

# A KÖRNYEZETTAN ALAPJAI



# **Környezettudományi alapok tankönyvsorozat**

A környezettan alapjai

A környezetvédelem alapjai

Bevezetés a talajtanba környezettanosoknak

Bevezetés a környezeti áramlások fizikájába

Környezetfizika

Környezeti ásványtan

Környezeti mintavételezés

Környezetkémia

Környezetminősítés

Környezettudományi terepgyakorlat

Mérések tervezése és kiértékelése

Environmental Physics Laboratory Practice



Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Természettudományi Kar

## **A KÖRNYEZETTAN ALAPJAI**

Szerkesztette:  
Kiss Ádám  
egyetemi tanár, Fizikai Intézet

Írta:  
Barkács Katalin  
adjunktus, Kémiai Intézet  
Kiss Ádám  
egyetemi tanár, Fizikai Intézet  
Mádliné Szőnyi Judit  
egyetemi docens, Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Mészáros Róbert  
adjunktus, Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Papp Sándor  
ny. egyetemi docens  
Pongrácz Rita  
adjunktus, Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Szabó Mária  
egyetemi tanár, Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Tasnádi Péter  
egyetemi tanár, Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Torkos Kornél  
ny. egyetemi docens  
Tóth Erzsébet  
muzeológus, Tatai Természetvédelmi Terület és Szabadtéri  
Geológiai Múzeum  
Weiszburg Tamás  
egyetemi docens, Földrajz- és Földtudományi Intézet  
Zsemle Ferenc  
tanársegéd, Földrajz- és Földtudományi Intézet

Lektorálta:  
Somorjai Endre  
professor emeritus, MTA Atommagkutató Intézet



**2012**

COPYRIGHT: © 2012-2017, Barkács Katalin, Kiss Ádám, Mádlné Szőnyi Judit, Mészáros Róbert, Papp Sándor, Pongrácz Rita, Szabó Mária, Tasnádi Péter, Torkos Kornél, Tóth Erzsébet, Weiszbürg Tamás, Zsemle Ferenc, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar

Lektorálta: dr. Somorjai Endre

Creative Commons NonCommercial-NoDerivs 3.0 (CC BY-NC-ND 3.0)

A szerző nevének feltüntetése mellett nem kereskedelmi céllal szabadon másolható, terjeszthető, megjelentethető és előadható, de nem módosítható.

ISBN 978-963-279-545-4

KÉSZÜLT: a [Typotex Kiadó](#) gondozásában

FELELŐS VEZETŐ: Votisky Zsuzsa

TÁMOGATÁS:

Készült a TÁMOP-4.1.2-08/2/A/KMR-2009-0047 számú,

„Környezettudományi alapok tankönyvsorozat” című projekt keretében.

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség  
www.ujszachenyiterv.gov.hu  
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

KULCSSZAVAK:

multidiszciplinaritás, környezet, fenntarthatóság, talaj, táj, időjárás, globális éghajlatváltozás, hidrogeológia, környezeti ásványtan, környezeti áramlások, biodiverzitás, szennyezés, szennyvíztisztítás, sugárzások, energiagazdálkodás

ÖSSZEFOGLALÁS:

A jegyzet a környezet fogalmának, összetevőinek, a fenntarthatóság fogalmának tisztázása után áttekinti az ember és a környezete, a természet- és környezetvédelem, a globális környezeti problémák szempontjából fontos területeket. A jegyzet olyan témákat kíván tárgyalni, amelyek a mai környezettudomány érdeklődésének fókuszában vannak. A jegyzet multidiszciplinaritását mutatja, hogy helyet kapott benne a környezet és fenntarthatóság kérdése, a táj, a környezet és a talaj rendszer bemutatása, a modern hidrogeológia és a környezeti ásványtan eredményei, az időjárás és az éghajlat aktuális problémái, kiemelve a globális éghajlatváltozást és ehhez kapcsolódóan a környezeti áramlásokat. A jegyzetben bemutatásra kerül a biodiverzitás megőrzésének fontossága, a bioszféra legfontosabb szennyezői, ezek közül is külön fejezet foglalkozik a szennyvíztisztítással. Bemutatásra kerülnek a környezetünkben előforduló sugárzások és az emberiség jövőjének kulcskérdése, az energiagazdálkodás is.

## Tartalomjegyzék

<b>1. Környezet és fenntarthatóság (Kiss Ádám).....</b>	<b>11</b>
1.1. A környezettudomány .....	11
1.2. A környezet .....	11
1.2.1. A természeti környezet.....	12
1.2.2. A mesterséges (épített) környezet .....	13
1.2.3. A mentális környezet .....	15
1.3. A fenntarthatóság .....	17
1.4. A globális ökológia fő kérdései .....	17
1.4.1. A Föld népességnövekedése .....	18
1.4.2. A Föld lakosságának édesvíz ellátása .....	20
1.5. Az emberi társadalom és a környezet átalakítása .....	21
1.6. Függelékek.....	24
1.6.1. Bibliográfia.....	24
1.6.2. Fogalomtár .....	24
<b>2. Táj, környezet, talaj (Papp Sándor).....</b>	<b>26</b>
2.1. Táj .....	26
2.1.1. A táj fogalma.....	26
2.1.2. A táj térgységeinek hierarchiája .....	28
2.1.3. A táj kutatás módszerei .....	29
2.2. Környezet.....	30
2.3. Talaj .....	30
2.4. Függelékek.....	32
2.4.1. Bibliográfia .....	32
2.4.2. Fogalomtár .....	32
<b>3. Környezeti ásványtan (Weiszbürg Tamás, Tóth Erzsébet) .....</b>	<b>33</b>
3.1. Bevezetés .....	33
3.2. Alapfogalmak.....	34
3.2.1. Az ásvány .....	34
3.2.2. A műtermékek .....	39
3.2.3. Az üvegek.....	40
3.2.4. Ásványok és műtermékek keverékei.....	40
3.3. A mérettartományok jelentősége a környezeti szakember munkájában .....	41
3.3.1. A felület jelentősége és méretfüggése .....	42
3.3.2. A felületi szerkezet jelensége és jelentősége a méretváltozással .....	43
3.4. Azbesztek – egy környezeti szempontból kiemelt ipari ásványcsoport .....	47
3.4.1. Az azbeszt: kezdetben csodaanyag, ipari sikertörténettel, majd rákkeltő közellenség.....	50
3.4.2. Az azbesztek egészségre gyakorolt hatása .....	50
3.4.3. Az azbeszt jogi vonatkozásai .....	53
3.4.4. Azbeszt az épített környezetben.....	55

3.4.5. Van-e jövője egy ilyen, ellentmondásokkal teli anyagnak?.....	57
3.5. Függelékek.....	58
3.5.1. Bibliográfia .....	58
3.5.2. Fogalomtár .....	58
<b>4. Modern hidrogeológia (Mádlné Szőnyi Judit, Zsemle Ferenc) .....</b>	<b>62</b>
4.1. A víz jelentősége életünkben, a víz tudományok és a hidrogeológia viszonya, globális vízproblémák .....	62
4.1.1. A Föld vízkészletei, a felszín alatti vizek jelentősége .....	62
4.1.2. A vízhasználat és globális megoszlása .....	63
4.1.3. Magyarország vízellátása .....	64
4.1.4. Globális vízproblémák .....	65
4.1.5. Az Európai Unió vízpolitikája .....	66
4.2. A modern hidrogeológia alapjai .....	67
4.2.1. A kútúrás kezdeteitől a 20. század második feléig .....	67
4.2.2. Az „artézi” szemlélet túlhaladottá válása.....	68
4.2.3. A „dinamikus paradigma” jellemzői és gyakorlati következményei .....	70
4.3. A „modern” hidrogeológia környezettudományi szerepe .....	71
4.3.1. Felszín alatti vizek, ásványvizek, gyógyvizek és termásvizek.....	71
4.3.2. A felszín alatti vizek mint környezeti tényezők.....	73
4.3.3. A felszín alatti vizeket érintő emberi tevékenységek.....	75
4.4. Függelékek.....	77
4.4.1. Bibliográfia .....	77
4.4.2. Fogalomtár .....	77
<b>5. Időjárás, éghajlat (Mészáros Róbert) .....</b>	<b>79</b>
5.1. Bevezetés .....	79
5.2. A légkör .....	79
5.2.1. A légkör összetétele és szerkezete .....	79
5.2.2. A Föld és a légkör hőháztartása .....	81
5.2.3. A felszín-légkör rendszer vízháztartása .....	84
5.2.4. A légkör mozgásjelenségei .....	84
5.2.5. A légkör vizsgálata.....	86
5.2.6. Az időjárás előrejelzése .....	87
5.3. Éghajlattani alapismeretek.....	88
5.3.1. Az éghajlatot alakító tényezők.....	88
5.3.2. Hazánk éghajlati jellemzői.....	89
5.4. Függelékek.....	90
5.4.1. Bibliográfia .....	90
5.4.2. Fogalomtár .....	90
<b>6. Globális klímaváltozás (Pongrácz Rita).....</b>	<b>92</b>
6.1. A múltban detektált változások .....	92
6.2. A klímaváltozás okai .....	96
6.3. A jövőben várható tendenciák .....	102

6.4.	Függelékek.....	109
6.4.1.	Bibliográfia.....	109
6.4.2.	Fogalomtár.....	109
<b>7.</b>	<b>Környezeti áramlások (Tasnádi Péter).....</b>	<b>110</b>
7.1.	Bevezetés.....	110
7.2.	A Föld energiamérlege.....	110
7.2.1.	A Föld tengelye dőlt.....	112
7.3.	Az általános légkörzés.....	113
7.3.1.	Az általános légkörzés cellás szerkezete.....	113
7.3.2.	A Hadley-cella.....	114
7.3.3.	A poláris és a Ferrel-cella.....	115
7.3.4.	A Rossby-modell.....	115
7.4.	Ciklonok és anticiklonok.....	116
7.4.1.	A geosztrofikus szél.....	117
7.4.2.	A levegő mozgása a ciklonokban és az anticiklonokban.....	117
7.5.	A zivatarfelhők összetétele és keletkezése.....	119
7.5.1.	Összetétel, energia.....	119
7.5.2.	A zivatarfelhők életciklusa.....	119
7.5.3.	Zivatarláncok és szupercellák.....	121
7.6.	A tengerek áramlásai.....	122
7.6.1.	A tengerek mozgását alakító dinamikai hatások.....	122
7.6.2.	A szélfúttá tengeráramlások.....	123
7.6.3.	A szél és a tengerfelszín kölcsönhatása.....	124
7.6.4.	A mélységi áramlások.....	128
7.7.	Függelékek.....	131
7.7.1.	A Coriolis-erő.....	131
7.7.2.	Bibliográfia.....	131
7.7.3.	Fogalomtár.....	131
<b>8.</b>	<b>A biológiai diverzitás, jelentősége és védelme (Szabó Mária).....</b>	<b>134</b>
8.1.	A biológiai diverzitás értelmezése.....	134
8.2.	A sokféleség csökkenése.....	137
8.3.	A biológiai sokféleség jelentősége.....	139
8.4.	A Kárpát-medence biodiverzitása.....	144
8.5.	Vizes élőhelyek a Kárpát-medencében.....	147
8.6.	A diverzitást veszélyeztető tényezők.....	150
8.6.1.	Idegenhonos fajok.....	150
8.6.2.	Élőhelyek beszűkülése és feldarabolódása.....	153
8.6.3.	Az emberi tevékenység hatásai.....	156
8.7.	Záró gondolatok.....	157
8.8.	Függelékek.....	157
8.8.1.	Bibliográfia.....	157
8.8.2.	Fogalomtár.....	158

<b>9. A bioszféra szennyezői (Torkos Kornél).....</b>	<b>160</b>
9.1. A bioszféra állapotát befolyásoló antropogén hatások .....	160
9.1.1. A bioszféra antropogén eredetű szennyezőinek főbb csoportjai.....	161
9.1.2. A szennyezők kibocsátásáért felelős területek.....	161
9.2. Legfontosabb környezetszennyező vegyületek típusai.....	161
9.2.1. Alifás és monoaromás szénhidrogének és halogénezett származékaik .....	161
9.2.2. Poli-aromás szénhidrogének (PAH-ok).....	163
9.2.3. Poliklórozott bifenilek (PCB) .....	166
9.2.4. Dioxinok .....	167
9.2.5. Peszticidek .....	167
9.3. Globális felmelegedés.....	169
9.4. Savas esők.....	170
9.5. Az „ózonlyuk” problémakör.....	171
9.6. Függelékek.....	172
9.6.1. Bibliográfia .....	172
9.6.2. Fogalomtár .....	172
<b>10. A Szennyvizek kezelése (Barkács Katalin) .....</b>	<b>174</b>
10.1. A szennyvizek keletkezése és környezeti hatásai .....	174
10.2. Szennyvíztisztítás.....	178
10.2.1. A mechanikai tisztítási fokozat .....	179
10.2.2. A biológiai tisztítási fokozat .....	181
10.2.3. A kémiai tisztítási fokozat.....	186
10.3. Függelékek .....	191
10.3.1. Bibliográfia.....	191
10.3.2. Fogalomtár .....	191
<b>11. Sugárzások a környezetünkben (Kiss Ádám) .....</b>	<b>194</b>
11.1. A sugárzásokról .....	194
11.2. Az elektromágneses sugárzások .....	194
11.2.1. A hullámokról .....	195
11.2.2. Az elektromágneses spektrum.....	195
11.2.3. Az elektromágneses sugárzások környezetünkben .....	198
11.2.4. Az EM sugárzások sugár-egészségügyi problémái .....	200
11.3. A természetes radioaktív sugárzások .....	200
11.3.1. A hosszú felezési idejű radioaktivitás a Földön .....	201
11.3.2. A kozmikus sugárzás.....	202
11.3.3. A folyamatosan keletkező radioaktív izotópok .....	202
11.3.4. Civilizációs eredetű radioaktivitás .....	203
11.4. A környezeti sugárzások hatásainak összefoglalása .....	204
11.5. Függelékek .....	205
11.5.1. Bibliográfia.....	205
11.5.2. Fogalomtár .....	205



<b>12. Az emberiség sorskérdése: az energia (Kiss Ádám) .....</b>	<b>206</b>
12.1. Az energia és energetika fogalmai, alkalmazott egységei.....	206
12.2. Az energiafogyasztás és az emberiség civilizációs fejlődésének kapcsolata ..	207
12.3. Az energiaellátás jelenlegi helyzete .....	213
12.4. Az energiaellátás jövőbeni lehetőségei .....	215
12.4.1. Az energiatakarékosság lehetőségei .....	216
12.4.2. Energia megújuló forrásokból .....	216
12.4.3. Az atomenergia.....	217
12.5. A biztonságos energiaellátás fenntartásának esélye.....	218
12.6. Függelékek .....	219
12.6.1. Bibliográfia.....	219
12.6.2. Fogalomtár.....	219



# 1. KÖRNYEZET ÉS FENNTARTHATÓSÁG (KISS ÁDÁM)

## 1.1. A környezettudomány

Az emberiség civilizációs fejlődése és eredményei segítségével mára az egész Földön elterjedt és gyakorlatilag belakja mindazokat a helyeket, amelyek egyáltalán alkalmasak emberi élet fenntartására. Az ember történelme folyamán, de különösen a mai modern társadalmak felépítése során komolyan megbolygatta és átalakította környezetét, sok helyen megváltoztatta az eredeti természeti viszonyokat és új környezeti feltételeket alakított ki. Az átalakítás sokszor és sok helyen drámai változásokhoz vezetett a környezettel kapcsolatban és több vonatkozásban látszik, hogy az elindított folyamatok akár az emberiség létét is fenyegető katasztrófákhoz vezethetnek.

A civilizációs eredmények azonban eszközöket is adtak az embernek, ahhoz, hogy felismerje a kedvezőtlen folyamatokat, és útját állhassa azok további kifejlődésének. A tudomány eszközei azok, amelyeket ezekkel a környezeti problémákkal kapcsolatban alkalmazni lehet és kell.

A környezeti problémák általában sokrétűek. A civilizáció fejlődésének el kellett érnie egy olyan szakaszt, amikor a környezettel kapcsolatos feladatok már a legtöbbször egy tudományágon kívül más tudományok ismereteit is igényelte a megoldás megtalálásához. Így alakult ki lényegében az elmúlt néhány évtizedben a ma már önálló tudományágnak tekinthető környezettudomány.

**A környezettudomány a Földre, természeti és alkotott alrendszerei jellemzőivel, azok összefüggéseivel, megőrzésével, változásai előrejelzésével, átalakításával, annak megtervezésével foglalkozó önálló tudományág.**

A környezettudomány szorosan kötődik a többi, természet-, műszaki és társadalomtudományághoz, de problémafelvetésében, alkalmazott módszereiben és igényelt szemléletében ma már világosan elkülönül azoktól. A környezettudomány bizonyos kérdésekben igen erős természettudományos vonatkozásai sem sorolhatók be egyszerű módon a biológia, a kémia, a földtudományok, vagy a fizika részterületeiként, hiszen maguk a környezeti problémák legtöbbször nem tartoznak egy-egy tudományághoz. A környezettudományos témák többsége joggal nevezhető multidiszciplináris, interdiszciplináris és transzdiszciplináris kérdésköröknek. Mindez alátámasztja azt a jellemzést, amelyik a környezettudományt önálló diszciplinának tekinti.

A környezettudomány tárgya maga a Föld. Környezetünk, ahol élet egyáltalán előfordulhat a Föld felszínének igen vékony, nagyságrendileg mintegy 10 km-es rétege. Ez a rétegvastagság szinte elhanyagolhatóan kicsiny a Föld 6730 km-es sugarához képest és az is bizonyos, hogy ez lényegesen nem növelhető meg.

## 1.2. A környezet

**A környezet az embert, egyedet, csoportot körülvevő tényezők összessége.** Így a környezetbe beleértendő minden olyan mozzanat, amely az ember környezetét

meghatározza, legyen az természetes eredetű, mesterséges eredetű, vagy a társadalmi beágyazottsággal kapcsolatos.

Mi határozza meg a környezetet, minek az alapján értékeljük, milyen módon osztályozzuk a környezetünkben található elemeket, milyen paraméterekkel lehet a legjobban jellemezni a környezetet? Ezekre a kérdésekre nem egyszerű a válasz. Arról kell ugyanis döntenünk, hogy a környezetünket jellemző számos mozzanat közül melyek a legfontosabbak. A környezetnek részei az abban résztvevő tárgyak, elemek, személyek, de markáns mozzanata a környezetnek a zaj, annak intenzitás szintje, a fény és annak erőssége, vagy a radioaktív sugárzási környezet, és számos más tényező is. Így szó sincsen arról, hogy a környezetet könnyű lenne egyszerű paraméterekkel jellemezni, vagy például fényképek felvillantása segítségével egy másik személynek hitelesen bemutatni. A fénykép ugyanis semmit nem tud a környezet számos eleméről, például a helyszín zajosságáról, sugárzási viszonyairól.

A környezet összetevőit különböző, ezzel foglalkozó szakemberek többféleképpen határozták meg. Mi rövid összefoglalónkban egy, általunk logikusnak tartott felosztást követünk, de a környezet jellemzése előbb érzékeltetett bonyolultságára való tekintettel kézenfekvő, hogy más környezeti összetevőkre vonatkozó felosztások is vannak.

A környezet legfontosabb általános összetevői

- a természeti környezet,
- a mesterséges (épített) környezet,
- a mentális környezet.

Természetesen a legtöbb környezetben a fenti összetevők több eleme egyszerre van jelen. A mai városi ember átlagos környezetében szinte mindig dominálnak a mesterséges tárgyak, célszerűen átalakított elemek, de igen sokszor jelen vannak természetes részletek és a társadalmi környezettől pedig ritkán tudunk teljesen eltekinteni. A környezetet az összetevők esetről-esetre változó aránya határozza meg minden tényleges esetben.

### 1.2.1. A természeti környezet

A *természeti környezet* a természet elemeiből épül fel. A környezet jellemzése szempontjából érdemes még ezt is tovább felosztani természetes környezetre, gondozott természeti környezetre és megművelt környezetre.

- A természetes környezet az, ami az ember alakítása nélkül jött létre. Ilyen lehet egy őserdő, érintetlen tengerpart, vagy bármi, amit az ember még nem bolygatott meg.
- A gondozott környezet is természeti elemekből áll, de annak kialakításában az ember részt vett.
- A megművelt környezet elemei természetesek, de létrehozását mesterségesen hajtották végre.

Az előzőek illusztrálására mutatjuk be az *1.2.1. ábrán* azt a képet, amely a spanyolországi Granada mór erődjének, az Alhambrának az egyik kertrészletében készült. A csodálatosan kialakított kert minden eleme természetes, de az egészet az alkotók tervei alapján mesterségesen építették fel.



1.2.1. ábra: Mesterségesen alakított természeti környezet: az Alhambra kertrészlete

### 1.2.2. A mesterséges (épített) környezet

A mesterséges, épített környezet az ember által létrehozott elemekből épül fel. A mai ember mindennapi életterét, környezetét elsősorban az ilyen mesterséges elemekből álló környezet jelenti. Az épített környezetet is tovább osztályozhatjuk, ezt elsősorban funkciójuk szerint érdemes megtenni.

- A települések jelentik azt a környezetet, amiben a legtöbb ember él. A települések kialakulásának, felépítésének, tényleges megjelenésének hosszú tradíciója, belső törvényszerűsége és logikája van, amely a fő környezeti elemekre is erős hatással bír. A település így meghatározó a mesterséges környezet jellegével kapcsolatban.
- A munkahelyi környezet az egyes ember környezetének meghatározó mozzanata. A legtöbb ember tevékenységének nagy részét munkahelyén végzi és egyáltalán nem mindegy, hogy az hogyan alakul ki, mik a fő jellemzői és hogyan lehetne azokon javítani.
- A lakóhelyi környezet, bár szoros kölcsönhatásban van az előbbi két környezettípussal talán a leginkább meghatározó az egyén környezeti körülményei között. A lakóhelyi környezet mindig mesterséges, de a tényleges kialakítása függ az egyed értékrendjétől, szociális helyzetétől, a tradícióktól és a társadalmi elvárásoktól.

Az 1.2.2. ábra Ruszt burgenlandi kisváros főterének bemutatásával ad példát mesterséges környezetre. A képen látható környezet természeti elemeit is mesterségesen helyezték el mozgatható ládába.



1.2.2. ábra: Mesterséges környezet: Ruszt burgenlandi kisváros főtere

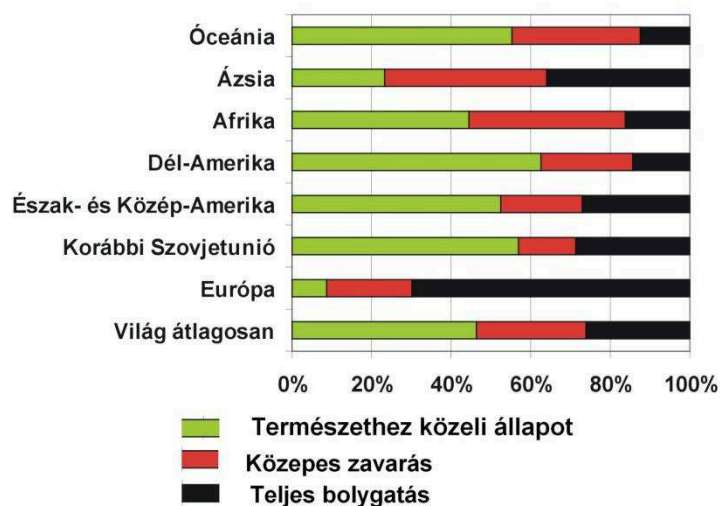
Más szempontok szerint osztályozva a mesterséges környezeti elemekhez tartoznak az emberi társadalmak működtetésével kapcsolatban kiépített üzemek, gyárak, tereptárgyak. Ezek megépítésével az ember átalakítja környezetét, megbolygatja a természetet, és a környezet egyre kisebb része tartozik a természeti környezethez. Az emberek számának növekedésével és az emberi kapcsolatok egyre bonyolultabbá válásával a társadalmak működtetésére kialakított mesterséges környezeti elemek az elmúlt néhány évtizedben a Föld jelentős részén dominánssá váltak. Példaként egy németországi széntüzelésű erőművet mutatunk be az 1.2.3. ábrán.



1.2.3. ábra: Széntüzelésű erőmű a németországi Düsseldorf környékén

Az 1.2.4. ábra becsléseket mutat be arra vonatkozólag, hogy a Föld kontinenseinek területei milyen mértékben bolygatottak. Az ábrából kitűnik, hogy a Föld szárazföldjeinek mintegy negyede a teljes bolygatottság állapotában van és a bolygatatlan részarány nem éri el az összterület felét sem. A kontinensek közül Európában a legnagyobb a bolygatott területek részaránya és ez közel van a teljes terület 70%-ához. A bolygatatlan területek aránya Európa tizedét sem éri már el.

## Antropogén zavarások



1.2.4. ábra: A kontinensek jelenlegi bolygatottságára vonatkozó becslés

### 1.2.3. A mentális környezet

A mentális környezet az emberek közötti kapcsolatrendszerek összessége. A környezet ezen összetevőjéről sokszor megfélemedeznek a környezeti körülményeket elemzők, pedig az emberek közérzetét alapvetően meghatározó környezeti komponensről van szó. A mentális környezetet is feloszthatjuk további elemekre. Az alábbiakban egy lehetséges felosztást mutatunk be.

- A társadalmi- és szociokulturális környezet hatásai döntőek és senki sem tudja kivonni magát e környezet befolyása alól. Ezek a hatások nagyobb embercsoportokra hasonlóak és eredetük a társadalom felépítésével kapcsolatos.
- A munkahelyi környezet fontos része a mentális környezetnek. Itt olyan kapcsolatokról van szó, amelyet az emberek munkahelyükön alakítanak ki és az egyes emberek idejük nagy részét ebben a mentális környezetben élik meg.
- A családi környezet az az elem, amely talán a legfontosabb a mentális környezet kialakulása szempontjából. A családon belüli emberi kapcsolatok általában a legszorosabbak és erős lelki kötődésekre mindenkinek szüksége van.

A többi emberrel együtt kialakított társadalmi lét közösségi környezetet tetelez fel (1.2.5. ábra). A mentális környezetet az ehhez való hozzáállás, a többi ember közé történő beilleszkedés alakítja ki.



1.2.5. ábra: Az emberek közelsége a mai ember meghatározó tapasztalata

A környezet összetevőkre történő, előzőekben bemutatott felbontása esetleges és számos szempontból bírálható. Maga a környezetkutatás területe szerteágazó és vitathatatlan fontossága ellenére sem rendelkezik általánosan elfogadott alapvetéssel és kutatásához kidolgozott, általánosan alkalmazott módszerekkel.

A környezetkutatás legnagyobb problémája, hogy a világban olyan folyamatok mennek végbe, amelyekből nyilvánvalóan környezetünket érintő válságok, több esetben pedig világvizonylatú katasztrófák származhatnak. (Ilyen folyamatokra számos példát lehet felhozni és a továbbiakban néhányra vissza is térünk.) A környezettudománynak feladata az, hogy ezeket a válságjelenségeket felismerje, foglalkozzon velük. Részleteiben:

- Fel kell ismernünk, hogy melyek ezek a környezetünket negatívan érintő folyamatok. Meg kell állapítanunk, hogy ezek a környezet melyik összetevőjére, annak melyik szintjére vonatkoznak és a folyamatok hogyan hatnak kölcsön a környezet más összetevőivel és azok szintjeivel.
- Melyek a hajtóerői az előbbi felismert folyamatoknak? Itt meg kell vizsgálni az érintett környezeti elemre vonatkozó természeti, gazdasági, társadalmi, kulturális és tradicionális vonatkozásokat, elemezni kell ezek összefüggéseit.
- Elemezni kell, hogy mit kell tenni e folyamatok irányának, az átalakulások sebességének a megváltoztatásához.

A legfontosabb kérdés az, hogy a társadalom és azon belül a döntéshozók felismerték-e egyáltalán a szóban forgó veszélyes környezeti folyamatokat. A következő probléma pedig az, hogy a globális veszélyek kezelésére az emberiség egészére kiterjed megegyezés és cselekvőképesség kellene.



Ugyanakkor azonban megállapítható, hogy a világ természetileg, etnikailag, kulturálisan, felépítése szerint és politikailag olyan mértékben tagolt, és ezért a nézetek olyan mértékben eltérnek egymástól, hogy még a nyilvánvalóan mindannyiunkat fenyegető környezeti veszélyhelyzetekre is igen nehezen képzelhető el közös válasz.

### 1.3. A fenntarthatóság

A mai világ működését, a benne zajló folyamatokat elemezve számos olyan környezeti elemet találhatunk, amelyeket egészen bizonyosan nem lehet hosszabb távon fenntartani. Ez felveti annak a kérdését, hogy melyek azok a folyamatok, amelyeket viszont társadalmi, morális és gazdasági szempontból támogathatunk.

A legfontosabb elv az, hogy a környezetünkben lezajló folyamatokat úgy szabályozzuk, hogy bolygónk, a Föld élhető maradjon, fennmaradjon. Ez a jelenlegi és a következő generációk közötti szolidaritást jelenti.

**Fenntarthatóság azt jelenti, hogy úgy elégítsük ki a jelen szükségleteit, hogy azzal ne veszélyeztessük a jövő generációk szükségleteinek kielégítését.**

Ennek az elvnek megfelelően minden folyamatot, fejlesztést, átalakítást abból a szempontból kell megvizsgálnunk, hogy az így meghatározott fenntarthatóság kritériumát teljesíti-e. A körülöttünk lévő világ jelenségeit egyenként megvizsgálva rá kell döbbernünk arra, hogy számos olyan jelenség van a Földön, amelyik nem elégíti ki ezt a fenntarthatósági kritériumot és komoly erőfeszítéseket kell tennünk annak érdekében, hogy a fenntarthatóság felé közeledjen környezetünk.

A fenti, fenntarthatóságra vonatkozó kérdésekkel a globális ökológia foglalkozik. A következőkben néhány olyan problémát fogunk tárgyalni, amelyek nyilvánvalóan elsőrendű fontosságúak és változtatások nélkül a jelenlegi tendenciák a Föld környezeti katasztrófáját okoznák.

### 1.4. A globális ökológia fő kérdései

A globális ökológia a Föld és az ember kapcsolatának, egymásra hatásának általános kérdéseivel foglalkozik. Az általa megtárgyalandó kérdések az emberiség és a környezet legalapvetőbb viszonyaival foglalkoznak.

- Milyen változást okoz az ember a Földön? Ez a kérdés elsősorban természettudományos. Számba kell vennünk azokat a legfontosabb változásokat, amelyeket az ember hozott létre.
- Melyek ezeknek a változásoknak a társadalmi következményei? Ennek elemzése a társadalomtudomány érdeklődési körébe tartozik.
- Mi az ember által előidézett változások társadalmi oka? Lényegében azt kívánjuk meghatározni, hogy milyen társadalmi erők azok, amelyek miatt az ember a vizsgált változásokat előidézi és végrehajtja. Ez a kérdés is elsősorban a társadalomtudományra tartozik.
- Hogyan lehetne a fenntarthatóság szempontjából elfogadhatatlan változásokat, folyamatokat megelőzni, megállítani, megváltoztatni? Ennek a kérdésnek a megválaszolásához minden tényleges esetben természettudományos, műszaki és társadalomtudományi ismeretekre van szükség.

A környezetünket veszélyeztető folyamatokkal kapcsolatos előbbi kérdéseinkre adandó válaszokhoz néhány alapvető fogalom és körülmény tisztázását kell elvégeznünk.

- Mit jelent a környezetre vonatkozóan a „fejlődés”? A változások leírásánál sokszor használjuk ezt a fogalmat, amely a korábbi civilizációs átalakulásoknál pozitív tartalmú volt.
- Mi a tudomány szerepe a környezetünk fenntarthatóságáért folytatott tevékenységünkben? Személy szerint nekem az a meggyőződés, hogy a tudomány eredményei és azok alkalmazása nyújtják azt a vékony pallót, amely segítségével bolygónkat a mai állapotából esetleg olyan irányba változtathatjuk, hogy fenntartható maradjon.
- Lehetséges-e az emberek világméretű összefogását igénylő kérdések közös megoldása? Mi lehet az a szervezeti, politikai és társadalmi keret, amelyben lehetséges a közös cselekvés? Ezeknek a kérdéseknek a megválaszolása már kapcsolatos a jelenlegi társadalmak politikai felépítésével, általános értékrendjével és egy sor olyan társadalmi mozzanattal, amely esetleg lehetővé tesz néhány területen az egész Földre kiterjedő közös cselekvést. Erre a történelem eddig lényegében nem mutatott példát.

Nézzük meg, hogy milyen tények és folyamatok tekinthetők a mai világ legfontosabb, a fenntarthatóságot és az emberiség jövőjét veszélyeztető globális problémájának.

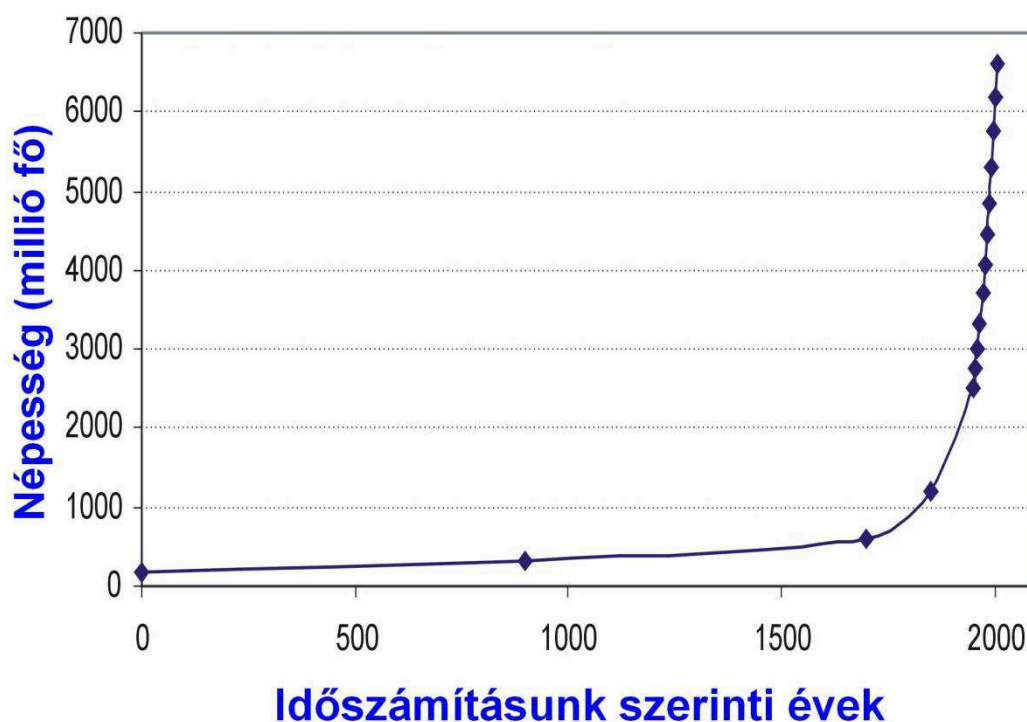
- A népességnövekedés,
- a globális éghajlatváltozás,
- az ember számára szükséges vízkészletek beszűkülése,
- a fajok kihalása, a **biodiverzitás** csökkenése,
- az ózonvékonyodás,
- a természeti erőforrások korlátos volta, kimerülése,
- az energiajövő bizonytalansága.

A fenti felsorolás nem kíván teljes, kizárólagos lenni, más globális problémák, más kérdések is felmerülnek. Ugyanakkor az itt szereplő témák mindegyike az egész emberiségre, az egész Földre vonatkozik és a velük kapcsolatos problémákra adott válaszok a fenntarthatóság alapjaihoz tartoznak.

A felsorolt hét globális probléma közül négygel, a globális éghajlatváltozással, a **biodiverzitás** csökkenésével, az ózonvékonyodással és az energiaellátás kérdéseivel ebben a tankönyvben külön fejezetek foglalkoznak, az ötödikkel, a természeti erőforrások kimerülését közvetetten minden fejezet érinti. Így mi most a népességnövekedés és a vízkészletek problémaköréhez teszünk megjegyzéseket.

#### 1.4.1. A Föld népességnövekedése

A Föld népessége a történelmi időkben a civilizáció előrehaladásával folyamatosan növekedett (1.4.1. ábra). A növekedés azonban évszázadokon keresztül lassú volt és robbanásszerű növekedést csak az utóbbi néhány évtizedben lehetett megfigyelni.



1.4.1. ábra: A Föld lakosai számának változása a történelmi időkben

A korábbi évszázadokat magas termékenység mellett magas halandóság és rövid életkor jellemezte. Gyakoriak voltak a járványok és a rossz életkörülmények sem kedveztek a lakosság növekedésének. Azonban az egyes társadalmakban — ugyan az egyes régiókban más és más időpontokban — egy **termékenységi átmenet** indult meg, amit magas születésszámok, javuló egészségügyi ellátás és javuló életkörülmények jellemeztek. Ezek megteremtették a lakosság gyors növekedésének feltételeit. Nyugat-Európában a **termékenységi átmenet** már a 17. században megindult, Magyarországon később, csak a 19. század végén érte el a lakosságnövekedés a maximumot. A Föld teljes lakosságára nézve a növekedés a maximumát 1965 és 1970 között érte el, amikor a népesség évi átlagban 2,1%-kal nőtt.

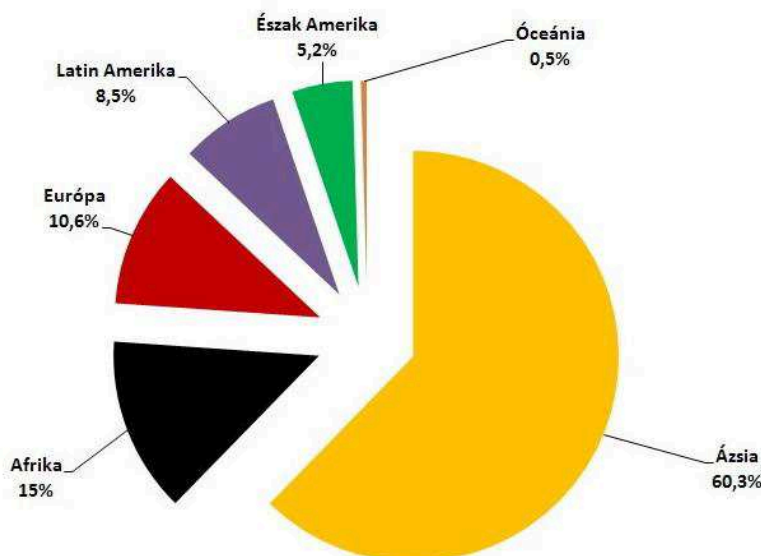
A Föld lakóinak száma 2011-ben 6,9 milliárd volt (1.4.2. ábra). A növekedés ~70 millió/év, azaz ~1%/év. Ez lényegesen alacsonyabb, mint az említett történelmi maximum volt. A növekedés csökkenésének oka a kevesebb születés, az 1970-es évektől India és Kína szaporodási üteme csökkenni kezdett.

A születések számának csökkenése minden országban (néhány afrikai ország kivételével) megfigyelhető. 1950-ben átlagosan minden nő 5 gyermeket szült, manapság ez az átlag 2,5 gyermek körül van. A csökkenés azonban nem egyenletes, az egyes régiókban jelentősen eltérnek egymástól. Így Európa lakosságának részaránya a Föld lakosságából az I. világháború kitörésének évében, 1914-ben 26% volt, ami 2011-re 10,6%-ra csökkent.

A népesség számának változása minden társadalom fontos kérdése. A különböző közösségek pedig különböző módon ítélik meg a népesedéssel kapcsolatos feladatokat. A megítélés kapcsolatos az egyes társadalmak értékrendjével és komoly szerepe van vallási megfontolásoknak is. Ráadásul sok helyen a nemzetek közötti verseny részének tekintik a népesség számának alakulását. — Ma ténykérdés, hogy a leggyorsabb lakosságnövekedést

a kevésbé fejlett országok mutatják. Azonban mindenütt megfigyelhető a termékenység csökkenése.

## A Föld lakossága 6.9 milliárd fő (2011)



**Növekedés: 70 millió/év**

1.4.2. ábra: A Föld népességének eloszlása a kontinensek szerint.

A demográfiai elemzések szerint a Föld lakossága legalább 2030-ig mindenképpen növekszik, de ennél valószínűbb, hogy a növekedés a 21. század közepéig folytatódni fog és az össznépesség akkor elérheti a 9,5 milliárd főt.

Az egyes ember életfeltétele megteremtéséhez természeti források igénybevételére van szükség. Ráadásul minél nagyobb igényei vannak az egyes embereknek, vagy embercsoportoknak, annál nagyobbak a felhasznált források. Így a Föld lakosságának ilyen robbanásszerű megnövekedése és a mindenütt növekvő igények kielégítésére való törekvés elkerülhetetlenül és komolyan veszélyezteti környezetünk jövőjét.

### 1.4.2. A Föld lakosságának édesvíz ellátása

Az emberi élethez édesvíz-ellátásra van szükség. Bár a víz az egyik legelterjedtebb anyag a Föld felszínén, az édesvízellátás biztosítása mégsem egyszerű feladat.

A Föld teljes vízkészlete mintegy 2 milliárd  $\text{km}^3$ , ami  $2 \cdot 10^{18}$  tonna víznek felel meg. Ennek ~15%-a kémiailag kötött. A további 1,4 milliárd  $\text{km}^3$  a globális víztározókban található. Az óceánok fogadják be ennek a víznek a 98,5%-át. Az óceánok vize sós, az átlagos sótartalom ~35 ezrelék.

A víz további 2%-a jég formájában van jelen a Föld felszínén. A maradék kis hányadnak jelentős részét, 0,57%-ot a felszín alatti vizek jelentik. A folyók, tavak és a bioszféra a vízkészlet 0,02%-át tartalmazzák. Ezek azok a vizek, amelyek már önmagukban is édesvizek.

Az egy főre eső édesvíz mennyisége az utóbbi néhány évtizedben folyamatosan csökken. Ennek fő oka az, hogy dinamikusan nő a felhasználás, 1950 óta több mint 3-szorosára emelkedett. Ezzel párhuzamosan jelentősen nőtt a vízszennyezés, így a kínálat is csökkent. Végül megemlítjük, hogy a klíma is állandóan változik, ami több helyen az elérhető vízkészletek csökkenéséhez vezetett.

Magyarország a vízhiány szempontjából a világ tíz legfenyegetettebb országa közé tartozik. Ennek hármas oka van. Először is a mai Magyarország alvízi ország, a víz 95%-a a határon túlról érkezik. Másodszor az országban évtizedek óta általános tendencia a szárazodás. Végül a felszín alatti vizeket az ország gyorsabb ütemben használja fel, mint ahogy azok keletkeznek.

Az alvízi országok általában nehéz helyzetben vannak a vízellátás szempontjából. A fenyegetettség olyan nagy, hogy akár fegyveres konfliktusok is adódnak a víz nem egyeztetett felhasználása miatt. Példa erre az arab-izraeli konfliktus egyik szála. Hasonló az a fegyveres összecsapással is fenyegető súlyos politikai válság, ami Törökország és Szíria között robbant ki az Eufráteszre épített Atatürk-gát miatt az 1990-es évek elején. Törökország a gát mögött  $\sim 50 \text{ km}^3$  vizet, az Eufrátesz mintegy 4 évi vízhozamát tartja vissza. Az Indiai-Pakisztáni konfliktus Kasmírra vonatkozó céljainak egyike pedig az Indus forrásvidékének az ellenőrzése. — A vízhiánnyal leginkább érintett területek sorrendje a jövőben valószínűleg Észak-Afrika, Közel-Kelet, Kína és India bizonyos részei lesznek.

A vízhiány most (2011) az emberek mintegy 8%-át ( $\sim 550$  millió ember) érinti. A tendenciák azonban riasztóak: becslések szerint 2030-ban már az emberiség  $\sim 30\%$ -a fog szenvedni az édesvíz szűkössége miatt.

Az édesvíz-szűkösség ellen a legegyszerűbb a tengervíz sóatlanítása lenne. Ez azonban óriási mennyiségű energiát igényelne. Bár építettek és kísérleteznek tengervíz sóatlanító telepekkel, igen messze vagyunk attól, hogy a tényleges igényekhez mérten ezeket a próbálkozásokat egyáltalán figyelembe lehetne venni.

A vízhiány a közvetlenül előttünk álló időszak egyik legnagyobb olyan problémája, amelynek megoldásához globális összefogásra lenne szükség. Ennek azonban ma még semmi jele nem látszik.

### 1.5. Az emberi társadalom és a környezet átalakítása

Az emberi társadalom a bioszférában él, az ember tevékenységével a bioszférát alakítja át. Ebben az átalakításban a gazdaságnak, mint az emberi társadalmi tevékenység egyik legfontosabb formájának, kiemelt szerepe van. A környezetre leginkább a gazdaság folyamatai hatnak. A következőkben ehhez fűzünk néhány megjegyzést.

Ha részletesebben elemezzük a gazdasági tevékenység jellemző folyamatait, akkor azt láthatjuk, hogy a séma a következő: a nyersanyag (természeti erőforrás) kitermelését követi a javak előállítás (szolgáltatások elvégzése). Ezzel egyidejűleg keletkezik a hulladék és a szemét. Más megfogalmazásban: a gazdaság működtetésével nagy mértékű anyagcsere folyik a természettel a kitermelés  $\rightarrow$  termelés  $\rightarrow$  fogyasztás sémában. Ez a természettel való kölcsönhatás **entrópia**-növekedéssel jár.

Azt látjuk, hogy környezetünket ez a kölcsönhatás jelentősen átalakítja. A környezeti változásokra vonatkozó sok paraméter arra utal, hogy a változások aggályosak és a jövőnk

szempontjából, a fenntarthatóság oldaláról vizsgálva megengedhetetlenek. Ezért az a kérdést kell megvizsgálnunk, hogy mitől függ a környezet-átalakítás mértéke?

A gazdasági tevékenység anyagcsereje a természettel, tehát a környezet-átalakítás mértéke nyilvánvalóan annál nagyobb,

- minél több javat állítunk elő, vagyis minél nagyobb a gazdasági teljesítmény,
- minél nagyobb az egységnyi gazdasági teljesítményhez tartozó anyagcsere (pl. anyagigény, energiafelhasználás, hulladék, szemét).

A környezet-átalakító hatás az ezzel a két, közvetlen tényezővel arányos. Ez a felismerés folyamatokra utal. Ezeket kell elemezni, ha az átalakítás mértékét korlátozni kívánjuk.

Foglalkozzunk először azzal, hogy mitől függ az első közvetlen tényező, a gazdasági teljesítmény nagysága! Ez a mennyiség minden társadalomra vonatkoztatva nyilvánvalóan arányos az egy főre eső gazdasági eredménnyel és a közösséghez tartozó emberek számával.

Az egy főre eső gazdasági teljesítményről sokan úgy gondolják, hogy az csak olyan tényezőktől függ, amelyek a gazdasági folyamatok technikai-fizikai hátterével vannak kapcsolatban. Pedig egy komolyabb elemzés rámutat arra, hogy az egy főre eső gazdasági teljesítmény mértékében meghatározó szerepet játszanak a társadalomra vonatkozó nem-materiális vonatkozások is. Gondoljunk arra, hogy a társadalom értékrendje, az egyes csoportok által fontosnak tartott igények kielégítése és az egyes emberek vágyai milyen mértékben meghatározzák a gazdaságpolitikai célokat. Egy, a takarékoságot társadalmi szinten értéknek tartó közösség fogyasztása azonos egyéb igényrendszer mellett is lényegesen kisebb lehet, mint egy nem takarékoskodó közösségé.

A gazdasági teljesítményt megadó másik tényező az emberek száma. Ezt rugalmatlan, a szándékoktól meglehetősen független tényezőnek tekinthetjük. A népességrobbanással korábban már foglalkoztunk. Most csak azt tesszük hozzá, hogy a múltban még egyetlen társadalomban sem sikerült az emberek számát előre tervezett mértékben beállítani.

Térjünk most rá arra a kérdésre, hogy a környezet-átalakítást megadó másik közvetlen tényező, az egységnyi gazdasági teljesítményhez tartozó anyagcsere (pl. anyagigény, energiaigény, hulladék) mértéke mitől függ! Az elemzések rámutatnak arra, hogy három olyan mozzanat azonosítható, amelyek mindegyike külön-külön hozzájárul az átlagos anyagcsere nagyságához.

- Annak a mértéke, hogy a javak előállításához alkalmazott technológiák milyen anyagforgalmat igényelnek, vagyis mennyire környezetkímélők.
- A tényleges gazdasági szerkezeti elemek anyagcserejének mértéke. Nyilvánvaló, hogy egy olyan gazdaságban, amelyben dominál a nehézipar, acélgyártás, egységnyi teljesítményre vonatkoztatva nagyobb anyagcserét folytat, mint az a gazdaság, amelyben a könnyűipar a legfontosabb.
- A gazdaság földrajzi mintázatától is van járulék. Ha a gazdasági tevékenység elemei földrajzilag távol vannak egymástól, akkor az anyagcsere meghatározásánál az ebből adódó járulékos tevékenységek környezetterhelését is figyelembe kell venni.

Az előbbieket kijelölik a környezet-átalakítás korlátozásának és a környezetvédelemnek az általános stratégiai szempontjait. E szerint mind az öt, előbb tárgyalt mennyiségből négyet, tehát

- az egy főre eső gazdasági teljesítményt,
- az alkalmazott technológiákhoz tartozó anyagcserét,
- a gazdasági szerkezet nagy anyagcserét igénylő elemeinek súlyát,
- a gazdaság geográfiai elhelyezéséből származó járulékos környezetterhelést

csökkenteni kell a környezet állapotának megtartása és a fenntarthatóság érdekében. Az ötödik fontos tényezőről, a közösséghez tartozó emberek számának problematikájáról korábban szoltunk.

Az előbbi stratégiai célok gyakorlatba való átültetése igen nehéznek ígérkezik

A **gazdasági teljesítmény** növelése kivétel nélkül mindenütt kiemelt társadalmi és politikai cél. A növekedés **GDP**-ben mérve 1950 óta évi átlagban 2%-os volt. A világgazdaságot a II. Világháború óta uraló gazdasági irányzatok egyértelműen növekedéspártiak voltak. Az anyagi javak halmozása ma korszellem, ez ellen tenni rendkívül nehéz.

Környezeti és fenntarthatósági szempontok miatt ezt a gazdasági szemléletet meg kellene változtatni. Ehhez négy területen komoly átalakulásnak kell bekövetkeznie.

- Új gazdaságpolitikai koncepcióra van szükség. Az önszabályozó piac elvére épült gazdaságirányítás az elmúlt évtized gazdasági válságával megbukott. Környezeti okok miatt vissza kell szorítani a piacokat és el kell érni, hogy a piacok visszakerüljenek a társadalmi ellenőrzés alá. Ez a gazdaság szereplőinek korlátozását is jelentheti, társadalmi csoportoknak lehetőséget kell adni, hogy beleszólhassanak a gazdaság folyamatainak irányába. — Közszolgáltatások (pl. ivóvíz-szolgáltatás) területén a piacnak nincs helye.
- A tudomány szerepét és a tudományos eredmények alkalmazását meg kell erősíteni. Az eddigi gazdaságirányítási elméletek nem vettek tudomást a természeti korlátokról, a gazdasági folyamatok és a bioszféra nagy mértékű anyagcseréjéről. Tudományosan elemezni szükséges minden egyes gazdasági folyamat környezeti hatásait és ezeket a fenntarthatóság szempontjából értékelni kell.
- Értékrend-változás nélkül a környezettel kapcsolatos követelmények nem teljesíthetők. Ma a javak bősége központi, sokak által vágyott érték. — Természetesen szükség van anyagi javakra, de más értékek is fontosak. Ilyenek például az egészséges környezet, az emberi kapcsolatok, a kulturális értékek. A gazdasági növekedés mindenek fölé helyezése mindezeket aláássa. Külön szerepük van a reklámoknak, amelyek vágyat keltenek az emberekben bizonyos anyagi javak, szolgáltatások iránt. Egészen bizonyos, hogy a reklámtevékenységgel kapcsolatos jogszabályokat felül kell vizsgálni a környezetvédelem és a fenntarthatóság érdekeinek megfelelően.
- A világgazdaság intézményrendszere is megérett az átalakításra. Az olyan nemzetközi nem-demokratikus szervezeteket, mint a **Nemzetközi Valutaalap**, a **Világbank**, a Világkereskedelmi szervezet, vagy a **G8** olyan szervezetekké kell átalakítani, amelyeket társadalmilag ellenőrizni lehet, és amelyek ezért a fenntarthatóság érdekében cselekszenek majd.

A **környezetkímélő technológiák** kifejlesztése és elterjedése terén biztató tendenciákat lehet megfigyelni. Sokszor a régebbi eljárások lecserélésével is sokat lehet nyerni a környezet átalakítása szempontjából. Az anyagtakarékos eljárások a bemeneti oldalon csökkentenek, aminek járulékos haszna, hogy kevesebb hulladék is keletkezik. Az energiatakarékos követelménye közismert és a legtöbb esetben ugyanannak a terméknek az előállításához ~40%-al csökkent az energiafelhasználás az utóbbi négy évtizedben.

A **gazdaság szerkezetének** átalakítása komoly mértékben csökkentheti a környezet károsítását. Ennek eszközei lehetnek a megfelelően bevezetett adók, mint például a természeti források felhasználásának megadóztatása, az ökológiai adók, vagy a hulladékadó bevezetése. A termelés szerkezet terén környezeti szempontból kedvező változásokat lehet megfigyelni, de ez sokszor azon az áron következik be, hogy a környezetszennyező termelést kitelepítik más, kevésbé fejlett államokba.

A **gazdaság geográfiai elhelyezkedése** több tényezőtől függött. A globalizálódó világ nemzetközi termékeket állít elő a nemzetközi piacra. A jelenlegi körülmények között gazdaságilag ésszerű lehet összetartozó termelési folyamatok földrajzi eltávolítása például alacsonyabb munkabérek, vagy lazább környezeti szabályok miatt. A gazdasági folyamatok lokalizációját az segíti elő, ha ennek járulékos környezeti terheléséből származó kár meghaladja azt az előnyt, ami a termelési részfolyamatok eltávolításából származik. A 21. század első évtizedének gazdasági válsága segíthet a gazdaság lokalizációjának javításában.

