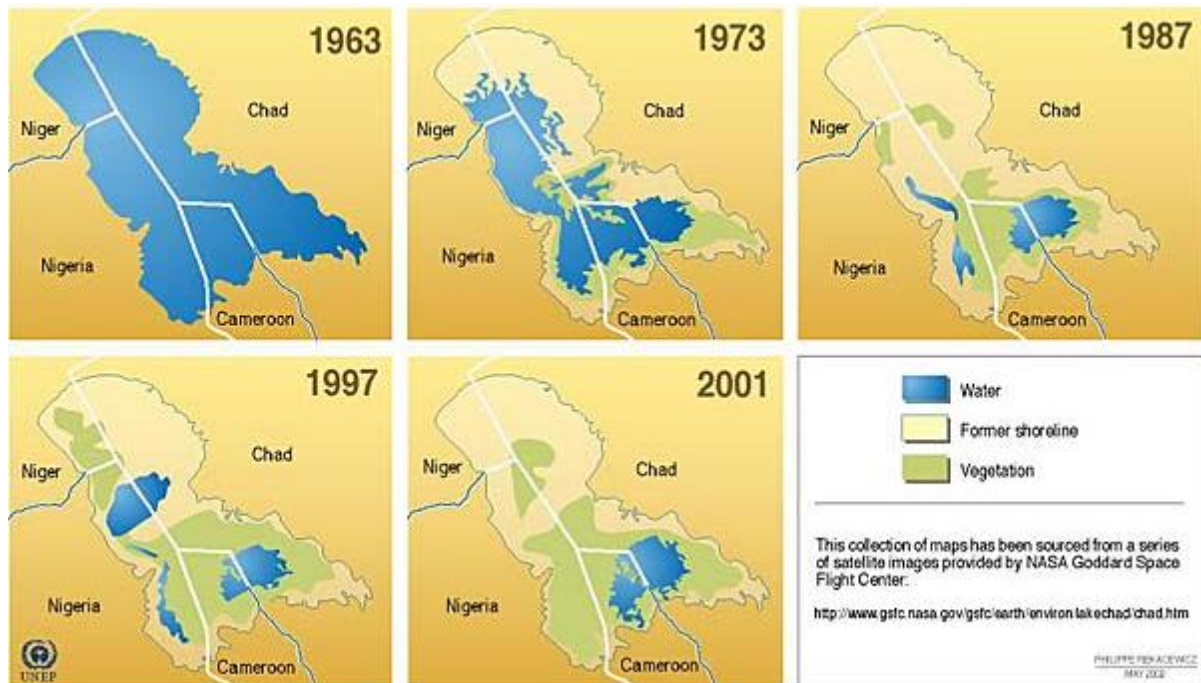


90. ábra. A Csád-tó vízszintváltozásai 1880-1996⁵⁵ (Forrás: USGS Olivry és társai 1996 alapján)

Az 1963-as nedves évtől a Csád-tó az Aralhoz hasonló hatalmas változáson ment át, 2001-re a korábbi huszadára (!) zsugorodott (91. ábra). Az okok itt azonban természeti és társadalmi hatások együttesére vezethetőek vissza. A vándorló félnomad gazdálkodást az 1960-as évektől egyre inkább felváltották az állandó települések, ami intenzívebb gazdálkodást követelt. A tó DK-i partja mentén Nigéria egy nagy öntözési programot tervezett az 1960-as évek elején, melynek keretében 55 ezer családi farm kialakítást terveztek. A tervezés a nedves 1962-63-as időszakban kezdődött, és az első ezer hektáros projekt 1966-ban sikeresen meg is valósult. A program fő része 1974-1979 között zajlott, aminek keretében 67 ezer hektár kiépítésére került sor. Az öntözést csatornák és szivattyúk segítségével végezték, nagyobb részben gravitációsan. A kidolgozott öntözési terv azonban a tó vízszintjéhez igazodva készült. Így azután amikor a vízszint a 2 méteres szint alá süllyedt, nem lehetett öntözni. Az eredmény az lett, hogy

⁵⁵ A felső ábra a hosszú távú változásokat mutatja 1880 és 1980 között, az alsó az 1960-1996 közöttieket)

működésnek első évtizede alatt, csak hat évben tudták használni – maximum 7000 hektár öntözésére. A terv készítésekor valós korábbi adatokból indultak ki, hiszen a megelőző száz évben mindig meghaladta ezt az értéket. Nem számoltak azonban a folyók menti öntözés vízszintcsökkentő hatásaival, illetve az 1960-as évek közepétől jelentkező aszályal.



91. ábra. A Csád-tó területének csökkenése (1963-2001) (Forrás: NASA Goddard Space Fight Center alapján)

Néhány évvel később Kamerun, Csád és Niger is nagy öntözési programokat indított el. Így az 1970-es években a szárazság növekedése fokozta a Chari folyó mentén is az öntözést, és a kettős hatásra a folyó lefolyása 75%-kal csökkent (a csádi N'Djamena városánál). Mindeközben a tóparton települések sora épült.

A csapadékeloszlás és a kis tómélység miatt a Csád-tó mérete pulzáló jellegűen csökken. A korábbi száraz évszakbeli átlagos 10 ezer km²-os kiterjedése 2001-re 1350-re esett (1982: 2276, 1994: 1756 km²), a kisebb vízfelület miatt viszont vízszintingadozása megnőtt. Az 1970-es évekig az éven belüli ingadozás az egy métert csak ritkán haladta meg (így területe is csak kevésbé ingadozott), utána azonban már nem ritka a 2 métert meghaladó ingadozás sem.

A folyamatokat modellezve arra az eredményre jutottak, hogy a Csád-tó 1966 és 1975 közötti 30%-os csökkenésében még csak 5%-ot jelentett az öntözés, az 1983 és 1994 közötti időszakban (amikor az öntözött terület megnégyszereződött) azonban – amely alatt a tó felülete negyedére csökkent – már fele részben ez a hatás okolható.

A kevesebb víz, a kisebb tófelület jelentős ökológiai változásokat is elindított: csökkent a vegetációval borított terület, fokozódott az erdőcsökkenés, és 2001-ben már tájidegen fajok borították a tó felét.

A Csád-tó jövője sem tűnik fényesnek, de éppen vízpótlásának klimatikus háttere miatt mégsem tűnik olyan reménytelennek, mint az Aralé. A hosszú szaharai száraz időszak elmúltával (melynek jelei talán már sejthetőek), lehet remény regenerálódására. Nagy kérdés, hogy az ott élők tudnak-e élni a lehetőséggel, és tudnak-e kellő mértékletességet mutatni a vízfelhasználás terén.

Mexikó City

A világvárosi vízellátási gondok leginkább Mexikóváros példáján keresztül mutathatóak be. A mexikói fővárost 18 milliós⁵⁶ népességével a világ 2. legnépesebb városaként tartják számon. A vízellátás szempontjából szinte minden adottsága kedvezőtlen. Földrajzi fekvése miatt az évi csapadék nem éri el a 600 mm-t, az is nagyon egyenetlenül oszlik el a nedves és a száraz évszak között. A város egy jelentős részben vulkánokkal övezett fennsíkon helyezkedik el, központi része egy mesterségesen feltöltött tavon épült, említést érdemlő felszíni vízfolyása nincs. Ez volt az oka annak, hogy a vízfelhasználásban a meglehetősen korlátozott felszínalatti vizekre próbált alapozni, ami még egy jóval kisebb város igényeit sem lenne képes kielégíteni. A vízkitermelés így nagyon rövid idő alatt a vízszintek gyors süllyedésével járt. A rossz altalaj és a vízszintcsökkenés együttes hatására jelentősen süllyed a város is (ennek nagyságrendje akár 2 cm/hó is lehet egyes helyeken). Leglátványosabban ez a központban található katedrálisnál figyelhető meg, amelyik annyira egyenlőtlenül süllyed, hogy annak szemléltetésére a kupolában egy „függőónt” helyeztek el, s ennek regisztrált kilengése (nagyjából a hossz tengely irányában) a 2 métert is meghaladja (!), annak ellenére, hogy hosszabb idő óta hatalmas erőfeszítésekkel megpróbálják stabilizálni. (A mértéktelen vízkitermelés persze nem csak Mexikóvárosban „eredményezi” a város süllyedését. Hasonló problémák vannak a világ más tájain, így Djakartában, Manilában vagy Bankokban – az utóbbi esetében 5-10 cm-es évi süllyedéseket tapasztaltak.)

A fővárost így egyre távolabbról és mélyebb területekről, óriási szivattyúkapacitásokkal kell vízzel ellátni. 1982-ben már száz km távolságból, és ezer méterrel alacsonyabban fekvő területekről szállítottak vizet a városba, 1990-ben azonban 200 km-ről és kétezer méterrel

⁵⁶ Az ENSZ hivatalos statisztikájával szemben más források akár 25-50 milliós népességgel is számolnak, és a Földünk legnépesebb településének tartják.

mélyebbi (azaz tengerszint közeli) vízbázisok bekapcsolására is szükség volt. Ez persze elég reménytelen vállalkozás, aminek következményeként egyes városrészekben rendszeres a vízhiány, másutt pedig nincs is vezetékhalózat kiépítve, ezeket gépkocsikkal látják el. Ehhez járul még az, hogy az egyébként is kevés víz jelentős része a rossz vezetékhalózat miatt egyszerűen „eltűnik”.

A vízhiány azonban csak egyik része a probléma-együttesnek. A nem egyenletes süllyedés miatt gyakran a szennyvízhálózatba bevezető oldalágak mélyebbre süllyednek, így a szennyvizet sokfelé csak szivattyúzással lehet a csatornába juttatni. Ráadásul a város szennyvízhálózata is hiányos, a talajba vezetett szennyvizek pedig a lecsökkent talajvíznívó következtében nagyon gyorsan lefelé szivárognak, azaz tönkreteszik a még kevés hasznosítható készletet is. Mexikó City így gyakorlatilag egyre növekvő hálózati kapacitások kiépítésére kényszerül, és alig látszik reménye arra, hogy belátható időn belül megoldja problémát.

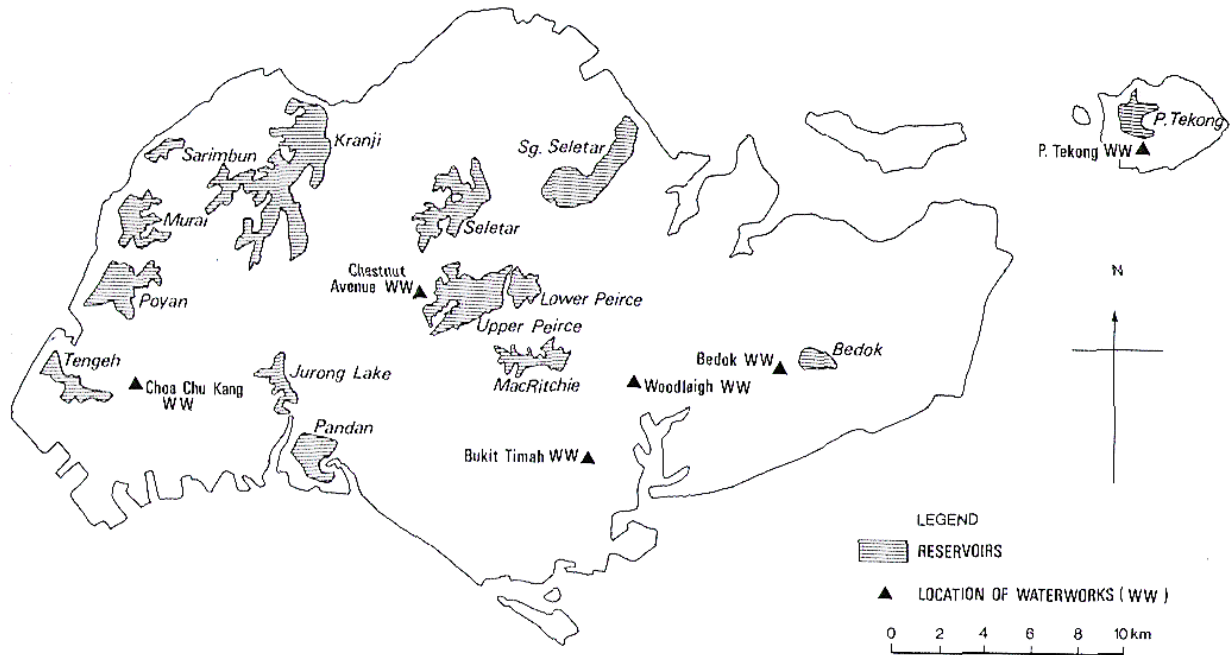
Szingapúr

A városállam a Maláj-félsziget közvetlen szomszédságában egy nagyobb és néhány kisebb szigeten helyezkedik el. Mivel az Egyenlítő közelében az ún. mindennapos esők⁵⁷ övében helyezkedik el, az évi átlagos csapadéka magas, közel 2400 mm. A város jelentős része beépített, területe a partok mentén végzett feltöltések miatt folyamatosan nő (!), 1960 óta (581,5 km²) közel 18%-kal nagyobbodott (2006-ben 683 km²), s az összterületnek közel fele beépített. Népszámszáma túlhaladta a 4,5 milliót, így a népsűrűség 6000 fő/km² körül alakul.

A város azonban alig rendelkezik vízkészlettel. A függetlenné válás előtt a város a vizet a Maláj-félszigetről (Johor-ból) szerezte be. A felszín alatti készletek (a korábban már említett sósvizek betörésének veszélye miatt) gyakorlatilag nem hasznosíthatóak, így csak a csapadékból származó megújuló készlettel számolhatnak, azaz egy fenntartható vízhasználatra kell berendezkednie. Éppen ezért az 1960-as évek végétől sorra alakították ki a víztárolókat, a hozzájuk tartozó védett vízgyűjtőkkel. Az 1990-es évek közepére ezek összes területe 263 km² volt, ami az akkor aktuális terület 43%-át jelentette, vagyis a második legjelentősebb területhasznosítási kategória lett (**92. ábra**), a beépített területek után. Emellett, ahogyan korábban utaltunk rá, a beépített területeken lehullott csapadék hasznosításáról is

⁵⁷ Oktatásunkban nehezen tudunk túllépni bizonyos sztereotípiákon, egy ilyen a mindennapos esők öve is. A jelenség jól magyarázható – csak nem biztos, hogy mindenben igaz. Szingapúr esetében például átlagosan 180 körül alakul az esős napok száma és közel száz év alatt a maximum 222 nap volt. Azaz a „természet szerint” valójában a „minden másodnapos” esők zónájában fekszik a vidék.

gondoskodnak. A magas és viszonylagosan egyenletesen eloszló csapadék jó kiinduló feltételt teremt a fenntartható vízhasználathoz, azonban ez csak nagyon szigorú környezetvédelmi feltételekkel valósítható meg. A vízbázis-védelem mellett a tengerbe bevezetett szennyvizek tisztítására is fokozottan figyelni kell, ugyanis a part menti területek folyamatos továbbépítése nagyobb részben felszámolta a természetes partközeli vegetációt (mangrove), így csekély annak öntisztulása. A város azonban bebizonyította, hogy kellő odafigyeléssel ilyen kritikus helyzetben levő területen is megvalósítható a fenntartható vízgazdálkodás.



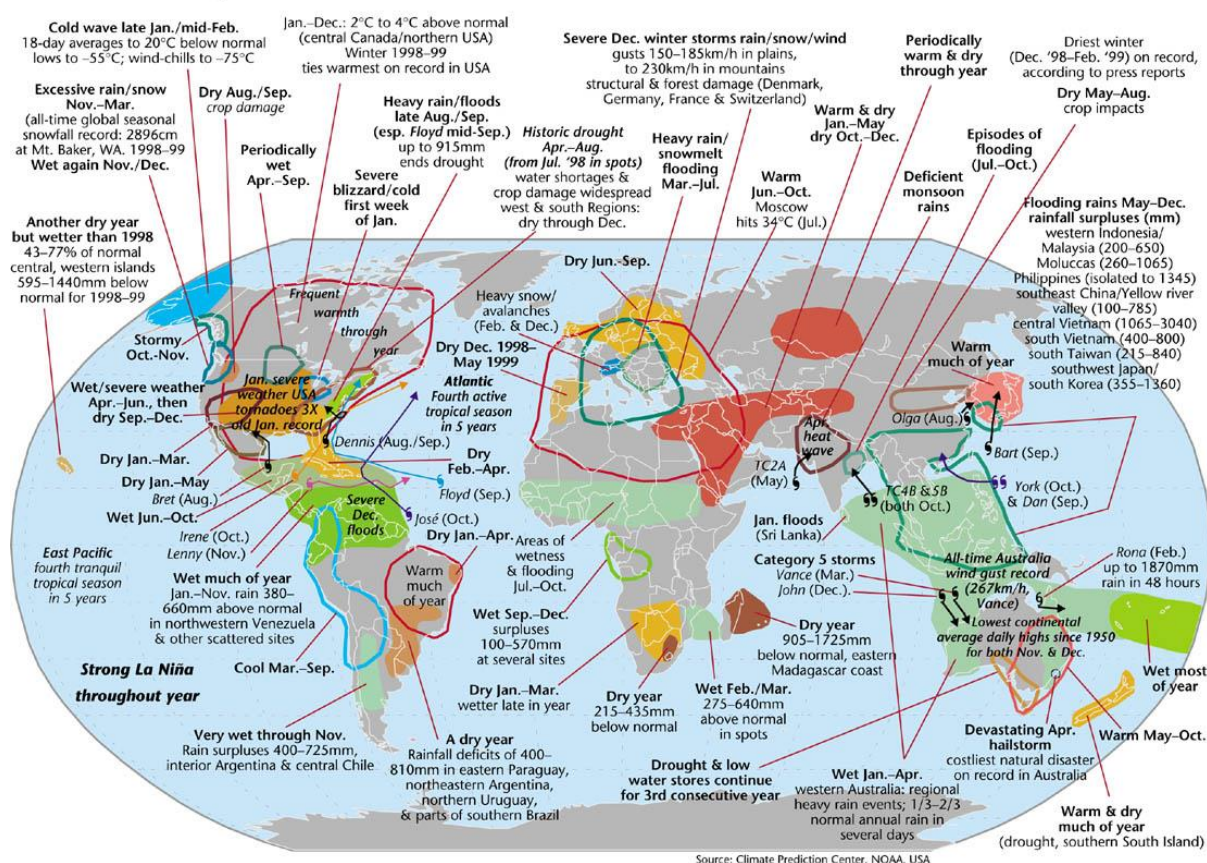
92. ábra. A víztárolók elhelyezkedése Szingapúrban (1984) (Forrás: Tang 1984 in Gupta-Pitts 1992)

2.6.2.5. Kevés víz, sok víz probléma

Az édesvizek hasznosítása során egy furcsa kettősség figyelhető meg: miközben alapvetően a víz hiánya okoz egyre nagyobb gondot világszerte, addig az időszakos víztöbbletekkel is egyre több a baj – nem ritkán ugyanazon a területen.

Ha a Meteorológia Világszervezet éves jelentéseit áttekintjük, akkor feltűnhet számunkra, hogy egy-egy évben szinte ugyanakkora területet sújt a csapadékhiány és a rendkívüli csapadék (93. ábra). Ez azt is jelenti, hogy nem annak mennyiségével van gond, hanem szokatlan területi eloszlása okozza leginkább a katasztrófákat (aszályok, árvizek).

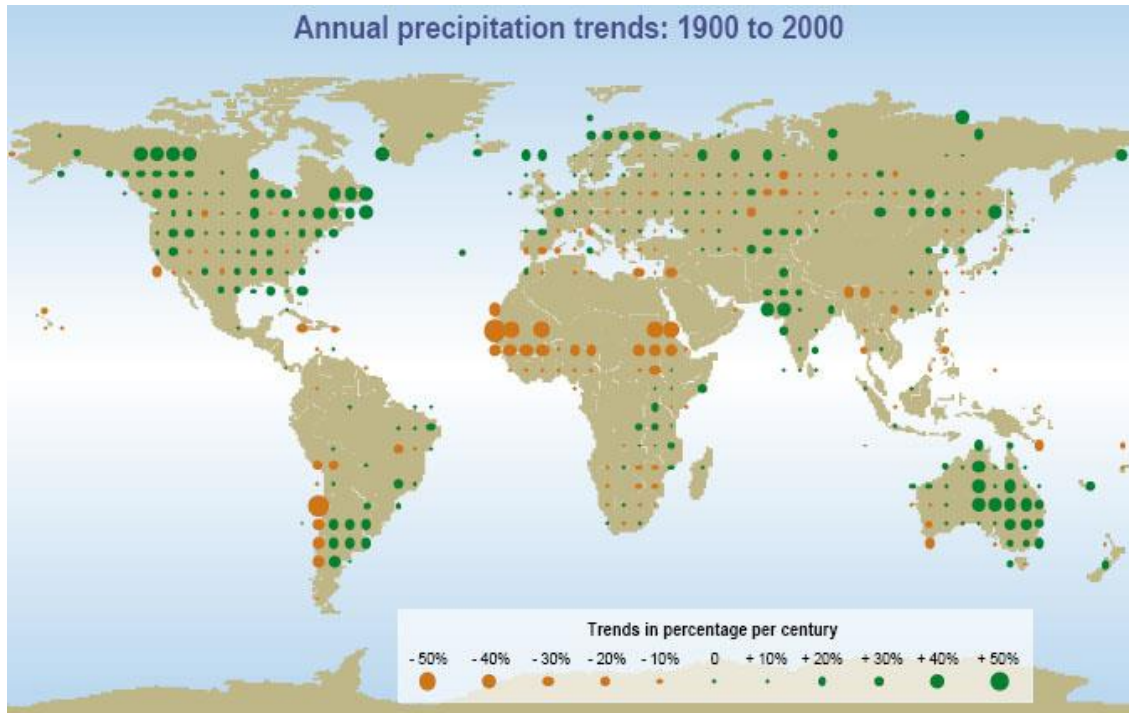
MAJOR GLOBAL CLIMATE ANOMALIES AND EPISODIC EVENTS IN 1999



93. ábra. Klimatikus anomáliák és epizodikus események 1999-ben (Forrás: WMO)

Hosszabb időszak megfigyelései alapján azonban a szárazföldeken lehulló csapadék területi megoszlásában már megfigyelhetőek csökkenéssel és növekedéssel jellemezhető területek (94. ábra). A 20. század során a legnagyobb csapadékhiány Afrika szaharai térségében alakult ki, míg Észak-Amerika és Ausztrália nagyobb részén inkább növekedés volt tapasztalható.

Az ember évezredekken együtt élt az árvizekkel. Igyekezett kihasználni annak előnyeit, s tevékenységében figyelembe vette a természetes változásokat. Amikor azonban egy-egy terület népessége oly mértékben megnőtt, hogy a rendelkezésre álló földterület kevésnek bizonyult, kézenfekvő megoldásnak látszott, hogy a csak időnként hasznosítható árterületeket is birtokba vegyék. A 19. és 20. században szerte a világon jelentős folyószabályozásokat, ármentesítéseket végeztek, ami egyre keservesebbé váló harcot indított el a természet és az ember között. A folyók statisztikailag kevésbé változó vízmennyiségei sokkal szűkebb területen kerülnek elvezetésre, ami több nyilvánvaló következménnyel jár:



94. ábra. Csapadéktrendek a 20. században a Föld térségeiben (Forrás: IPCC 2006)

a gátak közé szorított folyók magasabb vízállásokkal és gyorsabban vezetik le az árvizeket, ez az egyéb környezeti hatásokkal együtt a gátak rendszeres magasztását teszi szükségessé, a gyorsabban levonuló vizek kimélyíthetik a medreket, megnövelik a vízhiányos időszak hosszát, és a vizes területek csökkenésével ökológiai és klimatikus változásokat is okozhatnak, fokozódik az egyébként is növekvő vízhiány,

szélsőséesebbé válik a folyók vízjárása (95. ábra),

az árvízi magasságok növekedése és a folyótól elhódított területek megművelése, beépítése sokszorosára növeli az árvizek kockázatát.

A természeti katasztrófák között az árvizek vezető szerepet töltenek be. A legtöbb emberáldozatot követelő természeti katasztrófák tízes rangsorában az árvizek foglalják el az első, a második, az ötödik és a kilencedik helyet is.⁵⁸ A technikai fejlődés ellenére az 1995-2004 között évente átlagosan 78 ezer ember pusztult el, s ebben az árvizek kb. fele részben

⁵⁸ Lásd a http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_disasters_by_death_toll# címen. Kiegészítésként meg kell jegyeznünk, hogy az 5. helyen álló, 1938-as kínai árvíz oka a japán-kínai háború során – Chiang Kai-Shek hadserege által – szándékosan átvágott töltés „eredménye”.

A különböző források sokszor nagyon eltérő adatokat adnak az egyes eseményekre, vö. az előzőket az igen részletes adatbázison alapuló

http://www.em-dat.net/disasters/Visualisation/profiles/natural-table-emdat_disasters.php?dis_type=Flood&Submit=Display+Disaster+Profile listájával.

részesednek annak ellenére, hogy az információk felgyorsulása nyomán egy-egy eseményben ma már jóval kevesebben halnak meg.

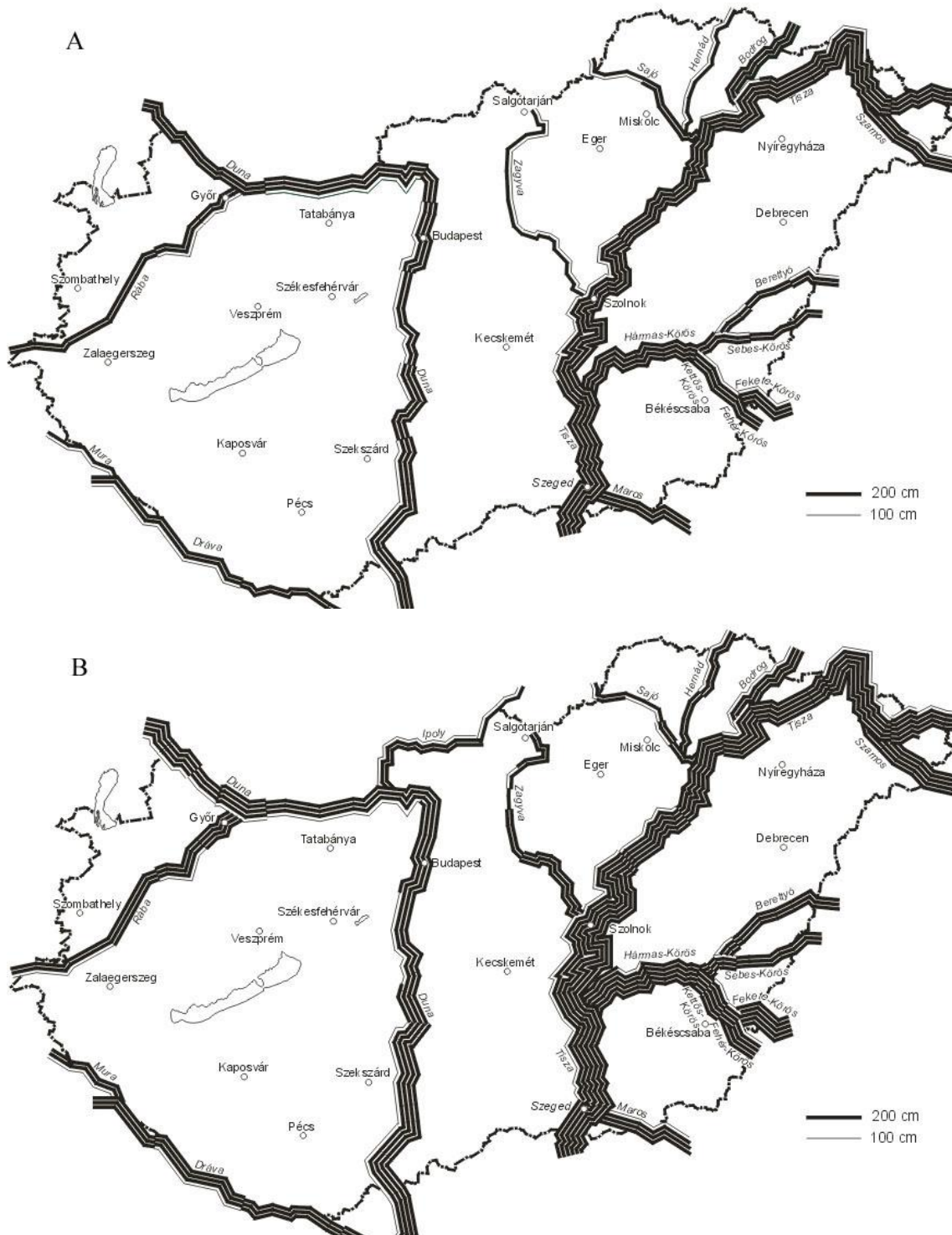
A természeti katasztrófák által okozott gazdasági károk szintén tetemesek, tíz év átlagában (1995-2004) 65 milliárd \$ évente, de például 2005-ben megközelítette a 160 milliárd dollárt is. Az árvízi események itt is kiemelt szerepűek: például a Jangce 1998-as árvize egymagában 30 milliárd \$ kárt okozott. Évente legalább 200-300 számottevő árvízi esemény van. Az árvizek aránylag jól körülhatárolható területekre koncentrálnak (**96. ábra**), de hatásaik a fejlettebb és fejletlenebb térségek között másként érvényesülnek. A nagyobb gazdasági károk inkább a fejlettebb országokban jelentkeznek, a több áldozatot pedig inkább az elmaradottabb országokban szedi. Például a 2002-es közép-európai árvíz több mint 20 milliárd \$ kárt okozott és 55 halálos áldozattal járt, a 2000 eleji Afrika déli részére kiterjedő áradássorozat 1 milliárd \$ kárösszegéhez pedig 929 halott és 733 ezer menekült kapcsolódott.

Az árvizek hatásai különböző mértékben érintik a kontinenseket is (**27. táblázat**). Ebben a klimatikus és domborzati tényezők mellett meghatározó szerepe van az árvizek által érintett területek népsűrűségének is. Jól látható, hogy Ázsia szenved leginkább ettől a természeti katasztrófától, s legkevésbé Afrika érintett

27. táblázat. Az árvizek által okozott összes veszteségek kontinensenként (1900-2005)

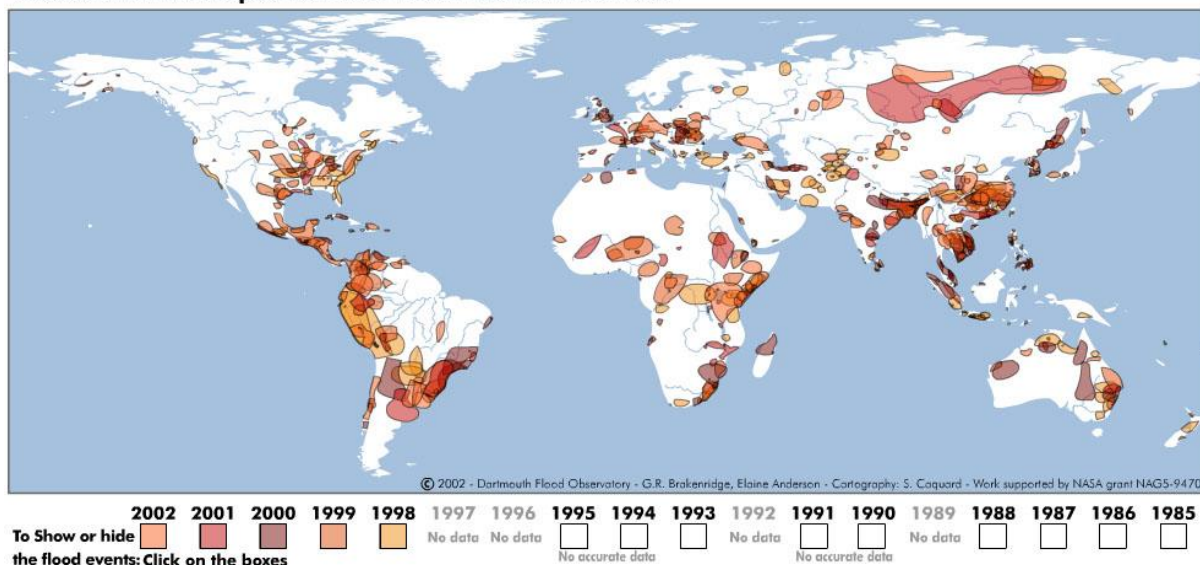
Kontinens	Halálos áldozat (ezer fő)	Kár (milliárd \$)
Áfrika	20,2	3,9
Amerika	100,8	61,5
Ázsia	6765,5	205,0
Európa	9,2	80,8
Ausztrália és Óceánia	0,4	2,4

Alig vitatható az, hogy az *árvízi események* sokban függenek az időjárási eseményektől, de a *társadalomra gyakorolt hatásuk már jelentősen függ az ember tevékenységétől*. Azáltal, hogy benépesülnek, illetve gazdálkodásba vonódnak a korábban vízjárta területek, az ember szinte maga teremti meg a katasztrófák feltételeit. Az persze más kérdés, hogy a világ sok táján nincs más választása az ott élőknek, mint kockára tenni életüket, javaikat – a napi táplálék megszerzése érdekében.



95. ábra. A magyarországi folyók vízjátéka⁵⁹ 1900-ban(A) és 2006 végén(B) (Szerk: Rakonczai J.)

⁵⁹ A vízjáték: az időpontig tapasztalt legnagyobb és legkisebb vízállás különbsége

Global Archive Map of Extreme Flood Events since 1985

96. ábra. Az árvízi események által érintett területek (1998-2005) (Forrás: Dartmouth Flood Observatory interaktív térképe⁶⁰)

2.6.3. Nemzetközi egyezmények a vízről

2.6.3.1. A világtengereket érintő egyezmények

Hosszú évszázadokon át a világtenger (a parti vizeket leszámítva) egyfajta senki földje volt, mindenki szabadon használhatta. A tengerhasználat közüli viták a 20. század második felében lángoltak fel, amikor kiderült, hogy a tengerek mélye hatalmas szénhidrogénkészleteket rejt, illetve akkor amikor távoli országok gyarapodó halászflojtái egyes partmenti országok halászatát is meggingatták. További problémát jelentett, amikor kiderült, hogy egyes országok az óceánok „gazdátlanságát” kihasználva azokat a veszélyes hulladékok szeméttelpeként használták, majd pedig az antropogén szennyezés óriási mértéke a part közeli vizekben.

Az első átfogó egyezmény a *London Dumping Convencion* 1972-ben született. Ez a világtengerekbe juttatott szennyezések megelőzéséről szól, és az ottani hulladéklerakást tiltja. Eredeti formájában betiltotta a radioaktív anyagok és más erősen veszélyes hulladékok lerakását a tengerekben, 1994-től tiltja a tengereken végzett égetést, 1995-től pedig minden ipari hulladék elhelyezést. Az egyezmény céljai világosak, mégis számtalan kijátszása történt. A Greenpeace például dokumentumfilmmel bizonyította, hogy az aláírás után évekkel is

⁶⁰ A <http://www.dartmouth.edu/~floods/Archives/> címen az interaktív térkép mellett számos részletes területi adatot találhatunk.

történtek radioaktív-hulladék lerakások. Ez is oka volt annak, hogy többszöri kiegészítés után 1996-ban „újraírták” az egyezményt.

A Londoni Hulladéklerakási Egyezményt egészítette ki az 1973-ban megszületett, majd 1978-tól megújított MARPOL Egyezmény (the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships), amely korlátozta hajókról az olaj, a szemét, a mérgek és mérgező folyadékok tengerekbe ürítését, illetve szabványokat írt elő a hajók szerkezetéről, működéséről, valamint tiltja a légi úton szállított szennyezők szándékos tengerbejuttatását. Az egyezmény folyamatosan kiegészítésekkel látják el. Egy ilyen 2006-ban született kiegészítés szabályozza azt, hogy a régi, szimpla falú tankereket folyamatosan ki kell vonni a szállításból.

Hosszas előkészületek után 1982-ben született meg az *ENSZ Tengerjogi Egyezménye* (UNCLOS), elfogadásra Jamaicában (Montego Bay) került sor. Az egyezmény szabályozza a világtengerek használatát, és lényegében véget vetett az imént említett gazdátlanság időszakának. Kiterjesztette a parti országok jogát, és a hagyományos nemzeti vizeken túl 200 tengeri mérföldes gazdasági zónákat határoz meg számukra. Ez kiterjed, mind vizekre, mind a tengerfenék hasznosítására, így bár formálisan nem az országok területét növelte, de hasznosítási szempontból gyakorlatilag azzal majdnem egyenértékű. Az egyezmény a döntően gazdasági indíttatású megállapodáson túl, intézkedéseket tartalmaz a tengeri populációk védelméről, fenntartásáról, helyreállításáról, és a tengereket érő szennyezések ellen.

A partközeli területek környezeti problémáiról először regionális megállapodások születtek, ezek jól tükrözték a leginkább konfliktussal sújtott területeket (Északi-tenger 1974, Földközi-tenger 1976, a kuvaiti régió 1978, a tágabb Karib-tenger 1983). 1985-ben alkották meg a szárazföldről származó szennyeződések elleni védekezés alapelveit, és végül 1995-ben megszületett a Washingtoni Nyilatkozat és a hozzá kapcsolódó akcióprogram (GPA) a tengeri környezet szárazföldről származó szennyeződések elleni védelemről (az akcióprogramot legutóbb 2001-ben aktualizálták).

A világtengerek szennyezését megakadályozandó mára már számos itt nem felsorolt egyezmény született.⁶¹

Az ember tevékenysége látványos pusztulást okoz a tengeri élővilágban. Az óceánok legnagyobb méretű fajai, a bálnák igen szembetűnően mutatják a problémát, nem véletlen, hogy védelmük megkülönböztetett figyelmet kapott. A kezdetben (1946) inkább csak gazdasági

⁶¹ Ezek aktuális helyzetéről összefoglalóan a

http://www.imo.org/Conventions/mainframe.asp?topic_id=247 címen, részleteiben a http://www.imo.org/Conventions/mainframe.asp?topic_id=260 címen tájékozódhatunk.

racionalizálás céljából létrejött *Nemzetközi Bálnavadászati Egyezmény* (IWC) akkor vett fordulatot, amikor a vadászatban nem, vagy kevésbé érintett (a szervezetbe „beszivárgó”) országok 1982-ben kikényszerítették a bálnavadászat betiltását. Az egyezmény körül azóta is rendszeresen kipattan a vita, mert a vadászatban gazdaságilag erősen érintett országok (pl. Japán, Oroszország, Norvégia) szeretnék feloldani azt, illetve rendszeresen ki is játsszák. Jól érzékelteti bizonytalanságot, hogy az IWC 2002. áprilisi ülésekor az állatvédők a tudományos kutatás ürügyén végzett bálnavadászat betiltását követelték, a norvégok és a japánok pedig a kereskedelmi bálnavadászati tilalom felfüggesztését kívánták elérni. (Japán a háttérben állítólag szavazatokat is „vásárolt”). Az ok: a japánok szerint egyre több a bálna, és hogy a tengeri emlősök „felzabálják a táplálékot”, ezzel károsítva a halászati ipart. Ezzel szemben a tengerkutatók azt állítják, hogy a legutóbbi, négyéves felmérés szerint harmadára csökkent a bálnák száma. Az ellentmondást jól mutatja, hogy Japán szerint 760 ezer csukabálna él az Atlanti-óceánban, míg a nemzetközi felmérések alig 250 ezer állatról számolnak be. Az egyezmény körüli szemléleti változást jelzi az is, hogy 2006 októberében Japán és Norvégia után már Izland is engedélyezte a bálnavadászatot.

A megszületett nemzetközi egyezmények valamelyest enyhítettek az óceánokra nehezedő környezeti nyomáson. Az utóbb bemutatott példa azonban csak egy azok közül, ami azt bizonyítja, hogy a tengerekre vonatkozó egyezmények betartása/betartatása még számos visszássággal terhelt. A halászhajók rendszeresen visszaélnék például a fejletlen országok halászvizein vásárolt jogokkal (a zsákmány egy részét könnyen letagadják), vagy egyszerűen megsértik a megállapított kvótákat a közös vizeken (kanadai lazac-halászok esete) így fokozzák a túlhalászást.

2.6.3.2. Az édesvizekre vonatkozó egyezmények

Az édesvizek problémáinak bemutatása során alig vitatható, hogy a kérdéskör globális jellegű, ugyanakkor a példák arra is rávilágítottak, hogy ezek a globálisnak tűnő jelenségek ezernyi lokális és regionális ügyből állnak össze, s egy-egy konkrét probléma megoldása általában nem átfogó elvi rendezést igényelne, hanem nagyon konkrét helyi beavatkozást.

Leginkább a talán a vizes konfliktushelyzetekkel foglalkozó fejezetrész mutatta azt meg, hogy az erőteljesen különböző érdekek miatt nehéz átfogó megállapodásokat kötni, s azokban elengedhetetlenül kompromisszumokat kellene találni. A vízzel kapcsolatos globális gondok alapvetően különböznek a légkör problémáitól. A légkör esetében kis túlzással azt mondhatjuk,

hogy az emberiség „egy csónakban evez”, még a határon átjutó szennyezések csökkentése esetében is van a szennyezőnek és az azt „élvezőnek” közös érdeke (hiszen a szennyezés egy része azért mégis helyben is károsít). *Az édesvizek esetében viszont inkább úgy általánosítható a probléma, hogy egy csökkenő méretű tortát kell egyre több éhes száj között elosztani. Az éhség egy határon túl már nehezen tolerálható, s a racionálisnak tűnő érvek helyett előtérbe kerülhetnek erőszakos „megoldások”.* Mindezek talán érthetővé teszik a vízproblémák rendezésre irányuló nemzetközi egyezmények tartalmát, azt, hogy a kevés átfogó megállapodás milyen kevés konkrétumot tartalmaz (ugyanis 2-3 ország ügyét nem lehet általánosan rendezni, a szükséges kompromisszumokban pedig helyben kellene megállapodni).

Az átfogó környezetvédelmi gondolkodást megelőzően az édesvizekre vonatkozóan már évtizedekre előremutató gondolatok fogalmazódtak meg az Európa Tanács „Európai Víz Chartában” (Strasbourg, 1948. május).

Víz nélkül nincs élet. A víz érték és létfontosságú környezeti elem.

Az édesvíz készletek nem kimeríthetetlenek. Ezért ezeket meg kell őrizni, illetve védeni.

A víz szennyezése veszélyes az ember és más vízfüggő élőlények számára.

A víz minőségének ki kell elégítenie a különböző használatok igényeit, különösen az emberi egészség szempontjából lényeges követelményeket.

A használt vizek vízfolyásokba vezetésével a víz minősége nem akadályozhatja annak további termelési, illetve személyes célú használatát.

A növényvilág és különösen az erdők szerepe a vízkészletek megőrzése szempontjából igen jelentős.

A vízforrásokat meg kell őrizni.

A vízügyi hatóságoknak meg kell tervezniük a helyes vízgazdálkodást.

A vízvédelem szükségessé teszi a szakoktatás, a tudományos kutatás és a nyilvánosság tájékoztatásának intenzívebbé tételét.

A víz közös tulajdon, melynek értékét mindenkinek ismernie kell. Az egyéneknek kötelessége a víz célszerű és gazdaságos használata.

A vízgazdálkodást természetes vízgyűjtő területek, és nem politikai illetve adminisztratív határok keretében kell megvalósítani.

A víz nem ismer semmiféle határokat, ezért, mint közös erőforrás nemzetközi együttműködést tesz szükségessé.

Az első jelentősebb, a szárazföldeken található vizekre vonatkozó globális megállapodásként az 1971-ben született *Ramsari Egyezmény* (Irán) értékelhető – igaz elsősorban

természetvédelmi célból született⁶². Az egyezmény a rohamosan csökkenő vizes élőhelyek (lásd korábban) megőrzését tűzte célul, és alapjában nem tiltó jellegű (az ésszerű hasznosítást megengedi), éppen ez az oka, hogy sokféle már gyakori ezek megsemmisítése. 2006. szeptemberéig a 153 aláíró országban 1631 egyezmény alá eső védett terület volt 145,6 millió hektár területtel⁶³, ami Föld vizes élőhelyeinek közel 11%-a.

A vízproblémákról az ENSZ először 1977-ben rendezett tematikus konferenciát Mar del Plata-ban (Argentína). Az itt elfogadott akcióterv alapján – és végső soron a vízhez kapcsolódó szaporodó gondok miatt – az 1980-as évtizedet „Az ivóvíz és a csatornázás” évtizedének nyilvánították, de ez a figyelemfelkeltésen túl nem sok konkrét eredmény hozott, a problémák csak fokozódtak.

Nemzetközi szinten az Rio Konferenciára készülve önálló vízügyi konferenciát rendezett az ENSZ Dublinban (1992. január). A 113 ország részvételével megtartott tanácskozás négy alapelvet fogalmazott meg. Ezek:

1. Alapelv: Az édesvíz véges és sebezhető természeti erőforrás, amely elengedhetetlen az élet fenntartása, a fejlődés és a környezet védelme szempontjából.
2. Alapelv: A vízkészlet-gazdálkodásnak és -fejlesztésnek a különböző szintű vízhasználók, tervezők és politikai irányítók részvételén kell alapulnia.
3. Alapelv: A nők központi szerepet játszanak a víz beszerzésében, megővésében és az azzal való gazdálkodásban.
4. Alapelv: Az egymással versengő vízhasználók szempontjából a víznek gazdasági értéke van és a gazdasági javak kategóriájába sorolandó.

A konferencia igazi eredménye azonban nem annyira az elvek meghatározásában, mint a legfontosabb jövőbeli feladatok meghatározásában van. Felhívták a figyelmet a felszíni és a felszín alatti vizek védelmének fontosságára, kiemelték az integrált vízgazdálkodás jelentőségét. Külön hangsúlyt kapott, hogy a vízkészlet-gazdálkodás természetes egysége a vízgyűjtő, ezért a határokon átnyúló vízgyűjtő esetében – a konfliktusok feloldása érdekében – meg kell teremteni a megfelelő jogi, intézményi és üzemi mechanizmusokat. Az ágazati megközelítésekben külön hangsúlyt kapott a fenntartható mezőgazdaság és a városok szerepe.

⁶² Az egyezmény pontos megnevezése: „Egyezmény a nemzetközi jelentőségű vizes területekről, különösen mint a vízmadarak élőhelyéről”. A megállapodás a természetes és mesterséges vízfelületekre is vonatkozik, és éppen természetvédelmi célja miatt értelmezése a tengerpart menti sós vizű területekre is kiterjed.

⁶³ Részletesebb aktuális információk a <http://www.ramsar.org/> címen érhetők el.

A kutatási témák között fontos szerepet tulajdonítottak a klímaváltozás következményei feltárásának, illetve részletes adatbázisok felállításának. Megfogalmazódott annak igénye is, hogy a Riói Konferencia után, az átfogó gondolkodásnak legyen vizekkel foglalkozó folytatása is, szervezetileg pedig szükséges felállítani egy nemzetközi testületet (pl. vízügyi világforum vagy világtanács), ami megfelelő szinten át tudja fogni gondokat, feladatokat. Egyúttal javasolták, hogy a felvetett kérdésekkel kapcsolatos ellenőrzésre 2000-ben kerüljön sor.

A Dublini Konferencia ajánlásának megfelelően az 1992. szeptemberében Rio de Janeiroban tartott ENSZ Környezet és Fejlődés világkonferencia az Agenda 21 (Feladatok a 21. századra) program keretében részletesebben is foglalkozott az édesvízi erőforrásokkal (a 18. fejezetben). Hét fő programterületet fogalmaztak meg: 1. Integrált vízi erőforrás-fejlesztés és -gazdálkodás, 2. A vízi erőforrások felmérése, 3. A vízi erőforrások, a vízminőség és a vízi ökoszisztémák védelme, 4. Ivóvízellátás és közegészségügy, 5. A víz és a fenntartható városfejlesztés, 6. A víz szerepe a fenntartható élelmiszertermelésben és a vidék fejlesztésében, 7. Az éghajlatváltozás hatása a vízi erőforrásokra. Az általános elveken túl például célként jelölték meg, hogy 2000-ig többoldalú megállapodásokat készítsenek (nemzetközi szervezetek bevonásával) az országhatárokon átnyúló vízgyűjtőkről, azt, hogy minden városlakó legalább 40 liternyi biztonságos vízhez juthasson. Az élelmiszerellátás javítása érdekében 130 fejlődő országban 2000-ig 15,2 millió hektár új öntözött terület kialakítását, 12 millió hektáron az öntözés hatékonyságának növelését, 7 millió hektáron vízszabályozást, további 10 millió hektáron pedig kis léptékű vízügyi programokat, vízvédelmet javasolta.

A Dublinban javasoltak szellemében 1996-ban megalakult a *Víz Világtanács* (amely évente áttekinti a legfontosabb feladatokat), majd ennek kezdeményezésére háromévenkénti gyakorisággal életre hívták a Víz Világforumokat.

Az I. *Víz Világforumra* a Marrakech-ben (Marokkó) 1997-ben került sor. A tanácskozás utal a fennálló feszültségre és a várható válsághelyzetre, felhívja a figyelmet a fenntartható vízhasználat tudatosításának fontosságára. A következő időszak fő feladatának tette egy hosszú távú (2025-ig terjedő) jövőkép megalkotását.

A Hágában tartott (2000) II. Víz Világforum már a konkrét, területekre lebontott problémák bemutatása mellett ennek a 2025-ig előre jelezhető vízügyi jövőkép elemzésével foglalkozott. A helyzetértékelés sorra vette az égető problémákat, amit korábban mi is bemutattunk (árvizek, aszályok, vízszennyezés, városok alatti talajsüllyedés, országok közötti politikai feszültségek a vízkészletek egyenlőtlen elosztása miatt, víz által terjedő betegségek, a vizes élőhelyeinek eltűnése, nagy folyamok kiszáradása). Értékelték az eredményeket: „Az ivóvíz és

a csatornázás” évtizede alatt lényegesen javult a közműellátottság, a fejlett országokban nem csak megállt a felszíni vízminőség romlás, de javulás is tapasztalható volt, s a népességnövekedéssel lépést tudott tartani az élelmiszerellátás. Négy fő kulcskérdést fogalmaztak meg:

A vízkészletek nem lehetnek monopóliumok, hanem közös értéket képeznek, s a jövő vízbiztonsága érdekében a „vízkérdést” mindenki ügyévé kell tenni.

A vízzel kapcsolatos szolgáltatások (tisztítás, elosztás, szennyvízkezelés) nem lehetnek ingyenesek. A használóknak meg kell fizetni a valós árat – a szociálisan rászorulóknak kapjanak kompenzációt. Fontos ugyanakkor a szolgáltatások megbízhatósága (vannak térségek ahol ez nagyobb gond, mint az árat kifizetni).

Az ivóvízhez és csatornázáshoz alanyi jogon juthasson mindenki hozzá.

A vízzel kapcsolatos hatalom megosztása, a polgárok és szervezetek szükségzerű bevonása a vízügyi politika kidolgozásába, megvalósításába (participáció).

A részletesen megfogalmazott térségi jövőképekhez pedig a *Globális Vízügyi Társulás* (Global Water Partnership⁶⁴) helyi csoportjainak közreműködésével cselekvési programok is készültek.

A 2002-es Johannesburgi Konferencia fontos kérdésként említette az egészséges ivóvíz ügyét, célul tűzte ki 2015-ig az egészséges vízhez nem jutók számának felére csökkentését, de konkrét megfogalmazás hiányában probléma fontosságánál kevesebbet vállalt.

2003. márciusában Kiotó-ban került sor a III. Víz Világforumra. A nagyszabású rendezvény bár sokoldalúan elemezte a víz körüli aktuális problémákat, mégis szerényebb eredményt hozott. A zárónyilatkozat kiemeli, hogy a víz kulcsfontosságú az egyes nemzetek fejlődéséhez, és bátorítja a vízforrások kezelésének finanszírozását⁶⁵, támogatja a vízügyi problémák regionális kezelését. Több delegáció (így az EU is) a konkrét elkötelezettségek elnagyoltsága miatt elégedetlenségét fejezte ki.

A IV. Víz Világforum helyszíne Mexikóváros volt. Fő témája a fenntartható vízhasználat volt, és egyebek mellett mint alapvető emberi jogot határozták meg a vízhez jutást.

Miközben a világ sok térségében jelentős gondok vannak a vizeket érintő együttműködésben, az Európai Unió igen határozott lépéseket tett (ez joggal adhatott okot az imént említett Kiotói

⁶⁴ A GWP egy olyan nemzetközi hálózat, amely fő céljának az integrált vízgazdálkodást tekinti, és az elveket a gyakorlatba „átülteti”. Célja a nagyfokú együttműködésen keresztül a vízbiztonság megteremtése.

⁶⁵ A Világbank 2002. márciusi vizekkel kapcsolatos támogatási stratégiájában jó néhány általunk is bemutatott krízistérség is szerepelt.

nyilatkozat kritizálására). Az ENSZ Európai Gazdasági Bizottság Környezet- és Vízügyi Kormányfő-tanácsadói Testületének (ma: Környezetvédelmi Bizottság) Vízügyi Problémák munkacsoportja 1992-ben dolgozta ki az ún. *Helsinki (vagy Vízügyi) Konvenciót*, amely „a határokon átlépő vízfolyások és nemzetközi tavak védelméről és használatáról” rendelkezik (1996 októberétől hatályos). Ez hangsúlyozza, hogy a határokat átlépő vízfolyások védelmével és használatával kapcsolatos együttműködésről főként az érintett országoknak kell gondoskodni különösképpen két- és többoldalú egyezmények keretében az egyenlőség és viszonyosság alapján, és összehangolt politikákat, programokat és stratégiákat kell kifejleszteniük az érintett vízgyűjtőkön.

Fontos lépésnek tekinthető az *ENSZ Vízfolyás-konvenciójának (New York) 1997. évi megszületése, ami a nemzetközi vízfolyások nem-hajózási célú használatának jogáról szól*. Ez döntően a nemzetközi vízfolyások mennyiségi kérdéseire, ezen belül is a vízmegosztásra, illetve az ezekkel kapcsolatos problémák konzultatív megoldására helyezi a hangsúlyt, benne még nem kap érdemi szerepet a vízminőség-védelem és az ökológia. A kötelezettségeket inkább csak ajánlások formájában fogalmazza meg. Bár felveti a nemzetközi szinten okozott károk kompenzálásának gondolatát, alapvető hiányossága, hogy hatálya csak a vízfolyásokra illetve azok meghatározott szakaszaira (és nem a vízgyűjtőkre) terjed ki.

Az Európai Unió az 1990-es évek közepén megfogalmazott vízügyi politika megvalósítására *2000 decemberében életbe léptette az EU Vízügyi Keretirányelveit*. Ez korszerű formában épített a korábbi Víz Chartára, természetes egységként kezeli a vízgyűjtőket – országhatároktól független gondolkodást követelve. *Az EK tagállamai számára kötelező feladat a Keretirányelv előírásainak végrehajtása, a csatlakozásra készülő országoknak pedig jogharmonizációs feladat*. Miközben új fogalmakat kell megtanulnunk (pl. víztest, ökológiailag jó állapot, stb.) új alapokra helyezi a teljes vízgazdálkodást. *Célja*, hogy megakadályozza a vízminőség további romlását (csökkentve a felszíni és felszín alatti vizekbe jutó káros anyagok mennyiségét), elősegítse a fenntartható vízhasználat kialakítását, redukálja az árvizek és az aszályok okozta károkat, illetve megvalósítsa a nemzetközi egyezmények céljait. *Hatálya* kiterjed a felszíni, a felszín alatti vizekre, a vízi ökoszisztémákra és a vízi ökoszisztémáktól közvetlenül függő szárazföldi ökoszisztémák állapotának védelmére, a vízgyűjtő-gazdálkodásra, a vizek mennyiségi és minőségi védelmére, a vizekre káros szennyező anyagok kibocsátásainak csökkentésére, a megfelelő minőségű víz biztosítására, a vízgazdálkodás nemzeti rendszerére. A Keretirányelv előírja, hogy *legkésőbb 2015. december 22-éig el kell érni a vizek jó állapotát*, amely felszíni vizek esetében a víztest ökológiai, és kémiai állapotára, felszín alatti vizek

esetében pedig mennyiségi és kémiai állapotára vonatkozik (az osztályozás alapjait minden víztest típusra meghatározza – így az emberi beavatkozások által súlyosan módosított vizek esetében is). Fontos elem a felszíni és a felszín alatti vizek állapotának figyelemmel kísérése, a vizekre káros kibocsátások ellenőrzése, mérése, ami szükségessé teszi a jelenleg működő monitoring rendszer fejlesztését, kiegészítését. A feladatok között előírja, hogy a tagállamok és a csatlakozásra készülő országok teljes területére a Keretirányelv előírásainak megfelelő *Vízgyűjtő Gazdálkodási Tervet* kell készíteni. A fentiek miatt Magyarország (és 2007 elején Románia) csatlakozása az Európai Unióhoz nemcsak gazdasági és politikai okokból nagyjelentőségű, hanem vízügyi kiszolgáltatottságunk megszüntetése miatt is.

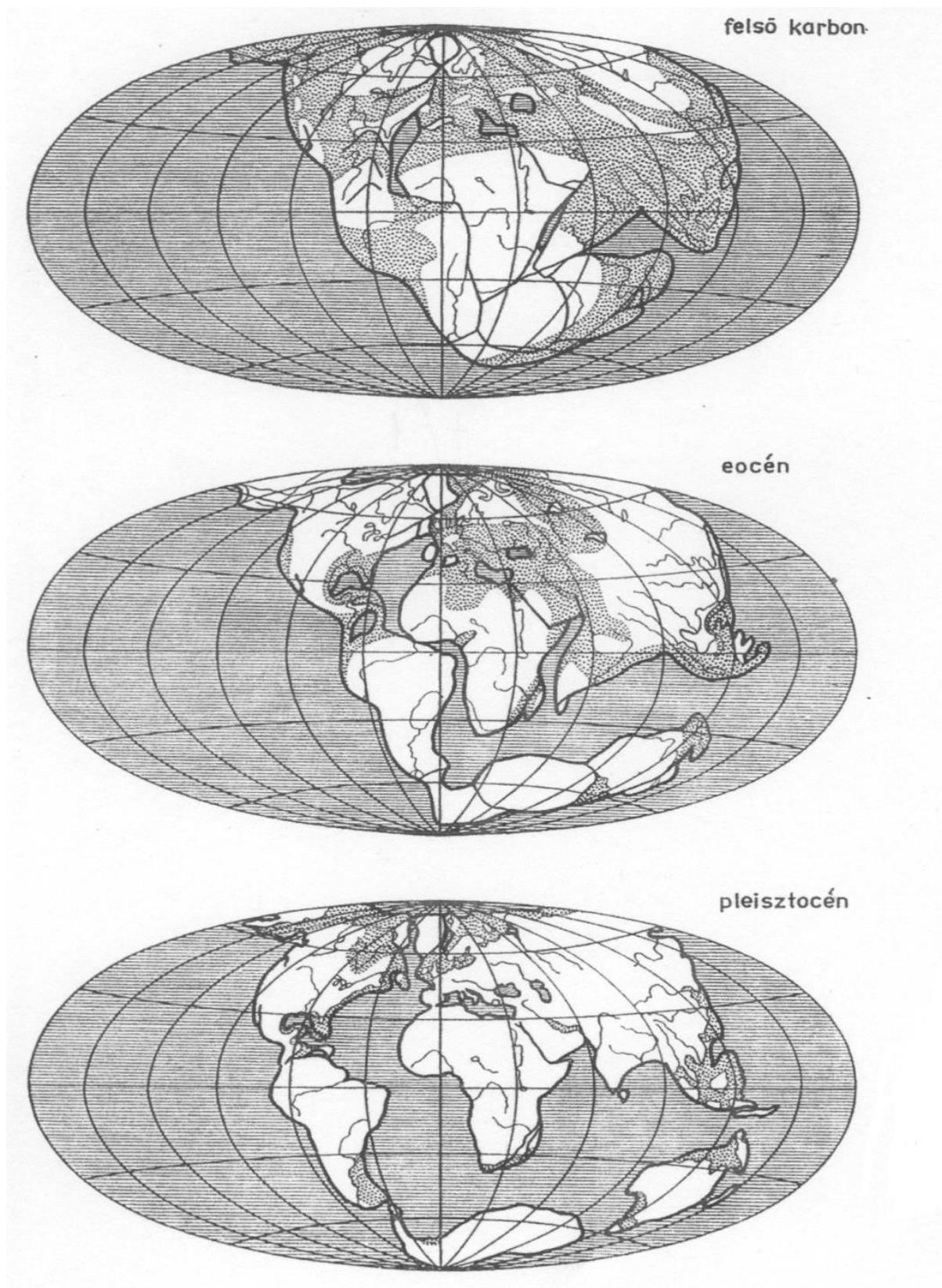
2.7. A kőzetburok és a szárazföldek mint a társadalom életének meghatározó színterei ***Kerényi Attila, Debreceni Egyetem***

2.7.1. Lemeztektonikai alapismeretek: a kőzetlemezek mozgásai és ezek környezeti következményei

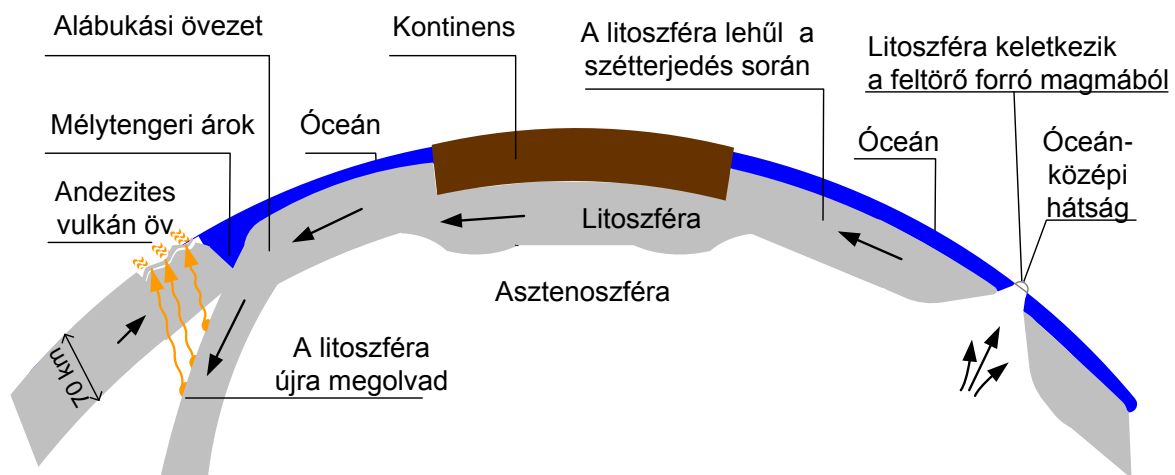
A kutatók egy része már mintegy évszázaddal ezelőtt is foglalkozott azzal a gondolattal, hogy a kontinensek földfelszíni helyzete és egymástól való távolsága a földtörténet során változott. A kontinensvándorlási elméletek közül *Wegener* ún. *úszási elmélete* a legismertebb. Anélkül, hogy ezt az elméletet részletesen ismertetnénk, utalunk arra, hogy ez a 20. század 60-as éveiben bizonyítást nyert lemeztektonikai elmélet korai előfutárának tekinthető.

Wegener abból indult ki, hogy az Atlanti-óceán amerikai partjai jól illeszkednek Afrika és Európa atlanti partvonalához, s ez arra utal, hogy ezek a kontinensek valamikor összefüggtek egymással, és sokmillió év alatt távolodtak el egymástól (**97. ábra**). Az eltávolodás úgy történt, hogy a szilárd kontinentális tömbök a képlékeny szima-rétegen (szilíciumban és magnéziumban gazdag gömbhéj a kisebb sűrűségű szilíciumban és alumíniumban gazdag legfelső földkéreg alatt) elúsztak egymástól.

Wegener számos bizonyítékot gyűjtött össze elmélete bizonyításához, kora geofizikai ismeretei azonban nem voltak elegendők ahhoz, hogy a tudományos közvélemény elfogadja érveit, mivel több fontos kérdést nem lehetett egzaktan bizonyítani. Így pl. a korabeli tekintélyes tudósok túl gyengéknek tartották azokat a mozgató erőket, amelyek Wegener szerint a kontinensek „úszását” okozzák. Wegener halála után az elmélet háttérbe szorult, de a tudósok egy részét később is foglalkoztatta a kérdés.



97. ábra. A kontinensek feldarabolása, ahogyan azt Wegener „A kontinensek és óceánok eredete” c. könyvében elképzelte (Sullivan W. 1985)

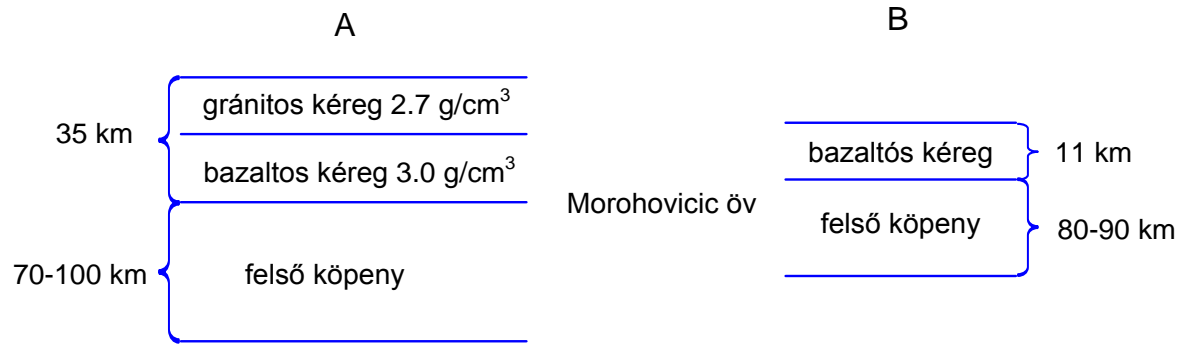


98. ábra. A litoszféra mozgása az asztenoszférán, balra: közeledő, jobbra: távolodó kőzetlemezek (Forrás: Magyar Nagylexikon, 2000, 11. kötet, 928. old)

Az igazi áttörést a geofizikai és oceanográfiai ismeretek gyarapodása, továbbá ezzel párhuzamosan a földrengések világméretű monitoringrendszerének kiépítése eredményezte. Heezen és Tharp részletes térképeket készített a mélytengeri hátságok rendszeréről és elemezte az ezekhez kapcsolódó sekélyfészkű földrengéseket. Vine és Matthews mérésekkel igazolta, hogy az óceánközépi hátságoktól távolodó lemezek mozgása az óceánfenék szétterülésével függ össze (98. ábra). Az ábra jobb szélén látjuk, hogy a feltörő forró magma az óceánközépi hátságoknál a lemezeket szétfeszíti, egymástól távolabbra tolja, miközben a lehülő magma gyarapítja a kőzetlemez anyagát. Ez a legszebben az Atlanti-óceán medencéjében mutatható ki, ahol a Közép-Atlanti-hátságnál a víz alatti vulkanizmus termeli a lemezt szétfeszítő és maga előtt toló bazaltot, az óceáni kőzetlemez gyarapodik, és Európa valamint Afrika távolodik Amerikától. A mozgás sebessége évente néhány cm-t tesz ki.

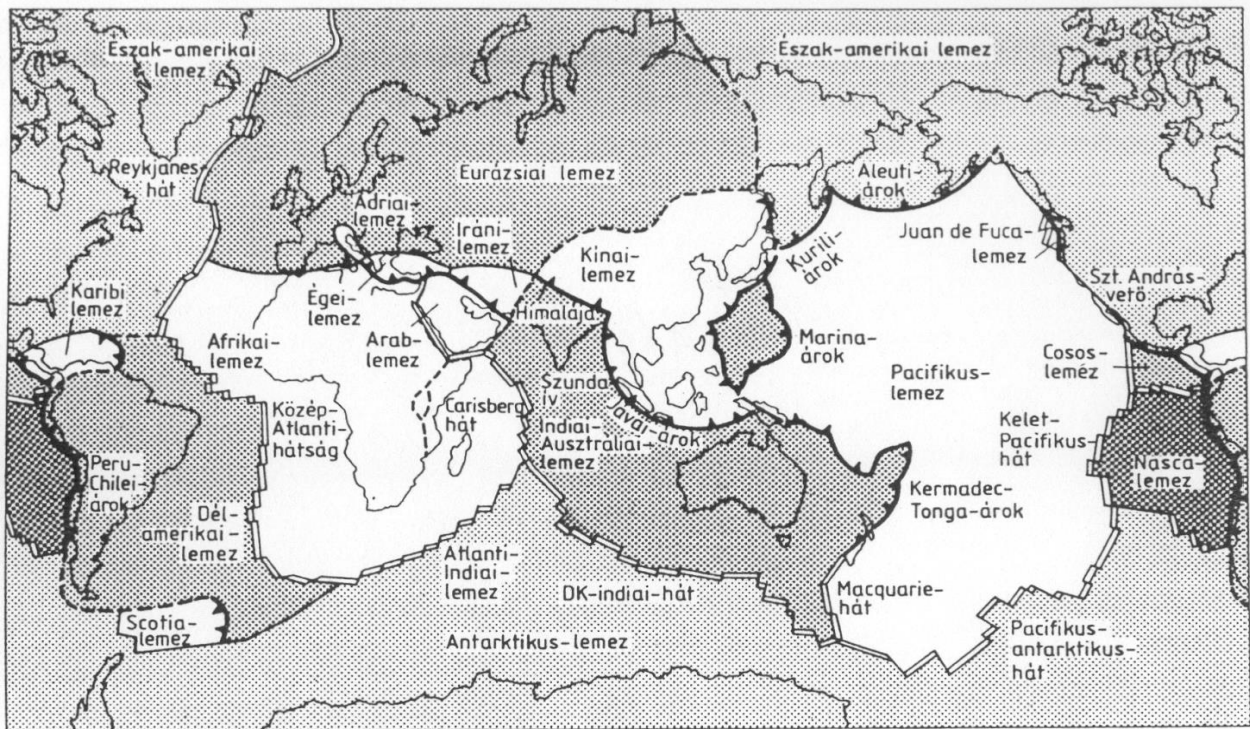
A mélyfészkű földrengések adatainak elemzése azt is bizonyította, hogy a kőzetlemezek egy része helyenként más kőzetlemez alá bukik, és kb. 500–700 km mélyen megsemmisül, beolvad a forró és képlékeny földköpenybe (konzumációs zóna). A kutatások során az is világossá vált, hogy a kőzetlemezek (litoszféralemezek) a szárazföldek alatt három rétegből állnak: a legfelső a gránitos réteg alatt a nagyobb sűrűségű bazaltos réteg helyezkedik el (ezek alkotják a földkérget), s a bazaltos réteg alatt a földköpeny felső, szilárd része alkotja a lemez harmadik rétegét. E három kőzetréteg együtt mozog a földköpeny forró, képlékeny rétegén, az asztenoszférán.

Az óceánok területén hiányzik a földkéreg legfelső, gránitos rétege, így az óceáni kőzetlemezek vékonyabbak és nagyobb a sűrűségük, mint a szárazföldi kőzetlemezeké (99. ábra).



99. ábra. A szárazföldi (A) és az óceáni (B) kőzetlemez egyszerűsített szerkezete

Az egyre gyarapodó ismereteket végül *MORGAN (1968)* és *LE PICHON (1971)* foglalta egységes rendszerbe, az ő munkásságuktól számítjuk a lemeztectonikai elmélet kiteljesedését.



100. ábra. A Föld nagy litoszférolemezei (Forrás: Morgan W. J., 1968)

Az elmélet szerint a Föld külső, szilárd burka két nagyobb és több kisebb méretű kőzetlemezéből áll (100. ábra). A nagy kőzetlemezek közül a Csendes-óceáni lemez tisztán óceáni szerkezetű, míg az Észak- és Dél-amerikai, az Eurázsiai, az Afrikai, az Indo- ausztráliai és az Anktartiszi lemez vegyes szerkezetű, azaz a szárazföldek területén vastagabb, három rétegű, a szomszédos tengerek, óceánrészek területén vékonyabb, két rétegű részekből áll.

A kisebb lemezek közül ismertebbek az alábbiak: *Nazca* (D-Amerikától Ny-ra), *Cocos* (Közép-Amerikától Ny-ra), *Karib-* (Közép-Amerikától K-re), *Fülöp-szigeteki* (az Indonéz-szigetvilágtól É-ra), az *Arab-lemez* (az Arab-félsziget és környéke – **100. ábra**).

A litoszférolemezek az alattuk lévő forró és képlékeny asztenoszféran néhány cm/év sebességgel mozognak („úsznak”). A mozgást előidéző erő a földköpenyben lejátszódó konvekciós áramlás. Ennek felszálló ága egy sávban vagy egy kis területen („pont”-ban), megemeli és „eltöri” a kőzetlemezt. Az így egymástól különálló lemezek kiemelt helyzetük miatt szétcsúszni, egymástól távolodni törekednek. A hasadékokon bazaltos magma nyomul fel, és a szétcsúszó litoszférolemezek pereméhez forradva megszilárdul, s ennek következtében bazaltos összetételű óceáni kéreg és felső köpeny keletkezik, melynek területe fokozatosan gyarapodik. Az ilyen típusú lemezhatárt *divergens lemezhatárnak*, a lemezek gyarapodó szegélyét pedig *akkréciós szegélynek* nevezzük. Ilyen lemezhatárt találunk a már említett Közép-atlanti hátságon kívül a Kelet-afrikai-árokrendszer területén is. Az afrikai nagy tavaktól a Vörös-tengeren át a Szír-palesztin árokig húzódó hatalmas árokrendszer a legszebb példa a szárazföldeken futó divergens lemezhatárra. Afrika keleti „szarva” (a Szomáli-félsziget) néhány millió év múlva a távolodó lemezmozgások következtében le fog válni Afrika testéről, s a szétnyíló árokba benyomul az óceán.

A divergens lemezhatárra jellemző a nagy mennyiségű bazaltos vulkanizmus, és gyakoriak a sekélyfészkű földrengések.

Mivel a Föld szilárd felszíne zárt gömbfelülethez közelít, az egymástól távolodó lemezeknek valahol alá kell bukniuk, vagy legalábbis egymáshoz kell ütközniük. Az ún. térrövidülés úgy is bekövetkezhet, hogy az ütköző lemezek pereme összetöredezik, egymásra csúszik.

Vizsgáljuk meg először az alábukás mechanizmusát.

Az egymáshoz közeledő lemezek közül a nagyobb sűrűségű a másik lemez alá nyomul be. Ilyen pl. a Nazca-lemez alábukása Dél-Amerika alá. Az óceáni lemez mintegy 45 fokos szögben nyomul lefelé az asztenoszférába, ahol fokozatosan felolvad. A megolvadó magma a felszín felé tör, a szárazföldön andezites vulkanizmust eredményez (**98. ábra** bal oldalán). Ilyen az Andok vulkanizmusa. Az alábukó lemez mozgása során feszültségek lépnek fel, földrengések pattannak ki. Ezek mélyfészkűek és a rengések hipocentrumai kirajzolják az ún. *Benioff-zónát*, amely tulajdonképpen az alábukó lemez síkját jelöli ki. Az alábukás helyén mélytengeri árok keletkezik (ld. a **98. ábra** bal oldalán): ezt a zónát *szubdukciós zónának* (alábukási övezetnek) nevezzük. A közeledő lemezmozgásokkal jellemezhető területeket *konvergens vagy destruktív lemezhatároknak* hívjuk, utalva a lemez megsemmisülésére. Dél-Amerikán kívül ilyen még a

Csendes-óceán nyugati pereme, a szigetívek mentén (Japán-szk – Japán-árok, Fülöp-szk. – Filippinó-árok, Mariana-szk. – Mariana-árok).

Az összetett (óceáni és szárazföldi lemezrészekből álló) lemezek mozgása során bekövetkezhet az az eset, hogy az óceáni lemezrész „elfogy”, vagyis az óceáni medence záródik, megszűnik létezni. Ekkor az óceánfenéken felhalmozódott hatalmas mennyiségű üledék „satuba szorul” és felgyűrődik. (A **98. ábra**középen elhelyezkedő kontinens a nyíl irányában mozogva elérkezhet ebbe a helyzetbe.) A felgyűrődött üledékek végül két szárazföldi lemez között igen magasra emelkednek, s a szárazföldi lemezszegélyekről darabok törhetnek le, amelyek becsúszhatnak a passzív lemezszegély alá. Ez a folyamat játszódott le és zajlik ma is az Indiai-lemeznek (a mai Indo-ausztráliai lemez elődjének) az Eurázsiai-lemezhez való ütközésekor. A Dekkán-tábla (az Indiai-félsziget) évmilliók alatt így került a mai helyére. A harmadidőszak során DDNY-i irányból közeledett az Eurázsiai-lemezhez, maga előtt tolvaa a Thetys óceáni lemezdarabját s a rajta felhalmozódó üledéket. A két lemez ollószerű záródása gyűrte fel Földünk legmagasabb hegységét, a Himaláját. Ma szárazföldi lemezrészek feszülnek egymásnak a Himalája-Pamír-Hindukus területén és az Eurázsiai-hegységrendszer többi szakaszán is: Irán peremhegyei és az Örmény-magasföld az Arab-lemez északra tolódása miatt alakultak ki.

A szárazföldi lemezek ütközésére a sekélyfészkű földrengések jellemzők. Mivel a szubdukció ebben az esetben előtt-utóbb leáll, egységes kontinens jön létre (a Dekkán ma már Ázsia része) és az alábukás máshol kezdődik meg.

A litoszféralemezek találkozásának harmadik típusa az egymás melletti elcsúszással jellemezhető. Ezeket **transzform** vagy *megőrző lemezhatároknak* nevezzük. Legismertebb szárazföldi példa erre az esetre a Szt. András-törésvonal környezete É-Amerika nyugati partjainál, Kaliforniában. A Szt. András-törésvonal nem más, mint egy transzform vető, amely a Csendes-óceáni és az Észak-Amerikai lemez határán jött létre. A Kaliforniai-hosszanti völgytől nyugatra fekvő területek ÉNy-ra, Alaszka irányában mozdulnak el, és néhány millió év alatt le fognak válni az észak-amerikai kontinensről. A tektonikus mozgásokat jól jelzik a néha pusztító erejű földrengések (San Francisco, 1906; Los Angeles, 1933, 1957). A transzform vetők gyakoriak az óceánközépi hegyláncok területén is, amelyeket harántirányban szelik át.

A litoszféralemezek mozgása a transzform vetők mentén az összes lemezmozgás közül a leggyorsabb lehet, de ez is csak kb. 10 cm/év nagyságrendet jelent. Mindenesetre a viszonylag gyors mozgás eredménye, hogy a földkéregben ismétlődő módon, és elég hamar halmozódnak fel azok a mechanikai feszültségek, amelyek földrengésekhez vezetnek. A földrengések sokszor a felszínen is észrevehető kéregelmozdulásokkal függenek össze.

A lemeztektonika törvényszerűségei a földtörténeti múltban is érvényesültek. Erre ma már számos bizonyíték van, így a földtörténeti óidő kezdetétől napjainkig rekonstruálni tudjuk a kontinensek mozgásait. Ennek alapján tudjuk, hogy a kőzetlemezek száma, mérete és határai sokszor változtak, kontinensek váltak külön és időnként egyesültek hatalmas „óriáskontinenssé”. Óceáni medencék keletkeztek és semmisültek meg, hegységek gyűrődtek fel és pusztultak le. Vagyis a Föld felszíni szilárd rétege állandó változásban volt és van. Ezek a változások az ember átlagos élettartamához képest többnyire lassúak, de egyes jelenségei váratlanok és igen gyorsan zajlanak le. Ilyenek a többször említett földrengések, amelyek az ember épített környezetét és az épületek összeomlásával az emberek életét is veszélyeztetik. Hasonló mondható el a vulkánkitörésekről, amelyek egyes típusai több kilométeres körzetben még nagyobb veszélyt jelenthetnek, mint a földrengések. (Közismert példa a Vezúv kitörése következtében teljesen elpusztult Pompei esete.) A litoszféra-lemezek mozgásának közvetett hatása lehet a tengeri szökőár (cunami), amely az alacsonyan fekvő tengerparti településeket akár a földdel is egyenlővé teheti. A közelmúltban (2005. decemberében) az Indonézia-szigetvilág déli részén, Szumátra közelében lejátszódott tenger alatti földrengés olyan méretű cunamit okozott, amely még Ceylon partjainál is pusztított, és összességében több, mint kétszáz ezer áldozatot követelt.

A földtani veszélyforrásokról a Környezetföldtan c. tananyagban bővebben olvashat.

Szólnunk kell azonban a lemeztektonikai folyamatok hosszú távú környezeti hatásáról is. A szárazföldre mérete, földrajzi helyzete, a hegységek csapásiránya egyaránt lényegesen befolyásolja az éghajlat alakulását. Ebből a szempontból a tengerek és óceánok medencéinek formálódása és az ezzel összefüggő víztömeg-áthelyeződés még fontosabb, hiszen a víz fajhője átlagosan ötszöröse a szárazföldének. A vulkánkitörések hatására a légkörbe kerülő hatalmas mennyiségű por és gáz ugyancsak befolyásolja az éghajlat alakulását. A földtörténeti múlt éghajlatváltozásaiban – számos egyéb ok mellett – ezek a lemeztektonikai folyamatok fontos szerepet játszottak. A klíma jelenlegi és jövőbeli alakulását ugyancsak lényegesen befolyásolhatják. Egyes elemzések pl. azt mutatták, hogy a DK-ázsiai Pinatubo vulkán kitörése után a globális hőmérséklet lehülése évekig mérhető volt.

2.7.2. A kőzetek csoportosítása, jelentőségük a társadalom számára

A litoszféralemezeket kőzetek alkotják. A *kőzetek* a kőzetlemezek nagy tömegű, szilárd alkotórészei, ásványokból állnak és összetételük viszonylag állandó. Valamely ásványtársulás

kőzetként való előfordulása arra utal, hogy az ásványok keletkezésének feltételei hasonlóak voltak, s maga a kőzet is hasonló geológiai folyamatok eredményeként képződött. A kőzeteket az ásványok alakja és illeszkedési módja (kőzetszövet) jellemzi.

A geológusok a kőzeteket három nagy csoportba sorolják:

1. magmás kőzetek,
2. üledékes kőzetek,
3. metamorf (átalakult) kőzetek.

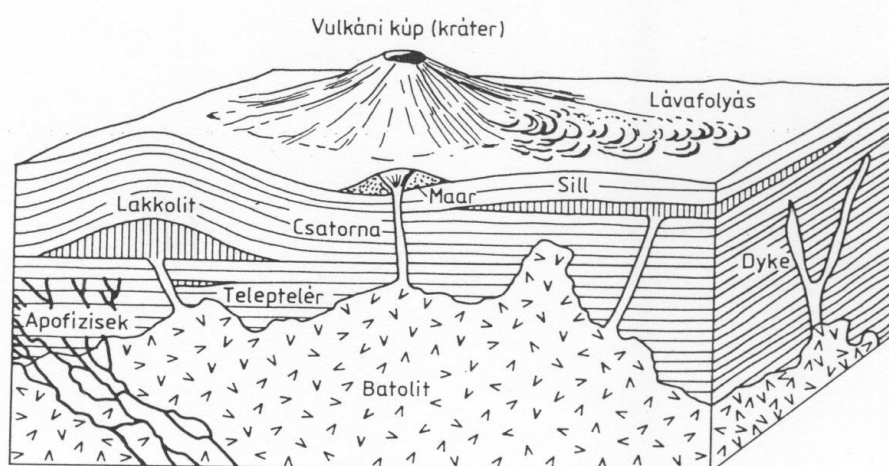
2.7.2.1. Magmás kőzetek

1. A magmás kőzetek a litoszféra olvadékanyagának, a magmának megszilárdult termékei. Ezek alkotják a kőzetlemezek 90–95%-át.

A képződés helye és körülményei alapján a magmás kőzeteket további két nagy csoportba sorolják.

A mélységi magmás kőzetek az asztenoszférából vagy a magmakamrából felfele nyomuló kőzetolvadékból akkor keletkeznek, ha az nem jut el a felszínig, hanem a földkéregben megreked. A megrekedt és megszilárdult kőzetek különböző formákat képeznek a felszín alatt. A kőzettömb alakja annak a térnek a formájától függ, amelyet a magma kitölt.

A *batolit* hatalmas terjedelmű (akár több ezer km² kiterjedésű) kőzettömeg, amelynek gyökere mélyre nyúlik (**101. ábra**).



101. ábra. A batolit, a lakkolit és más szubvulkanikus formák, valamint a felszíni vulkanizmus jellegzetes formái (Forrás: Borsy Z., 1993)

A *lakkolit* az előzőnél kisebb méretű, és úgy jön létre, hogy a felnyomuló magma az üledékes kőzet(ek) rétegei közé hatol és boltozatosan megemeli azokat, így a kerek alaprajzú kenyérre emlékeztető forma jön létre (**102. ábra**).

A *telér* a közethasadékokba préselődött és ott megszilárdult magma. Gyakran elágazó szerkezetű. Ha a telér valamely kőzet rétegei közt helyezkedik el, vízszintes vagy enyhén lejtő *teleptelér* jön létre (**103. ábra**).

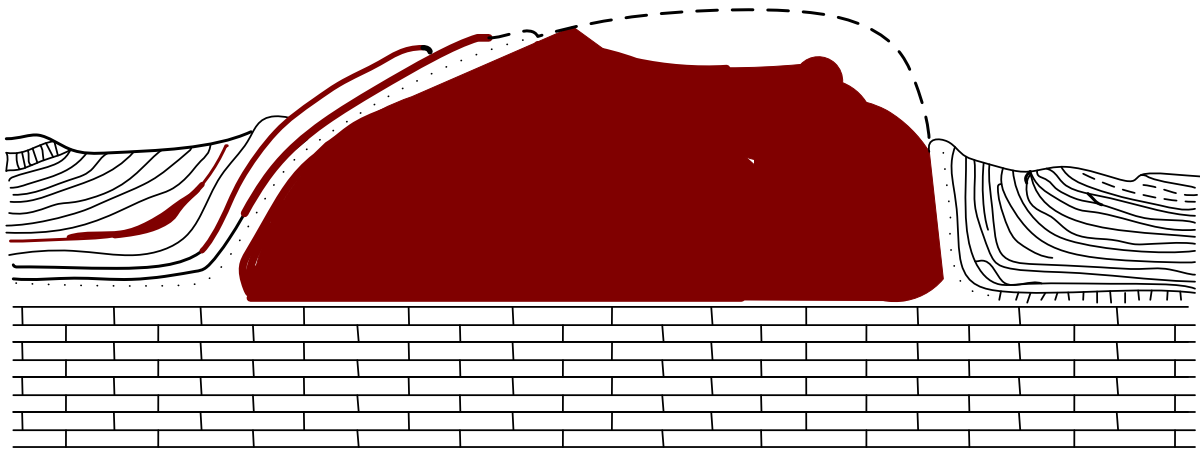
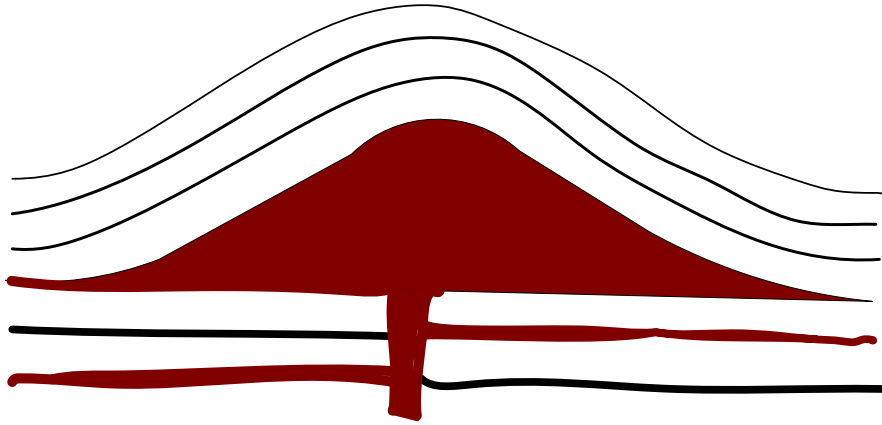
A röviden ismertetett kőzettömb-formákat az alábbi leggyakoribb mélységi magmás kőzetek alkotják: *gránit*, *gabbró*, *peridotit* és különböző telérkőzetek.

A mélységi magmás kőzetek csak azokon a helyeken kerülnek a felszínre vagy a felszínközelbe, ahol a külső lepusztító erők (víz, szél, jég, gravitáció, napsugárzás) hosszú idő alatt eltávolították az őket elfedő kőzeteket. Ilyen helyszínek a pajzsterületek és az idős hegységek. De az intenzív lepusztulás és tektonikus mozgások hatására fiatalabb gyúrt hegységekben is felszínre bukkanhatnak. Hazánkban a Velencei-hegységben található a felszínen gránitsziclákat.

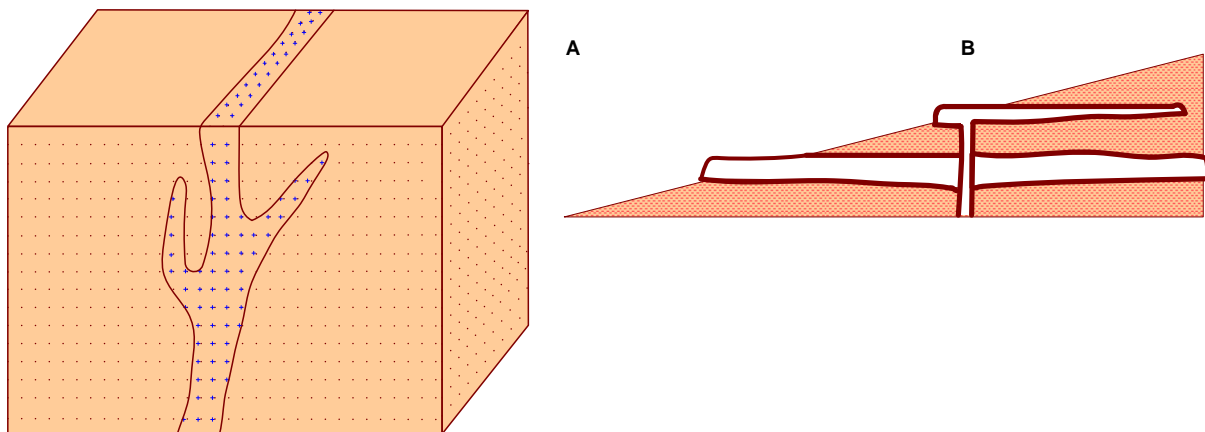
A mélységi magmás kőzetek közül a gránit a legismertebb és az építészeti gyakorlatban sokáig fontosnak számító kőzet. Számos kiemelkedően fontos történelmi épület oszlopait, emlékműveket, szobrok talapzatát készítették gránitból. Így pl. Szt. Péterváron az Izsákszékesegyház oszlopait és Nagy Péter lovasszobrának talapzatát stb. Különösen az aprószemű gránitok nagy szilárdságúak, ugyanakkor megmunkálhatóságuk ún. bányanedves állapotban viszonylag könnyű. Csiszolt és fényezett felülete elég jól ellenáll a légköri szennyeződések bontó hatásának. Természetes körülmények között mállása során sajátos formákat képez: a sarkoknál lekerekített kocka alakú tömbök, az ún. *gyapjúzsákok* a pados elválású gránit esetén jellegzetesek.

A magmás kőzetek másik csoportját **kiömlési vagy effuzív** (vulkáni) **kőzetek**nek nevezzük. Használatos még a vulkanitok kifejezés is. Ezek a vulkáni tevékenységek során a felszínre jutó magma anyagából keletkeznek. Egyik csoportjuk a higan vagy sűrűn folyó láva (felszínre kerülő magma) megszilárdulásával jön létre, másik csoportjuk pedig a robbanásszerűen felszínre kidobott lávadarabok, vulkáni por és hamu leülepedésével képződik. Az előzők kemény, tömör (kompakt) kőzetek, az utóbbiak laza, porózus szerkezetűek, összefoglaló nevük: *tufák* (tofus = likacsos kő, latinul).

Elméletileg mindegyik mélységi kőzetnek van effuzív párja, és legtöbb kompakt kiömlési kőzetnek van tufa megfelelője is.



102. ábra. Lakkolit (fent) és egy felszínre került lakkolit (lent) (Forrás: Borsy Z., 1993.)



103. ábra. Egy telér tömbszelvénye (A) és két teleptelér (B). Ez utóbbiak (fehérrel jelölve) homokkő és agyagpala közé nyomultak be a rétegek mentén. A teleptelérek függőleges telérből táplálkoznak. (Forrás: Vendl A., 1957)

Így pl. a mélységi gránit kiömlési megfelelője a *riolit*, ennek pedig a *riolittufa* a levegőből lehulló vulkáni anyagokból képződő párja. E kőzetek közötti „rokonságot” az ásványos, ill. kémiai összetétel teremti meg. Mivel a tufák a robbanásos vulkanizmus termékei, egyrészt a robbanás során, másrészt a por, hamu lerakódása és kőzetté válása során más anyagok, üledékes kőzetek (agyag, iszap, homok) kerülhetnek az eredeti láva anyagba, így anyagi összetételük attól többé-kevésbé eltér. Lényegében azonban ugyanazokból az elegyrészekből állnak, mint az ugyanabból a lávából képződött kompakt vulkanit.

A már említett riolit a Kárpátok belső vulkáni övezetében, azaz hazai vulkáni hegységeinkben is nagy mennyiségben keletkezett a miocén időszak során. A Tokaji-hegységben több helyen az ugyanakkor keletkezett *riolittufa* a meghatározó kőzet. Bodrogkeresztúr mellett jelentős mennyiségben bányásszák, építkezéseknél hasznosítják.

A *trachit* kevésbé gyakori vulkanikus kőzet. (Mélységi megfelelője a szienit.) Hazánkban Telkibánya közelében a geológusok olyan trachitot találtak, amely jelentős mennyiségű káliumot tartalmaz, vegyipari hasznosításra is alkalmas.

Igen nagy tömegben képződött vulkáni kőzetünk az *andezit*, amely minden vulkanikus hegységünkben megtalálható, és gyakori a tufája is, az *andezittufa*. (Mélységi megfelelőjük a diorit.) Az andezitnek több változata jött létre a harmadidőszaki vulkanizmus során. Nagy mennyiségben bányásszák és változatos építkezési célokra használják. Fő hasznosítási területei: útépitéseknél alapozásra, (régebben kockakövek alakjában úttestépítésre is) folyószabályozásoknál gátépítésre, mederszűkítésre, vasúti pályatestek építésére. Régebben kerítések, sőt házak építésére is használták.

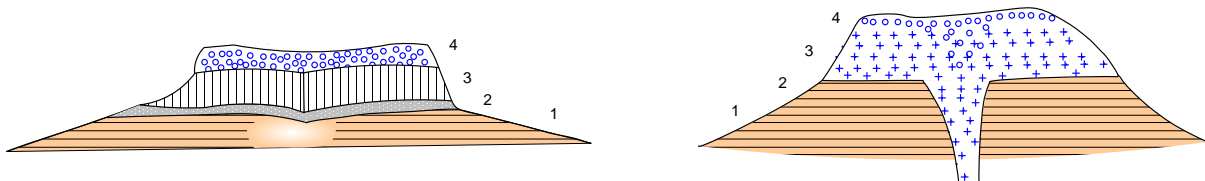
Érdekességként megemlítjük, hogy andezitekhez hasonló *porfiritok* a földtörténeti középidő vulkáni tevékenységeinek eredményeként jöttek létre. Az ember a történelmi ókortól kezdve hasznosította a porfiritokat, mert szép színekben fordul elő és tartós. A római császárság idején vázák, edények, szarkofágok, szobrok készültek belőlük. A középkorban is számos dísz tárgy alapanyaga volt egy-egy porfirít-változat. Egyes változataikat templomok, jelentősebb épületek díszítésére ma is használják. A porfiritokat csak hazánk határain túl bányásszák.

A *bazalt* az andezithez hasonlóan ismert és nagy mennyiségben képződött kiömlési kőzet. *VENDL* (1957) szerint a név etiópiai eredetű, és vastartalmú fekete követ jelent. A bazaltnak is számos változata van, s a tipikusak valóban sötét színűek. A főbb kőzetalkotó ásványaik a plagioklász, az angit, az olivin, a magnetit, de több változatukban egyéb ásványok is fontosak (ilmenit, amfibol, apatit). A magnetit jelenléte azzal is bizonyítható, hogy a nagyobb tömegű bazalt hatással van a mágnesűre, azt eltéríti.

Hazánkban a bazaltok kialakulása fiatal (pliocén) vulkanizmushoz kötődik. Legismertebbek a balatonfelvidéki és nógrádi előfordulásai. Somoskő bazaltoszlopai világhírűek, és szépen mutatják a bazaltok képződése során kialakult sokszög-keresztmetszetű oszlopos formákat. Más képződési körülmények között a bazalt pados elválású lehet, de a kettő kombinációja is előfordul: a karcsú oszlopok harántirányban osztottak.

A bazaltok többsége lassan mállik, évszázadokon át éles, szögletes darabjai maradnak meg a természetben. A jelentős kopásállóságuk ugyancsak alkalmassá teszi az út- és vasútépítésekhez. Régebben a bazaltkockákat (az andezithez hasonlóan) útburkolásra is sikeresen használták, de híd-, víz- és magasépítési célokra is beváltak. A hólyagos bazalt az ókor óta becsült építőkö, sőt malomkőnek is alkalmas volt. Budapest néhány fontosabb útját még ma is bazaltkövek burkolják, melyeket a zalai és nógrádi bazaltbányákban termeltek.

A bazaltok számos, természetvédelmi szempontból is különleges értéket képviselő geomorfológiai formát alkotnak. Közismertek a Balatonfelvidéki Nemzeti Park bazaltsapkás tanuhegyei a Tapolcai-medencében (**104. ábra**). Természetvédelmi oltalom alá került a már említett somoskői vékonyoszlopos bazalt és számos bazaltbányát is felhagytak – részben a természeti értékek megőrzése miatt, amit segített az új útburkoló anyagok előtérbe kerülése, s ezzel a bazaltbányászat iránti igény csökkenése is.



104. ábra. Bazaltsapkás tanuhegyek: a Badacsony (balra), a Szent György hegy (jobbra); 1 = pannóniai homokos agyag, 2 = bazalttufa, 3 = bazalt, 4 = salakos bazalt (VENDL, 1957)

2.7.2.2. Üledékes kőzetek

A másik nagy kőzetcsoportot az üledékes kőzetek vagy szedimentek alkotják. Vízből vagy levegőből leülepedő kőzet- és ásványrészecskék felhalmozódásából keletkeznek, a leülepedés helyén nyomás és egyéb hatásokra kőzetté alakulnak. Ez utóbbi folyamat a *diagenezis*, melynek során laza vagy tömör üledékes kőzetek jöhetnek létre.

Az üledékes kőzetek diagenezisét megelőzi más kőzetek fizikai és kémiai mállása, majd a felaprózott, átalakult kőzetrészecskék szállítása. Ezekkel a folyamatokkal a **2.7.3** foglalkozunk.

Az üledékes kőzeteket különböző szempontok szerint lehet csoportosítani. Mi a keletkezésük körülményeit helyezzük előtérbe. Keletkezésük szerint három nagy csoportot különböztetünk meg:

törmelékes üledékes kőzetek (létrejöttükben a fizikai folyamatok dominálnak),

vegyi, kémiai üledékes kőzetek (a természetben lejátszódó vegyi folyamatok eredményeként keletkeznek),

szerves üledékes kőzetek (élőlények elhalásával, testük anyagából vagy anyagcsere-termékeik felhalmozódásával jönnek létre).

Az üledékes kőzetek rendkívül változatosak, sokféleségüket az is tükrözi, hogy önálló tudományág, a *szedimentológia* foglalkozik velük. Mi a hazánkban leggyakoribb üledékes kőzetekről adunk rövid áttekintést. Mind az Alföldünket, mind pedig a Kisalföldet folyóvizek töltötték fel hordalékaikkal. A lerakódott rétegek egymásra telepedve törmelékes üledékes kőzetekké alakultak. Mivel dombságaink túlnyomó része is üledékes kőzetekből épül fel, elmondhatjuk, hogy ez a kőzetcsoport található a legnagyobb kiterjedésben hazánkban.

a) Törmelékes üledékes kőzetek közül a **homok** (pszammit) nagy területeken fordul elő. Homoknak nevezzük azt az apró ásvány- és/vagy kőzetszemekből álló laza kőzetet, melynek szemcséi túlnyomórészt 2 és 0,02 mm közötti méretűek. A természetben e mérettartományon kívül néhány százalék kisebb méretű szemcse is előfordul a homokban. Hazánk fő homokterületei a következők: Nyírség, Duna-Tisza-köze, Belső-Somogy. Emellett számos kisebb területen meghatározó a homok alapkőzet: többnyire a folyók teraszain és hordalékkúpjain (Győr-Tatai teraszvidék, Bodroghöz, Hevesi homokhát stb.)

A homok talajképző kőzetnek silány, azaz rajta csekély termékenységű talajok képződnek, mert a homokszemcsék növényi tápanyagokban általában szegények. Ennek az a magyarázata, hogy a hazai homokos üledékekben a nehezen málló kvarc a meghatározó (70% fölött), de a második leggyakoribb ásvány, a kalcit (a dunai homokban 10% fölött) sem szolgáltat megfelelő alapanyagot a talajképződéshez. A homok rossz víztartó képességű kőzet, így a homokrégeken gyorsan átszivárog a csapadékvíz, és a homok rövid idő alatt kiszárad. A száraz homokot – ha a vízen kívül nincs a szemcséket összetartó más hatóanyag – könnyen mozgásba hozza a szél. A homokos szövetű talaj így áldozatul eshet a deflációnak. (Ha azonban rajta összefüggő növénytakaró telepedett meg, az védelmet nyújt a defláció ellen.)

A homok a diagenézis során nagyobb nyomás és hatóanyagok hatására *homokkővé* állhat össze. A homokkő sajátos lepusztulási formái földtani-geomorfológiai értéknek minősülnek (pl. a Káli-medencében a Balatonfelvidéki Nemzeti Park területén.)