A környezet megőrzése és a fenntarthatóság mind a négy faktornak a csökkentését és ötödikként az emberek számának lehetőség szerinti szabályozását követeli meg. Hangsúlyozni kell, hogy nem elegendő egy, vagy két mennyiséget csökkenteni, a környezet védelme és a fenntarthatóság minden téren komoly jelentős korlátozásokat követel. Mindehhez a társadalmi szintű szemléletváltás mellett minden egyes ember személyes belátására és öntudatos cselekvésére van szükség.

## 1.6. Függelékek

### 1.6.1. Bibliográfia

Kerényi A.: *Környezettan*, Mezőgazda Kiadó, 2003., Budapest

Kerényi A.: *Általános környezetvédelem*, Mozaik Oktatási Stúdió, 1995., Szeged

Nánási I. (szerk.): *Humánökológia*, Medicina Kiadó, 2005., Budapest

Láng I. (főszerk.): *Környezet- és természetvédelmi lexikon* I. II. kötetek, Akadémiai Kiadó, 2002., Budapest

### 1.6.2. Fogalomtár

**biodiverzitás:** biológiai sokféleség

**entrópia:** valamely fizikai rendszer rendezetlenségének mértéke; a zárt rendszer entrópiája folyamatosan növekszik, azaz a rendszer rendezetlensége fokozódik

**G8:** a világ gazdaságilag legfejlettebb 7 országának, az Egyesült Államoknak, Franciaországnak, Japánnak, Kanadának, Olaszországnak, Nagy-Britanniának, Németországnak, valamint Oroszországnak az együttműködési fóruma

**GDP** (Gross domestic product): bruttó hazai termék



**Nemzetközi Valutaalap (International Monetary Fund — IMF):** az ENSz szervezete, a nemzetközi pénzügyi rendszer központi intézménye, amelynek célja a nemzetközi pénzügyi együttműködés és az árfolyamstabilitás elősegítése, a gazdasági növekedés fokozása és a magas szintű foglalkoztatás megteremtése

**termékenységi átmenet:** egy emberi közösség szaporodási mutatóiban megjelenő, viszonylag rövid idő alatt bekövetkező jelentős változás

**Világbank (World Bank Group):** öt nemzetközi intézményből álló, Washingtonban székelő bankcsoport, amely hitelezési és tőkeáramlást segítő tevékenységével a fejletlen országok gazdasági növekedését segíti

## 2. TÁJ, KÖRNYEZET, TALAJ (PAPP SÁNDOR)

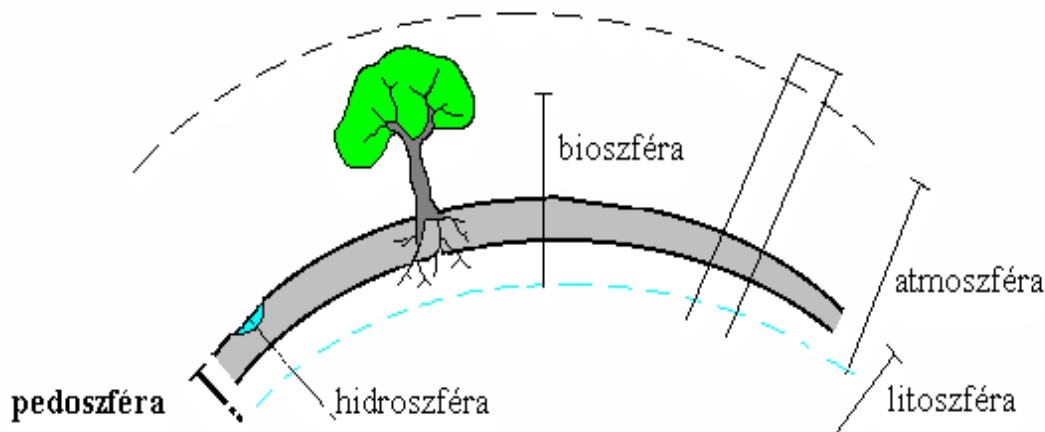
### 2.1. Táj

#### 2.1.1. A táj fogalma

A hétköznapi szóhasználatban gyakran előforduló „táj” a földrajztudomány egyik leggyakrabban használt térfogalma, egyszersmind kutatási terület- (tér-) egysége. Az elnevezés már a VIII. században megjelent („*lanscaf*”), de széles körben a XV–XVI. századi németalföldi festők tevékenysége nyomán terjedt el („*landschap*”).

*Nem tudományos definíciókban* a táj mibenlétét helyenként meglehetősen filozofikusan fogalmazták meg („érzéki benyomás, a környezet visszhangja az emberben”, „a környező világ természeti minősége”), másutt egyértelműbb, közérthetőbb („festmény, kép”, „elhatárolt földterület, a földburok részlete”), esetenként pedig hibás („az emberiség által kiformált földfelszín”<sup>1</sup>) meghatározását adták.

A *tudományos meghatározáshoz* az előbbieik közül az „elhatárolt földterület, a földburok részlete” áll a legközelebb, azzal a megszorítással, hogy a táj nem egyszerűen földterület, földfelszíni folt, hanem valóban a több rétegű (geoszférákból összetevődő) földburok meghatározott részlete: *az összes szférát magába foglaló, horizontális és vertikális kiterjedésű térkomplexum* (lásd a függőleges hasábot az 2.1.1. ábra jobb oldalán).



2.1.1. ábra: A Föld szférikus felépítését szemléltető vázlat az összes szférát magába foglaló „téroszlop” (tkp. táj) feltüntetésével

Az ábrán vázlatosan feltüntetett ún. geoszférák *nem folytonos* és tulajdonságaikat tekintve egyáltalán *nem egynemű* gömbhéjakként ölelik körül bolygónkat. Például a *litoszféra* anyagai,<sup>2</sup> az ezeken kialakult *domborzati formák*, a **mezo- és mikroklíma**-viszonyok kis területeken belül is sokfélék lehetnek; a *hidroszféra*t alkotó felszíni és felszín alatti vizek mennyiségi és eloszlási viszonyai ugyancsak nagymérvű változatosságot

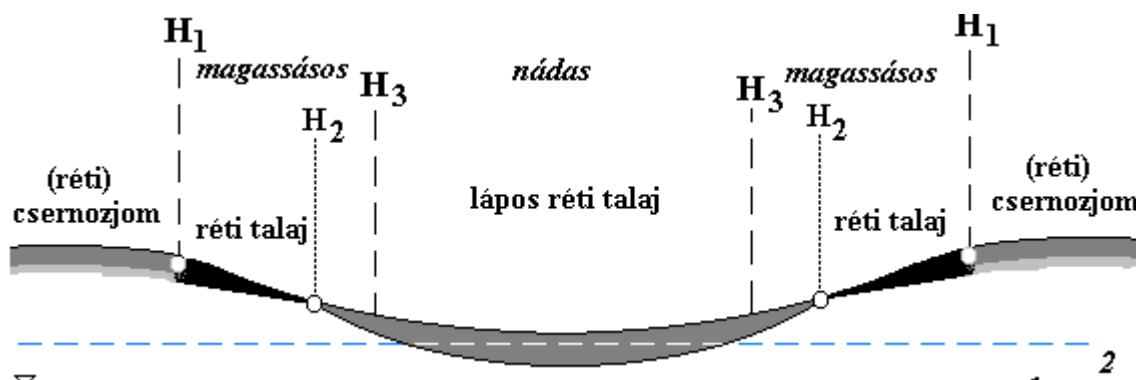
<sup>1</sup> A tájat nem az emberi tevékenység hozza létre, legfeljebb többé-kevésbé módosítja annak arculatát.

<sup>2</sup> Esetünkben a szárazföldek felszíni-felszínközeli kőzetei.

mutatnak, nem beszélve a *bioszférát* alkotó növény- és állatvilág térbeli mintázatának tarkaságáról és a mindezek kölcsönhatása eredményeként képződött *talajok* sokféleségéről. A földfelszínen mozogva tehát lépten-nyomon változatos megjelenésű, arculatú kép (tájkép, táj) tárul a szemünk elé, amit általában szembeötlő domborzatával (például hegység, dombság, síkság, hullámos homokvidék, folyami ártér stb.) vagy növényzetével (például erdő, nádas, szikes puszta; mezőgazdaságilag hasznosított táj esetében: például szántó, szőlő-, gyümölcsültetvény stb.) szokás megnevezni.

A tájak sokféleségének, mozaikosságának oka az, hogy a – szélsőséges esetektől eltekintve – *mindenütt<sup>3</sup> jelen levő és egymással kölcsönhatásban levő szférák* a földfelszín különböző helyein eltérő módon/mennyiségben *kombinálódnak*, ami e területeknek a szomszédságuktól többé-kevésbé eltérő fiziognómiájában (megjelenésében, arculatában) jut kifejezésre. Lássunk néhány egyszerű példát!

a) A folyók árterének síkjába sekélyebb-mélyebb feltöltött morotvák (egykori folyómeder-kanyarulatok) mélyülnek. Azért, mert ezek fenékszintje *közelebb van a talajvíz szintjéhez*, ökológiai viszonyaik eltérnek sík környezetüktől: bennük a víztöbblet hatására *hidromorf talajtípusok* ([réti talaj](#), [lápos réti talaj](#)), illetve *nedvesség-/vízkedvelő növényzet* (például magassásos, nádas) sávjai jelennek meg (2.1.2. ábra). Ez utóbbiak egyszersmind jól kirajzolják a morotvák jellegzetes, C-szerű felülnézeti/térképi alakját.



2.1.2. ábra: Feltöltött sekély morotva – mint homogén téregység – sematikus keresztmetszéve a nedvességtöbblet változását jelző talajtípusok és növénytársulások határainak feltüntetésével.  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  – a morotvaszegély kijelölésének lehetséges esetei. 1 – aktuális (adott időpontban mérhető mélységű) talajvízszint; 2 – [kapillaris zóna](#)

b) A hullámos-buckás *homokfelszínek aprólékosan tagolt domborzata* – elsősorban a besugárzási viszonyok és a vízellátottság befolyásolásával – rendkívül változatos életfeltételek kialakulását határozza meg, ami az eltérő igényű homoki *növénytársulások* tarka mozaikosságában tükröződik. Más-más társulások borítják a buckák hűvösebb északi és forró déli *kitettségű* lejtőit, a buckatetőket, valamint a buckaközi mélyedéseket (attól is függően, hogy ez utóbbiak talpszintje milyen mértékben közelíti meg – az itt mindig a felszínhez közelebb [magasabban] elhelyezkedő – *talajvíz-szintet*). Láthatjuk tehát, hogy ez esetben a *szférák* (a továbbiakban: *tájénytézők*) az ártérhez képest itt egészen más kombinációkban vannak jelen (2.1. táblázat; 2.1.3. ábra).

<sup>3</sup> Kivételek például a Föld nagy jégtakarói (Antarktisz, Grönland), amelyek területén a litoszféra „hiányzik” (a vastag jégréteg alatt természetesen megvan!), de például még a legszárazabb sivatagokban is jelen van – legalább éjszakai harmat formájában – a hidroszféra és (még ha erősen hézagosan is) a bioszférát képviselő növény- és állatvilág.

sajátos <u>litológia</u> (nagy hézagterfogatú, gyors kiszáradásra hajlamos homok)	→	szélfújta, „nyugtalan”, buckás <b>domborzat</b>	→	sűrűn és aprólékosan <b>váltakozó égtáji kitettség okozta változatos besugárzási viszonyok</b>	→	mindezekhez messzemenően igazodó <b>nővény- (és állat-) társulások</b> , valamint <b>talajok</b>
			→	erősen <b>változó mélységű talajvízszint</b>	→	

2.1. táblázat: A tájtényezők kapcsolatrendszere (kombinációja) futóhomok-területeken

Hangsúlyoznunk kell, hogy a tájak nagy részének arculatára – másodlagosan – az *emberi társadalmi tevékenység* is rányomta a bélyegét, aminek figyelembevétele vagy figyelmen kívül hagyása a tájak *kialakulását* illető két nézetcsoporthoz ellentétére világít rá. E nézetek szerint a táj

– „*kizárólag természeti komplexum*”, azaz arculatának kialakításában az ember nem játszott szerepet; illetve

– „*totális geográfiai komplexum*”, vagyis természetes eredetű, de arculatát az ember/társadalom többé-kevésbé átalakította.

Mindkettőre bőven találunk példát a Földön, bár az emberi társadalom által nem érintett természetes tájak („*kizárólag természeti komplexumok*”) ma már egyre ritkábban fordulnak elő. Elterjedtebbek viszont a „*totális geográfiai komplexumok*”, a *geoszféra kölcsönhatása eredményeként kialakult, sajátos arculatú, a szomszédaitól – esetleg éppen az antropogén átalakítás/hasznosítás miatt – többé-kevésbé jól elkülönülő téregységek.*

### 2.1.2. A táj térgységeinek hierarchiája

a) Homogén téregységek (a nemzetközi szakirodalomban: landscape unit; Ökotop, Geotop [magyar helyesírással: ökotóp, geotóp], Fliese; fácies, biogeocönózis stb.).

Azokat a tereket, amelyekben belül a tájtényezők azonos/hasonló módon kombinálódnak (bennük az ökológiai viszonyok azonosak vagy nagyon hasonlóak, de a szomszéd terektől többé-kevésbé eltérőek), (*legkisebb*) *homogén téregységeknek* nevezzük. Szárazföldjeink végső soron ezek megszámlálhatatlan sokaságából tevődnek össze.

Változatos – de nem feltétlenül kicsiny (!) – *kiterjedésűek*: például a fent említett morotva vagy a homokbuckák különböző irányokba néző lejtői esetleg valóban csak néhány tucat m<sup>2</sup>-esek, de például az ártéri síkok (morotvák nélkül szemlélt) ökológiai homogén szalagjainak kiterjedése ezeknek sok százszorososa is lehet. *Méreteik* alsó határát az ésszerűség szabja meg: a legalább néhány m<sup>2</sup>-es, „*térképezhető kiterjedésű*” tereket számítjuk ide.<sup>4</sup>

Fontos jellemvonásuk, hogy *határaik* kevés kivétellel<sup>5</sup> nem élesek, inkább átmeneti jellegűek. Az említett morotva példájánál maradva: az enyhén, folyamatosan mélyülő (a talajvízszintet egyre jobban megközelítő) meder szegélye gyakorlatilag bárhol (a

<sup>4</sup> Elvileg (ad absurdum) még egy vakondtúrason is elkülöníthetők eltérő ökológiai adottságokkal jellemezhető (például a talaj mikroorganizmusok számára különböző életfeltételeket nyújtó) lejtők.

<sup>5</sup> Például vízpart vagy eltérő genetikájú/tulajdonságú kőzetek érintkezése („éles kőzethatár”).

mederlejtő inflexiós sávjában<sup>6</sup> vagy bármelyik talaj-, illetve növényzeti határon: a 2.1.2. ábrán például a H<sub>2</sub> vagy a H<sub>3</sub> vonalában) meghúzható, esetünkben azonban célszerű a nedvességtöbbletet már egyértelműen jelző magassásos növényzeti, illetve réti talajzóna külső határvonalát (H<sub>1</sub>) választani.

b) Heterogén téregységek (a nemzetközi szakirodalomban: tájmozaik, Ökotopgefüge [ökotópszervezet (-csoport)], [pod]urocsisce, mesztnoszty, landsaft<sup>7</sup> stb.)

A táj kutatások során igen gyakran *nagy(obb) kiterjedésű, több és többféle* (nem ritkán sok és sokféle) *homogén téregységet magukba foglaló, ún. heterogén téregységek* vizsgálatára van szükség, rendszerint olyan nagy és összetett tájakéra, amelyek elemzése, értékelése a homogén téregységek méretarányában – azaz olyan részletességgel – nem is valósítható meg.

Ezek a „*rokon származású*” *homogén téregységek társulásai, összeszővődései*, határaik megvonása ezért nem lehet önkényes; helyesen csakis genetikai-„*rokonsági*” alapon történhet. Ismét csak az ismert példánál maradván: a folyóártér és a szélfújta, hullámos homokvidék merőben eltérő módon képződött, ezért specifikus (csak rájuk jellemző) homogén téregységekből tevődnek össze (2.1.3. ábra). Az ártéri sík és a különböző mértékben feltöltött morotvák generációi *folyóvízi*, míg a buckatető, -lejtők, buckaközi laposok *eolikus*<sup>8</sup> eredetű formák (táji értelemben homogén téregységek), a tájhatár tehát értelemszerűen az ártér és a homokvidék érintkezési vonalában/sávjában fut (lásd a 2.1.3. ábrán: H).



2.1.3. ábra: Eltérő kialakulású, szomszédos heterogén téregységek (folyóártér és szélfújta, hullámos homokvidék) elhatárolása. 1–5 – a folyóártér homogén téregységei (ártéri sík [1], különböző mértékben feltöltött (idősebb-fiatalabb) morotvák [2–5]); 1–5 – a homokvidék homogén téregységei (eltérő kitérségű lejtők, tetőszintek és buckaközi mélyedések); H – tájhatár. ▼ – talajvízszint

E határok a valóságban – a homogén téregységekéihez hasonlóan – átmeneti jellegűek, elmosódtak, a nagyobb területet ábrázoló (kisebb méretarányú) térképeken azonban szükségképpen éles vonalként jelennek meg.

### 2.1.3. A táj kutatás módszerei

Az egyes földi szférákat évszázadok óta ún. ősi szaktudományok (például geológia, meteorológia, hidrológia, biogeográfia, talajtan), illetve ezek nagymértékben és sok irányban specializált részdiszciplínái „*horizontálisan*” tanulmányozzák, azaz sajátos módszereket alkalmazó kutatásaik elsősorban az érintett szféra szerkezeti-működési törvényszerűségeinek feltárását célozzák.

<sup>6</sup> A domború, illetve homorú lejtőszakasz közötti átfordulás vonala/sávjá. A 2.1.2. ábrán ez kb. a H<sub>2</sub> vonalának felel meg.

<sup>7</sup> Német eredetű orosz kifejezés, ezért nem sch-val írandó.

<sup>8</sup> Szélfújta, szél által kialakított.

A táj – mint az összes szférát magába foglaló képződmény – tanulmányozása ezzel szemben csakis „*vertikálisan*”, az említett szaktudományok vizsgálati módszereinek felhasználásával és továbbfejlesztésével, illetve az általuk feltárt ismeretanyag szintézisével lehetséges. Lényegében ilyen **komplex** és **szintetikus** tudomány az elsősorban a természetes ökológiai rendszerekkel (**ökoszisztémákkal**) foglalkozó *ökológia* és a nálánál fiatalabb, *a többé-kevésbé átalakított természeti rendszerek (tájak) felépítését és működését (is) vizsgáló tájökológia*.

A vizsgálati céltól, de nem kevésbé a személyi, illetve anyagi-financiális lehetőségektől függően a tájökológiai kutatási irányok alapvetően kétfélék lehetnek.

a) Az ún. *strukturális-morfológiai vizsgálatok* a táj „pillanatnyi” állapotának felmérését célozzák, s szokásosan három szakaszra tagolhatók: 1. *analízis* (a tájtényezők egyenkénti vizsgálata, térképezése), 2. *szintézis* (a tájtényezők közötti kapcsolatok feltárása, a különböző hierarchiaszintű téregységek lehatárolása), 3. *javaslattétel* e téregységek differenciált, optimális hasznosítására.

b) Az ún. *strukturális-funkcionális (monitoring-) kutatások* a táj hosszabb időn át (évszakosan, több év, esetleg évtized alatt) végbemenő változásainak (a táj „működésének”) vizsgálatát foglalják magukba, amely állandó kihelyezett (terepi) kutatóállomások létesítését igényli.

## 2.2. Környezet

A bennünket körülvevő és a mindennapi életünket sokféleképpen befolyásoló világot a köznyelv összefoglalóan és leegyszerűsítve *környezetnek* nevezi, s nem tesz különbséget a természetes eredetű (legfeljebb a társadalom által többé-kevésbé átalakított) táj és a rendszerint összetettebb és olykor csaknem teljesen mesterséges környezet között. A két fogalom még egyes szakmunkákban is gyakran keveredik egymással: gyakran találkozhatunk például a *tájvédelem – környezetvédelem, tájhasznosítás – környezethasznosítás* egyenértékű használatával. Ennek elsősorban az az oka, hogy kialakító tényezőik egy része lényegében azonos: a tájtényezők egyszersmind (természeti) környezeti (sőt, mint látni fogjuk, talajképző) tényezők is.

A táj és a környezet közös és eltérő vonásaira tájkatató geográfus szakember (MAROSI SÁNDOR) világított rá:

– a tekintetben azonosak, hogy mindkettő *térkategória, négydimenziós és komplex*, de  
– területi elhatárolódásukban és legfőbb kapcsolatrendszerükben különböznek egymástól (lásd 2.2. táblázat).

## 2.3. Talaj

A talaj – mint a földi élet szempontjából nélkülözhetetlen természeti képződmény – definiálásához többféle módon közelíthetünk. A *legegyszerűbb* meghatározások szerint a talaj: „...a Föld legkülső szilárd burka, amely a növények termőhelyéül szolgál”; illetve „...a földkéreg legfelső, laza, termékeny rétege”. *Fizikai-kémiai szemléletet* tükröz a „...háromfázisú (halmazállapotú) anyagi rendszer”, s *rendszer szemléletet* a „...számos alrendszerből álló, összetett, nyílt rendszer” meghatározás.

<b>KÖRNYEZET</b>	<b>TÁJ</b>
– feltételezettséget fejez ki, viszonylatot (birtokviszonyt) tükröz: <i>élő szervezet (növény, állat, ember [egyed vagy csoport]) birtoka</i> (vö. ökológia)	– <i>nem viszonylat</i> – <i>nem birtoka élő szervezetnek</i>
– <i>konkrét tere, helye az élő szervezetnek, amelyre hat</i>	– <i>nem konkrét feltétele konkrét tevékenységnek</i>
– térkategóriákként úgy kapcsolódnak egymáshoz, <i>kereszteznek és szövik át egymást</i> , mint konkrét birtokosaik, az élő szervezetek	– térbeli alapja, határainak meghatározója <i>a természeti tényezők összessége</i> – <i>hierarchikus rendben, hézagmentesen lefedi a földfelszínt és önálló földrajzi neve van (lehet);</i> – <i>határai</i> – természeti meghatározottságuk miatt – <i>állandóbbak</i>
– területi egysége az <i>ökotóp</i>	– területi egysége a <i>geotóp</i>

2.2. táblázat: A környezet és a táj alapvető különbségei

A földrajzi megközelítés – akárcsak a tájak meghatározásakor – ismét a geoszférák kölcsönhatásaiból indul ki. Azt hangsúlyozza, hogy a bolygónkat felépítő, eltérő összetételű, halmazállapotú és szerveződésű gömbhéjak nem „hagymahéjszerűen” egymáson, hanem a szárazföldek viszonylag vékony legfelső rétegében „egymásban” vannak jelen és hatnak egymásra. Ezt a legsokoldalúbb és legintenzívebb kölcsönhatásokkal jellemezhető, aktív földfelszíni réteget nevezzük talajnak, globális léptékben pedig talajburoknak, pedoszféranak.

\*

A mondottakból következik, hogy a táj, a (természeti<sup>1</sup>) környezet és a talaj kialakító tényezői lényegében *ugyanazok*. A talaj különlegessége abban rejlik, hogy – mivel képződése tulajdonképpen *táj-/környezeti tényezők* (szilárd [szubsztrátum](#) [kőzet], domborzati, éghajlati, vízrajzi, biogeográfiai viszonyok stb.) szintézisével valósul meg (egyúttal tehát a legkomplexebb tájtényező) – ismerete kulcsfontosságú a táj, illetve a természeti környezet vizsgálatában.

<sup>1</sup> Ezt feltétlenül hangsúlyoznunk kell, hiszen az élőlények környezetét gyakran mesterséges elemek is alkotják.

## 2.4. Függelékek

### 2.4.1. Bibliográfia

- Marosi S.: Tájkutatói irányzatok, tájértékelés, tájtipológiai eredmények. – Elmélet –Módszer – Gyakorlat, 35., MTA FKI, Budapest, 1980, 119 p.
- Marosi S.: Táj és környezet. Földr. Ért. 30. 1981, pp. 59–72.
- Marosi S.–Szilárd J.: A természeti földrajzi tájértékelés elvi-módszertani kérdéseiről. Földr. Ért. 12. 1963, pp. 383–417.
- Papp S.: Talajaink kialakulása; Magyarország talajtípusai; Talajvédelem. In: Pannon Enciklopédia – Magyarország földje, Kertek 2000 Könyvkiadó, Budapest. 1997, pp. 258–260; 261–263; 466–468.
- Papp S.: A talaj mint megújuló és mint megújítható erőforrás. A földhasználat. In: Bora Gy.–Korompai A. (szerk.): A természeti erőforrások gazdaságtana és földrajza (2., javított kiadás), Aula Kiadó, Budapest, 2003, pp. 222–259.

### 2.4.2. Fogalomtár

**Ad absurdum:** kb. ésszerűtlenül, a lehetetlenséggel határosan.

**Antropogén átalakítás/hasznosítás:** valamely térség természetes állapotának megváltozása az ember (a társadalom) kisebb-nagyobb mértékű beavatkozása (pl. erdőirtások, mezőgazdasági tevékenység, folyószabályozások, bányászat stb.) révén.

**Eltérő genetikájú:** különböző módon, eltérő folyamatok hatására keletkezett.

**Hierarchia:** alá-, ill. fölérendeltségi viszony, rangsor (természeti és társadalmi értelemben egyaránt).

**Kapilláris zóna:** az üledék hézagait teljesen kitöltő talajvíz felett kialakult, a finom hálózatot alkotó pórusok, repedések, hézagok által kapillárisan felemelt víztől nedves, változó vastagságú (al)talaj-réteg.

**Komplex:** itt: több tudományágat magában egyesítő.

**Lápos réti talaj:** magasan álló talajvíz, valamint időszakos felszíni vízborítás hatására képződött talaj, amelyben az elhalt növények szöveteinek egy része az oxigénhiány miatt bomlatlanul vagy kevésbé lebomlott állapotban (tözegként) halmozódik fel.

**Litológia:** a felszíni és a felszínközeli kőzetek/üledékrétegek anyagi minősége, tulajdonságai.

**Mezoklíma:** közepes méretű domborzati forma (hegytető, hosszabb, összetett lejtő, folyóártér, szélesebb nyílású völgy stb.) jellemző hőmérsékleti, párolgás- és szélviszonyai.

**Mikroklíma:** viszonylag kis kiterjedésű, egész területén nagyjából azonos természeti tényezőkkel (lejtőszög/besugárzás, növény- és talajtakaró, talajvízmélység stb.) jellemzett (homogén) téregység (pl. tetőszint, azonos meredekségű és égtáji kitettségű lejtőszakasz, völgytalp, feltöltött morotva stb.) talaj- és léghőmérsékleti, párolgás- és szélesebesség értékeinek napi járása a felszín felett kb. 1 m magasságig.

**Ökoszisztémák:** külső energiaforrással működő, sok komponensből (élőlényekből és azok élettelen környezetéből) összetett, egymással sokoldalú kölcsönhatásban álló természeti rendszerek.

**Réti talaj:** elsősorban a felszínközeli talajvíz hatására képződött, jellemzően sötét/fekete színű, vaskiválásokat tartalmazó alföldi-folyóártéri talajtípus.

**Szintetikus:** itt: több tudományág módszereit, eredményeit együttesen figyelembe vevő és alkalmazó.

**Szubsztrátum:** alapzat, szilárd (kőzet)felszín.



### 3. KÖRNYEZETI ÁSVÁNYTAN (WEISZBURG TAMÁS, TÓTH ERZSÉBET)

#### 3.1. Bevezetés

Környezetünk nem élő, kémiai összetételük szerint *egynemű* anyagai gázok, folyadékok és szilárd anyagok.

A környezettel foglalkozó szakember jól tudja, hogy közülük a *szilárd anyag* nem csak a lábunk alatti *talajban* és *kőzetekben* található: állandóan, jelentős mennyiségben, és a *mennyiségénél is jelentősebb környezeti hatással* jelen van a *légkörben* és a *vizekben* is, csupán szemcséinek parányi mérete rejti el itt a hétköznapi ember szeme előtt. Ha egy kémiailag egynemű (*homogén*) gáz- vagy folyadékrendszerben megjelenik a szilárd anyag bármilyen apró szemcséje is, vele szükségszerűen eltűnik a homogenitás, megjelennek *határfelületek*, a rendszer összetetté (*heterogénné*) válik és tulajdonságai is megváltoznak.

A környezetben képződő szilárd fázisok szemcsemérete jellemzően a nanométer (nm) – 10 mikrométer (µm) tartományba esik, vagyis nagy részük a legjobb felbontású *optikai* (fényvel működő) mikroszkópokkal sem látható. A kis szemcseméret oka, hogy a környezeti folyamatok viszonylag *kis energiájú környezetben* zajlanak (légnomás, -60 – +60 °C), ráadásul az e környezetben meghatározó vizes oldatokban a *kémiai koncentráció* és a (*mikro*)*biológiai aktivitás gyorsan változó*, így a nagy kristályok növekedéséhez elengedhetetlen, időben nyugodt termodinamikai körülmények sem adóttak.

A gázokat és folyadékokat általában *molekulaként* megjelenő *vegyületek*, *elemek* vagy ezek *keverékei* és bennük oldott *szabad* (általában *hidratált*) *ionok* alkotják. A *gázok* és *folyadékok* vizsgálatára fejlődött ki az elmúlt kétszázötven évben a modern *kémia*.

Ezzel párhuzamosan a *természetes szilárd vegyületek* (ásványok) kutatása is megindult a 18. században egy önálló tudományág, a modern *ásványtan* keretében. A kémia és az ásványtan elkülönülésének fő oka, hogy a természetes szilárd anyagok többsége – szemben a gázokkal és a folyadékokkal – *nem molekuláris vegyület*, ezért megismerésük más módszereket kívánt. Az elmúlt 15–20 évben alakult ki a természetesekkel rokon szilárd *környezeti* anyagok megismerésével foglalkozó *környezeti ásványtan*.

Az ásványtan (mineralógia) tehát az ásványokkal és a velük rokon (szilárd) vegyületekkel foglalkozó tudomány. Ásványtani szempontból a tisztán természetes és a környezeti (az ember keze nyomát *is* magán viselő) szilárd anyagok között nincs különbség: mindkettő az ásványtan *alapfogalmaival* írható le, az ásványtan eszközeivel ismerhető meg, mindkettőnél az ásványtan tudja feltárni és jellemezni a kedvező vagy kedvezőtlen – vagy éppen semleges – környezeti hatásokat.

Az ásványtan 21. századi tudományos kapcsolatrendszerét a *3.1.1. ábra* mutatja.

A kémia, a fizika és az ásványtan kutatási eszköztárában számos hasonlóságot találunk, de mindegyiknek megvannak a maga sajátos eszközei is. Mivel a környezeti ásványtan tárgyát képező parányi szemcséket hagyományos módon, közvetlenül (szabad szemmel vagy optikai mikroszkópokkal) nem láthatjuk, ezért kutatásuk csak az elmúlt

évtizedekben elterjedt *nagyműszeres vizsgálatokkal* (elektronmikroszkópiák, diffrakciós mérések,

szerkezeti információt adó spektroszkópiák, felületi mikroszkópiák) lehetséges. E módszereket itt, ebben az összeállításban – hely hiányában – nem tárgyaljuk.



3.1.1. ábra: Az ásványtan 21. századi tudományos kapcsolatrendszer

Előadásunk a környezeti ásványtanból három részt emel ki. Először az *alapfogalmakat* vezetjük be. Ezután, pusztán geometriai megfontolások alkalmazásával, megmutatjuk, hogy a környezeti ásványok *parányi mérete* milyen óriási változást eredményez szemcséik mennyiségében és *fajlagos felületükben*. Végül arra hozunk példát az azbesztek segítségével, amikor a méret csökkenésével nem csupán a felület *nagysága*, hanem *minősége* is megváltozik: amikor egy *nano- és mikrométeres* méretben keletkező szilárd vegyület kémiailag, fizikailag, sőt élettani hatásában is másként viselkedik, mint a hagyományos, milliméteres, deciméteres megfelelője.

## 3.2. Alapfogalmak

Előadásunk, amelyhez könyvünk segédletként készül, minden egyetemista által felvehető, általános tárgy. Mivel Magyarországon 1948 óta az ásványtani alapismeretek nem épülnek be a közoktatásba, és így az ezt lezáró érettségibe sem, ezért a hallgatóság soraiban ülők döntő többsége számára nem ismertek. Ásványtani alapismeretek nélkül azonban a környezeti ásványtan nem tanítható, ezért áttekintésüket – bármilyen rövid is az előadási idő – nem tudjuk elhagyni.

### 3.2.1. Az ásvány

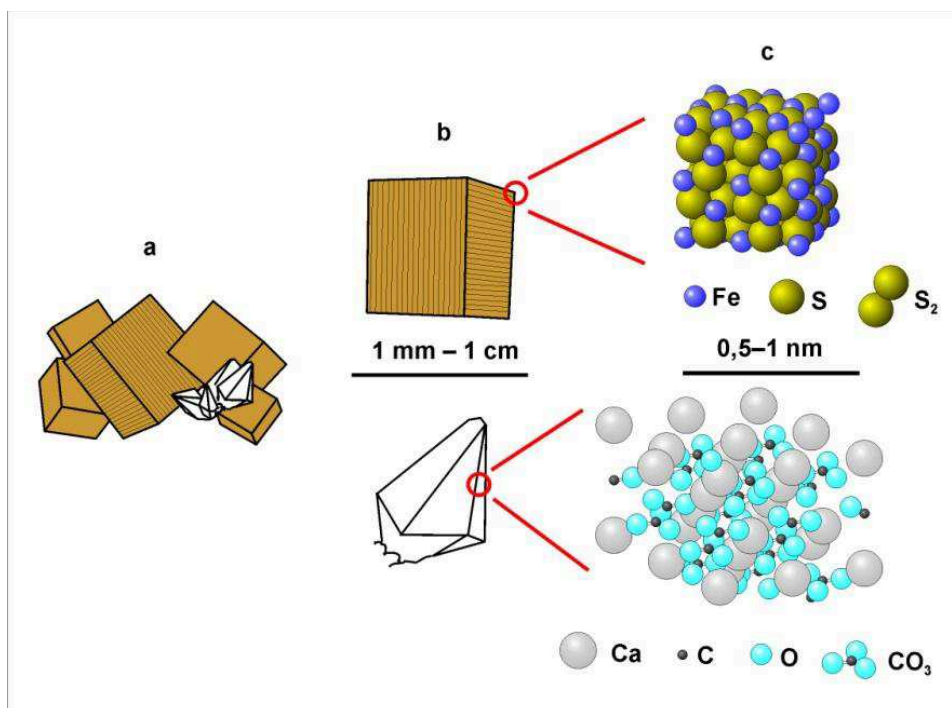
#### *Az ásvány definíciója*

Az ásvány természetes kristályos vegyület, ritkán elem. Ma mintegy 4500 ilyen vegyület ismert. Számuk lassan gyarapszik, minden évben néhány tíz újabbat fedeznek fel a Földön.

A *természetes* azt jelenti, hogy *természetes folyamatok* hozták létre.

A **kristályos** azt jelenti, hogy az anyagban *mind rövid, mind hosszú távú rend* megtalálható. A *rövid távú* (jellegzetesen 0,1–0,2 nanométeres távolságú) geometriai rendet a kémiai kötések alakítják ki az atomok, ionok között. A *hosszú távú rend* a rövid távon rendezett atomcsoportok néhány nanométertől akár centiméteres távolságokig is terjedő szabályos ismétlődését, a „végtelen” (kristály)rács kialakulását jelenti.<sup>1</sup> A kristályos szemcséknek legtöbbször nincs szabályos alakjuk, de különleges, a természetben ritkán megvalósuló növekedési feltételek között, síklapok szimmetrikus elrendeződésével, megjelenhetnek rajtuk *szabályos kristályalakok* is. A kristályos anyagnál mindig meglévő *belső* (atomi léptékű) kristályrácsot az esetenként megjelenő *külső* (makroszkopikusan észlelhető) kristályalakokkal a *szimmetria* kapcsolja össze.

A *vegyület* esetünkben olyan anyagi minőséget jelöl, ahol az alkotók (atomok, ionok) között főként **elsőrendű kémiai kötések** (kovalens, ionos, fémes) vannak, és ennek nyomán az anyagnak van határozott, állandó kémiai összetétele, a benne levő alkotók aránya *kémiai képlet* segítségével felírható.



3.2.1. ábra: Pirít ( $\text{FeS}_2^{\text{köbös}}$ ) és kalcit ( $\text{CaCO}_3^{\text{trig}}$ ) kristályokból álló halmaz vázlatos rajza. A pirít arany-sárga kockákból áll, ezek mérete az ábrán maximum 1 cm; kristályszerkezete köbös, benne a vas és kén aránya 1:2. A kalcit fehér, fél cm-es hegyes kristályokból áll, kristályszerkezete háromszöges

<sup>1</sup>A kristályrácsot az ásványok *döntő többségénél* folytonosan – a szemcse teljes térfogatában, „végtelenül” – elsőrendű kötésekkel kapcsolódó atomok, ionok építik fel. Az ilyen anyagban nincsenek zárt, kémiaiilag, elektromosan semleges molekulák. A megadott kémiai összegképlet pusztán az alkotók egymáshoz képesti arányát rögzíti. Például egy parányi kvarcsezemcsében *sok ezer milliárd szilícium atom* és velük kémiaiilag összekötve *kétszer annyi oxigén atom* található, a felírt képlet mégis „csak”  $\text{SiO}_2$ . Egy ilyen, *nem molekuláris* kristály szétbontásakor a vegyület is alkotóira bomlik, a kvarc példájánál maradvá Si és O atomokra esik szét. *Néhány ásványnál*, ilyen például a *jég* ( $\text{H}_2\text{O}$ ) és a *termésken* ( $\text{S}_8$ ), az elsőrendű kötések „véges” számú atom rövid távú rendjeként megjelenő, kémiaiilag zárt, elektrosztatikusan semleges, igazi *molekulát* hoznak létre. Ezeknél az anyagoknál a hosszú távú rend (kristály) e molekulák gyenge (másodlagos) kötések révén történő sorba állításából ered („molekulárcsós anyagok”). Ebből következően a *molekulákból álló kristályoknál* a rács felbomlása után is megmarad a vegyület: a jégkristály ( $\text{H}_2\text{O}$ ) felolvasztása nyomán víz ( $\text{H}_2\text{O}$ ) lesz, a kén olvadáskor pedig a 8 kénatomból álló kénmolekula ( $\text{S}_8$ ) lesz jelen.

(trigonális), alkotóinak aránya  $Ca:C:O=1:1:3$ . Az ásványok kristályszerkezetében az atomok/ionok helyzetét a *c* ábrarészlet szemlélteti. Figyeljük meg a méretarányok változását!

Egy ásvány(szemcse) jellemzéséhez három dolgot kell megadni (3.2.1. ábra):

1. a szemcse méretét, alakját;
2. a *kémiai elemi összetételét*, vagyis a benne lévő egyes kémiai elemek *egymáshoz viszonyított mennyiségét (arányát)*, tekintet nélkül arra, hogy ezek az elemek hogyan kapcsolódnak egymáshoz; valamint
3. a vegyület *anyagszerkezetét*, vagyis az elemek, ionok között ható kémiai *kötőerőket (kötéstípus)*, az általuk kialakított *rövid távú rendet (koordináció)*, és a különböző koordinációk összességéként kialakuló *hosszú távú rendet (rács, rács típus)*.

### ***Az ásványok neve, magyar írásmódja és kiejtése***

Az *ásványfajoknak* (egy-egy adott – idealizált – kémiai összetételű és kristályszerkezetű természetes vegyület) az egyszerűbb kezelhetőség érdekében nevet adunk („triviális név”). Az ásványok *neve* nemzetközileg egységes (a kevés kivételek egyike a jég!), a név *írásalakja* azonban minden nyelvben eltér, alkalmazkodik az adott nyelv helyesírási és kiejtési szabályaihoz.

A magyarban törekszünk a *kiejtés szerinti* (fonetikus) írásmódra, így az ásványnevek jó része egyszerűen, az olvasott alakban kiejthető. Például *kvarc, calcit, gránát*. A kivételt azok az ásványok jelentik, amelyek nevét latin betűs nyelvből átvett *tulajdonnévből* (pl. személynév, földrajzi név) származtatjuk. Ezeknél megőrizzük az eredeti írásalakot, például *goethit* – ejtsd: „götít” (németből), *jarosit* – ejtsd: „harozit” (spanyolból), vagy *grunerit* – ejtsd: „grünerit” (franciából).

Korábban az ásványfajok egy-egy másodlagos tulajdonság (pl. szín, alak) alapján elkülönített *változatának* is adtak nevet. Ma a változatnevek használata nem támogatott, kikopóban van a szaknyelvből. Egyes változatnevek továbbélhetnek ipari termékekben, például az azbeszteknél ilyen a *krokidolit* és az *amozit* név (lásd részletesen később).

### ***Az ásvány definíciójának korlátai***

Az ásvány fenti, három szóból álló definíciója jó, mert *egyszerű*, és az érintett anyagcsoport *döntő részére igaz*. A természet és az anyag azonban sosem hagyja magát egyszerű dobozokba csomagolni: tisztában kell lennünk mindhárom kritérium esetében a *korlátokkal* is.

### ***A „természetesség” korlátai***

A *természetes folyamatok* kapcsán két korlátot emelünk ki.

Az első, hogy a legtöbb ásványt mára laboratóriumi eszközökkel is elő tudjuk állítani. Például a digitális órák lelkét adó *kvarc* kristályokat kezdetben a természetből gyűjtött, nagyon tiszta kvarcból vágták ki, mára azonban döntően laboratóriumban növesztett kristályok kerülnek az órákba. A két anyag mind kémiai összetételét (szilícium-dioxid,  $SiO_2$ ), mind kristályszerkezetét (háromszöges szimmetriájú kristályrács) tekintve azonos. Ha pontosak akarunk lenni, akkor a laboratóriumban „utánzott” anyagot megkülönböztethetjük a *szintetikus* jelzővel (kvarc – szintetikus kvarc), de tudnunk kell, hogy környezeti szempontból a „*két*” anyag egy, viselkedésük is teljesen azonos lesz. Hasonló a helyzet az informatikában, a műszeriparban, az ékszeriparban alkalmazott

gyémánt – szintetikus gyémánt (C, köbös), rubin – szintetikus rubin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , háromszöges) esetében is.

A természetesség egy másik korlátja, ha az ember közvetve, *a természetes folyamatok módosításával* vesz részt az ásvány kialakulásában. Ilyenkor az ásványok már *környezeti folyamatokban* keletkeznek. Példa erre a „*meddőhányó ásványok*” kialakulása. Tudjuk, hogy a bányászat során a haszonanyag kitermelése érdekében jelentős tömegű nem hasznosítható (*meddő*) anyagot is meg kell mozgatni. Ezt utóbb a bányákhoz közeli *meddőhányókon* helyezik el. A *szén* és a *szulfidos érc*ek bányászatánál gyakori, hogy a meddőhányókra kerülő eredeti szilárd vegyületek (ásványok) a felszíni levegővel és vízzel érintkezve instabillá válnak, elbomlanak, és ott helyben új, a felszínen már stabil szilárd vegyületek formálódnak. E *meddőhányó ásványok* környezeti jelentősége nagy, viselkedésük az ásványtan eszközeivel írható le.

### A „*kristályosság*” korlátai

A kristályosságnak is több korlátja van.

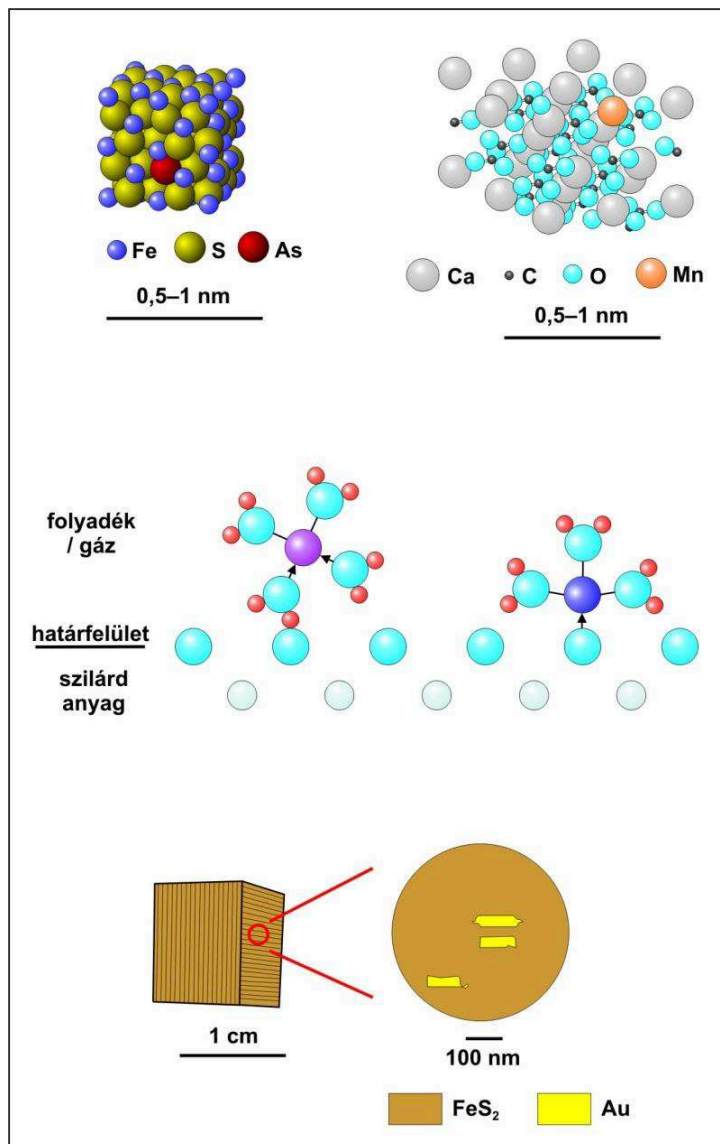
A környezeti gyakorlatban vannak olyan szilárdként viselkedő nem molekuláris anyagok, amelyekben *nincs meg a hosszú távú rend*. Ilyen, kémiaiilag egynemű, *vegyületnek* tekinthető, csak rövid távú renddel jellemezhető anyag például az *opál-A* ( $\text{SiO}_2 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ ). Szintén hosszú távú rend nélküliek, de kémiaiilag is összetettebbek a különböző természetes (és mesterséges) *üvegek* (lásd 3.2.3. fejezet).

A kristályosság, a hosszú távú rend környezeti alkalmazásokban egyik legizgalmasabb korlátozása az, amikor az ásvány *szemcséjének mérete* olyan kicsi, hogy maga a szemcse mérete jelenti a határt. Ha egy – például légköri *aeroszol*ként lebegő – 10–100 nm-es szemcse teljes *belső térfogatában* rendezett kristályrács is van, az anyag fizikai és kémiai tulajdonságai – éppen parányi mérete miatt – eltérhetnek, esetenként jelentősen el is térnek egy azonos anyagú és rácsú, de az ember számára megszokott méretű (10-100  $\mu\text{m}$ –1-10 mm) ásványétól. Ennek oka, hogy a kicsiny méret miatt az ismétlődések száma már nem tekinthető „végtelennek”, a *szemcse felületének szerkezete* a csökkenő szemcsemérettel egyre jelentősebb szerepet játszik a *térfogati szerkezettel* szemben. E jelenségre még visszatérünk a [3.3.2. fejezetben](#).

### A „*vegyületség*” korlátai

A természetes és környezeti folyamatok legfőbb eltérése a vegyész számára megszokott laboratóriumi körülményektől éppen a folyamatban résztvevő kémiai elemek sokfélesége. A természetben sosem találunk „steril”, „pro anal.” alkotókból felépülő rendszereket.

Egy konkrét szilárd vegyület (ásvány) vizsgálatakor a képletében ismert elemektől eltérő kémiai elemek megjelenése általában a következő három ok közül egyre vagy többre vezethető vissza (3.2.2. ábra).



3.2.2. ábra: A „vegyületség” korlátai ásványoknál.

Az ábra felső részén a kristályrácsban atomi szinten történő helyettesítésre látunk példát: a már megismert pirit és kalcit kristályok egy részlete látszik. A piritben a kén helyére arzén (As) épült be, a kalcitban a kalcium helyére mangán (Mn). Az ábra középső részén vízmolekulákkal körülvevett ionok kötődnek meg egy kristály felületén. Az ábra alsó részén az ásványzárványokra látunk példát: az 1 cm-es piritkockába parányi, 100 nm-es aranyzemcsék (termésarany) záródtak be

Az egyik ok, hogy a kristályrácsban a hasonló tulajdonságokkal (pl. töltés, ionsugár stb.) rendelkező *elemek helyettesíthetik egymást*. Ennek következménye, hogy az ásványfajok megadott képlete mindig elvonatkoztatás eredménye. Például az a fent olvasott megállapítás, hogy a *kalcit* kalcium-karbonát (CaCO<sub>3</sub>), a környezettel foglalkozó szakember számára azt jelenti, hogy ez a vegyület magában rejthet – és leggyakrabban rejt is! – még több, a kalciumhoz hasonlóan viselkedő kémiai elemet is (pl. magnézium, stroncium, mangán, vas, kobalt) a környezettudomány számára jelentős, század–tized százalék, vagy akár több százalék mennyiségben.

Ha az elemek, ionok közötti hasonlóság elegendően nagy, a helyettesítés a kristályrácsban két elem („két szélső tag”) között korlátlan, folytonos is lehet. Ilyenkor *elegykristályról*, vagy *szilárd oldatról* (angolul: *solid solution*) beszélünk.<sup>2</sup>

Másik ok, hogy a parányi,  $\mu\text{m}$  alatti méretű környezeti anyagoknál fokozottan számolnunk kell emellett a szemcsék *nagy fajlagos felülete* miatt ionok, vagy akár molekulák jelentősebb mértékű *felületi megkötődésével* is.

Az ennél nagyobb szemcséknél pedig már lehetőség van más szilárd vegyületek kicsiny szemcséinek növekedés közbeni befogadására is (ásványzárványok). E szilárd zárványok jelentik a kémiai változatosság harmadik fő okát.

Az ásványokban mért, képletükben nem szereplő, kis koncentrációjú elemeket az ásványtanban vagy a környezettudományban járatlan szakemberek gyakran illetik a „szennyező” kifejezéssel. Ez a szóhasználat a természetes és környezeti szilárd fázisoknál (ásványok) *helytelen*, hiszen az ásványok a képletükben is megjelenő *főelemek* mellett, mindig tartalmaznak *mellékelemnyi* (kb. 0,1–1%), vagy *nyomelemnyi* (kb. 0,0001–0,1%) mennyiségben más elemeket is. A mellék- és nyomelemek a keletkezésük körülményeire visszavezethető, *fontos alkotói* az ásványoknak. A fenti példánál maradva, a környezetmérnök vagy környezetkutató számára a kalcit *nem* „kobalttal szennyezett”, hanem „kobalt-tartalmú”. (A „szennyező” kifejezésnek legfeljebb *tiszta vegyszerekkel* dolgozó laboratóriumi vegyész szemszögéből lehetne értelme.)

A *környezeti hatás* szempontjából meghatározó fontosságú, hogy a 3.3. ábrán bemutatott lehetőségek közül melyik valósul meg. Ezért a környezeti rendszerekben, ahol szilárd fázis (is) mindig jelen van, a hagyományos (környezet)kémiai vagy (környezet)geokémiai vizsgálatokat feltétlenül ki kell egészíteni ásványtani vizsgálatokkal is.

### 3.2.2. A műtermékek

Vannak olyan szilárd, kristályos, nem molekuláris vegyületek is, amelyek nem keletkeznek a természetben, csak a laboratóriumokban, műhelyekben, ipari üzemekben állítjuk elő őket. Ezeket a környezeti ásványtanban *műtermék*nek nevezzük. Műtermék például a cementgyártáskor keletkező *trikalciumszilikát* („alit” –  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ , háromhajlású), amellyel minden betonozásnál dolgozunk, vagy a modern kor informatikai technikája által alkalmazott itrium-alumínium gránát (YAG – ejtsd: „jag”). De műtermék a kéményekből a légkörbe juttatott és ott aeroszolként lebegő parányi (0,1–10  $\mu\text{m}$ -es) szilárd vegyületek jelentős része is.

Bár a műtermékeket (csak) mesterségesen állítjuk elő, rájuk, az egyértelműség érdekében, nem használjuk a *szintetikus* jelzőt, azt meghagyjuk a természetes anyagokkal kémiai és szerkezetileg egyező laboratóriumi termékekre (pl. szintetikus kvarc). Nem is volna értelme „szintetikus YAG”-ról beszélni, hiszen nincs „természetes YAG”.

Mára a műtermékek száma jóval meghaladja a százazretet, ami a négyezer ásványfajhoz képest igen jelentős szám. A dolgok természetéből adódóan azonban a tágabb környezetünket *meghatározó* szilárd vegyületek többsége még ma is ásvány és nem műtermék.

<sup>2</sup> Az elegykristályokat alkotó ásványfázisok esetében csak a szélső kémiai tagok kapnak nevet. A helyettesített fázist mindig annak a szélső tagnak a nevével jelöljük, amely kémiai a meghatározó („50%-os szabály”).

A műtermékek a környezetbe kerülve az ásványokhoz hasonló módon kapcsolódnak be a környezeti folyamatokba (oldódás-mállás, aprózódás, kondenzációs mag stb.). Legtöbbjük viselkedése – a hasonló kristálykémiái tulajdonságok miatt – hasonló az ásványokéhoz, így a környezettel foglalkozó természettudományos vagy műszaki szakember számára az ásványok és a műtermékek együtt kezelhetők a környezeti ásványtan keretein belül.

A műtermékek egy kis részének van „triviális” (az ásványnévhez hasonló, egyszerű) neve, legtöbbjüket azonban csak kémiai összetételük és kristályszerkezetük megadásával tudjuk leírni. Egyes szakmák speciális névkészleteket is használnak (pl. cementipar: alit, belit; kohászat: ferrit).

*Megjegyzés:* környezetünkben számos *műanyag* van jelen. Ezek a szerves *molekulákból* álló anyagok első pillantásra mutathatnak a műtermékekkel hasonló tulajdonságokat (állandó alak, felület, keménység stb.). Ennek ellenére a *műanyagokat*, valamint a műanyagok és ásványok/műtermékek keverékeiből alkotott *kompozit anyagokat* itt nem tárgyaljuk, mivel ezek ismeretéhez az ásványokétól eltérő kémiai, szerves kémiai alapok is kellene, az ásványtan eszköztára ezek leírásához már nem elegendő.