A homok építőipari felhasználása kiemelkedően fontos: mészhabarcs, ill. vakolat készítéséhez óriási mennyiségben használják. Erre a célra olyan homok alkalmas, amelyben nincs iszap és agyag. Ilyen homokot alföldi területeinken igen sok helyen lehet bányászni.

Sokkal szigorúbb követelményt támaszt a homokkal szemben az üvegyártás, amely csak nagyon tiszta kvarchomokot használ. Ez a homok 99% kvarcot kell, hogy tartalmazzon, és nem szabad, hogy színező fémoxid legyen benne. A színes üveg gyártása esetén a homokban lehet kevés vasoxid, de az nem haladhatja meg a 0,5%-ot.

A homokot felhasználják még az öntődékekben (formázó homok), a festékiparban és a tisztítószerek gyártásánál is.

A másik igen gyakori törmelékes üledékes kőzet az **agyag**. Szigorúan véve az agyag olyan laza üledékes kőzet, amely 0,002 mm-nél kisebb átmérőjű szemcsékből áll. A természetben azonban tiszta agyag sosem fordul elő, mindig vannak benne iszap méretű szemcsék is (0,02–0,002 mm). Az agyag nemzetközi neve *pelit* (pelosz = iszap, agyag). Az agyag kolloidális tulajdonságokat mutat: nagy az adszorpciós képessége, felületén töltésekkel bír, amelyek között dominálnak a negatív töltések, így kationokat képes megkötni. A kolloid oldatban az agyagos részecskék savak vagy fémionok hatására koagulálódnak. Ez a jelenség fontos az erősen agyagos talajok javítása szempontjából. A tiszta agyag ugyanis csaknem vízzáró, így az agyagos talaj nehezen fogadja be a vizet, ha viszont befogadta, túl erősen köti meg, így a növények vízellátása hiányt szenved. A koagulált agyagrészecskék között nagyobb méretű pórusok képződnek, így javulnak a talaj vízgazdálkodási tulajdonságai.

Az agyag ásványi összetétele nagyon változatos lehet, ezzel terjedelmi okokból nem foglalkozhatunk. Itt csak azt említjük meg, hogy a táguló rácsú ásványokban (montmorillonit típusú ásványok) gazdag agyag sok vizet képes felvenni, és az agyag megduzzad. Száradáskor ennek ellenkezője történik: a száraz agyag megrepedezik. Minél nagyobb az agyag montmorillonit-tartalma, annál nagyobb méretű repedések képződnek a száraz agyagban. A váltakozó csapadékos és száraz időszakok eredményeként az agyagban a tágulás-zsugorodás ún. csúszási tükröket hoz létre.

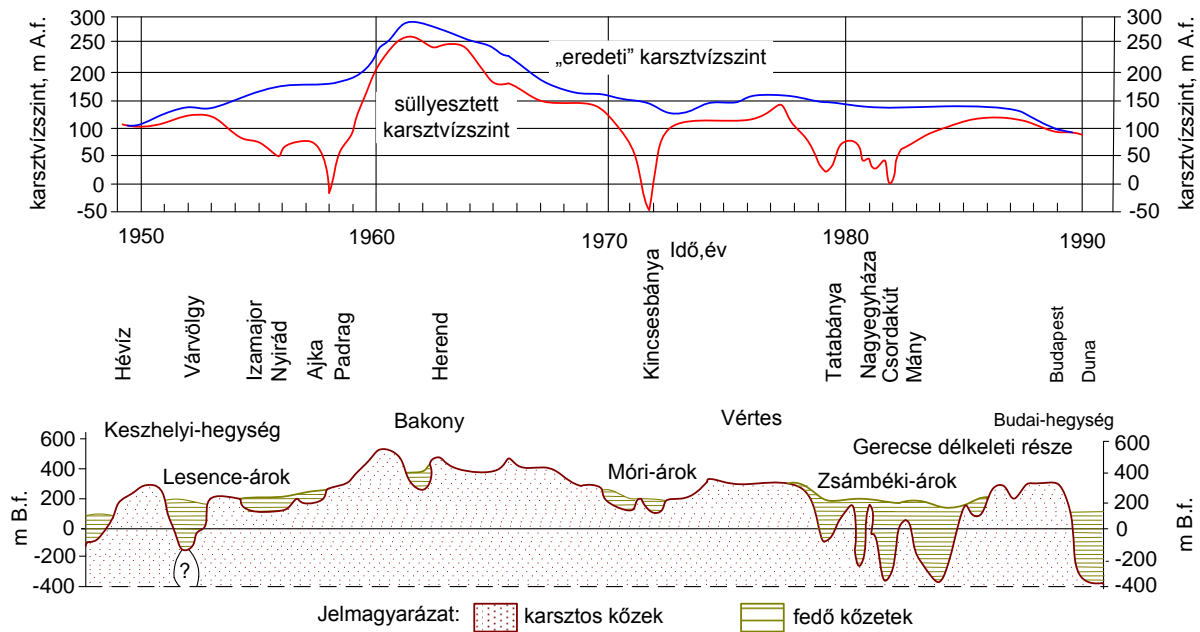
A nedves agyag képlékeny, gyúrható, formálható. Nyomóerő hatására összenyomódik, azaz térfogata csökken. Ezek a fizikai tulajdonságok nagyon fontosak pl. az építkezési gyakorlatban. Az agyagos alapkőzeten a nagy tömegű épületek megsüllyedésével kell számolni, sőt, ha a kiszáradás-átnedvesedés ismétlődő jelenség (pl. a csapadékviszonyok miatt), az épület szerkezeteiben tartós feszültségek léphetnek fel. Ezeket persze az épület speciális alapozásával csökkenteni lehet. Az agyagos kőzeten az épület süllyedése évtizedekig tarthat.

Még veszélyesebb folyamat játszódik le a lejtőn elhelyezkedő agyagos rétegekben: azok átnedvesedésekor a lejtő irányában megcsúszhatnak. Az ilyen lejtőkre lehetőleg nem kell épületeket tervezni és építeni, mert azok egy-egy nedvesebb időszakban a csúszás hatására akár össze is omolhatnak, vagy legalábbis súlyos károkat szenvedhetnek. (A falak megrepednek, az épület életveszélyessé válhat.)

Az agyag azonban az őskortól kezdve többféle emberi felhasználásra is alkalmasnak bizonyult. Formálhatósága miatt a kezdetekben kis agyagfigurákat (emberek és állatok ábrázolása az óneolitikumban), majd edényeket készítettek. Ez utóbbiak akkor terjedtek el, amikor elődeink rájöttek, hogy az agyag hevítésre véglegesen megszilárdul, azaz hevítés után újabb nedvesség hatására már nem duzzad. Hétezer évvel ezelőtt már kialakult a fazekas mesterség, vagyis az agyagból készült tárgyakat iparszerűen állították elő. A használati tárgyak sora egyre bővült.

Az agyagból készült téglák, tetőfedő cserepek ma is a legfontosabb építőanyagok közé tartoznak. Ezek készítésére minden olyan agyag felhasználható, amely égetéskor 1000°C hőmérsékletet kibír. Speciális, úgynevezett tűzálló téglá azonban csak olyan agyagból készíthető, amelyik 1700–1800°C-on sem deformálódik. Az agyag tűzállósága anyagi minőségétől függ. Általában elmondható, hogy minél több alumíniumot tartalmaz, annál tűzállóbb. Az agyagban előforduló nagyobb mennyiségű CaCO_3 (különösen, ha az nagyobb szemcsékben van jelen) rontja a tűzállóságot és egyáltalán a téglaként vagy cserépként történő felhasználhatóságot. Ugyancsak káros ilyen szempontból a gipsz, a pirit vagy a markazit jelenléte az agyagban, mivel kén- és vastartalmuk káros kémiai folyamatokat indít el a téglában. A törmelékes üledékes kőzetek csoportjába tartozik a fémipar szempontjából alapvetően fontos **bauxit** is. Nevét Les Baux-de-Provence településről (Dél-Franciaország) kapta, ahol 1821-ben fedezték fel. Ez tulajdonképpen kolloid méretű szemcsékből álló maradéküledék, amely különböző kőzetek mállása során keletkezett meleg, trópusi éghajlati körülmények között. A bauxit az alumínium legfontosabb érce, zömében alumínium-oxid és -hidroxid ásványokból áll. A keletkezés kiinduló kőzetétől, ill. a fekvő kőzetanyagától függően megkülönböztetünk *karsztbauxitot* (mészkö, ritkán dolomit alapon) és *laterites bauxitot* (többnyire bazalt és gabbró alapon). A hazai bauxitlepek karsztos felszínen jöttek létre főleg triász, ritkábban jura korú mészkövön. Jelentősebb bányák a Dunántúli-középhegységben: Gánt, Iszkaszentgyörgy, Iharkút, Halimba, Alsópere, Fenyőfő, Kincsesbánya. A bányászat során a legnagyobb környezeti problémát az okozta, hogy a kitermelhető bauxitlepek sok helyen a karsztvízszint alatt fordultak elő. Ezek bányászata csak úgy volt lehetséges, hogy nagy teljesítményű szivattyúkkal kiszivattyúzták a vizet a bányákból. Ez a tevékenység – a szénbányászat hasonló

hatásaival együtt – jelentős mértékben csökkentette a bányák környezetében a karsztvíz szintjét (105. ábra). A bányászat intenzitásának csökkenése enyhítette azt a nemkívánatos hatást, vagyis az utóbbi másfél évtizedben lényegesen emelkedett a karsztvízszint.



105. ábra. A karsztvízszint változása a bányászat hatására a Dunántúli-középhegységben 1950-től 1990-ig (Szilágyi G. – VITUKI, 1994 nyomán)

A **löss** az ún. összeálló törmelékes üledékes kőzetek közé tartozik. Fakósárga, rétegtelen és porózus kőzet, amelynek szemcséi között dominál a 0,01–0,05 mm-es frakció. Ennek aránya rendszerint lényegesen meghaladja az 50%-ot. A szemcséket kalcitos „cementálás” tartja össze, így a lösz meredek (akár függőleges) falban is képes megállni, ugyanakkor mechanikai hatásokkal szembeni ellenállóképessége csekély. (A szekérekerek lazító hatására felgyorsul a lösz eróziója, és évszázadok során akár több 10 méter mély löszmélyút képződik.)

A lösz főként a pleisztocén száraz időszakában képződött az akkori periglaciális (jégperemi) területeken, így hazánk területén is. A szél által szállított nagy mennyiségű por felhalmozódása a gyér tundra növényzet évenkénti elhalásával szerves anyagokat is magában foglalt. A lágyszárú növények maradványainak ásványosodásával a száraz, gyökerek helyén vékony járatok maradtak, amelyek a lösz sajátos porózus szerkezetét adják. A lösz ásványos összetétele változatos: legnagyobb mennyiségben a kvarc (40–50%) és a CaCO_3 (5–15%) fordul elő benne, de a szíves ásványok sem hiányoznak belőle. Ezek a tulajdonságok a talajképződés számára kedvezők: a legjobb minőségű mezőségi talajaink (csernozjomok) löszhátakon képződtek.

A lösz, CaCO_3 -tartalma miatt alkalmas savanyú és szikes talajok javítására (sárgaföld-terítés). Ezenkívül hasznos a túl kötött (erősen agyagos) talajok vízgazdálkodási tulajdonságainak javítására is. A löszből téglát is lehet égetni és vályogvetésre is használható.

Hazánk legnagyobb löszterületei a Dunántúl keleti és délkeleti részein vannak (Mezőföld, Somogyi-dombság, Tolnai- és Baranyai-dombság, Zselic), a Dunától keletre a Bácskában, a Nagykunságban és a Hajdúságban találunk jelentős löszterületeket, de számos más előfordulása is ismert.

b) A kémiai (vegyi) üledékes kőzetek

A vegyi üledékes kőzetek anyaga oldatból válik ki. Az oldatban ezek az anyagok ionjaikra disszociáltak vannak jelen, s valamilyen külső hatásra (pl. hőmérséklet-változás, pH-változás stb.) válnak ki az ionok az oldatból, s képeznek szilárd kőzetet.

Tulajdonképpen *nincs éles határ a törmelékes üledékes és a vegyi üledékes kőzetek között*, mivel egyes törmelékes üledékes kőzetek képződésében is szerepet játszanak az oldatból kiváló anyagok, mint pl. a lösz esetében a CaCO_3 .

A legnagyobb mennyiségben előforduló vegyi üledékes kőzetek a karbonátkőzetek: a mészkő és a dolomit.

A **mészkő** meghatározó ásványa a kalcit (CaCO_3), de mellette számos más „szennyeződést” is tartalmaz, csekély mennyiségben. Ilyenek lehetnek: agyag, magnézium, mangán, grafit stb.

A vizes oldatból a CaCO_3 úgy válik ki, hogy a szénsavtartalmú oldat szén-dioxidot veszít, és az oldatban lévő kalcium-hidrogénkarbonát elbomlik kalciumkarbonátra és vízre, miközben a szén-dioxid a légkörbe távozik:



A mészkövek nagyobb része tengerben képződött, és csak kisebb arányban keletkezett édesvizekben (édesvízi mészkő = travertino). A tengerben képződött mészkövek kiválásában *sok esetben az élőlények is szerepet játszottak* (pl. a zöld növények közvetve, a víz széndioxidjának felvételével, a korallak, mészszivacsok, puhatestűek stb. közvetlenül, a sejtjeikben vagy a sejtfalukban kiválasztva), így nem ritka az az eset, amikor nehéz eldönteni, hogy vegyi üledékes, vagy szerves üledékes mészkőről van-e szó.

A mészkő abból a szempontból is különleges kőzet, hogy kristályos formában is előfordul: ez a *márvány*, amelyet szabadszemmel is látható kalcitkristályok alkotnak. A márvány azonban *metamorf kőzet*, amely mélyebb kőzetrétegekben az üledékes mészkőből képződik.

A mészkövet nagy mennyiségben bányásszák és az építőiparban sokféle célra hasznosítják. A mészkő hevítésével állítják elő az égetett meszet (CaO), amelyet vízzel keverve oltott meszet kapnak, s ehhez homokot keverve habarcsot készítenek. A habarcsot felhordják a nyers téglafalra, ahol megszilárdulva vakolatot képez.

A tömör mészkövet kerítések építésére, sőt házak falazó anyagaként is használják – rendszerint a bányák közelében. Dekorációs és szobrászati célokra is alkalmas. (Nálunk a tömött mészkövek egy részét márványnak nevezik.)

Az üveggyártásnál és a kohászatban is használnak mészkövet. Csiszolóanyagként, szennyvíz derítésére, írókréta gyártására (ehhez foraminiferás mészkő szükséges) ugyancsak hasznosítják. A kiváló minőségű valódi márványokat az ókor óta szobrok nyersanyagaként és különleges épületek (templomok, paloták stb.) építő- és díszítőanyagaként használják.

A **márga** ugyancsak nagy CaCO_3 -tartalmú vegyi üledékes kőzet, amely azonban jelentős mennyiségű (tipikusan 25–60%) agyagot tartalmaz. (Az agyag azonban törmelékes eredetű, így ebben az esetben is átmeneti a kőzet besorolása.) A kalcit és az agyag egyenletesen elkeveredve, finom szemcsésen van jelen a kőzetben, csak kémiai módszerrel választható el egymástól: ha sósavval kioldjuk a kalcitot, visszamarad az agyag. A kalciumkarbonát- és az agyagtartalom szerint a mészkő és a márga között, valamint a márga és az agyag között átmeneti kőzetfajták léteznek (28. táblázat). A táblázatban azt is látjuk, hogy a márgát legnagyobb arányban a cementgyártás alapanyagaként hasznosítják. A nagy mennyiségű CaCO_3 -ot tartalmazó márga kompakt, ezért építőköként is alkalmazható főleg olyan célra, ahol nincs túl nagy terhelésnek kitéve (kerítések, kerti utak burkolása, teraszrézsük kialakítása stb.)

28. táblázat. Kalciumkarbonát- és agyagtartalmú kőzetek és hasznosításuk Vendl (1957) nyomán

Kőzet neve	CaCO_3	Agyag	Felhasználás
Mészkő	98–100%	0–2%	mészégetés
Márgás mészkő	90–98	2–10	
Mészmárga	75–90	10–25	
Márga	40–75	25–60	cementgyártás
Agyagmárga	10–40	60–90	
Márgás agyag	2–10	90–98	téglagyártás
Agyag	0–2	98–100	

A **dolomit** kőzet meghatározó ásványa a dolomit, vagyis a kalcium-magnézium-karbonát ($\text{CaMg} [\text{CO}_3]_2$), de mellette kalcium-karbonátot és más anyagokat (agyag, homok, bitumen stb.) is tartalmaz kisebb mennyiségben. A dolomit magnéziumtartalmú tengervízből képződik, vagy közvetlen kicsapódások, vagy kalcium-karbonát átalakulásából a magnéziumtartalmú tengervíz hatására. (VENDL A.: Geológia; 1957; Tankönyvkiadó; Budapest; 623 : 331.) A mészkőhöz hasonlóan a dolomit képződésében is szerepet játszhatnak az élőlények. A tengeri mészalgák és a korallok váza 10–20% magnézium-karbonátot is tartalmazhat a kalcium-karbonát mellett, s ilyen esetekben az élőlények maradványaiból is képződhet dolomit, vagyis részben szerves üledékes kőzetnek tekinthető.

A legtöbb dolomit mészkőből képződött oly módon, hogy a tengervízben oldott állapotban lévő magnézium-ionok a kalcium egy részével helyet cseréltek a mészkőben. (Ezt a folyamatot a szaknyelv *metaszomatózisnak* nevezi.)

Hazánkban a Dunántúli-középhegységben nagy mennyiségben fordulnak elő a triász időszakból származó dolomitok: Vértes, Pilis, Gerecse, Budai-hegység. A Dunától keletre a Bükkben találunk nagyobb mennyiségű dolomitot.

A tömött dolomitot építőkönek is használják, de nagyobb jelentőségű az útépítésben (alapozás, felhintés). Kohók és kemencék bélésének előállítására ugyancsak alkalmas, mert tűzálló anyagot lehet készíteni belőle. Az üvegyártásban és a fémkohászatban az olvadáspontot csökkentő adalékanyagként hasznosítják.

c) Szerves üledékes kőzetek

Amennyiben nem számítjuk a már említett szerves eredetű mészköveket és dolomitokat, ez a kőzetcsoport földtani szempontból jelentéktelen szerepű, *gazdasági hasznosítás szempontjából azonban rendkívül fontos*. Az emberiség energiaellátása évszázadok óta erre a kőzetcsoporthoz alapozott.

A **kőszén** alapvetően elhalt növényi részekből keletkezett, de kisebb-nagyobb arányban szervesetlen alkotórészek is keveredtek a szerves anyagokhoz. Az elhalt növények átalakulása a talajban humuszképződéshez vezet, lápokban, mocsarakban, levegőtől elzárva *tőzeg* keletkezik. A földtörténeti óidőktől kezdve (a szárazföldi élet kialakulása óta) a földfelszín mélyedéseiben a lápok, mocsarak tőzegjét sok helyen szervesetlen üledékek fedték be, így az a levegőtől elzárva és a ránehezedő rétegnyomás hatása alatt a tőzeg szénteleppé alakult. A kőszénfélék egyrészt tartalmazzák a szerves vegyületek alkotóelemeit, vagyis szenet, hidrogént, oxigént, nitrogént

és ként. Emellett számos szervesetlen vegyület is előfordul benne. Ezek a szén elégetése után a hamuban maradnak. A jó minőségű kőszén széntartalma 80% fölötti.

A kőszén minőségét alapvetően a széntartalom határozza meg, ez az egyéb tulajdonságait is befolyásolja.

A széntartalom növekedésével az alábbi kőszénfajtákat különböztetjük meg: tőzeg, fiatalabb barna kőszén (lignit), idősebb barna kőszén, fekete kőszén, antracit, sungit, grafit (**29. táblázat**).

A táblázat adatai víz- és hamumentes kőszénekre vonatkoznak. Tudnunk kell azonban, hogy a természetes állapotú tőzeg 80–90% vizet tartalmaz, a barna kőszénekben 20–60%, a fekete kőszénekben és az antracitban már csak 2–4% víz van.

A kőszén elégetésével nagy mennyiségű CO₂ kerül a légkörbe, s ez a szén ciklust befolyásolja. (Erről A biogeokémiai ciklusok c. fejezetben olvashattunk.) A szén-dioxid növekvő légköri koncentrációja károkat nem okoz a földi környezetben, így a szennyező anyagok sorában másként kezeljük, mint az élővilágra mérgezően ható gázokat: pl. a kén-dioxidot.

Környezetvédelmi szempontból fontos a kőszén kéntartalma. A szén elégetésekor ugyanis a kén is egyesül az oxigénnel, és kén-dioxid kerül a légkörbe. A kén-dioxid mind a mai napig a legnagyobb mennyiségben keletkező, erősen mérgező hatású környezetszennyező gáz, s a kőszén elégetésén kívül az ugyancsak szerves eredetű kőolaj elégetéséből származik. A kőszén kéntartalma 0,5–3,0% között változik (**29. táblázat**). Ma már a hőerőművekbe hatékony kéntelenítő berendezést lehet szerelni, amely kémiai úton (CaCO₃-tal reagáltatva) megköti a kén-dioxidot, és a folyamat eredményeként hasznos anyag, gipsz keletkezik.

A kőszénkészletek a fosszilis energiahordozók közül a legnagyobbak: becslések szerint legalább két évszázadra elegendők. E hatalmas mennyiség felhasználásának árnyoldala – az említett kén-dioxid-kibocsátáson túl – a légkör szén-dioxid-tartalmának további növelése, ami az éghajlatváltozás felgyorsulását eredményezheti (Az éghajlatváltozás témaköréről a *Földünk állapota* c. tantárgy anyagában olvashat bővebben.)

A kőszén elsődleges hasznosítása az energianyerés, de más célra is használható. Külön tudományág és iparág jött létre a kőszénnel kapcsolatos vegyészeti alkalmazásokra: ez a kőszénvegyészet, ill. a kőszénvegyipar.

29. táblázat.**a) A kőszénfélék fontosabb vegyi alkatrészei (víz- és hamumentes anyagra vonatkoztatva, %)***Vendl (1957) nyomán*

	C	H	O	N
Tőzeg	60	6	32	2
Fiatalabb barnakőszén	69	6	24	1
Idősebb barnakőszén	75	5	19	1
Feketekőszén	84	5	10	1
Antracit	92	3	4	1
Sungit	99	0,5	–	0,5
Grafit	100	–	–	–

b). Fontosabb kőszénfajták vegyi összetétele Vendl (1957) szerint

	C	H	O	N	H ₂ O	Hamu	S	Fűtőérték
Lignit	31,36	2,63	12,29	0,81	43,73	9,17	1,42	2668
Barnakőszén	52,75	4,05	13,99	0,84	21,00	7,37	0,56	4942
Feketekőszén	76,39	4,82	7,08	1,68	2,56	7,47	0,64	7376
Antracit	80,42	2,47	2,81	1,15	2,61	10,54	2,71	7148

c.) Ugyanezen kőszének összetétele hamu-, kén- és víztartalom nélkül Vendl (1957) szerint

	C	H	O	N	Kocsz %
Lignit	66,60	5,59	26,00	1,72	26,5
Barnakőszén	73,84	5,66	19,53	1,16	41,2
Feketekőszén	84,91	5,36	7,87	1,86	65,3
Antracit	92,60	2,84	3,24	1,32	88

A **kőolaj** folyékony kőzet. Túlnyomórészen folyékony szénhidrogénekből áll, de oldott állapotban lévő, egyébként szilárd szénhidrogéneket, sőt oldott formában gázokat is tartalmaz. A keletkezési hely geológiai adottságaitól függően több-kevesebb kén-tartalmú vegyület is előfordul benne.

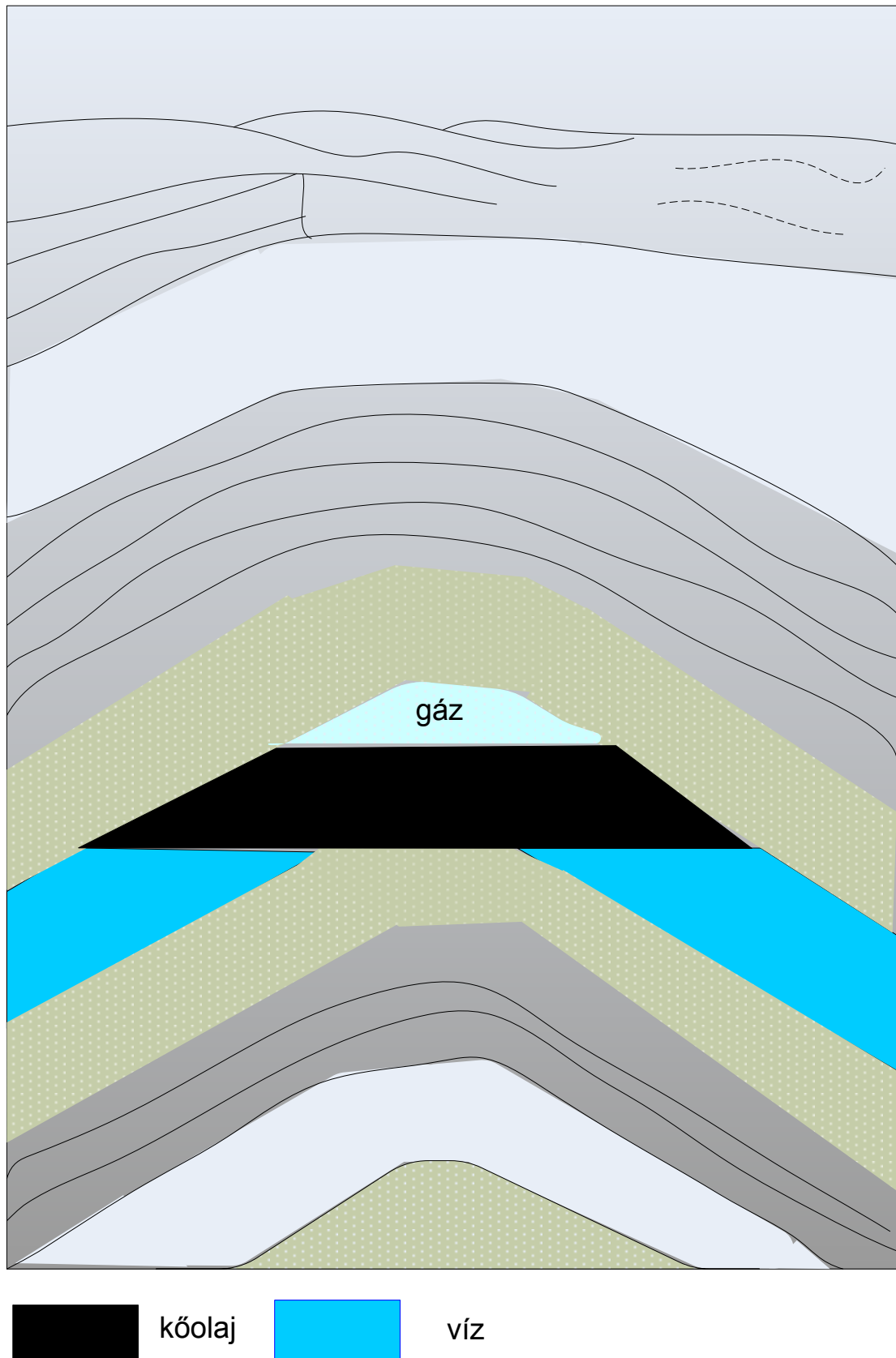
A kőolaj elhalt planktonok szervezetéből keletkezett. A növényi és állati planktonok maradványai finomszemcsés szerves üledékekkel keveredve a tengerfenék üledékeit gyarapították. A szerves anyagok az egyre vastagodó üledék növekvő nyomása és emelkedő hőmérséklete, valamint anaerob baktériumok lebontó tevékenysége következtében szénhidrogénekre és más, a kiinduló anyagokhoz képest egyszerűbb vegyületekre bomlottak. A rétegek nyomása következtében a keletkező gáz és az olaj kiperéselődött az anyakőzetből, és vándorolni kezdett a porózus kőzetekben, mígnem csapdába esett. Egy kőolajcsapda jellegzetes rétegződését mutatja a **106. ábra**. A kőolaj tehát tengeri eredetű üledékes kőzetekben fordulhat elő, és ez független a rétegek földtani korától – bár képződéséhez valószínűleg millió évekre van szükség. A harmadidőszaki kőolaj (legalább 10 millió éves) fiatalnak számít, de találtak már kőolajat kambriumi rétegekben is (500 millió évnél idősebbek). A legfontosabb olajtartó kőzetek: az olajtartó homokok, homokkővek és mészkővek.

A kőolaj a 20. század során a motorizáció fejlődésével meghatározó energiahordozóvá vált. A vele legtöbbször együtt előforduló **földgázzal** a világ energiafogyasztásának több, mint 60%-át teszi ki. Az olajtermékek a robbanómotorokban való alkalmazásukon túl a légiközlekedés kizárólagos hajtóanyagát adják, a kőolajleparlás maradéka, a pakura pedig kenőolajok előállítására és erőművek fűtésére használható. A kőolajvegyészet számos vegyszer előállítását dolgozta ki a kőolajat vegyipari alapanyagként használva.

A kőolaj és származékainak használata jelentős környezetszennyezéssel jár. A már említett kén-dioxid-kibocsátáson túl a bányászat, a szállítás, a leparlás és a kőolajtermékek használata egyaránt komoly szennyezéseket okoz „normál” üzemen is, és lényegesen fokozzák a nemkívánatos hatásokat a haváriák, amelyek a tankhajó-katasztrófáktól a kőolajkutak felgyújtásán át a kőolajtartályok felrobbanásáig rendkívül széles skálát ölelnek fel.

Valamivel környezetkímélőbb fosszilis tüzelőanyag a földgáz, mivel tökéletesebben ég, nagy a fűtőértéke, viszonylag könnyen szállítható.

A kőolaj- és földgáz-készletekre vonatkozó becslések azt vetítik előre, hogy a 21. század folyamán ezek a készletek kimerülnek, így az emberiségnek más módon kell megoldania az energiatermelést.



106. ábra. Kőolajcsapda (Forrás: Környezet- és természetvédelmi lexikon, 2002)

2.7.2.3. Metamorf (átalakult) kőzetek

E kőzetcsoportba olyan kőzetek tartoznak, amelyek magmás, üledékes vagy korábban metamorfizálódott kőzetek átkristályosodásával keletkeztek. Az átalakulás nagy nyomás és magas hőmérséklet hatására, rendszerint a földkéreg mélyebb rétegeiben vagy a litoszféralemez legalsó rétegében megy végbe. Keletkezési körülményeiktől függően az átalakulás (és ennek megfelelően az átalakult kőzetek) számos típusát ismerjük, amelyek ismertetésére itt nem kerülhet sor, az a geológia tantárgy feladata.

A metamorf kőzetek jelentős része a képződése során jellemző egyirányú nyomás hatására *palás* (vékonyréteges) szerkezetet vesz fel. Eközben kristályosodás is végbemegy, így **kristályos palák** jönnek létre.

A metamorfózis során a geológiai környezet kémiai összetétele is szerepet játszik az átalakult kőzet tulajdonságainak kialakulásában. A magas hőmérséklet és a nagy nyomás hatására ugyanis nemcsak fizikai változások, hanem kémiai átalakulások is lejátszódnak a diageneziskor. Hazánkban viszonylag kis területen fordulnak elő metamorf kőzetek. (A helyszíneket a konkrét esetekben említjük.)

A mészkő keletkezésének ismertetésekor már utaltunk arra, hogy a kalciumkarbonát kristályosodásával **márvány** jön létre. Hazánkban valódi metamorf márvány nem fordul elő, a piszkei és siklósi „márvány” tömött üledékes mészkő. A **30.** táblázat a legfontosabb magmás és üledékes kőzeteknek megfelelő metamorf kőzeteket tüntettük fel. A metamorf kőzetek alapvető kémiai összetétele többé-kevésbé hasonló a nekik megfeleltetett kőzetekéhez, de szerkezetükben és kisebb mértékben kémiai tulajdonságaikban eltérnek azoktól.

A **gnájszok** ásványi összetétele a gránitokéhoz hasonló, de más elegyrészek is előfordulnak bennük. Lényegesen különböznek a gránittól a palás szerkezetükben. A gnájszok általában ugyanolyan célokra használhatók, mint a gránitok, de palás szerkezetük miatt az alkalmazásuk lehetőségei szűkebbek azoknál: leginkább csak útépítéseknél használják őket. Hazánkban csak Sopron környékén fordulnak elő.

A **csillámpala** fő elegyrészei a csillámok és a kvarc. Kiinduló kőzetük agyag, agyagos-kovasavas kötőanyagú homokkő vagy konglomerátum, ill. breccsa. Gazdasági hasznosíthatósága még korlátozottabb, mint a gnájszoké. A kvarcdúsabb fajtákat utak kavicsolására használják, a csillámdús fajtákat a kohászat hasznosítja. Magyarországon a Soproni-hegységben muszkovitos csillámpala található.

30. táblázat. Az eredeti kőzetek és az átalakult kőzetek Vendl (1957) szerint

Az eredeti kőzet	A belőle származó metamorf kőzet
Gránit, szienit	Gnájsz, szemes gnájsz, protogingnájsz
Gránitaplit, szienitaplit	Aplitgnájsz, granulit
Kvarcporfir, porfir, keratofir	Porfiroid, szericites fillit
Kvarcdiorit, diorit	Dioritgnájsz, amfibolgnájsz, kloritpala
Gabbró	Szerpentin, amfibolit, talkpala
Diabáz, melafir	Szerpentin, amfibolit, kloritpala
Peridotit, piroxenit	Szerpentin, amfibolit, kloritpala, steatitpala
SiO ₂ kötőanyagú homokkő, konglomerátum, breccsa	Kvarcitpala
Agyagos, kovasavas kötőanyagú homokkő konglomerátum, breccsa	Szericites fillit, csillámpala, sztomolit
Arkózás homokkő	Földpátos fillit, gnájsz, sztomolit
Agyag	Fillit, csillámpala, gnájsz, sztomolit
Márga	Mészfillit, mészcillámfillit, amfibolpala, amfibolit, szilikátos sztomolit
Mészkő	Márvány
Magnezit	Steatit, steatitpala
Sziderit, barnavasérc	Hematit, magnetit
Kőszén	Antracit, grafit, koks

A **kvarcitpala** és a **kvarcit** csillámpalákból képződhet oly módon, hogy a csillámok mennyisége erősen lecsökken benne. Ebből következik, hogy egyeduralkodó ásványuk a kvarc, s más ásványok csak kis mennyiségben fordulnak elő bennük. A kvarcitpala és a kvarcit között csak szerkezetbeli különbség van, azaz az előbbi palás szerkezetű, míg utóbbiban ez a szerkezet nagyon gyenge vagy látható. A legtisztább kvarcitpalák és kvarcitok (99,5% kvarc) jó minőségű üvegek gyártására alkalmasak. Ezenkívül útépitéseknél, vasúti talpfák beágyazásánál jól használhatók. Hő- és saválló, ezért pl. az acélgyártásnál használatos martinkemencék, valamint savnyelőtornyok bélelésére is alkalmasak.

A **talkpala** és **talk** (steatit = szalonnakő) a gabbróból képződött átalakult kőzet. Meghatározó ásványa a névadó *talk* (*zsírkő*), amely igen lágy, az ún. Mohs-keménységi skálán a legkisebb keménységű, körömmel könnyen karcolható. Mivel a talkpalában és talk kőzetben más ásványok is előfordulnak, ezek keménysége 1–2 között van. (Kettes keménységű a gipsz). A

szalonnakőnek nevezett tömött változatát szabókrétának használják, sőt zsírok, olajok felszívására is alkalmas. A gyógyászatban hintőpor előállítására, a papírgyártásban tömítőanyagként használják. A talk izzítás hatására megkeményedik, ekkor elektromos szigetelőanyagként is alkalmazható. Hazánkban csak kis mennyiségben fordul elő: Vas megyében Felsőcsatár mellett.

Mind a három nagy kőzetcsoporthoz kőzeteit általában csak azokon a helyszíneken bányásszák, ahol felszínközeli vannak. Ez alól kivétel a kőszén, a kőolaj és a földgáz, amelyek az emberiség életében annyira fontosak, hogy extrém környezetekben is bányásszák őket. Oroszországban, Alaszkában hideg éghajlaton, az Északi-tengeren és Venezuela partjainál a tengerfenékről szerzik be a szénhidrogéneket. Az építkezésekhez használatos kőzeteket nem gazdaságos nagy távolságokra szállítani, ezért ezeket a – túlnyomórészt külszíni – bányák közelében használják fel.

Világmerétekben több tízezerre rúg a jelentősebb bányák száma. Az ezekben folyó bányászati tevékenységek összegzett hatása már globális következményekkel is jár földi környezetünkre. Ezeket a következményeket a Környezetföldtan c. tantárgyban tárgyaljuk.

2.7.3. A kőzetek éghajlat-függő mállása, a talajképződés földrajzi különbségei a Földön

2.7.3.1. A mállás intenzitása a kontinenseken és a földrajzi övezetekben

A kőzetek mállásával a Környezetföldtan c. tantárgy foglalkozik. Ebben a fejezetben azt kívánjuk bemutatni, hogy az éghajlat hogyan befolyásolja az aprózódás (fizikai mállás) és a kémiai mállás intenzitását a Föld különböző zónáiban.

A mállás mennyiségi megítéléséhez többféle módszert használnak a kutatók. Az egyik megbízhatónak tartott módszer a felszíni vízrendszerek által szállított hordalék és oldott ionok alapján végzett becslés. A folyók által szállított hordalék mennyisége jól mérhető, sőt ma már modellszámítások alapján is elég pontosan becsülhető.

A felszíni víz oldott ionjainak összege arányos a kémiai mállás mértékével, ha azt nem is fedti pontosan. Korrekciós számításokkal aránylag megbízhatóan becsülhető a vízgyűjtő területek mállási intenzitása, s ezek összegzésével kontinensekre vonatkozó adatok is számíthatók. Ilyen számítások eredményeit közli munkájában *Strakhov, N. M.* (1967). Néhány tanulságos adatát a 31. táblázatban és 32. táblázatban mutatjuk be.

Különböző éghajlati területeken, eltérő domborzati és közettani viszonyok között a folyók vízgyűjtő területein lényegesen eltér a mechanikai és a kémiai denudáció – ennek megfelelően az aprózódás és a mállás intenzitása is (**30. táblázat**). Legintenzívebb a kőzetpusztulás a nedves szubtrópusi és a meleg-mérsékelt éghajlat hegységi folyóinak vízgyűjtő területén: Rioni, Szulak, Tyerek. A mechanikai denudáció itt többszöröse a kémiai denudációnak.

31. táblázat. A Föld néhány vízgyűjtő területének mechanikai és kémiai denudációja (Strakhov, N. M. 1967)

Mechanikai denudáció (t/km ²)		Kémiai denudáció (t/km ²)	Mechanikai denudáció (t/km ²)		Kémiai denudáció (t/km ²)
I. Mérsékelt és hideg éghajlat É-i folyói			II. Meleg-mérsékelt, szubtrópusi és trópusi éghajlat folyói		
Hegységi folyók			Hegységi folyók		
Kolima	7	5,5	Kura	213	23,4
Jana	10	3,9	Tyerek	587	125,0
Pecsora	20	17,1	Rioni	2000	209
Amur	28	10,1	Szulak	2000	290
Yukon	103	22,0			
Síksági folyók			Síksági folyók		
Jenyiszej	4,0	11,4	Dnyeper	4,0	17,0
Onyega	4,0	20,0	Don	18,3	22,0
Ob	6,0	12,2	Volga	18,6	32,5
É-i Dvina	16,5	48,0	Dnyeszter	31,5	3,5
			Hegyvidéken eredő folyók		
			Amazonas	60	13,0
			Parana	75	18,0
			Mississippi	118	28,4
			Kubany	180	35,0

A kontinentálisabb síksági területeken több folyónál tapasztalható, hogy a kémiai folyamatok erősebben hatnak, mint a mechanikaiak (Dnyeper, Don, Volga).

Érdekes, hogy a trópusi folyók vízgyűjtő területén (Amazonas, Parana) a fajlagos kémiai denudáció nem éri el a mérsékelt övi folyók vízgyűjtőinek hasonló típusú lepusztulási értékeit. Ez ellentmondani látszik annak az elméletileg bizonyítható ténynek, hogy a trópusokon (ezen belül a nedves és váltakozva nedves éghajlaton) a mállási folyamatok a legintenzívebbek. Hozzá kell azonban tennünk: „egyébként azonos feltételek mellett”. Ha ugyanis a kőzettani felépítésben lényegesek a különbségek, az éghajlati adottságokból származó eltéréseket kiegyenlíthetjük. Így pl. a Kelet-európai-síkság folyóinak vízgyűjtőjén fontos szerepe van a lösznek, amelyben az oldódás mértéke nagyságrendekkel nagyobb lehet, mint a Brazil-hegyvidék prekambriumi kőzetein. A hideg és a mérsékelt éghajlat északi folyói síksági területeken kis mechanikai, közepes kémiai denudációval jellemezhetők, a hegységekben viszont – a várakozásnak megfelelően – megnő a mechanikai lepusztulás.

A **32. táblázat** a kontinensek sorrendjét figyelhetjük meg. Kiemelkedő Ázsia felszínének nagy mechanikai denudációja. Az elszállítást előkészítő aprózódási folyamatok közül ki kell emelnünk a fagy okozta aprózódást, amely a kontinens igen nagy területein hatékony (Észak-Ázsia, Közép-Ázsia magashegységei, fennsíkjai) és az inszolációs aprózódást, amely a nagy kiterjedésű sivatagi, félsivatagi tájakon jellemző. Észak-Amerikában hasonló okokra vezethető vissza a kontinensek sorában második legnagyobb mechanikai denudáció. Itt a Kordillerák belső medencéire, Alaszka és a Kanadai-pajzs területeire jellemző nagy inszolációs, ill. fagy okozta aprózódás. Ázsiához képest azonban ezek a területek kisebb kiterjedésűek, ami a mechanikai denudáció sokkal alacsonyabb értékében tükröződik. A kémiai lepusztulás gyakorlatilag azonos intenzitású a két kontinensen, ami megfelel hasonló földrajzi helyzetüknek (hasonló éghajlati zónák, területek).

32. táblázat. A kontinensek éves mechanikai és kémiai denudációja (Strakhov, N. M. 1967)

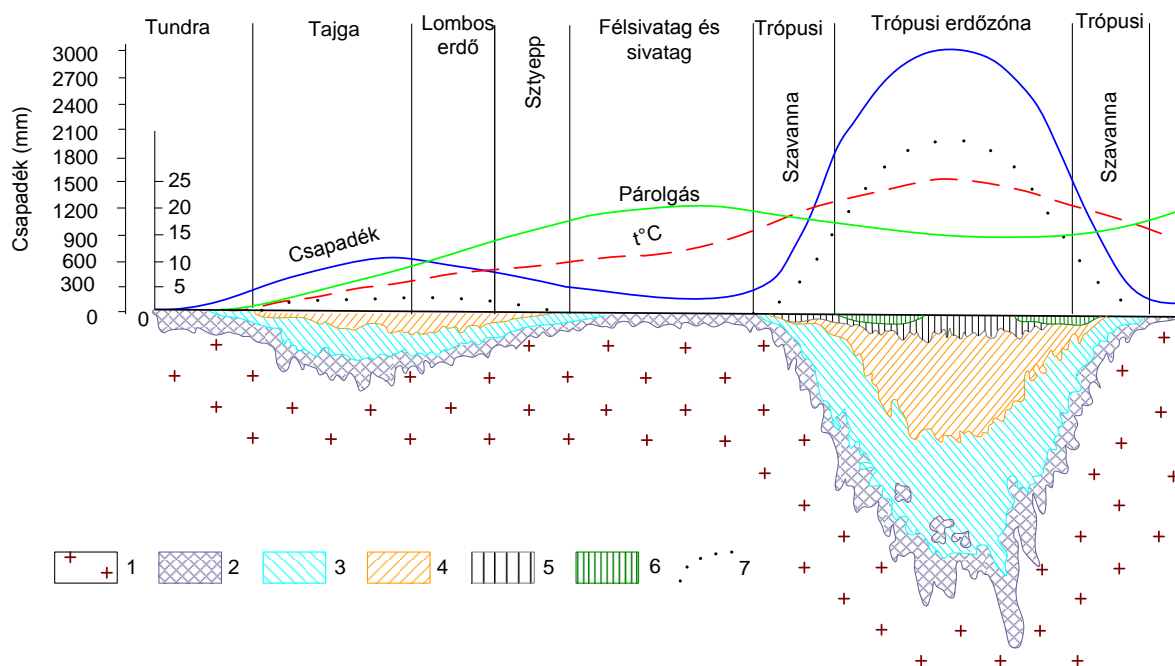
Kontinens	Mechanikai denudáció (t/km ²)	Kémiai denudáció (t/km ²)	Mechanikai és kémiai denudáció aránya
Észak-Amerika	86	33	2,6
Dél-Amerika	56	28	2,0
Ázsia	310	32	9,7
Afrika	17	24	0,7
Európa	27	42	0,65
Ausztrália	27	2	10,0

Dél-Amerikában az Andok, Patagónia és a Brazil-hegyvidék szárazabb területeinek erősebb aprózódási folyamatai járulhatnak hozzá a viszonylag nagy mechanikai denudációhoz.

Európában, az eddig tárgyalt kontinensekkel szemben, a mállási folyamatok sokkal hatékonyabbak, mint az aprózódási folyamatok, sőt a kémiai denudáció fajlagos értéke valamennyi kontinens közül itt a legnagyobb. Ezzel szemben szélsőségesen alacsony a kémiai denudáció Ausztráliában: még az afrikai kontinensre számított érték egytizedét sem éri el. Ugyanakkor Európában és Ausztráliában a mechanikai denudáció fajlagos értéke pontosan egyforma.

Az adatok közül nehezen értelmezhető az afrikai kontinens nagyon alacsony mechanikai denudációja. Valószínűleg a sivatagi területeken végbemenő aprózódási folyamatok intenzitásának alábecsléséről van szó.

Végül nézzük meg, hogyan változik a málladéktakaró vastagsága és jellege a nagy földrajzi zónákban az éghajlati és a növényzeti tényezők függvényében (107. ábra).



107. ábra. A mállás és talajképződés néhány tényezője a Sarkoktól az Egyenlítőig

(Strakhov, N. M. – 1967 – nyomán módosítva) 1. mállatlan kőzet, 2. gyengén mállott zóna, 3. hidroszillám, montmorillonit, beidelit zóna, 4. kaolinit zóna, 5. vas-hidroxid, Al_2O_3 : 6. vasalumínium mállási kéreg, 7. növényi produkció

A hideg övezeten belül csak a tundrán alakul ki egy vékony, gyengén mállott felszíni réteg.

A mérsékelt övezeti tajgazónában már erősebbek a mállási folyamatok, s az Egyenlítő irányában haladva a nedves viszonyok és a hőmérséklet emelkedése is hozzájárul a málladéktakaró vastagodásához. Egyre nagyobb arányban fordulnak elő benne az agyagásványok, melyek közül a leggyakoribbak a montmorillonit, a hidrocillám (illit) és a beidellit. A málladéktakarón talajképződés megy végbe, melynek eredményeként valódi, háromszintű talajok jönnek létre.

A mérsékelt övezeti sztyepp felé haladva fokozódik a párolgás, és csökken a csapadék, a málladéktakaró egyre vékonyabb lesz, és a mérsékelt övezeti sivatagok-félsivatagok területén csak egy gyengén mállott vékony, felszíni réteg bizonyítja a kőzetek kémiai bontásának gyenge intenzitását. Ugyanilyen viszonyokat találunk a trópusi sivatagok-félsivatagok területén.

A trópusi övezet egyes öveiben a mállás az alábbiak szerint változik. A trópusi szavannaövben növekszik az évi csapadékösszeg és az átlaghőmérséklet is, ami a mállás kémiai folyamatainak kedvez: a málladéktakaró egyre vastagabb lesz. A hidrocillám-montmorillonit-beidellit zóna mélyebbre hatol, és a felszínközeli kaolinit a meghatározó agyagásvány.

A trópusi esőerdőövben az igen nagy csapadékhoz magas hőmérséklet társul, s az itteni erdők a Földön a legnagyobb mennyiségű szerves anyagot termelik. Az intenzív kémiai és biológiai mállás hatására a málladéktakaró itt a legvastagabb. A felszínen és felszínközeli a vas és az alumínium oxidjai és hidroxidjai jellemzők. Ez alatt vastag kaolinites zóna következik, majd a mállatlan alapkőzethez közeledve a mérsékelt övezetben meghatározó agyagásványok fordulnak elő legnagyobb arányban (**107. ábra**).

2.7.3.2. A talajképződés földrajzi különbségei a Földön

A talajképződés (T) több tényezőtől függ: a klímától (K), a földtani tényezőktől (F), a domborzattól (D), a biológiai tényezőktől (B), attól az időtartamtól, amely a talajképződéshez rendelkezésre állt (t) és az antropogén tényezőktől (A), amelyek a többi tényezőre gyakorolt hatáson keresztül érvényesülnek:

$$T = f(t) [(K, F, D, B) \cdot A].$$

A felsorolt tényezők közül talajföldrajzi szempontból kiemelkedő jelentőséget tulajdonítunk az *éghajlatnak*, amely a talajnak mint összetett rendszernek az anyag- és energiaáramlási folyamataiban meghatározó szerepű. A Nap sugárzási hője közvetlenül vagy közvetve minden

földi élet forrása, ill. feltétele. Az éghajlati hatások alapvetően meghatározzák a *biológiai tényező* jellegét, földrajzi elterjedését. Különösen fontos szerepe van a növényformációk földfelszíni eloszlásának kialakulásában, a talajképződés jellege pedig szoros kapcsolatban van a *növényzettel*. Úgy is fogalmazhatunk, hogy a talajok földfelszíni zonális elrendeződése alapvetően az éghajlattól függ, de az éghajlat nemcsak közvetlenül fejt ki hatását a talajokra, hanem a biológiai talajképző tényezők keresztül is oly módon, hogy annak földfelszíni eloszlását meghatározza. Az élővilág pedig közvetlenül befolyásolja a talajokban lejátszódó folyamatokat.

Az aktív földtani tényezők közé a kéregmozgásokat, a vulkanizmust, a talajvizet, a talajnedvességet és a felszíni vizeket soroljuk. Ezek közül kiemeljük a talajvíz szerepét a talajképződésben.

A *talajvíz és a talajnedvesség* a talajban lejátszódó biológiai és kémiai folyamatokat befolyásolja. Túl nedves viszonyok között oxigénszegény környezet alakul ki, a redukciós folyamatok dominálnak, az aerob viszonyokat igénylő élőlények részben elpusztulnak, részben csökkent életműködéssel reagálnak a megváltozott viszonyokra. A talajnedvesség mozgásának iránya meghatározza, hogy a talajban a kilúgzás vagy a felhalmozódás játszódik-e le.