### 3.2.3. Az üvegek

Az üvegek olyan nem molekuláris, kondenzált anyagok, amelyekben nincs meg a hosszú távú rend (nem kristályosak), de a felépítő atomokat jellemzően elsőrendű kémiai kötések kötik össze (rövid távú rend) folytonosan, ezért köznapiban értelemben tulajdonságaik a szilárd anyagokéval azonosak (állandó alak, felület, keménység stb.). A kristályrács hiánya miatt kémiai összetételük széles tartományban változhat, így nem tekinthetők szűk értelemben véve vegyületeknek. Ugyanakkor egy konkrét üvegen belül általában a kémiai összetétel nem változik jelentősen, így van értelme az üvegeket kémiai elemzés alá vetni, és kémiai összetételüket megadni. Az, hogy az üvegen belül az elsőrendű kémiai kötések folytonosak, egyben azt is jelenti, hogy alapesetben az üvegben nincsenek külön fázisok, nincsenek benne belső (fázis)határok, így az üveg keveréknek sem tekinthető.

Vannak természetes üvegek, mint például a vízbe ömlő lávából üvegesen megdermedő *obszidián*, vagy a villámcsapás megolvasztotta homokból megszilárduló *fulgurit*. A mesterséges üvegek gyártása az emberiség korai történelmétől fontos, az üvegiparnak ma is, és a jövőben is fontos szerep jut a fejlett gazdaságokban.

Az üvegek gazdasági jelentősége és környezeti hatása vegyületcsoportonként eltérő. A környezetben található üvegek legtöbbje [szilikátüveg](#), így környezeti hatásuk a [szilikátásvány](#)okéhoz lesz hasonló. A mesterséges üvegek egy részébe technológiai okokból vagy speciális célok (pl. dekoratív színek) érdekében olyan fémeket is beépítenek a gyártás során, amelyek később, a környezetbe kioldódva a hagyományos szilikátoknál nem várt környezeti kockázatot jelenthetnek.

### 3.2.4. Ásványok és műtermékek keverékei

Az ásványok és műtermékek *szilárd keverékei*ben több, nem molekuláris vegyület van jelen *fizikailag* egymás mellett. E vegyületeket egyszerű fizikai kapcsolatok, vagy bonyolult anyagszerkezetű, néhány atomnyi vastagságú (0,5–1 nm) határrétegek kötik össze. Általános esetben két ilyen szilárd vegyület között tehát nincs közvetlen kémiai kapcsolat, nincs közvetlen kémiai kötés.



A környezetünkben található leggyakoribb természetes ásványkeverékek a *kőzetek* és az *érc*ek. A részben vagy egészen mesterséges ásvány- és műtermékkeverékek száma nagy, ilyen például a *beton*, a különböző *durvakerámiák* (pl. téglá, cserép), *finomkerámiák* (ipari kerámiák, háztartási kerámiák – mosdókagylók, tányérok stb.) vagy éppen egyes ércdúsítási, ércfeldolgozási melléktermékek.

Az eddig ismertetett természetes és mesterséges szilárd, nem molekuláris anyagfajtákra az 3.1. táblázat hoz összefoglaló példákat.

<b>MEGJELENÉSI HELY</b>	<b>TERMÉSZETES</b>	<b>MESTERSÉGES</b>
<b>Földön/földben</b>	<b>kőzetek</b> , pl. gránit, mészkő, bazalt, márvány; <b>érc</b> ek, pl. bauxit, aranyérc, vasérc; a <b>talaj</b> szervesetlen alkotói	beton, salakok, téglá, timföld, csempék, padlóburkoló kőlapok
<b>Vizekben</b>	az <b>iszap</b> és a <b>lebegő hordalék</b> jelentős része	szennyvíziszapok jelentős része, ipari tevékenység (pl. ércdúsítás) melléktermékei
<b>Légkörben</b>	tengeri <b>sókristályok</b> a magas légkörben, <b>vulkáni finom por</b> , <b>lebegő és szálló</b> természetes <b>porok</b> (földfelszínről, talajról)	kémények „füstje”, pernye, lebegő és szálló ipari porok
<b>Élőlényekben/emberben</b>	<b>szilárd vázelemek</b> : CaCO <sub>3</sub> – kalcit/aragonit (csigaház, kagyló) Ca <sub>5</sub> [(PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH,F,Cl)] apatit/foszfátok (csontok, fogzománc, guanó) SiO <sub>2</sub> – opál-A (egysejtűek váza) <b>„kövek”</b> : pl. Ca-oxalát (vesekő, növények kalciumraktározása)	csonthelyettesítő implantátumok (kerámia, fémötvetetek), kerámia fogpótlás

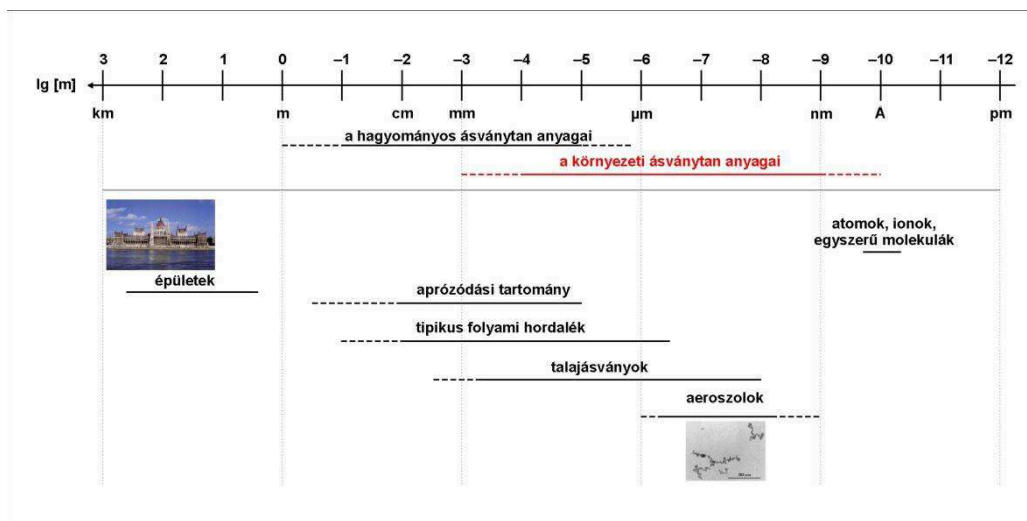
3.1.táblázat: Természetes és mesterséges szilárd, nem molekuláris anyagfajták a környezetben

### 3.3. A mérettartományok jelentősége a környezeti szakember munkájában

Láttuk, hogy a szilárd anyagoknak *mérete, alakja, határa, felülete* van.

Felmerül a kérdés, hogy melyik az a mérettartomány, amelyben a környezeti problémák megoldása során képesnek kell lennünk gondolkozni és dolgozni.

Az alsó határ elég pontosan megadott: a környezeti problémák megoldásához legtöbbször nem kell a kémia építőkövei, az atomok, ionok *tized nanométeres* mérete alá benéznünk. A felső határt pedig a köznap életünkben megszokott *méteres – kilométeres* – esetleg *ezer kilométeres* méretek jelentik (3.3.1. ábra). A lefedendő mérettartomány tehát mintegy *tizenhárom–tizenhat nagyságrend!*



3.3.1. ábra: A környezeti problémák megoldásakor figyelembe veendő mérettartomány, logaritmus méterskálán. A felső határ a kilométeres nagyságrend (pl. hegyek), olykor akár 1000 km-ig (pl. légszennyezés terjedése egy földrajzi értelemben vett medencében). Az alsó határ az atomok mérete (nagyságrendileg  $10^{-10}$  m, azaz 1 [angström](#))

A mindennapi ember tapasztalatai, gondolkodása nagyjából e tág mérettartomány felső felét, a tized milliméter–pár száz kilométer tartományt fedik le. Az ennél kisebb tartományban való gondolkodást már *csak külön tanulással lehet elsajátítani*.

Ahogy arról a bevezetőben már szóltunk, és a későbbiekben példákkal is megmutatjuk, a környezeti folyamatokban szerepet játszó szilárd anyagok kivétel nélkül ebbe az alsó mérettartományba esnek (3.3.1. ábra), ezért a környezeti szakember nem takaríthatja meg az alsó hat nagyságrendben (tized nanométer–tized milliméter) való gondolkodás megtanulását. Ez még akkor is igaz, ha ezen bevezető jegyzetben csak néhány példával tudjuk bemutatni e készség elsajátításának fontosságát.

### 3.3.1. A felület jelentősége és méretfüggése

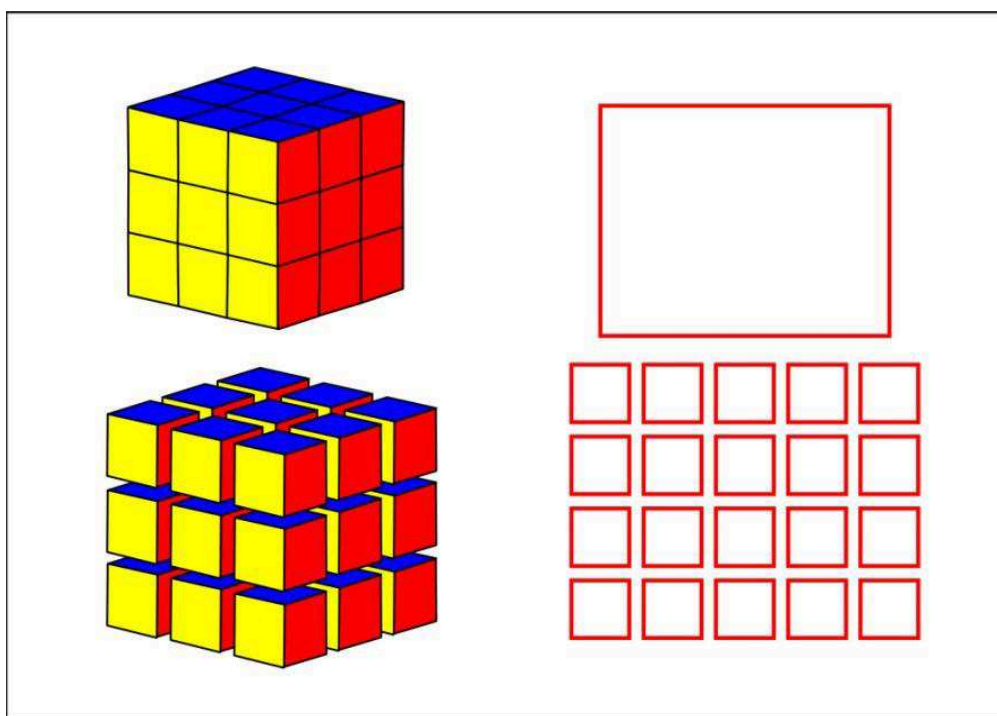
A környezeti folyamatok során az ásványok (szilárd anyag) viselkedését elsősorban a *kémiai és biokémiai kölcsönhatások, egyensúlyok* szabják meg. A hőmérséklet és különösen a nyomás szerepe másodrendű. A *(bio)kémiai kölcsönhatások* az ásványszemcsék *felületén* játszódnak le, legyen szó akár a szemcse visszaoldódásáról vagy növekedéséről, akár molekulák, ionok felületi megkötéséről (*adszorpció*). Ebből következik, hogy ezeknek a reakcióknak a gyorsasága, környezetre gyakorolt hatása arányos lesz az ásványok *szabad felületével*.

Vizsgáljuk meg a szabad felület méretének változását a szemcseméret változása során, ha az anyag mennyisége nem változik. Példánkban a *kvarcot* ( $\text{SiO}_2$ , háromszöges) használjuk, mert ez a (fizikailag és kémiailag is) ellenálló ásványok közül a leggyakoribb a környezetünkben. (Ez az oka annak, hogy általában a *homok* is főként apró kvarc szemcsékből áll.)

Példánkban a szemcse alakját, a számolás egyszerűsége kedvéért, mindig tekintsük *kockának* (3.3.2. ábra). Egy, a homokban jellemző méretű, 1 mm élhosszúságú szemcse felülete  $6 \text{ mm}^2$  ( $=6 \times 1 \text{ mm}^2$ ). Ha ez a szemcse tizedakkora ( $=100 \mu\text{m}$ ) élhosszúságú szemcsékre esik szét az aprózódás során, akkor már *ezer darab* ( $10^3$  db) kocka lesz belőle, egyenként *századakkora* ( $10^{-2}$ ),  $0,06 \text{ mm}^2$  felülettel ( $=6 \times 0,01 \text{ mm}^2$ ). Így mintánkban a

teljes szabad kvarcfelület – a tömeg változatlansága mellett – tízszeresére ( $10^3 \times 10^{-2}$ ),  $60 \text{ mm}^2$ -re nő.

Mire ugyanez a szemcse tovább aprózódva eléri a folyóvizekben, levegőben szállított kvarcsemcsékre jellemző alsó mérethatárt, az *1 mikrométert*, vagyis kiindulási méretének ezredrészére csökken, akkor már *egy milliárd darab* ( $10^9$  db) parányi kockánk lesz, egyenként milliomodnyi ( $10^{-6}$ ) felülettel, tehát a mintában *a kvarc teljes szabad felülete*, ezáltal adszorpcióképessége stb., *ezerszeresére* ( $10^9 \times 10^{-6}$ ) nőtt anélkül, hogy változtattuk volna benne a kvarc mennyiségét. Hasonlóan továbbgondolva láthatjuk, hogy azonos ösztérfogat mellett, a légkörben aeroszolként lebegő, tipikus 10 nm-es ásványsemcsék *felülete*, ezzel *reakcióképessége is százezerszerese* egy 1 mm-es szemcsének.



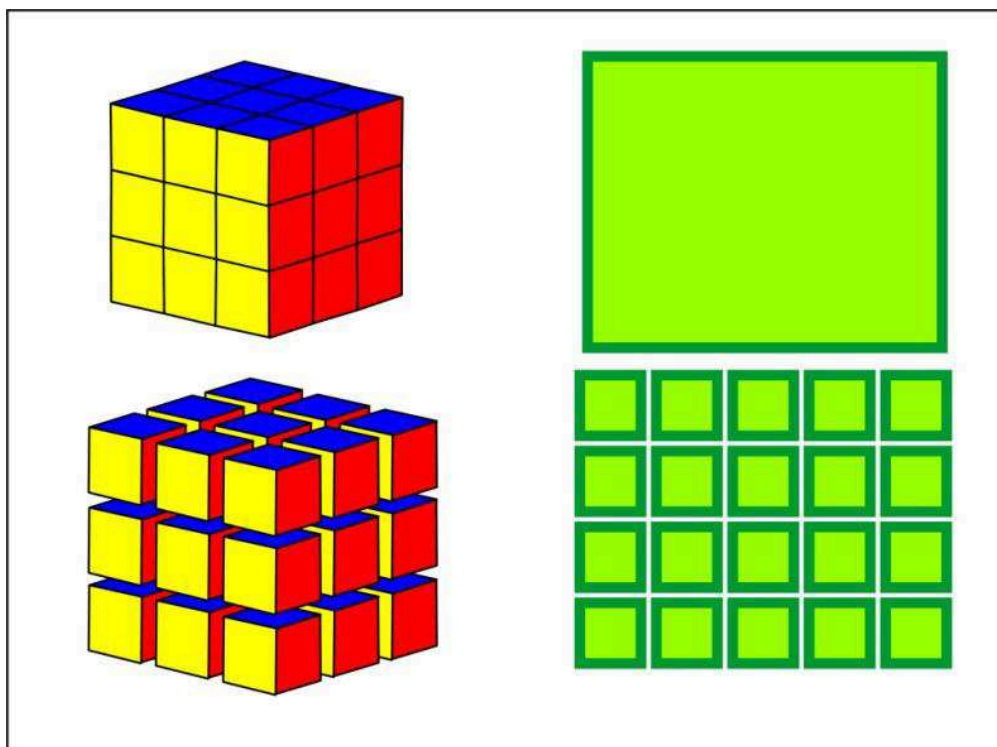
3.3.2. ábra: Kockával modellezett szemcse aprózódása. Az aprózódási modellben a nagy kocka sok kicsire aprózódik szét, hasonlóan ahhoz, ahogy a Rubik kocka sok kis kockából épül fel. Az össztömeg (és ösztérfogat) változatlansága mellett a szabad felület nő

### 3.3.2. A felületi szerkezet jelensége és jelentősége a méretváltozással

A hagyományos ásványtanban, amely a mikrométernél, milliméternél nagyobb ásványsemcsékkel foglalkozik (3.3.1. ábra), az atomok rendjét leíró kristályrácsot, egyszerűsítve, *végtelesen* tekintjük. Nem foglalkozunk azzal, hogy pontosan *hogyan végződik egy kristály*, mi történik a felszínéhez közeli atomokkal, ionokkal. Tesszük ezt annak ellenére, hogy nyilvánvaló: magán a határon az atomok, ionok közvetlen környezete más, így a kémiai kötések, és emiatt a kialakuló rövid távú rend is más lesz, mint a kristály belsejében. Egy valódi (véges méretű) kristályban tehát meg kell különböztetnünk a belső, *térfogati (kristály) szerkezetet* a külső, vékony „kéreg” szerkezetétől. Utóbbit a következőkben *felületi szerkezetnek* nevezzük.

Az, hogy a hagyományos ásványtan mérettartományában egyszerűsíthetünk, és a *felületi szerkezet elhanyagolása* mellett mégis használható eredményeket kaphatunk, abból adódik, hogy a felületi szerkezet csak a felület közvetlen közelében lévő, *néhány atomnyi*

vastagságú „kéregre” terjed ki. Az ebben a „kéregben” található atomok mennyisége egy nagy kristálynál elhanyagolható a belső (térfogati) szerkezetbe rendeződő atomok számához képest (3.3.3. ábra).

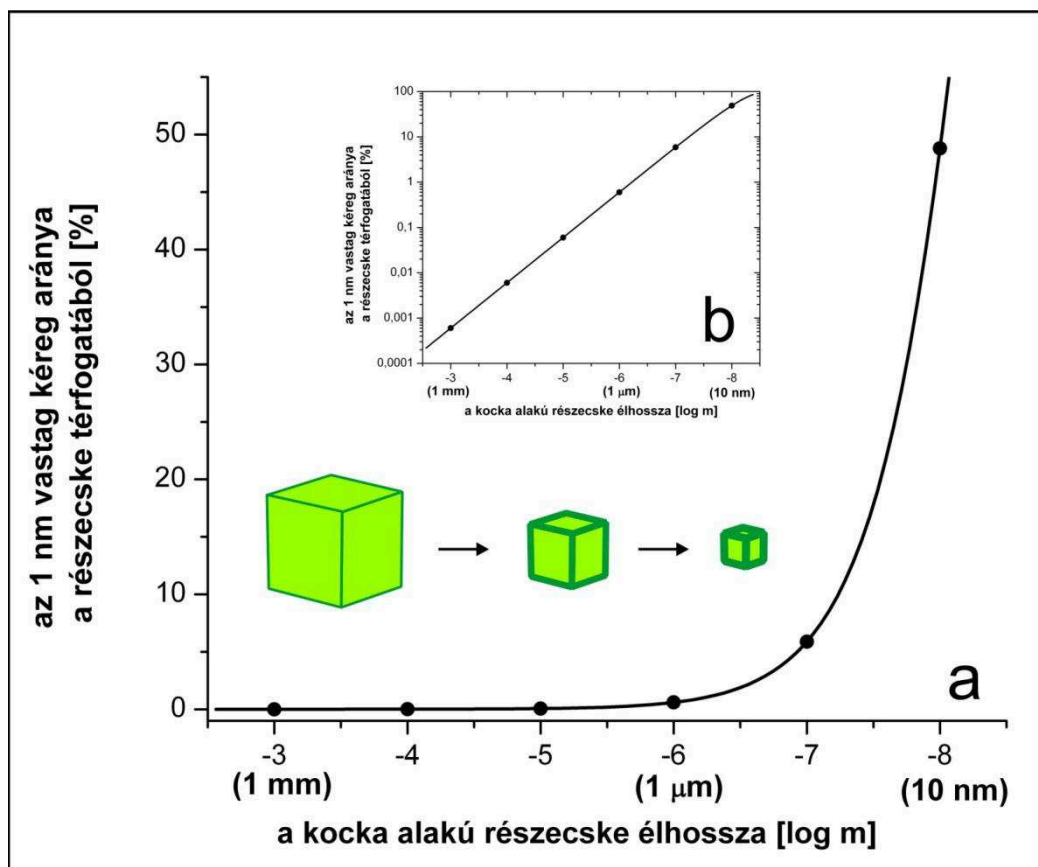


3.3.3. ábra: A szilárd anyagok határán nm-es vastagságú felületi szerkezet alakul ki. A szemcseméret csökkenésével a felületi (sötétzöld) és a térfogati (világoszöld) szerkezet egymáshoz viszonyított mennyisége a felületi szerkezet javára tolódik el. Ez fontos szerepet játszik abban, hogy a környezeti folyamatokban szereplő parányi ásványszemcsék másként viselkednek, mint mm-es, cm-es társaik

A szemcseméret csökkenésével a helyzet jelentősen megváltozik. Nézzük hogyan!

Ha a felületi szerkezet vastagságára, felső becslésként, 1 nm-t adunk, és megvizsgáljuk, hogy a fenti példánknál, az 1 mm-es kockakristály esetében mit tapasztalunk, látszik (3.3.5. ábra), hogy az atomok 99,9994%-a a térfogati szerkezetbe rendeződik, és még egy 1  $\mu\text{m}$ -es kristálynál is 99,4% a térfogati szerkezet részesedése. Az is látszik azonban, hogy a szemcseméret további csökkenésével már rohamosan nő a felületi szerkezetbe rendeződő atomok aránya: egy 50 nm-es szemcsénél 11%, egy 10 nm-es szemcsénél már 50%. *Vagyis a környezeti rendszerekben, környezeti folyamatokban kiemelten fontos nanométeres mérettartományban a felületi szerkezet egyre meghatározóbbá válik.*

A következmény, hogy lényegesen módosulhat, és módosul is, egyes szilárd vegyületek viselkedése. Ezekre az ásványszemcsékre már nem lehet automatikusan kiterjeszteni a velük egyező kémiai összetételű makroszkopikus ásványoknál mért adatokat, mint például a földi üvegházhatást befolyásoló elektromágneses sugárzások (ultraibolya, látható, infravörös) elnyelését, átbocsátását, a kémiai kölcsönhatásokat befolyásoló oldhatóságot, vagy a molekulák megkötését és a **kondenzációt** meghatározó felületi töltést, és annak eloszlását.



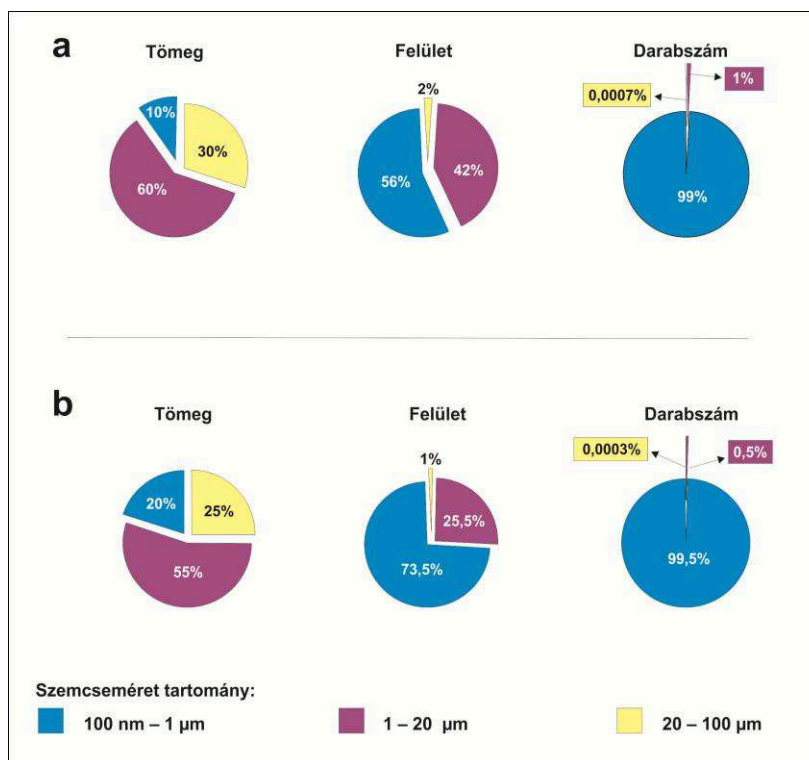
3.3.5. ábra: Egy 1 mm élhosszúságú kockával modellezett szemcse aprózódása során a csökkenő mérettel a felületi szerkezetű kéreg térfogatarányának növekedése. A felületi szerkezet részesevé a mikrométeres szemcseméret alatt kezd meghatározóvá válni  
(a: lineáris %-skála; b: logaritmikus %-skála)

A méret, a tömeg és a részecskeszám kapcsolata

A környezet állapotának jellemzésére gyakran használjuk a levegőben, vizekben lebegő szilárd részecskék (ásvány szemcsék) számát (pl. darab/cm<sup>3</sup>), vagy a lebegő tömeget (g/cm<sup>3</sup>, mg/mm<sup>3</sup>, pg/μm<sup>3</sup>). Érdekes egy pillantást vetnünk arra, hogy ezek a mutatószámok hogyan kapcsolódnak össze a részecskék méretén keresztül. Ha ismerjük a rendszerben megjelenő ásványfajokat is, akkor – a méret mellett – ezek jellemző alakja segítségével a felület változására is jó becslést tudunk készíteni.

Tegyük fel, hogy egy folyó által lebegtetve szállított hordalékszemcséket méret szerint osztályozva a teljes tömegből 30% esik a 100–20 μm-es mérettartományba, 60% az 20–1 μm és 10% az 1 μm–100 nm tartományba. A durva frakció főként aprózódó **törmelékes ásványokból** (kvarc, földpát, klorit, csillám) áll, a közepesben ezek mellett már megjelennek, a finomban pedig kizárólagossá válnak a környezeti folyamatokban keletkező **agyagásványok** (illit, kaolinit, szmektit).

Ha ugyanezeket a méretfrakciókat nem a hozzájuk tartozó szemcsék össztömegével, hanem a darabszámmal jellemezzük, egészen más képet kapunk: az össztömegre alárendelt, legfinomabb frakció teszi ki a lebegtetett teljes szemcseszám zömét (99%!), míg a két nagyobb (az össztömeg 90%-át kitevő!) mérettartomány szemcséinek darabszáma szerint elhanyagolható (3.3.6.a. ábra).



3.3.6. ábra: Folyó lebegtetett hordalékának modellezése 10 tömegszázaléknyi (a) és 20 tömegszázaléknyi (b), környezeti szempontból különösen fontos, finom frakcióval (100 nm–1 μm). A hordalék teljes felületének már 10% finom frakció esetén is több mint felét adja a finom frakció, a hordalék darabszámát mindkét esetben a finom frakció határozza meg

A szemcsék felülete esetében is a kis mérettartomány lesz a domináns (3.3.6.a. ábra), és az is jól látszik, hogy a legkisebb frakció mennyiségének már szerény növekedése is jelentősen megnöveli az összfelületen belül a finom frakció jelentőségét (3.3.6.b. ábra).

*Megjegyzés:* mivel a durvább frakciók abszolút mennyisége nem változott nagyon, így tényleges felületük sem csökkenhetett lényegesen. Ebből könnyű észrevenni, hogy a finom frakció viszonylagos (relatív) felületi jelentőségének növekedése csak a – változatlan össztömegű, de más szemcseméretű lebegő anyaghoz tartozó – tényleges (abszolút) felület növekedése révén valósulhatott meg. Így is van, a 25/55/20%-os frakciónkénti tömegmegoszlású anyag egységnyi tömegére jutó (abszolút) felület mintegy másfélszerese a 30/60/10%-osénak.

Hasonló jelenséget tapasztalhatunk a légköri aeroszoloknál is, csak néhány nagyságrenddel lejjebb (1 nm–500 nm). Ennek jelentőségét akkor érthetjük meg, ha figyelembe vesszük, hogy pl. a felhőképződésnél a kondenzációt a kondenzációs magok száma és nem a tömege befolyásolja elsődlegesen, vagyis ha elegendően kicsik a részecskék, akkor már egészen elhanyagolható tömegű lebegtetett anyag is komoly kondenzációs hatást fejthet ki.

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy egy olyan rendszerben, ahol több nagyságrendnyi eltérés van a szabad szemcsék méretében – és a környezetünk ilyen! –, a legkisebb mérettartomány szemcséi a *számuk* és *felületük* alapján, a legnagyobb mérettartomány szemcséi a *tömegük* alapján vesznek részt a folyamatokban.

### 3.4. Azbesztek – egy környezeti szempontból kiemelt ipari ásványcsoport

Az azbeszt gyűjtőfogalom, egyes szilikátásványok szálas megjelenésű változatainak összefoglaló neve. Az iparban alkalmazott azbesztek két ásványcsoportból kerülnek ki, a *szerpentin*, illetve az *amfibol* csoportból.

A szerpentin csoport négy ásványfaja közül (antigorit, krizotil, lizardit, poligonális szerpentin) a *krizotil* mindig szálas, mivel *feltekert szerkezetében* kódolva van a szálas megjelenés, de az *antigorit* és a *poligonális szerpentin* is lehet szálas.

Az amfibolok *szalagszerkezete* is hordozza a szálas megjelenés lehetőségét, ám ezek a gyakori kőzetalkotó ásványok legtöbbször jól fejlett, oszlopos-táblás (nem azbeszt) megjelenésűek (3.4.1. ábra), csak *különleges geológiai körülmények* között kristályosodnak szálas *amfibolazbesztként*.

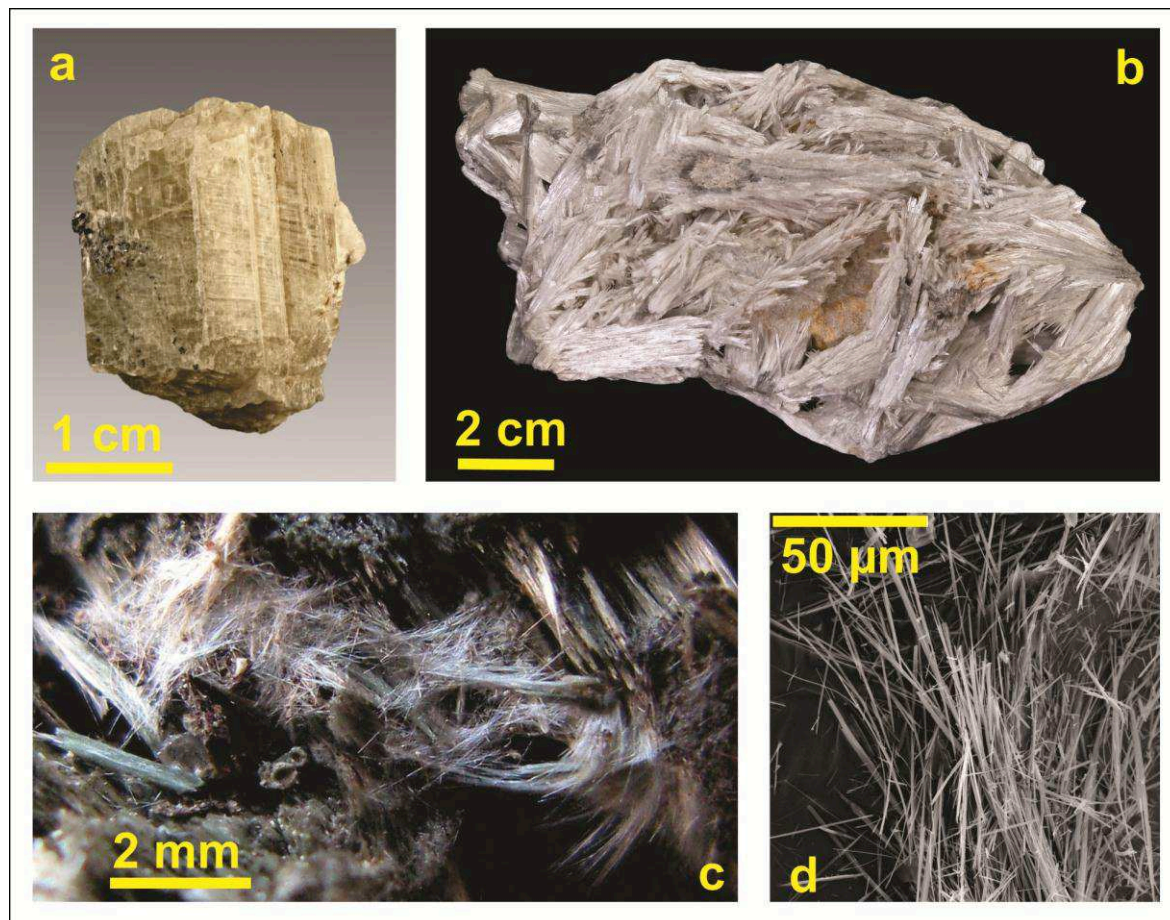
Az azbesztszálak igazi *nanoanyagok*, a szabad szemmel látható „szálak” valójában egyedi („elemi”) szálacskákból álló *szálkötegek*, ezért az elemi szálakig foszlathatók. Az amfibolazbeszt elemi szálak átmérője többnyire 0,5  $\mu\text{m}$  (=500 nm) alatti, hosszúsága a néhány  $\mu\text{m}$ -tól több 100  $\mu\text{m}$ -ig terjedhet. A krizotil (szerpentincsoport) esetében az elemi szálak átmérője legfeljebb néhány 10 nm.

A vékony szálas („egydimenziós”) megjelenés a jól fejlett kristályokkal összehasonlítva hatalmas *fajlagos felület*<sup>1</sup> biztosít az azbeszteknek. Ugyanakkora tömegű amfibol *azbesztként* akár tízezerszer is nagyobb felületű lehet,<sup>2</sup> mint egy egységes, folytonos, *jól fejlett kristály* (3.4.1. ábra).

Az azbeszteknek, különösen az amfibolazbeszteknek azonban még két különleges tulajdonsága van. *Fizikai* viselkedése lényegesen eltér a hagyományos ásványokétól: rugalmas, szőhető, fonható; *kémiai*lag pedig – éppen ellentétesen azzal, amit a nagyobb fajlagos felület alapján várnánk – ellenállóbbá, nehezebben oldhatóvá, nehezebben felbonthatóvá válik. E két tulajdonság együttesen eredményezi *eltérő biokémiai* – és emiatt különleges egészségi – hatását. A különleges viselkedés oka, hogy a nanoszálás kristályosodás következtében felületi szerkezete lényegesen eltér az ideális kristályszerkezettől.

<sup>1</sup> A fajlagos felület egységnyi tömegű (vagy térfogatú) anyag felülete.

<sup>2</sup> Az erre vonatkozó modellszámítás megtalálható Weiszbürg & Tóth (2011) Azbeszt című fejezetében.



3.4.1. ábra: Tremolit (amfibol) különböző megjelenési formái:

a) jól fejlett kristály; b) nyúlt oszlopos kristálycsoport; c) azbeszt megjelenés; d) azbeszt megjelenés pásztázó elektronmikroszkópos felvételen. Az a és b képeken szereplő példányok nem jelentenek környezeti kockázatot, még porrá törve sem. A c és d képeken szereplő szálak változatokból könnyen kiszabadulhatnak a belélegezhető méretű amfibolszálak, így tömeges előfordulásuk környezeti kockázatot jelent

A példányok és fényképek forrása: a) Franklin, New Jersey, USA (mindat.org, fénykép száma: 246783). b) Campolungo, Ticino, Svájc (a tremolit típuslőhegye), Didier Descouens felvétele (en.wikipedia.org). c) Útbevágás, 9-es út, Wellesley, Massachusetts, USA, Peter Cristofono felvétele (mindat.org, fénykép száma: 159086). d) El Dorado, California, USA, Greg Meeker (az Amerikai Geológiai Szolgálat azbeszt fotogalériája, usgsprobe.cr.usgs.gov).

Az egészségi kockázatok miatt az elmúlt 50 évben az azbeszt már a *jogalkotásba* is bekerült. Az azbeszt **jogi definíciója** *anyag minőséget* (ásványtani kritérium, 3.2. táblázat) és *számszerűsített méretinformációt* (alaki vagy morfológiai kritérium) is magában foglal.

**A) Ásványtani kritérium:** jogi szempontból 6 ásványfaj szálak változatait tekintjük azbesztnak,<sup>3</sup> ezek a *serpentin csoportból* a **krizotil**, az *amfibol csoportból* pedig az **aktinolit**, az **antofillit**, a **grunerit**, a **riebeckit** és a **tremolit** (3.2. táblázat).

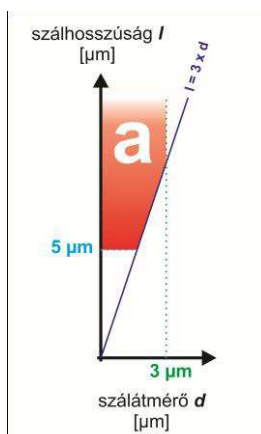
<sup>3</sup> Ennél több ásványt ismerünk szálak megjelenéssel, főleg szilikátokat, amelyek sokszor az azbesztekéhez hasonló egészségügyi kockázatot hordoznak. Ezeket azonban iparilag nem dolgozták fel, így mesterséges (épített) környezetünkben általában nem fordulnak elő, legfeljebb természetes kibúvásaik hordoznak helyi környezeti kockázatot.



CSOPORT	ÁSVÁNY	KÉMIAI ÖSSZETÉTEL	KERESKEDELMI NÉV / SZINONIMA
SZERPENTIN	krizotil- azbeszt	$Mg_3[Si_2O_5(OH)_4]$	fehér azbeszt
A M F I B O L	grunerit- <sup>4</sup> azbeszt	$(Fe^{2+},Mg)_7[Si_8O_{22}(OH)_2]$	amozit <sup>5</sup> , barna azbeszt, (ritkán: szürke azbeszt)
	antofillit- azbeszt <sup>6</sup>	$(Mg,Fe^{2+})_7[Si_8O_{22}(OH)_2]$	
	riebeckit- azbeszt	$Na_2Fe^{3+}_2(Fe^{2+},Mg)_3[Si_8O_{22}(OH)_2]$	kék azbeszt, krokidolit
	tremolit- azbeszt	$Ca_2Mg_5[Si_8O_{22}(OH)_2]$	
	aktinolit- azbeszt	$Ca_2(Mg,Fe^{2+})_5[Si_8O_{22}(OH)_2]$	

3.2. táblázat: A jog szerint **azbesztváltozat**ként is megjelenő ásványfajok (ásványtani kritérium)

**B) Alaki (morfológiai) kritérium** (az Európai Unióban, így Magyarországon is): alakját tekintve (3.4.2. ábra) azbesztnek minősítendő az a **szál**, amelynek **hossza nagyobb, mint 5 µm** (=0,005 mm), **átmérője kisebb, mint 3 µm** (=0,003 mm), valamint **hossz:átmérő aránya nagyobb, mint 3:1** ( $l:d > 3:1$ ).



3.4.2. ábra. Az azbesztszálak alaki (morfológiai) kritériumának grafikus megjelenítése. A vízszintes tengelyen a szálak átmérője ( $d$ ), a függőleges tengelyen a szálak hossza ( $l$ ) van feltüntetve, mikrométerben kifejezve. Mindhárom feltétel két részre osztja a síkot. Az  $l > 5 \mu m$  feltétel a vízszintes világoskék pontozott vonal feletti felsíkot jelöli ki. A  $d < 3 \mu m$  feltétel a függőleges zöld pontozott vonaltól balra eső felsíkot jelöli ki, míg az  $l:d > 3:1$  feltétel az  $l=3 \times d$  sötétkék átlós egyenestől balra eső felsíkot jelöli ki. A három feltétel által határolt terület (pirossal színezve) adja meg az azbesztszálak mérettartományát

<sup>4</sup> A grunerit ásványnév ma is sokszor helytelenül „grünerit” írásalokban szerepel, mind a magyar, mind az európai angol nyelvű jogszabályokban. Az ásvány névadója a svájci születésű francia mérnök, Emmanuel-Louis Gruner (1809–1893), aki a metallurgia (fémtan) és a geológia (földtan) területén alkotott maradandót.

<sup>5</sup> Az amozit (angolul amosite) szó *mozaik*szó, az ásványváltozat iparilag meghatározó méretű dél-afrikai bányászataira utal (*asbestos mines of South Africa*), az ásványokra jellemző „it” végződéssel kiegészítve.

<sup>6</sup> A vas és a magnézium egymást helyettesíthetik. Ezért ásványtanilag az antofillit-, illetve gruneritazbesztek mindig a rombos, illetve egyhajlású kristályszimmetriával jellemzett antofillit – ferro-antofillit, illetve grunerit – cummingtonit *amfibolfajok szilárd elegyei (solid solution)*.

### 3.4.1. Az azbeszt: kezdetben csodaanyag, ipari sikertörténettel, majd rákkeltő közellenség

Az azbeszteket kitűnő tulajdonságaik – hajlékonyságuk, sav- és hőállóságuk, jó hang- és hőszigetelő képességük, jó húzószilárdságuk, felületi megkötő képességük – miatt az ember igen korán felfedezte, és a 19. század második felétől kezdve már ipari mennyiségekben is felhasználta.

A széles körű ipari alkalmazás a 20. század közepéig jellemző módon (és a fejlődő országokban ma is) *magas porterhelésű munkakörülményeket* jelentett, úgy a bányászok, mind a feldolgozók, a késztermékeket előállítók esetében. Mivel a *szórtazbeszt-szigetelések* kiporzás elleni védelme gyakran megoldatlan volt, sokszor még a végfelhasználók (például egy ház lakói) is magas azbesztszál-koncentrációjú levegőt lélegeztek be.

Az extrém porterhelésben dolgozók légúti megbetegedései világítottak rá az *amfibolazbesztek* egészségkárosító hatására. Ez a tudományosan megalapozott felismerés – részben éppen a társadalom ásványtani ismereteinek hiánya miatt – az 1970-es évektől az Egyesült Államokból kiinduló, világméretű hisztériához és általános azbesztellenességhez vezetett. Mára az azbesztek *felhasználása* már általánosan tiltott a fejlett társadalmakban, Magyarországon is. Ezzel párhuzamosan a társadalmak *jelentős közpénzzel* támogatják a környezetünkbe beépített azbeszt eltávolítását. Az azbesztek, azbeszt tartalmú anyagok veszélyes hulladékként való bontása, lerakása, illetve ezen anyagok ártalmatlanítása komoly iparággá fejlődött, csakúgy, mint az azbesztek kiváltó anyagok kutatása, előállítás.

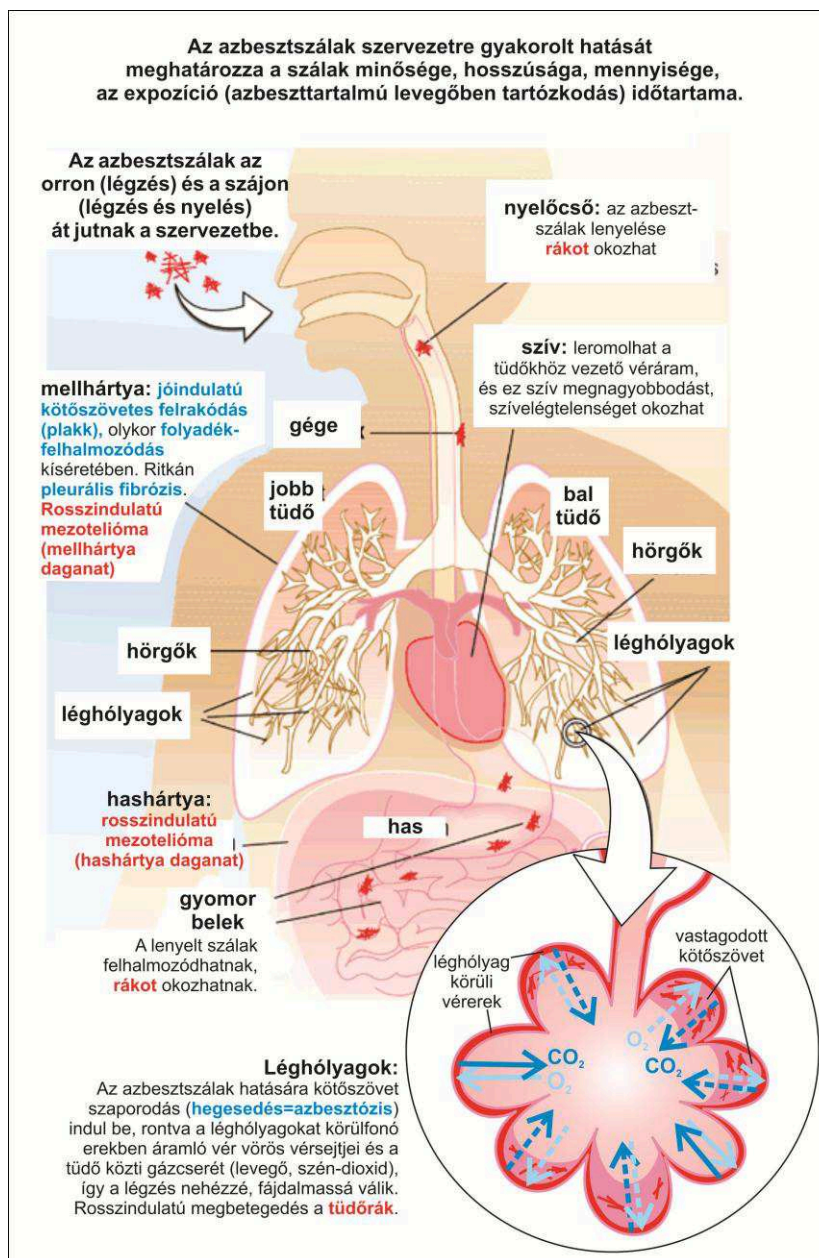
Amellett, hogy egyre nő az egészségkárosodás miatti kártérítési perek száma, és egyre több országban tiltják be alkalmazásukat, olcsóságuk és egyszerű felhasználásuk miatt az azbesztek a mai napig bányásszák. A legnagyobb termelők, 2010-es adatok alapján, csökkenő kitermelés szerint: Oroszország, Kína, Brazília, Kazahsztán, és Kanada. A bányászott azbeszt túlnyomórészt krizotil (szerpentinazbeszt), de alárendelten, lokális felhasználásra amfibolazbesztet is bányásznak még (aktinolit, antofillit, tremolit; Indiában, Pakisztánban, Törökországban). A teljes azbeszt kitermelést 2010-ben 1 970 000 tonnára becsülték. (A tiltások előtt, az 1970-es évek végén és az 1980-as évek elején a világ éves azbeszttermelése a 4 500 000 tonnát is meghaladta, és még 2005-ben is mintegy 2 400 000 tonna volt.) A fő felhasználók ma a fejlődő országok, mint Kína és India.

Az azbeszt tehát a társadalom számára érzékeny, ellentmondásokkal, érdekellentétekkel teli ásványkincs. Bárhogy alakuljon is az azbesztek sorsa a tudomány fejlődésével (teljes tiltás vagy korlátozottan engedélyezett használat), mivel a 20. században nagy mennyiségben beépítettük őket környezetünkbe, a 21. század első felében még mindenképp problémát és költséget fognak jelenteni a társadalom, és munkát fognak biztosítani a környezettudományi szakemberek számára. Ez az alfejezet, hely hiányában, csak az azbesztekre vonatkozó legfontosabb ismereteket közvetíti, a témakörrel kapcsolatos részletes információk Weiszbürg & Tóth (2011) *Környezeti ásványtan* című tankönyvének önálló fejezetében olvashatók.

### 3.4.2. Az azbesztek egészségre gyakorolt hatása

Az azbesztek elsősorban a légző szervrendszeren („belélegezve”), kisebb mértékben az emésztő szervrendszeren („lenyelve”) át juthatnak be az emberi szervezetbe (3.4.3. *ábra*). Nem tartalmaznak toxikus elemeket (pl. nehézfémeket), így nem „mérgezők” a szó

hagyományos értelmében; nem tartalmaznak radioaktív elemeket sem, így sugárveszélyt sem jelentenek.



3.4.3. ábra. Az asbesztszálak útja a légző és emésztő szervrendszerben, a szálak által generált betegségekkel. Kék szín jelöli a nem-daganatos, piros a rosszindulatú (daganatos) elváltozásokat

A belélegzett szálacskák, csak úgy, mint a levegő, és általában a porszemcsék, a garat-légcső-hörgő-hörgöcske útvonalon jutnak el a léghólyagokig, ahol a gázcsere zajlik. Lefelé a légutak egyre szűkülnek és többször elágaznak. A szemcsék tüdőbe jutásának hatékonysága a szemcsemérettel fordítottan arányos, azaz belélegzéskor a legkisebb szemcsék jutnak legmesszebbre. A kilégzés során pedig a legmélyebbre jutott szilárd szemcséknek van a legkisebb esélye távozni a légárammal.

A léghólyagok kulcsszerepet játszanak a légzésben: a léghólyagok felszínén keresztül a belélegzett oxigén a tüdőből a vérbe jut, míg a szén-dioxid a vérből a tüdőbe kerül, és a kilégzéssel távozik. Minden, a léghólyagokig lejutó szilárd szemcsé idegen test, ezért

védekező mechanizmust vált ki a szervezetből. Ez ugyanúgy igaz az azbesztszála, mint a házi por leggyakoribb alkotórészére, a kvarcra.

A szervezetnek többféle módszere van arra, hogy a belélegzett részecskéktől megszabaduljon. A védekező mechanizmusok sokfélék, függenek a porszemcsék anyagától, méretétől, oldhatóságától. A légutakban felszaporodik a váladék (nyák), beburkolja a nagyobb részecskéket, így azokat könnyebb felköhögni. Ezen kívül a légutakat borító sejteken lévő csillók fölfelé, a tüdőkből kifelé terelik őket. A tüdők léghólyagaiban különleges falósejtek, az ún. makrofágok az idegen részecskék többségét bekebelezik, és feloldják őket, de legalábbis elszigetelik a szervezettől. Ha a porszemcse nem oldódik fel a tüdő enyhén savas körülményei közt, bejuthat a szövetekbe. A feloldhatatlan, kikerülhetetlen szemcsék felületén olykor vastartalmú fehérjekéreg képződik, ezzel igyekszik magát távol tartani a szervezet az idegen anyagtól. Az azbesztszálak a léghólyagoktól egészen a tüdők külső felszínéig eljutnak a nyirokrendszeren keresztül, a tüdöket kívülről és mellkasüreget belülről borító mellhártyák közötti térbe.<sup>7</sup>

A nagy tömegben, hosszú időn át a tüdőbe jutó porok a tüdőben **kötőszövet-szaporodást (fibrózis vagy rostos hegesedés)** idéznek elő. Ha ezt kvarcpor váltja ki, szilikózis<sup>8</sup> a betegség neve, ha azbeszt, **azbesztózis**. Azbesztózis főként a léghólyagok régiójában (alsó tüdőlebeny) fordul elő, csökkentve a légzési kapacitást (száraz köhögés, légszomj, csökkent terhelhetőség, mellkasi fájdalom tünetekkel). A mellhártyán (latinul pleura) leggyakrabban **jóindulatú kötőszövetes felrakódás (pleurális plakk)** fordul elő, ez érdemi egészségkárosodást nem jelent, csak jelzi az azbeszt**expozíció**t. A mellhártyák régiójában kóros folyadékképződés és ritkán hegesedés (**pleurális fibrózis**) is előfordulhat az azbesztszálak hatására.

Az azbesztek által kiváltott védekező mechanizmusok nyomán gyulladásozó állapot alakul ki az élő szervezetben, sok olyan vegyület keletkezik, amely elősegíti a mutációt vagy a kóros sejtburjánzást, végső soron rákot okozva. Főként az amfibolazbeszt belélegzéséhez kötik a **mellhártyát és hashártyát érintő savóshártya daganatot (rosszindulatú mezotelióma)**. A **tüdőrákot** – sok egyéb tényező mellett – amfibol- és krizotilazbeszt is kiválthatja az orvosi kutatások szerint. A tüdőrák esélyét az azbesztpor belélegzésével párhuzamos dohányzás is növeli: az azbesztszálak nagy fajlagos felületén megkötődnek a cigarettafüstben megtalálható, rákkeltő policiklusos aromás szénhidrogének (PAH), amelyek azután az azbesztszálakkal a tüdő minden zugába eljutnak.

A léghólyagok régiójába lejutott porszemcsék orvosilag nem moshatók ki, legfeljebb oldódásuk révén csökkenhet mennyiségük (vagy a szervezet más régióiba való elszállítódás nyomán). Éppen ezért az azbeszthez kötődő betegségek nem gyógyulnak meg és a legtöbb azbeszthez kötődő egészségkárosodás kezelésére nincs terápiás lehetőség. A betegség rosszabbodása (progresszió) főként az azbesztexpozíció kezdetén jellemző.

**Magyarországon (az európai szabályozással összhangban) a következő, azbesztexpozícióhoz kötődő foglalkozási eredetű betegségeket kell az egészségügyi hatóságoknak nyilvántartani: azbesztózis, mezotelióma (savóshártya daganat), azbesztexpozícióhoz köthető hörgő- és tüdőrák, a mellhártya légzésfunkció csökkenéssel együtt járó hegesedése (fibrózis).**

<sup>7</sup> A két mellhártya közötti teret folyadék tölti ki, csökkentendő a tüdők és a mellkasüreg belső fala közti súrlódást légzéskor.

<sup>8</sup> A szilikózis a legrégebben ismert foglalkozási eredetű megbetegedés.

Az azbesztszálak hatását, az azbesztszálak jelenlétére az élő szervezet által adott védekezési válaszokat a mai napig vizsgálják. Vizsgálják az elhunytak tüdejében levő száltartalmat, vannak „in vitro” (azaz „üvegben” – petricsészében, modelledényben) és „in vivo” (azaz életben, modellállatokon végzett) kísérletek. Sok adatot szolgáltatnak az azbesztnak kitett népesség (foglalkozásból adódóan azbeszttel kapcsolatba került csoportok, pl. azbesztfeldolgozó gyár munkásai, bányászok; természetes azbesztelőfordulás környezetében élők) statisztikus vizsgálati eredményei is.

Sokszor ellentmondóak a vizsgálatok eredményei. **Az azbesztek közül az amfibolazbesztek, s ezen belül is kiemelkedően a riebeckitazbeszt (krokidolit vagy kék azbeszt) rákkeltő hatása igazolt. A krizotil rákkeltő hatása máig kérdéses, ha van is, lényegesen kisebb az amfibolazbesztekénél. Ezzel együtt, a Nemzetközi Rákkutatási Ügynökség (International Agency for Cancer Research) nem tesz különbséget száltípusok között, és az azbeszt összes fajtáját a legkockázatosabb, 1-es kategóriába<sup>9</sup> sorolja (Group 1 – embereknél rákkeltő<sup>10</sup>).**

Az amfibolazbesztek nagyobb kockázata több dologból adódik:

**Kémiai szempontból**, a lényegesen eltérő kémiai összetétel és szerkezeti felépítés miatt, az amfibolszálak tartósan fennmaradnak a tüdőben (modellszámítások szerint olyan lassan oldódik, hogy e hatás csak 6–8 év után kezd észlelhetővé válni), míg a krizotil jobban oldódik (egy éven belül feloldódik még egy 1 µm átmérőjű szálköteg is). Így a krizotil mennyisége az idővel sokkal gyorsabban csökken a tüdőben.

A *vas* (elsősorban a Fe<sup>2+</sup>) jelenléte az amfibolokban káros hatású redox-reakciókat vált ki. (A krizotilban nem kell számolnunk jelentős vas helyettesítéssel.) A *vasas fehérjekéreg* képződése is káros hatású, és elsősorban az amfibolszálakra jellemző.

A **fizikai viselkedés** miatt is az amfibol a kockázatosabb. A léghólyagok régiójában a hosszabb azbesztszálak kártékonyabbak. A *falósejtek* a **rövidebb szálakat** képesek bekebelezni, és míg az amfibolazbeszt kötegek *hosszában foszlódnak* (így a szálak hossza nem csökken a tüdőben), a krizotilszálak *keresztben törnek*, ez a rövidülés pedig segíti a falósejtek munkáját.

### 3.4.3. Az azbeszt jogi vonatkozásai

**Az Európai Unióban tilos az azbesztásványok bányászata, alkalmazása, beépítése. Magyarországon 1992-ben tiltották be az amfibolazbeszt, 2005-ben pedig a krizotil (szerpentinazbeszt) alkalmazását.** Hazánkban – a geológiai felépítésből adódóan – nincs ipari méretű természetes azbesztelőfordulás. A korábbi évtizedekben az importált azbesztet három településen, Nyergesújfalun (eternitgyár – azbesztcement palák), Selypen (azbesztcement csövek) és Kisvárdán (azbeszt tartalmú fékbetétek) dolgozták fel nagyobb mennyiségben.

<sup>9</sup> Az IARC első, azbesztek rákkeltő hatását tárgyaló monográfiája 1973-ban jelent meg (2. kötet), további megjelent összefoglalók: 1977 (14. kötet), kiegészítés (7. kiegészítő kötet, 1987). Egy 2009-es munkatülés nyomán folyamatban van az azbesztekkel is foglalkozó legújabb, 100C kötet kiadása. A megjelenés a <http://monographs.iarc.fr/index.php> oldalon várható.

<sup>10</sup> Az IARC kategóriái (állatkísérletek adatai illetve a vizsgált anyagnak kitett emberek adatai alapján): 1 – embereknél bizonyítottan rákkeltő; 2A – embereknél valószínűleg rákkeltő; 2B – embereknél lehet, hogy rákkeltő; 3 – emberekre gyakorolt rákkeltő hatás tekintetében nem besorolható; 4 – embereknél valószínűleg nem rákkeltő.

A már beépített azbesztekre nincs kötelező érvényű szabályozásunk. A beépített azbesztek egy része teljesen kötött formájú, így ha nem bontjuk, fúrjuk, daraboljuk őket, gyakorlatilag nem jelentenek veszélyt, nem kerülhetnek a levegőbe. Más részük azonban könnyen porlódik, levegőbe jut, ezzel tényleges kockázatot jelent az ott élő/dolgozó embereknek.



3.4.4. ábra. Az azbesztek jelenlétére figyelmeztető jelzés a 44/2000. (XII. 27.) EüM rendelet szerint. A rendelet azt is kiköti, hogy a legveszélyesebb azbesztet (riebeckitazbeszt) tartalmazó anyagnál az „azbesztet tartalmaz” feliratot „krokidolitot/kék azbesztet tartalmaz” felírra kell módosítani. A jelzés minimális mérete 5 cm × 2,5 cm (A jelzés alakja, színezése és szövege megfelel az 1907/2006/EK (2006. 12. 18.) rendeletben foglaltaknak is.<sup>11)</sup>

Az azbeszttartalmú szigetelések bontását (azbesztmentesítés) csak hatósági engedéllyel rendelkező cég végezheti, a kiporzást megakadályozó óvintézkedések mellett. Az azbeszttartalmú hulladék veszélyes hulladék, elhelyezése csak kijelölt hulladéklerakókban lehetséges. A könnyen porló és a kevésbé porlódó hulladék egyformán veszélyes hulladéknak minősül, jóllehet utóbbi környezeti kockázata jóval kisebb. Mind a beépített, mind a hulladékként kezelt azbesztet jelzéssel kell ellátni (3.4.4. ábra).

A levegő azbesztszál-koncentrációjának mérését csak akkreditált laboratórium végezheti. Azbesztmérést az Országos Munkahigiénés és Foglalkozás-egészségügyi Intézet (OMFI) végezhet, illetve ő akkreditálja és ellenőrzi a hazánkban azbesztmérésre szakosodó laboratóriumokat.

Levegő azbesztkoncentrációja tekintetében három határérték van: környezeti határérték (levegő terheltségi szint), tisztasági határérték és munkavédelmi határérték. A levegőre vonatkozó **környezeti határérték  $0,001 \text{ rost/cm}^3 = 1000 \text{ rost/m}^3$**  szálkoncentráció<sup>12</sup>. A tisztasági és munkavédelmi határértékek az azbesztekkel kapcsolatos egyetlen megengedett tevékenységhez, az azbesztmentesítéshez kötődnek<sup>13</sup>. Ha egy helyiségben a porlódó szigetelést eltávolítják, a mentesítés utáni azbesztszál koncentrációra vonatkozó **tisztasági határérték  $0,01 \text{ rost/cm}^3 = 10000 \text{ rost/m}^3$** . Azbeszteltávolítás során a légzésvédő eszköz

<sup>11</sup> Az EU-s rendelet hivatalos magyar fordításában: „Az azbesztpor belélegzése ártalmas az egészségre.”

<sup>12</sup> A 4/2011. (I. 14.) VM rendelet (A levegő terheltségi szint határértékeiről és a helyhez kötött légszennyező pontforrások kibocsátási határértékeiről). Az azbesztet a rendelet a legveszélyesebb (I. veszélyességi fokozat: különösen veszélyes) légszennyező anyagok közé sorolja. Megjegyzésre érdemes, hogy e rendelet – valószínűleg szerkesztési hiba folytán – azbesztként **csak az amfibolazbesztek**et jelöli meg, a **krizitilt nem!**

<sup>13</sup> 12/2006. (III. 23.) EüM rendelet az azbeszttel kapcsolatos kockázatoknak kitett munkavállalók védelméről.

(porvédő maszk) viselését a **8 órára vonatkoztatott  $0,1 \text{ rost/cm}^3 = 100000 \text{ rost/m}^3$  munkavédelmi határérték** túllépése esetén írják elő.

#### 3.4.4. Azbeszt az épített környezetben

Az első ismert azbesztfelhasználás 6500 éves (antofillitazbeszt cserépedények megerősítésére a mai Finnország területén). Innen kezdve, változó intenzitással, a mai napig használjuk az azbeszteket. Az 1860-as években kezdett az azbesztfeldolgozó-ipar felvirágozni, a gőztechnológia elterjedése (=hőszigetelési feladatok megjelenése), az észak-olasz azbesztbányák újrainyitása és a quebeci (Kanada) krizotilbányák termelése révén.

A 20. század elejére az azbesztnek már több száz alkalmazása volt ismert. A legnagyobb mennyiségű azbesztet – a viszonylag speciális *vegyipari, textilipari, papíripari* alkalmazások mellett – a *gépipar* (tömítések, autó fékpofák) és az *építőipar* (azbesztcement palák, vízvezetékcsövek, tűzvédő, hang- és hőszigetelő lapok és burkolatok, azbeszt erősítésű burkolóanyagok, műanyag padlók, padlólapok; 3.4.5. ábra) használta/használja fel.

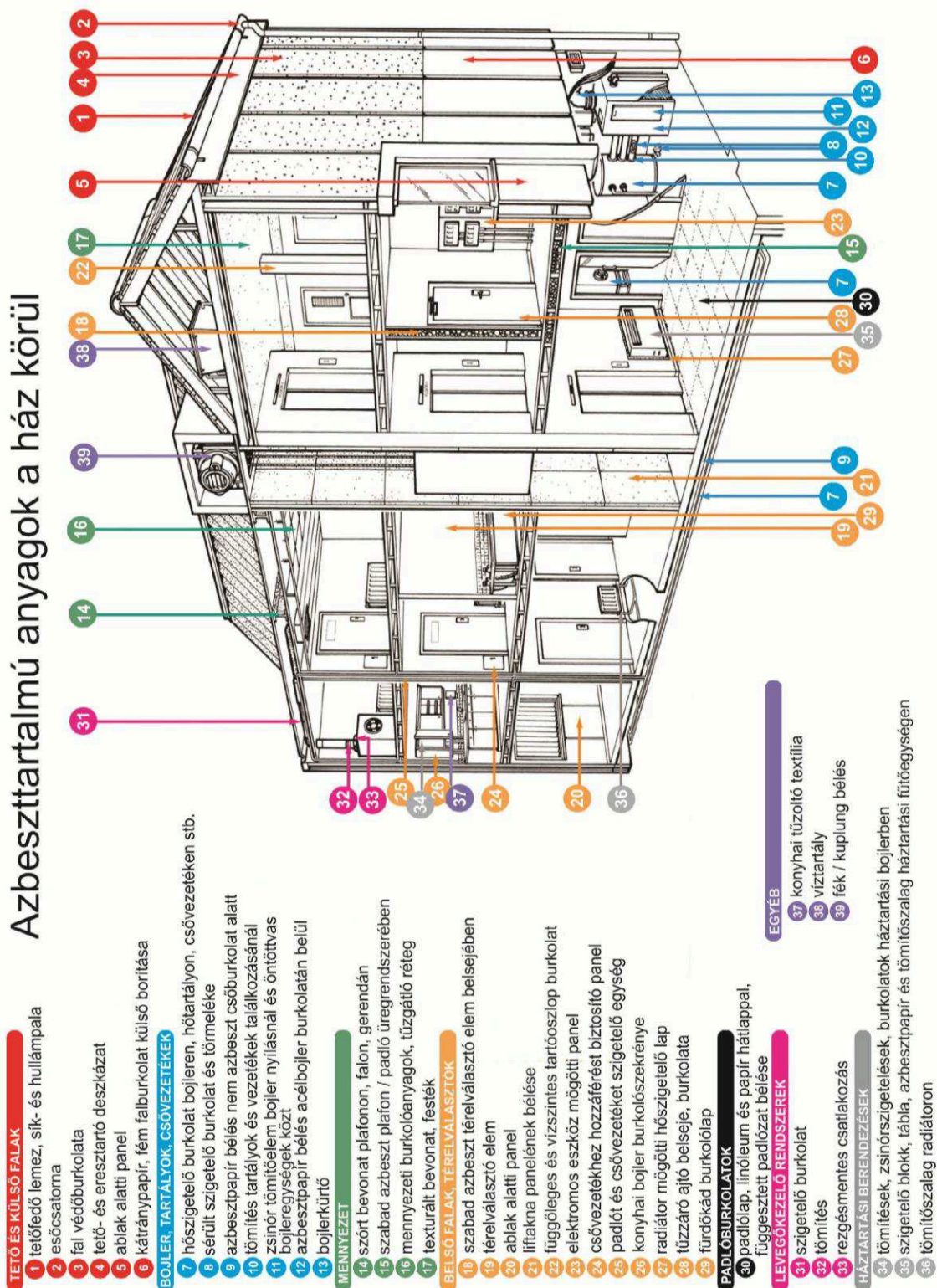
Ma már az Európai Unióban, így Magyarországon is, tilos az azbeszt alkalmazása, így csak korábban beépített anyagokban találkozhatunk azbeszttel. Az egészségi kockázat szempontjából az azbesztet tartalmazó anyagokat két csoportba oszthatjuk: kis kötőanyag-tartalmú (szórt) azbeszt, illetve magas kötőanyag-tartalmú összetett anyagok, pl. azbesztcement termékek.

**Kis kötőanyag-tartalmú alkalmazás a szórtazbeszt-szigetelés**, amely 95–97% azbesztet és 3–5% kötőanyagot tartalmaz. Ezek az anyagok porózusak, kis sűrűségűek, a magyar jogszabályok „alacsony,  $1 \text{ g/cm}^3$ -nél kisebb sűrűségű, azbeszttartalmú szigetelő vagy hangszigetelő anyagok” néven említik őket. A *szórtazbeszt-szigetelés* elnevezés onnan származik, hogy a szigetelendő felületre szórópisztollyal vitték fel az azbesztszálakat, ahogyan a festéket, vakolatot is szokás. **Szórtazbeszt-szigeteléseket nagyjából 1940-től az 1980-as évek közepéig alkalmaztak Magyarországon, a különböző azbeszt típusokat ilyenkor nem keverték, és egyaránt alkalmaztak riebeckitet, illetve krizotilt.** Az ilyen burkolatoknak többnyire nincs kiporzás elleni védelme, vagyis az azbesztszálak a légmozgás hatására azonnal szabadon a levegőbe jutnak, és veszélyt jelentenek az egészségre. Az ilyen alkalmazásoknál javasolt a burkolatok cseréje, vagy legalább a kiporzás elleni védelem biztosítása.

**A nagy kötőanyag-tartalmú alkalmazás** leggyakoribb példája az **azbesztcement síkpala, hullámpala, vízvezetékcső**. Itt legfeljebb 8–10% azbesztet keverték a 90–92% cement kötőanyaggal. **Az azbesztcement termékekben, kissé eltérő tulajdonságaik miatt, sokáig együtt alkalmazták a krizotilt és a riebeckitet**<sup>14</sup>. Az azbesztszál szerepe itt a szakítószilárdság és a rugalmasság növelése volt. A magas kötőanyag tartalom erősen csökkenti az azbesztszálak levegőbe jutásának esélyét, így még ha időről időre ki is szabadulhat egy szál, a szálkoncentráció általában elhanyagolható. Az azbesztcement termékek cseréje elméletileg a cement tönkremenetelekor (=megnövekedett kiporzási esély) javasolt, a gyakorlatban azonban ezek a termékek rendkívül időtállóak, sok tíz év

<sup>14</sup> Az azbesztcement termékekben Nyergesújfalun 1903–1983 között, Selypen 1971–1992 között alkalmazták együtt a krizotilt és a riebeckitet. A későbbiekben a riebeckitet műszállal és cellulózzal váltották ki, de krizotilt továbbra is alkalmazták a gyártás során. 2005 óta minden szálcement termék azbesztmentesen, műszálakkal, cellulózzal készül Magyarországon.

után is stabilak, így inkább csak a tető- vagy vízvezeték-felújításokkor történik meg a csere és jelentkezik a veszélyes hulladékként történő elhelyezés kötelezettsége.



3.4.5. ábra: Hol találkozhatunk beépített azbeszttel 20. századi épületekben? Magyarországon a leggyakoribb alkalmazások az azbesztcement termékek: sík- illetve hullámpala a tetőn; csövek, pl. nyomócsőként vagy esőcsatornaként; a szórt szigetelés pl. hőszállító csöveken, hő/hangszigetelő ill. tűzvédelmi



bevonatként garázsban, lépcsőházban, közműcsatornában; azbesztlap kályhák és kazánok közelében. Az ábra angol azbesztmentesítő cégek tájékoztatója alapján készült, így olyan alkalmazásokat is tartalmaz, amilyenekkel Magyarországon csak ritkán találkozhatunk

#### 3.4.5. Van-e jövője egy ilyen, ellentmondásokkal teli anyagnak?

A válasz nem egyszerű. Az azbesztek remek technológiai anyagok.

A helyettesítésükre használt anyagok (cellulózszál, kevlar, közetgyapot, wollastonit stb.) legtöbbször nem rendelkeznek az azbesztéhez hasonló szigetelőképesességgel, szakítószilárdsággal, rugalmassággal, vagy éppen megfelelően alacsony előállítási költséggel. Emellett a helyettesítő anyagok egészségre gyakorolt hatása is sokszor kérdéses, és intenzív kutatások tárgya világszerte.

**Az amfibolazbesztek erős egészségkárosító hatása tudományosan bizonyított.** Közülük is kiemelkedően veszélyes a riebeckitazbeszt (kék azbeszt) és a gruneritazbeszt (amozit, barna azbeszt). **Ezen anyagok ipari használata mai ismereteink szerint tehát nem indokolt, nem várható.** Szerencsénk, hogy az amfibolazbeszt, már káros hatásának felismerése előtt is – geológiai okokból – csak a világ azbeszttermelésének 10–20%-át tette ki, tehát a 19–20. században környezetünkbe beépített azbesztnak csak kisebb része ennyire veszélyes. Óvatosságra int azonban, hogy már a bányászatkor is, és a feldolgozás során különösen keveredhetnek az azbesztek. Így minden alkalommal ellenőrizni kell a szerpentinazbesztet is, hogy nincs-e mellette, akár alárendelt mennyiségben, amfibolazbeszt is.

**Ugyanakkor a krizotil,** az ötven éve folyó tudományos kísérletek tanúsága szerint, **eleve sokkal kisebb egészségi kockázatot hordoz.** Az eltérés nem meglepő, ha tudjuk, hogy a krizotil egészen más vegyület, az amfiboloktól kémiai és szerkezetileg is gyökeresen eltér, hozzájuk kizárólag a szálas megjelenésben hasonló. Mindezek alapján – a fejezet szerzőinek véleménye szerint – nem zárható ki, hogy *megfelelő szabályok bevezetése mellett* a krizotil, mint ásványkincs, biztonságos és hatékony ipari alkalmazása egy-két évtized múlva visszatérjen. Ha ez felmerülne, a szabályozásoknak ki kellene terjedniük a porképződés minimalizálására a *kitermelés, feldolgozás, beépítés során,* a megfelelő ellenőrzésre a *használat alatt,* a megfelelő kezelésre a *bontás során,* és természetesen a biztonságos *újrahasznosításra* vagy *végelhelyezésre* is.

A krizotil alkalmazásának jövője nagyrészt azon tudományos kutatások eredményétől függ, amelyet ásványkutatók és orvosok végeznek együtt évtizedek óta, immár, a 21. században, a környezettudományi szakemberek együttműködésével.

Tudnunk kell azonban, hogy a kutatóktól „csak” a *tudományosan alátámasztott eredmények* remélhetők. Hogy ezek alapján megszületnek-e majd a szükséges *törvényhozási lépések,* az már egy másik sportágban dől el. Ott az lesz a kérdés, hogy képesek lehetnek-e egyáltalán a tudományos eredmények megmérkőzni a döntéshozó politikusokban a félelmekkel hiszterizált, a tudományból kiábrándult, a természettudományos eredményeket is gyakran relativizáló közgondolkodásnak megfelelni akarással.

A képzett természettudományi szakemberek egyik kiemelt feladata a 21. században éppen az, hogy szakértelemmel párosuló felelősségvállalásukkal segítsék a szélesebb társadalmat és a politikusokat a jó döntések meghozatalában.

### 3.5. Függelékek

#### 3.5.1. Bibliográfia

- Banfield, J. F., Nealson, K. H.: Geomicrobiology: Interactions between microbes and minerals. *Reviews in Mineralogy*, 35(1997) 448 pp.
- Bognár L.: Ásványnévtár. ELTE Eötvös Kiadó, 1995, Budapest, 345 pp. (<http://www.tankonyvtar.hu/geologia/asvanynevtar-080904-5>)
- Bognár L.: Ásványhatározó. Második, átdolgozott és bővített kiadás. ELTE Eötvös Kiadó, 1999, Budapest, 478 pp.
- Farkas, I. M., Weiszburg, T.: Üledék és szálló por ásványtani vizsgálata a romániai Kolozs megyéből. *Földtani Közlöny*, 136/4(2006), pp. 547–572.
- Guthrie, G. D., Mossman, B. T.: Health effects of mineral dusts. *Reviews in Mineralogy*, 28(1993), 584 pp.
- Hawthorne, F. C., Oberti, R., Della Ventura, G., Mottana, A.: Amphiboles: Crystal chemistry, occurrence, and health issues. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 67(2007), 545 pp.
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 14, (1977): Asbestos. 106 pp. (internetes összefoglaló: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol14/volume14.pdf>)
- IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Supplement 7 (1987): Overall Evaluations of Carcinogenicity: An updating of IARC Monographs Volumes 1 to 42. 449 pp. (internetes elérhetőség: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/suppl7/Suppl7.pdf>)
- Koch S., Sztrókay K. I.: Ásványtan I-II. Harmadik, javított kiadás. Tankönyvkiadó, Budapest, 1986., 936 pp. (<http://mek.oszk.hu/04700/04799/>)
- Nolan, R. P., Langer, A. M., Ross, M., Wicks, F. J., Martin, R. F.: The health effects of chrysotile asbestos. Contribution of science to risk management decisions. *The Canadian Mineralogist Special Publication*, 5(2001), 304 pp.
- Sahai, N., Schoonen, M. A. A.: Medical mineralogy and geochemistry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 64(2006), 332 pp.
- Sahai, N.: Medical mineralogy and geochemistry. *Elements – An International Magazine for Mineralogy and Geochemistry*, 3/6 (2007) (pp. 369–440).
- Szakáll S.: Ásványrendszertan. Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 2005., 336 pp.
- SLIC : Gyakorlati útmutató az azbeszttel járó kockázatok megelőzése vagy csökkentése érdekében követendő bevált gyakorlathoz a (potenciálisan) azbesztveszéllyel járó munkáknál – a munkáltatók, a munkavállalók és a munkaügyi felügyelők számára. A bevált gyakorlathoz szóló, nem kötelező érvényű útmutató. Európai Bizottság, a vezető munkaügyi felügyeleti tisztviselők bizottságának (SLIC) kiadása, 150(2006) pp. [http://www.omfi.hu/letolt/azbeszt\\_gyakorlati\\_utmutato.pdf](http://www.omfi.hu/letolt/azbeszt_gyakorlati_utmutato.pdf)
- Szakáll S., Gatter I., Szendrei G.: A magyarországi ásványfajok. Kóország Kiadó, Budapest, 2005., 427 pp.
- Vaughan, D. J., Wogelius, R. A.: Environmental Mineralogy. *EMU Notes in Mineralogy*, 2, Eötvös University Press, Budapest, 2000., 434 pp.
- Virta, R. L.: Mineral commodity profiles – Asbestos. USGS circular 1255-KK, 2005., 63 pp.
- Virta, R. L.: Mineral commodity summaries – Asbestos. USGS circular. 2011.
- Weiszburg T., Tóth E.: Környezeti ásványtan. Környezettudományi alapok tankönyvsorozat, Typotex Kiadó, 2011.

#### 3.5.2. Fogalomtár

**Aeroszol:** Gázban (többnyire levegőben) lebegő parányi (nagyságrendileg tized mikrométeres-néhány nanométeres) szilárd szemcsék és/vagy folyadékcspepek. Aeroszolok tipikus példái a természetben a felhők, környezeti (ember által létrehozott) példa a szmog, a kémények füstje, a porlasztott folyadék állagú kozmetikumok (pl. dezodor), gyógyszerek (pl. asztma elleni készítmények). Lebegő természetes szilárd szemcsék lehetnek a tengervíz cseppjeinek beszáradásával kelet-

kező sókristályok, vulkánkitörés hamuja, spóra, pollen, mikroszkópikus élőlények vázai. Lebegő természetes folyadéksepp a víz a felhőkben.

**Agyagásvány:** Réteges szerkezetű szilikátásvány, tipikusan mikrométeres vagy az alatti méretű kristályokból áll, ezért kiemelt jelentősége van környezeti folyamatokban. Üledékes környezetben egyéb szilikátásványok (pl. földpátok, csillámok) kémiai átalakulásával (mállásával) keletkeznek.

**Ångström (Å):** Hosszúság mértékegység, a méter tízmilliárdod része. A svéd ábécé Å betűjével jelölik.  $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m} = 0,1 \text{ nm}$ . Nem része a nemzetközi SI mértékegységrendszernek, a kémiában és az ásványtanban mégis használatos, mert az atomok, ionok, molekulák mérete, a kémiai kötések hossza segítségével kényelmesen adható meg. Nevét Anders Jonas Ångström (1814–1874) svéd fizikusról kapta.

**Azbeszt:** Ipari név. Az iparban alkalmazott szálas megjelenésű, speciális fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkező szilikátásványok gyűjtőneve.

**Ásvány:** Természetes, kristályos vegyület vagy elem. Egyértelmű megadása képlettel és a kristályszerkezetre utalással lehetséges, pl. pirit ( $\text{FeS}_2$ , köbös kristályrendszer), markazit ( $\text{FeS}_2$ , rombos kristályrendszer). Ma kb. 4500 ásványfajt ismerünk, ezek száma lassan nő (évente néhány 10 fajjal). Az ismert ásványok kevés kivétellel (terméselemek) vegyületek.

**Elem:** Olyan kémiai anyagminőség, amely kizárólag azonos protonszámú atomokból épül fel. Halmazállapota nem jellemző, azaz lehet szilárd (pl. gyémánt, C köbös), folyékony (pl. terméshigany, Hg), vagy légnemű (neon, Ne).

**Elsőrendű kémiai kötés:** Kovalens, ionos és fémes kötés. Erős kötés, csak a vegyület teljes, atomjaira/ionjaira való felbomlásakor (pl. megolvadás) szakad fel.

**Expozíció (magyarul kitettség):** egészségre káros anyagok esetében használt kifejezés, megadja, hogy az ember (illetve más élőlények, pl. állatkísérletek alanyai) milyen hosszú ideig, milyen formában, milyen koncentrációban (mennyiségben) voltak kapcsolatban az egészségre káros anyaggal. Azbesztek feldolgozásánál például évtizedekig nagy azbesztszál koncentrációjú levegőt lélegeztek be a poros környezetben dolgozó munkások (magas expozíció). Ugyanakkor az azbesztcement palával fedett házban lakók expozíciója, hasonló időintervallumban, alárendelt (alacsony), mivel az azbesztszálak nehezen szabadulnak ki a cementből, így a házban és környezetében az azbesztszálak mennyisége a levegőben elenyésző.

**Érc:** Természetes ásványkeverék, amelyből gazdaságosan fém nyerhető ki. Földi léptékben általában kis kiterjedésű (max. néhány 100 m). Az érc a fémet tartalmazó ércásványokból és a fémkinyerés szempontjából haszontalan (meddő=„terméketlen”) ásványokból áll. Példa: aranyérc, amely ércásványként tartalmazhat terméсарanyat (Au, köbös kristályrendszer), meddőásványként pedig kvarcot ( $\text{SiO}_2$ , háromszöges kristályrendszer). Kiterjedését tekintve kivétel az alumínium érce, a bauxit, amely akár 1000 kilométeres elterjedésben ismert a trópusokon, így a bauxit egyben kőzet is.

**Főelem:** Összetett (több különböző kémiai elemből) álló anyag alkotója, amelynek mennyisége meghaladja az 1%-ot. Kémiai képlettel felírható anyagoknál (vegyületeknél, ásványoknál) a főelemek mindig megjelennek a vegyület kémiai képletében. (Lásd még: mellékelem, nyomelem).

**Kondenzáció (lecsapódás):** Halmazállapot változás, amikor a gőz halmazállapotú anyag folyadék halmazállapotba kerül. A párolgás ellentéte. Környezeti példa: felhőképződés, amikor a lebegő szilárd részecskéin (aeroszol) a vízmolekulák lecsapódnak, vízcseppekké alakulnak.

**Koordináció:** Egy atom vagy ion közvetlen (legközelebbi) szomszédainak száma és térbeli elrendeződése (geometriája). A fogalom értelmezhető molekulákra, összetett ionokra és nem molekuláris szilárd anyagokra is. A gyémántban például a szénatomot négy másik szénatom veszi körül, tetraédes elrendeződésben (úgy képzelhetjük el, mintha egy tetraéder közepén és 4 csúcán lenne egy-egy szénatom, a középsőt központi atomnak hívjuk, őt „koordinálja a többi négy). Önmagában a szomszédok számának megadása nem elég: a tetraédes mellett négyes koordináció létrejöhet

más geometriával, például úgy is, hogy a koordináló atomok egy négyzet csúcsain, a központi atom pedig a négyzet közepén foglal helyet (négyzetes koordináció).

**Kőzet:** Természetes ásványkeverék, amely földi léptékben nagy mennyiségben (legtöbbször kilométeres nagyságrendtől felfelé) fordul elő. Nagy geológiai folyamatok (pl. lemeztectonika) hozták létre. Mivel a kőzeteket létrehozó folyamatok száma korlátozott, a kőzettípusok száma is az, csak 100-200 körüli. Példák: gránit (mélységi magmás kőzet), bazalt (vulkáni magmás kőzet), mészkő (üledékes kőzet), márvány, csillámpala (átalakult vagy metamorf kőzet).

**Kristály:** Szilárd anyag. Alkotói atomok, ionok, molekulák, ezek aránya állandó, ezért összetétele kémiai képlettel felírható. Az alkotók között főként elsőrendű kémiai kötések teremtenek kapcsolatot (kivétel a molekulárcsos kristályok, ahol a molekulán belül elsőrendű, a molekulák között másodrendű kötések vannak). Az atomok, ionok és a köztük kapcsolatot teremtő kémiai kötések a térben rendezetten helyezkednek el, mind rövid (azaz egy atom környezetében, 0,1-0,2 nanométeres nagyságrendben), mind hosszú távon (néhány 10 nanométertől felfelé).

**Mellékelem:** Összetett (több különböző kémiai elemből) álló anyag alkotója, amelynek mennyisége nagyságrendileg néhány tized százalék (<1-0,1%). Kémiai képlettel felírható anyagoknál (vegyületeknél, ásványoknál) a mellékelemek csak ritkán jelennek meg az anyag kémiai képletében. (Lásd még: főelem, nyomelem).

**Molekula:** Elsőrendű kovalens kötésekkel összekapcsolódó, elektromos töltését tekintve semleges, véges számú atomból álló atomcsoport. Példák: H<sub>2</sub>O (gáz halmazállapotú vízgőz, folyékony víz vagy szilárd halmazállapotú jég, ekkor H<sub>2</sub>O, hexagonális kristályrendszer), O<sub>2</sub> gáz.

**Műtermék:** Ember által előállított szilárd, kristályos anyag, amely a természetben nem keletkezik (vagyis nincs természetes megfelelője).

**Nyomelem:** Összetett (több különböző kémiai elemből) álló anyag alkotója, amelynek mennyisége nagyságrendileg tized százalék alatti (<0,1-0,0001%). Kémiai képlettel felírható anyagoknál (vegyületeknél, ásványoknál) a nyomelemek nem jelennek meg a vegyület kémiai képletében. (Lásd még: főelem, nyomelem).

**Szilikátásványok (röviden szilikátok):** A szilikátok a földkéreg felépítésében résztvevő legfontosabb ásványcsoport. Jellemző építőegysége a szilikátgyök (tetraéder alakú [SiO<sub>4</sub>]<sup>4-</sup> komplex anion), amely fém kationokkal kapcsolódik össze. A szilikátok egyik jellegzetessége, hogy a szilikátgyökök közvetlenül is összekapcsolódhatnak az oxigéneken keresztül (polimerizálódhatnak), csoportokat, gyűrűket, láncokat, térhálós szerkezetet hozhatnak létre.

**Szilikátüveg:** Nagyrészt szilikát tetraéderekből felépülő, de kis mennyiségben más fémeket is tartalmazó (Al, Na, K), hosszú távon nem rendezett szilárd anyag. Természetes szilikátüveg az obszián, de az ember által használt legtöbb üvegtípus is ide tartozik.

**Talaj:** A földkéreg külső, laza, termékeny rétege, a földkérget alkotó kőzetek fizikai aprózódása, kémiai átalakulása révén, az élővilág aktív közreműködése mellett alakul ki. Mikrométeres nagyságrendű ásványszemcsék, élő és élettelen szerves anyagok, iongazdag vizes oldatok és gázok a fő alkotói.

**Törmelékes ásvány:** A kőzetek pusztulásával, fizikai aprózódásával keletkező ásványszemcse, amely kémiai (kristályszerkezetét, kémiai összetételét) tekintve nem alakul át. Példa a gránit aprózódásával keletkező, akár több száz kilométeres szállítást is átvészoló kvarcsemcse a homokban.

**Üveg:** Szilárd anyag, melynek alkotóit (atomok, ionok) elsőrendű kötések kapcsolják össze, de összetétele változó (képlettel nem írható fel), mert hiányzik belőle a hosszútávú rend (ellentétben a kristállyal). Természetes példák: obszián (vulkáni üveg), fulgurit (villámcsapáskor megolvadó kvarchomok), tektit (meteoritbecsapódás hőjétől megolvadó földi kőzet).

**Vegyület:** kémiai anyagminőség, amelyben többféle elem atomjai/ionjai kapcsolódnak össze elsőrendű kötésekkel. A kémiai kötések révén alkotóitól eltérő tulajdonságokkal rendelkezik. Alkotóinak aránya meghatározott, ezért kémiai képlettel felírható. Vannak nem molekuláris vegyületek (a legtöbb ásvány ilyen), és molekuláris vegyületek (a legtöbb folyadék és gáz ilyen). Halmazállapota nem jellemző, azaz lehet szilárd (pl. kősó, NaCl, köbös kristályrendszer), folyékony (pl. víz, H<sub>2</sub>O) vagy gáz halmazállapotú (pl. szén-dioxid, CO<sub>2</sub>) is.

## 4. MODERN HIDROGEOLÓGIA (MÁDLNÉ SZŐNYI JUDIT, ZSEMLE FERENC)

### 4.1. A víz jelentősége életünkben, a víz tudományok és a hidrogeológia viszonya, globális vízproblémák

A Föld kék bolygó, felszínének hetvenegy százalékát víz borítja. A víz a földi élet előfeltétele, az egészség fenntartója, a természeti szépség forrása. A víz egyúttal spirituális közeg, minden vallásban központi jelentőségű. Nélkülözhetetlen anyag a mezőgazdaságban, iparban, tehát áru, amelynek értéke van, ezáltal meghatározó gazdasági hajtóerő. Ugyanakkor az élet- és vagyónbiztonságot fenyegető kockázati tényező. A világon a legnagyobb léptékű természeti katasztrófát áradások és aszályok okozzák. Csupán egy példa csak a 2010-es pakisztáni árvíz, amely több mint 13 millió embert érintett. Megjegyezhető, hogy a 2004-es, Indiai-óceán mentén pusztító szökőár, a 2005-ös kasmíri földrengés és a 2010-es haiti földrengés miatt segítségre szoruló emberek száma együttvéve is kevesebb volt ennél a számnál. Mindezekon túl a víz korlátozottan rendelkezésre álló, sérülékeny erőforrás, melyet örökségül kaptunk elődeinktől, ezért ügyelnünk kell fenntartható használatára. Ezek alapján nem kétséges, hogy a víz az emberiség életében stratégiai jelentőségű (Somlyódy, 2008).

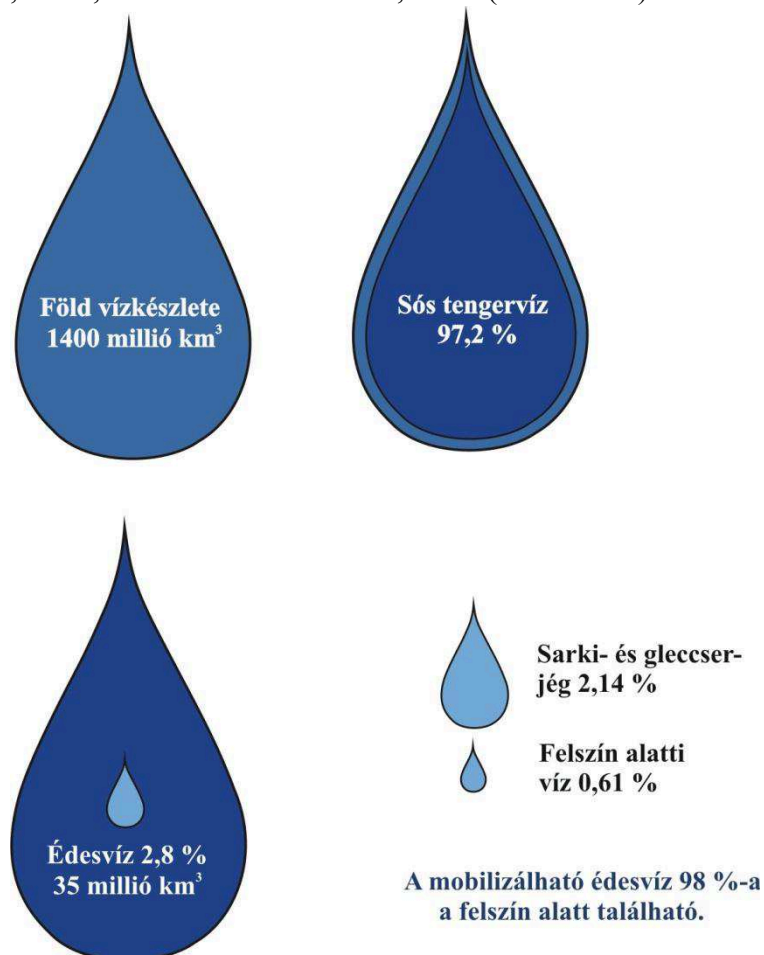
A Föld és a víz kapcsolatával tágabb értelemben foglalkozó tudomány a [hidrológia](#), amely a víztömegek globális, szférákon belüli és azok közötti szállítódásával foglalkozik. A [hidrogeológia](#) a Föld és a víz kapcsolatát tanulmányozza a felszín alatt, a litoszférában. Azon folyamatok és jelenségek tartoznak vizsgálódási körébe, amelyek a felszín alatti víz és a kőzetváz egymásra hatásából erednek. Felszín alatti víz alatt az összes földfelszín alatt található vizet értjük egészen addig a mélységig, ameddig szabad víz előfordulhat.

A földi nagy vízrezervoárok közül az atmoszféra vizeivel foglalkozó tudomány a légkörtan. A hidroszféra az a nagy földi vízrezervoár, amely magában foglalja a földfelszín vízzel, jéggel vagy hóval kitöltött mélyedéseit, óceánokat, tengereket, sarkvidéki jégpáncélokat, tavakat, folyókat és gleccsereket. A hidroszféra vizeit tárgyaló tudományterületek: a limnológia, potamológia, [glaciológia](#) és az oceanológia. A [limnológia](#) egyféle értelmezésben a nem tengeri állóvizekkel foglalkozó tudomány, míg egy másik felfogás szerint az édesvizekkel mint komplex – fizikai, kémiai és biológiai kölcsönhatások által létrejövő – rendszerekkel foglalkozó tudományterület (Padisák, 2005). A [potamológia](#) a folyamok és folyók tudománya, a [glaciológia](#) a jégjelenségekkel és gleccserekkel, míg az [oceanológia](#) a tengerekkel és az óceánokkal foglalkozik. A [hidrogeológia](#) az a tudomány, melynek tárgyát tehát a litoszféra vizei képezik. A litoszférában a víz a kőzetekben található, részben szabad vízként, részben a pórusok falához kötődő vízként, vagy az ásványok szerkezetébe beépülő kristályvízként. A víz az atmoszféra, hidroszféra, litoszféra és a bioszféra között, szisztematikus módon szállítódik a hidrológiai ciklus révén.

#### 4.1.1. A Föld vízkészletei, a felszín alatti vizek jelentősége és a vízkészletek eloszlása

Felmerülhet a kérdés, hogy van-e elegendő víz az emberiség számára? A válasz egyértelműen igen. A Földön található összes víz ~1400 millió km<sup>3</sup>, melynek mintegy 97,2%-a azonban sós tengervíz. Az édesvíz, – az 1000 mg/l-nél kisebb oldott anyag

tartalmú víz – ~35 millió  $\text{km}^3$ -t tesz ki, és a teljes víztömegnek mindössze 2,8%-a. Globálisan 2,1%-nyi víz jég és gleccserek formájában található meg, azaz közvetlenül nem hozzáférhető. Ami talán meglepő, hogy a földi viszonylatban előforduló összes mobilizálható édesvíz 98%-a a felszín alatti található. Azonban ez sem használható korlátlanul, csak az utánpótlódás mértékében. A felszíni víz földi viszonylatban 0,009%, a talajnedvesség 0,005%, az atmoszferikus víz 0,001% (4.1.1. ábra).



4.1.1. ábra: A földi vízkészletek megoszlása (Fetter, 1994 és Shiklomanov, 1999 nyomán)

A vízkészletek eloszlásában gondot jelent a vízkészletek területi és időbeli eloszlásának rendkívüli egyenlőtlensége. A területi egyenlőtlenség által leginkább érintettek a vízben legszegényebb országok, Egyiptom és az Egyesült Arab Emírátságok. Az édesvízkészletekben leginkább bővelkedő országok közül kiemelhető Izland és Suriname. A monszun övezetben az időbeli egyenlőtlenségek is terhelik a vízhasználatot. Kína csapadékeloszlását tekintve elmondható, hogy Északnyugat-Kínában nagy területeken 50 mm alatti az éves csapadék, míg a délkeleti régióban 1600 mm-nél is több, de ez mind az esős évszakban hullik. Észak-Kínában a vízhiány, Délkelet-Kínában az áradások és a szennyezések okoznak problémát.

#### 4.1.2. A vízhasználat és globális megoszlása

A  $4000 \text{ km}^3$  éves globális vízhasználat 99%-a – becslések szerint – megújuló forrásból származik. Kevesebb, mint 1%-ot, azaz  $30 \text{ km}^3$ -t használunk nem megújuló forrásból, elsősorban Algéria, Líbia és Szaud-Arábia víztartóiból. Ezekben a régiókban viszont ez a fő vízforrás (UNESCO, 2009).

Globálisan a teljes vízhasználat ~18%-a származik felszín alatti vizekből, megújuló és nem megújuló forrásból. Ez a részesedés gyorsan nő, főleg a vízben szegény területeken. A felszín alatti vízhasználat ötszörösére nőtt a 20. században. Ez több helyen a vízszint csökkenéséhez vezetett és kérdéseessé tette a fenntarthatóságot ott, ahol a felszín alatti vizekre támaszkodtak. A kínai fővárosban, Pekingben 40 000 kút termeli egyre mélyebbről a vizet, itt a vízszint csökkenése 50 méter körüli. Kína 2011 februárjában (AP hírügynökség) bejelentette, hogy intenzív kútúrési programot indít annak érdekében, hogy az öntözés révén fentarthassa búzatermelését. 1350 kút lemélyítését tervezik a szárazság által leginkább érintett nyolc északkeleti provinciában, 1 milliárd USD-t költenek a szárazság enyhítésére. Kína a világ vezető gabonatermelő országa, a szárazság miatti termés kiesés már jelenleg is a világgiazi búzaár emelkedéséhez vezetett.

Azokon a területeken, ahol édesvízhiány van, sótalanított vizet vagy tisztított szennyvizet használnak. Ez a globális vízmérlegben nem éri el az 5%-ot, mégis jelentős a benne rejlő potenciál.

#### 4.1.3. Magyarország vízellátása

A Kárpát-medencében jobb a vízhelyzet, mint a Föld egyéb részein és nagyságrendekkel jobb, mint a fejlődő világban. Ugyanakkor hazánk a Föld egyik zárt medencéjének alján fekszik. A hegyekkel övezett medencében az éghajlati jellemzők területi változása, gradiense nagyobb, mint Európában általában. Az éghajlati modellek előrejelzéseinek bizonytalansága ebből adódóan szintén nagyobb. A medence belsejében párolgási vízhiány uralkodik. Jelenleg 100 ezer ha-t öntözünk, de ez a jövőben elérheti az 500 ezer ha-t is. Az éghajlatváltozás a készleteket és igényeket kedvezőtlenül befolyásolja (Somlyódy, 2008). A hegyek vízfeleslege a folyóvizeken és a felszín alatti víztartókba beszivároghva jut el a medence belsejébe.

A medencébe három oldalról érkezik víz, és egy irányba távozik. Magyarország a vizekben gazdag, ha az összes felszíni vízkészletet tekintjük. A folyóvizek tekintetében átmenő ország vagyunk, a Duna teljes vízgyűjtőjének 10%-a esik Magyarországra. Vízkészleteink 94%-a külföldről származik, vízhálózatuk egyenetlen. Ebből adódóan jelentős hazánk kitétsége mind az árvizeknek, mind pedig a szennyezéseknek. Folyóvízkészleteink 75%-át a Duna, Tisza, Dráva, Száva vízfolyások teszik ki, a fennmaradó 25% kisvízfolyásokból származik. A hasznosítható felszíni vízkészlet 117,5 km<sup>3</sup>/év. Bár megállapítottuk, hogy Magyarország felszíni vizekben gazdag ország, ugyanakkor, ha az ország területén leulló csapadékból származó lefolyást nézzük, ami 6 km<sup>3</sup>/év, akkor igen szegény. A felszíni lefolyást tekintve mindössze 600 m<sup>3</sup>/év az egy főre jutó vízkészlet (Somlyódy, 2008). Felszíni vizeinkből mindössze 1,5 km<sup>3</sup>/év mennyiséget hasznosítunk, azaz a víz jórészt hasznosítás nélkül adjuk át déli szomszédainknak. „Ki a Tisza vizét issza, vágyik annak szíve vissza” strófa is elveszítette mára létjogosultságát. A felszíni vizek kitétek a szennyezőknek, nagy a baleseti, havária jellegű szennyezés veszélye, melyet több kisebb eset mellett a 2000. évi tiszai cianid-, és a 2010-es a Tarna patakot, majd a Marcalt és a Rábát is elérő vörösiszap-szennyezés sajnálatosan bizonyított.

A felszín alatti hasznosítható vízkészlet becslések szerint alig 5%-a a felszíninek. A külföldi hatások ugyanakkor kevésbé érintik a felszín alatti vizeket, azok gyakorlatilag az egész ország területén hozzáférhetőek. Vízellátási hagyományaink is a föntiekben vázolt hatásokat erősítik. A felszíni vizek csak a folyók mentén hasznosíthatók. A hegyvidéki területeken a források vizét is fogyasztják. Síkvidéken a vízellátás csak kutakkal valósítható meg. Kezdetben gémes és kerekas kutakkal talajvíz-hasznosítás történt. Az ásott kutak a



19. század közepén bekövetkezett elszennyeződése – bakteriális fertőzöttség és magas nitráttartalom miatt – indította meg a mélységi vizek feltárását. A mélyfúrású kutak az Alföldön kezdetben többnyire szabadkifolyással, majd később szivattyúzással termeltek. A mélyfúrású kutakra épült az ún. közkutas, majd az 1950-es évektől meginduló közműves vízellátás. Jelenleg 1200 vízbázis több, mint 10 000 kúttal termel, jó minőségi megbízhatósággal. A kitermelt vízmennyiség 2350 millió m<sup>3</sup>/év, a parti szűrésű vízkészletek nélkül a kihasználtság 70%-os (Somlyódy, 2008).

A medencebeli és a hegyvidéki víztartók elterjedése gyakorlatilag az egész ország területén lehetővé teszi a vízellátást karsztos, hasadékos, illetve porózus medencebeli **vízadó** képződményekből. A medencében a fő vízadó képződmények a felső pannóniai és a pleisztocén korú rétegek. A felszín alatti vizek több mint 95%-ban biztosítják közüzemi vízigényeinket. Hazánkban a vízellátottság 95–98%-os. A rendszerváltozással párhuzamosan a jelentős üzemek bezárása és a vízdíj bevezetése miatt a regisztrált vízfogyasztás jelentős visszaesést mutat, ugyanakkor megnőtt az illegális vízhasználat. Ugyanakkor e vizeket a közüzemi hasznosításon túl felhasználjuk öntözésre, ha hőmérsékletük megengedi, fürdésre, de akár fűtésre is. Itt további kiaknázatlan lehetőségeink vannak. Az ásványvizek és a terápiás célból használt gyógyvizek is felszín alatti vízből származnak.

#### 4.1.4. Globális vízproblémák

Gyakran hallunk napjainkban vízproblémákról. Ezek számos tényező, a globális éghajlatváltozás, a népességnövekedés, a városiasodás, a szennyező anyagok vízbe kerülése és a mezőgazdasági öntözés együttes hatására jelentkeznek (Somlyódy, 2008; World Water Development Report 3 2009). Néhány szám az UNESCO jelentése alapján: 0,9 milliárd embernek nincs egészséges ivóvize, 2,4 milliárd ember szennyvizét nem tisztítják meg, vagy el sem vezetik; évente 2 millió öt év alatti gyermek hal meg vízzel terjedő betegségben. A WHO szerint (2004) Ázsiában, Dél-Amerikában és a szubszaharai Afrikában a szennyvizek 65%-a, 86%-a, illetve 100%-a marad tisztítatlan.

A Föld népessége 2025-re várhatóan eléri a 8 milliárdot, ezzel a jelenlegi átlagos 6000 m<sup>3</sup>/év/fő fajlagos vízkészlet 4800 m<sup>3</sup>/év/fő-re csökken, de a 2050-re 9,2 milliárdra prognosztizált népesség mellett ez a mutató tovább romlik. A népesség növekedésének problémái az egyébként is rossz helyzetben lévő fejlődő világot érintik.

Az *Intergovernmental Panel for Climate Change* (IPCC) 2007. évi jelentése alapján 90%-os valószínűséggel megéljük az emberi hatások által előidézett éghajlatváltozásokat és a víz – az *European Environmental Agency* szerint – az éghajlatváltozás által leginkább befolyásolt erőforrás (Somlyódy, 2008). Ez a bizonytalanság nehezíti a hosszú távra szóló vízgazdálkodási tervek kidolgozását, növeli az időjárási szélsőségek és ezekkel összefüggő természeti katasztrófák, az árvizek és az aszály gyakoriságát. Kétségtelen, hogy az információk hozzáférhetősége miatt is nő a dokumentált természeti katasztrófák száma. Ami azonban biztosan kiolvasható az adatokból, hogy az áradások és a ciklonok száma a földrengésekhez viszonyítva nő. A globális tengerszint-emelkedésből adódó hatások leginkább a mély fekvésű tengerparti területeket – Hollandia, Maldív-szigetek, Banglades – érinthetik. Bangladesben 150 millió ember él a veszélyeztetett tengerparti régióban, de 2050-re itt 100 milliós növekedést prognosztizálnak. Az ország területének több mint 80%-a alig 10 méterrel fekszik a tenger szintje fölött, 1,5 méteres tengerszint-emelkedés 17 millió ember földjét áraszthatja el. Az ezzel párhuzamosan a szárazföld alá benyomuló sós tengervíz pedig tönkreteszi a felszín alatti vizeket.

A városiasodás elsősorban a fejlődő országokat érintő probléma. A városi lakosság 2030-ra elérheti az össznépeség 60%-át. A gyorsan növekvő több tízmillió lakosú megvárosok tervezés nélkül burjánzanak, infrastruktúrájuk áttekinthetetlen és képtelen követni az igényeket. A vizek nagy szervesanyag-terhelése következtében előálló tápanyagdúsulás miatt az oxigénháztartás felborulása, ennek hatására eutrofizálódás következhet be. Az emberi tevékenység révén szerves és szerves perzisztens mikroszennyezők juthatnak be a vizekbe, melyek már  $\mu\text{g/l}$  koncentrációban is toxikusak és rákkeltőek lehetnek. A vízzel az élő szervezetbe kerülő patogén baktériumok, paraziták komoly járványokat okozhatnak. Rendkívül aggasztó jelenség, hogy az 1950-es évekre megfékezettnek vélt kolera világméretben terjed. De egyes – a fejlett világot érintő – vízbalesetek is figyelemre méltóak. Ilyen eset történt 1993-ban az USA-ban Millwaukeében, ahol az ivóvízbe bekerülő *Cryptosporidium* parazita által kiváltott járvány több, mint 400 000 megbetegedést, 54 halálozást okozott. E parazita spórái ugyanis nagyon ellenállóak a klórozással szemben. Ez az eset is felhívta arra a figyelmet, hogy teljes biztonság nem létezik, kockázatilag kell gondolkodni (Somlyódy, 2008).

A városiasodással párhuzamosan nő az igény az öntözésre a városi tömegek ellátása érdekében. Jelenleg a vízigények 70%-a köthető a mezőgazdasághoz, az ipar 20%-ra tehető, míg a háztartási fogyasztás 10% körüli (UNESCO, 2009). A fokozódó mezőgazdasági vízigény a készletek kimerüléséhez, szikesezéshez, a vidék elszegényedéséhez vezet, ami fenntarthatatlanná teszi az öntözést. A paradicsomtermesztés miatti vízigények Dél-Spanyolországban vezettek az ország északi régióival vitát kiváltó konfliktushoz. Egy másik példa Afrikából: 1963 óta a Csád-tó területe  $25,000 \text{ km}^2$ -ről  $1,350 \text{ km}^2$ -re csökkent. A csökkenés fele részben az öntözésnek, másrészt a klímaváltozásnak tudható be.

Gyakran hallhatjuk, hogy a 21. század fejlődését meghatározó tényező a víz lesz. Összességében elmondható, hogy globális vízválság van kibontakozóban, amely nehezen ismerhető fel és más válságokkal is társul, mint élelmiszerválság, energiaválság, általános gazdasági válság (Somlyódy, 2008). Az egyik legsúlyosabb helyzetben lévő terület az 1,3 milliárd lakosú Kína. A vízkészletek már említett egyenlőtlenségére, az országon átívelő három csatornarendszerrel kívánnak megoldást találni. A délről északra vizet szállító csatornák révén több millió hektárral tervezik növelni a mezőgazdaságilag művelhető területet. Kérdéses e tervek környezeti, társadalmi és politikai hatása. A Kína szomszédságában található Tibet pedig amiatt került a figyelem középpontjába, hogy a gleccserek olvadása „időzített bombaként” a Föld lakói egyharmadának mindennapjait fenyegeti.

A vízzel kapcsolatos problémák akár politikai konfliktusok kiváltóivá is válhatnak a jövőben. Egy ilyen jövőbeli konfliktushelyzet alakulhat ki 2020–2025-re annak következtében, hogy Irak felszíni vizeinek 70%-a Törökország hegyeiben ered, ahol jelenleg duzzasztógátákat építenek a víz visszatartása céljából (Kazemi, 2009, in: Marton, 2010).