A talajvíz kémiai összetétele és felszínközelsége meghatározó jelentőségű a szikes és réti talajok képződésében. Láptalajok is csak magas talajvízállású területeken alakulnak ki. Azokat a talajokat, amelyek kialakulásában a vízzel meghatározó szerepe van, összefoglaló néven vízhatású talajoknak nevezzük.

A passzív földtani tényezők közé a kőzetek és ásványok tartoznak. Fontosságukat mi sem bizonyítja jobban, minthogy az ún. *ásványi talajok* tömegének 93–95%-át a szervesetlen kéreganyagok: kőzetek, ásványok alkotják. A talajban ezek átalakult (mállott) formában vannak jelen. A talajképződés alapanyagául szolgáló kőzeteket *talajképző kőzetnek*, *anyakőzetnek* vagy *alapkőzetnek* (a talajok C szintje) nevezzük; az angolszász irodalom a *parent material*, a német a *Grundgestein* vagy *Untergrund* kifejezést használja.

A talajképző kőzet tulajdonságai egyes talajtípusok kialakulásában meghatározó jelentőségűek lehetnek, még a klimatikus hatást is háttérbe szoríthatják. Ezeket a talajtípusokat összefoglaló néven *közethatású talajoknak* nevezzük.

A *domborzat* közvetett hatással van a talajképződésre oly módon, hogy a többi tényezőt módosítja.

Ismeretes, hogy a tengerszint feletti magasság változásával változik az éghajlat, vagyis a talajképződés egyik alapvető feltétele.

Az azonos tszf-i magasságban fekvő hegységi vagy dombsági tájakon pedig a lejtők meredeksége és expozíciója nagy különbségeket okozhat a besugárzásban, s ennek eredményeként a felszín felmelegedésében és lehülésében. Mindez talaj élővilágának aktivitását, a mállás intenzitását módosítja, hozzájárul a kiszáradás ütemének fokozódásához vagy lassulásához.

A domborzati adottságok az erózió és akkumuláció intenzitásának módosításával a talajképződést gátolhatják (szélsőséges esetben a talajfejlődés a váztalajok szintjén megreked), vagy elősegíthetik (síksági területek zavartalan talajképződése).

A talajok mint ökológiai rendszerek keletkeznek, fejlődnek és elpusztulnak. E természetes úton lezajló változásokhoz – az emberi életkor léptékével mérve – hosszú időre van szükség. A Föld különböző helyein a mai talajtakaró kialakulásához különböző idő állt rendelkezésre.

Az idősebb talajokban többféle folyamat alakulhatott ki, azok több ideig hatottak, így bonyolultabb, differenciáltabb talaj jöhetett létre, mint a fiatal, a fejlődés alacsonyabb szintjén álló talajok esetében.

A 20. században a természetes talajképző tényezők mellett fontossá vált az emberi tevékenységek talajképző hatása.

A Föld megművelt területei mintegy 1,5 mrd ha-t tesznek ki. Itt mindennapos az eredeti talajtulajdonságok tudatos vagy akaratlan módosítása. Elegendő, ha a talajművelés, a műtrágyázás vagy az öntözés kedvező és kedvezőtlen hatásaira gondolunk. De a nem mezőgazdasági tevékenységek is járhatnak talajtani változásokkal. Egy víztározó mentén pl. megemelkedhet a talajvíz szintje, és ennek hatására módosulhat a talajképződés iránya, rétiesedés vagy másodlagos szikesedés játszódhat le (az egyéb földrajzi adottságoktól függően). Míg a természetes talajfejlődés sebességét ezer, tízezer, sőt néha millió évekkel mérjük, antropogén hatásra akár 10–20 év alatt is megváltozhat a talajtípus. E változást mindig a talajképző tényezők módosításával éri el az ember.

A továbbiakban azt vizsgáljuk meg, hogy a természetes talajképző tényezők földrajzi különbségei milyen talajtani különbségeket idéztek elő a Földön.

A globális talajföldrajzi törvényszerűségek közül a *zonalitás törvénye* a legfontosabb. Ennek lényege, hogy a talajok a földfelszínen az éghajlati-növényzeti öveknek megfelelően alakultak ki és fejlődnek tovább.

Ha az éghajlat által irányított egy vagy több zonális folyamat meghatározza a talajfejlődés irányát s ennek eredményeként az adott földrajzi övre jellemző talaj jön létre, a talajt zonálisnak nevezzük.

Az *intrazonális talajokban* a helyi (intrazonális) talajképző folyamatok és tényezők vagy egyenrangúak a zonális folyamatokkal és tényezőkkel, vagy hatásuk uralkodóvá válik azokkal szemben. Két intrazonális tényező szerepét kell kiemelni: az alapkőzetét és a vizét – ezen belül elsősorban a talajvizét. Legtöbb intrazonális talaj létrejöttében ezek egyike a meghatározó: pl. rankerek, rendzinák esetében az alapkőzet, szikesek képződésekor a talajvíz.

Az azonális talajokban olyan talajképződési folyamatok dominálnak, melyek bármely zónában előfordulhatnak. Így végül is – ha a létrejöttükhöz szükséges helyi talajképző folyamatok jelen vannak – a zónák jellegétől függetlenül bárhol kialakulhatnak: pl. lejtőhordalék-talajok a hegyek lábánál, öntéstalajok a folyók mentén bármely éghajlati-növényzeti zónában megtalálhatók.

2.7.3.2.1. *A trópusi övezet talajai*

A forró nedves éghajlaton a magas hőmérséklet és nagy nedvesség intenzív mállási folyamatokat eredményez, így vastag málladéktakarók képződnek.

A Föld legnagyobb szervesanyag-termelésű esőerdeiben az elhalt növényi részek gyors ásványosodása következtében kevés humusz képződik (1–3%), és a humuszanyagok N-tartalma kicsi. A savanyú nyershumusz felhalmozódása jellemző.

A nedves trópusok talajainak adszorpciós kapacitása általában csekély, ami a humuszban és agyagásványokban való szegénységgel függ össze. Kicsi az alkáliák és a földalkáliák mennyisége is.

A zóna tipikus talajai a *latosolok* (ferralsols), amelyekben a deszilikátosodás (szilikátvesztés) a jellemző talajképződési folyamat. Azokon a területeken találjuk ezeket, ahol a felszíni hozzáfolyás nem játszik szerepet a talajfejlődésben. A latosolok többméteres vastagságukhoz képest egyszerű felépítésűek (**108. ábra**). A tipikus *ironstone*-szelvényekben a kilúgzási szint alatt vaskőfok(ironstone)-szintet találunk, amelyet lateritszintnek is szoktak nevezni (innen a korábbi szakirodalomban használt laterit elnevezés).

A vaskőfok alatt fehér és halvány rózsaszín agyagos talajréteg következik vörös foltokkal. A fehér szint a kvarcsemek okozzák, a vöröset a vas-oxid, az agyag elsősorban kaolinit agyagásványt tartalmaz.

A laterites szintek gyakran felszíni kérget alkotva reliktumként jelennek meg a trópusi tájban. A térszín emelkedésével vagy antropogén hatásra ugyanis az erózió fokozódott s ez az A szintet lepusztította, a felszínre került lateritszint irreverzibilisen megkeményedett.

A latosolok másik csoportját a legnedvesebbkörülmének között képződő *sárga latosolok* alkotják, amelyeket a genetikus nevezéktan zseltozjomokként is szokott említeni. Szelvényfelépítésük abban különbözik az ironstone-típusokétól, hogy nincs vaskőfokszintjük, az egész szelvény csaknem homogén (**108. ábra**). Uralkodik benne a névadó sárga színárnyalat, amely mellett a vörös elszíneződések vas-oxidok jelenlétére utalnak.

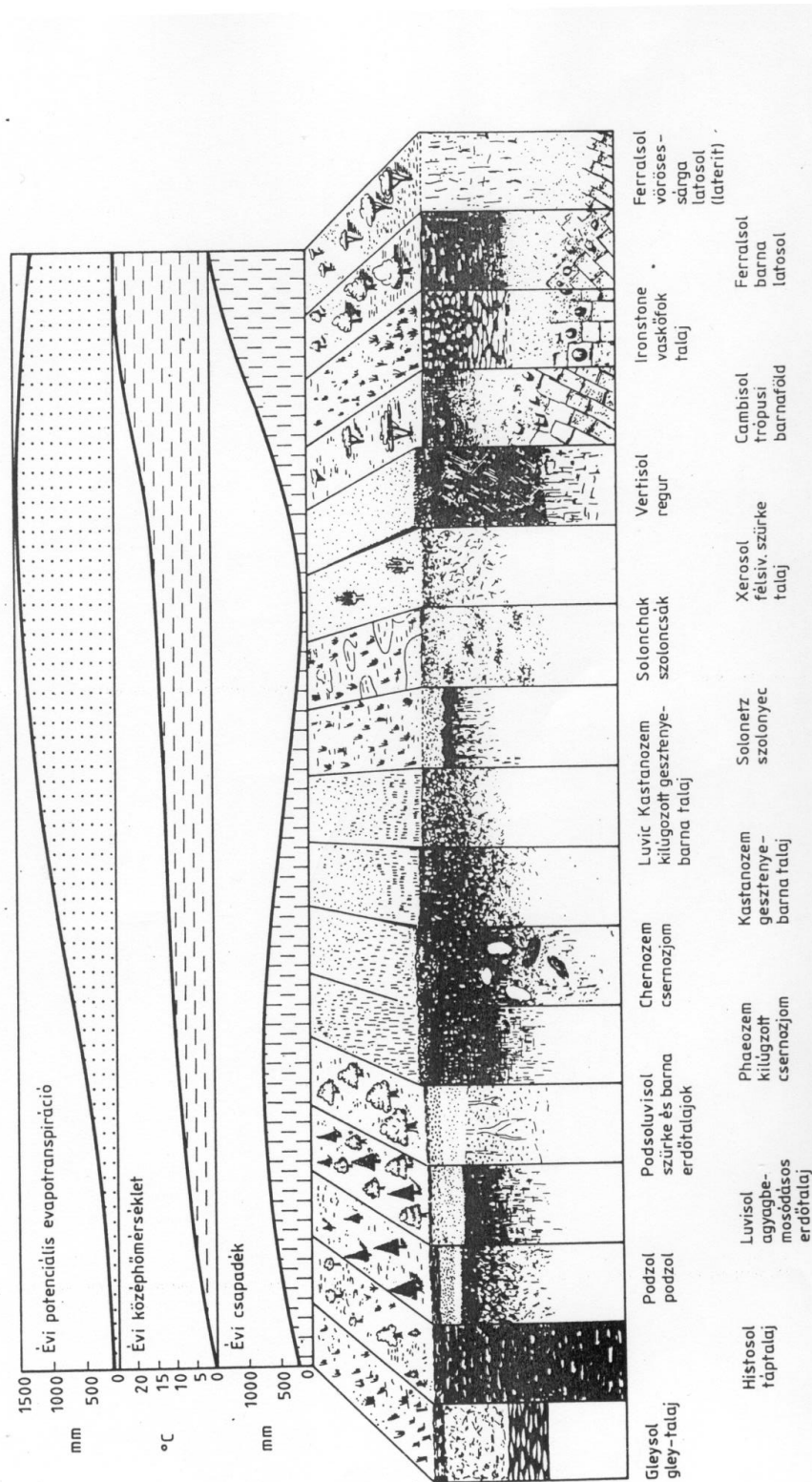
A trópusi esőerdők gyakoribb intrazonális talajai a *glejtalajok*, a *láptalajok* és a *mocsári talajok*. Említésre méltók az azonális öntéstalajok is. Ez utóbbiak különösen az Amazonas vízgyűjtő területén fordulnak elő nagy kiterjedésben.

Az antropogén hatásra kialakult *rizstalajok* ebben a zónában is jellemzők.

A trópusi szavanna zónában az éghajlat közös jellemzője a kifejezetten száraz évszak létezése, amelyet rövidebb-hosszabb nedves évszak vált fel. A nedves és száraz szavannák (utóbbiakat régebben trópusi sztyeppekként említették a tankönyvek) viszonylag nagy szervesanyag-produkciója és az éghajlati feltételek a trópusi viszonyok közötti legnagyobb humuszképződést teszik lehetővé. A kilúgzás különböző intenzitású ugyan, de az egész zónában jellemző talajképződési folyamat.

A zónán belül az évi csapadékátlag növekedésével a deszilikátosodás folyamata egyre kifejezettebb. Az oldott SiO_2 azonban a talajszelvény B szintjében különböző formákban (szekunder kvarc) kiválik. A szabad szeszkvioxidok (elsősorban a vas oxidjai) a feltalajt vörösre színezik. A hagyományos nevezéktan összefoglaló néven *rozsdavörös* (ferruginous) talajoknak nevezi a zóna tipikus talajait. A FAO-klasszifikáció szerint ezek a talajok az acrisolokhoz vagy a nitosolokhoz tartoznak.

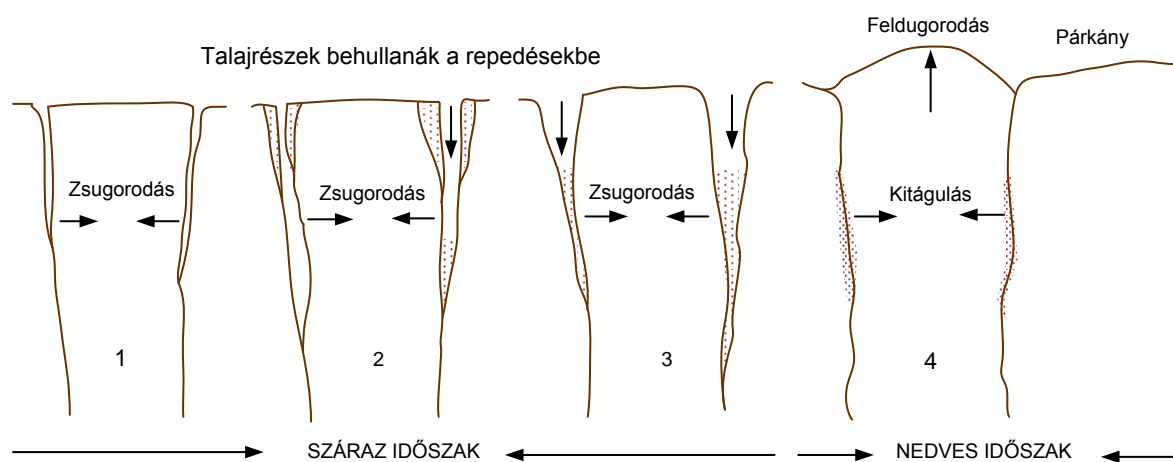
A bázisgazdag alapkőzetten képződő, vasvegyületekben bővelkedő vörös trópusi és szubtrópusi talajokat *krasznozjomok*nak nevezik el. A név a transzkaukázusi területről származik, de széles körben elterjedt, még Ausztráliában is használják. A talaj termékenysége jó, különösen a cukornád- és az ananászültetvények számára. A nemzetközi névhasználatban egyre inkább háttérbe szorul a krasznozjom kifejezés, s helyette a FAO-nevezéktant használják, amely szerint ez a talaj leggyakrabban a nitosolokhoz vagy a ferralsolokhoz tartoznak.



108. ábra. A Föld fontosabb taljai, a növényformációk és az éghajlati elemek közötti kapcsolat (FitzPatrick, E. A., 1983. nyomán, módosítva). Fent FAO-talajnevek. Lent: genetikus rendszerek talajnevei

Azokon a területeken, ahol a kőzetek mállása során nagy mennyiségű agyag képződik, s az agyagban számottevő táguló rácsú agyagásvány fordul elő, az intrazonális *vertisolok* jönnek létre. A talajon belüli anyagvándorlás eredményeként a felszínen sajátos mikrorelief képződik, amelyet Ausztráliában írtak le először, és gilgai jelenségnek neveztek el (**109. ábra.**). A vertisolok a trópusi talajok között jó termékenységűnek számítanak, amit a fekete gyapot-talaj (black cotton soil) elnevezés is tükröz.

Az ember mint talajképző tényező jelentős szerepét bizonyítják a „*rizstalajok*” (paddy soils). Az állandó rizstermő helyeken (125 mill. Ha) a tartós vízborítás hatására mesterségesen jöttek létre. A vízborítás redukciós viszonyokat, a talajművelés tömörödést okozott.



109. ábra. Gilgai jelenség a vertisolakban (Bridges, E. M. 1978. szerint)

A félsivatagos és sivatagos területekre a csekély csapadék (évi 200–300 mm), az epizodikus lehulló esők gyors elfolyása, ill. elszivárgása is jellemző. A teljes növénytelenségtől a foltokban megjelenő félsivatagi vegetációig változik a növényborítottság.

A talajképződés ilyen körülmények között általában igen csekély intenzitású.

Gyakori eset, hogy a homorú felszíni formákban *sós talajok*, elsősorban *szoloncsák* vagy *takir* típusú szikesek képződnek oly módon, hogy a víz elpárolgása után a benne oldott sók a felszínen és a talaj felső szintjében kiválnak.

A félsivatagokban képződő jellemző talajok a szerozjomok (xerosols). Humusztartalmuk kicsiny, ritkán haladja meg az 1%-ot. A legszárazabb sivatagokban csak terméketlen váztalajok képződnek.

2.7.3.2.2. *A mérsékelt övezet talajai*

A Föld legnagyobb kiterjedésű mediterrán klímaterülete az európai Földközi-tenger környékén található. Ezen kívül Kalifornia, Közép-Chile, Dél-Afrika, Délnyugat-Ausztrália jellemezhető hasonló éghajlati adottságokkal.

Ezeken a területeken a *barna* és a *vörös mediterrán talajok*, valamint a *fahéjszínű* talajok zonálisak. A FAO-klasszifikáció szerint ez utóbbi kettő a chromic luvisoloknak felel meg, míg az előzők orthic luvisolnak minősülnek. A vörös mediterrán talajokat a legtöbb klímagenetikus rendszer terra rossaként említi, a fahéjszínű talajokat pedig cinnamon soils-nak jelöli.

A *barna mediterrán talajok* viszonylag csapadékosabb területeken jellemzők CaCO₃-mentesek. Az erős talajerózióknak kitett lejtőkön gyakoriak a közethatású talajok (rendzina, ranker) és a köves váztalajok. Az akkumulációs területeken a terra rossák áttelepített anyaga a meghatározó, amelyen gyakran ma is terra rossa képződés játszódik le. A terra rossa nem más, mint egy vas-oxidokban gazdag, nagy agyagtartalmú, enyhén kilúgzott erdőtalaj.

Az utóbbi évtizedben nagyobb figyelmet szenteltek a talajtanosok a *fahéjszínű talajoknak*, amelyeket a száraz mediterrán erdők és bozótosok talajainak tartanak. A mediterrán területek leggyakoribb talajainak számítanak, termékenységük közepes. A mezőgazdasági termelést gátló tényező ebben az esetben nem a talajok rossz tápanyag-ellátottsága, hanem a tartósan alacsony talajnedvesség. Öntözéssel megfelelő termést lehet betakarítani róluk.

A szorosabb értelemben vett mérsékelt övezetben a csapadék és a párolgás viszonya a lombos erdők és az erdős sztyeppek határán kiegyenlítődik, a hőmérséklet az Egyenlítő felé haladva tovább emelkedik (**108. ábra**).

A lombos erdők területén a barna erdőtalajok zonálisak. A csapadékosabb, óceánikusabb régiókban a *lessivage* (agyagbemosódás) a jellemző talajképző folyamat, amely az *agyagbemosódásos barna erdőtalajban (luvisol)* meghatározó jelentőségű. A savanyú pH-jú talaj közepes vagy jó termékenységű, Nyugat-Európától hazánkig a mérsékelt övezeti lombos erdők zonális talajtípusa.

A kevésbé nedves lomboserdő-területeken a *barnaföld* tekinthető zonális talajtípusnak. A FAO-nevezéktan szerint ez – az adott szelvény vizsgálati eredményeitől függően – lehet podzoluvisol vagy phaeozem. A barnaföldek pH-ja legtöbbször enyhén savanyú, termékenységük jó. Eredeti vegetációjukat sok helyen kiirtották, s ma mezőgazdaságilag hasznosított talajok.

A mérsékelt övezeti sztyeppek zonális talajai a *csernozjomok*. Nevük fekete színükre utal. Nagy humusztartalmuk, kitűnő morzsás szerkezetük, kiváló tápanyag- és vízraktározó képességük

eredményeként Földünk legtermékenyebb talajai. Egy kilúgzott és egy tipikus csernozjom szelvényének rajzát láthatjuk a **108. ábra**. (A FAO-klasszifikáció szerint phaeozem, ill. chernozem.) A növények tápanyagfelvételét a gyengén savanyú vagy semleges pH-juk is megkönnyíti. Legnagyobb összefüggő zónában Eurázsia területén találjuk a csernozjomok talajtársulásait a mi Alföldünkötől Belső-Ázsiáig. A csernozjomömben előforduló talajtársulások egyik gyakori tagja az intrazonális *réti talaj*. A víz állandó befolyása alatt képződik. A talajvíz olyan közel van a felszínhez, hogy a kapillaris zóna állandóan a talajszelvényben mozog. A vízhatás eredményeként rozsdafoltok és glejffoltok képződnek, amelyek az időszakos oxidációs ér redukációs viszonyokat tükrözik. Közepes termékenyséű, a nedvesség miatt nehezen művelhető.

A sztyeppterületeken belül a szárazság fokozódásával az ún. rövid fűvű sztyeppék zónájában a *gesztenyebarna talajok* (kastanozemek) válnak uralkodóvá. A növények szervesanyag-termelése a félsivatagi zóna felé haladva egyre csökken, így kevesebb humusz képződik, mint a hosszú fűvű sztyeppék területein. Ennek következménye, hogy a csernozjomokhoz képest világosabb színű, kevésbé termékeny gesztenyebarna talajok képződnek.

A mérsékelt övezet félszáraz-száraz területein belül a szárazság fokozódásával az ismertetett zonális talajok mellett egyre gyakrabban jelennek meg a *szikesek*. A *szoloncsákok* a felszíntől sósak, szelvényük nagyon gyengén differenciálódik, a szintek alig különböztethetők meg egymástól (**108. ábra**). A legrosszabb termékenyséű talajok közé tartoznak, csak sótűrő növények élnek meg rajtuk, eredményes mezőgazdasági termelésre alkalmatlanok.

A szolonyecekben a sófelhalmozódás maximuma a B szintben van, amely morfológiailag és színében is élesen elválk az A szinttől: oszlopos szerkezetű és fekete vagy csaknem fekete színű (**108. ábra**). A sötét színt a nátrium-humát okozza.

A szolonyecek gyenge termékenyséűek, de termékenyséűk egyszerű módszerekkel (pl. „sárgaföldterítéssel”) javítható.

Az emberi tevékenység is okozhat szikesedést. A félig száraz és száraz területeken rendszeres öntözés hatására megemelkedhet a talajvíz, és elérheti az ún. kritikus szintet, ahonnan a kapillaris vízemelés a felső talajszintekbe szállítja a vízben oldott sókat, s a víz elpárolgásával azok itt felhalmozódnak. Ezt a folyamatot *másodlagos szikesedésnek* nevezzük. Ilyen folyamat játszódott le pl. az Amu-Darja és Szir-Darja vizére alapozott öntözőrendszerek mentén, hazánkban pedig az Alföld egyes részein.

Az erdős tundra zónájától a szubarktikus klímazóna túlevelű erdei felé haladva felerősödnek a talajképző folyamatok. Ez egyrészt azzal függ össze, hogy a csapadék gyarapodik, mégpedig

nagyobb ütemben, mint a párolgás (**108. ábra**). Így az atmoszférikus talaj-vízgazdálkodási típus lesz jellemző, ami a kilúgzás fokozódásához vezet. A túlevelű avar erősen savanyú környezetet biztosít a talajképződés számára. Ilyen viszonyok között az agyagszétesés lesz a meghatározó zonális folyamat, amelynek eredményeként a podzolok fő típusába tartozó talajok képződnek. A podzolok a Föld legelterjedtebb talajai: kb. 20 millió km² az összkiterjedésük. Az északi félteke podzolainak öveiben intrazonális és azonális talajok is társulnak a podzolokhoz. Mészköterületeken a rendzinák, savanyú szilikátos kőzeteken a rankerek inkább a hegységi tájakon fordulnak elő. A síkságokon a láptalajok és a glejtalajok foglalnak el nagy területeket (Nyugat-szibériai-alföld, Kanada). A láptalajok (histosolok) szelvényei fejlettek, jelentős vastagságúak (**108. ábra**).

Az azonális talajok közül a nagy folyók mentén képződő öntéstalajok (fluvisolok) és a hegységek meredek lejtőin található köves, sziklás váztalajok (lithosolok) érdemelnek említést.

2.7.3.2.3. *Az arktikus övezet talajai*

A Föld felszínén a szárazföldeken csak a jéggel borított felszíneket tekinthetjük mindenféle talajképződési folyamattól mentesnek.

A sarkok felől az Egyenlítő felé haladva a tundra éghajlaton (ET) találkozunk először valódi talajokkal. Az alacsony hőmérséklet mellett az évi 200–250 mm-es csapadékösszeg nedves viszonyokat eredményez. A lágyszárúak és cserjék helyenként zárt növénytakarót alkotnak, másutt csak foltszerűen jelennek meg. A rövid nyár és alacsony hőmérséklet miatt kicsi a szervesanyag-termelés, így csekély a humuszképződés is.

A tundraöbven többféle talaj képződhet. A jó vízvezetésű területeken az arktikus *barna talajokat*, a mélyebb fekvésű, rossz vízvezetésű területeken *arktikus glejtalajokat* (gleysol) találunk.

A glejesedés a talajokban levegőtlen viszonyok következtében (általában a víz kiszorítja a levegőt a talaj pórusaiból) játszódik le. Lényege: a háromértékű (oxidált) vas és az oxidált mangán redukált formába megy át, s ennek a két redukált elemnek a vegyületei alkotják a glejffoltokat. A glejes talajok nagyon gyenge termékenységűek.

A legnedvesebb mélyedésekben, a tundra déli határán és az erdős tundrán *tőzegláptalajok* (histosol) is előfordulnak. Tőle északabbra csak kezdetleges tőzeges talajok jellemzők, mindössze 8–10 cm-es tőzegréteggel, amely alatt gyakran világosszürke glejes szint következik.

A tundra talajainak közös tulajdonsága a csekély szelvényvastagság, amely a gyenge szervesanyag-képződés mellett a felszínközeli talajfagy következménye.

2.7.4. A szárazföldi környezet eltartóképessége: területi különbségek

A Föld eltartóképességét különböző szempontok alapján lehet becsülni. Ha pl. egy gazdag ország lakosainak átlagos életszínvonalát vesszük alapul, akkor egyrészt könnyen belátható, hogy az alapvető emberi szükségleteken (élelem, minimális ruházat és lakhatás) kívül számos, ezen túlmutató igényt is figyelembe kell vennünk; másrészt nehéz megmondani, hogy az igények további növekedésével hogyan változik az eltartóképesség. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy a természeti erőforrások egy része véges, és nem lehet tudni, hogy a társadalom ezek kimerülése esetén mivel fogja helyettesíteni őket. (Ld. a fosszilis energiahordozók kimerülését és az alternatív energiahordozók belépését az energiarendszerekbe.)

Mivel az eltartóképesség szorosan összefügg a népesedési folyamatokkal is, tekintsük át röviden az 1970-es évektől zajló népesedési trendeket és a 21. században várható változásokat.

Az emberiség szaporodási üteme az 1970-es években érte el a csúcspontot: akkor évente 90 millió fővel gyarapodtunk. Azóta mérséklődött – de nem állt meg – a növekedés üteme: most már „csak” évi 78 millióval vagyunk többen. A fejlett világban gyakorlatilag megállt a szaporodás (mindössze 5 százalékkal járul hozzá a növekedéshez), a gazdaságilag elmaradott országokban viszont még mindig nagy a termékenységi arányszám (110. ábra). A kontinensek közül a legnagyobb nyomorban élő Afrikában átlagosan öt gyermeket szül egy anya.

Az ENSZ demográfusai rendszeresen készítenek becsléseket a 21. század első évtizedeire, s a távolabbi jövőre is. (Minél távolabbi jövőre próbálunk becsléseket végezni, annál nagyobb a tévedés lehetősége.) Már az önmagában is biztatónak látszik, hogy az utóbbi 20 évben ezek az ENSZ-adatok rendre túlbecsülték a szaporodás ütemét. 1990-ben a 2000-re készített előrejelzések 6,25 milliárd főben, 2025-re pedig 8,47 milliárd főben állapították meg a várható lélekszámot. A 2000. évre becsült adat kb. 200 millióval meghaladta a tényleges népességszámot.

Az 1998-ban készített ENSZ becslés 2050-re (figyelembe véve a szaporodás ütemének várható további mérséklődését) 8,9 milliárd főben határozta meg a Föld lakóinak számát. Ezt az adatot sem tekinthetjük biztosnak, hisz pl. olyan tényezők nehezen vagy egyáltalán nem vehetők figyelembe, mint az esetleges háborúkban, a váratlan éhínségekben, új (= még nem ismert) betegségekben elhunytak száma. Azt azonban figyelembe vették a szakértők, hogy – különösen

Afrikában – rendkívüli ütemben nő a HIV-fertőzöttek száma, és jelenleg ez a betegség még halálos kimenetelű. Nem lehet tudni, hogy az orvostudomány mikorra oldja meg a gyógyítás problémáját. Ha ez megtörténik, az érintett országokban csökken majd a halálozási arányszám. Azt is nehéz megbecsülni, hogy egyes kormányok nem hoznak-e olyan népesedéspolitikai intézkedéseket, amelyek lényegesen befolyásolják az adott ország szaporodási ütemét. (Ilyenre volt már több példa is. Közülük a kínai intézkedések az egész világ népesedési adataira is érezhető hatással voltak.)



110. ábra. A termékenységi arányszám a Föld országában az ezredfordulón (A Fischer *Weltalmanach*, 2001 adatai alapján szerk.)

Az ENSZ 2002. áprilisában megtartott konferenciáján a demográfiai gyorsjelentés meglepő képet rajzolt a világ népesedésének várható alakulásáról. E szerint az elmúlt néhány évben számos, a világ népesedését is meghatározó országban *váratlanul gyorsan kezdett fogyatkozni az élve született gyermekek száma*, aminek eredményeképpen *lényegesen módosítani kell a távlati előrejelzést is*. Ez az újabb prognózis azt tartalmazza, hogy bolygónk népesedési üteme jelentősebben fog lassulni, mint akár 4 évvel ezelőtt is gondolták. Ennek eredményeképpen 2025-re valamivel 8 milliárd alatt marad a Föld lakóinak száma, s 2050-ig gyakorlatilag stagnálni fog, majd csökkenésbe csap át.

Miután négy év alatt a demográfusok becslése 25 évre vonatkoztatva több, mint fél milliárddal változott, jogosan rendülhet meg a bizalmunk az előrejelzések megbízhatóságában.

A bizonytalanság ellenére az emberiségnek arra kell számítnia, hogy kb. 20 év múlva legalább 1,5 milliárd éhes szájjal több lesz a Földön, s 2050-ig ez a lélekszám átmenetileg stabilizálódik. A továbbiakban az eltartóképességet az élelmezés oldaláról közelítjük meg. Bár a mezőgazdasági termeléssel biztosítani lehetne a Föld lakóinak (jelenleg kb. 6,5 milliárd fő) élelemmel való ellátását, az emberiség mindeddig nem tudta felszámolni az éhezést a Föld több nagy régiójában.

Különböző adatok látnak napvilágot az *alultápláltak*, az *éhezők* számáról. Reálisnak tekinthetjük azt az adatot, mely szerint kb. 1 milliárd ember éhezik a Földön. Ezek többsége az ún. fejlődő országokban él (India, Nigéria, Banglades, Pakisztán, Vietnám, Etiópia és számos további afrikai ország).

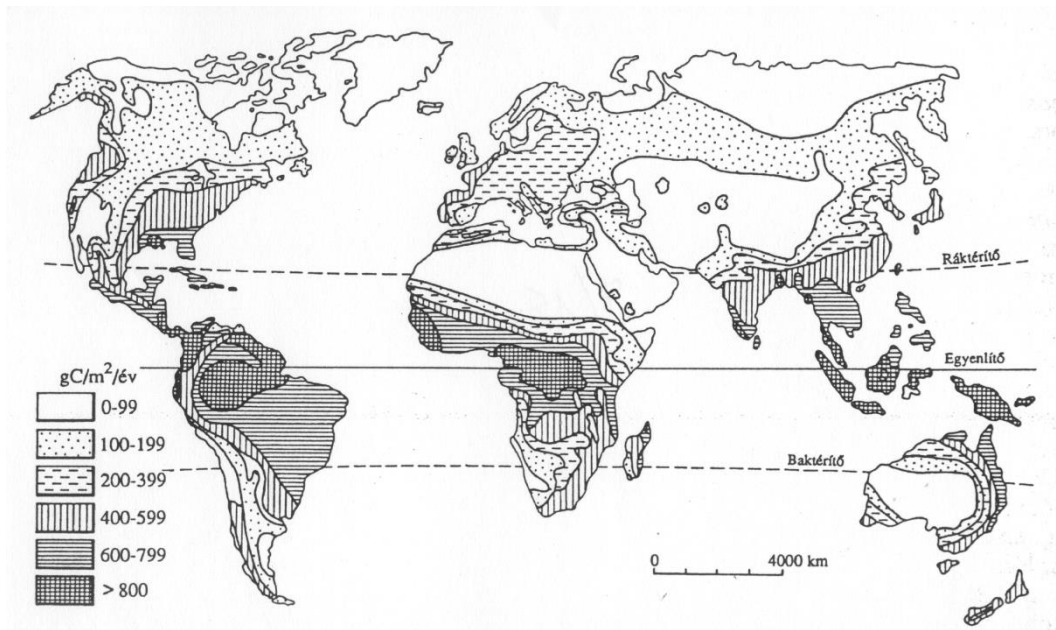
Még ennél is szomorúbb a kép, ha a **minőségi éhezést** is figyelembe vesszük, vagyis azt is megvizsgáljuk, teljes értékű (elegendő fehérjét és vitamint tartalmazó) táplálékot fogyasztanak-e a polgárok. Ebben az esetben az derül ki, hogy még a világ leggazdagabb országában, az USA-ban is milliók szenvednek a hiányos táplálkozástól.

A táplálkozásbeli hiányosságok súlyosan érintik az emberiséget. Minden évben 11 millió azoknak a gyerekeknek a száma, akik még az 5 éves kort sem érik el, mert éhen halnak vagy az éhezéssel összefüggő betegségben pusztulnak el.

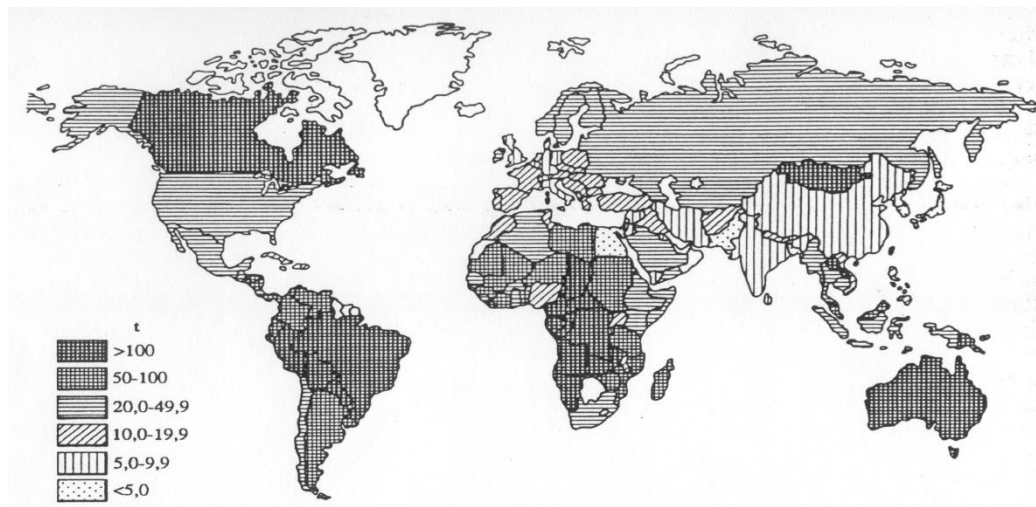
Felmerül a kérdés: vajon a Föld már képtelen eltartani ennyi embert? Meghaladja-e a 6,5 milliárd ember élelmiszerigénye az előállítható élelem mennyiségét?

Figyeljük meg először a természetes **biológiai produktivitás** (nettó elsődleges termelés) területi különbségeit a Földön (*III. ábra*). A várakozásnak megfelelően a trópusi esőerdők, szárazerdők és szavannák „termelőképesége” a legnagyobb, míg a sivatagoké, fűsivatagoké, jéggel borított területeké és a tundráké a legkisebb. A fejlett európai országok területén közepes vagy kicsi (pl. Skandinávia) a biológiai produktivitás.

Ha az **agrár-ökoszisztémákat** vesszük figyelembe, akkor azt tapasztaljuk, hogy a trópusi területen több haszonnövény szervesanyag-termelése megközelíti vagy meghaladja a természetes növényzet szervesanyag-termelését, ha fejlett mezőgazdasági módszerekkel termesztik azokat. Ha azonban fejletlen gazdaságú trópusi országban vizsgáljuk meg ugyanazon növények biológiai produkcióját, igen alacsony értékeket fogunk kapni (**Woodwell, G. M.** 1970). S az a tény, hogy a trópusi országok nagyobb részének igen alacsony színvonalú a gazdasága.



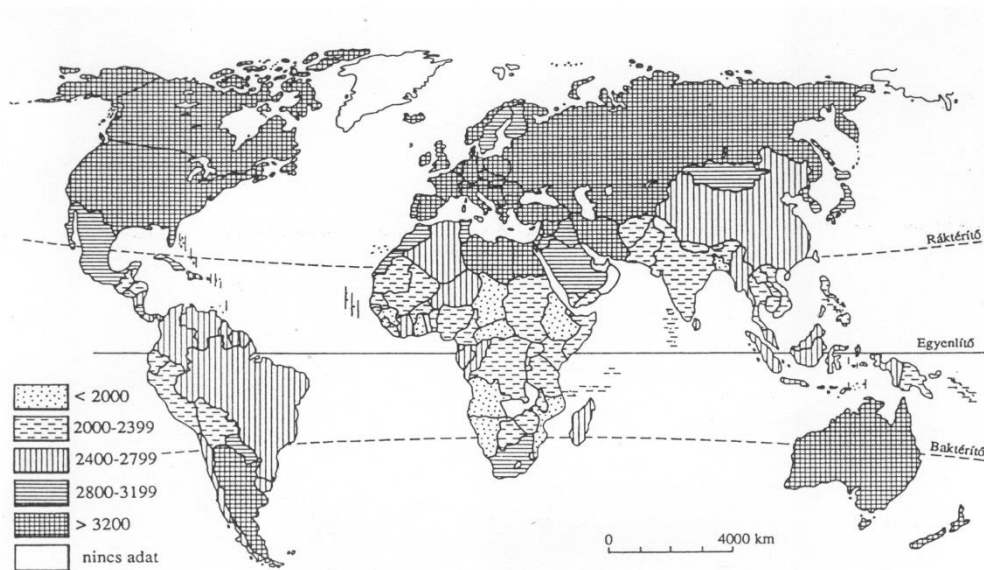
111. ábra. A biológiai produktivitás területi különbségei a Földön Sarre, Ph. (1991) szerint



112. ábra. A fajlagos ökológiai potenciál eloszlása a Földön a természetes növénytakaró nettó elsődleges termelése alapján. A t-ban megadott értékek az egy főre jutó nettó elsődleges termelést jelentik 1981-ben (Probáld F. 1984)

Probáld F. (1984) a természetes növénytakaró elsődleges termelésének országonkénti adatait elosztotta a népességszámmal, s az így nyert adatok alapján megszerkesztette a fajlagos (relatív) ökológiai potenciál világtérképét (112. ábra). Nem vette figyelembe azokat az országokat, amelyek lakosságszáma nem érte el az 1 milliót, vagy területe kisebb volt 10 000 km²-nél. Mivel ez a térkép az egy főre jutó biológiai produktivitás területi eloszlását mutatja

be, jó összehasonlításra ad lehetőséget az egy főre jutó napi kalória-felvétel térképével (**113. ábra**). (A két térkép készítése közötti néhány év időkülönbség nem befolyásolja lényegesen az összehasonlítás során levonható következtetéseket.) Szembeötlő az ellentmondás *Afrika* trópusi országainak kedvező fajlagos ökológiai potenciálja és az egy főre jutó csekély kalória-felvétel között. Ugyanilyen nagy az ellentmondás a trópusi Andok országaiban és *Közép-Amerika* egy részén. *Brazília*ban a nagy fajlagos ökológiai potenciál mellett az egy főre jutó napi kalória-felvétel közepesnek mondható.



113. ábra. A táplálékkal felvett, egy főre jutó napi energia (kcal-ban) a Föld országaiban a 80-as évek végén Lean, G. – Hinrichsen, D. – Markham, A. (1990) szerint

Ezzel szemben az iparilag fejlett európai államok legtöbbszörében kis fajlagos ökológiai potenciál ellenére kifejezetten nagy az egy főre jutó napi kalória-felvétel. Összhang látszik a két térkép között *India*, *Banglades* és *Pakisztán* esetében, ahol mindkét érték kicsiny, továbbá *Kanada*, *Ausztrália* és *Argentína* esetében, ahol mindkét érték nagy. A közepes fajlagos ökológiai potenciálhoz magas kalória-felvétel társul az *Egyesült Államokban*, a *Szovjetunióban* és a *skandináv államokban*, *Kínában* pedig alacsony fajlagos ökológiai potenciálnál közepes kalória-felvétel jellemző.

Láthatjuk tehát, hogy a fajlagos biológiai produktivitás és a lakosság éhezése között legtöbb esetben nincs közvetlen összefüggés. Mindez arra utal, hogy az országok nagyobb részében az éhezés okát nem a természetes biológiai produktivitás elégtelenségében kell keresnünk, hanem a társadalmi-gazdasági viszonyokban. A környezet eltartóképességének vizsgálatakor tehát nemcsak a természeti, hanem a társadalmi környezet eltartóképességét is figyelembe kell

vennünk. Az idézett térképek készítése óta Kína és India gazdasága gyors fejlődésnek indult. Egyelőre ez sem változtatott lényegesen az éhezők számán, aminek társadalmi-elosztási okai vannak.

Az emberiség történelme során a társadalmak a Föld különböző régióiban eltérően fejlődtek. Az egyenlőtlen társadalmi-gazdasági fejlődés eredményeként a 20. század végére az a helyzet állt elő, hogy a *megtermelt anyagi javak kétharmadát a világ népességének egynegyede fogyasztja el*. Az is igaz azonban, hogy ez az egynegyed az anyagi javak több mint kétharmadát termeli meg. A rosszabb helyzetbe került háromnegyedből kerülnek ki az éhezők, akik pusztta létük biztosítása érdekében pusztítják saját természeti erőforrásaikat, s ez a pusztítás már kihat az egész földi rendszerre. A kényszer- és tudatlanság-szülte *rablógazdálkodás* nem veszi figyelembe az *ökológiai rendszerek terhelhetőségét, önmegújító-képességét*, sokszor maradandó károkat okoz bennük. Úgy tűnik tehát, hogy a Föld megújulni képes *agrárprodukcója* bőségesen elegendő lehetne a jelenlegi 6,5 milliárd ember számára, de a mezőgazdasági termelés földrajzi megoszlásának különbségei, annak színvonalbeli eltérései, a természeti viszonyokhoz nem alkalmazkodó államhatárok, a szállítási nehézségek és egyéb kedvezőtlen gazdasági adottságok regionális konfliktusokat eredményeznek a népesség szükségletei és a természeti környezet között.

A jövőre nézve változhat-e a földi környezet eltartóképessége?

A szakemberek túlnyomó része határozottan állítja, hogy a mezőgazdaság a 2050-re várható 8 milliárd lakos számára nagy biztonsággal meg fogja termelni a szükséges élelmiszert. Ezt a becslést elsősorban arra alapozzák, hogy a *géntechnika* egy új zöld forradalmat fog megalapozni, s emellett a mezőgazdasági kutatás legújabb eredményei, a magasabb szintű, ún. *integrált növényvédelem*, a jelenleginél jobban szabályozható tápanyagellátás akár meg is duplázhathatja az átlagos terméshozamokat. Azt is látnunk kell azonban, hogy a géntechnika terjedését számos ország akadályozza, az így manipulált élelmiszerek potenciális egészségi kockázataira hivatkozva.

A terméshozam egyre feljebb tornászásának környezeti hatásai csak részben ismeretesek. A talaj nagyon sok helyen – különösen a trópusokon, ahol a termés növelésére a legnagyobb szükség van – az erózió áldozatául esett. Ez beszűkítette a növénytermesztés lehetőségeit.

Az egyik legnagyobb probléma mégiscsak az, hogy a *terméshozamok* és az élelmiszer-termelés országonkénti mennyiségei *rendkívül egyenlőtlenül oszlanak el*. Azok az országok (s ezek többsége Afrikában van), amelyek már most is súlyos élelmiszerhiánnyal néznek szembe, szegénységük, fejletlen agrotechnikai módszereik és alacsony színvonalú ipari termelésük miatt

hosszú távon sem lesznek képesek lényegesen növelni mezőgazdasági termelésüket. A fejlett országokban pedig, ahol stabilizálódott a lakosság lélekszáma, s a jövőben inkább népességcsökkenésre lehet számítani, a magas színvonalú agrárgazdaság lényegesen több termés előállítására képes, mint amennyire szükség van. Ezekben az országokban tehát túltermelés jellemző (hazánk is ebbe a kategóriába tartozik), de a többletermést csak azokba az országokba szállítják, amelyek fizetőképesek. Márpedig a legrosszabb helyzetben lévő államok erre nagyon korlátozottan tudnak pénzt fordítani.

A szegény országok népességének további gyors szaporodása a jövőben még tragikusabb élelmezési helyzetbe hozhatja ezeket a régiókat, mint ahogy ma látjuk őket. Így például Nigéria jelenlegi 111 milliós lakossága 2050-re 244 millióra nőhet, ami a gabonaföldek 1 főre jutó méretét 0,15 hektárról 0,07 hektárra csökkenti. Mivel ezek túlnyomórészt félszáraz és jelenleg öntözetlen területeken vannak, csak a gazdasági fejlődés, az öntözőrendszer kiépítése segíthet az országon. Mérsékelné az ellátás gondjait, ha a népesség növekedésének ütemét lassítani lehetne.

Pakisztánban már ma is nagyon kicsi (0,08 hektár) az egy főre jutó gabonaterület, s ha a lakosság gyarapodása ugyanolyan gyors marad, mint jelenleg, akkor ez 2050-re 0,03 hektárra csökkenhet, ami vészesen kevés a népesség normális ellátásához.

Hasonló gondokkal fog küzdeni a jövőben India, ahol 2050-re további félmilliárddal nőhet a lélekszám és Banglades, amely már jelenleg is túlnépesedett, de területén továbbra is gyors szaporodási ütemre lehet számítani, ami súlyosan lecsökkenti a jelenleg is 1 hektár alatti átlagos birtokméretet, s ez drámai helyzetet teremthet az élelmiszerellátásban.

A szegény országokban a lélekszám növekedése mellett a másik nagyon súlyos probléma a *vízhiány*. Tudjuk, hogy a legnagyobb vízhasználó a mezőgazdaság, s a termés hozamok növeléséhez öntözésre van szükség. A Föld globális vízkészletei elegendők lennének a 8 milliárd ember ellátásához is, de a vízkészletek eloszlása nagyon egyenlőtlen, s a szegény országok jelentős része félszáraz vagy száraz környezetben terül el, ahol az öntözéshez nagy mennyiségű vízre lenne szükség. A 33. táblázat azokat a régiókat mutatjuk be, ahol már napjainkban is vízellátási problémák vannak, s ezek várhatóan súlyosbodni fognak. Figyeljük meg, hogy a népesség növekedésének üteme milyen gyors lesz ezekben az országokban: 32–71 százalékkal gyarapodik majd a lakosság. Az abszolút számok a Gangesz vízgyűjtő területén a legnagyobbak: itt 25 év alatt csaknem 500 millió lakossal gyarapodik a vízhasználók száma. A táblázatban nem szerepel, de Kína szintén jelentős vízhiánnyal küzd, és ez ugyancsak fokozódni

fog. Tervek szerint ezt úgy igyekeznek enyhíteni, hogy a bővizű Jangce vízének egy kisebb részét (kb. 5 százalékát) az északi szárazabb tartományokba vezetik.

33. táblázat. Lélekszám a vízmegosztási küzdelem egyes forró pontjain 1999-ben, 2025-re szóló előrejelzésekkel (A világ helyzete 2000 nyomán)

Vízgyűjtő/Ország	Össznépesség 1999 (millió)	Előrejelzés 2025-re (millió)	Változás (százalék)
Aral-tó Kazahsztán, Kirgízia, Tadzsisztán, Türkmenisztán, Üzbegisztán	56	74	+32
Gangesz Banglades, India, Nepál	1137	1631	+43
Jordán Gáza, Izrael, Jordánia, Libanon, Szíria, nyugati part	34	58	+71
Nílus Burundi, Kongói Demokratikus Közt., Egyiptom, Eritrea, Etiópia, Kenya, Ruanda, Szudán, Tanzánia, Uganda	307	512	+67
Tigris-Eufrátesz Irak, Szíria, Törökország	104	156	+50

McRae, H. (1996) a következő okokkal magyarázza a várhatóan egyre súlyosbodó vízhiányt: a világ élelmiszer-termeléséhez elengedhetetlen további területek öntözéses megművelése, a fejlődő világ városi népességének növekedése a vízkészletek nagymérvű növelését teszi szükségessé,

a készletnövelés bevett módszere – további duzzasztók építése – súlyos környezeti következményekkel jár, melyeket még csak most kezdünk teljesen felmérni. A föld legtöbb gátépítésre alkalmas helyét egyébként is már kihasználtuk,

ahol a folyók államhatárokon át folynak, ott az érintett országok – akár a szomszédjuk kárára is – megkaparintanak, amit csak lehet.

A víz mezőgazdasági használatához szakértelemre van szükség. Ismerni kell kémiai összetételét, annak a talajnak a tulajdonságait, amelyre kiöntözik, a talajvíz mozgásait és az

éghajlati viszonyokat. Ha ezekkel tisztában van a szakember, akkor eldönti, hogy milyen és mennyi vízzel, melyik időpontban és mennyi ideig lehet öntözni az adott területen. Sok helyen nem veszik figyelembe ezeket a körülményeket, és a tudatlanság megbosszulja magát. Felmérések szerint pl. Pakisztán mezőgazdasági művelés alatt álló földjeinek egynegyede ment tönkre a *másodlagos szikesedés* (sós talajok antropogén képződése) miatt. Ez a folyamat komoly gondot jelent Indiában, Kínában és Egyiptomban is, és a jövőben az elszikesedő területek kiterjedése várhatóan nőni fog.

A szárazföldi élelmiszer-termesztés korlátai miatt nagyobb figyelmet kell fordítani a jövőben a halászatra és a haltenyésztésre. Habár a tengeri halászat intenzitása elérte a tetőpontját, az eddiginél ésszerűbb, összehangoltabb halfogás, sőt egyes halfajok átmeneti halászati tilalma és a halpopulációk regenerálódásához szükséges halászterületek ideiglenes zárlata később az összes fogás mennyiségét növelné is.