#### 4.1.5. Az Európai Unió vízpolitikája

Megállapítható, hogy bár a vízválság leginkább a fejlődő világot érinti, a fejlett világnak vezető szerepet kell vállalnia a kiútkeresésben. Az Európai Unió vízpolitikai dokumentuma, a Víz Keretirányelv (VKI), 2000. december 22-én lépett hatályba. Ezt a 27 tagország törvényerőre emelte, a csatlakozni kívánókkal együtt ez közös európai stratégiát és szakpolitikát jelent. Célja: a vizek ökológiai állapotának megőrzése, káros anyagok vízbe jutásának korlátozása, az árvizek és aszályok hatásainak mérséklése, biztonságos

ivóvízellátás, azaz a fenntartható vízgazdálkodás elősegítése. A „jó ökológiai állapotot” 2015-re kellene elérni, melyet aztán hatévenként felülvizsgálunk.

Európában a Fekete-erdőtől a Fekete-tengerig terjedő mintegy 800 ezer négyzetkilométer nagyságú, nyolcvan millió lakost számláló Duna-térség része hazánk is. Elemi érdekünk a régió fenntartható fejlődésének elősegítése. Ezt a célt szolgálja az EU Duna stratégiája. Az [EU Duna Régió Stratégia](#) a Duna-medence országainak makroregionális szintű fejlesztési programja. A Stratégia magában foglalja a térség legfontosabb energetikai, infrastrukturális és környezetvédelmi projektjeit. A stratégiához adott legfontosabb magyar elemek a vízgazdálkodás és a vízminőség szakterületeihez kapcsolódó szerepvállalás, valamint a vízkészletek jövő generációk számára történő megőrzése.

### Ökológiai vízgazdálkodás

Az EU Víz Keretirányelve a felszíni és felszín alatti vizek komplex kezelését helyezi középpontjába. E szemlélet gyökereit Hollandiában lehet megtalálni, amely fekvése folytán szintén stresszes terület a víz szempontjából. Ez az ország jelentette a mérnöki vízgazdálkodás bölcsőjét, ahogyan erre egy 18. századi francia utazótól származó mondás is utal: „Az Úristen megteremtette a világot, a hollandok pedig Hollandiát.” A hollandok jöttek rá elsőként, hogy a természeti adottságokat megváltoztatni nem lehet, megoldást csak az adottságokhoz alkalmazkodó, a felszíni és felszín alatti vizek komplex kezelését célul tűző ökológiai szempontú vízkezelés jelent. A továbbiakban azt tekintjük át, hogy miként változott meg a felszín alatti vizekről való vélekedés az utóbbi évtizedekben és ez hogyan járulhat hozzá a komplex, ökológiai szemléletű vízkezeléshez.

## 4.2. A modern hidrogeológia alapjai

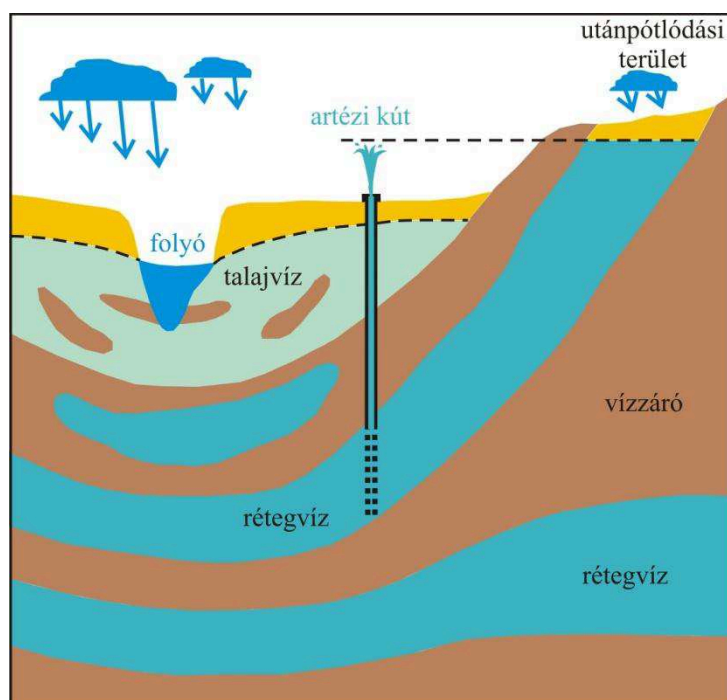
### 4.2.1. A kútfúrás kezdeteitől a 20. század második feléig

A felszín alatti vizekkel foglalkozó vízföldtan vagy hidrogeológia tudományát évezredekön keresztül a víznyerés motiválta. A felszín alatti vizeket, már az ősi civilizációkban is használták ivóvízként, természetes forrásokon vagy fűrt kutakon keresztül. Időszámításunk előtt, 3000-ben az első favázás fűrógép kínai feltalálói, már tudatosan dolgoztak azon, hogy a kőzetekben tárolt vizet berendezésükkel a felszínre hozzák. Bambuszrudakból készült fűrócsövekkel több száz méter mélységből képesek voltak vizet termelni. A kezdetleges, a vádik vizét hasznosító sekély kutak létesítésére a Bibliában is található utalások „És megpihenteté a tevéket a városon kívül egy kútfőnél estefelé, mikor a leányok vizet méríteni járnak” (1 Móz 24,11). Egy nagy ugrással: a reneszánsz fontos előrelépést hozott abban, hogy felismerték a víz körforgását és csapadékvíz talajba szivárgásának lehetőségét. Gondoljunk csak Leonardo da Vinci 14–15. századi írásaira és vázlataira, ezek tükrözik a víz körforgásának megértését.

A következő szakaszban az artézi vizek eredete és mechanizmusa került az érdeklődés homlokterébe. Antonio Vallisneri a *Könyv* (1715) című művében nagy átérezettségű rétegekről ír alacsony átérezettségű rétegek között. Az artézi szó maga Artois francia grófság nevéből származik és két [vízzáró réteg](#) közötti [vízvezető réteg](#)ben tárolt vizet jelent. Kúttal való feltárás esetén a rétegből a föld felszíne fölé emelkedő vízszint várható. A mélyfúrás technológia fejlődése révén 1835-ben a kutak már az 1 km-es mélységet is elérték. Ebből a korszakból származik a Hősök terén található 1878-ban elkészülő, 970 méter mély kút, amely Zsigmond Vilmos bányamérnök tízéves munkájának ma is működő eredménye.

A felszín alatti vízmozgás kvantitatív megértésének első lépése Henry Darcy francia hadmérnök nevéhez köthető, aki 1856-ban kísérleti úton levezette a porózus közegben történő **szivárgás intenzitását** leíró összefüggést. Ennek értelmében a rétegen át történő szivárgás intenzitása ( $q$ ) arányos a vizet mozgató erő nagyságával ( $dh/dl$ ), az arányossági tényező a porózus közeg **vízáteresztő képessége** ( $K$ ). Minél nagyobb a hajtóerő és minél nagyobb a közeg áteresztő képessége, annál intenzívebb lesz a szivárgás.

A 19. századtól egészen a 20. század második feléig tehát a hidrogeológia tudományában az **artézi szemlélet** uralkodott (4.2.1. ábra). Ennek lényege ismert: a legfelső vízzáró fölött található a csapadékból közvetlenül táplálkozó **talajvíz**; alatta pedig, további vízzárókkal elszigetelt víztározó kőzetekben a **rétegvíz**. A rétegvíz utánpótlódása kizárólag a hegylábaknál kibukkanó kőzeteken történik, és a bele fúrt kútban a közlekedő edényekhez hasonlóan a hegylábaknál található vízszint magasságáig emelkedik fel a víz. Az artézi szemlélet fontos sajátossága, hogy a vízzárókon át a rétegek között nem enged meg semmiféle vertikális kommunikációt.



4.2.1. ábra: Az artézi szemlélet koncepció vázlatja

Ekkoriban a vízföldtan tudományának kizárólagos feladata a vízkincsek felkutatása és kutakkal történő feltárása volt. A korlátozás nélküli vízhasználat azonban az 1950-es évekre kitermelte saját környezetvédelmi problémáit. A mértéktelen fogyasztás hatásai források elapadásában, kutak kiszáradásában, a térfelszín süllyedésében és a vízkészletek elszennyeződésében jelentkeztek. Világossá vált, hogy a felszín alatti vizeken belüli nagyobb dinamikai összefüggések megismerése nélkül e problémák már nem orvosolhatók.

#### 4.2.2. Az „artézi” szemlélet túlhaladottá válása

Nézzük meg, hogy milyen felismerések vezettek az „artézi” vagy elszigetelt víztartókban és vízzárókban gondolkodó szemlélet túlhaladottá válásához. Első lépés a korábban vízzárónak vélt kőzetek általános érvényű tökéletes szigetelőképességének megkérdőjelezése

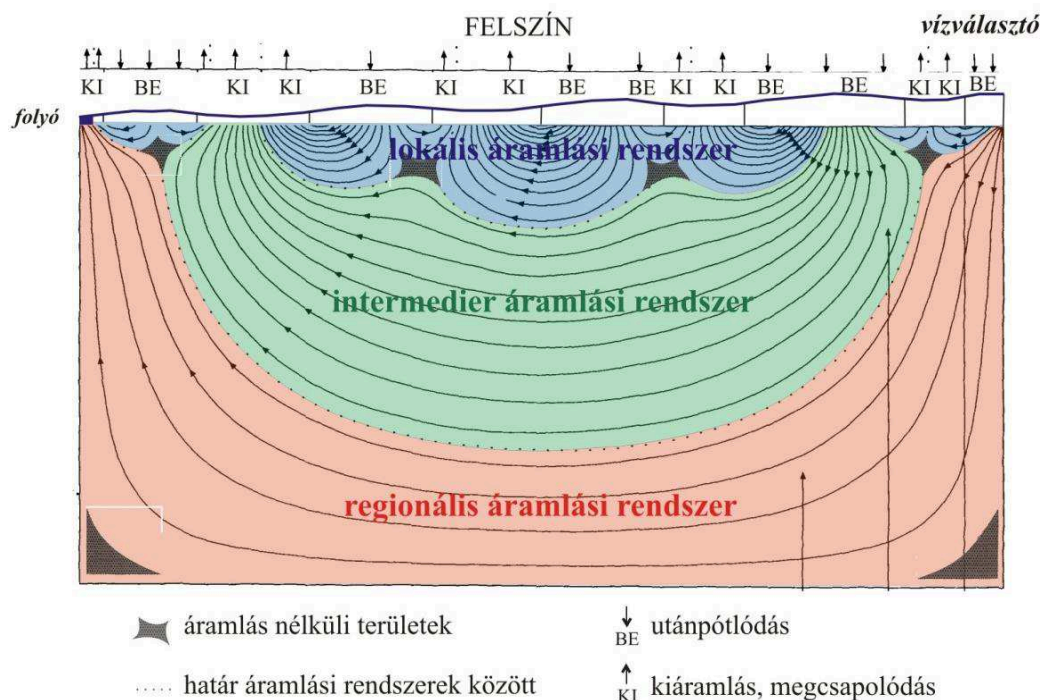
volt, amely Thomas C. Chamberlin nevéhez köthető az 1800-as évek végén.

1940-ben King Hubbert a folyadékdinamika törvényét a felszín alatti térre alkalmazva megállapította, hogy a vízrészecskéknak a felszín alatt is mozgásban kell lenniük és ezt a dinamikát alapvetően a felszín alatti energiamező határozza meg. Mi is ez az energiamező? A felszín alatti vizek – a folyókhhoz hasonlóan – uralkodóan a térfelszín magasságkülönbségei, tehát a gravitáció révén mozognak, csakhogy ez a vízmozgás a felszín alatt, a kőzeteken át zajlik. Kitüntetett szerepű ebben a talajvízszint. Alatta a pórusokat teljes egészében víz tölti ki. A talajvíz szintkülönbségei, a térfelszín magasságkülönbségeihez hasonlóan, mozgásba hozzák az alatta található vizet. Mégpedig úgy, hogy a víz a magasabb talajvízszintű, azaz energiájú helyek felől az alacsonyabb talajvízszintű, energiájú helyek felé áramlik a pórusokon át a talajvízszint-különbség kiegyenlítésére.

Hubbert arra is rájött, hogy a **folvadékpotenciál** ( $\Phi$ ) rendkívül könnyen meg is mérhető. Az általa levezetett összefüggés alapján arányos a víztermelési célból kialakított kutakban, azaz potenciométerekben mért **hidraulikus emelkedési magasság**, **nyugalmi vízszint** tengerszint feletti magasságával ( $h$ ) az arányossági tényező, a nehézségi gyorsulás ( $g$ ).

A víz mindig a nagyobb potenciálú, energiataralmú hely felől mozog a kisebb felé. A közeg és a víz vezetőképességi mutatójának ismeretében a **vízszivárgás intenzitása vagy fluxus** is meghatározható, a Darcy által korábban megállapított összefüggés alapján. Analitikus számítással, numerikus szimulációval vagy nagyszámú kútban megmérve a nyugalmi vízszinteket, két vagy három dimenzióban meghatározható a folyadékpotenciál felszín alatti eloszlása, ebből a felszín alatti vízmozgás iránya, a **hidraulikus vezetőképesség** ismeretében akár intenzitása is.

E felismerések ellenére az artézi gondolkodást felváltó új, **modern, dinamikus hidrogeológia** kialakulására még két évtizedet kellett várni. Egy kanadai magyar származású hidrogeológus, Tóth József 1962–63-ban vízkutatás közben elhatározta, hogy megérti „egy esőcsepp útvonalát attól a helytől és pillanattól kezdve, amikor az beszivárog a talajba addig, amíg újra a felszínre kerül”. „Lássuk csak hová akar menni a víz magától, határoztam el és megoldottam a folyadékmozgást a felszín alatti vizekre alkalmazó Laplace egyenletet.” Két dimenzióban kiszámolta a folyadékpotenciál eloszlást egy elméleti, vízzárókkal határolt, lineárisan lejtő térfelszínű, azonos szemcseméretű homokkal kitöltött medencére (Tóth, 1962, 1963). A folyadékpotenciál képből és a rájuk merőlegesen megállapított áramvonalakból kiderült, hogy a medence felső felében a víz vertikális értelemben lefelé, míg a medence alsó felében felfelé szivárog. Azaz **áramlási rendszer** fejlődik ki. Számítását később szinusz függvényvel közelítő hullámosan lejtő medencére is megismételve az derült ki, hogy a medencében különféle rendű áramlási rendszerek alakulnak ki (Tóth, 1963): **regionális rendszerek** a medence fő vízválasztója és fő völgye között, lokális áramlások a szomszédos helyi magas és mélypontok között, illetve **intermedier rendszerek** a köztes magaslati és mélypontok között (4.2.2. ábra). Később a matematikai analízist elvégezték különféle kőzetösszetételű, rétegekkel, lencsékkel és szerkezetekkel tagolt, a valósághoz jobban közelítő medencékre. Az eredmény holland hidrogeológusok szóhasználatával élve a „hierarchikusan fészkelte áramlási rendszerek” néven vonult be a szakmai köztudatba. Az ábra figyelemre méltó üzenete, hogy a felszín alatti vízáramlások a felszínen is mozaikosságot idéznek elő. A különféle rendű áramlási rendszerek **utánpótlódási**, **átáramlási** és **megcsapolódási területei** egymás szomszédságában találhatók.

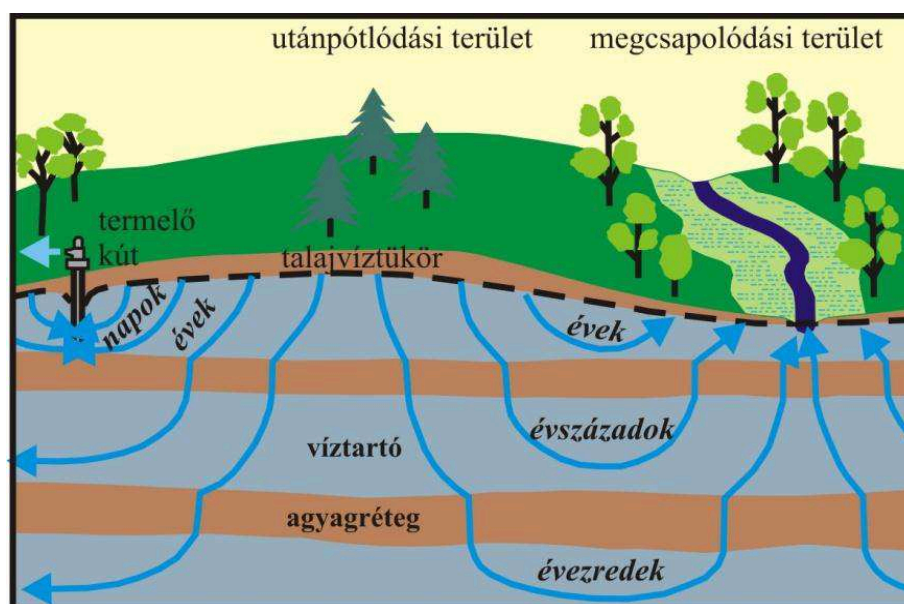


4.2.2. ábra: Az összetett medence áramképe, áramlási rendszerek és felszíni hatások (Engelen és Kloosterman, 1995 után módosítva)

#### 4.2.3. A „dinamikus paradigma” jellemzői és gyakorlati következményei

E felismerések nyomán indult fejlődésnek a modern szemléletű hidrogeológia, amely nem vízzárókkal elválasztott, hanem a folyadékpotenciál-különbségek által mozgatott összefüggő medencebéli áramlási rendszerekben gondolkodik. Ennek megfelelően a talajvízszint a felszín alatti vízáramlási rendszerek felső potenciálfelületeként kezelhető. Kutatási vagy gyakorlati feladatok megoldása során célunk, hogy egy-egy medencére megértsük a vizet mozgató erőket, a **vízfogók** és vízvezetők eloszlását és a vízáramlási képet. Az új szemléletű hidrogeológia további fontos praktikus üzenete, a tér- és időskálák teljes spektrumában való gondolkodás. A léptékfüggésből következően minden gyakorlati feladathoz, meg kell találni a megoldáshoz szükséges vizsgálati méretarányt. Gyakran a „lokális” problémákat – mint egy forrás kiapadása vagy egy vízáramlásokkal érintett vizes élőhely kiszáradása – az áramrendszerek hierarchizáltságából következően, a probléma helyén akár 10–50 km-rel is túlmutató „regionális” keretbe helyezve lehet, és kell megoldani. Nagyon lényeges új felismerés, hogy a kőzetek vízáteresztő képessége skálafüggő. Geológiai időléptékben az agyagos kőzeteken keresztül is lehetséges az átszivárgás. Ugyanezek a kőzetek rövid időtartamig laboratóriumban elemezve, például mérnöki, építészeti célból vízrekesztőként viselkednek. Ez a fajta léptékfüggés tükröződik abban is, hogy a vízrészecskék egy része mindössze néhány napot, mások viszont több ezer vagy akár millió évet is eltöltenek a felszín alatt (4.2.3. ábra).

Az új dinamikus hidrogeológia szemlélet rávilágít arra, hogy a talajvíztükör alatt zajló földtani folyamatokban mindenhol számolnunk kell a folyadékok hatásával. A felszín alatti vizek utánpótlódásuk és megcsapolódásuk révén azonban a felszínre is hatnak, alakítják környezetüket és kapcsolatba kerülnek a felszíni vizekkel. E felismerések oda vezettek, hogy mára a hidrogeológia – víznyerési feladatain túl – földtani és környezeti alaptudománnyá vált.



4.2.3. ábra: A vírzecskék felszín alatti tartózkodási ideje (USGS után módosítva)

### 4.3. A „modern” hidrogeológia környezettudományi szerepe

#### 4.3.1. Felszín alatti vizek, ásványvizek, gyógyvizek és termálvizek

A felszín alatti vizek feltárása és használatának tervezése hagyományosan a hidrogeológia feladata. Ehhez képest is újat nyújt a modern hidrogeológia. A korszerű, ökológiai szempontú vízgazdálkodás a vízrendszerek, az áramlási pályák és az áramló vízmennyiségek ismeretére épül. Természetesen meghatározó szempont a felszín alatti és felszíni vizek komplex, a vízkörforgalom keretrendszerébe helyezett, ökológiai szemléletű kezelése. Hollandia és Japán vállaltak vezető szerepet abban, hogy vízgazdálkodásukat a fenti elvek szerint építsék ki. E szempontok érvényesítése Magyarországon is kulcsot adhat – más egyéb akut problémák mellett – a belvíz és aszály kezeléséhez.

Megváltozott táplálkozási szokásaik révén napjainkban egyre többen az ásványvizek fogyasztása mellett döntenek. A palackozott víz kereskedelme komoly üzletággá nőtte ki magát. Leszögezhető, hogy az ivóvíz, a természetes ásványvizek, a gyógyvizek, és a termálvizek ugyanazon természeti folyamatoknak köszönhetően alakultak ki: a felszín alatti víz mozgása során bekövetkező víz-közet kölcsönhatás következtében. E vizeket minden esetben forrásokból vagy fúrt kutakból nyerjük. A különbségtétel közöttük emberi eredetű, fogyasztási, használati céljainkat szolgálja, és fizikai, kémiai összetételbeli különbségeken, fiziológiai hatáson és jogi elismertségen alapul. Az ivóvízminőség törvényi szabályozása jelent garanciát arra nézve, hogy a poharunkba kerülő víznek megfelelő legyen a biológiai minősége, ne tartalmazzon egészségre ártalmas kémiai komponenseket, hőmérséklete, színe kielégítse az ivóvíz iránt támasztott igényeket.

A természetes ásványvíz élelmiszernek tekintendő, a biológiai vízigény, a szomjúságoltás teljes vagy részleges kielégítésére fogyasztjuk. Az elmúlt három évtized Magyarországon is sok változást hozott az ásványvizek használata terén, hiszen az 1979-es 2,4 l/fő fogyasztás 2009-re 110 l/fő-re emelkedett. Ezért célszerű e kérdéssel is foglalkozni.

A Kárpát-medence fekvése és geológiai adottságai révén rendkívül gazdag ásvány- és gyógyvizekben. A 2004 előtti szabályozás értelmében a természetes ásványvíz emberi fogyasztásra szánt, elismert víz, amely legalább 1000 mg/l oldott ásványi sókat tartalmaz, vagy oldott anyag tartalma 500–1000 mg/l közötti, de egyéb értékes ásványi anyagok is jelen vannak benne, optimálisan fluor, jód, kén vagy szén-dioxid.

Az Európai Unióhoz való 2004-es csatlakozás e tekintetben is változást hozott. Az ott érvényben lévő „mediterrán” ásványvízfogalom az alacsonyabb oldott anyag tartalmú vizeket is ásványvízként kezeli. A csatlakozással megtörténtek azok a jogszabályi átalakulások Magyarországon, melyek értelmében megszűntek az oldottanyag-tartalomra vonatkozó megkötések. A fogyasztók többnyire nincsenek tisztában azzal, hogy palackozott ivóvizet vagy ténylegesen az ásványi anyagok szervezetbe jutását biztosító vizet fogyasztanak-e. Holott e kérdés megválaszolása az ásványvízfogyasztás jelenlegi mértéke mellett rendkívül fontos lenne.

Sokan a hálózati vízzel kapcsolatos aggodalmaik miatt fordulnak az ásványvízfogyasztás felé. Kétségtelen, hogy a vízvezeték minősége, az, hogy műanyag vagy ólomvezeték, befolyásolja a vezetéken érkező víz minőségét. Sok emberben él a tévhit – főleg a karsztforrások fővárosi gazdagsága miatt –, hogy Budapest ivóvízellátása legalábbis részben karsztvizekre épül. A főváros vízellátása teljes egészében parti szűrésű vízkészleteken alapul. Joggal felmerül a kérdés, hogy a Dunába a szennyvizekkel bekerülő szteroid és nem szteroid alapú gyógyszermaradványok bekerülnek-e parti szűrésű kutakba és a vízvezetékbe. A Műegyetem és a Fővárosi Vízművek 2010-es közös kutatása azt mutatta, hogy nem.

A **gyógyvíz** – orvosiilag bizonyítottan gyógyhatású víz – szomjúságoltásra kellemetlen íze miatt sem használható. Elsősorban a megelőzést és a gyógyítást szolgálja (Borszéki, 1998).

Ismert, hogy hazánk területe alatt magas a geotermikus gradiens, átlagosan 45 °C/km. Közvetlenül a felszín alatt törmelékes üledékek vagy repedezett mészkő, dolomit található, mely kőzetek jó víztárolóként működnek. A **termálvíz** – a hazai definíció szerint a legalább 30 °C-os víz – az ország területének több, mint 70%-án rendelkezésre áll. Elmondhatjuk, hogy hazánkban adottak a természetes geotermikus rendszerek elemei: a hő, a tározó, és a közvetítő fluidum, a víz. Ugyanakkor a kihasználás terén még van előrelépési lehetőség. Hazánk területe alatt az átlagos hőáram 90–100 mW/m<sup>2</sup>, ami azt jelenti, hogy 500 méter mélységben a hideg területek kivételével az átlaghőmérséklet 35–40 °C. A magasabb hőmérsékletet – 45–70 °C-t –, a vízáramlás fűtő hatása okozza. Nagyobb mélységben az áramlás által okozott hőmérsékleti anomália lecsökken. 1000 méter mélységben az átlaghőmérséklet 55–65 °C, 2000 méter mélységben pedig 110–120 °C, a melegebb területeken 130–140 °C.

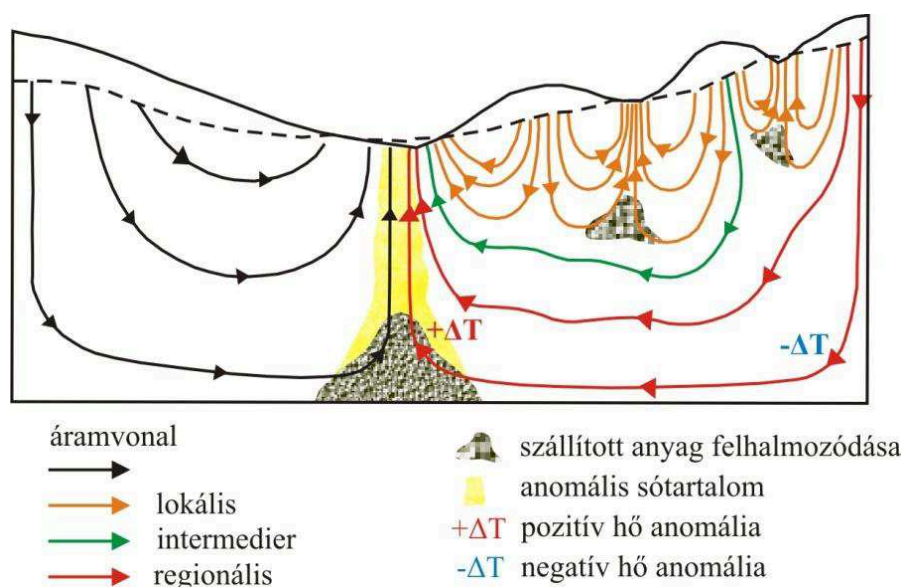
A hőhasználat révén a geotermikus energia energiamérlegben való aránya azonban Magyarországon mindössze 4 PJ (Mádlné Szőnyi et al., 2009). A felszín alatti vizekkel ugyanakkor 26–38 PJ/év hőt termelünk ki, melynek csupán 10%-át használjuk energetikai célra, a többi a vízzel elfolyik. Magyarországon a földhő kapacitás 50%-át a fürdési felhasználás teszi ki, ami önmagában még nem lenne baj. De mindezt úgy tesszük, hogy közben a hőt többnyire elpazaroljuk, csak ~14% hasznosul fűtésre. Azaz a balneológiai hasznosítás előtt vagy után – a hőmérséklettől függően – a vizet lehűtik, többnyire hőenergiájának hasznosítása nélkül. Ezért tartják rólunk még ma is szakmai körökben azt, hogy: „a magyarok elpancsolják földhő energiájukat”. A balneológia, a termálturizmus, az



ehhez kapcsolódó geotermikus energia hasznosítási lehetőségek a világon mindenhol előtérbe kerültek és elsőbbséget élveznek a magyar jövő szempontjából is. A Pannon-medence megújuló energetikai és termálturisztikai „hungaricumát” ezért valós súlyán és értékén kell kezelnünk.

#### 4.3.2. A felszín alatti vizek mint környezeti tényezők

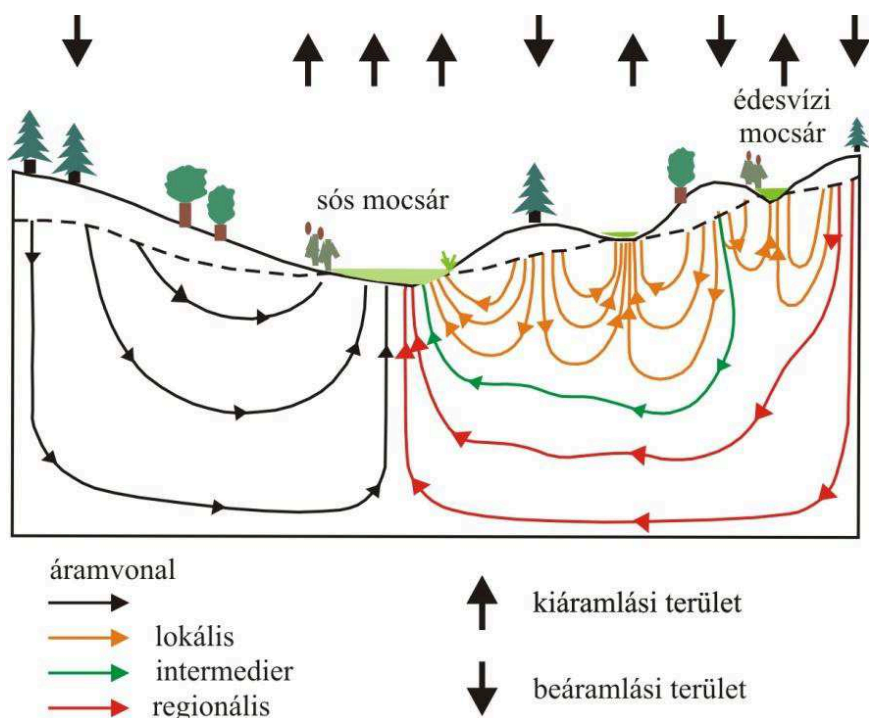
Az új dinamikus hidrogeológia szemlélet rávilágít arra, hogy a talajvíztükör alatt zajló földtani folyamatokban mindenhol számolnunk kell a folyadékok hatásával. A geológiai időskálán működő vízáramlások a kőzetekkel kölcsönhatásba lépve anyagokat oldanak ki. Többek között így alakul ki például a vizek oldott sótartalma. Az áramlások az oldott anyagot szállítják, majd felhalmozzák ott, ahol energiájuk minimálisra csökken. Hozzájárulhatnak így érctelepek, szénhidrogén felhalmozódások kialakulásához (4.3.1. ábra). De részt vesznek a hő felszín alatti szállításában is.



4.3.1. ábra: A felszín alatti vizek mint földtani hatótényezők

A felszín alatti vízáramlások a kőzeteken keresztül történő lassú szivárgás során fellépő oldási folyamatok révén sóforrást biztosítanak a szikesedéshez. A Duna–Tisza közén kimutatott felszín alatti vízáramlásokat és a felszíni szikesedési mintázatot összehasonlítva kiderült, hogy a sóforrást a medencealjzat NaCl-os és a medencekitöltés NaHCO<sub>3</sub>-os típusú vize biztosítja, melyek a medencealjzatban uralkodó túlnyomásnak köszönhetően fölfelé mozognak. Kutatásaink rámutattak, hogy a felszín alatt kimutatható vetők, szerkezeti elemek utat nyithatnak a feláramló magas oldottanyag-tartalmú víznek és szerepet játszhatnak abban, hogy e vizek megközelítsék a földfelszínt. Azt, hogy a szikes területek milyen mintázatban fordulnak elő a felszínen, azt már a felszínről induló és a térfelszín magasságkülönbségei által mozgatott vizek geometriája is befolyásolja. Ezek végzik el a diffúzió útján a rendszerbe kerülő só kiosztását. Érdekes különbség figyelhető meg a Duna- és a Tisza-völgy között a szikesedési mintázatot tekintve, melynek okait az áramlási rendszerekben kell keresnünk (Mádl-Szőnyi és Tóth, 2009).

A felszín alatti vízáramlások érintik a biológiai sokféleség megőrzése szempontjából oly fontos felszín alatti vizektől függő tavak és vizes élőhelyek állapotát (4.3.2. ábra).



4.3.2. ábra: A felszín alatti vízáramlások hatása a felszínre

A felszínen vízhiányos, vagy éppen víztöbblettel bíró területeket eredményezhetnek akár egyazon régióban is. Továbbá hatással vannak az ott található tavak vízkészletére és hidrológiai viselkedésére is. Így van ez a már példaként említett Duna–Tisza közti hátság esetében is. A beáramlási területek alatt mélyen található a talajvíztükör, így az itt található tavak csapadékhiányos időszakban a talajvíztükör tartós süllyedésével ki is száradhatnak. Ma már tudjuk, hogy azok a tavak vagy wetlandek a legérzékenyebbek a kiszáradásra, melyeket rövid felszín alatti pályájú, **lokális áramlási rendszerek** táplálnak alulról. Ezek ugyanis a talajvíztükör süllyedésével akár meg is szűnhetnek.

A regionális **kiáramlási területeken** a talajvíztükör a felszín közelben található és alig-alig változik. Ezt láthatjuk Kelemen-szék esetében, melynek vize és szikes környezete az alulról érkező oldott sók hatásait is mutatja. Az áramlási rendszerek szempontjából köztes helyzetű a Kolon-tó, amely vizet kap a hátság irányából és vizet ad le a mélyebb fekvésű területek irányába.

Ebből az alaphelyzetből nyilvánvalóan következik, hogy a felszíni vízrendezések, lecsapolások, csatornaépítések is hatnak a felszín alatti vizek állapotára és viszont. Egy közelmúltban készült kutatás rámutatott arra, hogy a Duna-völgyi szikes zónában található – eredendően megcsapolódási helyként funkcionáló – Kelemen-szék esetében a felszíni vízrendezések úgy módosították a tó környezetének áramlásait, hogy a terület fő megcsapoló helye, azaz legmélyebb pontja a Duna-völgyi főcsatorna lett. A tó körül kialakult egy lokális áramlási rendszer, melynek utánpótlódási területe, a tótól kb. 4 km-re nyugatra található magaslat, míg megcsapolódási helye a főcsatorna. Tehát módosult a tó eredeti, megcsapolódási hidraulikai helyzete. Ugyanakkor a tó stabil kémiai jellegét továbbra is a mélyből érkező sóutánpótlás biztosítja.

Az előzőekből következik, hogy hazánkban az aszály által leginkább érintett területek a Duna–Tisza köze, a Nyírség utánpótlódási régiói alatt találhatók. Ott, ahol a talajvíztükör eleve mélyen van, és további süllyedése a tavak kiszáradásához és súlyos mezőgazdasági

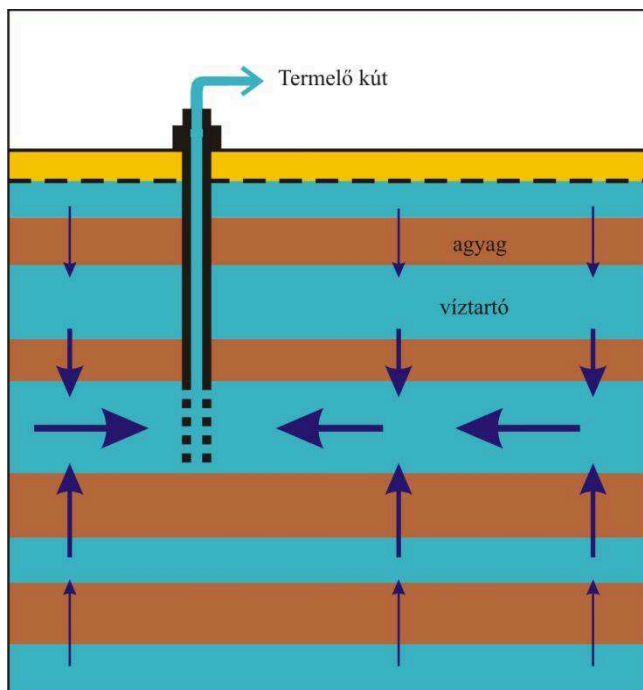
gondokhoz vezet. Itt az öntözés sem segít, ugyanis az öntözővíz is elszivárog a mélység irányába.

Ugyanakkor a Nagykunság regionális kiáramlási terület az áramlási rendszerek szempontjából és felszín közeli talajvízszinttel jellemezhető. Itt a folyóvízi lefolyás és a felszínre hulló csapadék sem tud a mélység felé utat találni magának és a felszín alatt lefolyni. Ez a legfőbb oka a belvíz és árvíz kezelhetetlenségének a Tisza vízgyűjtőjén.

#### 4.3.3. A felszín alatti vizeket érintő emberi tevékenységek

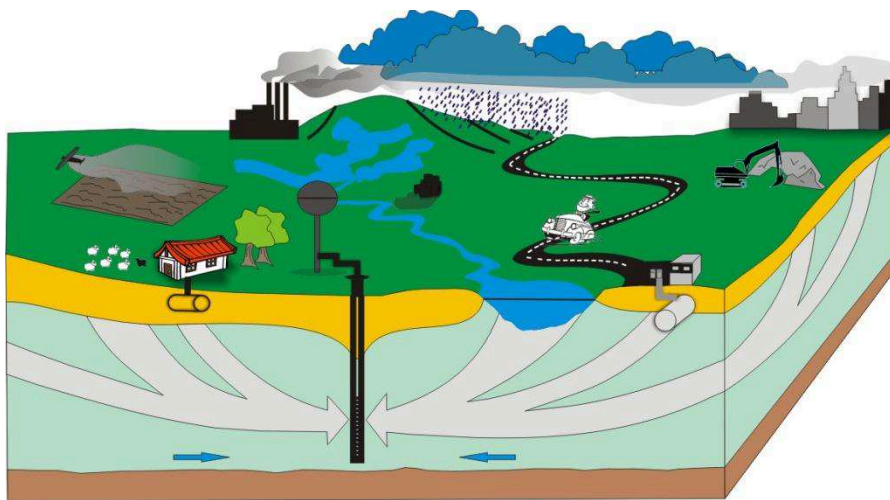
A litoszféra vizeire hatnak az időjárási és éghajlati változások, a folyóvizek áradása, továbbá a tavak lecsapolása, az öntözés és a vízkivételek is. A felszíni vizekkel való szoros kölcsönhatás következtében például adott területen a csatornák feltöltését követően a felszín alatti vízviszonyok is rehabilitálódnak.

A felszín alatti vizek mennyiségi állapota szempontjából legmeghatározóbb befolyásoló tényező a felszín alóli vízkitermelés. A légkörrel közvetlenül kapcsolatban álló víztartóknál vízszintcsökkenés figyelhető meg a víztermelés hatására, de bekövetkezhet a víztartót megcsapoló források hozamcsökkenése vagy elapadása is. Ez történt más források mellett a tatai Fényes-források esetében is, a Dunántúli-középhegységben bányászati célból történt vízkivétel következtében. A rendszerváltást követően felhagytak a bányászati célú karsztvízszivattyúzással és a 2000-es évek első felében a vízszint regenerálódásával a források ismét megjelentek. Elfedett víztartók tartós szivattyúzása esetén a folyadékpotenciál mesterséges csökkentésével egy idő után nemcsak a rétegből termeljük a vizet, hanem átszivárgás indulhat meg a környező vízfogó rétegeken is, amely szélsőséges esetekben akár a talajvízszintig is kihathat (4.3.3. ábra). A Debreceni Vízművet ellátó mélyfúrású kutak hosszú idejű szivattyúzása átszivárgást indított el a környező vízfogó agyagrétegeken keresztül a debreceni Nagyerdő területén és ez a talajvíztükör szintjéig ható folyadékpotenciál csökkenéshez vezetett (Marton, 2010), melynek hatására a talajvíztükör szintje 12–14 méter mélyre szállt. A csapadékszegény időben ilyen mélységből a fák sem kaptak elegendő vizet, többen erre vezetik vissza bizonyos nagyerdei fák károsodását (Marton, 2010). A másik következmény, hogy a termeléssel megbontjuk a vízzel telített víztartó mechanikai egyensúlyát, melyre az tömörődéssel reagál. Az alsó pleisztocén réteg közel 100 éves termelése révén itt is bekövetkezett a rétegtömörödés. A felszín alatti víztermelés itt 1968-ban érte el csúcát, évi 20 millió m<sup>3</sup>-t. Fuzzy aritmetika alkalmazásával meghatározták a vízadó és a fölötte található vízfogó réteg tömörödése miatti süllyedést, a vízkivétel centrumában erre legvalószínűbb értéként 0,4–0,7 méter adódott. A termálvizek hőhasznosítása során is alapvető szempont a rezervoárok hosszú távú termelhetősége, melyet az energetikai célú zárt rendszerű termálvíz hasznosítás során, a lehűlt víz visszasajtolása biztosít.



4.3.3. ábra: Rétegzett víztartó rendszer termelése

A felszín alatti vízáramlásokkal nemcsak a víz közvetítődik, hanem a szennyezők is (4.3.4. ábra). A vizek minőségét károsítja a szakszerűtlen műtrágya-adagolás, az illegális személtlerakás. A csatornázatlan területeken a házi emésztők gyakran a szennyvizek felszín alatti vízbe jutását eredményezik. Benzinkutak tartályainak szivárgásából is bekövetkezhetnek vízszennyezések. Az állattartó telepekről hígtrágya juthat a felszín alatti vízbe.



4.3.4. ábra: A felszín alatti vizek szennyező forrásai

Az utak téli sózásának hatása Budapesten kimutatható a rózsadombi barlangok csepegő vizeiben. Ha a felszín alatti vizeket kutakkal termeljük, akkor a szennyezett víz mozgását mesterségesen felgyorsítjuk. Problémát okoz, hogy a szennyezettségről többnyire csak a kútban, forrásban való megjelenéskor értesülünk. Emiatt az elszennyeződött mélységi vizek rehabilitációja rendkívül költséges és többnyire az eredeti állapot nem is állítható helyre.

A szennyezőkre különösen érzékenyek a karsztok. Itt ugyanis a felszínihez hasonlóan gyors szennyező terjedés is lejátszódhat. A hazai legnagyobb, 2006 júniusában bekövetkezett felszín alatti vízszennyezés a Bükk karsztterületén érte a Miskolctapolcai Vízművet. A sajnálatos ajkai vörösiszap balesetnél is csak a karsztos kőzetet védő több száz méteres fedőrétegnek és a hidraulikai helyzetnek volt köszönhető, hogy a szennyező nem érintette a karsztvizet és döntően felszíni lefolyással haladt tovább.

#### 4.4. Függelékek

##### 4.4.1. Bibliográfia

- Borszéki, B. Gy.: Ásványvizek, gyógyvizek, MÉTE Kiadó, Budapest, 1998.
- Marton, L.: Az ivóvízkészletek védelmének hidrológiai vonatkozásai, Debreceni műszaki közlemények, 2 (2010), 31–48.
- Mádlné Szőnyi, J., Rybach, L., Lenkey, L., Hámor, T., Zsemle, F.: Fejlődési lehetőségek a geotermikus energia hasznosításában, különös tekintettel a hazai adottságokra. Magyar Tudomány, (2009) Augusztus, 989–s1003.
- Padisák, J.: Általános Limnológia, ELTE, Eötvös Kiadó, (2005), 310.
- Somlyódy, L.: Töprengések a vízről – lépéskényszerben, Magyar Tudomány, 4(2008), 462–473.
- Tóth, J.: A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada, Journal of Geophysical Research, 67(11), 4375–4387.
- Tóth, J.: A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, Journal of Geophysical Research, 68(16): 4795–4812.
- UNESCO: Water in a changing world, The United Nations World Water Development Report 3(2009), 349.

##### 4.4.2. Fogalomtár

**Artézi szemlélet:** A 19. századtól a 20. század második feléig uralkodó hidrogeológiai szemlélet, fontos sajátossága, hogy a vízzárókon át a rétegek között nem enged meg semmiféle vertikális kommunikációt.

**Áramlási rendszer:** az áramvonalak azon készlete, amely bármelyik pontjában két szomszédos áramvonal szomszédos marad a rendszer egészén keresztül

**Ásványvíz:** Eredeténél fogva tiszta, minden kémiai és mikrobiológiai szennyezőtől és emberi beavatkozástól mentes természetes víz. Kedvező összetételben és kedvező mennyiségben tartalmaz ásványi anyagokat, makro- és mikroelemeket, egészséges. Védett vízáadó rétegből származik.

**Átáramlási terület:** A felszín alatti víz kizárólag laterális áramlási komponenssel rendelkezik.

**Beáramlási vagy utánpótlódási terület:** A felszín alatti víz áramlásának vertikális komponense lefelé irányul.

**EU Duna Régió Stratégia:** A Duna-medence országainak makro-regionális szintű fejlesztési programja. Magában foglalja a térség legfontosabb energetikai, infrastrukturális és környezetvédelmi projektjeit.

**Folyadékpotenciál ( $\Phi$ ):** Az egységnyi tömegű folyadék összes mechanikai energiájának mennyisége. Felszín alatti eloszlásának ismeretében megállapítható a felszín alatti vizek mozgását befolyásoló energiaeloszlás.

**Glaciológia:** A gleccserekkel, tágabb értelemben a jéggel, illetve az eljegesedéssel kapcsolatos természeti jelenségekkel foglalkozó tudomány.

**Gyógyvíz:** Vegyi összetételénél fogva orvosiilag bizonyítottan gyógyhatással bíró természetes víz.

**Hidraulikus emelkedési magasság, nyugalmi vízszint(h):** Kutakban mérhető paraméter, nagysága a nyomásemelkedésből és a mérési pont helyzeti magasságából (mérési pont helyzete egy

viszonyító síkhoz képest) tevődik össze. A  $h-t$  a nehézségi gyorsulással megszorozva, a mérési pontra vonatkozóan megállapítható a folyadékpotenciál értéke ( $\Phi = gh$ ).

**Hidraulikus vezetőképesség, szivárgási tényező (K):** A közeg és a benne szivárgó fluidum tulajdonságaitól függő vezetőképességi mutató.

**Hidrogeológia, vízföldtan:** A Föld és a víz felszín alatti kapcsolatával foglalkozó tudomány.

**Hidrológia:** A Föld és a víz kapcsolatával tágabb értelemben foglalkozó, a víztömegek globális szférákon belüli és azok közötti szállítódását vizsgáló tudomány.

**Intermedier áramlási rendszer:** A medence közttes magaslati és mélypontjai között kialakult felszín alatti vízáramlási rendszer.

**Kiáramlási vagy megcsapolódási terület:** A felszín alatti víz áramlásának függőleges komponense felfelé irányul.

**Limnológia:** Egyféle értelmezésben a nem tengeri állóvizekkel foglalkozó tudomány, míg egy másik felfogás szerint az édesvizekkel, mint komplex – fizikai, kémiai és biológiai kölcsönhatások által létrejövő – rendszerekkel foglalkozó tudományterület.

**Lokális áramlási rendszer:** A medence szomszédos helyi magas- és mélypontjai között létrejött felszín alatti vízáramlási rendszer.

**Modern dinamikus hidrogeológia:** Az 1980-as években kialakult új hidrogeológiai szemlélet. Ennek szellemében a talajvízszint a felszín alatti vízáramlási rendszerek felső potenciálfelülete. A folyadékpotenciál-különbségek által mozgatott összefüggő medencebeli áramlási rendszerekben gondolkodik.

**Potamológia:** A folyamok és folyók tudománya.

**Regionális áramlási rendszer:** A medence fő vízválasztója és fő völgye között létrejött felszín alatti vízáramlási rendszer.

**Rétegvíz:** A talajvíztartótól vízzáró réteg közbeiktatódásával elválasztott, mélyebb helyzetű víztartó vize, amely utánpótlódását kizárólag hegylábi kibúvásain át kapja. Az artézi gondolkodásban használt fogalom.

**Szivárgási vagy folyadékáramlási intenzitás, fluxus (q):** Az egységnyi keresztmetszeten egységnyi idő alatt átáramló vízmennyiség.

**Talajvíz:** A felszínhez legközelebb eső vízrekesztő réteg fölött elhelyezkedő víz, amely kapcsolatban van a légkörrel és az időjárási viszonyok közvetlenül befolyásolják állapotát. Az artézi gondolkodásban használt fogalom.

**Termálvíz, hévíz:** Magyarországon a 30°C-nál melegebb kifolyó vizet adó kutakat és forrásokat tekintjük hévízkutaknak, ill. hévízforrásoknak.

**Vízadó, vízvezető:** vizet tároló és vizet továbbító képződmények összessége

**Vízfogó:** Vízátárolásra és vízvezetésre képes képződmények, de a vízvezetőknél nagyságrendekkel kisebb mértékben.

**Vízzáró:** Elméleti fogalom, abszolút impermeábilis réteg.

## 5. IDŐJÁRÁS, ÉGHAJLAT (MÉSZÁROS RÓBERT)

### 5.1. Bevezetés

A meteorológia a *légkör* folyamatainak és jelenségeinek feltárásával, előrejelzésével és szabályozásával, az [időjárás](#) és az [éghajlat](#) tényezőivel foglalkozó tudomány. A légkört állandó mozgásban lévő egységes, összefüggő, intenzív rendszerként vizsgálja.

A Föld légköre tágabb értelemben a különböző gázok és részecskék tömegének azon összessége, melyet bolygónk saját tengelye körüli forgása, illetve a Nap körüli keringése során magával visz. E tartomány méretéhez képest csak egy szűk rétegen belül, az ún. [troposzférában](#) zajlik az időjárást alakító folyamatok jelentős része. Az időjárás a légkör fizikai tulajdonságainak (léghőmérséklet, légnyomás, nedvességtartalom, szélviszonyok stb.) és az ezeket alakító légköri folyamatoknak (időjárás frontok, [ciklonok](#), anticiklonok, kisebb skálájú légköri folyamatok stb.) egy adott helyen, rövidebb időszak – néhány óra, néhány nap – során a környezettel és egymással is kölcsönhatásban álló rendszere. Az *éghajlat* ezzel szemben valójában az adott földrajzi térség időjárás eseményeinek együttese, a légkör fizikai tulajdonságainak és folyamatainak egy adott helyen, hosszabb időszak – általában néhány évtized – során a környezettel és egymással is kölcsönhatásban álló rendszere. Az éghajlat tehát mintegy keretet szab az időjárás folyamatoknak, jellemzi az adott helyen, vagy tágabb földrajzi térségben előforduló időjárás viszonyok átlagainak és szélső értékeinek statisztikai mérőszámait is.

E fejezetben alapvető légkörtani ismereteket (légkörünk főbb tulajdonságait, annak összetételét és szerkezetét) az időjárással és az éghajlattal kapcsolatos fogalmakat, valamint légköri jelenségeket mutatunk be.

### 5.2. A légkör

#### 5.2.1. A légkör összetétele és szerkezete

A légkör a Földet körülvevő levegőburok gázok keverékéből áll, ezen kívül cseppfolyós és szilárd anyagokat is tartalmaz diszperz (szétszórt) állapotban. Légkörünk tömege mintegy  $5,3 \cdot 10^{15}$  tonna. Ez a mennyiség a [hidroszféra](#) (óceánok, tavak, folyók, felszín alatti vizek, hó és jég összessége) tömegéhez ( $1,4 \cdot 10^{18}$  t) viszonyítva három, a Föld össztömegéhez ( $5,98 \cdot 10^{21}$  t) viszonyítva hat nagyságrenddel kisebb.

A légköri gázokat kétféleképpen csoportosíthatjuk. Az osztályozás egyik szempontja a gázok légköri *tartózkodási ideje*. Eszerint megkülönböztetünk állandó, lassan változó, illetve gyorsan változó gázokat. Állandó gázok a nitrogén ( $N_2$ ), az oxigén ( $O_2$ ), az argon (Ar) és egyéb nemesgázok. Lassan változó gázok például a szén-dioxid ( $CO_2$ ), a metán ( $CH_4$ ), a hidrogén ( $H_2$ ), vagy a dinitrogén-oxid ( $N_2O$ ). A gyorsan változó gázok csoportjába tartozik többek között a vízgőz ( $H_2O$ ), a szén-monoxid (CO), az ózon ( $O_3$ ), a nitrogén-dioxid ( $NO_2$ ), az ammónia ( $NH_3$ ) és a kén-dioxid ( $SO_2$ ). Az állandó jelző itt valójában azt jelenti, hogy ezen gázok légköri tartózkodási ideje hosszú (geológiai skálán azonban változik a mennyiségük). A lassan változó gázok tartózkodási ideje néhány év, esetleg évtized és mennyiségük térben is változik. A gyorsan változó gázok mennyisége rövid időtartam alatt (néhány nap) és kis területen belül is jól érzékelhető.

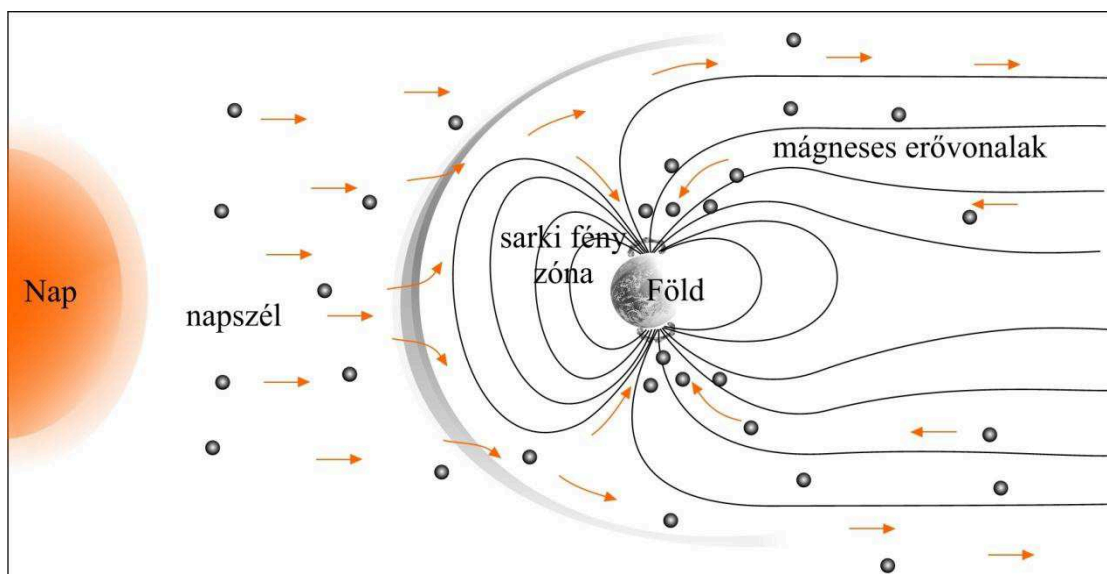
Az osztályozás másik szempontja a gázok mennyiségén alapul. E felosztás szerint nagyobb részarányban előforduló, ún. fő összetevőket és kisebb mennyiségben megtalálható nyomgázokat különböztetünk meg. A fontosabb légköri gázokat az 5.1. táblázatban foglaltuk össze.

		Mennyiség	
		Fő összetevők	Nyomgázok
Tartózkodási idő	Állandó	N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Ar	Egyéb nemezgázok
	Lassan változó	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O,...
	Gyorsan változó		H <sub>2</sub> O, CO, O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> ,...

5.1. táblázat: A légköri gázok osztályozása mennyiség és tartózkodási idő szerint

A levegőben a gázokon kívül nagy számban találhatók szilárd és cseppfolyós összetevők, ún. **aeroszol-részecskék**. Ezek elsősorban (mintegy 90%-ban) természetes eredetűek. Nagy mennyiségű aeroszol-részecske jut a légkörbe vulkánkitörések alkalmával, a talajfelszínről, vagy a tengerek felszínéről porlasztás révén. Kisebb hányaduk (kb. 10%) antropogén forrásokból (például fűtés, közlekedés) származik. Az aeroszol-részecskéket méretük alapján osztályozzuk. A legkisebb méretű részecskék alkotják az ún. nukleációs módot, a légkörben ezek találhatók a legnagyobb mennyiségben. E kis részecskék **koaguláció** hatására nagyobb részecskékké alakulva alkotják az akkumulációs módot. A legkisebb mennyiségben a legnagyobb, a durva módusba tartozó részecskék találhatók a légkörben. Az aeroszol-részecskék fontos szerepet játszanak a felhő- és csapadékképződésben, a felszínlégkör-rendszer sugárzási- és energiaháztartásában, ionokkal, radioaktív izotópokkal összekapcsolódva a légkör elektromos és radioaktív tulajdonságainak meghatározói.

A légkör nem hirtelen, hanem fokozatosan megy át a bolygóközi térbe. Légkörünk voltaképpen megegyezik a magnetoszféra tartományával, mely a Föld mágneses tere és a Naptól kiáramló protonok és elektronok árama, azaz a napszél kölcsönhatásával alakul ki. A magnetoszféra a Föld árnyékos oldalán hosszán elnyúlva ún. geomágneses uszályt képez (5.2.1. ábra).



5.2.1. ábra: A magnetoszféra szerkezete



E tartományon belül a légkör össztömegének a fele 5,5 km alatt, 99% pedig 30 km alatt, tehát a magnetoszférához képest rendkívül vékony rétegben található.

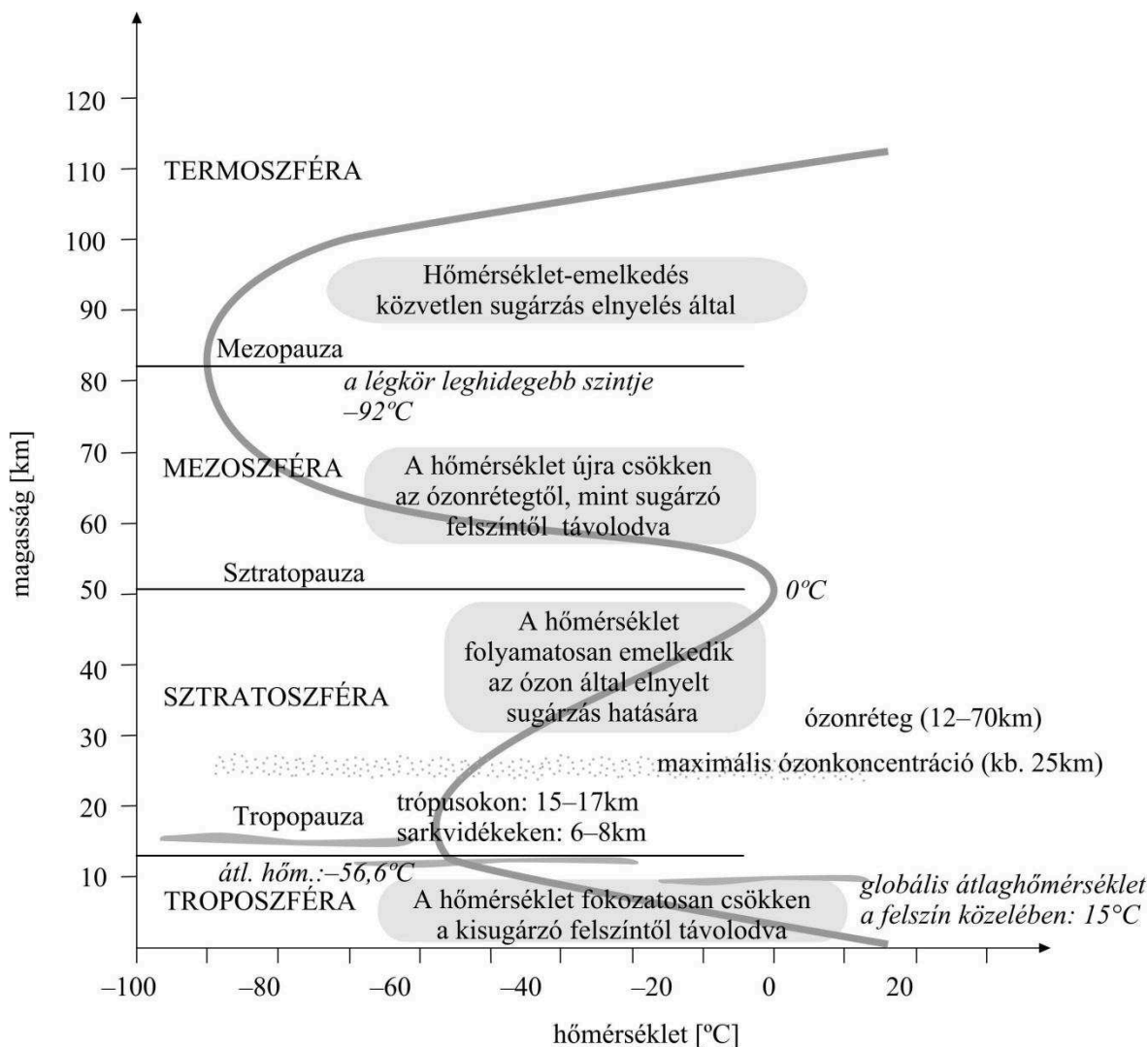
A kémiai összetétel alapján két fő réteget különböztethetünk meg a légkörben. Nagyjából az alsó 80 km-es tartományban a gázok egymáshoz viszonyított aránya közel állandó, amit a sűrűbb közegben uralkodó turbulens, átkeverő mozgások biztosítanak. E réteget homoszférának nevezik. 80–100 km-es magasság fölött a [turbulens áramlás/lamináris áramlás](#) váltja fel. Ennek következtében a légkör összetétele a molekula-, illetve atomsúly szerint alakul. Ez a réteg a heteroszféra, ahol nagyjából 200 km magasságig a molekuláris oxigén, 1 000 km-ig az atomos oxigén, e fölött a hélium, majd 2 500 km-től a hidrogén dominál, de itt már természetesen jóval ritkább a „levegő”, mint a felszín közelében.

A légkör sűrűsége és nyomása a földfelszíntől távolodva először gyorsan, majd mind lassabban, de gyakorlatilag folytonosan csökken. Ezzel szemben a hőmérséklet változásának vertikális eloszlása lényegesen bonyolultabban alakul, melynek átlagos menetét az 5.2.2. ábra mutatja.

A földfelszín a napsugárzás egy részét elnyeli, ezért felmelegszik és alulról melegíti a légkört. Így a hőforrásként felfogható felszíntől távolodva a hőmérséklet egyre alacsonyabbá válik. A hőmérséklet csökkenésének üteme évszaktól és időjárási helyzettől függően igen különböző lehet, sőt egyes rétegekben esetenként a hőmérséklet növekedése (ún. [inverzió](#)) figyelhető meg. A légkör ezen alsó tartományában, melyet [troposzférának](#) nevezünk, a hőmérséklet felfelé haladva 100 méterenként átlagosan 0,65 °C-ot csökken. A troposzféra a közepes földrajzi szélességeken kb. 12 km-es magasságig, a tropopauzáig tart. (A tropopauza feljebb helyezkedik el nyáron, mint télen, és jelentősen függ a földrajzi szélességtől is. Az Egyenlítő környékén akár 18 km-re, míg a sarkoknál csupán 8 km-re tehető.) Itt a hőmérséklet csökkenése megtorpan, egy ideig nagyjából állandó ([izoterm zóna](#)), majd növekedésnek indul a [sztratoszférában](#). E növekedés oka az itt megfigyelhető magasabb ózonkoncentráció. Ez az ózonréteg védi az életet a káros ultraibolya sugaraktól és a napsugárzás 0,22 és 0,28 µm hullámhosszúságú tartományát elnyelve egyben melegíti a sztratoszférát. A folyamatos melegedés kb. 50 km-ig, átlagosan 0 °C-ig tart. A sztratoszférát lezáró újabb izoterm réteg (sztratopauza) felett található [mezoszféra](#), amit ismét a hőmérséklet vertikális csökkenése jellemez. Itt – hasonlóan a felszín felett megfigyelt jelenséghez – a sztratoszféra alulról történő melegítése jelent energiabevételt nagyjából a 85 km-es magasságig, a mezopauzáig. E réteg fölött, a [termoszférában](#) ismét a hőmérséklet magassággal való növekedése észlelhető, az oxigén atomok által elnyelt, 0,2 µm-nél rövidebb hullámhosszúságú sugárzás hatására.

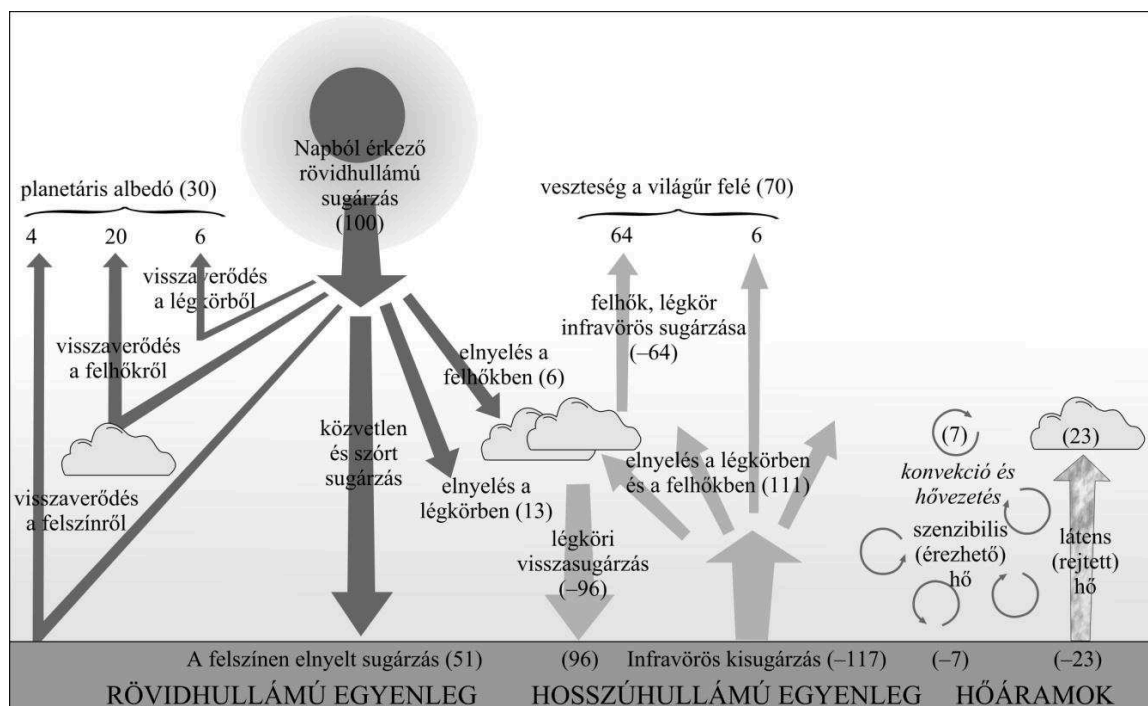
### 5.2.2. A Föld és a légkör hőháztartása

A légkör és a Föld felszíne a Naptól érkező sugárzással energiát kap. Az energiabevétel, az egyes energiafajták közti átalakulás és átadás folyamatosan zajlik, ami a Föld egyes régióiban eltérő mértékű. Ez alapvetően meghatározza a légkörben kialakuló cirkulációs rendszereket, az időjárást és ezzel együtt az éghajlati viszonyokat.



5.2.2. ábra: A légkör szerkezete – a hőmérséklet függőleges menti változása az egyes rétegekben

A sugárzás során energiaátadás történik, melynek keretében a sugárzást kibocsátó fizikai rendszer energiát ad át a környezetének, miközben belső energiájának egy része sugárzási energiává alakul át. A Nap és a Föld esetében ez elsősorban elektromágneses hullámok kibocsátása során valósul meg. A Naptól nagy energiájú elektronok és protonok alkotta részecskesugárzás is érkezik légkörünkbe, ennek jelentősége azonban az időjárás szempontjából elenyésző az elektromágneses sugárzáshoz képest. A földi légkör szinte egyedüli energiabevétele a Nap sugárzása, mely rövidhullámú (4  $\mu\text{m}$ -nél alacsonyabb hullámhosszúságú) elektromágneses sugárzás formájában érkezik a Naptól. A légkörön keresztülhaladó sugárzás egy részét a légkör alkotóelemei szórják, vagy elnyelik. A szóródás a sugárzás irányát változtatja meg. A szóródás következménye többek között az ég kék, illetve a felkelő vagy lenyugvó Nap vöröses színe. A sugárzás elnyelése során a szóródással ellentétben energiaátalakulás történik. A Naptól jövő sugárzás elnyelésében jelentős szerepet játszanak az ózon, a szén-dioxid és a vízgőz. Végül is a felszínre a légköri veszteségek után kevesebb (globális átlagban körülbelül feleakkora) sugárzási energia jut, mint a légkör külső határára.



5.2.3. ábra: A Föld-légkör rendszer évi átlagos energiaháztartása. A szám adatok felszíni és műholdas mérések adatain alapulnak. A számértékek a Napból a légkör külső határára érkező sugárzáshoz viszonyítva (azt 100 egységnek tekintve) jellemzik az egyes folyamatok mértékét

A felszínre érkező rövidhullámú sugárzás egy része a felszínborítottság függvényében visszaverődik, a többi a földfelszín melegíti. A felszínről visszaverődő és a beérkező rövidhullámú sugárzás aránya az **albedó**. Az albedó valójában a felszín rövidhullámú sugárzás-visszaverő képessége; értéke annál nagyobb, minél világosabb a felszín.

A felmelegített felszín a hőmérsékletének megfelelően hosszuhullámú tartományban sugároz a világűr felé. E kisugárzás egy részét a légkör alkotóelemei (légköri gázok, aeroszol-részecskék, felhők) elnyelik, majd egy részüket a felszín felé újra kisugározzva mintegy „visszatartják” a hőt. Ezt a jelenséget nevezzük **üvegházhatásnak**. A legfontosabb üvegházhatású gázok a vízgőz, a szén-dioxid, az ózon, a metán, a dinitrogén-oxid és a halogénezett szénhidrogének. Számítások szerint az üvegházhatás jelensége nélkül, vagyis ha légkörünk a felszíni hosszuhullámú sugárzást maradéktalanul átengedné a világűr felé, a Föld felületének átlaghőmérséklete 33°C-kal hidegebb lenne.

A Föld-légkör rendszer évi átlagos energiaháztartásának legfontosabb elemeit az 5.2.3. ábra szemlélteti. A rövid- és hosszuhullámú sugárzási egyenleg által meghatározott hőenergia részben a légkör melegítésére, részben a felszíni vizek párologtatására fordítódik. Amint már említettük, a légkört a sugárzási folyamatok által felmelegített felszín melegíti alulról. Ez elsősorban a felszínről a légkörbe irányuló konvektív hőszállítás, kisebb mértékben hővezetés formájában megy végbe (e folyamatokat együttesen szenzibilis vagy érezhető hőáramnak nevezzük). Az időjárási folyamatok szempontjából kiemelt jelentőségű vízforgalom részeként pedig a felszínről elpárolgó víz (látens vagy rejtett hőáram) is felhasználja a rendelkezésre álló energia egy részét. Ez a „vízgőzbe rejtett” hőmennyiség a felhő- és csapadékképződés során szabadul fel, melegítve a légkör magasabb részeit. A felszín és a légkör közötti hőáramok jelentős szerepet játszanak a felszín és a légkör közti energiacsereben, az időjárási folyamatok alakításában.

### 5.2.3. A felszín-légkör rendszer vízháztartása

Földünk légkörében kitüntetett a szerepe a víznek. Az egyetlen légköri összetevő, amely három halmazállapotban van jelen. A különböző halmazállapotú vízmennyiséget magában foglaló hidroszféra vízkészlete a globális víztározókban található. Ezek a tengerek, a szárazföldi vizek, a sarkvidéki, illetve magashegységi jég- és hótakaró (**krioszféra**), valamint a légkör. A többi tározóhoz képest elenyészően kis mennyiség található a légkörünkben (a hidroszféra teljes vízkészletének nagyjából 96%-a a tengerekben, kevesebb, mint 2–2%-a a szárazföldi vizekben, illetve a krioszférában található, s mindössze alig 1 ezrelékét tartalmazza légkörünk). E csekély vízmennyiség ugyanakkor a többi tározóhoz képest sokkal gyorsabban változik (a légköri víz átlagos tartózkodási ideje 10 nap, szemben a szárazföldi vizek néhány száz, a tengerek néhány ezer, illetve a krioszféra néhány tízezer éves kicserélődési idejével).

Az egyes víztározók egymás között vízforgalmat bonyolítanak le, melyben kiemelt szerepet kap a légkör. A légkör és más víztározók között a csapadék és a párolgás biztosítják a vízforgalmat. E két folyamat globálisan, évi átlagban kiegyenlíti egymást, értékük  $5,26 \cdot 10^5 \text{ km}^3$ . A Föld egyes területein azonban rendkívül nagy különbségek alakulhatnak ki a csapadék és a párolgás értékeiben. A két mennyiség közötti különbséget a szárazföldi vizek felszíni és felszín alatti lefolyása egyenlíti ki. A szárazföldre összességében több csapadék hullik, mint amennyi onnan elpárolog. A párolgás történhet közvetlenül a talajról is, de a folyamatban igen fontos szerepe van a növénytakarónak. A többlet folyékony halmazállapotban visszaáramlik az óceánokba, tengerekbe. Legkisebb a vízforgalma a jégtakarónak. Ennek az az oka, hogy a jéggel fedett területeken csak nagyon kevés csapadék hullik, továbbá a lefolyást gyakorlatilag a gleccserek olvadása vagy az óriás jégtábláknak a sarki jégtakaróról történő leszakadása jelenti.

Ha a lefolyástól eltekintünk, akkor egy adott terület vízháztartását a csapadék és a párolgás egymáshoz viszonyított aránya határozza meg. A párolgás mértéke attól függ, hogy mekkora sugárzási energia érkezik az adott területre. Ez az energiamennyiség megadja a elpárologtatható vízmennyiséget, az ún. potenciális párolgást. A potenciális párolgás és a csapadék egymáshoz viszonyított aránya alapvetően meghatározza egy adott térség éghajlati viszonyait. Ha a csapadék évi átlagban több, mint a potenciális párolgás, akkor az éghajlat nedves, fordított esetben száraz. A Föld bizonyos területein a potenciális párolgás értéke meghaladja a csapadék mennyiségének háromszorosát is, ezeken a területeken alakulnak ki a sivatagok.

### 5.2.4. A légkör mozgásjelenségei

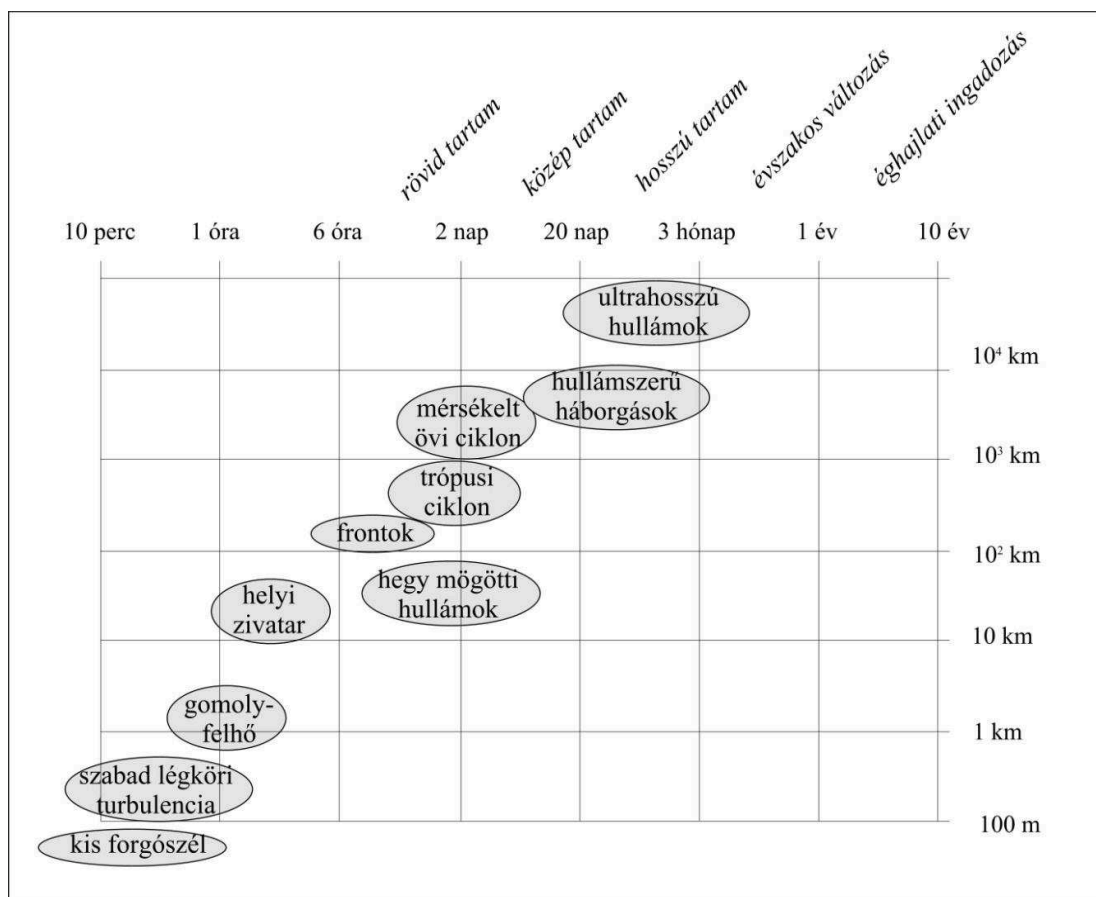
A légköri mozgások alakításában fontos szerepet játszik a Föld különböző régióinak eltérő légnyomása. Ez a horizontális légnyomás különbség termikus okokra vezethető vissza, s így végső soron a levegő mozgását a különböző területek eltérő sugárzás-háztartása befolyásolja. A Nap mint a rendszer motorja, a Föld egyes részeit erőteljesebben melegíti fel, ezért a különböző földrajzi térségek között horizontális hőmérséklet-különbségek alakulnak ki. A melegebb levegőben a levegőrészecskék több energiával rendelkeznek, mozgékonyabbak, mint a hidegben. A mozgékonyabb légrézecskekből álló meleg levegő kiterjed, s ezáltal csökken a sűrűsége. A könnyebb, meleg levegő felemelkedik, s a magasban szétterül. Így a melegebb terület felett összességében kevesebb levegőrészecske marad, ami a felszíni légnyomás csökkenését vonja maga után. A magasban szétterülő levegő fokozatosan lehűl, s más területek fölé jut, növelve ott a levegőrészecskék számát, vagyis a felszíni légnyomást. A magas nyomású területen leáramló levegő a felszínen

széttérülve megindul az alacsonyabb nyomású részek felé, ezzel létrejön a levegő vízszintes áramlása, a szél.

A levegő mozgását azonban egyéb tényezők is befolyásolják. Ezért a szél valójában nem a magas nyomású terület felől az alacsonyabb nyomású terület felé fúj, hanem az azonos nyomású pontokat összekötő görbékkel, az **izobár**okkal közel párhuzamosan. Ez az iránymódosulás a Föld forgásából származó eltérítő erő, az ún. Coriolis-erő következménye, ami az áramlást az északi félgömbön jobbra téríti. A valóságban az izobárok legtöbbször görbült vonalúak, ezért egy újabb erő, a centrifugális erő is fellép. A földfelszín közelében pedig – az előbbieken túl – a felszíni egyenetlenségek miatt fellépő súrlódás is lényegesen befolyásolja a levegő mozgását.

Eddig horizontális áramlásokról beszéltünk, de az időjárás szempontjából nagy jelentőségűek a függőleges menti elmozdulások is. A levegő feláramlása, vagyis a konvekció a felhő- és csapadékképződés egyik alapfeltétele.

Földünk légkörének általános cirkulációját különböző tér- és időskálájú mozgásrendszerek összessége alkotja. Ide tartoznak a kis méretű, rövid időtartamú portölcsérek, de az egész Földet körülölelő planetáris hullámok is (5.2.4. ábra).



5.2.4. ábra: A Föld légkörének különböző tér- és időskálájú mozgásrendszerei

Hazánk területén elsősorban a mérsékletövi ciklonok és az ezekhez kapcsolódó időjárási frontok, valamint az anticiklonok teszik változatossá időjárásunkat. A mérsékletövi ciklonok és anticiklonok alacsony-, illetve magas nyomású légörvények. A ciklonon belül markáns választó felületeket, időjárási frontokat találunk. Ezek mentén a

légköri állapotváltozások értékei gyors változást szenvednek. A frontok mentén jelentős feláramlás alakul ki, amely jellegzetes frontális felhőrendszereket hoz létre és esetenként kiadós csapadékot okoz. Ezzel szemben az anticiklonban nincsenek frontok. Az anticiklonban uralkodó leszálló légáramlatok a felhőzet feloszlását eredményezik. A nyugodt, felhőmentes területeken gyakoriak a hőmérsékleti szélsőségek, a szélsőséges időjárás a szennyezőanyagok koncentrációjának növekedését idézheti elő.

#### 5.2.5. A légkör vizsgálata

A légkör pillanatnyi állapotának felméréséhez, valamint a várható jövőbeli alakulásának előrejelzéséhez a meteorológiai mérések és megfigyelések nyújtanak segítséget. Az adatgyűjtés eszközeit és módszereit a Meteorológiai Világszervezet szabályozza. A méréseket a Globális Megfigyelő Rendszer keretében működő állomások végzik. A földfelszíni állomáshálózat gerincét a meteorológiai főállomások, más néven szinoptikus állomások képezik. A szinoptikus (áttekintő) megfigyelések alapja az azonos időben végzett észlelés. Ezen állomások mérési programja jelenti a legrészletesebb és legpontosabb információt a légkör legalsó tartományáról. A felszíni mérőhálózatot tengeri megfigyelések is kiegészítik. Az óceánokon végzett meteorológiai mérések eloszlása egyenletesebb, viszont ritkább, mint a szárazföldi megfigyelőbázisoké. A tengerfelszín és a felszínközeli légkör állapotáról helyhez kötött és áramló bójják is fontos adatokat szolgáltatnak. A bójják mérete és mérési programja rendkívül változatos.

A légköri folyamatok pontos ismeretéhez és előrejelzéséhez azonban nem elegendő a felszín közelében méréseket végezni. A légkör vertikális szerkezetét mintegy 30–35 km magasságig legpontosabban az ún. rádiószondás, közvetlen mérések írják le. Világszerte kb. 700 meteorológiai állomásról bocsátanak fel olyan ballont, amelyre meteorológiai szenzorokkal felszerelt szondát erősítenek. Fontos információt jelentenek a repülőgépek által végzett meteorológiai mérések is. Különösen olyan területeken hasznosak ezek a mérések, ahol kevés a rádiószondás mérés vagy egyáltalán nincs.

Az 1960-as évek közepétől az űrtechnika gyors fejlődésének köszönhetően lehetővé vált, hogy a világűrben is nyomon követhessük a felhőzet mozgását, változását. A műholdas megfigyelés lehetősége jelentős változást hozott a meteorológiában. Mivel egyszerre nagy területről képes átfogó képet adni, ezért a nagyobb skálájú folyamatok jól nyomon követhetők. A műholdakat keringési pályájuk alapján két csoportba soroljuk, ezek a geostacionárius és a kvázipoláris műholdak. A geostacionárius műholdak az Egyenlítő fölött mintegy 36 000 km-rel találhatók, ahol keringési idejük megegyezik a Föld forgási idejével. Ezek a műholdak a Földhöz képest állni látszanak. A geostacionárius műholdak segítségével – a sarkokhoz közeli területeket leszámítva – az egész Föld megfigyelhető. A kvázipoláris műholdak általában a felszín felett 700–900 km-rel ellipszis alakú pályán keringenek, pályájuk síkja pedig közel merőleges az Egyenlítőre. Ezek a műholdak már képesek a sarkkörökön túli területek megfigyelésére is. Mivel a földfelszínhez közelebb keringenek, a Föld más területeiről is nagyobb felbontású képet készíthetnek, mint a geostacionárius műholdak. A kvázipoláris műholdak úgy tapogatták le a Földet, hogy miközben a keringési pályájuk síkja nem változik, a Föld elforog alattuk. Ezért minden kör megtétele közben más-más területet látnak, és így naponta kétszer (egyszer felszálló, egyszer leszálló ágbán) készítenek felvételt ugyanarról a területről. Mérési programjuk lehetővé teszi a légkörben lévő gázok koncentrációjának vizsgálatát (például ózonkoncentráció változása a stratoszférában), vagy a levegő hőmérsékletének és vízgőztartalmának meghatározását különböző magasságokban.

### 5.2.6. Az időjárás előrejelzése

Az időjárás előrejelzése során a légkör jövőbeli állapotát numerikus modellekkel írhatjuk le. A modellek a légkört térbeli rácshálózaton írják le. Az időjárás jelenlegi állapotából kiindulva e rácspontokon kell a légköri kormányzó egyenleteket (az ún. hidrotérmodynamikai egyenletrendszer) megoldani, hogy megkapjuk a légköri állapotváltozók rácspontbeli értékeinek jövőbeni alakulását. A pontos előrejelzés egyik feltétele az lenne, hogy a jelenlegi időjárást a légkör minden egyes pontjában ismerjük. Ehhez képest a légköri állapotváltozók értéke csak a meteorológiai állomások környezetében ismert. Mivel az állomások eloszlása nem egyenletes, ezért a kiindulási meteorológiai adatokat először egymástól azonos távolságra vett pontokra, a modell rácspontjaira kell interpolálni. A légkört leíró bonyolult egyenletrendszer ezekben a véges számú pontokban kell megoldanunk. A rácspontok számának meghatározása során két tényezőt kell figyelembe venni. Az egyik szempont az, hogy a légköri mozgásrendszereket jól nyomon tudjuk követni, a másik a számítási idő optimalizálása.

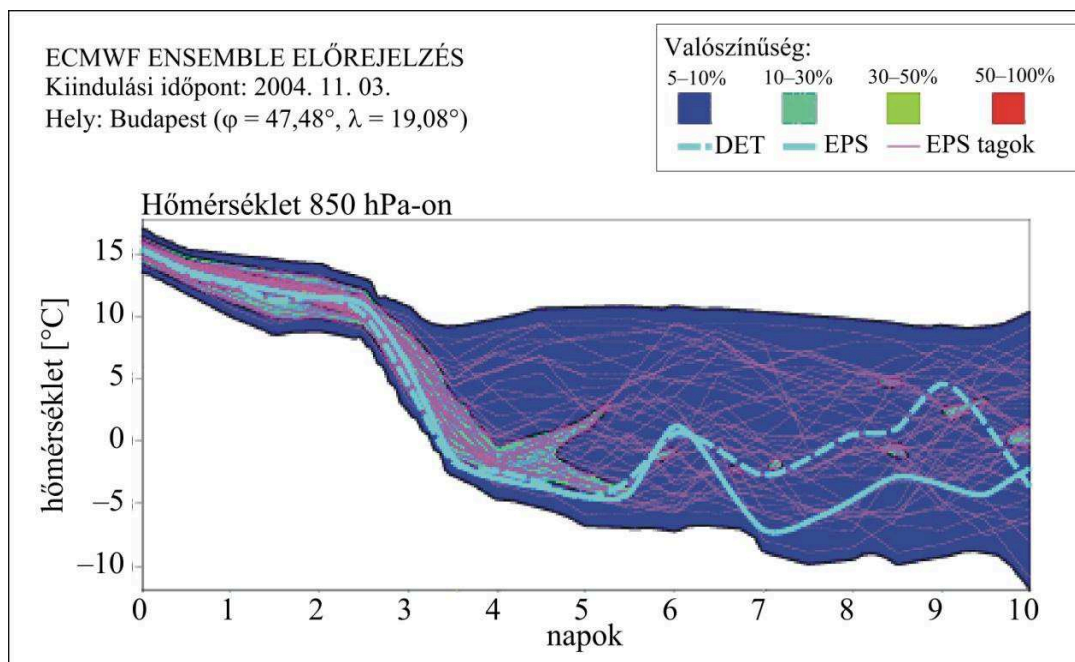
Mivel a rácspontok között nem tudjuk pontosan leírni a légkört, tehát már a kiindulási állapotot sem ismerjük teljes bizonyossággal, ezért az előrejelzések is eleve bizonytalansággal terheltek. Nagy rács távolságot alapul véve, a rácspontokra megadott értékekkel jól leírhatók a nagyobb skálájú időjárási folyamatok (ciklonok, anticiklonok, stb.). Ezzel szemben a kisebb mozgásrendszerek (például zivatar) már sokszor teljesen észrevétlenek maradnak. A közepes méretű, a rácshálózattal azonos nagyságrendű időjárási képződmények (például front vagy instabilitási vonal) pedig torzulhatnak.

E bizonytalanság csökkenthető, ha növeljük a rácspontok számát, azaz csökkentjük a rácspontok közötti távolságot. Ez azonban az előrejelzési feladat számítási igényének rendkívüli megnövekedését vonja maga után. Emiatt a modellszámításokat általában nem az egész légkörre, hanem csak egy részterületre végzik el finom felbontásban, azaz sűrű rácshálózattal. A kis skálájú képződmények azonban sokszor még ekkor sem jelennek meg. Ezeket indirekt módon lehet előre jelezni a modellszámítások eredményeit felhasználva, s figyelembe véve a helyi időjárást alakító hatásokat (például domborzati viszonyokat, felszíni jellegzetességeket).

A numerikus időjárás előrejelzés klasszikus formájának, az ún. determinisztikus előrejelzésnek határt szab az, hogy a légkör, és a benne zajló folyamatokat leíró egyenletek bonyolultsága miatt az előrejelzések rendkívül érzékenyek a kezdeti feltételekre (a kiindulási meteorológiai adatokra). Ez egyben azt is jelenti, hogy a modellszámítások csak maximum egy-két hétig adnak megfelelő előrejelzést, és még a legtökéletesebb kezdeti feltételekkel sem lehet megmondani, hogy pontosan milyen lesz az időjárás egy hónap múlva. A kezdeti feltételek hatása, valamint a modell bizonytalansága úgy vehető figyelembe, ha az előrejelzési modellt többször ugyanarra a kezdeti időpontra vonatkozó, egymástól kisebb-nagyobb mértékben eltérő kezdeti feltétel megválasztásával futtatjuk. A különböző futtatások az előrejelzési időtartam növekedésével egyre eltérőbbek lesznek. Az eltérés mértéke függ az időjárási helyzettől.

Ezt a típusú előrejelzést *ensemble* (együttes) előrejelzésnek nevezzük. Az így kapott eredményhalmazból következtethetünk az egyes időjárási események bekövetkezési valószínűségére, ugyanakkor az előrejelzések megbízhatósága alapján becsülhetjük az előrejelezhetőség időtartamát is. A módszer hátránya ugyanakkor, hogy jóval nagyobb számítási időt igényel, mintha csupán egyetlen előrejelzést készítenénk. Az 5.2.5. ábrán egy Budapest térségére vonatkozó hőmérséklet-előrejelzés látható a hagyományos

determinisztikus) és az együttes (ensemble) előrejelzés által. A görbék az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ) 850 hPa-os nyomási szintre (kb. 1 500 méter magasságra) vonatkozó hőmérsékleti előrejelzését mutatják Budapestre 2004. 11. 3-án. A szaggatott vonal a hagyományos, determinisztikus előrejelzés (DET) eredményét mutatja. A vastag vonal az ensemble-előrejelzés átlagát (EPS – Ensemble Prediction System), a vékony vonalak pedig az egyes, eltérő kezdeti feltételekkel történő futtatások eredményeit mutatják (EPS tagok). A bemutatott időjárási helyzet esetén az előrejelzés bizonytalansága három nap múlva jelentősen megnő. Addig viszont nagy valószínűséggel a hőmérséklet csökkenése várható.



5.2.5. ábra: Az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 850 hPa-os nyomási szintre (kb. 1 500 méter magasságra) vonatkozó hőmérsékleti előrejelzése Budapestre 2004. 11. 3-án

A különböző modellfuttatások eredményeként megkapjuk a meteorológiai állapothatározók jövőbeli becsült értékeit. A nyers modelleredmények az utófeldolgozás során válnak a meteorológusok és a felhasználók számára értelmezhetővé, közvetlenül felhasználhatóvá. Az előre jelzett légköri állapothatározók szabályos rácsra megkapott értékeiből fizikai összefüggések alapján további meteorológiai paramétereket számíthatók, illetve térképes formában is megjeleníthetők a meteorológiai mezők előre jelzett értékei.

### 5.3. Éghajlattani alapismeretek

#### 5.3.1. Az éghajlatot alakító tényezők

Egy térség éghajlatát döntően az a hőenergia-mennyiség határozza meg, amely a Naptól jövő elektromágneses sugárzásából adott időtartam alatt rendelkezésre áll. Az előzőekben láttuk, hogy a Föld különböző területeire jutó eltérő mennyiségű sugárzási energia a felelős a különböző mozgásrendszerek létrejöttéért. A hőenergia területi kiegyenlítésében részt vevő légáramlatok és tengeráramlatok egyaránt jelentős szerepet játszanak az éghajlat alakításában. A hőenergia közvetlen, valamint a mozgásrendszerek által közvetített eloszlása mellett a másik fontos éghajlatot alakító tényező a vízellátottság. Ez azonban, a



víz fázisátalakulásai (párolgás, felhőképződés stb.) révén szoros kölcsönhatásban áll a hőellátottsággal. Végül egy terület hő- és vízháztartását egyaránt jelentősen befolyásolják a felszíni sajátosságok (felszínborítottság, felszínformák, tengerszint feletti magasság). A felszín a légkör markáns határfelülete, ahol a sugárzási energia hőenergiává alakul, és ahol a párolgás, illetve csapadékból származó vízbevitel végbemegy.

### 5.3.2. Hazánk éghajlati jellemzői

A különböző földrajzi övek éghajlati sajátosságait, a Föld, vagy egy adott térség klimatikus viszonyait a leíró éghajlatlan tárja föl. Az éghajlatok osztályozása többféle szempont alapján elvégezhető, de alapvetően az előző alfejezetben bemutatott fő éghajlat-alakító tényezők (hő- és vízellátottság, felszíni sajátosságok) szerint történik. A Föld átfogó éghajlati elemzése túlmutat e fejezet keretein, ezért csak hazánk főbb éghajlati jellemvonását mutatjuk be.

A legegyszerűbb, szoláris éghajlati felosztás szerint Magyarország a mérsékelt övben helyezkedik el. Az ország észak–déli kiterjedése nem éri el a 3° földrajzi szélességet. A domborzati viszonyokat tekintve az ország több mint a fele 200 méter tengerszint feletti magasság alatti síkvidék, s területének mindössze 2%-a található 400 m-nél magasabban. Ez a csekély szélesség- és domborzatkülönbség nem eredményez jelentős éghajlati különbségeket az ország területén. Ennek ellenére kisebb eltérések, az adott földrajzi térségre jellemző sajátosságok még így is kimutathatók.

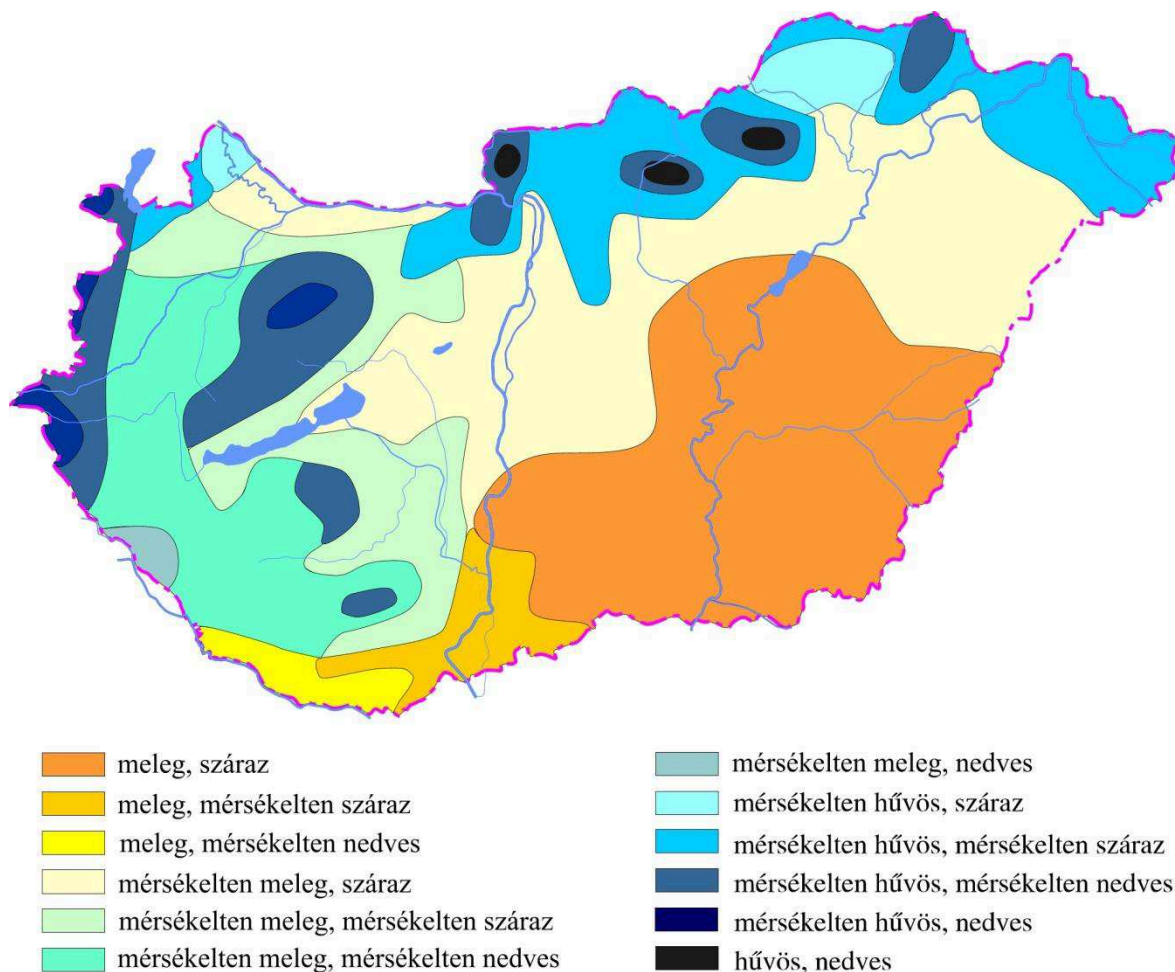
A Föld éghajlati rendszerei között Magyarország a kontinentális éghajlat, hosszabb meleg évszakkal típusba sorolható. Erre a klímátípusra jellemző, hogy a hőmérséklet évi ingása jelentős, jól elkülönül a négy évszak. Ugyanakkor az egyes években az adott évszakok, hónapok időjárása jelentős változékonyságot mutathat, ami annak a következménye, hogy hazánk három klímaöv, a kontinentális, az óceáni és a mediterrán ütközőpontján fekszik és hol az egyik, hol a másik hatása érvényesül erősebben.

A hőmérséklet térbeli változékonysága a sugárzás mennyiségét megszabó földrajzi szélességtől (az Egyenlítőtől való távolságtól), a tengerszint feletti magasságtól, valamint a tengerektől való távolságtól függ. Ez utóbbi tényező az óceáni, illetve a kontinentális hatások érvényesülését fejezi ki. Leghidegebb hónapunk a január (a januári középhőmérséklet általában  $-1\text{ °C}$  és  $-4\text{ °C}$  között változik), míg a legmelegebb a július (az átlaghőmérséklet  $19\text{ °C}$  és  $22\text{ °C}$  között). Hazánk területén a dokumentált szélső értékek ennél jóval nagyobb intervallumot fednek le (az országos abszolút minimum  $-35\text{ °C}$ , az abszolút maximum pedig  $41,9\text{ °C}$ ).

A csapadékelletlenség közepes, a nedves és a száraz éghajlatok közötti átmenetet reprezentálja. A csapadék nagy része általában a nyári félévben hullik, de a vízellátottság tekintetében is jelentős az évenkénti változékonyság. Az országon belüli évi átlagos csapadékeloszlást egyrészt a tengerektől való távolság, másrészt a domborzat befolyásolja. Eszerint a legtöbb csapadék évi átlagban a dél-nyugati határszélen és a Bakonyban hullik (több, mint 800 mm), míg a Alföld területén sokszor az 500 mm-t sem éri el.

A hőmérsékleti és csapadékviszonyok alapján még egy ilyen viszonylag kisebb térségen belül is, mint Magyarország, elkülönülnek az éghajlati sajátosságok. Ezek térbeli elrendeződését az 5.3.1. ábra mutatja. A hő- és vízellátottság alapján Péczely György 12 éghajlati altípust különített el az ország területén. Eszerint az ország területének legnagyobb hányada – az alföldi részek – a meleg-száraz és a mérsékelt meleg-száraz klímakörzetbe tartozik. Északabbra, illetve nyugatabbra haladva, valamint a tengerszint feletti

magasság növekedésével már nedvesebb és hűvösebb körzetek is megjelennek. A skála másik végét a hűvös-nedves típus alkotja, amellyel csak kis területen, az északi középhegység 700–800 méter tengerszint feletti magasságában találkozunk.



5.3.1. ábra: Magyarország éghajlati körzetei Pécze György alapján

## 5.4. Függelékek

### 5.4.1. Bibliográfia

Bartholy Judit, Geresdi István, Matyasovszky István, Mészáros Róbert, Pongrácz Rita: A meteorológia alapjai. 2011. Jegyzet

Bartholy Judit, Pongrácz Rita: Az éghajlati rendszer, globális klímaváltozások. In: Nánási Irén (szerk.): Humánökológia. Medicina Könyvkiadó Rt. Budapest, 2005. Czelnai Rudolf: Bevezetés a meteorológiába I. Tankönyvkiadó, Budapest, 1988.

Czelnai Rudolf, Götz Gusztáv, Iványi Zsuzsanna: Bevezetés a meteorológiába II. (A mozgó légkör és óceán). Tankönyvkiadó, Budapest, 1988.

Czelnai Rudolf: Bevezetés a meteorológiába III. (A meteorológia eszközei és módszerei) Tankönyvkiadó, Budapest, 1988.

Pécze György: Éghajlat. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.

### 5.4.2. Fogalomtár

**aeroszol:** A levegő mint gázfázisú közeg és a benne lebegő kis méretű (mikrométer nagyságrendű) szilárd, vagy cseppfolyós halmazállapotú részecskék rendszere.

**albedó:** Különböző felszínek rövidhullámú sugárzás-visszaverő képessége. A visszavert és a beérkező rövidhullámú sugárzás hányadosaként határozhatjuk meg.

**anticiklon:** Magas nyomású légköri képződmény, melyben az áramlás az északi félgömbön az óramutató járásával megegyező.

**ciklon:** Alacsony nyomású légköri képződmény, melyben az áramlás az északi félgömbön az óramutató járásával ellentétes.

**éghajlat:** Egy adott földrajzi térség időjárási eseményeinek együttese, azok átlagos, illetve szélsőséges eseményeinek statisztikai jellemzői, melyek általában egy nagyobb térséget jellemeznek, de jellemzik egyúttal magát az adott pontot is.

**hidroszféra:** A földburoknak a különböző halmazállapotú (víz, jég, vízgőz) összes természetes vizét magában foglaló része.

**időjárás:** Légköri környezeti jelenségek és események (például csapadék, felhőzet, szél, hőmérséklet-változás, stb.) időbeli lefutása adott térségen belül, valamint az ezeket okozó légköri folyamatok (például időjárási front, ciklontevékenység, stb.) egy-egy ciklusa a kifejlődéstől a feloszlásig.

**inverzió:** (hőmérsékleti inverzió) A hőmérséklet emelkedése a magassággal.

**izobár:** Az azonos nyomású pontokat összekötő görbe.

**izoterma:** Az azonos hőmérsékletű helyeket összekötő görbe.

**koaguláció:** Aeroszol-részecskék összetapadása és ezáltal növekedése.

**krioszféra:** A sarkvidéki jégsapkák, a gleccserek, a tengeri jég (jéghegyek) és a téli félévben képződő időszakos szárazföldi hótakarók együttese.

**lamináris áramlás:** Réteges áramlás, az átkeveredést nem biztosítják turbulens (örvényes) folyamatok.

**légkör:** A Földet körülvevő levegőburok.

**mezoszféra:** A sztratoszféra feletti légréteg, melyet a hőmérséklet magassággal való csökkenése jellemez.

**sztratoszféra:** A troposzféra feletti légréteg, melyben a nagyjából 20–30 km magasságban található ózonréteg rövidhullámú sugárzás elnyelése miatt a hőmérséklet a magassággal növekszik.

**tartózkodási idő:** Az az időtartam, amelyen keresztül az adott légköri komponens a légkörben tartózkodik.

**termoszféra:** A mezoszféra fölötti légréteg, melyet a hőmérséklet emelkedése jellemez. A melegedés oka a napsugárzás közvetlen elnyelése.

**troposzféra:** A légkör legalsó, változó magasságú (a közepes földrajzi szélességeken kb. 12 km vastag) rétege, amelyben a hőmérséklet a magassággal csaknem szabályosan (átlagosan 100 méterenként 0,65 °C-ot) csökken.

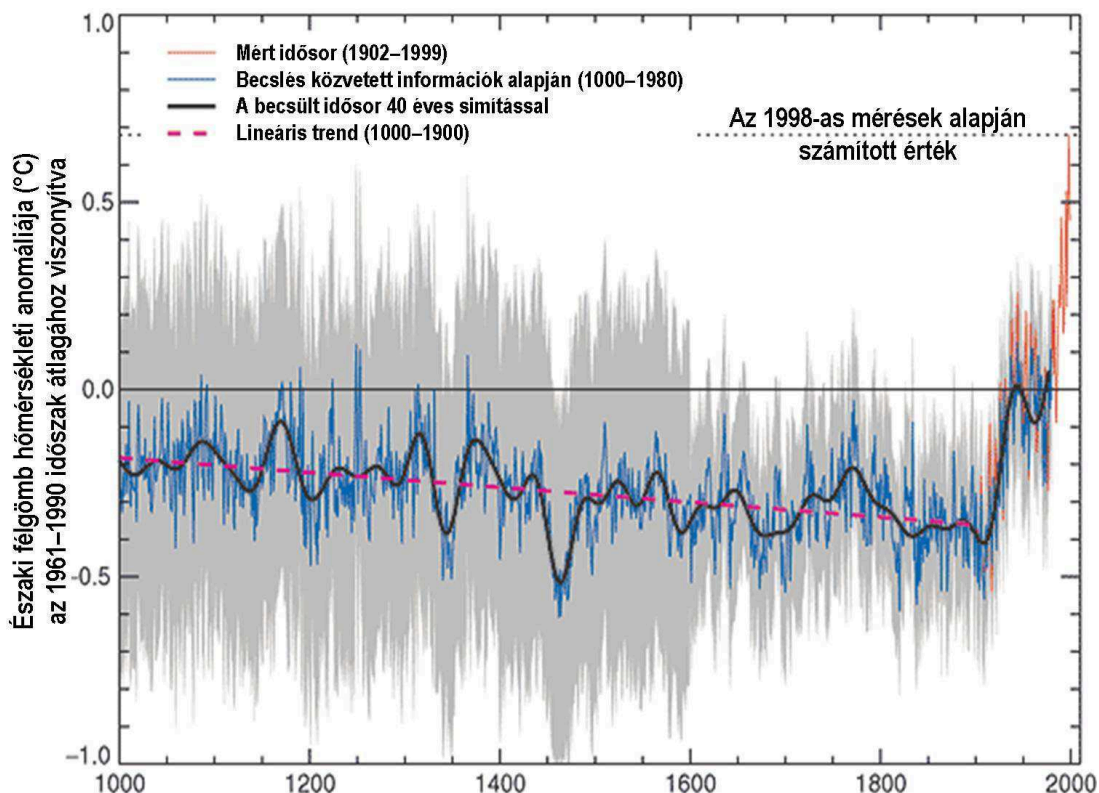
**turbulens áramlás:** Turbulencia által befolyásolt légáramlás. A turbulens (örvényes) áramlás hatása számos légköri folyamatban (például felszín-légkör közötti hő és nedvességátvitel, szennyezőanyagok terjedése stb.) alapvető fontosságú.

**üvegházhatás:** A légkör alsó rétegének felmelegedése annak következtében, hogy a rövidhullámú napsugárzás jelentősebb elnyelődés nélkül hatol keresztül a légkörön és a Föld felszínén nyelődik el. Ugyanakkor a felszín hosszuhullámú sugárzását lényegesen nagyobb mértékben elnyeli a légkör, ezáltal visszatartva a hőt.