A fogyasztók tudatossága és aktivitása segíthet a fenntartható halászat kialakításában. McGinn, A. P. (1998) beszámol arról, hogy a 80-as évek végén az amerikai fogyasztók bojkottálták a konzerv tonhal vásárlását, és ez rákényszerítette a halászokat a túlhalászás elkerülésére és a tonhallal együtt kifogott delfinek megvédésére. A szerző arra a következtetésre jut, hogy „a globális halászterületek jövője azokon a fogyasztókon állhat, akik fenntartható módon előállított haltermékeket vásárolnak, akik megkérdezik, honnan származik egy hal és hogyan tenyésztették...” A fogyasztók tájékoztatásában segítenek az ökocímkék, de kérdéses, hogy mennyi időnek kell eltelnie ahhoz, hogy a vásárlói öntudat és cselekvőképesség globális eredményre vezessen.

Reálisabbnak látszik a haltenyésztés hozamainak további növelése, mivel ez már eddig is sikeresnek mondható. Erősen kétséges azonban, hogy a haltenyésztés képes lesz majd kompenzálni azt az élelemhiányt, ami a szegény országokban az elkövetkezendő évtizedekben várható.

Nézzük meg ezek után számszerűen, hogy a jövőkutatók milyen adatokat közölnek a Föld jövőbeli eltartóképességét illetően!

A becslések legnagyobb része 8–16 milliárdra teszi az eltartható emberek számát, néhány demográfus azonban 2 milliárd körülire.

Ha az embert emberi méltósága szerint becsüljük, és társadalmi lényként kezeljük, akit nemcsak „abrakkal kell ellátni”, hogy létezzen, hanem vannak tanulási, kulturális, utazási, üdülési és sportigényei is, akkor erősen megkérdőjelezhető akár a 8 milliárdos eltartóképesség is. Vester, F. (1982) közli egy olyan számítás eredményét, amelynek kiinduló feltételezése az volt, hogy a

Föld minden lakója az egyesült államokbeli átlagos életszínvonalon él (70-es évek!). Ebben az esetben a Föld erőforrásai csak 2 milliárd ember számára volnának elegendők. Sokan vélekednek úgy, hogy az emberiség lélekszáma már most is meghaladta az optimális szintet.

Sajnos, az eltartóképesség globális becslése nem elegendő a jelenlegi és várható helyzet értékeléséhez, mivel rendkívül nagy regionális különbségek alakultak ki bolygónkon.

A túlszaporodó és/vagy politikailag instabil országokból az elkövetkező évtizedekben egyre fokozódó népességáradat indul meg a fejlett világ felé. Ez a folyamat már ma is zajlik: gondoljunk az Európai Unióban is megfigyelhető egyre fokozódó bevándorlásra, vagy a hazánkba érkező menekültekre. De nagy befogadó az amerikai Egyesült Államok is.

A következő 20 évben kb. 1400 millióval lesznek többen a fejlődő világban. Ha csak tíz százalékuk gazdasági menekültként a fejlett világban keres munkát, ez 140 millió főt jelent. Nehezen hihető, hogy ennyi embert befogadjanak a gazdag országok, bár ha befogadnák őket, az sem jelentene megoldást a szegényebb országok számára, sőt tragikus következményei lehetnének. A fejlett világ ugyanis azokat fogadja be leginkább, akik képzettek, hasznos tagjai lehetnek az új hazájuknak. A legmagasabban kvalifikáltak távozása a szegény országokból még sötétebb nyomorba taszítaná az otthon maradottakat. De növelné a társadalmi feszültségeket a befogadó országokban is. Valószínű, hogy a menekültek számának gyarapodásával a velük szembeni ellenállás is fokozódni fog. Európa viszonylag nehezen fogadja be a bevándorlók tömegét, így Észak-Amerika (elsősorban az Egyesült Államok) számíthat jelentős menekülthullámra a jövőben.

2.8. A kontinensek természeti környezetének mozaikos felépítése: a természeti és kultúrtájak. Gazdálkodás a tájak természeti potenciáljával

Kerényi Attila, Debreceni Egyetem

2.8.1. Alapismeretek a tájakról

Kerényi Attila, Debreceni Egyetem

2.8.1.1. Táj, természeti táj, kultúrtáj

A sokféle tájfogalom közös elemeit összefoglalva az alábbi meghatározást fogadjuk el.

A táj a földfelszín (geoszféra) sajátos arculatú része, önálló individuum, olyan térbeli egység, amelynek alapvető tulajdonságai és határai természeti folyamatok eredményeként alakultak ki, egyszersmind az emberi tevékenységek hatására többé-kevésbé módosultak. Működésére, formálódására jellemző a tájalkotó tényezők sokrétű kölcsönhatása, ugyanakkor funkcionális egysége. A táj időbeli változásai (hosszú természettörténet és rövid, de intenzív antropogén tájformálás) ugyancsak egyediek, vagyis csak reá jellemző a táj sajátos története.

A definícióban a földfelszín (geoszféra) kifejezés magyarázatra szorul. Itt ugyanis nem egy szilárd *felületről* van szó, hanem a **földrajzi burok** alkotórészeinek egységéről, amelyek azonban a földfelszínen sajátos formákban jelennek meg. Vagyis a táj arculatát a felszínre bukkanó **kőzetek**, a kőzeteken képződő **talajok**, a talajokon tenyésző **növények**, a litoszféra által meghatározott **domborzat**, a felszínen mozgó és a mélyedésekben megálló, bár nem mozdulatlan **vizek**, továbbá az **emberi létesítmények** és **tevékenységek** közösen határozzák meg és adják a táj egyedi jellegét. A földrajzi burok ezen alkotói egyszersmind a **tájalkotó tényezők** is, kiegészítve a táj működését „láthatatlan” módon, többnyire közvetve befolyásoló tényezőkkel. Ilyen a **levegő** mint szállító közeg, melynek hatása már láthatóvá válik a szél eróziós és akkumulációs tevékenysége révén, sőt kémiai összetételének változásai (szennyező gázok) hatással vannak az élőlényekre, a talajra, sőt az emberi építményekre is, és súlyos esetekben ez akár a tájkép megváltozásához is *vezethet* (pl. erdőpusztulást okozhat). A levegő mozgásai erősen befolyásolják az időjárást, sőt hosszabb távon a **klímát**, mindez pedig a tájakat.

Bár az előzőekben csak a növényeket említettük, hisz azok a táj legfeltűnőbb – tájképet meghatározó – élő alkotói, nem szorul bővebb magyarázatra, hogy a tájban előforduló

valamennyi élőlény hatással van a geoszféra működésére, mivel az **élővilág** anyagcseréje révén módosítja környezetét.

A felszínre bukkanó kőzetek kialakulása hosszan tartó geológiai folyamatok eredménye, így tájtényezőként a **geológiai adottságokat, folyamatokat** (tektonizmus, vulkanizmus) jelölhetjük meg.

Mint láttuk, a **táj** fogalom jelző nélküli használata magában foglalja a természeti tényezőket és a társadalom építményeit, tevékenységeit is. Emellett azonban használhatjuk a **természeti táj** fogalmát is. Ennek legegyszerűbb értelmezése az ember nélküli táj lehetne, vagyis olyan táj, amelyben sem emberi létesítmény, sem emberi hatás nem létezik. Azt azonban tudjuk, ha ezeket a kritériumokat szigorúan vesszük, gyakorlatilag sehol a Földön nem találunk ilyen tájat. Elég csak arra utalnunk, hogy a légkörbe juttatott antropogén szennyeződések már mindenhol eljutottak, sőt az ember a maga alkotta eszközeivel bolygónk legtávolabbi zugait – a mélytengerektől a magaslégkörig – is „meghódította”.

Létezik azonban ennél engedékenyebb értelmezés is, és a továbbiakban erre szükségünk lesz. **Természeti tájnak** nevezzük azt a tájat, melynek domináns részein csak a természetes tájtényezők hatnak, lényeges tulajdonságait és folyamatait az emberi tevékenységek nem változtatták meg, benne természetes folyamatok eredményeként kialakult ökoszisztémák működnek.

Miután az ember szinte az egész Földet (legalábbis a szárazföldeket) „belakta”, még ezek a feltételek sem sok helyen teljesülnek. Néha a látszat szerint természetesnek tűnik egy-egy táj, fejlődéstörténetének, múltjának megismerése azonban rávilágít antropogén jellegére. Ilyen pl. a mediterrán vidék tájainak túlnyomó része, ahol az ókori erdőirtások s azokat követő, ill. kísérő talajpusztulás máig nem tette lehetővé, hogy az eredeti táj regenerálódjon. De ilyen a mi Hortobágyunk is, amely mai formájában egyrészt a 19. századi folyószabályozás, másrészt a rendszeres legeltetés hatására alakult ki. Ugyanakkor az sem tagadható, hogy sok, korábban durva beavatkozással kialakított tájban – amennyiben hosszú ideje megszűnt a zavaró emberi tevékenység – tartósan természetes folyamatok hatnak, és a táj, némileg módosulva ugyan, de természetes úton regenerálódik. Az ilyen tájban az „ember előtti” állapothoz képest ugyan más ökoszisztémák alakulnak ki, de a természetes folyamatok dominanciája nem tagadható. Ezeket a tájakat **természetközeli tájaknak** nevezhetjük.

Mindebből látszik, hogy az emberi hatások nagyon különböző mértékűek lehetnek, s a tájak természetességi foka e hatásokra fokozatosan csökkenhet. Sajnos, nincs abszolút objektív kritériuma annak, hogy meddig nevezhető egy táj természetinek (természetesnek), és mikor

szükséges természetközelinek minősíteniük. Általában elmondható, hogy Európában a nagy népsűrűség és beépítettség, továbbá az intenzív termelés és fogyasztás hatására alig fordul elő természeti táj, a védett területek többsége is inkább természetközelinek minősíthető.

Itt meg kell említenünk, hogy a hazai jogszabályokban (így pl. a természetvédelmi törvényben) használják a **természeti terület** fogalmát. Ez jogi kategória, és *olyan területet jelöl, „amelyre a természeteshez hasonlító körülmények, természetközeli állapotok jellemzőek”*. Természeti területté csak meghatározott művelési ágú területek minősíthetők. Így pl. az erdők, gyepek, nádasok és a művelés alól kivett egyéb területek, ha „nem építmény elhelyezésére szolgálnak, nem állnak bányaművelés alatt, továbbá mező- és erdőgazdasági hasznosításra alkalmatlanok”. Mint látjuk, a jogi megközelítés tudományos szempontból kissé felületes („természeteshez hasonló körülmények”), másrészt azonban a tételes felsorolással igyekszik egyértelmű helyzetet teremteni, hogy mely területek tartozhatnak a „természeti terület” kategóriába.

Visszatérve a tudományos gondolatmenethez, az emberi tevékenységek tájformáló hatásainak fokozódása oda vezethet, hogy a tájkép formálódásában és a tájban lejátszódó folyamatokban egyaránt meghatározó szerepet játszik a társadalom. Az így alakított tájat *kultúrtájnak* nevezzük, s kritériumait az alábbiak szerint foglalhatjuk össze.

„Kultúrtáj a földfelszínnek az intenzív és célszerű emberi tevékenységgel létrehozott és fenntartott olyan területi egysége, amit a növény- és állatvilággal, valamint az emberi tevékenységgel együtt a geológiai, a talajtani, a domborzati, az éghajlati és a vízviszonyok határoznak meg” (Környezet- és természetvédelmi lexikon, 2002).

A kultúrtájat tehát a természeti tájból a társadalom alakítja ki, és az emberi tevékenységek tartják fenn. A természeti tényezők továbbra is hatnak a tájra, de ezeket a hatásokat az ember módosítja. Így például a csapadékvíz a lejtőkön eróziót okoz. Ennek mértéke azonban nagyban függ attól, hogy a lejtőn milyen növényt termesztenek, használnak-e talajvédelmi eljárásokat, biztosítják-e a felszínen lefolyó víz elvezetését, vagy pedig az adott lejtőn meghagyják az esetleg ott tenyésző természetközeli erdőt. Ezek az emberi tevékenységek meghatározzák a kultúrtáj jellegét. DK-Ázsiában pl. a meredek lejtőkön kialakított teraszok s az ezeken megművelt rizsföldek jellegzetesek. Más esetben az emberi építmények, létesített parkok akár a tájrészlet pontos helyszínét is azonosíthatóvá teszik.

Fontos hangsúlyoznunk, hogy a kultúrtájat az emberi tevékenységek tartós hatása tartja fenn. A kultúrtájak sorsa hosszú távon háromféle irányt vehet.

1. Ha az emberi tevékenységek intenzitása mérsékelte, és idővel sem változik lényegesen, beáll egy *kvázi-egyensúly a természeti folyamatok és az emberi hatások között*.

Ilyen esetben a kultúrtáj évezredekken át zavartalanul működhet, a tájkép természeti és antropogén jellemzői tartósan megmaradnak. Az említett ázsiai példában az erózió nem mossa le a talajt, nem teszi pusztasággá a lejtőt, ugyanakkor a teraszok egyértelműen tükrözik a táj jellegét.

2. Ha az ember valamilyen okból *felhagy a táj hasznosításával*, a természeti tényezők a táj eredeti adottságainak megfelelően működnek, beindulnak a természetes szukcessziós folyamatok, és a kultúrtájból – hosszútávon – **másodlagos természeti táj** lehet.

Ez a tájváltozási folyamat ma már viszonylag ritka, és kis területen érvényesülhet. Ennek az oka, hogy az emberiség lélekszáma a 20. század folyamán négyszeresére nőtt, és a 21. században, bár mérsékeltebb ütemben, de tovább nő, így csak sajátos társadalmi viszonyok között fordulhat elő, hogy egy-egy tájrészletet hasznosítatlanul hagy az ember. Ilyenek lehetnek pl. a fejlett országokban az elnéptelenedő vidéki térségekben, ahol a hegyi legelőket, kaszálókat felhagyják, s azok fokozatosan beerdősülnek. (Szlovákiában a Bélai-Tátra és a Magura, nálunk a Zempléni-hegység stb.) A múltban azonban ez a természetes tájregenerációs folyamat több helyen és többször is bekövetkezett. Európában pl. a 14. században több hullámban pusztító pestisjárvány helyenként teljesen elnéptelenedett településeket hagyott maga mögött, s ezek határában a természetes folyamatok viszonylag gyors ütemben indultak be: az erdők terjeszkedtek, a korábban szántóföldi művelésbe vont területek visszaszorultak. A kultúrtáj „elvadult”, másodlagos természeti tájjá formálódott. Ez a folyamat azonban nem tarthatott évszázadokig, mert a népesség újbóli növekedésével ismét szükség lett a felhagyott területekre.

3. Abban az esetben, ha az *emberi tevékenységek egyre intenzívebbé válnak* a kultúrtájban, *bekövetkezhet annak degradációja*. Ez többféle módon játszódhat le. Ha pl. jelentős ásványkincs (vagy ásványkincsek) nagy készleteit tárják fel egy tájban, s a nagy tömegű anyagot helyben kívánják feldolgozni, látványos tájdegradáció lesz az eredmény. Óriási bányagödrök és meddőhányók változtatják meg a korábbi kultúrtáj képét és pusztítják el az ott még létező természetközeli élővilágot, élőhelyével együtt. A megépülő nehézipari üzem nemcsak a telephelyével, hanem a környezetébe juttatott szennyező anyagaival is degradálja a tájat.

Más jellegű emberi tevékenységek is tájdegradációhoz vezethetnek. A különlegesen intenzív mezőgazdálkodás kevésbé látványos következményekkel járhat. A monokultúrás növénytermesztés s az ennek során alkalmazott nagy dózisú műtrágyázás, valamint növényvédőszer-használat a táj biológiai diverzitását drasztikusan lecsökkenti. Az intenzív

vegyszerhasználat és a gépesítés a környezetszennyezéshez is hozzájárul. A táj „homogenizálása” olyan mértékűvé válik, hogy azt már a mozaikos kultúrtájhoz képest is degradált tájnak kell minősítenünk.

2.8.1.2. A természeti tájak hierarchikus felépítése

A tájak legjellemzőbb tulajdonságai közé tartozik a mozaikosság. A táj arculatát a felszínre bukkanó kőzetek, a kőzeteken képződő talajok, a talajokon tenyésző növények, a litoszféra által meghatározott domborzat, a felszínen mozgó és a mélyedésekben megálló, bár nem mozdulatlan vizek, továbbá az emberi létesítmények és tevékenységek közösen határozzák meg és adják a táj mozaikos szerkezetét, egyszersmind egyedi jellegét. Ezeknek a tájtényezőknek a térképi ábrázolásával, majd a térképek szintézisével világossá válik, hogy léteznek a tájban olyan elemi alkotórészek, amelyek tovább nem oszthatók anélkül, hogy elvesztenék komplex jellegüket.

Az elemi tájrészleteket **ökotopoknak (tájsejteknek)** nevezzük. Funkciójukat úgy kell elképzelni a tájban, mint a sejtek funkcióját egy magasabb rendű szervezetben. A sejtek szöveteket, a szövetek szerveket, a szervek szervrendszereket alkotnak, végül a szervrendszerekből felépül az egész szervezet. Ehhez hasonlóan épül fel a táj is. Az egymással nem teljesen azonos tulajdonságú, de sok közös vonással rendelkező tájsejtek nagyobb egységet képeznek a tájban. Ezt a szintet a német szakirodalom alapján **nanochornak** nevezzük. Magyar megfelelője a **tájsejt-együttes (34. táblázat)**.

A táji hierarchia e két legalsó szintje még nem mutat az adott tájra a maga komplexitásában jellemző vonásokat, hisz egy-egy ökotop lehet, hogy csak néhány száz m² -es egység, s esetleg a nanochor kiterjedése sem haladja meg a néhány ha-t. (A topikus és chorikus dimenzióhoz tartozó méretek nagyban függenek a táj jellegétől: egy kiterjedt síkságon valószínűleg sokkal nagyobb elemi egységeket térképezhetünk, mint egy változatos domborzatú hegyvidéken.)

A nanochorok feletti hierarchiaszint a **mikrochor = tájrészlet**.

Ez az a szint, amely már az adott táj főbb tulajdonságait a tájképben is magán viseli. Ilyen pl. a Tokaj-Zempléni-hegyvidéken elhelyezkedő Bodrogkeresztúri-félmedence. Ez a mindössze 9 km²-es tájrészlet mind geológiai felépítésében, mind domborzatában és egyéb tulajdonságaiban hordozza a hegység számos, meghatározóan fontos adottságát, beleértve a hegylábhoz simuló településeket is.

A **mezochor** = **kistáj** a hasonló tájrészleteket magában foglaló egység. Előző példánkat tovább folytatva: a *Hegyalja* több olyan tájrészletből épül fel, mint a Bodrogkeresztúri - félmedence. (A nemzeti atlaszban a hazánk természeti tájainak rendszertani felosztását bemutató térképlap ábrázolja tájaink hierarchikus felépítését. E térkép széles körben használatos, és ugyanezeket a kistájneveket találjuk a Magyarország kistájainak katasztere c. műben is [MAROSI-SOMOGYI, 1990]. Meg kell azonban jegyeznünk, hogy a nemzeti atlasz tájbeosztásával és tájneveivel szakmai körökben többen nem értenek egyet, azok egy részét „mesterségesnek”, sőt „mesterkéltnek” tartják. Mivel azonban hazánkról más, elfogadottabb és jobb „tájrendszer-térkép” mindaddig nem készült, megmaradunk ennél.)

34. táblázat. A táj hierarchiaszintjei

Nemzetközi megnevezés	Magyar megnevezés	Magyarország nemzeti atlasza	Példa
Ökotop	Tájsejt	–	Homogén adottságú élőhely Pl. D-i kitettségű 10°-os lejtőszakasz homogén talajviszonyokkal
Nanochor	Tájsejt-együttes	–	D-i kitettségű lejtő változó lejtés- és talajviszonyokkal
Mikrochor	Tájrészlet	–	Bodrogkeresztúri-félmedence
Mesochor	Kistáj	Mikrorégió	Hegyalja
Makrochor	Kistáj-csoport	Szubrégió	Tokaj-Hegyalja
Szubrégió	Középtáj	Mezoregió	Tokaj-Zempléni-hegyvidék
Régió	Nagytáj	Makrorégió	Észak-magyarországi-középhegység
Nagy régió	Nagytáj-csoport	–	Kárpát-medence

A kistajak (Hegyalja, Szerencsi-dombság, Tokaji-hegy) **kistájcsoportha** = **makrochorba** rendeződnek és *Tokaj-Hegyalját* alkotják.

A következő hierarchia-szint a **szubrégió** = **középtáj**. Példánkban ez a *Tokaj-Zempléni-hegyvidéket* jelenti, amely Tokaj-Hegyalján kívül a Hegyközt és a Zempléni-hegység kistájcsoporthat foglalja magában.

Hazánk **nagytájai** (**régiói**) Magyarországon a táji hierarchia-szintek csúcsán állnak. A Tokaj-Zempléni-hegyvidék az Észak-Magyarországi-középhegység nagytájunkhoz tartozik. Meg kell

jegyeznünk, hogy a nemzetközi tájföldrajzi irodalomban leggyakrabban használt régió kifejezés nemcsak nagytáj értelemben használatos, hanem társadalomföldrajzi régiókra is. A hazai régiók (É-Alföld, D-Alföld stb.) ugyancsak társadalomföldrajzi-közigazgatási értelemben használatos. Éppen ezért erre a hierarchia szintre a magyar *nagytáj* fogalmat használjuk a továbbiakban.

Országhatárainkon túl tekintve a **nagytáj-csoport (nagy régió)** is megemlítenéd, mint már egy kontinentális jelentőségű hierarchia-szint, s erre példa a *Kárpát-medence*. Tájvédelmi szempontból sülysgéttelennek tartjuk a táji hierarchia további, magasabb szintjeinek taglalását, hisz a tájvédelem gyakorlati megvalósításában különösen az alsó hierarchia-szinteknek van jelentőségük. Mi ennek a magyarázata?

A tájak kezelésében, fenntartásában vagy éppen tönkretételében azok kíméletes vagy kíméletlen hasznosítása, az emberi tevékenységek különböző mértékű szabályozása játszik meghatározó szerepet –adott esetben akár egyes tevékenységek teljes megtiltásával is. Ahhoz pedig, hogy egy tájban mely tevékenységek folytathatók korlátozás nélkül, melyeket kell mérsékelni vagy akár tiltani, ismernünk kell a táj mozaikos felépítését, sőt az egyes tájsejtek tulajdonságait, terhelhetőségüket is. A részletes tájanalízis az ökotopoktól a tájrészletekig, esetleg a kistájakig terjedő szinteken mozog. A gyakorlati tapasztalat azt mutatja, hogy az országos kistájataszter információbázisa sem elegendő egy-egy kistáj struktúrájának és működésének kellő mélységű megismeréséhez.

Tehát ahhoz, hogy hatékony tájvédelmi tervet készíthessünk, s megfelelő tájvédelmi intézkedéseket hozzunk, nem utolsósorban környezetkímélő módon gazdálkodhassunk egy kistájban, a meglévő ismeretanyagon túl az ökotopokig „lehatoló” kutatásra, egzakt vizsgálatokra van sülygség. A tájsejtek meghatározása/térképezése a kutatás során úgy történik, hogy nagy felbontású geomorfológiai talaj-, mikroklíma- stb. térképeket készíttünk, s ezek segítségével körülhatároljuk a morfotopokat, a pedotopokat, a klímatopokat stb., vagyis mindazokat a homogén területegységeket, amelyek alapján elkészíthető az ökotop-térkép. E munka során számos mérési adatot nyerünk a tájalkotó tényezőkről, amelyek ugyancsak informatívak lehetnek a tájvédelemben. A talajtérkép készítése során pl. meghatározzuk a talajok pH-ját, így kirajzolódnak azok a pedotopok, amelyek savanyú kémhatásúak, ezért a savas fiziológiai hatású műtrágyák alkalmazása azokon a területeken kerülendő.

Persze a magasabb hierarchiaszinteknek is megvan a tájvédelmi jelentőségük. Ezt röviden abban fogalmazhatjuk meg, hogy a kistájak szintjén tervezett tájvédelmi intézkedések összehangolásához azok a közös táji adottságok nyújtanak támpontokat, amelyek alapján a

nagyobb tájegységeket meghatároztuk. A nagytáji szintézis az országos tervezéshez nélkülözhetetlen, a nagytáj-csoportok védelmének összehangolása pedig már nemzetközi egyeztetéseket igényel. Tananyagunkban a nagytájak és középtájak szintjén foglalkozunk a tájhasználat kérdéseivel.

2.8.1.3. Hazánk tájtípusai

Magyarország Nemzeti Atlaszában feltüntetett **tizennégy tájtípus négy nagyobb csoportba rendezhető** (JAKUCS P. – KERESZTESI Z. – MAROSI S. – PÉCSI M. – SOMOGYI S. 1989).

Mérsékelt kontinentális síkság, uralkodóan mezőgazdaságilag hasznosított tájtípusok

Ártéri síkság, magas talajvízállású, hidromorf talajú kultúrsztyeppes tájtípus

Ártéri síkság, uralkodóan közepes talajvízállású, réti-mezőségi talajú kultúrsztyepp

Medencebeli löszös síkság, mezőségi talajú kultúrsztyepp

Futóhomokos hordalékkúp-síkság, szőlő-gyümölcs és erdőmozaikos kultúrsztyepp, közepes és mély talajvízállással

Medenceperemi hordalékkúp-síkság, sűrű vízhálózatú, mozaikosan cseres-tölgyerdő-maradványos, mezőségi és erdőtalajú kultúrsztyepp

A fenti tájtípusokon belül a vízháztartás, a talajtípusok, a domborzati adottságok különbségei alapján az öt síksági tájtípuson belül további tizennyolc altípust különítettek el.

Eróziós dombságok, uralkodóan mező- ill. erdőgazdasági – lokálisan ipari – jellegű tájtípusok

Eróziós és deráziós völgyekkel tagolt hegyláb felszínek és dombságok, szőlő-gyümölcsös ill. cseres-tölgyerdő-mozaikos kultúrsztyepp, mély talajvízállással (a Dunántúli-dombságon mérsékelt meleg és száraz szubmediterrán, az Észak-magyarországi-középhegységben mérsékelt hűvös és száraz szubkontinentális éghajlati hatás alatt)

Eróziós és deráziós völgyekkel tagolt önálló dombságok, többnyire mély talajvízű kultúrmezőség, szőlőkkel, kevert erdők jelentősebb maradványaival (a Kárpát-medencebeli helyzetüktől függően különböző éghajlati hatások – mérsékelt meleg és mérsékelt száraz szubmediterrán, mérsékelt meleg és mérsékelt nedves szubatlanti, mérsékelt hűvös és nedves szubatlanti és szubalpi, mérsékelt nedves és mérsékelt nedves szubmediterrán – érvényesülnek.)

Hegységbeli kisebb medencedomságok, cseres-tölgyerdő-maradványos, mély talajvizű kultúrsztyeppék (a Kárpát-medencebeli helyzetüktől függően különböző éghajlati hatások – szubkontinentális ill. szubatlanti – alatt állnak)

A dombsági tájtípusok tizennégy altípusát éghajlati adottságaik, talajképző közeteik és talajaik, valamint völgyekkel való tagoltságuk alapján különítik el egymástól.

Középhegységi, erdős tájtípusok

Alacsony középhegységek, uralkodóan szubkontinentális éghajlati hatás alatt, cseres- (és gyertyános) tölgyerdők (650 m tszf.-i magasság alatti) tájtípusa

Alacsony középhegységek, szubatlanti és szubmediterrán éghajlati hatást is viselő cseres- és gyertyános tölgyesek tájtípusa

Alacsony középhegységek, főként szubatlanti és éghajlati hatás alatt álló erdőségekkel

Középhegységek hűvösebb-nedvesebb bükkerdős tájtípusa Észak-Magyarországon

A középhegységi erdős tájtípusokon belül – mindenekelőtt a felépítő kőzetekben és talajtani viszonyokban mutakozó eltérések alapján – további kilenc altípus különíthető el.

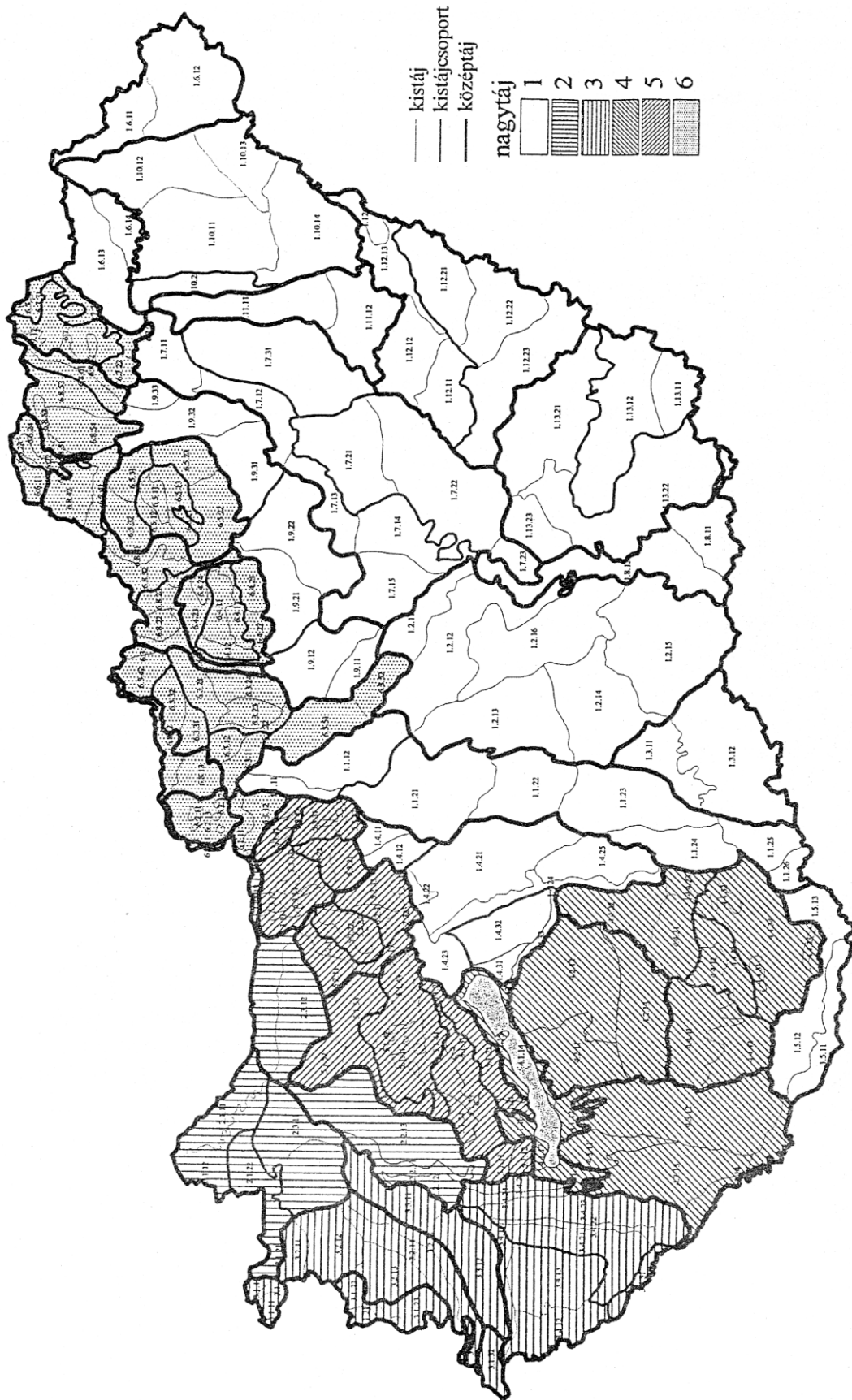
Néhány sajátos tájtípus

Jelentősebb völgyek különböző dombsági és hegységi tájtípusokon belül

Tavi-tókönyéki típus

A IV. csoporton belül a közettani és egyéb táji adottságok különbségei alapján további négy altípust határoztak meg.

Magyarország hat nagytája – Alföld, Kisalföld, Nyugat-magyarországi peremvidék, Dunántúli-dombság, Dunántúli-középhegység, Észak-magyarországi-középhegység – a táji hierarchiában elhelyezve a Kárpát-medence nagytájcsoportjába sorolható. A hat nagytájon belül harmincöt középtáj, hatvanegy kistájcsoport és kétszázharminc kistáj különíthető el (MAROSI S. – SOMOGYI S. 1990).



114. ábra. Magyarország tájai

Jelmagyarázat:	
1 Alföld	1.4.31 Enyingi-hát
1.1 Dunamenti-síkság	1.4.32 Kálóz-Igari löszhátak
1.1.1 Pesti-síkság	1.4.33 Sió-völgy
1.1.11 Vác-Pesti-Dunavölgy	1.5 Drávamenti-síkság
1.1.12 Pesti hordalékkúp-síkság	1.5.11 Dráva-sík
1.1.2 Csepel-Mohácsi-síkság	1.5.12 Fekete-víz síkja
1.1.21 Csepeli-sík	1.5.13 Nyárári-Harkányi-sík
1.1.22 Solti-sík	1.6 Felső-Tiszavidék
1.1.23 Kalocsai-Sárköz	1.6.11 Beregi-sík
1.1.24 Tolnai-Sárköz	1.6.12 Szatmári-sík
1.1.25 Mohácsi-sziget	1.6.13 Bodrogek
1.1.26 Mohácsi teraszos sík	1.6.14 Rétköz
1.2. Duna-Tisza közti síkvidék	1.7 Közép-Tiszavidék
1.2.11 Gerje-Perje-sík	1.7.1 Közép-Tiszai-ártér
1.2.12 Pilis-Alpári-homokhát	1.7.11 Taktaköz
1.2.13 Kiskunsági-homokhát	1.7.12 Borsodi-ártér
1.2.14 Bugaci-homokhát	1.7.13 Hevesi-ártér
1.2.15 Dorozsma-Majsai-homokhát	1.7.14 Szolnoki-ártér
1.2.16 Kiskunsági-löszöshát	1.7.15 Jászság
1.3. Bácskai-síkvidék	1.7.2 Nagykunság
1.3.11 Illancs	1.7.21 Tiszafüred-Kunhegyesi-sík
1.3.12 Bácskai löszös síkság	1.7.22 Szolnok-Túri-sík
1.4 Mezőföld	1.7.23 Tiszazug
1.4.1 Észak-Mezőföld	1.7.31 Hortobágy
1.4.11 Érd-Ercsi-hátság	1.8 Alsó-Tiszavidék
1.4.12 Váli-víz síkja	1.8.11 Marosszög
1.4.2 Duna-Sárvíz köze	1.8.12 Dél-Tisza-völgy
1.4.21 Közép-Mezőföld	1.9 Észak-alföldi hordalékkúp-síkság
1.4.22 Velencei-medence	1.9.1 Tápió-Galga-Zagyvavidék
1.4.23 Sárret	1.9.11 Hatvani-sík
1.4.24 Sárvíz-völgy	1.9.12 Tápsóvidék
1.4.25 Dél-Mezőföld	1.9.2 Gyöngyös-Hevesvidék
1.4.3 Nyugat-Mezőföld	1.9.21 Gyöngyösi-sík

Jelmagyarázat:	
1.9.22 Hevesi-sík	2 Kisalföldi
1.9.3 Borsod-Zempléni-síkvidék	2.1 Győri-medence
1.9.31 Borsodi-Mezőség	2.1.1 Szigetköz-Mosoni-síkság
1.9.32 Sajó-Hernád-sík	2.1.11 Szigetköz
1.9.33 Harangod	2.1.12 Mosoni-sík
1.10 Nyírség	2.1.2 Fertő-Hanság-medence
1.10.1 Nyírségi homokvidék	2.1.21 Fertő-medence
1.10.11 Közép-Nyírség	2.1.22 Hanság
1.10.12 Északkelet-Nyírség	2.1.3 Rábaköz
1.10.13 Délkelet-Nyírség	2.1.31 Kapuvári-sík
1.10.14 Dél-Nyírség	2.1.32 Csornai-sík
1.10.21 Nyugati- vagy Lőszös-Nyírség	2.2 Marcal-medence
1.11 Hajdúság	2.2.12 Marcal-völgy
1.11.11 Hajdúhát	2.2.12 Kemenesalja
1.11.12 Dél-Hajdúság	2.2.13 Pápa-Devecseri-sík
1.12 Berettyó-Körösvidék	2.3. Komárom-Esztergomi-síkság
1.12.1 Berettyóvidék	2.3.11 Győr-Tatai-teraszvidék
1.12.11 Dévaványai-sík	2.3.12 Igmánd-Kisbéri-medence
1.12.12 Nagy-Sárét	2.3.13 Almás-Táti-Dunavölgy
1.12.13 Berettyó-Káló-köze	
1.12.14 Érmelléki löszös hát	
1.12.2 Körösvidék	
1.12.21 Bihari-sík	
1.12.22 Kis-Sárrét	
1.12.23 Körösmenti-sík	
1.13 Körös-Maros-köze	
1.13.1 Békés-Csanádi-hát	
1.13.11 Csanádi-hát	
1.13.2 Békés-Csongrádi-sík	
1.13.21 Békési-sík	
1.13.22 Csongrádi-sík	
1.13.23 Körösszög	

Jelmagyarázat:	
3 Nyugat-magyarországi-peremvidék	4 Dunántúli-dombság
3.1. Alpokalja	4.1 Balaton-medence
3.1.1 Soproni-hegység	4.1.11 Kis-Balaton-medence
3.1.11 Soproni-hegység	4.1.12 Nagyberek
3.1.12 Fertőmelléki-dombság	4.1.13 Somogyi parti sík
3.1.13 Soproni-medence	4.1.14 Balaton
3.1.2. Kőszegi-hegység-Vas-hegy	4.1.15 Balatoni- Riviéra
3.1.21 Kőszegi-hegység	4.1.16 Tapolcai-medence
3.1.22 Vas-hegy és Kőszeghegyalja	4.1.17 Keszthelyi-Riviéra
3.1.23 Pinka-sík	4.2 Külső-Somogy
3.1.3 Felső-Őrség-Vasi-hegyhát	4.2.11 Nyugat-Külső-Somogy
3.1.31 Felső-Őrség	4.2.12 Kelet-Külső-Somogy
3.1.32. Vasi-Hegyhát	4.2.13 Dél-Külső-Somogy
3.2 Sopron-Vasi-síkság	4.3 Belső-Somogy
3.2.11 Ikva-sík	4.3.11 Marcali-hát
3.2.12 Répce-sík	4.3.12 Kelet-Belső-Somogy
3.2.13 Gyöngyös-sík	4.3.13 Nyugat-Belső-Somogy
3.2.14 Rábai teraszos sík	4.3.14 Közép-Dráva-völgy
3.2.15 Rába-völgy	4.4 Mecsek és Tolna-Baranyai-dombvidék
3.3 Kemeneshát	4.4.1 Mecsekvidék
3.3.11 Alsó-Kemeneshát	4.4.11 Mecsek-hegység
3.3.12 Felső-Kemeneshát	4.4.12 Baranyai-Hegyhát
3.4. Zalai-dombvidék	4.4.2 Tolnai-dombság
3.4.1 Nyugat-Zalai-dombság	4.4.21 Völgység
3.4.11 Felső-Zala-völgy	4.4.22 Tolnai-Hegyhát
3.4.12 Kerka-vidék (Hetés)	4.4.23 Szekszárdi-dombság
3.4.13 Közép-Zalai-dombság (Göcsej)	4.4.3 Baranyai-dombság
3.4.2 Kelet-Zalai-dombság	4.4.31 Pécsi-síkság
3.4.21 Égerszeg-Letenyei-dombság	4.4.32 Geresdi-dombság
3.4.22 Principális-völgy	4.4.33 Villányi-hegység
3.4.23 Zalaapáti-hát	4.4.34 Dét-Baranyai-dombság
3.4.24 Alsó-Zala-völgy	4.4.4 Zselic
3.4.25 Zalavári-hát	4.4.41 Észak-Zselic

Jelmagyarázat:	
3.4.3 Muravölgyi-sík	4.4.42 Dél-Zselic
3.4.31 Mura-balparti sík	
5 Dunántúli-középhegység	5.2.32 Sörédi-hát
5.1 Bakonyvidék	5.2.33 Lovasberényi-hát
5.1.1 Keszthelyi-hegység	5.2.34 Velencei-hegység
5.1.11 Tátika-csoport	5.3 Dunazug-hegyvidék
5.1.12 Keszthelyi-fennsík	5.3.1 Gerecsevidék
5.1.2 Balaton-felvidék	5.3.11 Nyugati-Gerecse
5.1.21 Badacsony-Gulács-csoport	5.3.12 Központi-Gerecse
5.1.22 Balaton-felvidék és kismedencéi	5.3.13 Keleti-Gerecse
5.1.23 Vilonyai-hegyek	5.3.14 Gerecse-kismedencék
5.1.3 Déli-Bakony	5.3.2 Bicske-Zsámbéki-medence
5.1.31 Veszprém-Nagyvázsonyi-medence	5.3.21 Etyeki-dombság
5.1.32 Kab-hegy-Agártető-csoport	5.3.22 Zsámbéki-medence
5.1.33 Sümeg-Tapolcai-hát	5.3.3 Budai-hegység
5.1.34 Devecseri-Bakonyalja	5.3.31 Budai-hegyek
5.1.4 Északi-Bakony	5.3.32 Tétényi-fennsík
5.1.41 Öreg-Bakony	5.3.33 Budaörsi- és Budakeszi-medence
5.1.42 Bakonyi kismedencék	5.3.4 Pilis-hegység
5.1.43 Keleti-Bakony	5.3.41 Pilisi-hegyek
5.1.44 Veszprém-Devecseri-árok	5.3.42 Pilisi medencék
5.1.5 Bakonyalja	
5.1.51 Pápai-Bakonyalja	
5.1.52 Pannonhalmi-dombság	
5.1.53 Súri-Bakonyalja	
5.2 Vértes-Velencei-hegyvidék	
5.2.1 Vértesalji-dombság	
5.2.11 Bársonyos	
5.2.12 Által-ér-völgy	
5.2.13 Móri-árok	
5.2.2 Véres-hegység	
5.2.21 Vértes-fennsík	
5.2.22 Vértes peremvidéke	

Jelmagyarázat:	
5.2.23 Gánti-medence	
5.2.3 Velencei-hegység és környéke	
5.2.31 Zámolyi-medence	
6 Észak-magyarországi-középhegység	6.4.24 Parád-Recski-medence
6.1 Visegrádi-hegység	6.5 Bükkvidék
6.1.11 Visegrádi-Dunakanyar	6.5.1 Központi-Bükk
6.1.12 Visegrádi-hegység	6.5.11 Bükk-fennsík
6.2 Börzsöny	6.5.12 Északi-Bükk
6.2.11 Központi-Börzsöny	6.5.13 Déli-Bükk
6.2.12 Börzsönyi kismedencék	6.5.2 Bükkalja
6.2.13 Börzsönyi-peremhegység	6.5.21 Tárkányi-medence
6.3 Cserhátvidék	6.5.22 Egri-Bükkalja
6.3.1 Nyugati-Cserhát	6.5.23 Miskolci-Bükkalja
6.3.11 Kosdi-dombság	6.5.3 Bükklába
6.3.12 Nézsa-Csöväri-dombság	6.5.31 Tardonai-dombság
6.3.2 Keleti-Cserhát	6.5.32 Upponyi-hegység
6.3.21 Központi-Cserhát	6.6 Aggtelek-Rudabányai-hegyvidék
6.3.22 Galga-völgy	6.6.1 Aggteleki-karszt
6.2.23 Ecskendi-dombság	6.6.11 Aggteleki-hegység
6.2.24 Cserhátalja	6.6.12 Alsó-hegy
6.3.3 Északi-Cserhát	6.6.2 Rudabánya-Szalonnai-hegység
6.3.31 Terényi-dombság	6.6.21 Rudabányai-hegység
6.3.32 Szécsényi-dombság	6.6.22 Szalonnai-hegység
6.3.4 Karancsság	6.6.23 Bódva-völgy
6.3.41 Karancs	6.6.24 Tornai-dombság
6.3.42 Litke-Étesei-dombság	6.7 Tokaj-Zempléni-hegyvidék
6.3.5 Gödöllő-Monori-dombság	6.7.1 Zempléni-hegység
6.3.51 Gödöllői-dombság	6.7.11 Központi-Zemplén
6.3.52 Monor-Irsái-dombság	6.7.12 Abaúji-Hegyalja
6.4 Mátravidék	6.7.2 Tokaj-Hegyalja
6.4.1 Központi-Mátra	6.7.21 Tokaji-hegy
6.4.11. Magas-Mátra	6.7.22 Szerencsi-dombság
6.4.12 Nyugati-Mátra	6.7.23 Hegyalja
6.4.13 Déli-Mátra	6.7.3 Hegyköz

Jelmagyarázat:	
6.4.2 Mátraalja	6.7.31 Hegyközi-dombság
6.4.21 Keleti-Mátraalja	6.7.32. Vitányi-rögök
6.4.22 Nyugati- Mátraalja	
6.4.23 Mátralába	
6.8 Észak-magyarországi medencék	
6.8.1 Ipoly-völgy és Nógrádi-medence	
6.8.11 Alsó-Ipoly-völgy	
6.8.12 Középső-Ipoly-völgy	
6.8.13 Nógrádi-medence	
6.8.2 Felső-Zagyva-Tarna közti dombság	
6.8.21 Zagyva-völgy	
6.8.22 Medves-vidék	
6.8.23 Felső-Tornai-dombság	
6.8.24 Tarna-völgy	
6.8.3 Gömör-Hevesi-dombság	
6.8.31 Ózd-Egercsehi-medence	
6.8.32 Pétervásári-dombság	
6.8.4. Borsodi-dombság	
6.8.41 Sajó-völgy	
6.8.42 Putnoki-dombság	
6.8.5 Cserehát	
6.8.51 Szendrői-rögvidék	
6.8.52 Rakacai-völgymedence	
6.8.53 Keleti-Cserehát	
6.8.54 Nyugati-Cserehát	
6.8.6 Hernád-völgymedence	
6.8.61 Hernád-völgy	
6.8.62 Szerencsköz	

2.8.2. *Gazdálkodás az erdővel*

Kerényi Attila, Debreceni Egyetem

2.8.2.1. Az erdők jelentősége

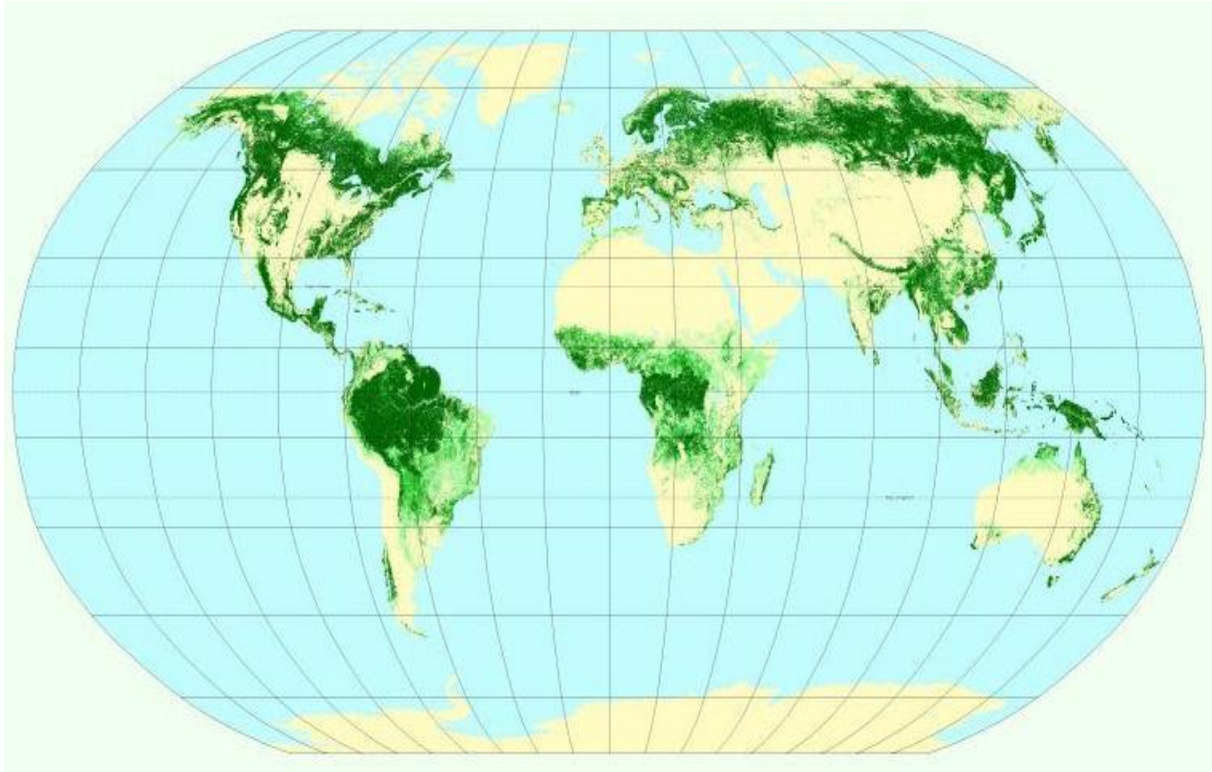
Mielőtt a címben megadott témáról szólnánk, meg kell határoznunk az erdő fogalmát. Ez korántsem egyszerű feladat, mert különféle szempontok alapján lehet definiálni a fogalmat. Így pl. ismeretes az erdő népi, jogi és tudományos (ökológiai) értelmezése is. Még ugyanabban a kategóriában (pl. a jogban) is számos definíció lehet: a jogban pl. országonként változhat. Ezért mi azt a megoldást választjuk, hogy egy rövid tudományos értelmezés mellett a hazai jogban elfogadott meghatározást is ismertetjük.

Tudományos értelemben az erdő „fák, cserjék, lágyszárú és alacsonyabb rendű növények, a növények között élő állatok és a talaj kölcsönös egymásra hatása során kialakult életközösség.” (Magyar Nagylexikon, 7. kötet ; 1998; Budapest; Magyar Nagylexikon Kiadó; 930:416.)

Jogi szempontból korábban legalább fél hektáros fás területet tekintettek erdőnek, ma azonban *hazánkban 1500 m² az erdő alsó határa*. Miközben ez egy fontos kritérium, „jogilag azt kell erdőnek tekinteni, amit a törvények annak minősítenek.”

A továbbiakban mi elsősorban az ökológiai értelmezést fogjuk követni, de még egy definícióról szólnunk kell, mivel rövid nemzetközi kitekintést is adunk. Az ENSZ Európai Gazdasági Bizottsága és a FAO 2000-ben kiadott mérsékelt és hideg égövi erdővagyon-értékelése során az erdőt a következőképpen határozta meg: az erdő olyan földterület, ahol a fák koronája a terület több, mint 10%-át fedi le, és kiterjedése meghaladja a 0,5 hektárt.

A *Föld erdőterülete (115. ábra)* meghaladja a 3,8 milliárd hektárt, összességében a szárazföldek felületének mintegy egyharmadát borítják erdők. (Ez a jelenlegi hivatalos adat, de meg kell említenünk, hogy az ismertetett nemzetközi definíció, mely szerint 10%-os lombkorona-fedettség esetén már erdőről beszélünk, hozzájárul a viszonylagosan magas értékhez. Az ökológusok szerint – mint később látni fogjuk – kb. a szárazföldek 25%-át borítják erdők.) Így az erdő a legnagyobb szárazföldi ökoszisztémának tekinthető, s mint ilyen, a biológiai sokféleség fontos forrása, a globális energiaáramlás, szén- és oxigénkörforgás egyik szabályozója, az élet meghatározó eleme.



115. ábra. Az erdők elhelyezkedése a Földön

Az erdő ugyanakkor a *megélhetés fontos forrása*, javai és szolgáltatásai (élelmiszerek mint gyümölcsök, gombák, fűszerek, az erdei állatok húsa, gyógyszerek, valamint energia) révén közvetlenül is létfeltételt jelent. Mintegy 600 millió és egymilliárd közöttire becsülhető a Föld népességének az a hányada, amely az erdőben és az erdőből él.

Ehhez a közvetlen hozzájáruláshoz jön a fa, mint *nyersanyagforrás* felhasználására épülő gazdasági ágazatok tevékenysége, a faipar, bútoripar, építőipar, energiaipar, papír- és nyomdaipar. Túl azon, hogy a fa felhasználása a fenti területeken a fenntartható fejlődés szempontjából is kívánatos, tekintettel arra, hogy megújítható és környezetbarát nyersanyagként a legkisebb környezetterhelés mellett képes társadalmi igényeket kielégíteni, az erdő és a faanyag más *emberi tevékenységek káros hatását is képes kompenzálni*.

Itt elsősorban a globális szénkörforgás megváltozására és az ahhoz kapcsolódó klímaváltozásra kell gondolni, amelynek ellensúlyozásában az erdőknek jelentős szerep juthat. A faanyagban ugyanis hosszú időre eltárolható annak a szénmennyiségnek egy jelentős része, amely a fosszilis energiahordozók égetésének következtében gyors ütemben jut vissza a légkörbe.

Az erdő materiális javai mellett rendkívül jelentősek az ún. *immateriális értékek*. Az élet minőségéhez való hozzájárulás mellett, mely az erdő a rekreációs funkcióiban ölt testet, az erdő

jelentős esztétikai értéket képvisel, továbbá az emberi kultúra része, spirituális értékek forrása, sok esetben a gyógyítás és gyógyulás helyszíne.

Annak ellenére, hogy a *Föld erdővagyonának értékét* az újabb kutatások 4800 milliárd \$-ban határozzák meg, mely a korábbi becsléseknél jóval magasabb érték, ez nem kerül elismerésre a gazdasági szférában, ráadásul ez mindössze *egy hetede a világ becsült éves GDP-jének*, holott nyilvánvaló, hogy az erdők jelentősége ennél lényegesen nagyobb.

2.8.2.2. Az erdők szerkezete

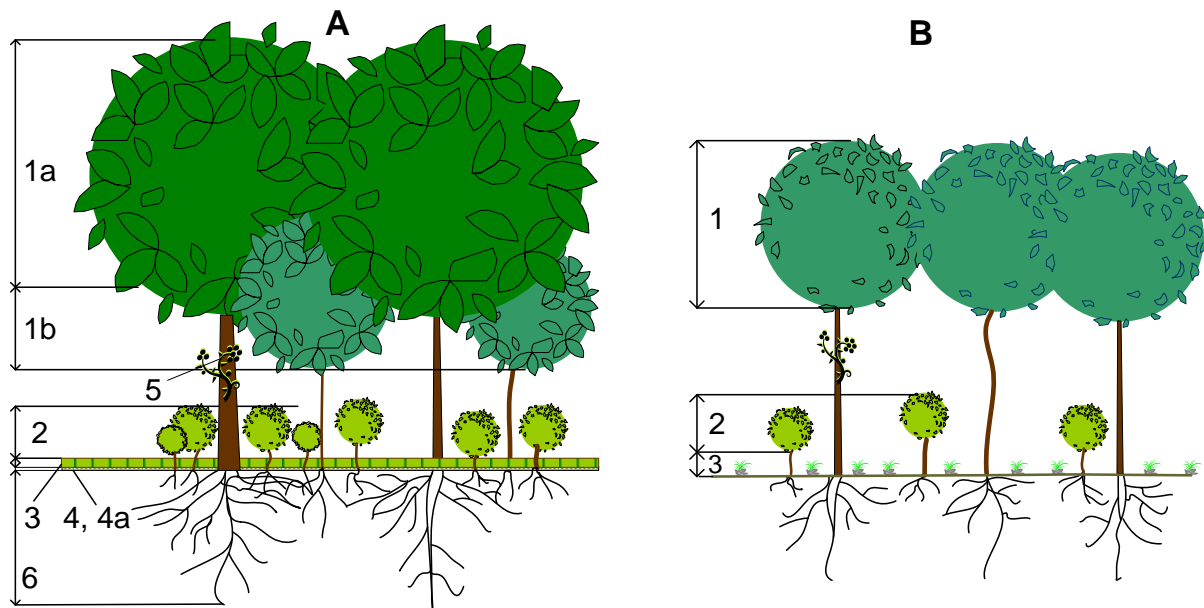
Természetes állapotában az erdő önfenntartó és önszabályozó, amelyben az anyag- és energiaáramlást a napsugárzás energiája teszi lehetővé. A rendszer sajátos térbeli felépítésű: függőlegesen különböző szintekből épül fel és vízszintesen is tagolt. (Az erdők szerkezetének és működésének részletesebb megismeréséhez ajánljuk *Bartha 2006, Mátyás 1996 és Somogyi 2001* munkáját)

Az erdők függőleges irányban általában jobban tagoltak, mint vízszintesen, de ebben is vannak különbségek erdő és erdő között – nem ritka esetben azért, mert az erdőgazdálkodás módosította a természetesen kialakult szerkezetet.

A természetes erdők színteztettségének jellemző vonása, hogy az egyes szintek nem válnak el élesen egymástól. A *mérsékelt övezet lombhullató erdeiben* a legfelső szint, a *lombkoronaszint* 15–40 méter magasan helyezkedik el, és az erdőt alkotó fák összeérő lombkoronái alkotják. A szint kiterjedése függ a fafajoktól, az erdő korától, a termőhely minőségétől. Jó adottságú termőhelyeken rendszerint két alszintre tagolódik: a legmagasabbra nyúló alszintet a kifejezetten fényigényes fafajok alkotják, míg alatta az előbbieket árnyékát elviselő, kevésbé fényigényes fajok lombja helyezkedik el (**116. ábra**).

A lombkorona a napfény legnagyobb részét felhasználja a hatalmas lombfelületen zajló fotoszintézishez szükséges energiaellátásra, így a lombkoronaszint alá már csak a fény töredéke jut: általában csak egytized, egyhuszad része, de ennél szélsőségesebb esetek is vannak.

A *cserjeszint* olyan erdőkben alakul ki, ahol még viszonylag sok fény jut át a lombokon, és a talaj is jó tápanyagellátottságú, sőt kellő nedvességtartalma is biztosítja a kedvező tápanyagfelvételt. Ez 4–5 méter magasságig emelkedik, és nem alkot okvetlenül összefüggő szintet (**116. ábra**).



116. ábra. Mérsékelt övezeti természetes (A) és kezelt (B) lombhullató erdő függőleges szerkezete 1a = felső lombkorona, 1b = alsó lombkorona, 2 = cserjeszint, 3 = gyepszint, 4 = mohaszint, 4a = alomszint (avarszint), 5 = liánok, szimbionták, 6 = gyöké

A cserjeszint alatt a gyepszint helyezkedik el, amelyet túlnyomórészt lágyszárúak alkotnak, s 0,5–1 m magasságig emelkednek (116. ábra). Erre a szintre méginkább érvényes az a megállapítás, hogy nem feltétlenül alkot összefüggő “pázsitot”, sőt inkább a lágyszárúak laza elhelyezkedése jellemző rá, és az erősen fényhiányos területeken teljesen hiányozhat. (Ezeket nudum = csupasz foltoknak, részeknek nevezik.) Laza lombkorona- és cserjeszint esetén dúsabb, összefüggőbb gyepszint alakul ki.

A mohaszint az erdő legalacsonyabb, néhány centiméterre emelkedő szintje (116. ábra). Általában azokban az erdőkben fejlődik ki, amelyekben a gyepszint nem nagyon fejlett. A mohaszintben sok zuzmó is él. A fejlett gyepszintű erdőkben a mohák és zuzmók kövekre, sziklákra, a fatörzsek alsó részére telepednek.

E négy szinten kívül léteznek olyan növények is, amelyek a fákon élősködnek vagy szimbiózisban* élnek velük, s olyanok is, amelyek felfutnak a fatörzsekre (liánok). Ezek az egészséges mérsékelt övezeti erdőkben nem fordulnak elő tömegesen, inkább a trópusi erdőkre jellemzők.

A fák, cserjék lehulló levelei, korhadó ágai, kéregdarabjai, az évente elhaló lágyszárúak maradványai az erdő talaján felhalmozódnak, s néhány centiméter vastag alomszintet (a hétköznapi nyelvben avarszintnek is nevezik) képeznek. Ez az alomszint átmenet az erdő élő szintjei és a talaj között: milliószámra hemzsegnek benne az élőlények (baktériumok, gombafonalak, apró rovarok, algák), amelyek az elhalt növényi részeket és állatmaradványokat

lebontják, átalakítják, s belőlük humuszanyagokat készítenek, amelyeket aztán a talajlakó állatok kevernek a talajba.

A növények magvai, hagymái, gumói az alomszintben töltik nyugalmi állapotukat, s a tápanyaggazdag környezet segíti zavartalan kihajtásukat és azt, hogy a kifejlődő gyökerek megkapaszkodjanak a talajban.

Minden erdőnek van még egy olyan élő szintje, amit nem mindig említenek meg: ez a *gyökérszint*. Az ember számára nyilvánvalóan a jól látható föld feletti szintek a fontosak, az erdő viszont két elem (az oxigén és a szén) kivételével az összes elemet a gyökérszintben veszi fel a talajból, és építi fel belőlük a rendkívül bonyolult élő rendszert.

A gyökérszint szerkezetében van némi hasonlóság az erdő felszín feletti szerkezetéhez. A föld felett a lombkorona a legmagasabb és legterebélyesebb, míg a talajban a felszíntől lefelé haladva egyre ritkább a gyökérzet. De itt is megfigyelhető a függőleges tagoltság: ha kiássuk a gyökereket, a felszín alatt közvetlenül a légyszárúak legsűrűbb gyökérszővedékét találjuk, majd a cserjék, végül a fák egyre mélyebbre hatoló gyökérzete következik. Az, hogy milyen mélyre hatolnak le a fák gyökerei, nagyban függ a talaj vastagságától, tápanyag- és víztartalmától, az alatta elhelyezkedő kőzetreteg vagy -rétegek tulajdonságaitól; általában azonban a fejlett fák több méter mélyen gyökereznek.

Magában a gyökérszintben is nagyon sok élőlény él. Különösen fontosak a gyökerekkel *szimbiózisban** élő szervezetek, amelyek segítik a növények tápanyagfelvételét, de a talajban milliárdszámra jelen lévő baktériumok is, amelyek a humusz végleges átalakítását végzik el, s a talajban lejátszódó egyéb folyamatokat is befolyásolják. A talajlakó rovarok, giliszták fontosak a talaj tápanyagainak egyenletes elkeverésében. Végül is a talaj önmagában is egy bonyolult rendszer, amelyben sokféle szerves tápanyag a kőzetek, ásványok mállásából származik, de ezek átalakulási folyamatait az igen kicsiny (nagy részt csak mikroszkóppal tanulmányozható) élőlények irányítják.

A gyökerek a talaj tápanyagait csak vízben oldott formában képesek felvenni, így a tápanyagok mellett nagyon fontos a talaj nedvességtartalma, ami a talaj vízraktározó képességétől és természetesen a lehulló csapadék mennyiségétől függ.

Mint láttuk, az erdő színtezettségét a növények és növényi részek határozzák meg, de érzékelhettük azt is, hogy az állatvilág is képviselteti magát az erdőben: a lebontók, a korhadéklakók az alomban, a rovarok, giliszták a talajban, s rajtuk kívül igen gazdag a felszíni ízeltlábú fauna (rovarok, pókok stb.), de a gerincesek populációi is: madarak, emlősök

(rágcsálók, más növényevők és ragadozók egyaránt – bár ez utóbbiak száma a természetközeli erdőkben is megcsappant).

Miben különbözik ettől a **kezelt erdő** színtezettsége? Egy mondatban így válaszolhatunk a kérdésre: *kevesebb és erősebben elkülönülő szintek jellemzik a kezelt erdőt*, mivel itt az állományalkotó fák egyidősek, a lombkoronaszint homogén, nem tagolódik alszintekre (8/6 B. ábra). A cserjeszint kevesebb fajból áll, fejletlenebb. A légyszárú szint alacsonyabb, homogénebb faji összetételű, de a fényviszonyoktól függően összefüggő is lehet. A mohaszint hiányozhat, s az alomszint vékonyabb, mint a természetes erdőkben.

Az erdők *horizontális szerkezete* kevésbé feltűnő, s a laikus számára nehezebb észrevenni. A természetes erdőkben a mérsékelt övezetben 15–20 fafaj is előfordul, s a lombkorona így madártávlatból változatos képet mutat, de csak 1–2 faj dominál a képben.

Ha az erdő számára a létfeltételek nem ideálisak (a talaj változó vastagságú, egyes részeken nem elég mély a gyökerek számára, esetleg túl kevés vagy túl sok vizet tárol), a fás növények egyenetlenül helyezkednek el, helyenként fátlan foltok jelennek meg az erdőben: *felszakadozó szerkezetet* látunk.

Ha a termőhely egyenletes tápanyag- és vízellátást biztosít, akkor *zárt horizontális szerkezetű* lesz az erdő. Ebben is jól látható az az egy-két meghatározó fafaj (ritkábban 3 faj), amelynek egyedei uralják az erdőt. Ezeket *állományalkotó fajoknak* nevezzük. Nemcsak az erdő külső megjelenését (habitusát) határozzák meg, hanem az ökoszisztéma anyag- és energiafelhasználását, ill. a biotermelés mennyiségét is. Természetesen az erdő többi növénye is termel élő anyagot, de a fő tömegét az az 1–3 faj produkálja, amelyet állományalkotóknak nevezünk.

Ha az erdő termőhelye szélsőségektől mentes (nem meredek sziklás lejtőn tenyészik, a talaj nem sós vagy mocsaras, esetleg száraz, homokos), akkor a természetes erdő zárt lombkoronájú. Ha azonban ilyen kedvező körülmények között tisztásokat, réteket találunk az erdőben, mindig az ember tevékenységére kell gyanakodnunk: azaz valamikor ezeken a helyeken az ember kiirtotta az erdőt, és legelőként vagy kaszálóként hasznosította, ezzel megakadályozva a fák visszatelepülését.

Az állományalkotó fafajok mellett 10–20 más fafaj is előfordul a lombos erdőben, de ezek szórványosan vagy kisebb csoportokban helyezkednek el, sokkal kisebb egyedszámban: *elegyfa-fajoknak* vagy *kísérő fafajoknak* nevezzük őket.

Az erdészeti kezelések sokkal gazdaságosabbak, és a fatömeg-termelés eredményesebb, ha egy-két fafaj alkotja az erdőt, s egyedeik egyidősek, hisz akkor egyszerre lesznek vágásérettek,

gazdaságos a „letermelésük”. Az ilyen homogenizált erdő elveszti legfontosabb rendszer-tulajdonságát: az önszabályozó és öfenntartó képességét.

Európában a Skandináv-félsziget jelentős részét természetközeli **tülevelű erdők** borítják (az eredeti erdőket itt is megritkította, átalakította az ember, de még bőségesen tenyésznek eredetihez közeli állományok), s innen kelet felé Közép-Szibériáig egyre szélesebb sávban húzódnak, hogy Kelet-Szibériában ismét csökkenő, de még mindig jelentős észak-déli kiterjedésben fussanak ki az Ohotszki-tenger partvidékére. Sehol a Földön nincs még egy ilyen hatalmas, egykor összefüggő, ma meg-meg szakadó erdőség: hazánknál kétszázszor nagyobb a kiterjedése. A tipikus boreális fenyvesek *sűrű lombkoronáján* keresztül csak nagyon kevés fény jut le a talaj felszínére, ill. annak közelébe: a fák alsó ágain nem maradnak meg a levelek, így az erdő belsejében a fenyőfák korántsem lennének alkalmasak karácsonyfának, mert alsóágaik csupaszak (**117. ábra**), legtöbbször már csak a csonkjaik maradtak meg.



117. ábra. Egy sokszintű trópusi esőerdő (A) és egy boreális fenyőerdő (B) függőleges szerkezete (Kerényi A. 2003 a)

A *cserjeszint* a fényhiány miatt nagyon szegényes: néhány örökzöld törpecserje alkotja, többnyire elszórt elhelyezkedésben. A talajt vastag tülevelű avar borítja, jelezve, hogy az örökzöld fenyő tülevele is hullik, de nem egyszerre, mint a lombhullató fáké. A rendkívül hosszú (7–9 hónapig tartó) tél után nagyon rövid a *vegetációs időszak*^{*}, ezért a lombosfáknak nem lenne elegendő idejük rügyezni, kihajtani, leveleket nevelni, hogy azután kellő mennyiségű szerves anyagot fotoszintetizáljanak. A fenyők azonban állandóan készen állnak erre: amint a tavasz napsütés sugarai felolvasztják a talajt, és megindulhat a fákban a nedvkeringés (a

fotoszintézishez vízre is szükség van!), a zöld tűlevelekben a víz és szén-dioxid egyesülésével megtörténik a szerves anyag előállítása, s ehhez a vízben oldott ásványi sók hozzáadásával a növény élő anyaga tovább gyarapodik.

A fenyők apró viaszos tűlevelei kiválóan ellenállnak a téli zord hidegnek, és csökkentik az elpárologtatott víz mennyiségét, amikor a nyári melegben minden csepp vízre szükség van. A fenyvesek avarján, ritkábban közvetlenül a talajon, továbbá a fák törzsein a *zuzmók és mohák* ha nem is alkotnak összefüggő szintet, mégis szép számmal tenyésznek.

A tavaszi olvadás után a még fagyott altalaj miatt a felszínen túlzott a nedvesség, a mélyebb fekvésű részeken lápok, mocsarak szakítják meg az összefüggő rengeteget, vagy néha meg sem szakítják, csak a fák helyezkednek el egy kissé lazábban a szokásosnál.

Tőlünk délre, a mediterrán vidéken más okok miatt alakultak ki örökzöld erdők, amelyek túlnyomó része – sajnos – az emberi tevékenységek áldozata lett. Itt a hosszú száraz nyarat kell átvészelnük a fáknak, ezért bőrnemű leveleik a párologtatást csökkentik, ill. a mediterrán tűlevelűek a fenyőkre jellemző viaszos réteggel érik el ugyanezt.

A Föld legbonyolultabb szerkezetű erdei a trópusokon található. A **trópusi esőerdők** óriásfáinak átlagos magassága 45–50 m, s lombkoronájuk a fő lombkoronaszint fölé emelkedik. Repülőgépből úgy néznek ki, mintha az egységes lombkoronaszintet átütve vastag partvisnyeiek végén terebélyesednének lombjaik laza elhelyezkedésben (*117. ábra*). Kb. 25–35 m között egymásba érő lombok zárt szintje következik, s még további 2–3 lombkoronaszint követi az előző kettőt.

Ugyanilyen gazdag a *cserjeszint*, amely legalább két alszintre tagolódik. A lágyszárú szint gyakorlatilag átszövi a cserjeszint alsó részét, s az igen magas páratartalom, az állandó nedvesség sok mohát, zuzmók seregét is élteni.

Az esőerdők sajátosságát az eddigieken kívül a sok *kúszónövény* (lián) és *epifiton* adja. Ez utóbbiak olyan, fán élő növények, amelyek életük során soha nincsenek kapcsolatban a talajjal – ellentétben a liánokkal, amelyek életüknek legalább egy szakaszában a földben gyökereznek. Ez a bonyolult függőleges szerkezetű erdő mind a növényeket, mind pedig az állatokat illetően rendkívül fajgazdag. Míg a mérsékelt övezeti erdőkben 1 hektár területen 15–20 faj fordul elő, a trópusi esőerdőkben ennek tízszeresét találjuk. De ugyanilyen, vagy még tágabb az arány az állatvilágban is. Biológusok vizsgálatai azt mutatták, hogy egyetlen óriásfának egyetlen epifita növényén 200–250 rovarfaj is előfordul. Az állatvilág az erdő növény szintjei szerint is differenciálódott: minden szintnek jellemző fajai vannak. A fő lombkoronaszint lakói a majmok, félmajmok, lajhárok, a rendkívül színes madárvilág képviselői, pl. a papagájok. A

talajon hangyászok, tapirok, vízidisznók élnek. Más-más rovarcsoport jellemző a mohaszintben, a cserjében a fák törzsein s a lombkoronában. *A Föld legfajgazdagabb ökoszisztémája ez!*

Becslések szerint a *világ növény- és állatfajainak közel a fele a trópusi esőerdőkben él*, holott területük a szárazföldek mindössze 5–6%-át teszi ki. Legnagyobb kiterjedésben az Amazonas-medencében és a Kongó-medencében terülnek el, de DK-Ázsiában, Indonéziában és Közép-Amerikában is jelentős maradványaikkal találkozhatunk.

A trópusi esőerdők arra is példát szolgáltatnak, hogy *a bonyolult ökológiai rendszerek nem mindig stabilak*. E rendkívül fajgazdag ökoszisztéma *gyenge pontja: a talaj*. A magas hőmérséklet és páratartalom miatt az elhalt növényi részek lebomlása igen gyors, a talajban nem képződik annyi humusz, amennyi a növények szervesanyag-termeléséből várható lenne. Márpedig a humusz a talajnak az a legfontosabb alkotóeleme, amely a tápanyagokat megőrzi, és a növények számára folyamatosan biztosítja, sőt a talaj szerkezetét ellenállóvá teszi a víz pusztításával szemben. Az örökzöld erdő levelei, elhalt növényi részei ugyan folyamatosan hullanak, de gyorsan ásványi anyagokká alakulnak, amelyeket a növények közvetlenül is felvehetnek, nincs szükség a talaj közvetítésére. Ennek ellenére a talaj természetesen fontos az esőerdők életében, hisz az óriásfák mély gyökerei és általában a mélyen gyökerező növények onnan veszik fel a tápanyagokat és a vizet.

Ha azonban akárcsak néhány fát is kivágnak az esőerdőből, a napi rendszerességgel lezúduló zápor (itt az évi csapadékösszeg 2000–3000 mm) gyors ütemben elhordja a sérülékeny talajt: az *erózió* terméketlenné teszi a kiirtott növények helyét, a fás vegetáció nem tud megújulni. De ez csak megindítja a lavinát! A kivágott óriásfák növény- és állatfajok százainak, sőt ezreinek élőhelyét alkotják. Ezek mind elpusztulnak. A fák rendkívüli faji változatossága azzal jár együtt, hogy az azonos fajhoz tartozó egyedek viszonylag távol kerülnek egymástól. Ha azonos fajhoz tartozó fákat vágunk ki az erdőből, bekövetkezhet az az eset, hogy a virágpor már képtelen megtalálni a másik egyed bibéjét, olyan távol kerülnek egymástól, e fajnak abban az erdőben nem lesz utódja, s vele együtt sok epifiton növény és alacsonyabb rendű állat esik áldozatul a favágásnak.

Az esőerdő bonyolult, mégis törekeny egyensúlyát a környékükön élők tapasztalatból is ismerik. Tudják, mert könnyű észrevenni: ha egy trópusi esőerdőt kiirtanak, az többé már nem lesz ugyanaz, hiába nő újra. Ezeket másodlagos erdőknek nevezzük, amelyek faji összetétele szegényesebb az eredetnél.

2.8.2.3. Gazdálkodás az erdőkkel

Az erdő az emberiség történelme során meghatározó energia- és nyersanyagforrás volt, s ezek a funkciók az utóbbi időben újabbakkal bővültek. Közülük kikell emelnünk a környezetvédelmi és rekreációs (idegenforgalmi, jóléti) funkciókat. Ezeket a funkciókat az alábbiakban részletezzük.

Az erdők óriási lombfelületük révén rendkívül intenzív fotoszintézisre képesek. A trópusi esőerdők minden egyes négyzetmétere kb. 1 kg szenet köt meg évente a légkörből, azaz hektáronként 10 000 kg-ot vagyis 10 tonnát. Ez egyben kifejezi azt az igen jelentős *biológiai termelőképeséget* (= biológiai produktivitást), amire ilyen mértékben egyetlen más élő rendszer sem képes. A Földön ma már csak a szárazföldek 26%-át borítják erdők, mégis *igen fontos szerepük van a szén-dioxid és az oxigén gázcseréjében*, hiszen a fotoszintézis során széndioxidot használnak fel, és több oxigént bocsátanak a légterbe, mint amennyi légzésükhöz szükséges. Az erdők a légköri széndioxid-egyensúly fenntartását mindaddig meghatározták, míg az ember nem kezdte egyre nagyobb intenzitással elégetni a kőszén, majd a kőolajat és a földgázt. Azt a széntöbbletet, amely így a légkörbe kerül, már nem képesek megkötni az erdők – már csak azért sem, mert területük egyre csökken, s ez inkább a korábbi (a nagy ipari forradalom előtti) egyensúlyi állapot még erősebb megbomlásához vezet. Azt azonban tudnunk kell, hogy a mai meggyötört erdők is *igen fontosak az üvegházhatás mérséklésében*, s ezáltal a globális földi rendszer működésében. (Ld. Környezetünk állapota c. tantárgyban)

Az erdők *a vízgyűjtő területek fontos természeti tényezői*. Különösen a lejtős területeken, meredek hegyoldalon létkérdés a jelenlétük. A lezúduló zápor ugyanis először a fák lombját éri, s egy része ott meg is tapad. Amikor átnedvesedtek a lombok, a cserje majd a gyepszint raktároz valamennyit a tovább csöpögő csapadékból, s végül az alomszint szivacszerűen működve *óriási mennyiségű vizet képes átmenetileg raktározni*, de lassan tovább engedi azt a talajba. Az erdő tehát hozzájárul ahhoz, hogy a víz ne vesszen el a növények számára, s ne növelje mértéktelenül a folyók vízhozamát.

Ha letermelik az erdőt, mindezek a kedvező hatások elmaradnak, a felszíni lefolyás jelentősen nőhet, s ennek egyenes következménye a nagy esőzések utáni árvíz. *A gyors lefolyás miatt azonban nemcsak a víz tömege nő meg, hanem a benne szállított hordalék is*, mert az áramló víz egyre több talajt ragad magával. Ott pedig, ahol szükség lenne a talajra, hogy az újabb erdő felnövekedhessen, nem marad más mint gyenge termékenységű erodált talajmaradvány.

Az erdők *igen fontos szerepet töltenek be a víz globális körforgásában*. A fák a vízben oldott tápanyagokat úgy veszik fel, hogy gyökerüktől a lomblevelekig állandóan áramlik testükben a víz, s a levelek gázcserenyílásain elpárolog. Az erdőkben s az erdők fölötti légtérben mindig több a vízpára, mint a fátlan területek fölött. A trópusi esőerdők fölött szinte önfenntartó a csapadékképződés, hisz a felszálló párából naponta képződik új eső a magas gomolyfelhőkben, s délutánonként visszahullik a földre.

Az erdők a levegő szennyezéseinek csökkentésében is szerepet játszanak. A gázcseréjük során nemcsak szén-dioxidot vesznek fel, hanem más gázokat is, ezek között sok szennyező anyagot. Igaz, ezek egy része károsítja a fák szervezetét, de a légtér tisztább lesz. Vannak fafajok, amelyeknél tartós megfigyelések azt mutatták, hogy elég nagy a „füsttűrő képességük”. (Ilyenek pl. a tuja-, borókafajok, a zöld- vagy kőrislevelű juhar és egy-két tölgyfaj is.)

Az erdők talán *a portól tisztítják meg leghatékonyabban a levegőt*. Radó D. vizsgálatai szerint pl. egy harminc éves juharfa a *vegetációs időszakban* 100 kg port képes megkötni. Ha az erdőket települések mellett vagy azok belterületén találjuk, akkor az ott élők számára igen hatásos levegőszűrőként működnek: egy hektár erdő 30–70 tonna portól szabadítja meg az ott lakókat. Ez a levegőtisztító hatás persze csak akkor ilyen hatásos, ha az erdő széles sávban húzódik a veszélyeztetett lakóterület közelében, s fái kellően fejlettek.

A lakóterületek és/vagy üdülők közelében kedvező klimatikus hatásokat is kifejtenek az erdők. Kiegyenlített hőmérsékletet, kedvező páratartalmat, csökkent légmozgást köszönhetünk az erdőknek. Pszichológusok és orvosok megfigyelték, hogy az erdős, parkos környezet jótékony hatással van a lelki, sőt a testi betegségben szenvedők gyógyulására is. A felsorolt tényezők összetett hatásaként nagyon jelentősnek tartjuk az erdők idegenforgalmi, jóléti funkcióit, amelyet sok ország nem használ ki kellőképpen.

Az erdőgazdálkodás legfőbb rendeltetése világszerte ma is az, hogy az ember számára hasznos faanyagot termeljen. Ahol még sok természetes erdő áll rendelkezésre, ott nincs szükség energia- és pénzügyi befektetésre, hisz a természet készen adja a faanyagot, csak a kitermelés és feldolgozás az ember feladata. Ilyen lehetősége még két földrajzi környezetben van az embernek: a nedves trópusokon és a boreális erdők területén.

Az erdők visszaszorulását azonban nem csupán a fafeldolgozás okozza. Különösen a trópusi környezetben újabb és újabb mezőgazdasági területekre van szükség a népesség eltartása érdekében, s ezeket többnyire az erdők felégetésével nyerik. Sok trópusi esőerdő esik áldozatul a települések terjeszkedésének, új települések és utak építésének. Időnként a spontán erdőtüzek

is katasztrofális méreteket öltenek, s ebben a helyenként fellépő szárazodás is szerepet játszik. A szárazság fokozódásában pedig gyakran az emberi tevékenység is ludas.

A hideg környezetben tenyésző fenyveseket is szorgalmasan pusztítja az ember. Az okok sokszor hasonlóak, mint a trópusokon, de a mértékük különbözik. A 20. század végén az erdők pusztításának üteme évente 16 millió hektárra becsülhető. Ebből kb. 14 millió hektár erdő a trópusokon semmisül meg, s „csak” 2 millió hektár a hidegmérsékelt övben elhelyezkedő erdők vesztesége. Az emberiségnek tehát valamit tennie kell az eredeti erdők védelmében. Ehhez azonban mélyebben meg kell ismernünk a pusztulást, erdőirtást kiváltó okokat.

A legmélyebben fekvő indítékokat a gazdasági érdekekben kell keresnünk. A termelés célja egyrészt az emberi igények kielégítése, másrészt a termelő vállalat (vállalkozó) számára haszon biztosítása. A vállalatok között verseny folyik, ami a termékek legolcsóbb előállítására ösztönöz. A vállalkozók olyan területeken próbálkoznak, ahol a legnagyobb hasznot remélik. Különösen kifizetődik a vállalkozás azokban az országokban, ahol a társadalom ösztönzi a termelést, pl. adókedvezmények formájában.

Márpedig a trópusi esőerdők területének túlnyomó része a szegény vagy „majdnem szegény” országokhoz tartozik. Ezek kormányai – alapvető szemléleti hiba miatt – *a lábon álló erdőt haszontalannak, improduktívnak ítélik*, és erősen túlbecsülik a fakitermelésből származó hasznot. Olyannyira fontos és sürgős számukra ez a haszon, hogy adókedvezményekkel vagy egyéb módon (pl. a fa árának leszállításával) ösztönzik a fakitermelést. Sokszor azzal sem törődnek, hogy a kitermelt fa mennyire értékes. Köztudott, hogy a trópusi fák között pl. igen értékes bútorfák vannak, mint a mahagóni, a szantálfa, az ébenfa stb. Mivel a gazdaságilag rosszul álló országokban a minél előbb jövedelemhez jutás a fő cél, ezért ezeket az értékes fákat is ugyanolyan „fillérekért” (pennyért) adják el, mint az értéktelenebbeket.

Dél-Amerikában pl. a nagyon rossz gazdasági helyzetben lévő Suriname és Guyana teljes erdőket adott el ázsiai fakitermelő társaságoknak igen csekély összegért. Indonézia adósságállományának csökkentését ugyancsak az esőerdők kiárusításától reméli, minek eredményeképpen erdőterületének már 41 százalékát eladta külföldi társaságoknak (ABRAMOVITZ J. N. 1998), az erdők kitermelésének ösztönzésére pedig a fa árát alacsonyán határozták meg, és a fafeldolgozást államilag támogatták.

Brazíliában a hatvanas évektől kezdve több intézkedést is hoztak, amelyek az esőerdők gyorsuló kiirtásához vezettek. Az Amazóniába vezető utak építéséhez s ott szarvasmarhatenyésztő farmok létrehozásához adómentességet, sőt negatív kamatlábakkal adott hiteleket biztosítottak, ami meg is hozta az eredményét: több millió hektár erdőterület helyén jöttek létre

marhalegelők. 1990 után négyszer annyi erdőt taroltak le az államilag támogatott farmok, mint a támogatás nélkül működők, s mindez 2,5 milliárd dollárba került.

A volt szocialista országok közül Oroszország elég súlyos gazdasági helyzetben van, s ez természeti értékeinek feléléséhez vezet. Gyakran előfordul, hogy a pénzügyileg megszorult helyi önkormányzatok a tulajdonukban lévő erdőterületekkel fizetik ki hitelezőiket. Az eredmény: gyors ütemben csökken a természetközeli erdők területe.

Sajnos, még gazdag országokban is tapasztalható az erdők értéken aluli kiárusítása. Az Egyesült Államokban pl. 1995-ben az értékesített nemzeti erdők kevesebb jövedelmet hoztak a kincstárnak, mint amennyit a Szövetségi Erdőhivatal a koncessziós tárgyalások előkészítésére fordított. Az alaszakai tengerparti erdők kitermelését pedig annak ellenére is állami támogatásban részesítik, hogy az rendszeresen veszteséges. Az igen nagy faállománnyal rendelkező Kanadában a fakivágások adója rendkívül alacsony (feleannyi, mint az Egyesült Államokban), ami szintén kitermelésre ösztönöz.

Gazdasági szempontból lényeges különbség a gazdag és szegény országok erdőgazdálkodása között, hogy a gazdag országokban a faértékesítésből származó jövedelem elenyésző töredékét adja a bruttó nemzeti jövedelemnek, míg a szegény trópusi országokban ez igen jelentős arányt képvisel. Sajnos, a gazdasági haszonból sokszor csak néhány száz ember részesül, és azok a helyi közösségek, amelyek korábban az esőerdőből éltek, még szegényebb sorba kerülnek. Ilyen körülmények között még jó ideig kilátástalannak tűnik az esőerdők sorsa.

A helyzet annál is inkább súlyos, mert az imént vázolt legfontosabb okon kívül ennek áttételes hatásai és egyéb okok is hozzájárulnak az erdőterületek csökkenéséhez, helyenként pedig az állományok leromlásához.

Az áttételes hatások között említhetjük az *erdőtüzek* gyarapodását, súlyosságuk fokozódását. A zárt, természetes esőerdők párásak, a környezet a jelentős csapadék miatt állandóan nedves, így erdőtüzekre nem fogékony. Az utakkal és irtásokkal megnyitott erdők – legalábbis a peremeiken – kiszáradnak, a tüzek martalékává lehetnek. Ennek bizonyítékát láthattuk 1997-ben Brazíliában és Délkelet-Ázsia több országában, ahol az esőerdők pusztulásán kívül más súlyos következményei is lettek a katasztrófális mértékű erdőtüzeknek. Indonéziában pl. 2 millió hektár erdő leégése következtében több millió ember betegedett meg a levegő szennyeződésétől, több százan meghaltak a tűzben, gyárakat, iskolákat zártak be, s körülbelül annyi szén-dioxid jutott a légkörbe, mint Nagy-Britannia teljes gazdaságából, ipart, közlekedést, lakossági fűtést is beleértve.

Az erdőterület csökkenése nem az egyetlen veszély, amely az erdők kedvező környezeti hatásait csökkenti. A *minőségi romlás* a faji diverzitás erős csökkenéséhez s az erdő egyéb funkcióinak hiányos ellátásához vezet.

Súlyos gond az *illegális fakitermelés és kivitel*, amely néhány országban ijesztő méreteket ölt. Abramovitz 1998-as tanulmánya szerint Pápua Új-Guineában az ellenőrizetlen fakivitel egy év alatt 241 millió dollár veszteséget okozott az országnak. Még megdöbbentőbb, hogy Braziliában Amazonas tartományban a fakitermelés 80%-a illegális! Kambodzsában pedig az engedély nélküli fakitermelés akkora veszteséget okoz, mint a nemzeti költségvetés teljes összege. Az erdők gyakran esnek a korrupció áldozatául még fejlett országokban is, néhány fejlődő országban pedig a politikai és családi érdekek szinte a teljes erdőtakaró kiirtását eredményezték. Jól példázza ezt a Fülöp-szigetek esete, ahol Ferdinand Marcos diktátor a szövetségeseinek fakitermelési *koncessziókat* adott, s így a 60-as években még a világ második legnagyobb faexportáló országából a 20. század végére már behozatalra szoruló ország lett.

Az erdők degradációjához maga a *modern erdőgazdálkodás* is hozzájárul. Ennek egyik jellemzője a *monokultúra*, azaz olyan erdőtelepítés és felújítás, amelynek során nagy területen egyszerre egyetlen fafajt telepítenek, így a természetes erdőktől távol álló fajszegény állományok alakulnak ki. Az egyszerre vágáséretté váló erdőben szinte törvényszerűen következik a *tarvágás* alkalmazása, amely a talajt egy ideig teljesen védtelenné teszi a vízerózióval szemben, s ez lejtős területeken akár az erdők újratelepítését is gátolhatja, ha a lezúduló víz *eróziós árkokat* mélyít a felszínbe. (A tarvágás széleskörű alkalmazását mi sem bizonyítja jobban, mint a magyar gyakorlat, ahol az erdőterület 90 százalékán fakitermeléskor a tarvágást alkalmazzák.)

Az erdészeti gyakorlatban világszerte telepítenek *idegen fafajokat* az őshonosak helyett. Ez az eset, amikor az ember okosabb akar lenni a természetnél, de ez rendszerint nem sikerül. Portugáliában például új eukaliptusz-ültetvényeket telepítettek néhány kiirtott erdő helyére. Az Ausztráliából származó eukaliptusz lombjának sajátossága, hogy a levelei élükre állva viselik el a nagyon erős napsugárzást; ennek azonban az a következménye, hogy a talajt igen erős sugárzás éri, így kiszárad. Az itt őshonos aljnövényzet nem tud megtelepedni, a talaj védtelen marad a hirtelen lezúduló záporokkal szemben. Az erdőtelepítés tehát nem hozta meg azokat a kedvező eredményeket, amelyeket egy vagy több őshonos fafaj telepítése meghozhatott volna. Magyarországon is eluralkodott az erdőgazdálkodásban az idegen fafajok telepítése: erdőterületeink felén nem őshonos fafajok állományait találjuk, s ez sokszor a talaj

elsavanyodásával, máskor az aljnövényzet szinte teljes eltűnésével, súlyos faji elszegényedéssel jár együtt.

Az *intenzív és gépesített erdőművelés* is sok országban elterjedt. A vegyszerek alkalmazása (gyomirtók, rovarölők) az erdők fajainak természetes populációiban tesz kárt, mivel alig használnak olyan vegyszereket, amelyek csak egyetlen (az ún. „kártékony”) fajra fejtenék ki hatásukat.

A „kártékony” szót azért tesszük idézőjelbe, mert *egy normálisan működő ökoszisztémában valójában nincs kártékony faj*. Az erdőben bonyolult táplálékláncok kapcsolódnak egymáshoz *táplálékhálózatot* képezve, ahol minden fajnak, minden populációnak megvan a szerepe. Elképzelhető, hogy átmenetileg egy-egy populáció túlszorodik, de az egészséges erdőben azonnal működésbe lép a negatív visszacsatolás, és rövidesen megálljt parancsol a túlzottan elszaporodó populációnak. Az erdő újra egyensúlyi állapotba kerül, és zavartalanul működik tovább.

A „kártékony” fajokat az ember csinálja azzal, hogy monokultúrát hoz létre az erdőben (ugyanazt teszi a mezőgazdaságban is), s erre az egy fafajra „szakosodott” élőlények mérhetetlenül elszaporodnak, mert nincs megfelelő konkurenciájuk, nincs fék, ami megálljt parancsolna terjeszkedésüknek. Kénytelen maga az ember közbelépni, s ehhez a legjobb módszernek tartja a gépekkel kiszórt vegyszereket.

Minden egyebet is igyekszik gépesíteni, mert az erdőművelés nehéz munka. Ma már a favágás után *tuskózás* következik, ami nem egyéb, mint a tuskók kitépése a földből gyökerestül. A tuskók eltávolítása után a „teljes talajelőkészítés” az alomszintet s a benne élő fajokat, sőt a korábbi aljnövényzetet és a hozzá társult állatvilág nagy részét is elpusztítja. Az eredeti erdő élő rendszerének visszaállítása így rendkívül nehéz, ha egyáltalán lehetséges.

A gépesített erdőgazdálkodás igénye az ún. *feltáró utak* létesítése. Ezek nem mindig a kívánt méretben és sűrűséggel valósulnak meg, sőt időnként megdöbbentő anomáliákra is fény derül. Mintegy 15 évvel ezelőtt a trópusi erdők megmentésére 8 milliárd dolláros pénzalapot hoztak léte, amelyből többek között Kamerun is kapott. Az akcióprogram szakemberei 600 km feltáró út építését javasolták az érintetlen esőerdőn keresztül, és a fakitermelést szorgalmazták. Vagyis pontosan az ellenkezőjét, mint amire a pénzalap született. A dologból nemzetközi botrány lett. A feltáró utak helytelen vezetése vagy rossz kivitelezése különösen lejtős területeken erős talajeróziót okozhat és hozzájárulhat az erdő degradációjához. Ha a feltáró utak túl sűrűn helyezkednek el, egyéb káros ökológiai következményei is lehetnek, főleg az erdő vízháztartására gyakorolnak kedvezőtlen hatást.

Az ember által kezelt erdőkben szabályozni kell a *nagyvadállományt*, mert ha ezt nem teszik, a túlszaporodott növényevők (nálunk pl. szarvas, muflon, vaddisznó) nehezzé teszik vagy teljesen megakadályozzák az erdőfelújítást (lerágják a facsemetéket).

Külön kell megemlítenünk egy olyan problémát, amely hazánk erdőgazdálkodását erősen sújtja. A rendszerváltás után rengeteg erdő került magántulajdonba: ma *több, mint 300 ezer tulajdonos* osztozik a teljes erdőterület felén (a másik fele állami tulajdonban van), ami annyit jelent, hogy 1–2 ha-os erdőterület jut egy-egy tulajdonosra. Ez olyan kis terület, hogy rajta ésszerű, ökológiai szempontból elfogadható erdőgazdálkodást folytatni nem lehet. A tulajdonosok többsége nem is akar! Céljuk: a bevétel, a haszon. Ennek pedig legegyszerűbb módja a tarvágás, és a letermelt fa értékesítése.

Ezek után fel kell tennünk a kérdést: fenntartható-e hosszú távon is napjaink erdőgazdálkodása? Abból kell kiindulnunk, hogy az emberiségnek továbbra is szüksége van faanyagra, és ezt a jövőben is az erdőből fogják kitermelni. Sok erdész ma is úgy értelmezi a fenntarthatóságot, hogy az az erdőgazdálkodás, amely a rendelkezésére álló erdőkből a gazdasági igények folyamatos kielégítésére képes, fenntarthatónak tekinthető.

Szerintünk csak az az erdőgazdálkodási mód tekinthető fenntarthatónak, amely az erdőket ökológiai rendszerként kezeli, s csak annyit és úgy vesz ki a rendszerből, amennyi annak tartós működését lehetővé teszi. Ha ebből a szempontból vizsgáljuk meg napjaink erdőgazdálkodását, azt kell tapasztalnunk, hogy a trópusi erdők területén, összkiterjedésük kb. egy ezrelékén törekednek a fahozam fenntartására, és az erdők ökológiai szempontú kezelésére..

Jelenleg ott tart az erdőgazdálkodás, hogy egyre többen kezdik megérteni a fenntarthatóság szükségességét, hisz a további drasztikus erdőirtás az érdekelt vállalkozások hosszú távú lehetőségeit is veszélybe sodorja. Napjaink erdőgazdálkodását úgy értékelhetjük, hogy az a *valódi fenntarthatóság felé történő átalakulás kezdeti szakaszában van*.

Meg kell magyaráznunk, mit értünk „valódi fenntarthatóságon”. Sajnos, a fenntarthatóság fogalmát rövid létezése óta sokan és sokféleképpen lejáratták. Egyes erdőgazdaságok szlogenjei (mint pl. „minden kivágott fa helyett ötöt ültetünk”, vagy: „környezetbarát” termék, esetleg: „fenntartható erdőgazdálkodás”) ellenőrizetlen és ellenőrizhetetlen kijelentések, s azt a célt szolgálják, hogy az adott erdőgazdaság termékeit minél többen vásárolják. A „minden kivágott fa helyett ötöt ültetünk” kijelentés még akkor sem jelent okvetlenül fenntartható erdőgazdálkodást, ha igaz az állítás. Nem mindegy ugyanis, hogy milyen fát vágnak ki (pl. 200 éves öreg tölgyet vagy 20 éves hibrid nyárfát, esetleg egy trópusi óriás fát), helyette hova és milyen fákat ültetnek, s azoknak mi lesz a sorsuk. Az új fák ugyanannak az ökológiai

rendszernek őshonos fái vagy valamelyik *faültetvény* csemetéi, amelyeket gyors ütemben nevelnek és kitermelnek? Még kevésbé ellenőrizhető a sok helyen felbukkanó „környezetbarát” erdei termék valódi életútja.

Éppen azért, hogy ezeknek a kijelentéseknek hitelük legyen, a valóban környezetkímélő gazdálkodásra törekvő erdészetek, fakitermelő és feldolgozó vállalatok, környezetvédő szervezetek, szakemberek létrehozták 1993-ban a *nemzetközi* tevékenységet vállaló *Erdőgazdálkodási Tanácsot*. Ez a szervezet a különböző erdészeti vállalkozások számára, az ő felkérésük esetén megvizsgálja a kérelmező vállalkozás erdészeti tevékenységét az erdő kezelésétől a fakitermelésen át a szállításig, értékesítésig, s amennyiben az valóban környezetkímélő, a Tanács által adományozott címkét jogosan használhatja termékein.

Az Erdőgazdálkodási Tanács kidolgozta Az erdőgazdálkodás alapelvei és kritériumai c. dokumentumot. Ez világos követelményeket fogalmaz meg a *fenntartható erdőgazdálkodásra* törekvő vállalatok számára. Az eddigi tapasztalatok kedvezők: egyre többen igénylik a Tanács minősítését, s a piacon is nő a kereslet az „ökocímkével” ellátott termékek iránt. Európában különösen kedvezők a tapasztalatok, Ázsiában azonban egyelőre kicsi az igény az ökotermékek iránt. Japán meghatározó az erdők jövője szempontjából, hisz a világ ipari gömbfaimportjának 37 százalékát egymaga bonyolítja le. Halvány reménysugarat jelent, hogy ott is bevezettek egy termékminősítési eljárást, ami a faáru eredetét, előállítási módját minősíti.

Mindezek ellenére, ha a világ erdőgazdálkodásának jelenlegi helyzetét röviden akarjuk jellemezni az erdők jövője szempontjából, azt kell megállapítanunk, hogy *az erdőgazdálkodás a világ erdeinek túlnyomó részén nem fenntartható módon zajlik*. Éppen ezért a „mentsük, ami menthető!” jelszó jegyében minél több erdőt *természetvédelmi területté* kell nyilvánítani, azaz *jogi védelem alá helyezni*. Jelenleg a Föld erdeinek kb. 7 százaléka védett, hazánk azonban sokkal jobban áll ezen a téren: erdeink több, mint 20 százaléka valamilyen fokú védeltséget élvez.

Tudnunk kell azonban, hogy a természetvédelmi oltalom még a fejlettebb, demokratikus berendezkedésű országokban sem jelent automatikus védelmet az erdők számára, a trópusi szegény országokban pedig a védeltség ellenére is nagyfokú a veszélyeztetettségük. Gondoljunk csak a korábban tárgyalt *illegális fakitermelésre!* Emellett sok országnak még *gyengén fejlett a természetvédelmi intézményrendszere*, s a jogszabályok betartását kikényszerítő szervezetek sem működnek megfelelően, sokszor *kiterjedt korrupció* bénítja meg őket, akár a legmagasabb szinten is.

A jelenlegi helyzetben a nemzetközi természetvédelmi szervezeteknek (IUCN = Nemzetközi Természetvédelmi Szövetség és a WWF = Természetvédelmi Világalap) *azt kell elérniük, hogy a Föld meglévő erdőtípusainak mindegyikéből legyenek védetté nyilvánított területek, mégpedig kellő kiterjedésben. A méret nemcsak azért fontos, hogy minél több erdő kerüljön védelem alá, hanem elsősorban azért, hogy az önfenntartó mechanizmusai zavartalanul működhessenek. Megfigyelték ugyanis, hogy ha egy összefüggő erdőállomány túl kis területű, az ökológiai rendszer nem működik jól: egyes fajok populációi kipusztulhatnak, ami az egész eredeti erdő romlásához vezethet. Világméretben az lenne elfogadható, ha 2005-re minden természetes és természetközeli erdőtípus legalább 10 százaléka védettséget élvezne, és a valóban fenntarthatóan működő erdőgazdaságok összes területe elérné a 200 millió hektárt (2 millió km²-t).*

Magyarországon a világtáznál jobb a helyzet, ami nagyrészt annak köszönhető, hogy fejlett intézményrendszert hoztunk létre, amely túlnyomó részben az Európai Unió jogrendszerével harmonizál, egyes területeken pedig szigorúbb is annál.

Az 1996-ban elfogadott természetvédelmi törvényünk többek között a következőket mondja ki: „*Fokozottan védett természeti területen lévő erdőben erdőgazdálkodási beavatkozás csak a természetvédelmi kezelés részeként a természetvédelmi hatóság hozzájárulásával végezhető.*” Ezen általános szabályozáson kívül több erdőgazdálkodási tevékenység korlátozását is előírja a különböző védettségi fokozatú természeti területeken.

Így például védett természeti területen lévő erdőben

erdőtelepítést kizárólag őshonos fafajokkal és a természetes elegy-arányoknak megfelelően lehet végezni,

fakitermelést a vegetációs időszakon kívül kell végezni,

tilos a teljes talajelőkészítés és vágásterületen az égetés,

az erdőfelújítást a termőhelynek megfelelő *őshonos fafajokkal* és természetes felújítási módszerekkel kell végezni.