## 6. GLOBÁLIS KLÍMAVÁLTOZÁS (PONGRÁCZ RITA)

Napjaink egyik legsúlyosabb környezeti problémája az éghajlat emberi tevékenységek következtében történő megváltozása, azaz a globális felmelegedés és az ezzel összefüggő különböző következmények. Az éghajlati rendszer belső kölcsönhatásai révén állandóan változó klíma jön létre az egyes földrajzi térségekben. Ám az antropogén hatások az emberiség története során tapasztalt ingadozásokhoz képest jóval erőteljesebben jelentkező tendenciákat eredményeztek már az elmúlt néhány évtizedben is, s a klímamodellek szimulációi további erősödést jeleznek a 21. század végéig. Közös feladatunk, felelősségünk, hogy minél pontosabban feltárjuk az éghajlatváltozások háttérében álló folyamatokat, kidolgozzuk a globális felmelegedés következményeinek mérséklését szolgáló teendőket, valamint elemezzük az emberiség alkalmazkodási lehetőségeit.

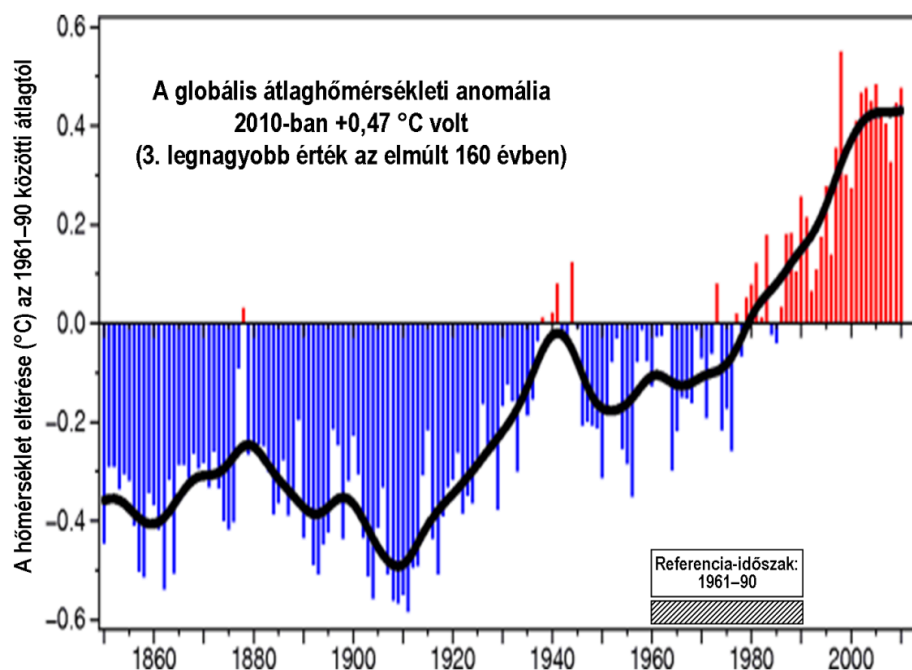
### 6.1. A múltban detektált változások



6.1.1. ábra: Az északi félgömb átlaghőmérsékletének alakulása 1000–2000 között az 1961–1990 referencia-időszakhoz viszonyítva mért és közvetett adatok alapján (Forrás: IPCC, 2001)

Elsőként tekintünk át az elmúlt évtizedek, évszázadok meteorológiai mérései alapján rendelkezésünkre álló bizonyítékokat, melyek a globális felmelegedésre utalnak. A rendszeres meteorológiai mérések ugyan csak a 19. század során kezdődtek meg, de többféle közvetett információ is rendelkezésünkre áll, melyekből lehetséges a régmúlt idők hőmérsékleti viszonyaira következtetni. Ilyen közvetett (ún. *proxy*) adatok nyerhetők többek között a fák évgyűrűiből, a jégfuratok rétegződéseiből, a kőzetrétegek

vizsgálataiból, vagy akár a történelmi dokumentumok, feljegyzések tanulmányozásából is. A 6.1.1. ábra késsel jelölt görbéje ezek alapján a közvetett információk alapján rekonstruált átlaghőmérséklet becsült idősorát illusztrálja. A szürke sáv arra utal, hogy minél messzebb megyünk vissza az időben, annál több bizonytalanság terheli ezeket az adatokat. A pirossal jelölt görbe a meteorológiai mérések alapján az északi félgömbre számított átlaghőmérséklet eltérését mutatja az 1961–1990-es referencia-időszakhoz viszonyítva. Jól látható, hogy míg 1000–1900 között egy 0,2 °C-os negatív trend illeszthető az idősorra, addig 1900–2000 között 0,9–1,0 °C-os hőmérséklet-emelkedést detektálhatunk az északi féltekén. Tehát a teljes ábrázolt időszak első kilenc évszázada alatt összességében bekövetkezett hőmérséklet-csökkenésnek mintegy ötszöröse az utolsó évszázad alatt észlelt hőmérséklet-növekedés.



6.1.2. ábra: A hőmérsékleti mérésekből meghatározott globális átlaghőmérsékleti anomália 1850–2010 közötti időszaka az 1961–1990 referencia-időszakhoz viszonyítva  
(Forrás: UEA CRU, 2011)

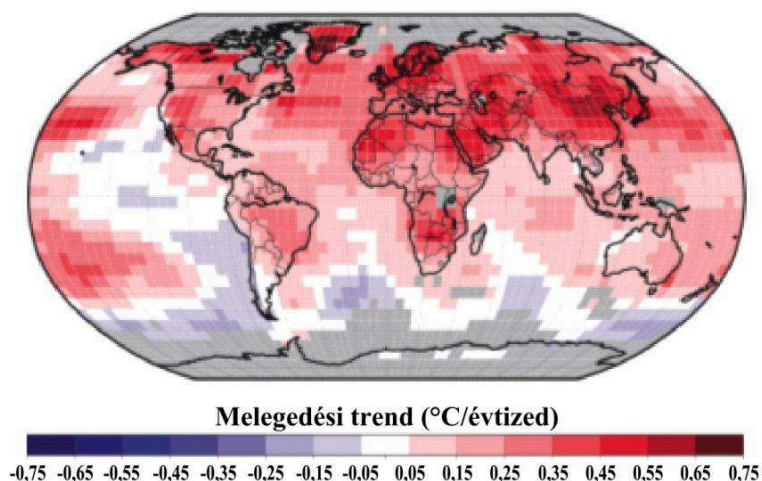
A hőmérsékleti mérések alapján meghatározott egész Földre vonatkozó globális átlaghőmérséklet alakulását követhetjük nyomon a 6.1.2. ábrán 1850 és 2010 között. Az éghajlati vizsgálatokban gyakran alkalmazott 1961–1990 referencia-időszak átlagához képest a 19. század második felében, s még a 20. század elején is mintegy 0,4 °C-kal alacsonyabb volt a globális átlaghőmérséklet, mely 1910–1940 között nagymértékben megnövekedett. Ezt követte egy nagyjából állandónak tekinthető időszak 1940–1975 között, mely során kismértékben csökkent a globális átlaghőmérséklet. 1975 után viszont egészen napjainkig is tartó hőmérséklet-emelkedést figyelhetünk meg, melynek mértéke eléri, sőt kissé meg is haladja a 20. század első felében detektált hőmérséklet-növekedést. Ha nagyság szerint sorba rendezzük az egyes évekre meghatározott hőmérsékleti anomáliákat (ugyancsak az 1961–1990 referencia-időszakhoz viszonyítva), akkor az első 17 helyen szereplő év mindegyike az 1990 utáni időszakból kerül ki, s az első 10 rekordmeleg év nagyrészt a 2000 utáni időszakból származik (6.1. táblázat). A 2001–2010 évtized globális átlagban összességében 0,2 °C-kal melegebb volt, mint az 1991–2000

évtized. A legutóbbi évtizedből csupán 2008 volt a többi évhez képest valamelyest hűvösebb, de ez is a 12. legmelegebb év a sorrendben. A hőmérsékleti mérések kezdete óta az egész Földet tekintve a legmelegebb év 1998 volt, ezt követi a sorban 2005, majd 2010.

Sorszám	Év	Hőmérsékleti anomália értéke (°C)	Sorszám	Év	Hőmérsékleti anomália értéke (°C)
1.	1998	0,52	11.	1997	0,35
2.	2005	0,48	12.	2008	0,33
3.	2010	0,47	13.	1995	0,28
4.	2003	0,46	14.	1999	0,27
5.	2002	0,46	15.	1990	0,25
6.	2009	0,44	16.	2000	0,24
7.	2004	0,43	17.	1991	0,20
8.	2006	0,42	18.	1983	0,19
9.	2001	0,40	19.	1987	0,17
10.	2007	0,39	20.	1988	0,16

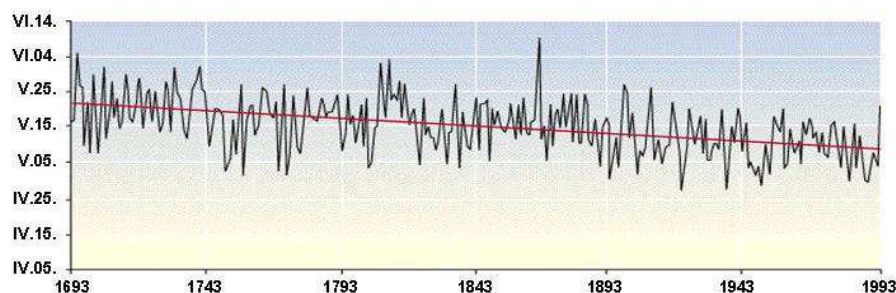
6.1. táblázat: A globális átlaghőmérsékleti anomália nagyság szerinti első 20 értéke az 1961–1990 referencia-időszakhoz viszonyítva (Forrás: HC-UKMO & CRU-UEA, 2011)

Az eddigiekben a globális átlaghőmérséklet alakulását vizsgáltuk az elmúlt évezredben, s ez alapján egyértelmű, hogy az utolsó néhány évtizedben kiemelkedően nagy hőmérséklet-emelkedés tanúi voltunk. Az elmúlt 25 évben globális skálán detektált melegedő tendencia földrajzi eloszlását illusztrálja a 6.1.3. ábra, melyen az évi középhőmérsékletek műholdas mérések alapján származtatott idősoraira illesztett lineáris trend évtizedes mértéke látható. A piros árnyalatok a növekvő hőmérsékleti trendet, míg a kék árnyalatok a csökkenő trendet jelölik. Lényegében az egész térképen a piros szín dominál, s különösen nagymértékű melegedő tendenciát figyelhetünk meg az északi félgömb szárazföldi területein (mely arra utal, hogy a hőmérséklet-növekedés mértéke meghaladja a globális átlaghőmérséklet emelkedésének ütemét). Csökkenő tendencia csupán kisebb térségekben jelentkezett, elsősorban a déli félgömb óceáni területei esetén.



6.1.3. ábra: Az éves átlaghőmérséklet évtizedes trendegyütthatóinak térképe műholdas megfigyelések alapján az 1979–2005 időszakra. A szürke színnel jelölt poláris területek adathiány miatt nem értékelhetők (Forrás: IPCC, 2007)

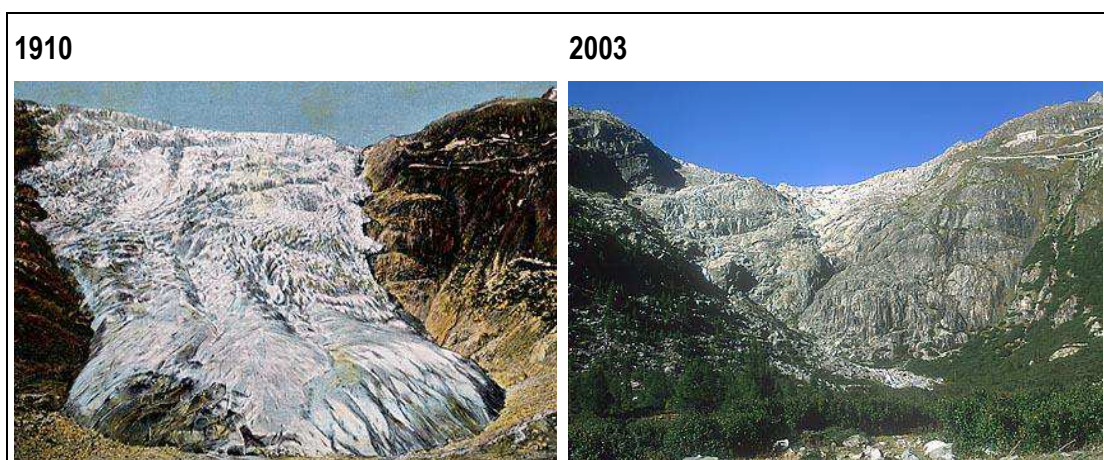
Magyarországon az utóbbi 30 évet tekintve 1,2 °C-ot meghaladó melegedést detektálhatunk az évi középhőmérsékletekben. Különösen erőteljes hőmérséklet-növekedés jellemzi az északkeleti térséget, ahol az Országos Meteorológiai Szolgálat mérései alapján 1,7 °C-ot is meghaladó hőmérséklet-emelkedés következett be éves átlagban az utóbbi három évtizedben. Országos átlagban az évi középhőmérsékletek közül a legmagasabb (11,8 °C) 2007-ben fordult elő (ekkor Európa-szerte rekord hőségeket detektáltak a nyári időszakban). Ebben az évben új abszolút hőmérsékleti rekord is született Magyarországon, mivel az Országos Meteorológiai Szolgálat kiskunhalasi mérőállomásán július 20-án 41,9 °C-ot regisztráltak. Hazánkban a műszeres mérések kezdete óta folyamatosan meghatározott évi átlaghőmérsékletek alapján az évek sorrendje a legmelegebb 2007 után az alábbiak szerint alakul: 2000, 2008, 1994, 2002, 2009.



6.1.4. ábra: A jégzajlás előretolódása a finn Tornio folyón, 1693–1993 (Forrás: GRID, 2001)

A globálisan és regionálisan is detektált hőmérséklet-emelkedés következményeképpen mind a **krioszféra**, mind a **bioszféra** esetén sokféle változást figyelhettünk meg az elmúlt évtizedekben. Az alábbi felsorolásban néhány példát emelünk ki ezek közül:

- A kontinentális jégtakaró 10%-kal csökkent.
- A tavaszi hóolvadás korábban indul.
- A folyók, tavak jége korábban kezd olvadni (6.1.4. ábra).
- Az Északi Sark körzetében a jég elvékonyodott, kiterjedése csökkent (nyáron 10–15%-kal).
- A magashegységek gleccserei világszerte visszahúzódnak (6.1.5. ábra).
- A növények vegetációs időszaka megnövekedett.
- A virágzási időszak korábbra tolódott.
- A költöző madarak tavasszal korábban érkeznek.
- Az élőhelyek általánosan magasabb szélességek felé tolódtak.

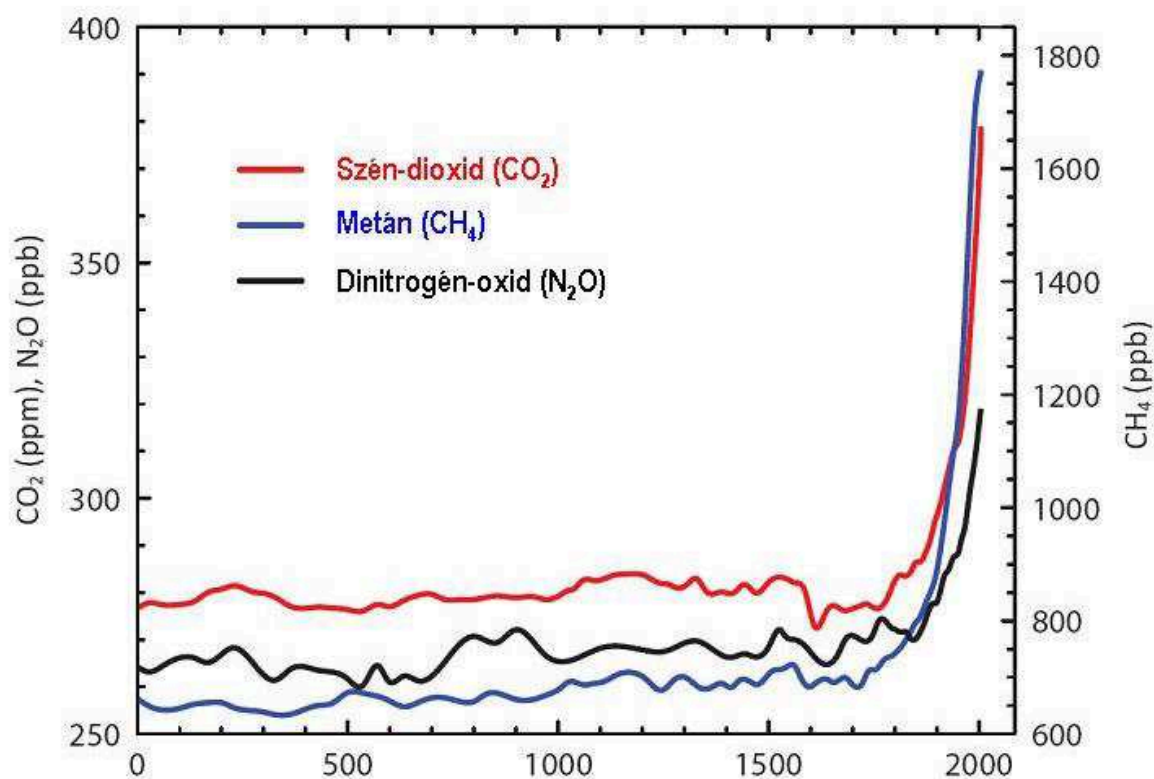


6.1.5. ábra: A Rhone-gleccser visszahúzódása az Alpokban (Forrás: Gesellschaft für ökologische Forschung, 2004)

## 6.2. A klímaváltozás okai

Vajon milyen folyamat áll az eddig tárgyalt melegedő éghajlati tendencia hátterében? E kérdés megválaszolásához elsőként tekintsük át a földi légkör felmelegítéséért felelős természetes folyamatot. A Földön a felszínközeli légkör átlaghőmérséklete  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  helyett  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . E hőmérséklet-többletért a földi üvegházhatás a felelős, mely során a földfelszínre leérkező rövidhullámhosszú napsugárzás elnyelődik, majd a felszín a hőmérsékletének megfelelő hosszuhullámhosszú sugárzást bocsát ki. A világűr felé távozó hosszuhullámú sugárzás egy részét a légkörben jelenlévő alkotórészek közül némelyek (az ún. üvegházhatású gázok) elnyelik, majd az elnyelt energiát újra kisugározzák ugyancsak hosszuhullámú sugárzás formájában – ez azonban már nem csak a világűr felé terjed, hanem minden irányba, s így újra eléri a felszínt is. A felszín elnyeli ezt a sugárzást, majd újra kisugározza a világűr felé.

A teljes  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérséklet-többletből közel kétharmadnyi rész ( $20,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a légköri vízgőz jelenlétével magyarázható.  $7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ért a szén-dioxid ( $\text{CO}_2$ ),  $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ért az ózon ( $\text{O}_3$ ),  $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ért a dinitrogén-oxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ),  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ért a metán ( $\text{CH}_4$ ),  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ért a **halogénezett szénhidrogének** (CFC-gázok, HCFC-gázok, HFC-gázok, PFC-gázok) a felelősek. E gázokat hívjuk üvegházhatású gázoknak. Az elmúlt néhány évszázad során a különböző emberi tevékenységek következtében történő folyamatos és növekvő kibocsátás hatására e gázok légköri mennyisége jelentősen megnövekedett (kivéve az ózont, mely esetében a sztratoszférában jelentős csökkenést figyelhattunk meg, s ezt a felszínközeli troposzférában megnövekedett mennyiség sem egyenlíti ki).



6.2.1. ábra: A főbb antropogén üvegházhatású gázok koncentráció-növekedése 0–2005 között (Forrás: IPCC, 2007)

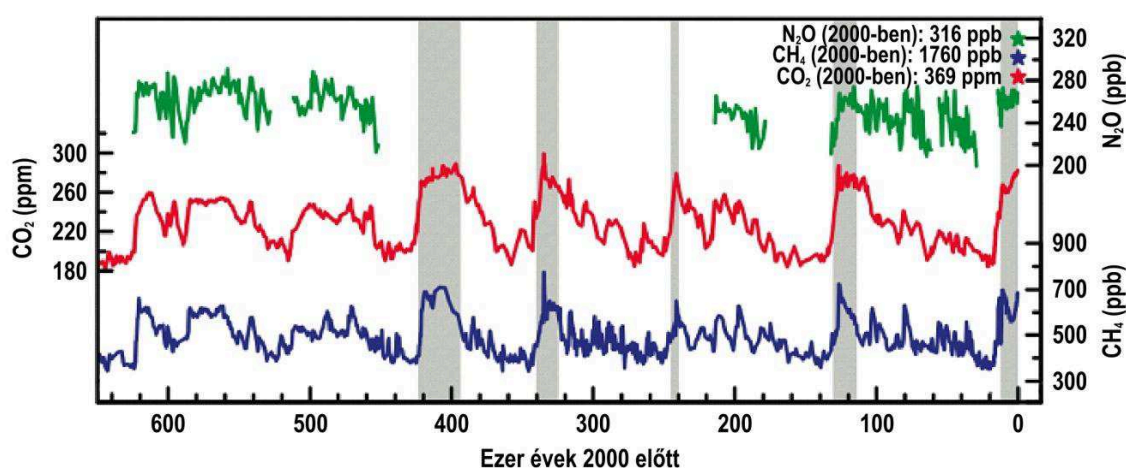


A szén-dioxid, a metán és a dinitrogén-oxid koncentrációváltozását követhetjük nyomon az elmúlt két évezred során a 6.2.1. ábrán. Mindhárom légköri gáz esetében jól látható, hogy hosszú évszázadokon keresztül stabil szint volt jellemző, mely csupán az utolsó két évszázadban változott meg. A viszonylag hirtelen bekövetkező, gyors koncentráció-növekedés egyértelműen az ipari forradalom következtében az emberiség fokozódó kibocsátásának hatására alakult ki. A földtörténet évmilliói alatt kifejlődött kibocsátási és elnyelési folyamatok természetes egyensúlyát az emberi tevékenységekből származó többletkibocsátás borította fel. Így napjainkra (2005-ös adatok alapján) a szén-dioxid koncentráció 35%-kal, a metánkoncentráció 148%-kal, a dinitrogén-oxid koncentráció 18%-kal növekedett meg az ipari forradalom előtti szinthez viszonyítva (6.2. táblázat). Az 1995–2005 közötti időszakban a szén-dioxid légköri koncentrációja évente átlagosan 1,9 ppm-mel emelkedett az egyre intenzívebb antropogén kibocsátás hatására.

Üvegházhatású gáz	Preindusztrális koncentráció	Koncentráció 2005-ben
Szén-dioxid	280 ppm	379 ppm
Metán	715 ppb	1774 ppb
Dinitrogén-oxid	270 ppb	319 ppb

6.2. táblázat: A főbb antropogén üvegházhatású gázok koncentráció-növekedése az ipari forradalom óta (Forrás: IPCC, 2007)

A 6.2.2. ábrán még hosszabb időre tekinthetünk vissza, egészen 650 ezer évvel ezelőttig, mely az Antarktiszról származó jégfuratminták elemzésével nemrégiben vált lehetségessé. A piros görbe a szén-dioxid koncentrációjának alakulását mutatja, a kék a metánét, s a zöld a dinitrogén-oxidét. A grafikonon berajzolt szürke sávok a Föld pályaelemeinek változása miatt bekövetkezett glaciális-interglaciális periódusok felmelegedési (interglaciális) szakaszait jelölik. Jól látható, hogy e melegebb időszakokban mindhárom üvegházhatású gáz koncentrációja ugrásszerűen megnövekedett. A görbékhez viszonyítva jóval magasabban helyezkednek el a grafikonon a színes csillagok, melyek a gázok 20. század végi globális koncentrációértékeit jelölik.

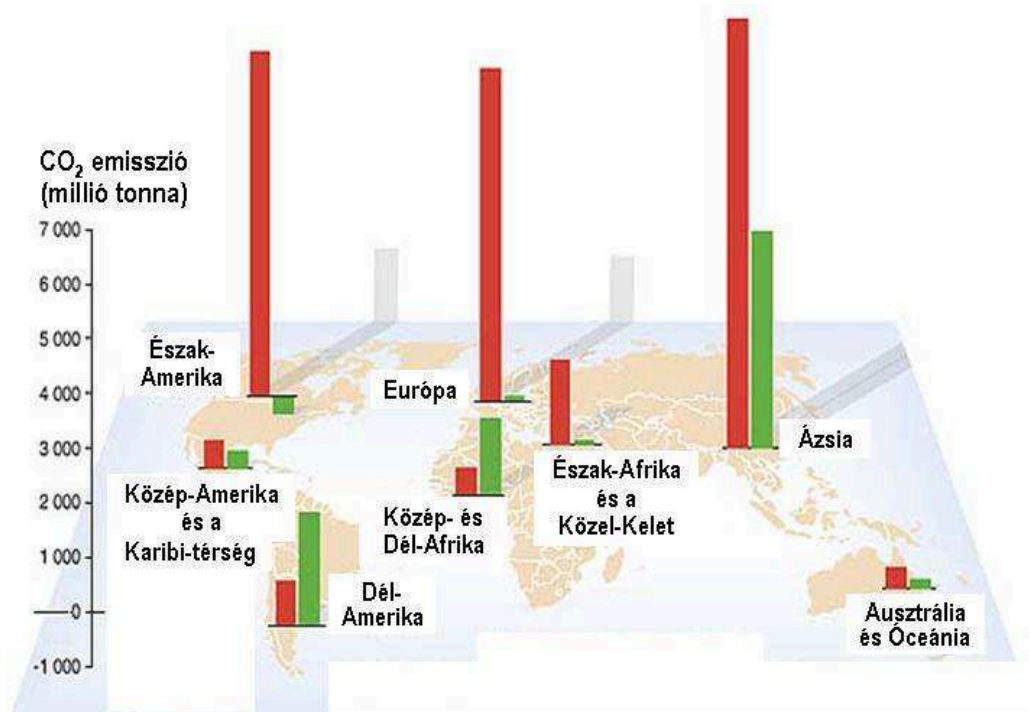


6.2.2. ábra: Fontosabb üvegházgázok légköri mennyiségének változása az elmúlt 650 ezer évben antarktisi jégfurat elemzések alapján (Forrás: IPCC, 2007)

A jelenlegi koncentrációértékek egyrészt rendkívül magasak az elmúlt 650 ezer évet tekintve, hiszen a rendelkezésre álló jégfuratok vizsgálata alapján egyik üvegházhatású gáz

légköri koncentrációja sem közelítette meg a mai értéket. Másrészt a hihetetlenül gyors koncentrációváltozás adhat okot aggodalomra, mivel az üvegházhatás ilyen mértékű erősödésére a hosszú évezredek során korábban még nem volt példa. Kérdés, hogy ehhez a földtörténeti léptékkal mérve hirtelen változáshoz és a jövőben valószínűsíthető további erőteljes növekedéshez a bioszféra, s azon belül is az emberiség hogyan tud alkalmazkodni.

Tekintsük át röviden, milyen kibocsátási forrásokból származnak ezek az üvegházhatású gázok! A szén-dioxid esetében a természetes források az élőlények légzéséhez, a széntartalmú szerves anyagok bomlásához, a vulkáni tevékenységhez, az óceánokhoz, valamint az erdőtüzekhez köthetők. Az egyensúly fenntartása érdekében a légkörből való kikerülést a zöldnövények fotoszintézise és az óceán elnyelési folyamatai biztosítják. Az emberi tevékenységek (pl.: fosszilis tüzelőanyagok elégetése, erdőirtások, cementgyártás) nyomán a légkörbe kerülő szén-dioxid mennyisége e természetes folyamatokhoz képest ugyan kevesebb, de a felhalmozódás miatt az üvegházhatás erősítésében óriási szerepet játszik. A 6.2.3. ábrán láthatjuk összefoglalva az ipari tevékenységhez (piros oszlopok) és mezőgazdasághoz (zöld oszlopok) kapcsolódó régiónkénti kibocsátást a 20. század második felére vonatkozóan. Egyértelmű, hogy a fosszilis tüzelőanyagok nagyarányú felhasználása jóval nagyobb mértékű szén-dioxid-kibocsátással járt az elmúlt időszakban, mint a földhasználat megváltozásából (elsősorban erdőirtásokból) adódó légkörbe jutó mennyiség. A fosszilis tüzelőanyagok kibocsátása Ázsiában (8 milliárd tonna), Észak-Amerikában (6,5 milliárd tonna) és Európában (6 milliárd tonna) volt a legjelentősebb. Az erdőirtások elsősorban Ázsiában (4 milliárd tonna), Dél-Amerikában (2 milliárd tonna) és Afrikában (1,5 milliárd tonna) járultak hozzá a szén-dioxid légköri felhalmozódásához.



6.2.3. ábra: A szén-dioxid-kibocsátás regionális megoszlása 1950–2000 között. A piros oszlopok a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásából származó kibocsátást jelzik, a zöld oszlopok pedig a földhasználat megváltozásának hatására a légkörbe kerülő többletet (Forrás: GRID, 2001)

Hosszú időn keresztül az Amerikai Egyesült Államok (USA) volt a felelős a teljes antropogén kibocsátás legnagyobb hányadáért. 1950 és 2000 között az USA részaránya 44%-ról 25%-ra csökkent, ám az egy főre jutó évi kibocsátás növekedett, napjainkban már meghaladja az évi 5 tonnát. Jelentős még az egy főre jutó szén-dioxid-kibocsátás Ausztráliában, Szaúd-Arábiában és Kanadában. Magyarország az egy főre jutó kibocsátásban az első harmadban helyezkedik el az országok listáján a globális átlagértéket (1,25 t/év) kismértékben meghaladó kibocsátási értékkel (1,53 t/év). Kína 2000-ben még a második legnagyobb kibocsátó volt (részaránya mintegy 12%-os), de az egy főre jutó kibocsátása nem érte el az évi 1 tonnát, vagyis jóval kisebb volt, mint a fejlett országok többségéé. Az elmúlt néhány évben Kína összkibocsátása már megelőzte az USA-ét, így 2007-ben Kína a globális szén-dioxid-kibocsátás 21%-áért, míg az USA már csak 19%-áért volt felelős. Az óriási mértékű gazdasági fejlesztések hatására Kína egy főre jutó évi kibocsátása is jelentősen megnőtt az elmúlt évtized során: 2007-ben már 1,35 tonna volt, mely a globális átlagnál nagyobb érték!

Az antropogén eredetű globális szén-dioxid-kibocsátás az ipari forradalom kezdetén és még jó néhány évtizeden keresztül szinte kizárólag a kőszénfelhasználásból adódott. Csak a II. világháború után növekedett meg a kőolaj, majd a földgáz energiahordozóként való alkalmazása miatti szén-dioxid emisszió. Napjainkra a kőszén, a kőolaj és a földgáz felhasználásából ered rendre a kibocsátott antropogén eredetű szén-dioxid 39%-a, 37%-a, illetve 19%-a. A teljes antropogén kibocsátás rendkívül gyors ütemben növekedett az elmúlt 200 évben: 1850 és 1900 között megtízszereződött, a 20. század elejétől a közepéig 205%-kal nőtt, és a század közepétől a végéig mintegy 313%-kal nőtt a légkörbe kerülő szén-dioxid mennyisége. Az utóbbi néhány évben átlagosan évente 3%-os növekedés volt jellemző.

A hazai antropogén szén-dioxid-kibocsátás összetevőit tekintve a kőszénfelhasználás hozzájárulása az 1980-as évek második felében néhány év alatt mintegy a felére esett vissza (melynek oka a rendszerváltáshoz köthető). Az 1990-es évek elején már a kőolaj, illetve pár év múlva a földgáz égetéséből eredt a hazai emisszió legnagyobb része. A 2007-es adatok alapján a földgáz felhasználásából származik szén-dioxid-kibocsátásunk 43%-a, a kőolaj és a kőszén felhasználása pedig rendre 32%-ban, illetve 21%-ban járul hozzá a teljes emisszióhoz.

A metán esetében a légkörbe való kerülés természetes forrásai a szerves anyagok oxigénmentes környezetben történő bomlási folyamatai, melyek például mocsarakhoz köthetők. A légkörből való kikerülést különböző légköri reakciók és talajbaktériumok biztosítják. Az emberi tevékenységek közül elsősorban a mezőgazdasági termelés során kerül metán a légkörbe, például a rizstermesztés (6.2.4. ábra) és a szarvasmarha-tenyésztés következtében, melyek manapság 27%-ban, illetve 30%-ban járulnak hozzá a teljes antropogén eredetű metánkibocsátáshoz. További antropogén forrás még a biomassa égetése, a fa fűtőanyagként való ipari felhasználása, valamint a kőszén- és földgázbányászat. 1860-tól napjainkig a metán antropogén eredetű forrásokból történő kibocsátása több mint négyszeresére nőtt. A rizstermesztésből és a szarvasmarha-tenyésztésből származó globális metánemisszió 151%-kal, illetve 342%-kal növekedett.

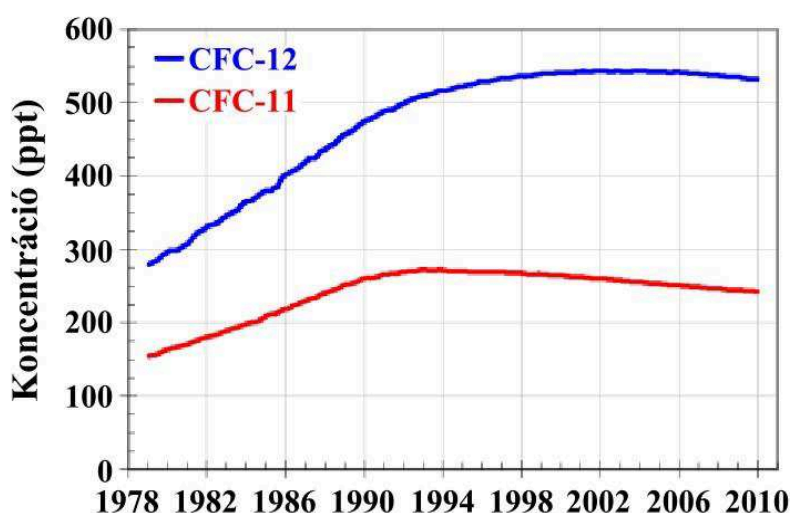


6.2.4. ábra: Elárasztott rizsföld, mely a légköri metán egyik jelentős antropogén forrása (Fotó: Pongrácz Rita)

A dinitrogén-oxidok döntő hányada természetes vagy antropogén háttérű biológiai forrásokból származik, és a **denitrifikáció** során a talaj hasznosuló nitrátjainak redukációjából ered, mely **anaerob** baktériumok hatására megy végbe. A nedves trópusi és mérsékelt övi talajok évente rendre 2,7–5,7 Mt, illetve 0,6–4,0 Mt mennyiséget bocsátanak ki. Az óceánok évente 1,0–5,7 Mt-val járulnak hozzá a teljes mennyiséghez, a légköri ammónia oxidációja során pedig évi 0,3–1,2 Mt keletkezik. Az antropogén források elsősorban a mezőgazdasági tevékenységhez kapcsolódnak: a mezőgazdasági talajok kibocsátása évi 0,6–14,8 Mt-t jelent, az állattenyésztésé pedig évente 0,2–3,1 Mt-t. Kisebb mértékben ipari források (0,7–1,8 MtN/év) és a biotömegtüzelés (0,2–1,0 MtN/év) is hozzájárul a dinitrogén-oxid teljes emissziójához. A légkörből való kikerülés különféle légköri reakciók és a **fotodisszociáció** révén történik, melyek elsősorban a sztratoszférában játszódnak le. A becslések szerint évente átlagosan 16,4 MtN származik a forrásokból, s a sztratoszférában évi 12,6 MtN lép ki a légkörből. A légköri mérleg évente +3,8 MtN, vagyis minden egyes évben átlagosan ennyivel több anyag kerül a légkörbe, mely mára már számottevő koncentrációnövekedést eredményezett a légkörben.

A CFC-gázok közül a legnagyobb mennyiségben a CFC-11 ( $\text{CFCl}_3$ ) és a CFC-12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) van jelen a légkörben, ezek kizárólag antropogén forrásból kerülnek a légkörbe, s a 20. századot megelőzően egyáltalán nem fordultak elő a földi légkörben. A halogénezett szénhidrogének a felszínközeli légrétegekben rendkívül stabil vegyületek, ezért felhasználásuk széles körben elterjedt: többek között hűtőközegként, hajtógázként, oldószerként, szigetelőanyagként alkalmazzuk az iparban és a mindennapi életben egyaránt. Az üvegházhatásuk mellett a felső légrétegekben rendkívül káros hatást fejtenek ki, ugyanis a sztratoszférikus ózon jelentős mértékű koncentrációcsökkenésében nagy szerepet játszanak. Ezt a földi ózonrétegre káros hatást felismerve az 1990-es évek elejétől nemzetközi összefogással több egyezmény született, melyek a CFC-gázok kibocsátásának csökkentéséről rendelkeznek, sőt az emisszió teljes beszüntetéséről. A felhasználások nagy részében helyettesítő anyagokat (pl.: HCFC-gázokat) vezettek be, ezek ózonkárosító hatása

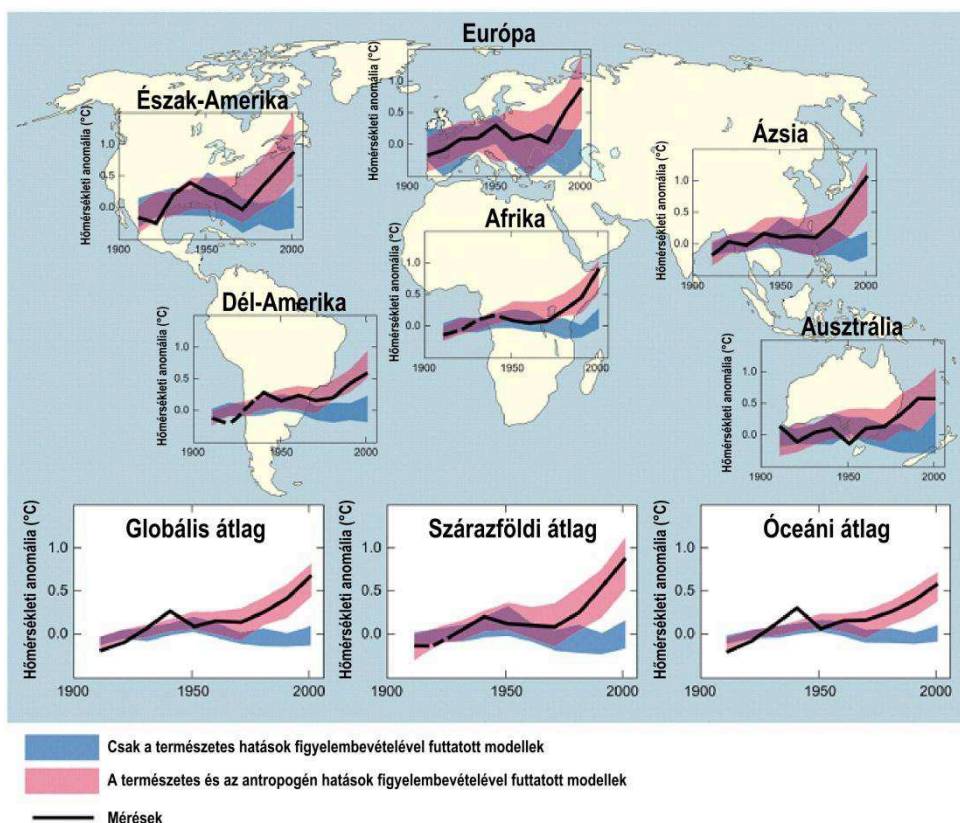
valóban jóval kisebb, mint a CFC-gázoké, azonban az egy molekulára jutó üvegházhatásuk (ún. melegítő potenciáljuk) némely anyag esetében jóval magasabb. A CFC-12 és a CFC-11 légköri koncentrációjának 1978–2010 közötti alakulását a 6.2.5. ábrán követhetjük nyomon. Jól látható, hogy mindkét vegyület esetében a koncentrációnövekedés – hála a szigorú nemzetközi egyezményeknek – napjainkra már megállt, s jelenleg (a 2010-es mérések alapján) 0,43 ppb, illetve 0,25 ppb a légköri koncentrációjuk. Habár a kibocsátással már mintegy egy évtizede teljesen leálltak a fejlett országok, a légkörből való teljes kikerülésig még néhány további évtizedet várni kell.



6.2.5. ábra: A CFC-12 és a CFC-11 koncentráció változása 1978–2010 között (Forrás: NOAA ESRL, 2010)

Minden üvegházhatású gáz jelenlegi globális antropogén kibocsátását összesítve, 25,9%-ért az energiafelhasználás a felelős, 19,4%-ért az ipari tevékenység, 17,4%-ért az erdőirtás, 13,5%-ért a mezőgazdaság, 13,1%-ért a közlekedés és szállítás, 7,9%-ért a háztartások és a kereskedelmi épületek, s 2,8%-ért a hulladék, illetve a szennyvíz. Az Európai Unió országainak 2003-as adatokon alapuló összkibocsátását tekintve a fenti arányok a következőképpen alakulnak: az üvegházhatású gázok 61%-a az energiafelhasználásból származik, 21% a közlekedésből, 10% a mezőgazdaságból, 6% az ipari tevékenységekből, a maradék 2% a hulladékkal kapcsolatos.

Az elmúlt évtizedek mérései alapján meghatározott átlaghőmérsékleti idősor éghajlati modellekkel történő szimulációi segíthetnek annak eldöntésében, hogy milyen mértékben tehető felelőssé az emberi tevékenység az előzőekben bemutatott melegedő éghajlati tendenciáért. A 6.2.6. ábrán szereplő grafikonokon a kék sáv jelöli az emberi tevékenység hatását figyelmen kívül hagyó 19 éghajlati szimuláció eredményét. E modellfuttatások csak a vulkáni tevékenységet és a napsugárzás ingadozásait tekintik, ezek alapján határozzák meg az éghajlat természetes változásait. A rózsaszín sávok az előbb említett természetes éghajlati kényszereken kívül az üvegházhatású gázok antropogén hatású koncentráció-növekedését is figyelembe vevő 58 szimuláció eredményeit foglalják össze. Akár a globális átlagot, akár a földrészenként számított átlaghőmérsékleti idősorokat vetjük össze az elmúlt 100 év klímaszimulációival, egyértelmű, hogy a 20. század utolsó negyedében detektált hőmérséklet-növekedés antropogén hatásra vezethető vissza.



6.2.6. ábra: A kontinentális és globális felszínközeli átlaghőmérséklet szimulációinak összehasonlítása a mért értékekkel 1906–2005 között (Forrás: IPCC, 2007)

### 6.3. A jövőben várható tendenciák

A globális felmelegedéssel és annak széleskörű, átfogó vizsgálatával foglalkozó nemzetközi kutatóközösséget az ún. Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (angolul *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) fogja össze. Az **IPCC** 1988-ban alakult a Meteorológiai Világszervezet (*World Meteorological Organization, WMO*) és az ENSZ Környezeti Programja (*United Nations' Environmental Programme, UNEP*) összefogásával. Három fő munkacsoportja a következő feladatokat végzi:

- (1) értékeli és rendszerezi a feltételezett éghajlatváltozás kiváltó okairól és jellegzetességeiről rendelkezésre álló tudományos ismereteket,
- (2) elemzi az éghajlatváltozás környezeti és társadalmi-gazdasági következményeit,
- (3) áttekinti és értékeli a szükséges és lehetséges válaszstratégiákat.

Az átfogó kutatási eredményeket öt-hat évente ún. Helyzetértékelő Jelentésekben publikálják, melyek angol nyelven teljes terjedelmükben szabadon letölthetők az internetről (<http://www.ipcc.ch>). A legelső Helyzetértékelő Jelentés 1990-ben jelent meg, a második 1996-ban, a harmadik 2001-ben, s a legutóbbi, negyedik 2007-ben. A különböző kutatócsoportok a várható klímaváltozás vizsgálatát emissziós forgatókönyvekhez, scenáriókhoz kapcsolódva végzik. A 2001-es és 2007-es jelentésekben négy alapszenárió esetére elemezték a várható éghajlati változásokat és az ezekből adódó következményeket.

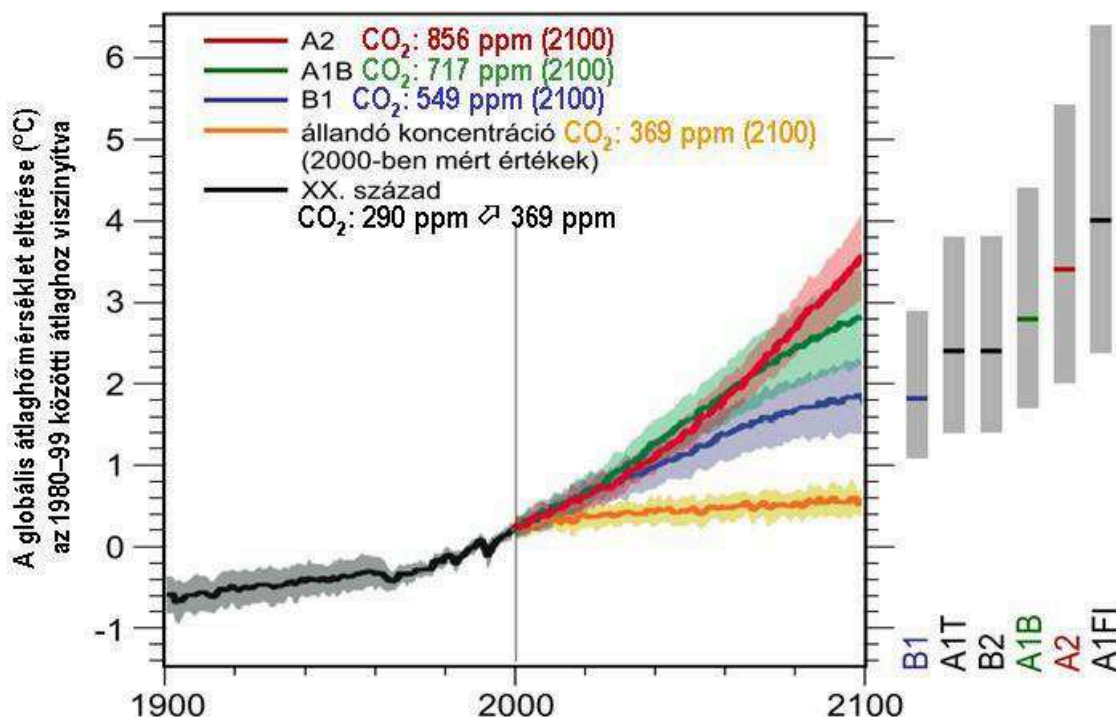
Ezek az A1, A2, B1, B2 jelölésű scenáriók tartalmazzák a földi népesség várható alakulását, a technológiai és gazdasági fejlődés előrevetített irányvonalait, a várhatóan tovább növekvő globális energiaigény biztosításához használt energiahordozók arányait, a mezőgazdasági termelés és ehhez kapcsolódóan a földhasználatok jövőbeli becsült alakulását (Nakicenovic és Swart, 2000). Az A1 és B1 scenáriók a globalizációs folyamatok felgyorsulásával számolnak, az A2 és a B2 scenáriók viszont inkább a regionális fejlődés irányába történő eltolódást prognosztizálnak. Az A1, A2 scenáriók esetén a gyors gazdasági fejlődése, míg a B1, B2 esetben a környezettudatos technológiai fejlesztések a prioritás. Az A1 scenárión belül három alszcenáriót különíthetünk el: (1) A1FI, melyet a fosszilis energiahordozók intenzív felhasználása jellemez, (2) A1T, melyet a megújuló és nukleáris energiaforrások használatának jelentős mértékű elterjedése jellemez, (3) A1B, mely a fosszilis, a megújuló és a nukleáris energiaforrások kiegyenlített használatát feltételezi. Az alapszcenáriók becslései alapján a szén-dioxid, a metán és a dinitrogén-oxid 2050-re, illetve 2100-ra várható légköri koncentrációit foglalja össze a 6.3. táblázat.

Emisszió scenárió	CO <sub>2</sub> (2050)	CO <sub>2</sub> (2100)	CH <sub>4</sub> (2050)	CH <sub>4</sub> (2100)	N <sub>2</sub> O (2050)	N <sub>2</sub> O (2100)
A1FI	567 ppm	970 ppm	2668 ppb	3413 ppb	378 ppb	460 ppb
A1B	532 ppm	717 ppm	2400 ppb	1974 ppb	350 ppb	372 ppb
A1T	501 ppm	582 ppm	2503 ppb	2169 ppb	342 ppb	354 ppb
A2	532 ppm	856 ppm	2562 ppb	3731 ppb	373 ppb	447 ppb
B1	488 ppm	549 ppm	1881 ppb	1574 ppb	357 ppb	375 ppb
B2	478 ppm	621 ppm	2363 ppb	2973 ppb	342 ppb	362 ppb

6.3. táblázat: A három legfontosabb antropogén üvegházhatású gáz 2050-re és 2100-ra becsült légköri koncentrációja a hat alapszcenárió szerint (Nakicenovic és Swart, 2000)

Ezek tükrében az antropogén emissziók (s egyben a klímaváltozás mértéke) szempontjából az A2 és az A1FI a legpesszimistább, a B1 és az A1T pedig a legoptimistább forgatókönyv. A CFC-11 és CFC-12 koncentrációk alakulásában a nemzetközi egyezményeknek megfelelően a légköri mennyiség azonos ütemű csökkenését veszi figyelembe az összes scenárió: 2050-re a CFC-11 gáz becsült koncentrációja 123 ppt lesz, a CFC-12 gázé pedig 362 ppt, 2100-ra a légköri koncentrációk rendre 45 ppt és 222 ppt.

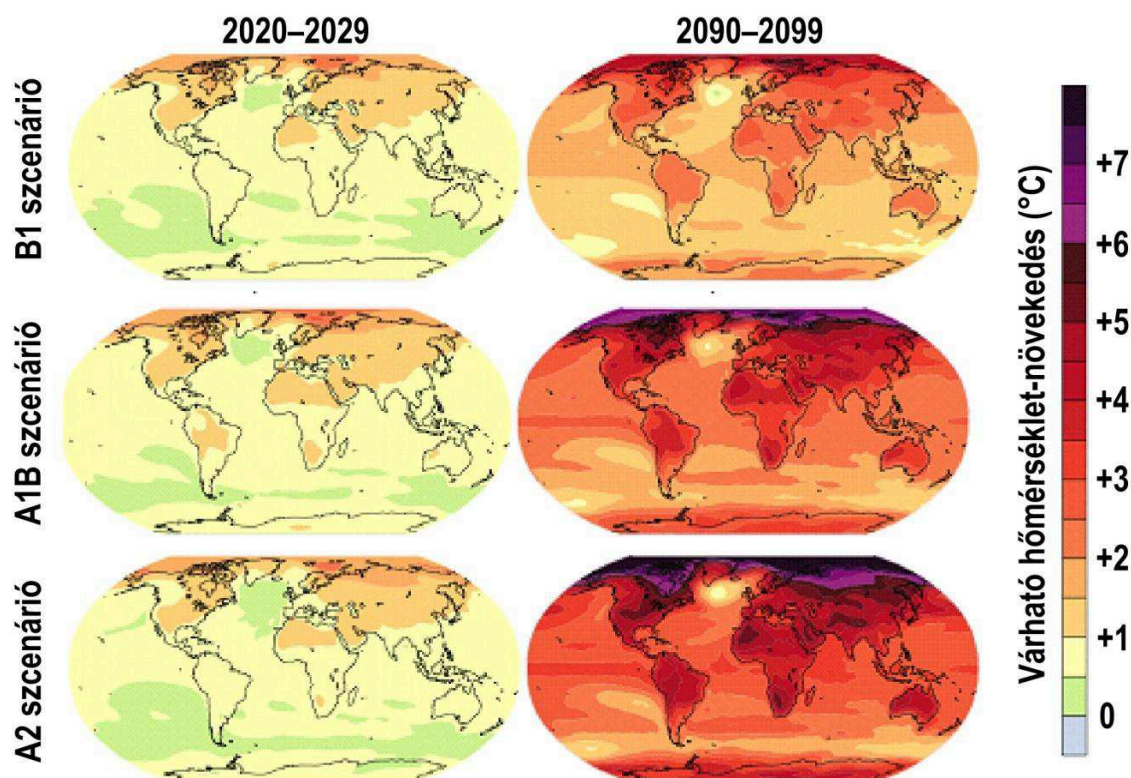
A globális átlaghőmérséklet 21. században várható alakulását mutatjuk be a 6.3.1. ábrán, mely a 2007-ben megjelent IPCC Helyzetértékelő Jelentésben közreadott eredményeket tartalmazza. A jobb szélén található oszlopok az egyes emisszióscenáriókhoz tartozó, 21. század végére várható globális átlaghőmérséklet-emelkedés intervallumát illusztrálják, melyek a különböző modellfuttatásokból származó eredményeket foglalják össze. A bal oldali grafikon részletesen mutatja három alapszcenárió (B1, A1B, A2) esetén a 21. század során várható hőmérsékletváltozások ütemét. A grafikonról leolvasható, hogy a legnagyobb hőmérséklet-növekedés az A1FI scenárió esetén várható (azaz ha a század végéig a fosszilis energiahordozók intenzív felhasználását feltételezzük). A melegedés mértéke ebben az esetben várhatóan 2,4–6,4 °C az 1980–1999 időszak átlagához viszonyítva. A legkisebb melegedésre a B1 scenárió esetén számíthatunk, melynek várható mértéke a 21. század végére csupán 1,1–2,9 °C, ám ez is meghaladja a 20. század során detektált hőmérséklet-emelkedést.