Mind a növények fejlődése szempontjából (növényevő állatok szerepe), mind pedig az állati populációk ideális méretének kialakítása szempontjából fontos a *vadászat* szabályozása a természetvédelmi területeken. Az élő rendszerek védelme, normális működése érdekében szükség lehet *különleges rendeltetésű vadászterületté* nyilvánításra. Erre vonatkozóan a vadgazdálkodásról és a vadászatról szóló törvény rendelkezései az irányadók. Tudnunk kell, hogy *az erdők természetes vadeltartó képességét jelentősen meghaladó vadállomány mellett*

még a természetes úton, magról történő felújítás sem lehet sikeres. A túltartott vadállomány tehát veszélyezteti erdeinket, így csökkentése feltétlenül szükséges.

Hazánkban távlati célként tűzhető ki, hogy az ország területének egynegyedét erdők borítsák. Ezen belül a természetközeli erdők kiterjedése – ideális esetben – 12 százalékot érhet el. Jelenleg erdeink összkiterjedése megközelíti az ország területének 20 százalékát, s lassan tovább növekszik.

2.9. A globális társadalom és a környezet

2.9.1. A társadalmi gazdasági fejlődés és a globalizáció környezeti következményei

A 2. világháborút követő gazdasági fellendülés, az ezzel együtt egyre inkább kiteljesedő globalizáció, olyan mértékben igénybe vette a földi környezetet, hogy az 1970-es évek elejére egyre nyilvánvalóbbá vált, minél előbb át kellene gondolni globális léptékben a gazdaság-társadalom-környezet kapcsolatrendszerét. A globális gondolkodást politikai síkra először U Thant, ENSZ főtitkár terelte látványosan, az ENSZ 1969-es ülésén. Nagy hatású beszéde, szinte startpisztolyként hatott a globális környezeti gondolkodásban: *„ennek a szervezetnek még egy évtizednyi ideje van arra, hogy tagjai elfelejtsék régi pereiket, és elkezdjenek egy világot átfogó együttműködést, hogy megállítsák a fegyverkezési versenyt, megjavítsák az emberiség életterét, megfékezzék a népességnövekedést, és a kibontakozáshoz megadják az első impulzust. Ha az elkövetkező tíz esztendőben nem jön létre ilyen összefogás, akkor attól félek, ezek a nehézségek olyan méreteket öltenek, hogy a megoldásuk meg fogja haladni az emberiség képességeit”*. Az ENSZ egyik szakosított szervezete, az UNESCO már 1970-ben elindította az „Ember és Bioszféra” (MAB) programot, majd 1972-ben megszervezték az ENSZ első környezetvédelmi világkonferenciáját is Stockholmban.

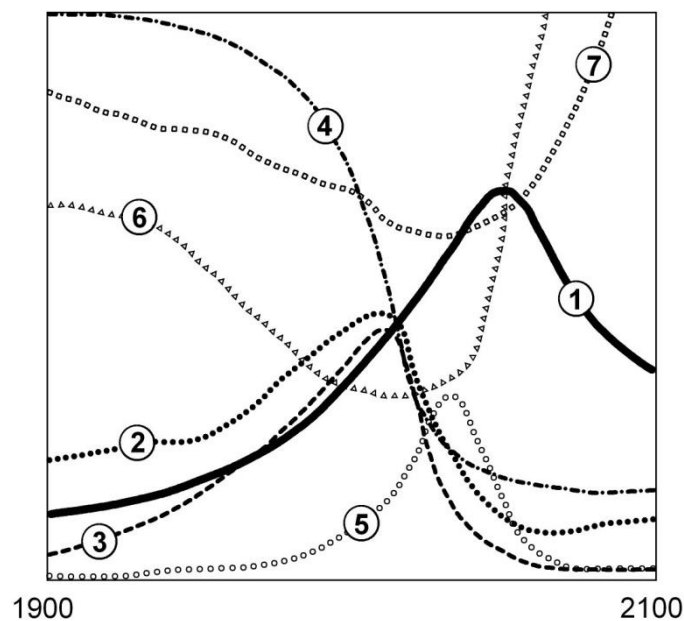
Ez volt az az időszak, amikor már felsejlett, hogy a rohamos népességnövekedéssel a Föld véges erőforrásai (élelem, ásványkincsek) nem tudnak lépést tartani. A helyzet áttekintő értékelésére számos globális modell született (1970-es évtizedben)⁶⁶. Ezek ugyan sokféle megközelítést alkalmaztak, de megállapításaik abban megegyeztek, hogy a kor önző, környezetromboló gazdaságpolitikáját nem lehet az emberiség létének veszélyeztetése nélkül fenntartani.

⁶⁶ A modellekről részletesebb összefoglalás található Rakonczai J. (2003): Globális környezeti problémák c. könyvében.

2.9.1.1. A globális modellek környezeti vonatkozásai

Az első és egyben a legnagyobb hatású világmodell a Római Klub nevű tudós társasághoz köthető. A Forrester, majd az erre épülő Meadows számítógépes modellek világosan bemutatják⁶⁷, hogy a korban (1970-es évek eleje) jellemző gazdasági és társadalmi folyamatok belátható időn belül az emberiség katasztrófájához vezet. Ennek végső oka az élelem- vagy a nyersanyaghiány, de éppúgy lehet a környezet szennyezésekkel szembeni teherbíró-képessége is (**118. ábra** és **119. ábra**). Már ekkor felhívják a figyelmet külön is környezetvédelmi szempontok beépítésének szükségességére a gazdaságba, illetve a környezetszennyezés következményeire a DDT példáján (**120. ábra**).

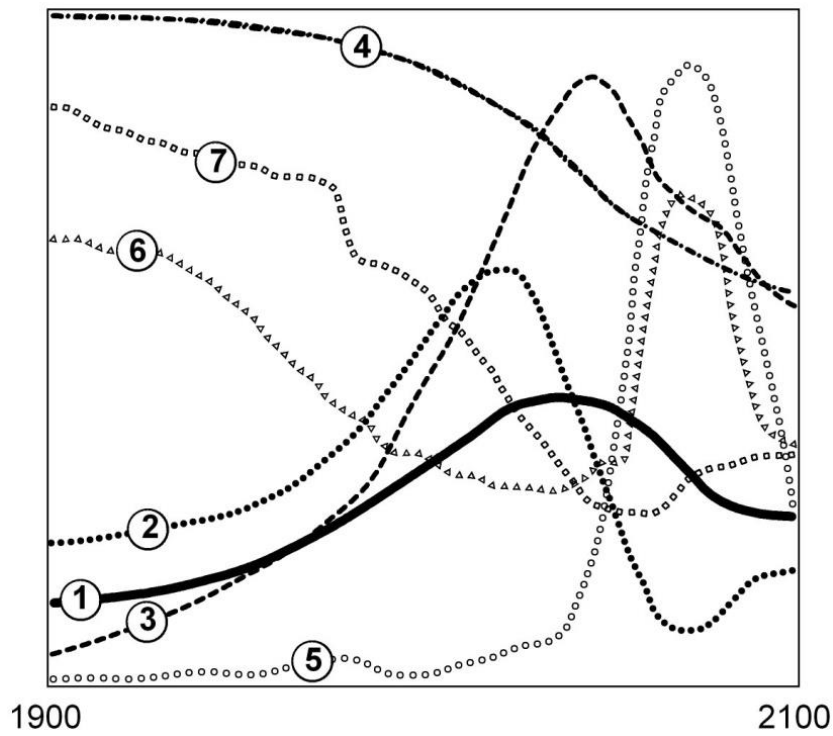
Összegző eredményként a zéró-növekedés ideológiáját fogalmazzák meg, ami azt jelentené, hogy az emberiség hosszú távon csak „befagyasztott” termelés és népességszám mellett maradhat fenn gazdasági és társadalmi krízisek nélkül (**121. ábra**).



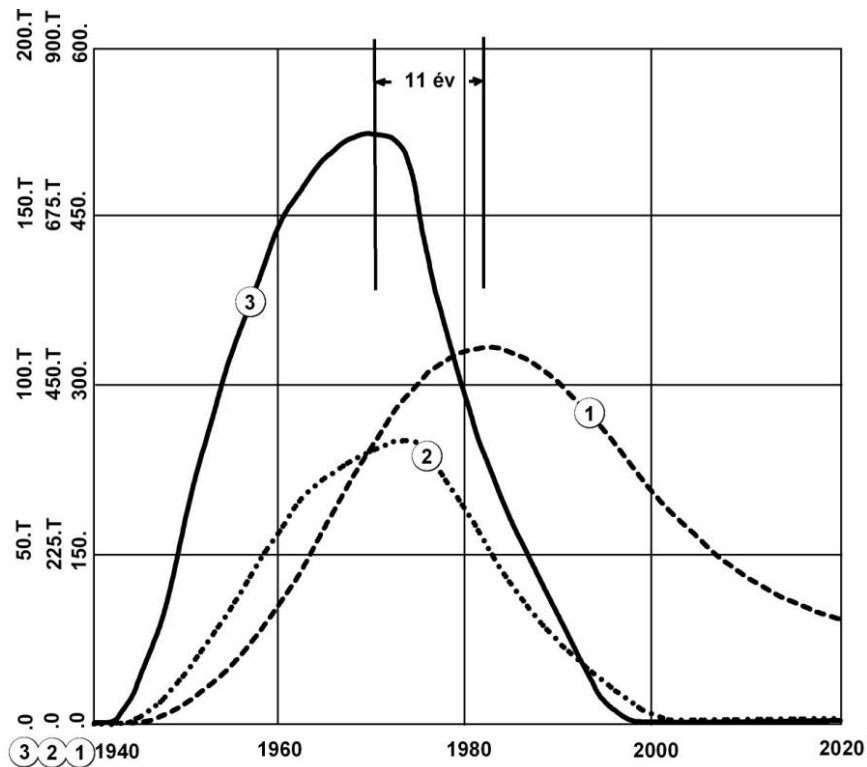
118. ábra. Az 1970-es évek elején uralkodó trendek alapján készített Meadows-féle modellváltozat

Jelmagyarázat a **118. ábra**, **119. ábra** és **121. ábra**: 1: a Föld népessége, 2: az egy főre jutó élelem, 3: az egy főre jutó ipari termelés, 4: nyersanyagkészletek, 5: környezetszennyezés, 6: halálozás, 7: születésszám.

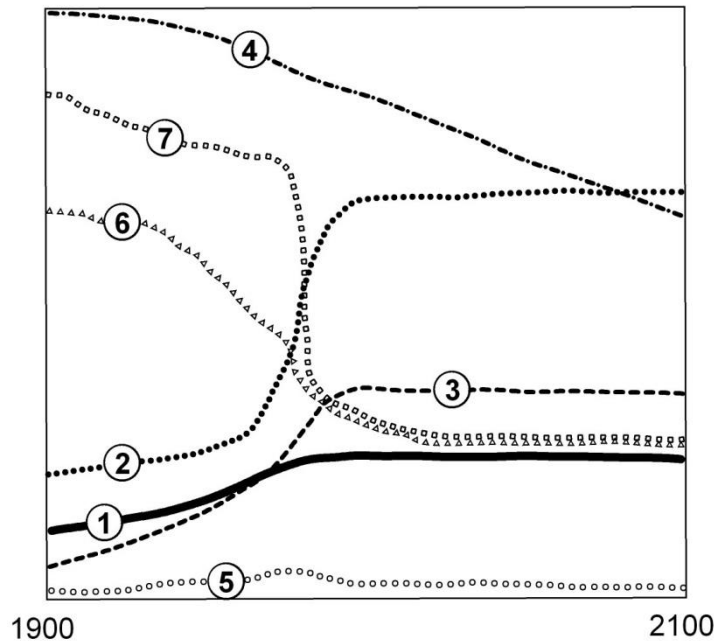
⁶⁷ Eredetileg 1972-ben „A növekedés határai” (The Limit to Growth) címmel mutatták be, majd 1974-ben „A növekedés dinamikája véges világban” (Dynamics of Growth in a finite World) címen publikálták.



119. ábra. A Meadows-modell eredménye korlátlan nyersanyagkészletek, intenzív mezőgazdaság és redukált környezetszennyezés esetén



120. ábra. A DDT éves felhasználása a világban (3), a talajban felhalmozódott mennyiség (2) és halmozódása a halakban (1) (Forrás: Meadows és társai 1974)



121. ábra. A Meadows-modellek egyik stabilizált változata (1975-ös stabilizálás)

Az ENSZ felkérésére készített Leontief-modell a környezeti ügyekre utalva két fontos kérdéskört vet fel: egyrészt elkerülhetetlen-e a szennyeződés növekedése a gazdasági fejlődéssel, másrészt a környezeti károk leküzdésének költségei nem túl nagyok-e, elviselhető-e árnövelő hatásuk? Az anyag szerint a technológiai feltételek adottak a szennyezések csökkentésére (például hulladékok újrahasznosítása), a gazdasági feltételek azonban a szükséges módszerek alkalmazását regionként eltérően teszik lehetővé. Emiatt kényszerből differenciált szabványok és ráfordítások alkalmazhatók a környezetvédelemben, azaz a gazdaságilag erősebb országokban többet lehet rá fordítani, a szegényeknél pedig gyakorlatilag el kell attól tekinteni.

Miután a modellek zömében a közgazdasági és társadalmi elemzések domináltak és a környezeti szempontok (ha vannak egyáltalán) másodlagosak voltak, az emberiség csak kevésbé szembesült azok átfogó következményeivel. A mind több szférát (főként a vizeket és a levegőt) és területet érintő környezeti problémák azonban kutatások sorát indította el, valamint a társadalom érdeklődésének központjába állította a környezetvédelmet, így több konferencián már bemutatták a fokozódó veszélyeket.

2.9.1.2. A fenntartható fejlődéstől az emberiség ökológiai lábnyomáig

A globális környezeti kérdésekkel foglalkozó világkonferenciák és egyéb rendezvények, a környezetvédő szervezetek tevékenysége, stb. azt bizonyították, hogy az emberek és a

kormányok felismerték: a gazdasági fejlesztés és a környezet kérdései nem választhatók el. A „túlélés egyetlen lehetőségeként” a Meadows-modellekben felvázolt zéró gazdasági növekedés nem jelenthetett elfogadható megoldást sem a fejlett, sem a fejletlen országok számára, de ugyanúgy mindenkinek számolni kell az előző fejezetekben érintett globális problémák következményeivel is. Az emberiség tehát eljutott a tények felismeréséig, a közös cselekvés szükségességéig, sőt ezen túlmenően egy új világmodell megfogalmazásának igényéig. Lester Brown, a Worldwatch Institute vezetője vázolta fel először a fenntarthatóság gondolatát, amely végül a fenntartható fejlődés elvének kidolgozásához vezetett. Ezt a „harmonikus fejlesztés” (a későbbiekben „fenntartható fejlődés”) modellt vette át a Gro Harlem Brundtland norvég miniszterelnök-asszony nevével fémjelzett ENSZ Környezet és Fejlesztés Világbizottság (1987). *A fenntartható fejlődés lényege: a jelen szükségleteit úgy kell kielégíteni, hogy az ne veszélyeztesse a jövő generáció életfeltételeit.*

A fenntartható fejlődés kellemes ideológiának bizonyult arra, hogy az emberiség nyugodt szívvel dughassa a homokba a fejét. A fenntartható fejlődésbe belefér a gazdasági növekedés, a növekvő fogyasztás, s nem okoz igazi konfliktust a különböző fejlettségű országok között sem – csak a világ környezeti mutatói nem tudtak „megbékülni” az eszmével. Az elmúlt két évtizedben egyre szaporodtak a fenntarthatóságot megkérdőjelező tények (pl. túlhalászás, ózon probléma, globális felmelegedés, vízhiány, stb.). De az ideológia azért is jó, mert a személyes felelősséget a globális problémákban nem lehet megfogni, az legfeljebb államok szintjén jelentkezik. Gyökeresen új helyzetet teremtett egy akár a személyek szintjéig is lebontható mutató, az ún. ökológiai lábnyom bevezetése⁶⁸.

A ökológiai lábnyom az a terület, ami károsodás nélkül (azaz fenntartható módon) meg tudja termelni egy adott személy aktuális életviteléhez szükséges javakat, számszerűsíti, hogy életmódunk mekkora hatással bír a természetre. Eredetileg minden egyén ökológiai lábnyoma hat elemből állt össze: az a terület, amelyen a táplálkozáshoz szükséges élelem megtermelhető; annak a legelőnek a nagysága, amely az általa elfogyasztott hús előállításához szükséges; a fa- és papírfogyasztásának megfelelő nagyságú erdőterület; a hal fogyasztásával arányos tenger; a lakáshoz szükséges földterület; valamint annak az erdőterületnek a nagysága, amely az egyén

⁶⁸ Kanadában jelent meg Wackernagel - Rees (1995): Ökológiai lábnyomunk – Az emberi hatás mérséklése a Földön címmel. Szemléletformáló hatását mutatja, hogy ma már egész világhálózat van a mérési módszernek. Célszerű hosszán elidőzni a <http://www.footprintnetwork.org/> oldalon!

energiafogyasztásával arányos mennyiségű szén-dioxid megkötéséhez szükséges.⁶⁹ A komplex mutató környezeti szempontok alapján teremt lehetőséget arra, hogy mérni lehessen, és összehasonlíthatóvá váljon egyének és országok fogyasztási szintje, illetve ugyanígy a rendelkezésükre álló erőforrások is. Ez lényegesen több annál, mint, hogy a fejlett országok többet fogyasztanak az országukban rendelkezésükre állónál, vagy nagyobb a káros anyag kibocsátásuk. Az pedig, hogy ezt megközelítőleg a konkrét személyekre lebontva is meg lehet határozni⁷⁰, talán növeli az egyének felelősség érzetét.

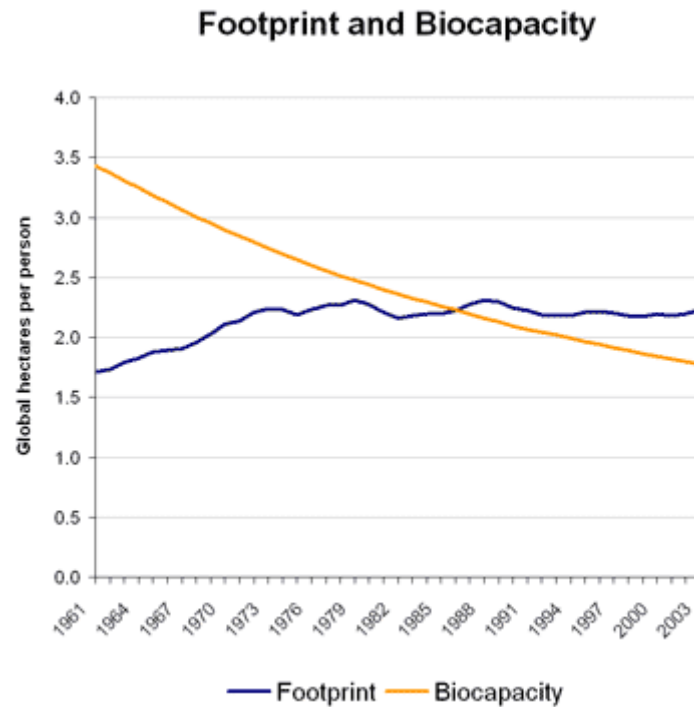
Legnagyobb jelentősége talán abban van, hogy (bizonyos pontatlanságai ellenére is) szembesít bennünket a Földünk korlátozott lehetőségeivel és folyamatosan növekvő szükségleteinkkel. Ezeket ebben a komplex mutatóban összevetve rá kell döbbernünk, hogy a fenntartható fejlődés sem globális szinten (**122. ábra**), sem az országok nagy részében nem reális lehetőség.

Az ábra szembesít bennünket azzal a ténnyel, hogy miközben az emberiség az 1980-as évek vége felé kezdett megbarátkozni a fenntartható fejlődés gondolatával (a gyors népességnövekedés miatt) éppen túl lépte a fenntarthatóság határát. Az is látszik, hogy az átlagos lábnyom méret alig változik már három évtizede. Ennek magyarázata, hogy a fejlett országok lábnyom növekedését a kevesebbet fogyasztó, de nagy népességnövekedésű országok mintegy kompenzálják, legalábbis időlegesen (**123. ábra**). Ez azonban nagyon csalóka, mert az emberiség tényleges ökológiai lábnyoma ez idő alatt kb. háromszorosára nőtt (**124. ábra**). Folyamatosan feléljük a Föld erőforrásait, és azonnali beavatkozással is csak az évszázad közepe tájára lehetne fenntartható szintre hozni „túlhasználatunkat”. Az ábrákon látszik, hogy 2003-ban az egy főre jutó már csak 1,8 hektár helyett átlagosan 2,2 hektárt használunk. Egy másik megközelítésben ez azt jelent, hogy amíg az 1960-as évek elején kb. fél Földre volt

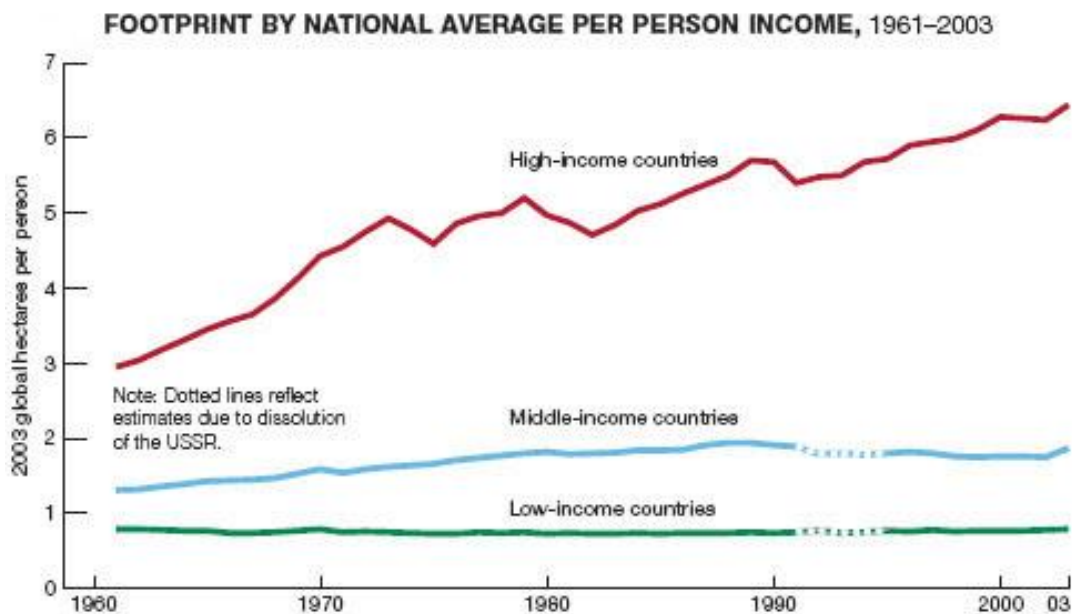
⁶⁹ A számítási módszer mára annyira népszerű lett, hogy további elemmel (nukleáris lábnyom) bővítették, részletesebbé tették, illetve egyes vizsgálatoknál már számolnak édesvízi indexet is (lásd a WWF: Living planet report 2006 kiadványt – pl. a <http://www.footprintnetwork.org/> címen. Mértékegysége a globális hektár, ami figyelembe veszi a tényleges természeti adottságokat, azaz területileg differenciált.

⁷⁰ Az interneten számos helyet találhatunk saját ökológiai lábnyomunk kiszámítására. Példaként több magyar és angol nyelvű programot is felsorolunk. Ilyenek: <http://www.antsz.hu/okk/okbi/movies/okolabnyom.swf> vagy az azonos <http://tavoktatas.kovet.hu/okolabnyom.html>, de javasoljuk még a http://www.glia.hu/services/public/napi/oko_labnyom.php, illetve az angol <http://myfootprint.org/> vagy a többnyelvű <http://ecofoot.org/> címet is. Természetesen ezek a számítások az egyének szintjén elég nagy hibahatárral dolgoznak, és végeredményük sem azonos, de hozzávetőleges adatuk is jó tájékoztató lehet. Az országok közötti összehasonlítás már sokkal pontosabbnak mondható.

szüksége a világnépességnek, addig mára lassan megközelíti a másfelet (125. ábra)⁷¹. Ha az összetevők szerint nézzük kiderül, hogy a legnagyobb változást a fosszilis energiahordozók miatti széndioxid-forgalomban bekövetkező hatás okozza (126. ábra).

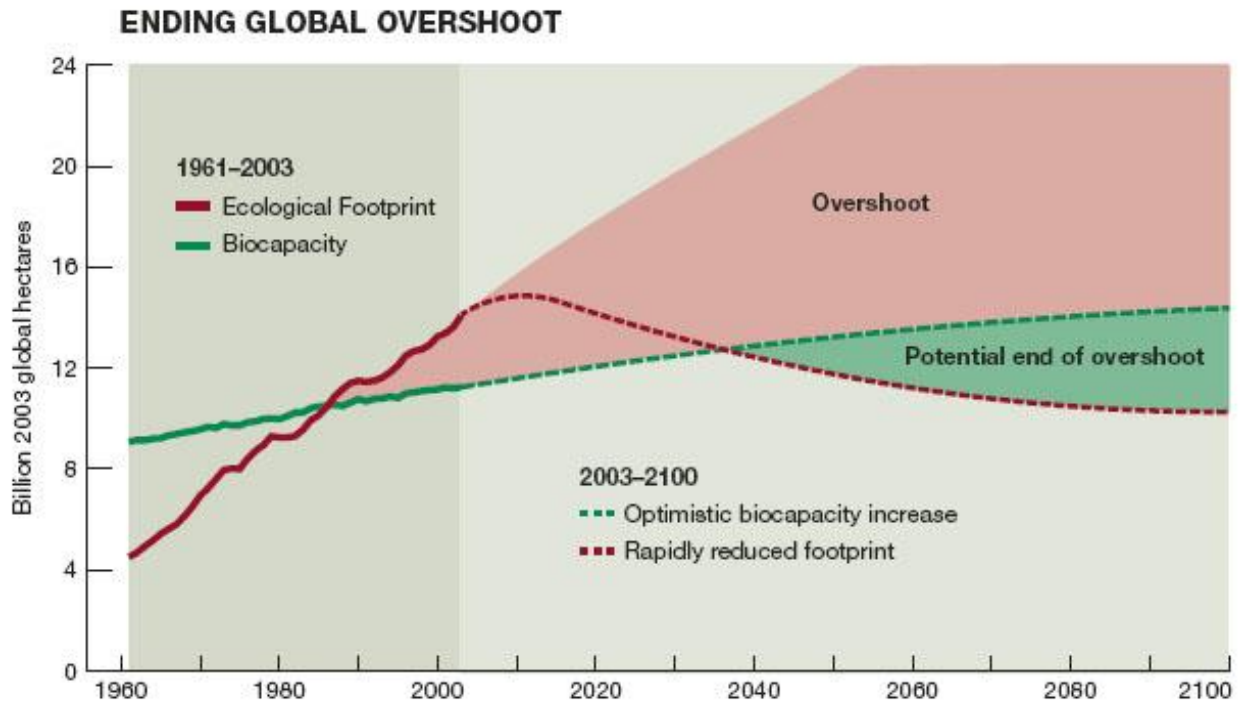


122. ábra. A Föld biológiai kapacitása és az emberiség ökológiai lábnyoma 1960-2003 (fő/globális hektár)(Forrás: <http://www.footprintnetwork.org>)

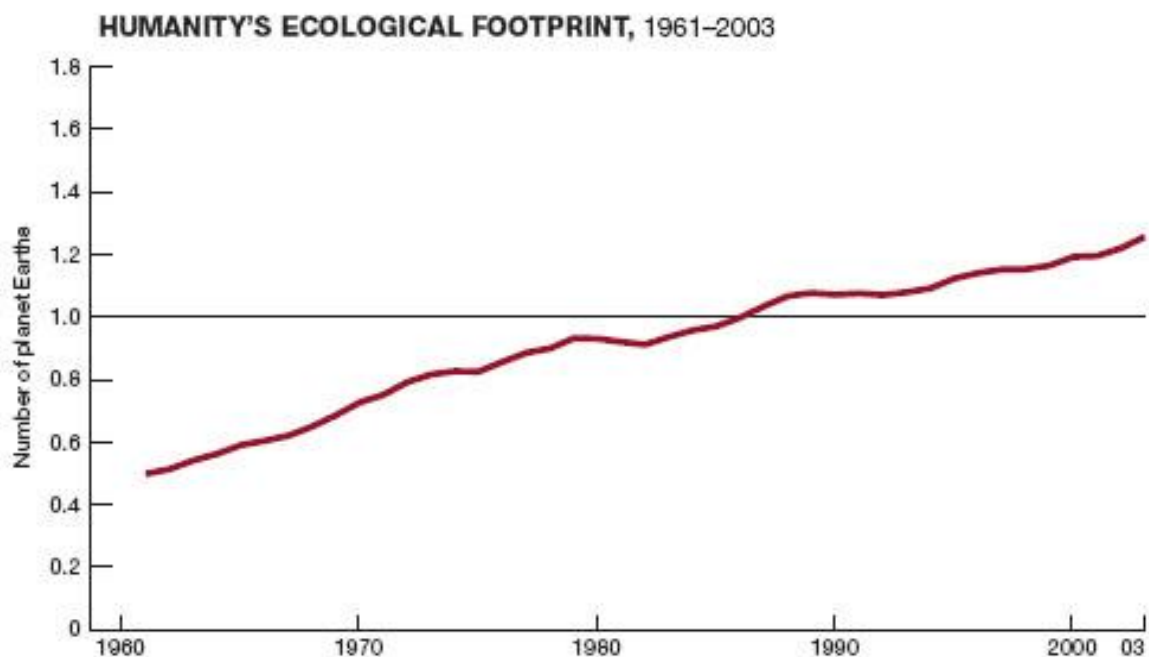


123. ábra. Az ökológiai lábnyom változása gazdasági fejlettség szerint (1961-2003) (Forrás: WWF 2006)

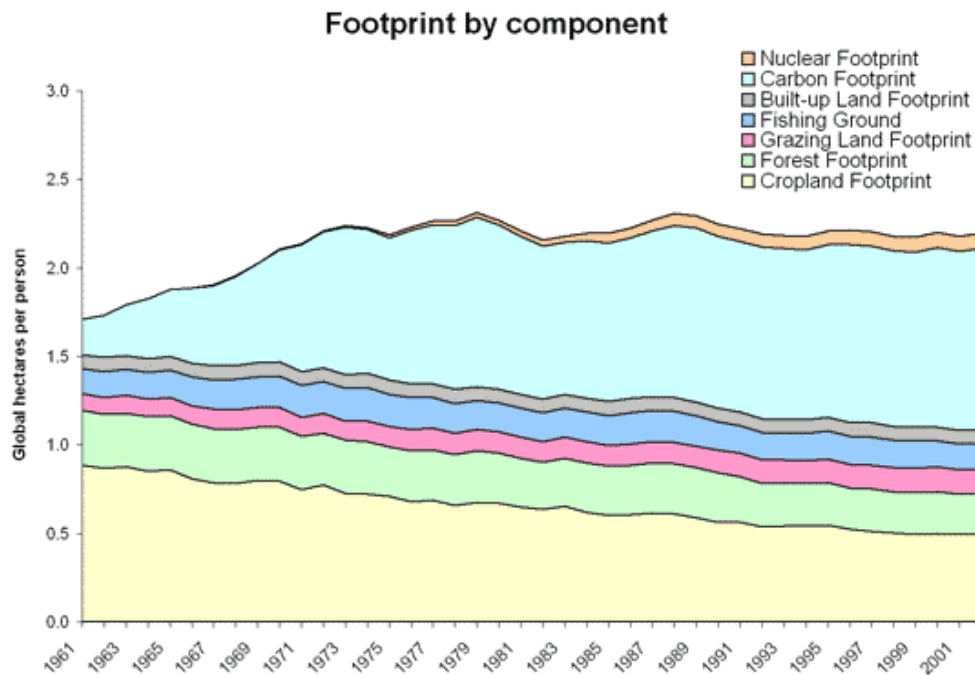
⁷¹ A számításokban 11,3 milliárd hektár biológiailag aktív földfelülettel számolnak.



124. ábra. Az emberiség teljes ökológiai lábnyoma és a Föld biológiai kapacitása (Forrás: WWF 2006)



125. ábra. Az emberiség ökológiai lábnyom igénye a Föld biológiai kapacitásához viszonyítva (1961-2003) (Forrás: WWF 2006)

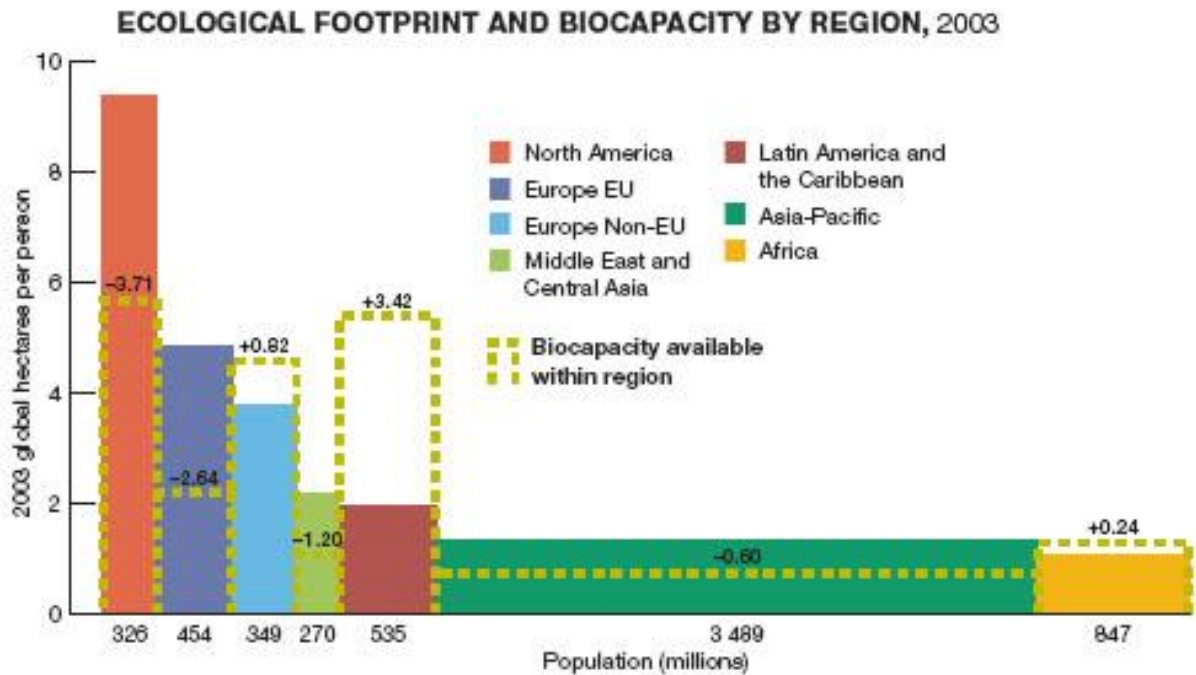


126. ábra. Az emberiség ökológiai lábnyoma komponenseinek alakulása (1961-2003)

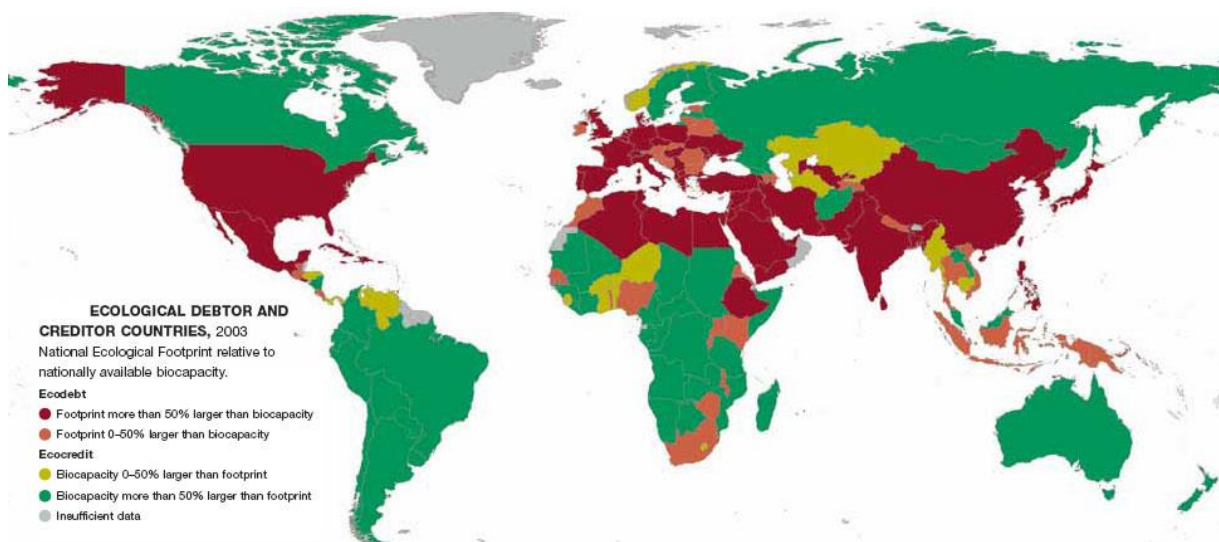
A Föld nagy régióit vizsgálva hatalmas aránytalanságokat találunk. A hét nagy térségből négy (Észak-Amerika, Európa, a Közel-Kelet és Ázsia) lényegesen többet használ annál, mint amennyi adottsággal rendelkezik (**127. ábra**). Az ábrát tanulmányozva érdemes arra felfigyelni, hogy Ázsia ugyan egy személyre vonatkoztatva viszonylag kevés értékkel lépi túl a biológiai kapacitását, ez azonban a hatalmas népesség miatt tetemes ökológiai deficitet jelent (majdnem kétszer annyit mint Észak-Amerika hiánya). Az országok jelentős részében a túlhasználat meghaladja a biológiai kapacitás másfélszeresét is (**128. ábra**). Az egy főre jutó átlagos hatást vizsgálva több mint 50 ország a világtátlagnál jobban veszi igénybe környezetét (**129. ábra**)⁷². Az „élbolyban” a sorrend: Egyesült Arab Emírátság, USA, Finnország, Kanada, Kuvait, Ausztrália. A fenti hat ország közül három (Finnország, Kanada és Ausztrália) azonban a rendelkezésre álló nagyobb terület, illetve kisebb népsűrűség miatt mégis kedvező helyzetben van (vö. **128. ábra**). Magyarország a 32. helyen található, s környezeti használatunk kb. kétszerese az adottságainknak. A **130. ábra** az is jól látható, hogy a lábnyom mérete szoros kapcsolatban van a gazdasági fejlettséggel. Hazánkra nézve kedvező, hogy miközben gazdasági fejlettségünk javult az elmúlt 30 évben, ökológiai lábnyomunk kissé csökkent.

⁷² A <http://www.footprintnetwork.org/> oldalról megtalálható részletes táblázat szinte valamennyi ország részletes adatát közli.

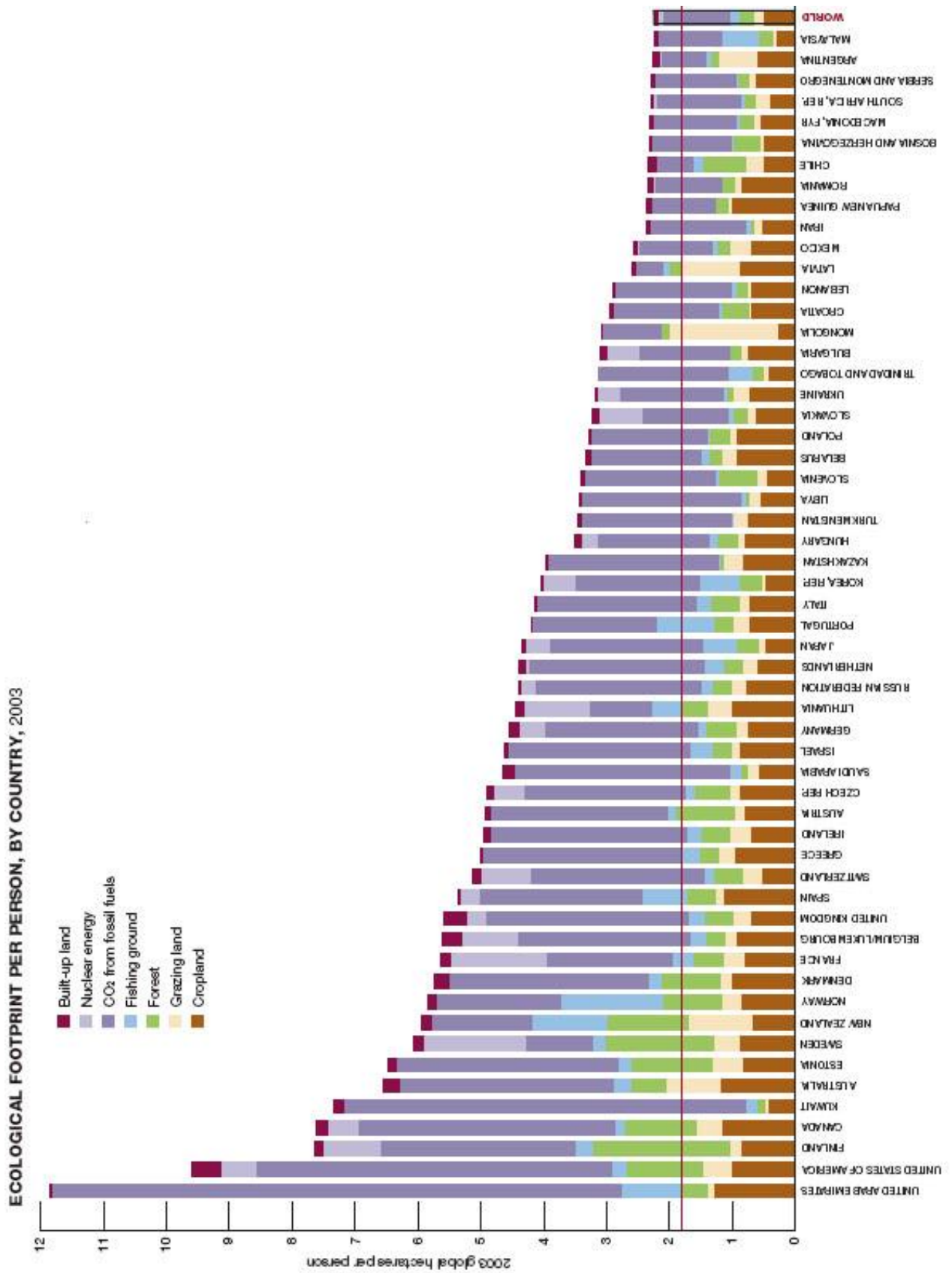
A Föld erőforrásainak használatát térképen bemutatva (**131. ábra**) jól látható, hogy az USA, Nyugat-Európa, Japán, Dél-Korea és a közel-keleti országok azok, amelyek a leginkább igénybe veszik a környezetet, de gyors gazdasági növekedésük miatt a két legnépesebb ország (Kína és India) szerepe rövid idő alatt jelentősen megnő.



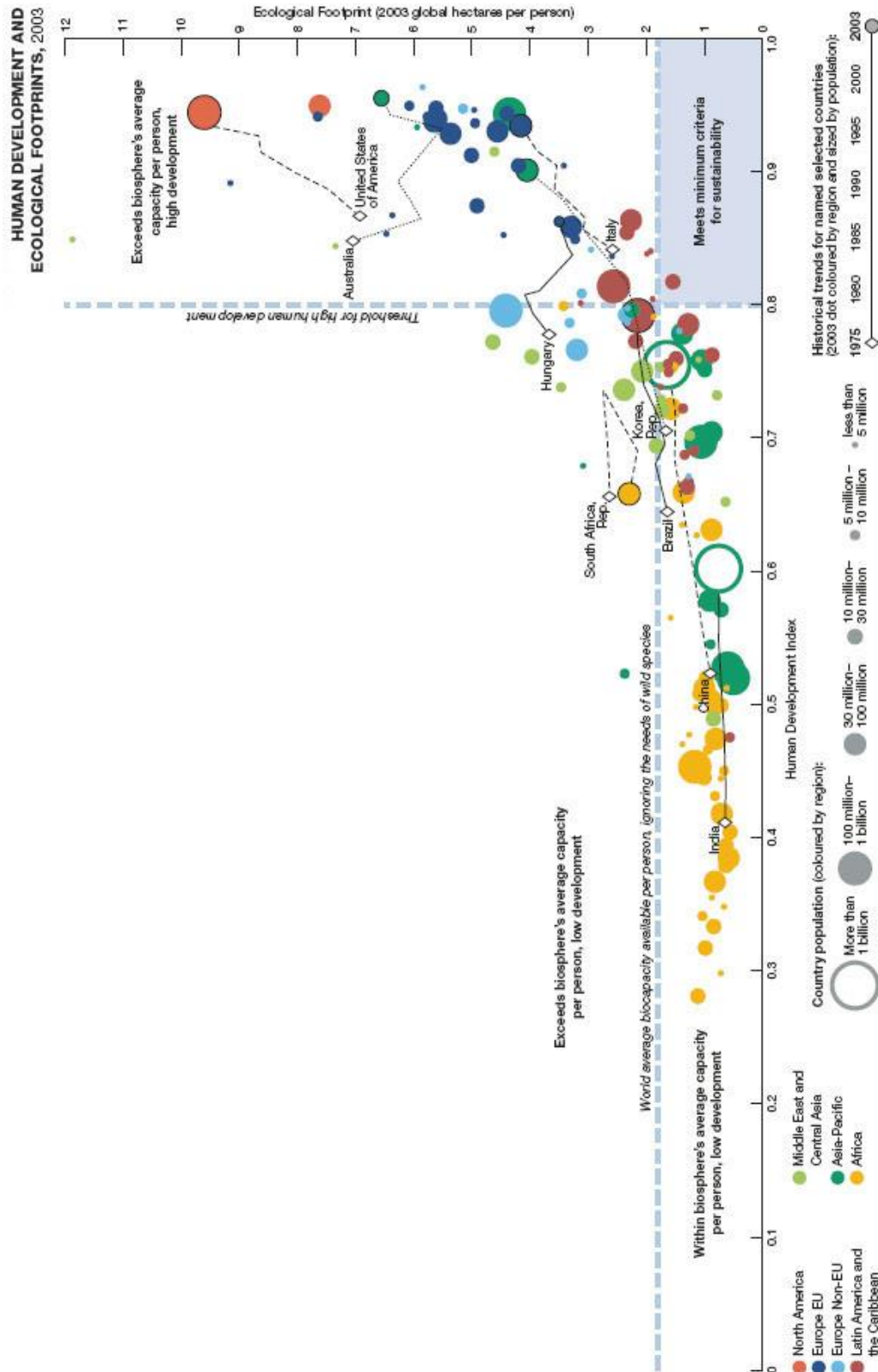
127. ábra. Az ökológiai lábnyom és a biológiai kapacitás régióként 2003-ban (Forrás: WWF 2006)



128. ábra. Ökológiai hiány vagy többlet mértéke országonként 2003-ban (Forrás: WWF 2006)

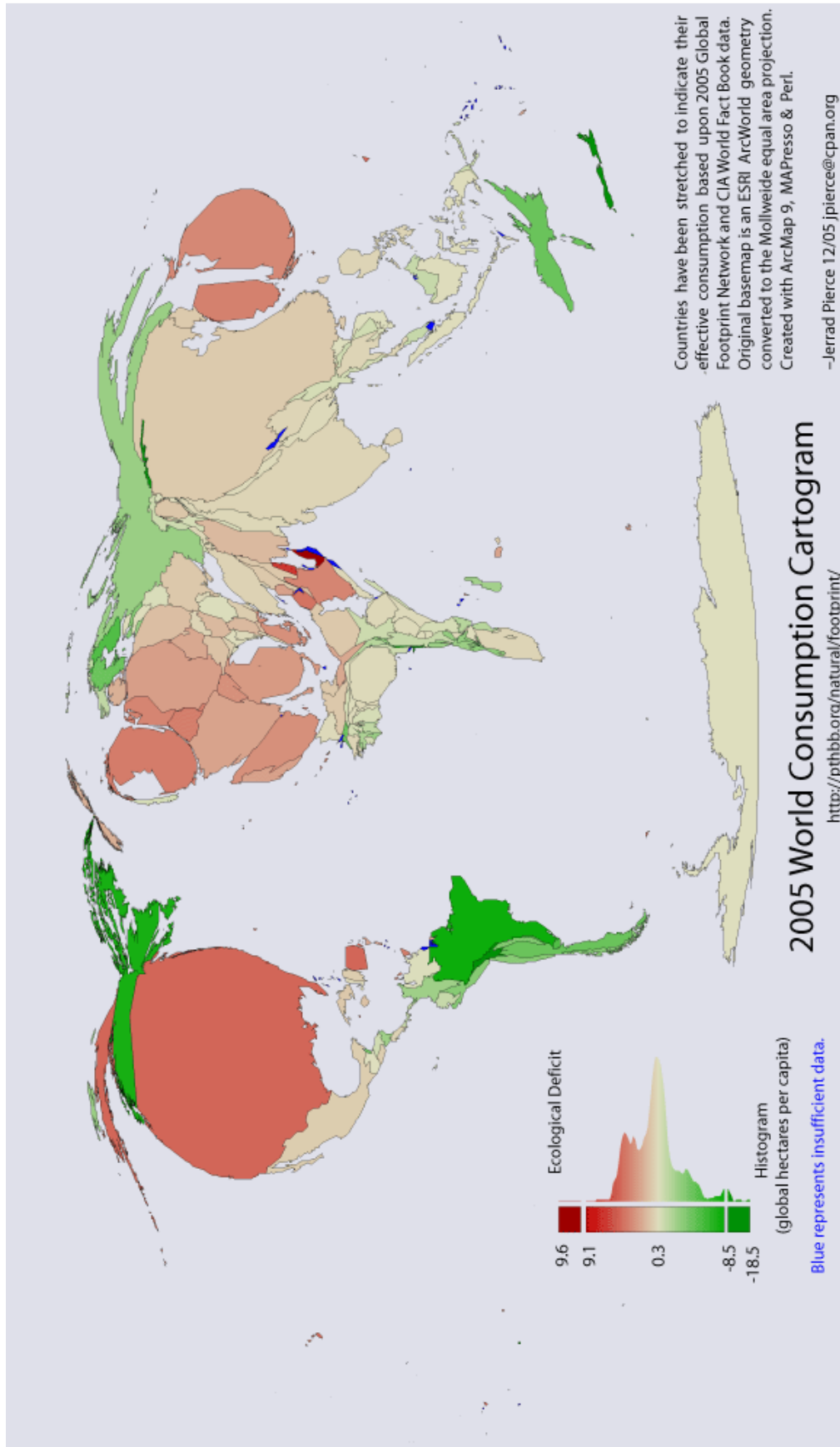


129. ábra. Az ökológiai lábnyom mérete és szerkezete országonként (Forrás: WWF 2006) ⁷³



130. ábra. A társadalmi fejlettség és az ökológiai lábnyom közötti kapcsolat 2003-ban (Forrás: WWF 2006)

⁷³ Az ábrán csak a világot meghaladó országokat mutatjuk be.



131. ábra. A Föld térképe az ökológiai hasznosítás szempontjából 2005-ben (Forrás: <http://www.footprintnetwork.org>)

2.9.2. *Mindennapi környezetünk*

Az előzőekben láthattuk, hogy ma már szinte személy szerint megállapítható közvetett felelősségünk a Föld környezeti állapotának változásában. De hogyan is valósul ez meg a napi gyakorlatunkban? Ennek megválaszolásához mind a társadalmak, mind a személyek magatartását meg kell vizsgálnunk.

2.9.2.1. Növekedés orientált fogyasztói társadalom, avagy az ökonómiai csapda

Számtalan gyakorlati példa azonban azt bizonyítja, hogy *a környezeti problémák egyik alapvető oka és részben következménye is a szegénység*, s ennek valamint az egyenlőtlen fejlődés következményeinek felszámolása nélkül alig képzelhető el megfelelő megoldás. Ha a globális problémákat egyszerűsítve tömörítjük, akkor megállapíthatjuk, hogy *a rohamosan növekvő népesség fokozódó igénye egy gyors termelésnövekedési kényszert vált ki*, amivel véges illetve alig bővíthető ökológiai és természeti erőforrások állnak szemben. A termelési kényszer országoként ugyan jelentősen különbözhet, három fő összetevőből származik:

Fogyasztási kényszer. Ez egyrészt azt jelenti, hogy az egyre nagyobb népesség fogyasztási igénye akkor is nő, ha az egyének nem támasztanak nagyobb igényeket, azaz több száj többet igényel (ez az oldal főként a fejlődő országokat sújtja). Másrészt viszont a fogyasztói társadalom modellje miatt jelentősen nő az egyének fogyasztása is. Ennek összetevői: a pazarló fogyasztás, a bővlik, egyszer használatos eszközök terjedése, az eldobható csomagolású termékek bővülő köre, az anyag- és energiaigényes termék terjedése (utóbbira jó példa lehet az, hogy ma már szinte nem is számít gépkocsinak az, amelyikben nincs légkondicionáló), a presztízsfogyasztás. Ez a második ok főként a fejlett országokban jelentkezik, illetve az egy főre jutó GDP-vel erős korrelációban van. Szemléletes példa lehet Kína gazdasági és fogyasztási növekedése.

Növekedési kényszer. Ezt talán onnan közelíthetjük meg, hogy a politikai stabilitás alapja (demokratikus viszonyok között) a gazdasági növekedés. A növekedést pedig leginkább GDP-vel mérik, s nem szabadidővel, környezeti állapottal, közérzettel. A fogyasztás növelése szinte mindig a politikai ígéretek középpontjában van, s ezekkel az ígéretekkel 4-5 évenként el kell számolni. Egy olyan program (legyen az bármennyire humánus, vagy a globális jövőben

gondolkodó), amelyik a növekedés megállítását, csökkenését tűzné célul, eleve bukásra lenne ítélve. Nem volt tehát véletlen a zero növekedés gondolatának elutasíthatósága.

Technológiai kötöttség. Egy-egy technológia jelentős erőforrásokat köt le, az átállás a fejlettebbre általában drága, s többnyire pazarló is. Gondoljunk az egyre nagyobb arányban hulladékba kerülő TV-készülékekre, számítógépekre. Ezek még tartalmazhatnak értékes elemeket, de már nem hasznosíthatóak a magasabb technológiai szinten (a klasszikus Commodore számítógépek még használható kiegészítői ugyanúgy a szemétre kerültek, mint az elavult gépek).

Az ökonómiai csapdát vélhetően még egy ideig az jelenti, hogy az itt felsoroltakon elég reménytelennek tűnik vállalkozni. Legnagyobb esély a kedvező irányú változásra az a) pont első elemében, a népességszám csökkentésében remélhető. A személyes fogyasztás befagyasztásának egyik eredményes módja a jegyrendszer lehetne. Miközben azonban a világ piacgazdaság felé halad, s minden ember emberhez méltóan és szabadon szeretne élni, senki sem kíván ilyen megszorító szabályozást. Másik megoldás a személyes és közösségi fogyasztás szerkezetének jelentős átalakítása. Ugyanígy a technológiai kötöttségből eredő gondokat is lehetne csökkenteni a pazarló hulladékgazdálkodási gyakorlattal. A növekedési kényszer csapdájára azonban alig látszik megszorítást eredményező alternatíva.

Az előbb leírtak nem túl biztatóak ugyan, de mutatnak némi reményt. Az, hogy a gazdasági fejlődés és a környezet tönkre tétele nem jár szükségszerűen együtt, jó példaként szokták felhozni a nyugati világvárosokat, amelyekben a környezet állapota igen kedvezően váltott meg (növekvő gazdaság mellett). Ez a tény vitathatatlan, és elaltathatja figyelmünket. Ha nem számolunk könnyen hasonló helyzetbe kerülhetünk, mint a fenntartható fejlődés gondolatának átvételekor. Amikor a jelenős környezeti problémák felszínre kerültek (nagyvárosi szmog, élettelen folyók, ózonlyuk, globális felmelegedés, a környezethasználat szűk keresztmetszetei: túlhalászat, édesvízhiány, stb.), ezek környezet jelzéseinek tekinthetőek, mint a beteg szervezetben a láz. A problémákat legalább részben kezeltük (csökkent a folyók szennyezettsége, tisztább lett a nagyvárosi levegő), azaz a „lázcsillapítás” megtörtént. De vajon ezzel az alapvető problémákat is felszámoltuk, vagy csak megnyugtattuk magunkat. Talán az ökológiai lábnyom ebben az esetben is használható, mint a gonosz mostoha igazmondó tükre. London polgármestere (Ken Livingstone) politikai céljai lényeges elemének tekintette a világváros fenntarthatósági programját. Ennek érdekében kiszámolták a város ökológiai

lábnyomát⁷⁴, ami 2000-re vonatkoztatva 6,6 hektárnak adódott, ami pontosan háromszorosa a világlátnak. A komplex mutató túl igen tanulságos annak szerkezete. A tömegközlekedést preferáló városszabályozás miatt kicsi a közlekedés részaránya (5%), jelentős azonban az élelmiszerellátás (41%) és a hulladékkezelés hatása (44%). Jellemző adalék, hogy a város hús fogyasztását megközelíti a kutya- és macskaeledel mennyisége, a palackozott vizek (ezek között legnagyobb arányt a 800 km távolságról ide szállított francia Evian ásványvíz képviseli) fogyasztásából, pedig sok műanyag hulladék keletkezik. Ilyen vizsgálat szembesíthet bennünket azzal, hogy a tiszta levegőjű, környezetére figyelő nagyváros még lehet ökológiai szempontból pazarló.

2.9.2.2. Az egyének napi cselekedetei és azok környezeti hatásai

Környezettel kapcsolatos viszonyunkat ismereteink, lehetőségeink illetve cselekedeteink határozzák meg elsősorban, de számos egyéb tény (reklám, jogszabály, gazdasági ösztönző vagy annak hiánya) lényegesen befolyásolhatja.

A 9.9. ábrán jól látható, hogy napjainkban az emberiség ökológiai lábnyomában széndioxid lábnyom a legnagyobb. Ebben legnagyobb szerepet a fosszilis energiahordozók nagy mértékű felhasználása jelenti. Az emberiség energiafelhasználása folyamatosan emelkedik, nagy kérdés az, hogy ebben milyen mértékben kap szerepet a megújuló energiák hasznosítása, illetve milyen eszközökkel érhető el a nem megújuló készletek használatának csökkentése. Ez lehet a kitermelés visszafogásával (időnként az OPEC él is vele – igaz nem környezeti okokból), vagy az árak jelentős emelésével. A 9.6. ábrán látható, hogy ezek az eszközök átmenetileg csökkentik a felhasználást (a nyersanyag árrobbanások időpontja a fejlett országok környezetre gyakorolt hatásának csökkenésében jól érzékelhető), szerepük azonban csak átmeneti jellegű. Nem segíti elő a környezetkímélő használatot, ha a világpiaci árakat valamilyen preferenciákkal csökkentik. Ez történt például a volt szocialista országokban, amikor az árrobbanást követően ún. csúszó áron (több előző év átlag ára alapján) kaptak nyersanyagokat a Szovjetuniótól. Ez a „kényelmes” helyzet jelentősen növelte a pazarlást, és a rendszerváltozás körül a gazdaságokra

⁷⁴ A részletes anyag a <http://www.citylimitslondon.com/> címen elérhető, de egy rövidebb ismertető magyarul is elérhető a <http://www.kukabuvvar.hu/hirek/1698> címen.

rászabaduló világpiaci ár versenyképtelenné tette gazdaságaikat. A korábbi évek magyar gázár-támogatási politikája is hasonló helyzetet generált.⁷⁵

Az egyének szintjére lebontva csak akkor remélhető látványos javulás, ha az nem csak a tudatra, hanem a pénztárcára is hat. Különösen igaz ez akkor, amikor a médiák által is generált fogyasztás aligha nevezhető környezetbarátnak, és az állami szabályozásban sem a környezeti szempontok dominálnak. Ez utóbbira lehet példa a geotermikus energia minimális hasznosítása hazánkban (a kedvező adottságok ellenére).

A mai társadalmi szemlélet még nem szembesült valójában tetteinek igazi következményeivel. 2006 nyarán Pekingben járva feltűnt, hogy az utóbbi években épült lakótelepeken kis túlzással alig van olyan lakás, amelyik nincs felszerelve légkondicionálóval. Hazánkban is gyorsan szaporodnak ezek a berendezések, sőt esetenként még egyes áramszolgáltatók támogatást is adnak beszerzésükhöz! Ahogy az előzőekben már említettük a gépkocsinak is csak az számít napjainkban, amiben „klíma” van. Ebben a fogyasztói magatartásban nyilvánvalóan nem a globális felmelegedés játssza a fő szerepet. Lakásaink rosszul szigeteltek, nagyon sok központi fűtéssel rendelkező lakásban nincs a használatot mérő eszköz, s a közös teherviselés nem ösztönöz takarékosagra. A lakótelepi energiatakarékosági programok a lassú megtérülés és tőkehiány miatt igen lassan valósulnak meg. Bármilyen furcsa, de a 2007-re tervezett drasztikus gázáremelés lehet az, ami meggyorsíthatja az energiatakarékosági megtérülést, és így közvetve a környezettudatos használatot.

A fosszilis energiák felhasználásának másik kritikus területe a motorizáció. Bár a gépkocsik átlagfogyasztása csökkenőben van, növekvő számuk miatt energiaigényük folyamatosan nő. A járművek vásárlásakor még mindig csak másodlagos szempont a fogyasztás, annál többet számít (minden sebességkorlátozás ellenére) a teljesítmény és a komort. A lakosság tömegközlekedésre történő átszoktatása (átkényszerítése) akadozik, a kerékpáros közlekedés sokfelé nem népszerű (az egykor kerékpárosokkal teli kínai nagyvárosokban a gépkocsik dominálnak). A gépkocsi a személyes fogyasztás státuszszimbóluma lett szerte a világban (még a vízhiányos országokban is a rendszeres kocsis mosásra biztosan van víz), a járművek rendszeresen kihasználatlanul közlekednek, a szegényebb országokban pedig környezetszennyezésükkel nem is foglalkoznak.

Bár már több évtizede nyilvánvaló, hogy az emberiség környezeti problémái között vezető helyen van a hulladékok kérdése, feldolgozásukra jó technológiai megoldások születtek, mégis

⁷⁵ Hasonló helyzetbe került 2006 elején Ukrajna is, amikor szembesült, hogy belátható időn belül reális árat kényszerül majd fizetni az eddig olcsó energiáért.

ökológiai lábnyomunkban (ha csak közvetetten is) meghatározó szerepe van (lásd London imént említett esetét).

A hulladékok ügyét szerte a világban úgy kezelték, mint amit könnyen a „szőnyeg alá lehet seperni”: természetes vagy antropogén mélyedésekbe hordták, netán félre eső területekben, erdőkben, utak, folyók, tengerpartok mentén deponálták. A „környezettudatos” vidékeken időnként még be is fedték azokat, hogy legalább ne legyenek láthatóak, máshol pedig a szél tevékenysége nyomán az eredetileg lerakásra igénybe vett területek sokszorosát sikerült így károsítani. A hulladékprobléma fonákságát jelzi, hogy 2006-ban már összeállították⁷⁶ a „Világ hét új (szemét) csodáját”. Ennek első helyén az a zömmel műanyagokból álló szemét sziget van, ami a Csendes óceánon úszik San Francisco és Hawaii között félúton, s mérete Texas államnál is nagyobb, s nem csoda, hogy már nevet is adtak neki (Eastern Garbage Patch). Második helyen New York szemétkerakója van, ami a Kínai Nagyfalon kívül (állítólag) az egyedüli űrből látható ember készítette „alkotás”.⁷⁷

A hulladékok újrahasznosításával nemcsak a környezetünket óvhatnánk a mind nagyobb méreteket öltő lerakásoktól, de az jelentős energia-megtakarítással járna és egyéb károktól is mentesíthetnénk környezetünket. Például csupán egyetlen alumínium sörös/üdítős doboz újrafeldolgozása során annyi energiát takaríthatnánk meg, amivel egy TV 3 órát üzemelne. Egy másik példa szerint egy tonna papír újrahasznosításával 26 m³ vizet, 1,4 m³ olajat és kb. annyi elektromos áramot takaríthatnánk meg, amennyit egy átlagos háztartás fél év alatt felhasznál⁷⁸. A probléma fontosságát mutatja az is, hogy már készül az EU Hulladék keretirányelve.⁷⁹ Mindeközben hazánkban még gyerekcipőben van a szelektív hulladékgyűjtés, a hulladékok ártalmatlanításában a lerakó-centrikusság érvényesül, s a magyar lakosság zöme szinte semmit nem tesz a hulladékmennyiség növekedése ellen (kb. 420 kg kommunális hulladékot „termelünk” évente) – pedig már lehetne honnan ötleteket szerezni (lásd: <http://www.zoldfelulet.hu/eletmod.php?a=5>).

A hulladéktermelésben fő szövetségeseink a TV-reklám. Időnként a reklámokban a pelenka „csodák” dominálnak. Egy London közeli 200 ezer lakosú városban (Milton Keynes)

⁷⁶ Lásd http://www.nyinquirer.com/nyinquirer/2006/11/seven_new_garba.html, illetve magyar kivonatát a <http://www.kukabuvor.hu/hirek/1784> címen.

⁷⁷ Jelenleg már rekultivációját tervezik, lásd a http://www.nyc.gov/html/dcp/html/fkl/fkl_index.shtml címen.

⁷⁸ További érdekes összehasonlító példákat találhatunk a <http://library.thinkquest.org/11353/facts.htm> és magyarul a <http://origo.hu/noilapozo/eletmod/20061208kornyeztudatos.html> címeiken.

⁷⁹ Lásd http://www.humusz.hu/download/hulladek_keretiranyelv.pdf

megállapították, hogy a kommunális hulladék 6%-a eldobott pelenka (az amerikai adatok még ennél is rosszabbak), s pamut pelenka használatával gyermekenként legalább 300 eurót lehetne megtakarítani. De a reklámok más területen sem környezetbarátak: például az agyonreklámozott vízlágyítóra az ország számos részén nincs szüksége mosógépeinknek.

Nagyon pazarlóan bánunk édesvizeinkkel is. A 6. fejezetben már bemutattuk, milyen veszélyek fenyegetik a készleteket, s hol vannak igazán kritikus területek a nagyvilágban. Miután az édesvíz készletek igen törékeny erőforrások az emberiségnek, fontos lenne, hogy ez is előbb-utóbb egyenrangúan beépüljön az ökológiai lábnyom-számításokba. Komoly erőforrás-pazarlás, hogy az EU szigorított normáinak megfelelő minőségű vízzel húzzuk le WC-ket, mossuk autóinkat stb. Bár a vízdíjak emelkedésével a lakossági vízfelhasználás számottevően csökkent, ebben még komoly tartalékok vannak (pl. egy zuhanyozásnál 70-80 liter vizet használunk, fürdéskor pedig kb. 140 litert).

Jelentősen csökkenthető lenne környezetre gyakorolt hatásunk az étkezési szokások módosításával is. Kevesebb hús fogyasztásával nemcsak egészségesebben étkezhetünk, de szükségleteink megtermeléséhez is kevesebb területre lenne szükség.

A példákat a hétköznapi élet sok területéről sorolhatnánk, de ki-ki találhat magának is a már említett <http://www.zoldfelulet.hu/> címen.

2.9.3. Mindennapi környezeti veszélyek és azok kivédése

Az emberek nagyobb része alig tudja megváltoztatni tágabb lakóhelyét, így közvetve kénytelen-kelletlen elfogadja annak környezeti állapotát is. Ez a helyzet emberek millióinak (és gyermekeiknek) alapvetően rontja életkilátásait.

Az 1999-ben alapított Blacksmith Institute's 2006 végén tette közzé azon kutatásának eredményét, amelyben számba vették Földünk legszennyezettebb helyeit.⁸⁰ Ez az értékelés jól mutatja, milyen sokan vannak azok, akik kiszolgáltatott helyzetben vannak.

⁸⁰ A <http://www.blacksmithinstitute.org/ten.php> helyen bolygónk tíz legszennyezettebb helye van összegyűjtve, részletes háttér-információkkal, de az intézet honlapjáról egy sokkal bővebb értékelés és lista is letölthető. Egy magyar nyelvű kivonat a <http://origo.hu/tudomany/fold/20061211bolygonk.html> címen is megtalálható.

Az emberiség jelentős része viszont bár tehetne azért, hogy kikerülje a környezeti veszélyek csapdáit, kevésbé foglalkozik vele. Talán intő jel lehet számunkra a 2006. december elején kirobbant „élelmiszer átárazási” botrány. Ennek kapcsán talán több figyelmet kap majd az, hogy figyeljünk jobban arra, mit eszünk, milyen terméket vásárolunk. Jelen sorok írója egy élelmiszer mérnök társszerzővel már több cikkben, előadásban foglalkozott a témával. Az elmúlt évek tapasztalatait csak megerősítik a napi események, ezért talán célszerű lenne bevásárlásainkkor megfogadni az alábbi 8+2 konyhai „parancsolatot”:

Tartósítószer helyett, a hőkezeléssel és aszeptikus technológiával elkészített élelmiszerek, gyümölcsitalok elterjesztése, vásárlása. Dobozos üdítők készülnek tartósítószer nélkül, a műanyag palackosok esetében mindig ellenőrizzük a termékösszetételt! Megoldást jelenthet a házi készítésű hőkezelt, vagy cukorral tartósított szörpök, lekvárok elkészítése, ellenőrzött gyümölcsökből.

A hústermékek tartós főzésével, sütésével, szakszerű hőkezeléssel és kellően steril feldolgozással csökkenthető a tartósítószer használata.

Már az üzletben tanulmányozzuk át az élelmiszereken feltüntetett adalékanyag-felsorolást. Ne vásároljunk olyan élelmiszert, ami a veszélyes adalékanyagokból valamennyit is tartalmaz. Elsősorban természetes adalékanyagokat tartalmazó termékeket vásároljunk.

Kerüljük a színezett élelmiszereket (édességek, cukorkák, pudingok), és csak olyanokat vásároljunk, amik természetes eredetű színezéket tartalmaznak.

Minél több feldolgozási fázison megy át egy alapanyag, általában annál több benne a különféle adalék. Bolti konzervek, édességek, mélyhűtött és félkész ételek helyett ezért lehetőleg vásároljunk friss piaci árút, és amit lehet, készítsünk el otthon magunk.

Ne fogyasszuk puha rágócukorkát, gumimacit, színes dobozos tejszínes pudingot, előre panírozott halrudat, kész szószokat, zacskós leveseket, szénsavas üdítőitalokat!

Ne fogyasszunk ízfokozott, agyoncukrozott, koffeinnel és szén-dioxiddal dúsított üdítőitalokat és energiatalokat, édesítőszerrel tartalmazó (főként aszpartám tartalmúakat, ami fenilalanin forrás, túlzott fogyasztása hashajtó hatású) csökkentett energiatartalmú italokat, édességeket!

Érdemes kenyérsütő gépet vásárolnunk, mivel így kevés fáradtsággal kitűnő teljes kiőrlésű adalékanyag-mentes kenyérhez és pékáruhoz juthatunk.

Ne csak az árra figyeljünk!

Ne befolyásoljanak minket a jobbnál jobb reklámok, mivel ezek nem a termék minőségéről szólnak!

Napi életünk másik kritikus területe lakó- és munkahelyük, ahol a legkülönfélébb elektromos berendezések vesznek körül bennünket. Észre sem vesszük, hogy életünket állandó közvetlen sugárzásokban éljük. Sokan reggeltől késő éjszakáig számítógép és TV előtt ülnek, órákat mobiltelefonoznak. Mindeközben szemünk sokkal jobban romlik, mint szüleinkké, s egyre gyakrabban vetődik fel, hogy az ártalmatlannak tartott „leválaszthatatlan” mobilnak is lehetnek káros egészségügyi hatásai.

A fenti két hétköznapi terület (étkezés, telekommunikáció) csak kiragadott példa arra, milyen veszélyek vannak környezetünkben. Kívánatos lenne, ha itt is, és az életünkben általában figyelni az egyik legfontosabb környezetvédelmi elvre, az *elővigyázatosságra*. Ez magunk és utódaink számára is elengedhetetlen.

Irodalomjegyzék

- ABRAMOVITZ, N. J.: A világ erdeinek megőrzése; 1998; Budapest; Föld Napja Alapítvány; 27–49.
- BARTHA D.: Erdőgazdálkodás – erdővédelem – természetvédelem; Környezettan szöveggyűjtemény; 2006; Budapest; Mezőgazda Kiadó.
- BARTHA D.: Magyarország természetközeli erdei és fenntartásuk, in Solymos R. szerk.: Természetközeli erdő- és vadgazdaság, környezetbarát fagazdaság; 1998; Budapest; MTA; 72–77.
- BIRKELAND, P. W.: Soils and Geomorphology; 1984; Oxford; Univ. Press; 372.
- BORSY Z. szerk. Általános természeti földrajz; 1993; Budapest; Nemzeti Tankönyvkiadó; 832.
- BÖGLI, A.: Kalklösung und Karrenbildung; 1960; Berlin; Zeitschr. F. Geomorphologie, Supplementband 2.; 4–21.
- BRIDGES, E. M.: World Soils; 1978; Cambridge/London/New York/Melbourne; University Press; 128.
- BROWN, L. R.: Building a Sustainable Society, 1981; New York; Norton; 433.
- BRUNDTLAND, G. H. (ed.) Our Common Future, World Commission on Environment and Development; 1987; Cambridge, England; Oxford University Press, 238.
- BÜNZEL-DRÜKE, M. – DRÜKE, J. – VIERHAUS, H.: Quarternary Park – Überlegungen zu Wald, Mensch und Megafauna; 1994; ABUinfo 17/18; Heft 4/93–1/94. 4–37.
- BÜNZEL-DRÜKE, M. – DRÜKE, J. – VIERHAUS, H.: Wald, Mensch und Megafauna; 1995; LÖBF-Mitteilungen 4/95; 43–51.
- DEEVY, E. S. J.: The Human Population; 1960; Scientific American; Sept. 194–204.
- ERDŐSI, F.: Hangzatos frázis csupán, vagy korunk megvalósítható főparancsa? (Nem fenntartható, de vállalható gondolatok a fenntartható fejlődésről) – In: szerk.: DÖVÉNYI Z. szerk. Alföld és nagyvilág, Tanulmányok Tóth Józsefnek; 2000; Budapest; MTA Földtudományi Kutatóközpont, Földrajztudományi Kutatóintézet; 45–66.
- FEKETE J.: Trópusi talajok; 1988. Budapest; Akadémia Kiadó; 503.
- FITZPATRICK, E. A.: Soils; 1983; London and New York; Longman; 353.
- GOUDIE, A.: The Human Impact on the Natural Environment; 1990; Oxford; Basil Blackwell; 388.
- GRASELLY, Gy.: Ásványi nyersanyagok; 1974; Budapest; 235.
- GYULAI I.: Elmélkedés a fenntarthatóságról – In Ligetvári F. szerk.: Környezetünk és védelme 2. kötet; 1999; Miskolc – Szarvas; Ökológiai Intézet és DATE; 45–108.

JAKUCS, L.: Morphogenetics of Karst Regions; 1977; Budapest; 2. 310.

KERÉNYI A.: A Föld talajai – In Borsy Z. szerk.; Általános természetföldrajz; 1993; Budapest; Nemzeti Tankönyvkiadó; 676–725.

KERÉNYI A.: Általános környezetvédelem; 1995; Szeged; Mozaik Kiadó; 383.

KERÉNYI, A.: Európa természet- és környezetvédelme; 2003b; Budapest; Nemzeti Tankönyvkiadó; 534.

KERÉNYI A.: Környezettan; 2003a; Budapest; Mezőgazda Kiadó; 470.

Közös jövőnk: A Környezet és Fejlődés Világbizottság jelentése; 1988; Budapest; Mezőgazd. Kiadó; 404.

Környezet- és természetvédelmi lexikon I–II.; 2002; Budapest; Akadémiai Kiadó

KUGLER, H. – SCHWAB, M. – BILLWITZ, K.: Allgemeine Geologie, Geomorphologie und Bodengeographie; 1980; Gotha/Leipzig; VEB Hermann Haack Geographisch-Kartographische Anstalt; 216.

LA PORTE, T. (ed.) Organized Social Complexity: Challenge to Politics and Policy; 1975; Princeton; Princeton University Press.

LÁSZLÓ, E.: Meg tudod változtatni a világot; 2002; Budapest; Magyar Könyvklub; 112.

LEAN, G. – HINRICHSSEN, D. – MARKHAM, A.: Atlas of the Environment: The most up-to-date report on the state of the World; 1990; London; Arrow Books; 192.

LE PICHON, X. – SIBUET, J-C.: Comments on the Evolution of the North-East Atlantic; 1971; Nature, **233**; 257–258 p.

LIVI-BACCI, M.: A világ népességének rövid története; 1999; Budapest; Osiris Kiadó; 268.

Magyar Nagylexikon 1–19; 1999–2004; Budapest; Magyar Nagylexikon Kiadó

MAKRA, L.: Szemelvények a környezetszennyezés történetéből, különös tekintettel a levegő szennyezésére I.; 2002; Légkör **47**. 1.; 45–66.

MAROSI S – SOMOGYI S.: Magyarország kistájainak hatásterülete I–II. 1990; Budapest; MTA FKI; 1023.

MÁTYÁS Cs.: Erdészeti ökológia; 1996; Budapest; Mezőgazda Kiadó; 312.

McGINN, A. P.: A fenntartható halászterületekért – In A világ helyzete; 1998; Budapest; Föld Napja Alapítvány; 69–90.

McRAE, H. A világ kétezerhúszerében – 6. fejezet: Az erőforrások és a környezet; 1996; Budapest; AduPrint; 142–163.

MEADOWS, D. H. – MEADOWS, D. L. – RANDERS, J. – BEHRENS, W. W.: The Limits to Growth, 1972; New York; Universe Books; 319.

- MÉSZÁROS E.: A környezettudomány alapjai; 2001; Budapest; Akadémiai Kiadó; 210.
- MORGAN W. J.: Rises, Trenches, Great Faults, and Crustal Blocks; 1968; Journal of Geophysical Research, 73. pp. 1959–1982.
- NÁRAY-SZABÓ G.: Fenntartható a fejlődés?; 2003; Budapest; Akadémiai Kiadó; 179.
- OLLIER, C.: Weathering; 1969; Edinburgh; Oliver and Boyd; 304.
- PALMER, D.: A történelem előtti világ atlasza; 2000; Budapest; Gabo Könyvkiadó; 224.
- PAPP S. – KÜMMEL, R.: Környezeti kémia; 1992; Budapest; Tankönyvkiadó; 359.
- PROBÁLD F.: A mezőgazdaság ökológiai potenciáljának eloszlása a Földön; 1984; Földrajzi Közlemények; 314–324.
- RAKONCZAI J.: Globális környezeti problémák; 2003; Szeged; Lazi Könyvkiadó; 191.
- SARRE, Ph ed.; Environment, population and development; 1991; London; Hodder and Stoughton; 304.
- SOMOGYI, Z.: Erdő nélkül?; 2001; Budapest; L'Harmattan Könyvkiadó; 268.
- SULLIVAN, W.: A vándorló kontinensek; 1985; Budapest; Gondolat; 388.
- SZ. JÓNÁS, I.: Természet és technika a középkori Európában – In: R. Várkonyi Á. – KÓSA L. szerk. Európa híres kertje; 1993; Budapest; Orpheusz Könyvkiadó; 24–43.
- SZABÓ Gy.: A globális klímaváltozás – a XXI. Század kihívása; 2002; Debreceni Szemle X. évf. 4.; 599–613.
- STEFANOVITS, P.: Talajtan; 1981; Budapest; Mezőgazdasági Kiadó; 380.
- STEFANOVITS P. – FILEP Gy. – FÜLEKY Gy.: Talajtan; 1999; Budapest; Mezőgazda Kiadó; 470.
- STRAKHOV, N. M.: Principles of lithogenesis; 1967; London; Oliver and Boyd; 245.
- TEILHARD DE CHARDIN, P.: Az emberi jelenség, 2. kiadás; 1980; Budapest; Gondolat Kiadó; 395.
- VENDL, A.: Geológia I. köt.; 1957; Budapest; Tankönyvkiadó; 623.
- VESTER, F.: Az életben maradás programja; 1982; Budapest; Gondolat Kiadó; 361.
- VIDA, G.: Helyünk a bioszférában; 2001; Budapest; Typotex Kiadó; 128.
- WACKERNAGEL, M. – REES., W. E.: Ökológiai lábnyomunk; 2001; Budapest; Föld Napja Alapítvány
- WOODWELL G. M.: The Energy Cycle of the Biosphere; 1970; Scientific American; **223**. 3. 64–74.
- Papp Sándor: Biogeokémia – körfolyamatok a természetben, Veszprémi Egyetemi Kiadó 2002; továbbá az ott felsorolt összefoglaló, illetve eredeti források

Ábrajegyzék

1. ábra. A zárt és nyílt anyagi rendszer különbsége	10
2. ábra. A negatív és a pozitív visszacsatolás elvi vázlata (a) és néhány példája: b) egy lakóház fűtésszabályozójának elvi működése, c) a negatív visszacsatolás egyik éghajlati példája, d) a pozitív visszacsatolás két éghajlati példája.....	12
3. ábra. Az egyszerű (a), az összetett (b) és a többszörösen összetett rendszer (c) általános modellje. A nyilak az anyag- és energiaáramlás irányait jelölik.	13
4. ábra. A világ fajainak kihalása százalékban a kambriumtól a negyedidőszakig (Palmer, 2000 nyomán, módosítva)	23
5. ábra. A népesség növekedése (fent), valamint a kipusztult emlősök és madarak száma (lent) 1650 és 1950 között (Goudie, 1990 nyomán, módosítva)	37
6. ábra. Az ember fontosabb társadalmi tevékenységeinek hatása az élettelen és élő természeti, valamint az épített környezetre és az emberre mint biológiai lényre (Magyarázat a szövegben)	41
7. ábra. Az evolúció legfontosabb lépéseinek sematikus ábrázolása Náray-Szabó (2003) szerint	47
8. ábra. Az ökológiai rendszerek dobozmodellje	56
9. ábra. Rezervoárok és anyagáramok a karboniumciklusban (10^{15} gC; 10^{15} g a ⁻¹), Bolin (1986).....	60
10. ábra. A fotoszintézis mechanizmusának sematikus ábrázolása	63
11. ábra. A CO ₂ emisszió változása tüzelőanyag-fajtánként 1950-től kezdődően.....	67
12. ábra. A nitrogén biológiai átalakulásának fontosabb lépései	73
13. ábra. A biokémiai nitrátredukció mechanizmusa és az egyes oxidációs lépcsők	76
14. ábra. Az atmoszférában (a), a hidroszférában (b) és a szárazföldi ökológiai rendszerekben (c) található nitrogénmennyiségek (Tg).....	80
15. ábra. A teljes nitrogénciklus transzportfolyamatai (Tg a ⁻¹ N).....	81
16. ábra. A kén biogeokémiai körforgása (anyagmennyiség: Tg S; anyagáram: Tg a ⁻¹ S).....	86
17. ábra. A mikrobiológiai kénkörforgás.....	91
18. ábra. Koncentráció- és hőmérsékletprofil a Csendes Óceán adott régiójában (MURRAY); a foszfortranszport legfontosabb lépései	97
19. ábra. A globális foszforciklus (anyagmennyiség: Mt P; anyagáram: Mt a ⁻¹ P)	98
20. ábra. Az oxigén biokémiai körforgása (anyagáram: 103 Mt a ⁻¹ O).....	103
21. ábra. A fémek biológiai hatása	106

22. ábra. A globális fémkörforgás meghatározó anyagáramai.....	108
23. ábra. A higany biogeokémiai körforgása (anyagáram: kt a-1 Hg).....	115
24. ábra. A higanyciklus kémiai és biokémiai folyamatai.....	116
25. ábra. Az ólom biogeokémiai körforgása (anyagáram: kt a-1 Pb).....	120
26. ábra. Az arzén környezeti átalakulása (WOOD).....	122
27. ábra. A mangán körforgása (GARRELS, MACKENZIE és HUNT szerint;.....	124
28. ábra. A vas(III)-hidroxid adszorpciós sajátosságai.....	127
29. ábra. Kénsav képződése az atmoszférában.....	137
30. ábra. Az atmoszferikus salétromsav képződése; Források: közlekedés, biomassza-égetés, villámlás, stb.	138
31. ábra. A fotokémiai füstköd komponensei koncentrációjának időbeni változása.....	144
32. ábra. A fotokémiai füstköd kialakulásának folyamata.....	144
33. ábra. Elhalt biomassza anaerob lebomlása szulfát jelen-, illetve távollétében.....	145
34. ábra. A foszfát remobilizációja anaerob körülmények között.....	146
35. ábra. A légkör oxigén és széndioxid tartalmának változása a földtörténet során (Rutten 1971 után, egyszerűsítve).....	151
36. ábra. A légkör vázlatos hőmérsékleti profilja és szférái.....	152
37. ábra. A légkör áteresztőképessége a hullámhosszak függvényében.....	154
38. ábra. A légkör CO ₂ koncentrációjának növekedése az 1950-es évek vége óta (Forrás: IPCC).....	157
39. ábra. A CO ₂ és CH ₄ koncentrációjának változása a légkörben az utóbbi 400 ezer év során és várható alakulás (Forrás: IPCC).....	157
40. ábra. A legfontosabb üvegházgázok mennyiségének alakulása a légkörben (1978-2006) (Forrás: NOAA/CMDL).....	158
41. ábra. A Föld sugárzási egyenlege (Forrás: Iowa State University 2000).....	160
42. ábra. A Föld átlaghőmérsékletének alakulása 1880 óta (Forrás: WMO).....	162
43. ábra. A területhasználat változása a Földön (Forrás:UNEP).....	163
44. ábra. A Föld hőmérsékletének változása az utóbbi ezer év során, illetve különböző előrejelzések a 21. század végére (Forrás: IPCC).....	163
45. ábra. A legmelegebb évek rangsora 1860 óta (Forrás: WMO).....	164
46. ábra. Az ózontartalom csökkenése az Antarktiszon október 15-31. közötti átlagok alapján (Forrás: NOAA CMDL).....	167
47. ábra. Az ózon-eloszlás vertikális profiljának változása a Déli Sarkon (NOAA CMDL).....	169

48. ábra. Az ózonlyuk nagysága és időbeli kialakulása a Déli Sark környezetében	170
49. ábra. A sztratoszférikus ózon csökkenése az északi félgömb közepes földrajzi szélességein (Forrás: NOAA CMDL)	171
50. ábra. A troposzférikus ózon mennyiségének változása évszakosan (a Nap magasságtól függően)(Ziemke at al 2006).....	172
51. ábra. A troposzférikus ózon változásának évi jellege Budapesten (1995) (Forrás: Tóth Z. 1996).....	173
52. ábra. A troposzférikus ózon változásának évi jellege és évtizedes trendje a Zugspitze mérőállomáson (Oltmans at al 2006)	173
53. ábra. A troposzférikus ózon változásának napi menete két hazai mérőállomáson (2003. április) (Forrás: Sándor V. 1996)	174
54. ábra. A troposzférikus ózon változása az északi félgömb mérőállomásain (Oltmans at al 2006).....	174
55. ábra. Néhány halfaj alkalmazkodóképessége a víz pH-változásához (USEPA).....	178
56. ábra. Békéscsaba zuzmó-térképe 2002-ben (SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Készítette: Kalmár G.)	179
57. ábra. A CO ₂ kibocsátás és a Kiotóban meghatározott célok (Eredeti forrás: Energy Information Administration in: ENSZ 2002).....	183
58. ábra. Az üvegházgáz-index alakulása és a gázok szerepe az energiamérlegben (1997-2005) (NOAA)	183
59. ábra. A Föld legnagyobb CO ₂ kibocsátói 2002-ben (forrás: IEA)	184
60. ábra. Az ózonkárosító gázok kibocsátása a nemzetközi egyezmények függvényében (Forrás: UNEP Ozone Secreteriat).....	186
61. ábra. A legfontosabb ózonkárosítók termelése (1980-2003) (Forrás: AFEAS).....	186
62. ábra. Az atmoszférikus klór és bróm koncentrációjának változása a légkörben(Forrás: NOAA CMDL)	187
63. ábra. A vulkánosság során levegőbe került kéndioxid mennyisége (1979-2003) (Forrás:TOMS).....	187
64. ábra. A levegő kéntartalmának változása Európában (mg/m ²) (Forrás: EMEP 2006).....	194
65. ábra. Az NO _x -kibocsátások alakulása az USA-ban (1990-2005) (Forrás: EPA 2006)...	195
66. ábra. A légkör kéndioxid-szennyezettségének változás az USA-ban (EPA 2006 alapján)	196

67. ábra. A gazdasági növekedés néhány mutatójának kapcsolata a szennyezőanyagok kibocsátásával az USA-ban (Forrás: EPA 2006)	196
68. ábra. A világtengerek hőmérséklete 2006. október 28-án	199
69. ábra. A nyári és a téli El Nino következményei (Forrás: NOAA).....	202
70. ábra. Az elmúlt 110 ezer év hőmérsékleti változásai (Broeker 1997 alapján).....	204
71. ábra. A Boecker-féle szállítószalag (Broeker 1997 alapján).....	205
72. ábra. A világtengerek hőmérsékleti anomáliái és a nagy korallpusztulások helyszínei 1997-ben (Forrás: WRI PAGE 2000).....	207
73. ábra. Mélytengeri halálzónák a világtengerekben (Forrás: WRI-PAGE 2000)	209
74. ábra. A világtengerekből kifogott hal mennyisége főbb régióként és globálisan 1960-2003 (a FAO 2005-ös adatai alapján)	210
75. ábra. A 2000. évi halfogás mennyisége a legsikeresebb évhez viszonyítva a Föld nagy halászterületein (a legnagyobb fogású időszak feltüntetésével) (Forrás: WRI – PAGE 2000)	211
76. ábra. A Földközi-tenger keleti medencéjének szennyezettsége 2001. május 15-én (Forrás: UNEP-DEWA).....	216
77. ábra. A trópusi ciklonok keletkezési területei (Forrás:Sulinet).....	220
78. ábra. A Katrina hurrikán útvonala és erőssége 2005. augusztusában (Forrás: Index).....	220
79. ábra. Nevet kapott viharok (kék) és hurrikánok (piros) Észak-Amerikában (1945-2005), valamint a jelentősebbek útvonalának feltüntetésével (Forrás: NSDC NOAA).....	221
80. ábra. A globális vízkörforgás (Forrás: UNEP 2002 Shiklomanov után)	224
81. ábra. A globális vízfelhasználás alakulása a fontosabb ágazatokban (1950-2000) és várható változása (Forrás: UNEP Shiklomanov után)	225
82. ábra. A megújuló vízkészletek területi eloszlása (Forrás: Earth Trends 2006. aug.)	226
83. ábra. A sós (S) és édesvízű (É) talajvíz viszonya egy szigeten (Strahler 1971 in Báldi 1994)	235
84. ábra. Az édes talajvíz kitermelése esetén a sósvíz szintje megemelkedik (Lundman – Coch 1982 in Báldi 1994)	236
85. ábra. Az édes és sós talajvíz határa egy intenzív kitermelés előtt (A) és után (B) (Press – Siever 1982 in Báldi 1994)	236
86. ábra. Az Aral-tó vidékére jellemző klímadiagram: a hőmérséklet (1), a párolgás (2) és csapadék havi átlagai Kazalinszkban (Forrás: Atlasz Mira).....	239
87. ábra. Az Aral-tó területének csökkenése (1957-2001)(Forrás:GRID Arendal)	239

88. ábra. Az Aral-tó 2003-ban (Forrás:Wikipedia)	240
89. ábra. Az Csád-tó déli előterére jellemző klímadiagram: a hőmérséklet (1), a párolgás (2) és csapadék havi átlagai N'Djamenaban (Forrás: Atlasz Mira)	242
90. ábra. A Csád-tó vízszintváltozásai 1880-1996 (Forrás: USGS Olivry és társai 1996 alapján)	243
91. ábra. A Csád-tó területének csökkenése (1963-2001) (Forrás: NASA Goddard Space Fight Center alapján)	244
92. ábra. A víztárolók elhelyezkedése Szingapúrban (1984) (Forrás: Tang 1984 in Gupta-Pitts 1992).....	247
93. ábra. Klimatikus anomáliák és epizodikus események 1999-ben (Forrás: WMO).....	248
94. ábra. Csapadéktrendek a 20. században a Föld térségeiben (Forrás: IPCC 2006)	249
95. ábra. A magyarországi folyók vízjátéka 1900-ban(A) és 2006 végén(B) (Szerk: Rakonczai J.).....	251
96. ábra. Az árvízi események által érintett területek (1998-2005) (Forrás: Dartmouth Flood Obrervatory interaktív térképe).....	252
97. ábra. A kontinensek feldarabolása, ahogyan azt Wegener „A kontinensek és óceánok eredete” c. könyvében elképzelte (Sullivan W. 1985)	261
98. ábra. A litoszféra mozgása az asztenoszférán, balra: közeledő, jobbra: távolodó kőzetlemezek (Forrás: Magyar Nagylexikon, 2000, 11. kötet, 928. old)	262
99. ábra. A szárazföldi (A) és az óceáni (B) kőzetlemez egyszerűsített szerkezete	263
100. ábra. A Föld nagy litoszféralemezei (Forrás: Morgan W. J., 1968).....	263
101. ábra. A batolit, a lakkolit és más szubvulkanikus formák, valamint a felszíni vulkanizmus jellegzetes formái (Forrás: Borsy Z., 1993).....	267
102. ábra. Lakkolit (fent) és egy felszínre került lakkolit (lent) (Forrás: Borsy Z., 1993.)....	269
103. ábra. Egy telér tömbszelvénye (A) és két teleptelér (B). Ez utóbbiak (fehérrel jelölve) homokkő és agyagpala közé nyomultak be a rétegek mentén. A teleptelérek függőleges telérből táplálkoznak. (Forrás: Vendl A., 1957)	269
104. ábra. Bazaltsapkás tanuhegyek: a Badacsony (balra), a Szent György hegy (jobbra); 1 = pannóniai homokos agyag, 2 = bazalttufa, 3 = bazalt, 4 = salakos bazalt (VENDL, 1957)...	271
105. ábra. A karsztvízszint változása a bányászat hatására a Dunántúli-középhegységben 1950-től 1990-ig (Szilágyi G. – VITUKI, 1994 nyomán)	275
106. ábra. Kőolajcsapda (Forrás: Környezet- és természetvédelmi lexikon, 2002).....	282
107. ábra. A mállás és talajképződés néhány tényezője a Sarkoktól az Egyenlítőig	288

108. ábra. A Föld fontosabb talajai, a növényformációk és az éghajlati elemek közötti kapcsolat (FitzPatrick, E. A., 1983. nyomán, módosítva). Fent FAO-talajnevek. Lent: genetikus rendszerek talajnevei	294
109. ábra. Gilgai jelenség a vertisolokban (Bridges, E. M. 1978. szerint)	295
110. ábra. A termékenység arányszám a Föld országaiban az ezredfordulón (A Fischer Weltalmanach, 2001 adatai alapján szerk.).....	300
111. ábra. A biológiai produktivitás területi különbségei a Földön Sarre, Ph. (1991) szerint	302
112. ábra. A fajlagos ökológiai potenciál eloszlása a Földön a természetes növénytakaró nettó elsődleges termelése alapján. A t-ban megadott értékek az egy főre jutó nettó elsődleges termelést jelentik 1981-ben (Probáld F. 1984).....	302
113. ábra. A táplálékkal felvett, egy főre jutó napi energia (kcal-ban) a Föld országaiban a 80-as évek végén Lean, G. – Hinrichsen, D. – Markham, A. (1990) szerint.....	303
114. ábra. Magyarország tájai	318
115. ábra. Az erdők elhelyezkedése a Földön.....	326
116. ábra. Mérsékelt övezeti természetes (A) és kezelt (B) lombhullató erdő függőleges szerkezete 1a = felső lombkorona, 1b = alsó lombkorona, 2 = cserjeszint, 3 = gyepszint, 4 = mohaszint, 4a = alomszint (avarszint), 5 = liánok, szimbionták, 6 = gyöké	328
117. ábra. Egy sokszintű trópusi esőerdő (A) és egy boreális fenyőerdő (B) függőleges szerkezete (Kerényi A. 2003 a).....	331
118. ábra. Az 1970-es évek elején uralkodó trendek alapján készített Meadows-féle modellváltozat.....	344
119. ábra. A Meadows-modell eredménye korlátlan nyersanyagkészletek, intenzív mezőgazdaság és redukált környezetszennyezés esetén.....	345
120. ábra. A DDT éves felhasználása a világban (3), a talajban felhalmozódott mennyiség (2) és halmozódása a halakban (1) (Forrás: Meadows és társai 1974)	345
121. ábra. A Meadows-modellek egyik stabilizált változata (1975-ös stabilizálás)	346
122. ábra. A Föld biológiai kapacitása és az emberiség ökológiai lábnyoma 1960-2003 (fő/globális hektár)(Forrás: http://www.footprintnetwork.org)	349
123. ábra. Az ökológiai lábnyom változása gazdasági fejlettség szerint (1961-2003) (Forrás: WWF 2006).....	349
124. ábra. Az emberiség teljes ökológiai lábnyoma és a Föld biológiai kapacitása (Forrás: WWF 2006).....	350

125. ábra. Az emberiség ökológiai lábnyom igénye a Föld biológiai kapacitásához viszonyítva (1961-2003) (Forrás: WWF 2006)	350
126. ábra. Az emberiség ökológiai lábnyoma komponenseinek alakulása (1961-2003)	351
127. ábra. Az ökológiai lábnyom és a biológiai kapacitás régióként 2003-ban (Forrás: WWF 2006).....	352
128. ábra. Ökológiai hiány vagy többlet mértéke országoként 2003-ban (Forrás: WWF 2006)	352
129. ábra. Az ökológiai lábnyom mérete és szerkezete országoként(Forrás: WWF 2006)	353
130. ábra. A társadalmi fejlettség és az ökológiai lábnyom közötti kapcsolat 2003-ban (Forrás: WWF 2006).....	354
131. ábra. A Föld térképe az ökológiai hasznosítás szempontjából 2005-ben (Forrás: http://www.footprintnetwork.org).....	355

Táblázatjegyzék

1. táblázat. A földtörténeti korbeosztás	18
2. táblázat. Néhány nagytestű növényevő faj jelenléte vagy hiánya Közép-Európában az utolsó három eljegesedés és interglaciális idején (Forrás: BÜNZEL-DRÜCKE et al. 1994 és 1995)	28
3. táblázat. A biomassa oxidatív lebomlása – az elektronakceptor redoxipotenciálja.....	65
4. táblázat. A természetben előforduló leggyakoribb nitrogéntartalmú részecskefajták	70
5. táblázat. A természetben előforduló leggyakoribb kéntartalmú részecskefajták	84
6. táblázat. A Föld globális oxigénlelőhelyei.....	102
7. táblázat. Az atmoszféra oxigéntartalmának forrásai és nyelői.....	104
8. táblázat. A fémek körforgásának antropogén módosítása	106
9. táblázat. Fémionok cseréje a talajban és az üledékben.....	109
10. táblázat. Jellemző cink- és kadmiumkoncentrációk a környezetben.....	111
11. táblázat. A globális higanyfelhasználás megoszlása (a teljes felhasználás mintegy 10 kta-1)	113
12. táblázat. A Föld globális higanyrezervoárjai	114
13. táblázat. Az ón átlagos koncentrációja a környezetben	117
14. táblázat. A Föld globális ólomrezervoárjai	119
15. táblázat. A fontosabb üvegházhatású gázok szerepe, és antropogén hatású változása (a vízgőz nélkül) (Mika J. 2002, az Environmental Health Center és a NOAA adatai felhasználásával)	155
16. táblázat. Az átlagos üvegházgáz-index (AGGI) alakulása 1979-2005 (a NOAA CMDL adatai)	161
17. táblázat. A legfontosabb antropogén hatások becsült következménye a Föld sugárzási egyenlegében 1750 óta (Mika J. 2002 alapján).....	164
18. táblázat. A levegőminőség javítása érdekében vállalt kibocsátás-csökkentések helyzete (2004) (Forrás: EMEP 2006)	191
19. táblázat. A Föld vízkészletének megoszlása	198
20. táblázat. A világtengerek korall-telepeinek pusztulása (%) (az UNEP 2001. évi adatai alapján)	208
21. táblázat. Az édesvízkészletek és a csapadékok területi megoszlása. (Az UNEP adatainak felhasználásával)	224
22. táblázat. A vízfelhasználás szerkezete néhány országban (%) (az Aktuelle Landkarte 1994/3. alapján).....	226

23. táblázat. Példa a vízhiányos országokra (Források: Világ helyzete 1993* és az ENSZ WWDP**)	227
24. táblázat. Néhány ország függése a külföldről érkező felszíni vizektől (Forrás: A világ helyzete 1996)	228
25. táblázat. A becsült vízhiány mértéke a Duna-Tisza közén	234
26. táblázat. Az Aral-tó vízgyűjtőjének néhány vízfelhasználási mutatója	241
27. táblázat. Az árvizek által okozott összes veszteségek kontinensenként (1900-2005)	250
28. táblázat. Kalciumkarbonát- és agyagtartalmú kőzetek és hasznosításuk Vendl (1957) nyomán	277
29. táblázat.	280
30. táblázat. Az eredeti kőzetek és az átalakult kőzetek Vendl (1957) szerint	284
31. táblázat. A Föld néhány vízgyűjtő területének mechanikai és kémiai denudációja (Strakhov, N. M. 1967)	286
32. táblázat. A kontinensek éves mechanikai és kémiai denudációja (Strakhov, N. M. 1967)	287
33. táblázat. Lélekszám a vízmegosztási küzdelem egyes forró pontjain 1999-ben, 2025-re szóló előrejelzésekkel (A világ helyzete 2000 nyomán)	306
34. táblázat. A táj hierarchiaszintjei	314