6.3.1. ábra: A 20. században detektált és a 21. századra prognosztizált globális átlaghőmérséklet-változás a különböző scenáriók esetén. Referencia-időszak: 1980–1999 (Forrás: IPCC, 2007)

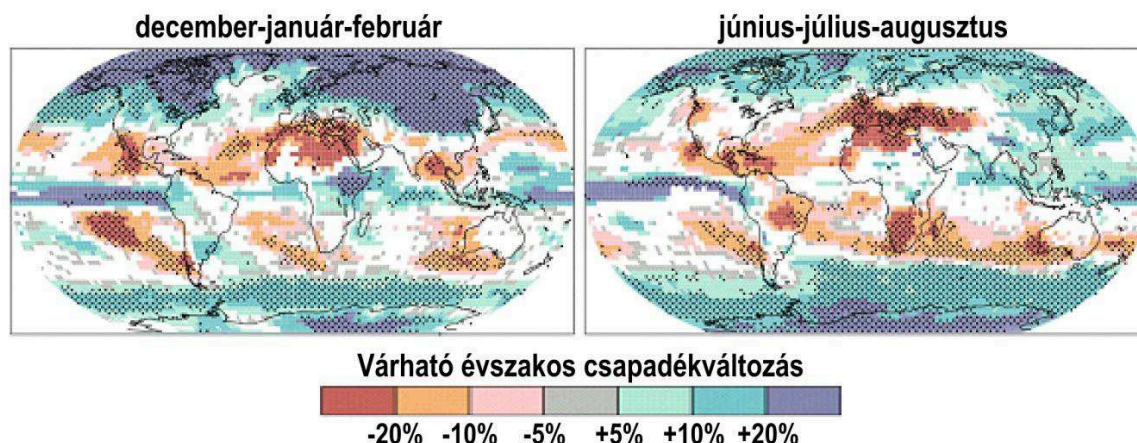
Több globális modell által becsült éghajlatváltozások átlagolásával kompozit-térképeket határozhatunk meg. Ezek felhasználásával a várható melegedés területi eloszlását illusztrálja a 6.3.2. ábra egy közelebbi és egy távolabbi évtizedre vonatkozóan. Jól látható, hogy a 2020–2029 időszakban még nem különülnek el egymástól jelentős mértékben a különböző scenáriók esetén becsült hőmérsékletváltozások. Ezzel szemben az évszázad végén, a 2090–2099 időszakban már markáns különbségek jelentkezhetnek, különösen az északi félgömb magasabb szélességein. Az északi sarkvidék régiójában várható a legjelentősebb melegedés mindkét évtizedben: 2 °C körüli hőmérséklet-növekedés várható 2030-ig, majd 2100-ig rendre mintegy 5 °C-os, 6 °C-os, illetve 7 °C-os hőmérséklet-emelkedés prognosztizálható a B1, A1B, illetve A2 scenárió esetén. A bemutatott scenáriók becslései alapján az északi félgömbön várható melegedés mértéke jelentősen meghaladja a déli félgömbön várható változások értékét. A térképeken azt is megfigyelhetjük, hogy a szárazföldi területeken általában nagyobb mértékű melegedésre számíthatunk, mint az óceáni területeken.





6.3.2. ábra: Az évi középhőmérséklet változásának területi eloszlása a B1 (fent), az A1B (középen) és az A2 (lent) szcenárió esetén 2020–2029 és 2090–2099 időszakra. Referencia-időszak: 1980–1999 (Forrás: IPCC, 2007)

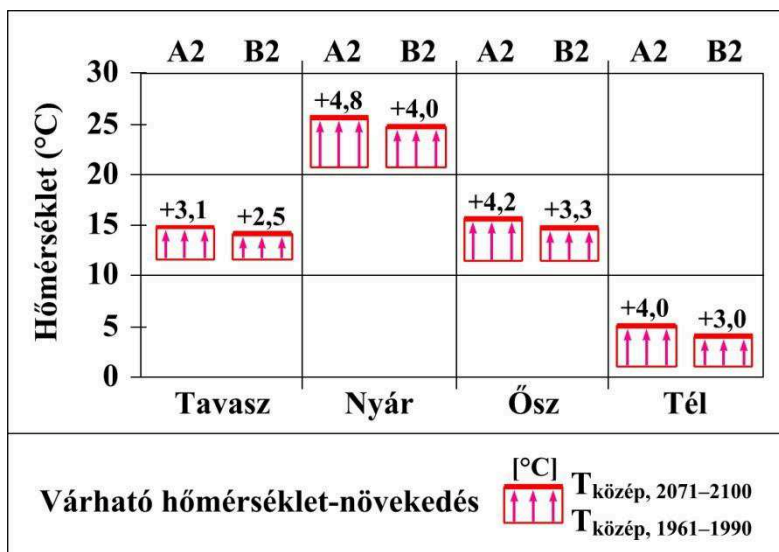
A másik alapvető éghajlati elem, a csapadék jövőbeli alakulására vonatkozó modellbecslések sokkal jobban eltérnek egymástól, mint a hőmérsékletre kapott szimulációs eredmények. Ennek oka, hogy a csapadék mind térben, mind időben jóval változékonnyabb éghajlati paraméter, mint a hőmérséklet. A csapadékbecslések bizonytalanságát az is növeli, hogy az antropogén üvegházhatás növekedése miatti sugárzási kényszer megváltozásából (a hőmérséklettel ellentétben) a csapadék nem határozható meg közvetlenül, hanem csak az éghajlati modellekben alkalmazott parametrizációs formulák eredményeképpen kaphatjuk meg. Az A1B szcenárió esetére a téli és a nyári csapadékösszeg 21. század végére várható változásának területi eloszlását szemlélteti a 6.3.3. ábra. Ezeket a térképeket a rendelkezésre álló globális modellszimulációk kompozitjaként állították elő. A pöttyözött területeken a modellek által prognosztizált csapadékváltozás 90%-ban azonos előjelű, a fehér színeljelt területeken viszont a becsült változások előjele nem egyezik meg a modellek legalább kétharmada esetén. A térképekről leolvasható, hogy az egyik legjelentősebb csapadékcsökkenésre a Földközi-tenger térségében számíthatunk mindkét évszakban, télen ez a szárazodás inkább a déli részre, és Észak-Afrikára terjed ki, míg nyáron északabbra húzódik, és így egészen Közép-Európáig felnyúlik. A magasabb földrajzi szélességeken mindkét félgömbön a modellek nagy része egységesen csapadéknövekedést prognosztizál, mely a téli hónapokban nagyobb mértékű, mint nyáron.



6.3.3. ábra: A téli és nyári átlagos csapadékváltozás várható mértéke az A1B scenárió esetén a 2090–2099 közötti időszakban, referencia-időszak: 1980–1999. A pöttyözött területeken a modellek 90%-a azonos előjelű változást jelez, a fehér területeken viszont a modellek kevesebb, mint 66%-a vár azonos előjelű változást (Forrás: IPCC, 2007)

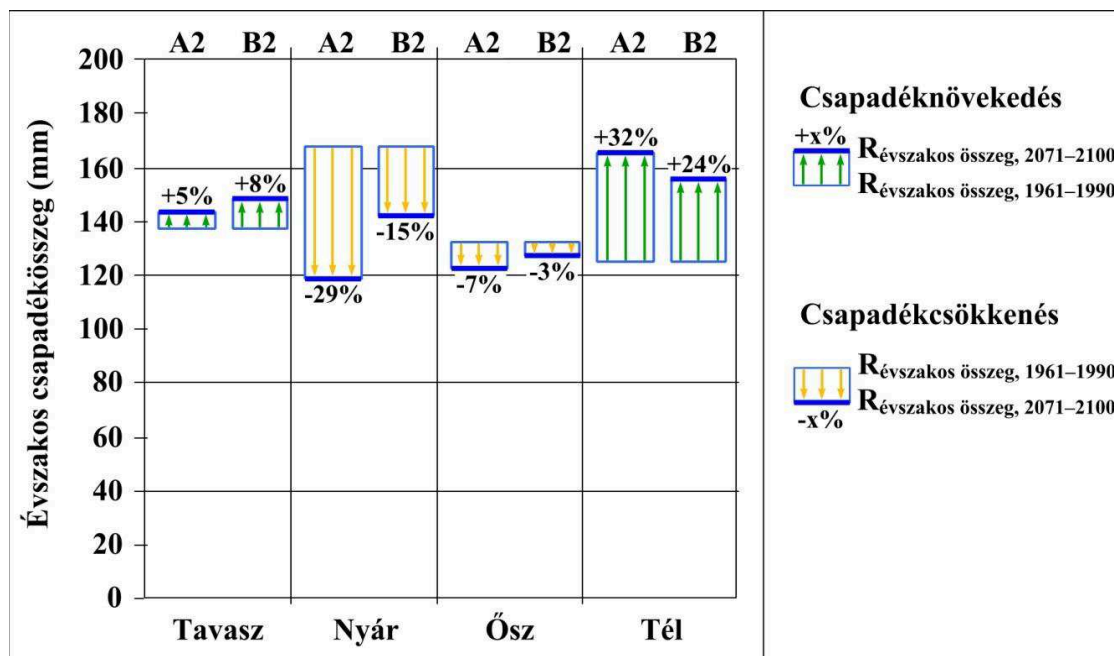
A globális átlaghőmérséklet jelentős növekedése természetesen hatással van egy-egy földrajzi térségben a szélsőséges hőmérsékletek előfordulási gyakoriságára is. A melegedő klíma hatására eltolódó hőmérsékleti eloszlásokat valószínűsíthetünk; így a hideg extrémumok várhatóan ritkábban fordulnak majd elő, a meleg extrémumok viszont gyakrabban. A 21. század közepére és végére adott klímaszimulációk alapján a globális melegedés következtében az időjárási és éghajlati szélsőségekben is jelentős változások várhatók. Többek között például a forró napok és éjszakák, a hóhullámok, a heves csapadéktevékenység, az aszály, az intenzív trópusi ciklonok aktivitása és a heves óceáni hullámozgás valószínűsége várhatóan növekszik. Ezen változások közvetve érintik a különféle emberi tevékenységeket: a mezőgazdasági és ipari termelést, az erdőgazdaságot, a vízgazdálkodást, valamint az egészségügyet.

Európára vonatkozóan több projekt keretében is történt finom skálájú regionális modellezés, mely során 50 km-es (Christensen és Christensen, 2007), 25 km-es (van der Linden és Mitchell, 2009), sőt 10 km-es (Torma et al., 2011) horizontális felbontású éghajlati becslések készültek. Ezek alapján a 21. század utolsó három évtizedére az A2 és a B2 scenárióra vonatkozóan foglaljuk össze a Magyarországra várható hőmérséklet- és csapadékváltozásokat (a 6.3.4. ábrán, illetve a 6.3.5. ábrán). Általánosságban elmondhatjuk, hogy a 2071–2100 időszakra a melegedés mértéke mindkét scenárióra és minden évszakra meghaladja a 2,5 °C-ot. A melegedés legnagyobb mértékű várhatóan nyáron lesz, 4,8 °C az A2 scenárió esetén, és 4,0 °C a B2 scenárióra (6.15. ábra). A legkisebb hőmérséklet-növekedés tavasszal várható: 3,1 °C (A2), illetve 2,5 °C (B2). A legkisebb eltérés az A2 és a B2 scenárió esetén várható melegedés mértéke között tavasszal várható (0,6 °C), míg a legnagyobb télen (1,0 °C).



6.3.4. ábra: A 21. század végére Magyarországra várható évszakos hőmérséklet-növekedés az A2 és a B2 scenárió esetén (az 1961–1990 közötti referencia-időszak hőmérsékletei a Budapesten mért értéket jelzik) (Forrás: Bartholy et al., 2007)

A 21. század utolsó három évtizedére prognosztizált hazai csapadékcsökkenés mértéke nyáron 24–33% (A2 scenárió), illetve 10–20% (B2 scenárió), a téli csapadéknövekedés mértéke pedig 23–37% (A2 scenárió), illetve 20–27% (B2 scenárió). A tavaszi csapadéknövekedés és őszi csapadékcsökkenés nem haladja meg a 10%-os mértéket. Az 1961–1990 közötti referencia-időszakban az átlagos évszakos csapadékmennyiség csökkenő sorrendben: nyár, tavasz, ősz, tél (6.3.5. ábra).



6.3.5. ábra: A 21. század végére Magyarországra várható évszakos csapadékváltozás az A2 és a B2 scenárió esetén (az 1961–1990 közötti referencia-időszak értékei a Budapesten mért csapadékösszegeket jelzik) (Forrás: Bartholy et al., 2007)

A modelleredmények valószínűsítik e sorrend teljes átrendeződését a 21. század végére. A modellek azt jelzik, hogy mindkét scenárió esetén a legcsapadékosabb két

évszak a tél és a tavasz lesz (ebben a sorrendben). A legszárazabb évszak az A2 scenáriót figyelembe véve várhatóan a nyár, míg a B2 scenárió esetén az ősz lesz. A klímaprojekciók alapján a B2 scenárió esetén az évszakai csapadékmennyiségek közötti különbségek szignifikáns csökkenése várható (felére csökken), mely azt eredményezi, hogy az éves csapadékeloszlás kiegyenlítettebbé válik a 21. század végére. Nem mondható el ugyanez az A2 scenárió esetére, ahol várhatóan továbbra is jelentős mértékben eltér egymástól a téli és a nyári csapadékösszeg, csupán felcserélődik a legszárazabb és a legcsapadékosabb évszak.

Az antropogén üvegházhatással és a globális felmelegedés problémakörével kapcsolatban egyelőre még nem jött létre széleskörű nemzetközi összefogás. A számos próbálkozás és a rendszeres nemzetközi találkozók ellenére eddig jelentős hatású konkrét kötelezettségvállalás nem született. 1992-ben Rio de Janeiróban a Föld 189 országának részvételével megfogalmazták az Éghajlatváltozási Keretegyezményt, ám ebben is csupán általános elveket szögeztek le. Ez az egyezmény tartalmazza az elővigyázatosság elvét, valamint azt is, hogy a globális környezeti problémákért az egész emberiség felelős, ám az egyes országok különböző mértékben részesülnek ebből a közös felelősségből. A keretegyezmény megkötése óta minden év december elején megrendezik az aláíró országok (ún. részes felek) ülészeit. Például 2009-ben Dánia fővárosában, Koppenhágában, 2010-ben a mexikói Cancunban került sor a nemzetközi találkozóra. Nevezetes volt 1997-ben a Japánban, Kiotóban megrendezett találkozó, ahol elfogadták az ún. Kiotói Jegyzőkönyvet, mely a legelső konkrét feladatmegjelölésnek tekinthető az antropogén üvegházhatás problémájának kezelésére. A jegyzőkönyv kimondja, hogy az üvegházgázok kibocsátását csökkenteni kell a fejlett és átmeneti gazdaságú országokban (ez mintegy 39 országot jelent) a 2008–2012 közötti időszakra átlagosan 5,2%-kal az 1990-es bázisszinthez viszonyítva. Az érintett országok eltérő mértékben vállalkoztak kibocsátásuk csökkentésére, például Magyarország számára az előírás 6%-os kibocsátáscsökkentést jelölt meg az 1985–1987 időszakhoz viszonyítva. Az akkori Európai Közösség 15 országa a megadott szinthez képest magasabb, átlagosan 8%-os emissziócsökkentést vállalt.

Az egyezmény hatályba lépését és a későbbiekben kidolgozott nemzetközi emissziókereskedelem beindítását sokáig gátolta, hogy habár 2004-ig több, mint 130 ország csatlakozott a Kiotói Jegyzőkönyvhöz és ratifikálta (Magyarország például 2002. augusztus 21-én), ám ezen országok hozzájárulása a globális üvegházgáz-kibocsátáshoz nem érte el az 50%-ot. A legnagyobb kibocsátók, az USA, Oroszország és Ausztrália nem csatlakozott a ratifikáló országok sorához, s így nem teljesülhetett az a feltétel, hogy a kibocsátás legalább 55%-áért felelős országok részt vegyenek a nemzetközi összefogásban. Ezt a feltételt csak a találkozó után hét évvel, Oroszország csatlakozásával sikerült teljesíteni (az oroszországi ratifikáció 2004. november 18-án történt meg). Így végül 2005. február 16-án életbe lépett a Kiotói Jegyzőkönyv. A célul kitűzött átlagos 5,2%-os kibocsátáscsökkentés sajnos még nagyon kevés ahhoz, hogy az IPCC-jelentésekben szereplő modellek által prognosztizált globális felmelegedést mérsékelje. Ennél sokkal drasztikusabb, akár 50–80%-os emissziócsökkentésre lenne szükség a következő évtizedekben. Az Európai Unió próbálja nemzetközi szinten is elfogadtatni, hogy az egyes országok nagyobb mértékű kibocsátáscsökkentést vállaljanak; továbbá azt is szorgalmazza, hogy a csökkentést kiterjesszék a fejlődött országokra (Kínára, Indiára, és a latin-amerikai országokra). Egyelőre sajnos nem beszélhetünk nemzetközi megegyezésről ebben a globális környezetünket érintő ügyben.

A széleskörű kormányzati támogatottság hiánya ellenére számos civil kezdeményezés indult a globális felmelegedés problémájához kapcsolódva, melyek a klímaváltozás mérsékeléséhez javasolt lakossági hozzájárulás lehetőségeit gyűjtik össze és teszik közzé többek között az interneten.

## 6.4. Függelékek

### 6.4.1. Bibliográfia

- Bartholy, J., Pongrácz, R., Gelybó, Gy., Regional climate change expected in Hungary for 2071–2100, *Applied Ecology and Environmental Research*, 5 (2007), 1–17.
- Christensen, J.H., Christensen, O.B., A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century, *Climatic Change*, 81 (2007), 7–30.
- IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, D. Xiaosu. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2001., New York, NY. 944p.
- IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2007., New York, NY. 996p.
- van der Linden, P., Mitchell, J.F.B., szerk., ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project, UK Met Office Hadley Centre, 2009, Exeter, UK, 160p.
- Nakicenovic, N., Swart, R., szerk., *Emissions Scenarios. A special report of IPCC Working Group III*. Cambridge University Press, 2000., UK. 570p.
- Torma, Cs., Coppola, E., Giorgi, F., Bartholy, J., Pongrácz, R., Validation of a high resolution version of the regional climate model RegCM3 over the Carpathian Basin, *J. Hydrometeorol.*, 12 (2011), 84–100.

### 6.4.2. Fogalomtár

**Anaerob:** Oxigénmentes.

**Bioszféra:** A földi élőlények összessége (növények, állatok, emberek).

**Denitrifikáció:** A nitrátok  $N_2$ ,  $N_2O$  vagy  $NO$  alakban bekövetkező, gáz halmazállapotú nitrogénvesztése, mely általában, de nem mindig biológiai (anaerob baktériumok) hatásra megy végbe.

**Fotódisszociáció:** Napsugárzás hatására történő kémiai bomlás.

**Glaciális:** Eljegesedési időszak.

**Halogénezett szénhidrogének:** Fluort, klórt vagy brómot tartalmazó szerves vegyületek, melyek az emberi tevékenységek hatására kerülnek a légkörbe; a sztratoszférikus ózon bontásában játszanak fő szerepet, s üvegházhatással is rendelkeznek.

**Interglaciális:** Két eljegesedési időszak közötti szakasz.

**IPCC:** Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (Intergovernmental Panel on Climate Change), melyet 1988-ban az ENSZ és a WMO (Meteorológiai Világszervezet) hozott létre.

**Krioszféra:** A földi hó és jég összessége.

## 7. KÖRNYEZETI ÁRAMLÁSOK (TASNÁDI PÉTER)

### 7.1. Bevezetés

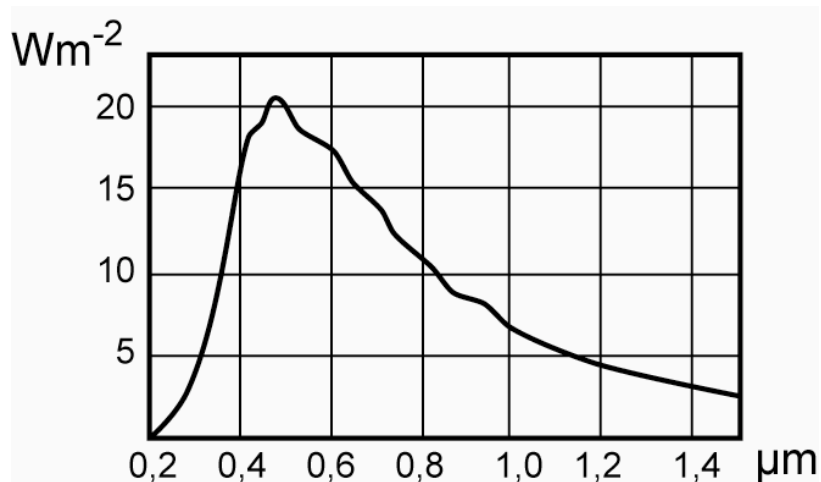
Környezeti áramláson általában a légkör és a tengerek áramlásait értjük. A körülöttünk lévő levegő és az óceánok vize is folyamatos mozgásban van. A levegő és a víz áramlásának vannak jól felismerhető állandósult szabályosságai, de rengeteg a véletlenszerű, hely szerint és időben is szabálytalan és megjósolhatatlan változás. Ahhoz, hogy ezt a bonyolult mozgásrendszert megértsük, fontosabb szabályait felismerjük, érdemes Földünket távolról nézve vizsgálni. A földi folyamatok mélyén mindig az húzódik meg, hogy a Föld a Naptól érkező sugárzásból energiát nyerhet. Célszerű tehát megvizsgálni, hogy milyen hatások alakítják ki a földi hőmérséklet-eloszlást és a hőmérsékleti különbségek a légkörben és a tengerekben milyen mozgást indítanak.

Az áramlásokat azután természetesen már a mechanika törvényei írják le, azaz a Newton II. törvényéből adódó mozgásegyenletet kell felírunk a folytonos közegnek tekintett légkörre, illetve tengervízre. Az egyenletek a pontrendszerek mechanikájában megszokott mozgásegyenletekhez képest jóval bonyolultabbak, mert a folyadékrezecskék könnyen elmozdulnak egymás mellől, s az adott pillanatban szomszédos folyadékrezek már rövid idő alatt nagy távolságba kerülhetnek egymástól. Emiatt a mozgásegyenletek felírásakor nem egyes rezecskék mozgását követjük, hanem a tér adott helyén adjuk meg a sebességet, gyorsulást, a közeg sűrűségét, hőmérsékletét, nyomását stb., függetlenül attól, hogy a vizsgált helyen éppen melyik folyadék rész tartózkodik. Ezt a leírásmódot Euler vezette be, és amennyiben az áramlás stacionárius, azaz adott helyen az áramlás sebessége nem változik, akkor jól szemléltethető az áramvonalakkal. Az áramvonalak olyan irányított görbék, amelyek adott pontban meghúzott érintője megadja az adott pontban lévő részecske sebességének irányát. A következőkben az áramlásokat többnyire az áramvonalrendszer megrajzolásával szemléltetjük.

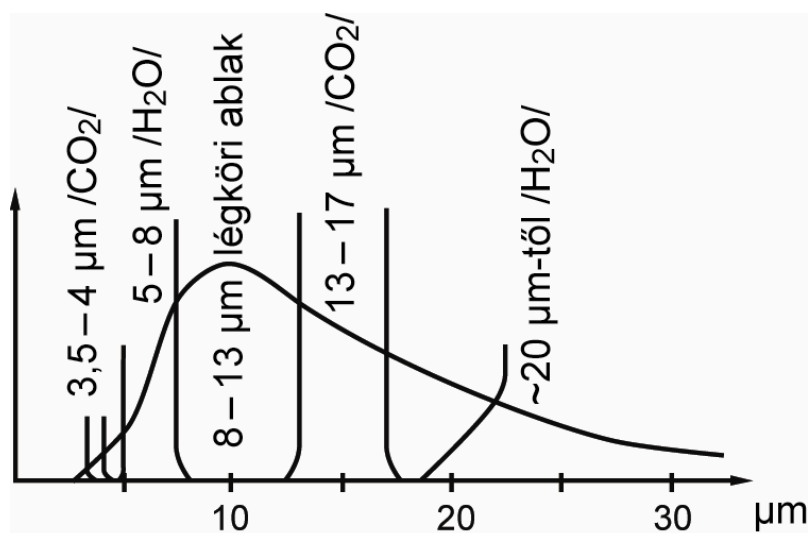
### 7.2. A Föld energiamérlege

Földünk a Nap bolygója, amelynek átlagos hőmérséklete 288 K körüli. Az, hogy a Föld hőmérséklete a 6000 K hőmérsékletű, Naptól jövő sugárzás ellenére állandó, azt jelenti, hogy a Naptól a Földre érkező energia nem tárolódik, hanem visszajut az űrbe. Felmerül a kérdés, hogy mi történik a Naptól a légkör határára érkező  $1,39kW/m^2$  sugárzási energiával. Az összegező megállapításon túl, hogy a Föld a beérkező energiát részben visszaveri, részben kisugározza, s ez a dinamikus egyensúly alakítja ki a Föld átlagos hőmérsékletét, érdemes kissé részletesebben megvizsgálni, hogy a sugárzási egyensúly létrejöttében milyen szerepe van a légkörnek, a légköri víznek és a földfelszínnek.

A Nap és a Föld úgynevezett hőmérsékleti sugárzását különböző hullámhosszúságú sugárzás elegye alkotja, az egyes összetevők súlyát a hőmérséklet függvényében a Planck-görbe adja meg. A 7.2.1. ábra a Nap 6000 K-es, a 7.2.2. ábra a Föld 288 K-es sugárzás-eloszlási görbéjét mutatja.



7.2.1. ábra: A Nap sugárzását leíró Planck-görbe

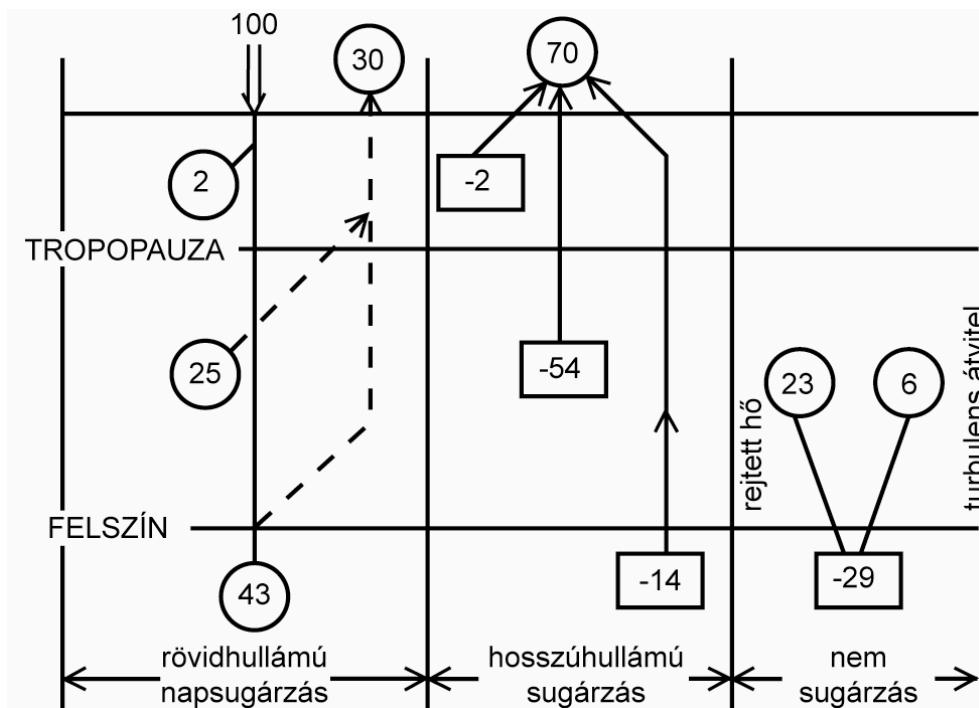


7.2.2. ábra: A Föld sugárzását leíró Planck-görbe

Az ábrák mutatják, hogy a Nap sugárzását rövid, a Földét pedig hosszú hullámú összetevők alkotják. A két sugárzási tartomány nem fedt át egymást, hiszen a napsugárzás  $2\mu\text{m}$  körüli hullámhosszakon már semmilyen összetevőt sem tartalmaz, a Föld kisugárzása pedig innen kezdve növekszik nagyobb hullámhosszúságú összetevők felé. Emiatt a mérésekben Nap rövidhullámú és a Föld hosszúhullámú sugárzása elkülöníthető. (A 7.2.2. ábra néhány olyan folyamatra is utal, amelyekkel most nem kívánunk foglalkozni. Mutatja az úgynevezett üvegházhatást, ami annak a következménye, hogy a légköri gázok a Föld [hőmérsékleti sugárzás](#)ából egyes hullámhossztartományokban erősen elnyelnek. Ez a Föld átlagos hőmérsékletét mintegy  $30^\circ\text{C}$ -kal növeli.)

A Föld globális energiámérlege tehát úgy alakul ki, hogy a Föld a beérkező sugárzás egy részét elnyeli, más részét visszaveri a világűrbe. A elnyelt sugárzás energiája sem tárolódik azonban, hosszúhullámú formában visszasugárzódik az űrbe. A Föld a rövidhullámú napsugárzás egy részét hosszú hullámúvá alakítja!

A kétféle sugárzás bonyolult visszaverődési és elnyelődési folyamatok során alakítja ki a Föld egyensúlyi hőmérsékletét. A sugárzási egyensúlyarányait a 7.2.3. ábra szemlélteti. (A visszavert és elnyelt sugárzás mennyiségét a Napból érkező sugárzás százalékában fejeztük ki.)



7.2.1. ábra: A sugárzási mérleg

A 7.2.3. ábra mutatja, hogy a bejutó energia nagyobbik részét a Föld felszíne nyeli el. Ugyanakkor a hosszú hullámhosszú kisugárzásért főként a **troposzféra** felelős. Hogyan tud a légkör több energiát kisugározni, mint amennyit elnyel? Ehhez a Föld felszínéről energiát kell átvenni a légkörbe! Az energiámérleg kialakításában, a felszín és a légkör közötti hőcsere biztosítására újabb szereplők, a légköri víz és a turbulens hőátvitel jelenik meg. Szinte hihetetlen, hogy a légkör össztömegének átlagosan csak 0,25%-át képviselő víz a teljes energiacsere több mint 20%-nyi részét szolgáltatja.

A magyarázatot egyrészt a víz gyors körforgása, másrészt nagy párolgáshője adja. A légkör teljes víztartalma nagyjából 10 naponként cserélődik, és 1 kg víz elpárologtatásához több mint 2000 kJ energia szükséges. Így már érthető, hogy a rövidhullámú sugárzástól felmelegített Földről elpárolgó, majd a magasban újra lecsapódó víz valóban hatalmas mennyiségű energiát szállít a légkörbe.

A párolgás-lecsapódás miatt létrejövő felhőképződés-csapadék hullás körforgás az energiámérlegben játszott szerepe mellett felelős a légkör elektromosságáért és a villámokért is.

### 7.2.1. A Föld tengelye dőlt

A Földet a napsugárzás egyenetlenül melegíti. Ha a Föld tengelye merőlegesen állna az **ekliptika** (Földpálya) síkjára, akkor a napsugarak mindig az Egyenlítőn érkeznének merőlegesen a Földre, és onnan észak és dél felé haladva a sugarak egyre laposabb szögben érnék a Föld felszínét, azaz egyre kisebb energia esne egységnyi területre. Ekkor az Egyenlítő környékén mindig nyár, a sarkok közelében mindig tél lenne.



A Föld tengelye azonban 23,5 fokos szögben hajlik az **ekliptika** síkjához. Emiatt az északi félteke nyarán a **Ráktérítő** környezetében, a délién pedig, a **Baktérítő** környékén érkeznek a napsugarak merőlegesen a Földre. Így keletkezik az évszakok váltakozása a Föld keringése miatt.

### 7.3. Az általános légkörzés

A napsugárzás egyenetlen eloszlása a földtengely ferdesége és a Föld forgása, mint láttuk, bonyolult hőmérsékleti viszonyokat teremt. Az általános légkörzés alapvetően az Egyenlítő körül erősebben és a sarkokon kevésbé felmelegedő levegő hőmérséklet-különbségének kiegyenlítésére jön létre. Az atmoszférában a hő szállítása áramlás formájában valósul meg. Az áramlásokat azonban a Föld forgása miatt fellépő Coriolis-erő eltéríti. (A Coriolis-erő részletesebb tárgyalását a Függelék tartalmazza.) Tovább bonyolítja a képet, hogy a szárazföldek nagy része az északi féltekén található, valamint az, hogy bár a sugárzási egyenleg állandósága miatt az áramlások nagy átlagban mindig ugyanúgy mennek végbe, mind időben, mind helyileg nagy ingadozások is felléphetnek bennük.

Az áramlások alapvető tulajdonságai egyszerűbben megérthetőek, ha egyszerre csak egy-egy fontos dinamikai hatás következményeit vizsgáljuk, majd az így adódó áramlási képeket szuperponáljuk.

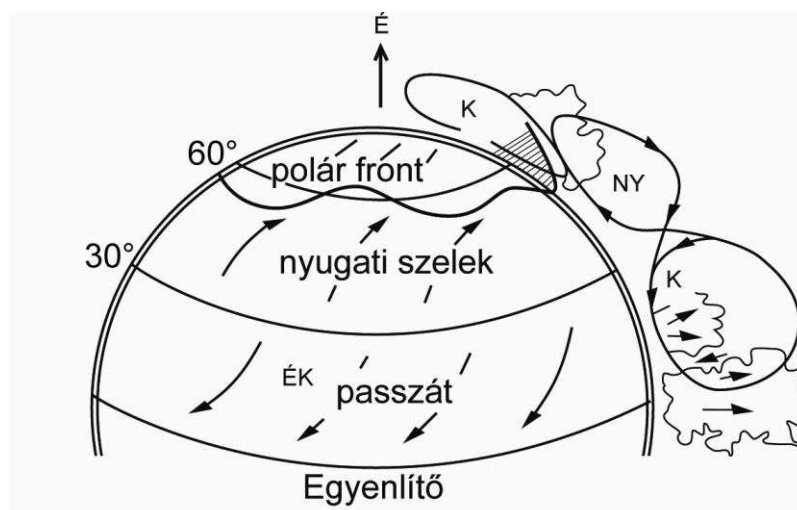
Amennyiben az álló Földet a Nap az Egyenlítő síkjában naponta körbejárná (ahogyan ezt az ókorban képzelték), akkor az Egyenlítőn felmelegedő levegő felszállna, a sarkok felé áramlana, ahol kihűlve lefelé mozogna. A magasban a sarkok felé áramló levegő helyére a talajon hideg levegő áramlana az Egyenlítő irányába, ahol újra felmelegedve ismét emelkedő mozgásba kezdene. Ennek a hőmérséklet kiegyenlítődését szolgáló áramlásnak a hatására, mindkét féltekén kialakulna tehát egy-egy folyamatos légkörzés.

Ha a Föld forogna, de a Nap nem melegítené a légkört, akkor a levegő hamarosan felvonná az adott helyen a forgásnak megfelelő sebességet, és együtt mozogna a Földdel, azaz a Földhöz képest nem jönnének létre áramlások.

A valóságban a két hatás együtt működik, megtévezve azzal, hogy a Föld tengelye nem merőleges az ekliptika síkjára. Ez utóbbi hatás okozza – mint már említettük – az évszakok változását.

#### 7.3.1. Az általános légkörzés cellás szerkezete

A földi légkörzés, a tapasztalat szerint, nem az előző gondolatmenetnek megfelelő egy-egy féltekére kiterjedő áramlási cellákból áll. Az áramlások nagy vonalakban történő áttekintéséhez érdemes olyan idealizált képet vizsgálni, amelyben a földfelszín ugyanaz a homogén közeg (pl. víz) borítja. Bár a kontinensek erőteljesen befolyásolják a kialakuló áramlási képet, fontosabb tulajdonságaiban az egyszerűbb, s könnyebben értelmezhető elképzelés is helyesen tükrözi a rendszer tulajdonságait.



7.3.1. ábra: A nagy földi légkörzés sematikus képe

A 7.3.1. ábra sematikususan mutatja a nagy földi légkörzés északi féltekére eső részének legfontosabb jellegzetességeit. Hasonló képet mutat a déli félteke áramlása is. Az ábra szélén a levegő mozgásának vertikális vetülete látható. Eszerint a féltekék légkörzése három cellára bontható. A nagyjából az Egyenlítő és a térítő körök között elhelyezkedő Hadley-cellában a levegő a talaj közelében a pólus felől az Egyenlítő felé (az északi féltekén északról délre) mozog. A térítő körök és a sarkkörök között úgynevezett inverz cellák alakulnak ki, amelyekben a talajon az Egyenlítő felől (az északi féltekén délről északra) a sarkok felé irányul az áramlás. Ezeket a cellákat **Ferrel**-celláknak nevezzük. A Ferrel-cellák általában a sarkkörökig terjednek. Közöttük és a sarkok között helyezkednek el a poláris cellák, amelyekben a légkörzés iránya megegyezik a Hadley-cellákéval.

További jellegzetessége a földi légkörzésnek, hogy a sarkkörök táján a hideg és meleg levegő viszonylag éles határvonalal találkozik. Ezt a határt polárfrontnak nevezzük. A polárfront a tapasztalat szerint állandó hullámszó mozgásban van, és a róla leszakadó örvények felszabdadják a Ferrel-cellának a sematikus képen látható egyszerű légkörzését.

### 7.3.2. A Hadley-cella

A **troposzféra** a Föld felszínén sekély, mintegy 10 km vastagságú réteget alkot. A troposzféra magasabb rétegeiben az Egyenlítő felől a sarkok felé áramló meleg levegő nagyjából a hosszúsági körök mentén haladva követi a Föld görbületét. Az összetartó hosszúsági körök mentén mozgó levegő már a térítő körök táján erősen összetorlódik, sűrűsége megnő. Emiatt mind a déli, mind az északi félteke 30°-os szélességi köre táján a magasban feltorlódó levegő a talajon magas nyomást (szubtrópusi magas nyomás) hoz létre, ami miatt az Egyenlítő felé fújó szél keletkezik. Az Egyenlítő felé áramló levegő pótlását a magashól lefelé mozgó levegő biztosítja. Az Egyenlítőnél kezdődő cellák emiatt nem terjedhetnek a pólusokig!

Az Egyenlítő felé fújó szelet a Coriolis-erő az északi féltekén jobbra, a délin balra téríti, ezért a szubtrópusok és az Egyenlítő között az északi féltekén északkeleti, a délin délkeleti szelek fújnak. Őket nevezzük **passzátszélnek**, illetve angol nyelven „**trade-wind**”-nek. A két félteke összeáramló passzátszele az Egyenlítő mentén összeáramlást hoz létre. Ezt nevezzük „**Intertropikus összeáramlási zónának**” (*InterTropic Convergence Zone*, röviden ITCZ). Ebben a zónában a hőmérséklet magas, és gyakoriak a

hosszú szélesenedes időszakok, amit a tengerészek a depresszióra utaló angol kifejezéssel „[doldrum](#)”-nak neveznek.

A passzátszelek az Egyenlítői feláramlással, a magasban a szubtrópusok felé mozgó áramlással és a szubtrópusi levegő lefelé mozgó áramával kiegészítve alkotják a Hadley-cellának nevezett önálló légkörczést. A cella George [Hadley](#)ről (1685–1768) kapta a nevét, aki már Coriolis előtt felismerte, hogy a [passzátszél](#) iránya a Föld forgásának következménye. A [Hadley-cella](#) szélén látható légkörczés nem egyezik meg a cellában mozgó légrések pályájával, hanem csak a pályák függőleges síkra vett vetületét mutatja. A légrések a Coriolis-erő eltérítő hatása miatt mind a magasban, mind a talaj közelében kimozdulnak az észak-déli egyenesből, és pályájuk spirálissá válik.

Az áramlási kép világosan mutatja, hogy a Hadleycella-áramlásban az Egyenlítő felől hő áramlik a magasabb szélességek felé.

### 7.3.3. A poláris és a Ferrel-cella

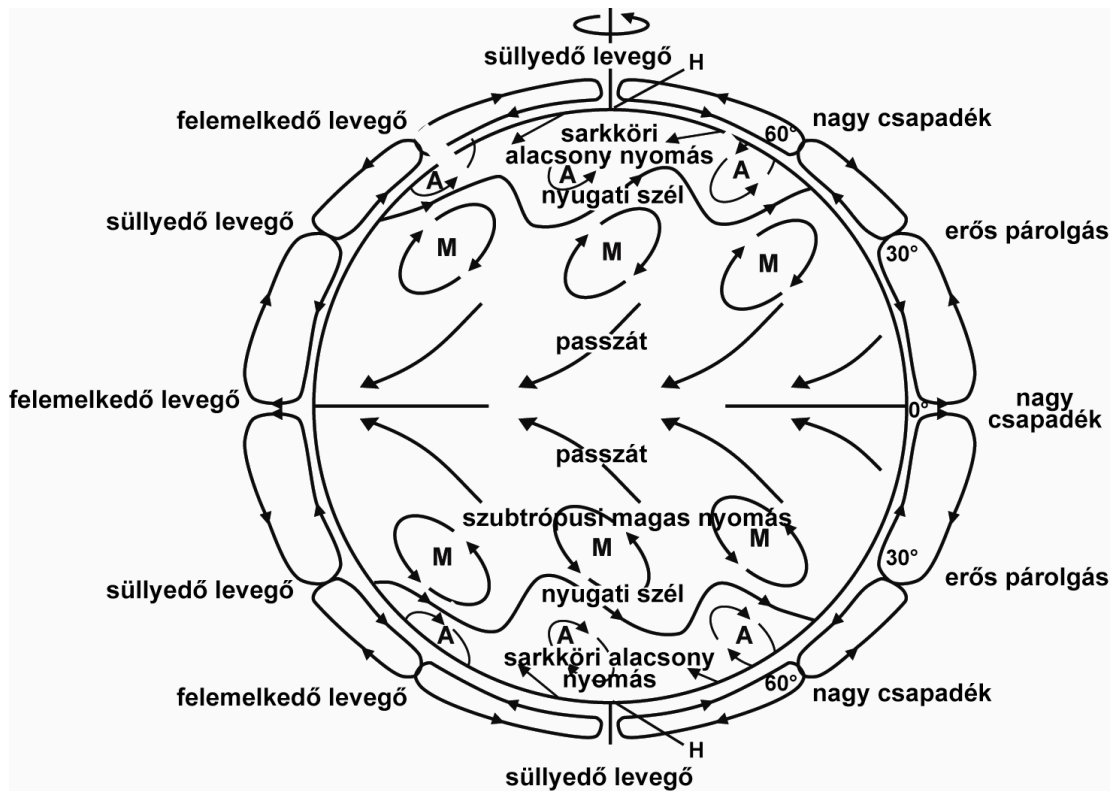
A szubtrópusi magas nyomású zónához hasonlóan, a sarkokon leszálló nagyon hideg levegő is magas nyomást hoz létre. A talaj közelében mind a szubtrópusi, mind a sarki magas nyomás felől áramlás indul. A két áramlás nagyjából a sarkkör táján találkozik, és felszálló légáramlást okoz. A magasban ez az áramlás két részre válik, egyik része a pólus felé halad és bekapcsolódik az ottani leszálló légáramlásba, a másik rész az Egyenlítő felé mozog és a szubtrópusokon leszálló légáramlással egyesülve erősíti a magas nyomás kialakulását. A sarki légkörczést poláris cellának, a két cella között létrejövő fordított körüljárású légkörczést Ferrel-cellának nevezzük.

Természetesen a Coriolis-erő ezekben a cellákban is eltéríti a légáramlások észak-déli ágát, emiatt a talajon a térítő körök és a sarkkör között a szélirány mindkét féltekén nyugatias lesz. A poláris cellákban pedig a talajon keleties az uralkodó szélirány. Ezekben a cellákban a Coriolis-erő hatása sokkal dominánsabb, mint a Hadley-cellában, hiszen a  $f = 2\Omega \sin \varphi$  [Coriolis-paraméter](#) a szélesség növekedésével nő.

A cellák találkozásánál (a 30. és a 60. szélességi kör környékén) a magasban a tropopauza közelében éles hőmérséklet-különbség alakul ki, s ennek, valamint a Coriolis-erőnek következtében nagy sebességű úgynevezett [futóáramlások](#), vagy „[jet stream](#)”-ek keletkeznek. A „[jet stream](#)”-ek mindig nyugatias szelet jelentenek. A szubtrópusi futóáramlás helyzete jó közelítéssel állandó, a polárfiót futóáramlása azonban szabálytalanul változtatja helyét és időnként meg is szűnik. Ennek ellenére ebben az áramlásban mérhetők a legnagyobb (télen akár 450 km/h) erősségű szelek.

### 7.3.4. A Rossby-modell

Az általános légkörczés fenti modellje azonban még mindig sok tekintetben pontatlan. A [Ferrel-cella](#) áramlása sokszor feltöredezik és áramlási képében önálló, nagy örvények, [ciklonok](#) és [anticiklonok](#) jelennek meg. A Ferrel-cella szabálytalan áramlási képét a polárfiót hullámozó mozgása okozza. A polárfiótban a sarki hideg és szubtrópusi mele levegő mindig viszonylag éles határfelülettel találkozik, maga a fíot azonban hullámozik és erősen változtatja helyét.



7.3.2. ábra: A nagy földi légkörzés

**Rossby** megállapította, hogy a sarkvidéki meleg és hideg levegő határán létrejövő polárfront a 40. és a 60. szélességi kör között hullámzik és az egész földet körbeéri. A hullámzó polárfront kitüremlései megnövekedhetnek és a frontról lefűződve, zárt örvények ciklonok és anticiklonok formájában leszakadhatnak. A ciklonok ott keletkeznek, ahol a meleg levegő észak felé nyúlik. A meleg levegőben a nyomás alacsonyabb, így a ciklonok alacsony nyomású képződmények, amelyekben a dél felé nyúló hideg levegő gyorsabban mozog, mint a meleg. A frontvonalról véletlenszerűen leszakadó ciklonok azután nyugatról keletre haladnak, forgásirányuk az északi féltekén az óramutató járásával ellentétes, a déli féltekén azonos irányú. (A 7.3.2. ábra szematikusan ezt a ma elfogadott általános áramlási képet mutatja.) Az anticiklonokban az északi féltekén a forgás iránya az óramutató járásával megegyező.

A mérsékelt övezet, így hazánk napi időjárásának előre nehezen jósolható változékonyságát lényegében a törvényszerűen keletkező, úgynevezett mérsékelt égövi ciklonok hozzák létre. Az örvények leszakadása a Föld egyenetlen hőmérséklet-eloszlása és forgása miatt törvényszerűen be kell, hogy következzen, az örvények keletkezésének azonban sem helye, sem ideje nem jósolható hosszú időtartamra előre.

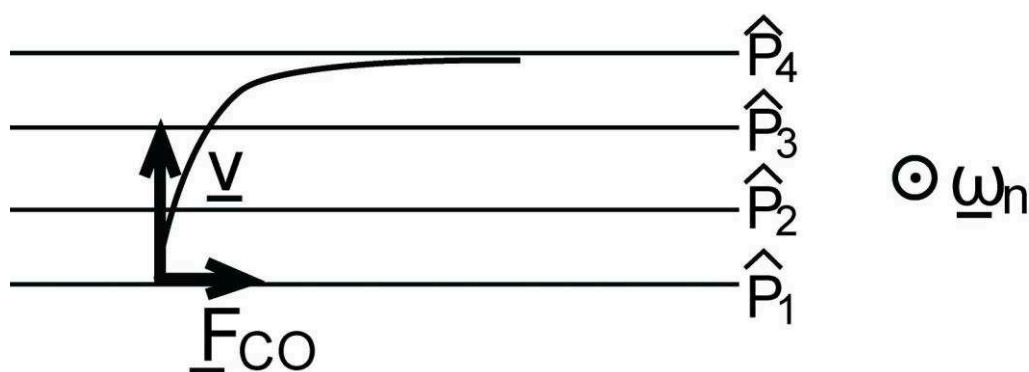
#### 7.4. Ciklonok és anticiklonok

A mérsékelt égöv időjárásának alakulása döntően az egymást követő ciklonok és anticiklonok mozgásától függ. Láttuk, hogy ezek a nagy örvények általában a polárfrontról szakadnak le és nyugati irányban mozognak. Keletkezésükben törvényszerű ismétlődés fedezhető fel. Ez a kép azonban erősen szemiatizált, a valóságban a ciklonok és anticiklonok

keletkezése nem köthető kizárólagosan a polárfronthoz és mozgásuk is erősen véletlenszerű, hosszabb időre előre nem jósolható.

#### 7.4.1. A geostrofikus szél

Megállapítottuk, hogy a horizontális síkban mozgó levegőt a Coriolis-erő az északi féltekén jobbra, a délin balra téríti el a nyomáskülönbség által megszabott irányától. Az eltérés azonban csak addig folytatódhat, míg az áramlás párhuzamossá nem válik az izobárokkal. Ezután a mozgás már nem változtatja irányát, egyensúlyi, úgynevezett geostrofikus áramlás alakul ki. Az áramlást azért nevezzük egyensúlyinak, mert a mozgás sebessége nem változik, a nyomásváltozából származó erő egyensúlyt tart a Coriolis-erővel. A 7.4.1. ábra párhuzamos izobár rendszerben mutatja a geostrofikus szél kialakulását.

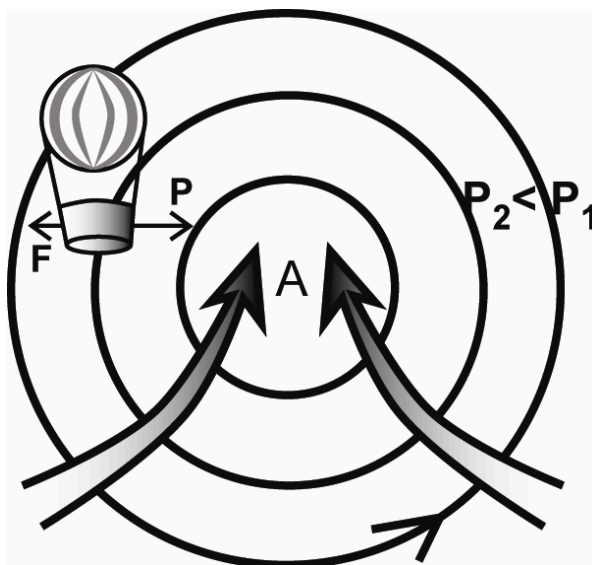


7.4.1. ábra: Geostrofikus áramlás kialakulása párhuzamos izobár rendszerben

#### 7.4.2. A levegő mozgása a ciklonokban és az anticiklonokban

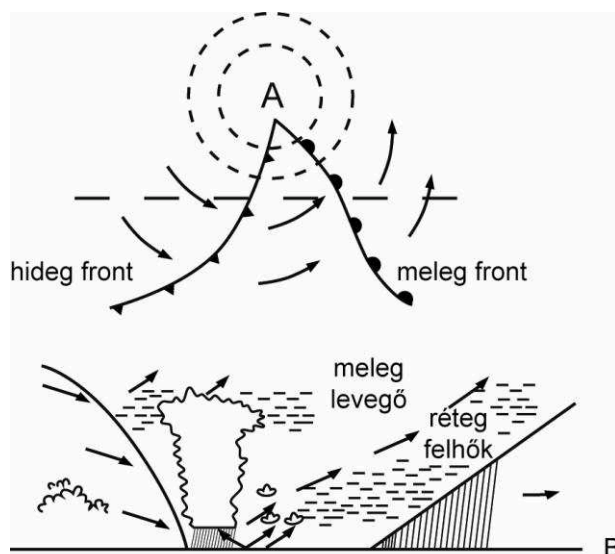
A ciklonok és anticiklonok izobár rendszere jól közelíthető koncentrikus körökkel. A ciklonokban a kör középpontjában alacsony, anticiklonokban magas nyomás található. Megállapítható az is, hogy a légrések mindkét légköri képződményben gyakorlatilag körpályán mozognak. A körmozgás iránya ciklonban az óramutató járásával ellentétes, anticiklonban pedig azzal megegyező. (A körmozgásra ciklonban kicsiny befelé és felfelé irányuló mozgás szuperponálódik. Anticiklonban ez az első közelítésben elhanyagolható járulékos mozgás kifelé és lefelé mutat.)

A ciklonokban és anticiklonokban a körmozgást az előző pontban tárgyalt **geostrofikus mozgás**hoz hasonlóan a Coriolis-erő eltérítő hatása hozza létre. Ha például ciklon külső oldalán mozgásba lendülő hőlégballont figyelünk, megállapíthatjuk, hogy a ballon először befelé, a ciklon alacsony nyomású középpontja felé indul. A Coriolis-erő azonban eltéríti, egészen addig, míg valamelyik állandó nyomású görbe (izobár) mentén „stabil pályára” nem áll. Ekkor a mozgás stabilizálódik. Ebben az esetben a centripetális erőt a csökkenő nyomás miatt fellépő, befelé mutató, erő (P) és a kifelé mutató Coriolis-erő (F) eredője szolgáltatja (7.4.2. ábra).



7.4.2. ábra: Ciklon idealizált izobár rendszere

A ciklonok további fontos tulajdonsága, hogy mindig a hideg és meleg levegő határán képződő hullámszerű zavarokról lefűződő örvények, amelyekben a forgása mellett jól érzékelhetők a hideg és meleg levegő határvonalai, a frontok is. A frontok mozgása közben az elől haladó meleg levegő felsiklik az előtte elhelyezkedő hidegebb fölé, míg a hátul haladó hidegfront megemeli az előtte lévő meleg levegőt. Amikor a gyorsabban haladó hidegfront utoléri a melegfrontot, létrejön az úgynevezett „okkludált” front, és a meleg levegő kiszorul a talajszintről. Ezzel a ciklon élete lényegében befejeződik (7.4.3. ábra).



7.4.3. ábra: A frontok mozgása ciklonban

Időjárási szempontból a frontok meghatározó képződmények, változatos felhőzetük és csapadékuk mindig szolgálhat meglepetéssel. Nagy általánosságban azt mondhatjuk, hogy a ciklon melegfrontja előtt rétegfelhők alakulnak ki, a melegszeletben (a meleg- és hidegfront között) kicsit javul az idő, elszórtan véletlenszerűen gomolyfelhők keletkeznek, a hidegfront pedig általában viharos szellőkéséssel érkezik, és erős zivatarokat hoz.

Az anticiklonokban – mint már említettük – a nyomás közepén a legmagasabb, és kifelé haladva csökken. A forgás mellett fellépő másodlagos mozgás ebben az esetben

középen leszálló és kifelé tartó áramlás. A leszálló levegő melegszik, ezért a benne lévő felhők vízcseppjei elpárolognak. Az anticiklonokban jellegzetes „felhősztató” hatás működik. Emiatt nyáron a tartós meleg, télen a tartós hideg, és mindkét esetben gyakorlatilag felhőmentes időért az erős, nagy kiterjedésű anticiklonok felelősek.

A fentiekben vázolt kép természetesen elnagyolt. Az időjárást rengeteg helyi tényező alakítja, a szárazföldről és vizek váltakozása, a hegységek elhelyezkedése, mind-mind befolyásoló tényező, de a mikroklímán akár egy faszor kivágása is változtathat.

## 7.5. A zivatarfelhők összetétele és keletkezése

Az előzőekben vázoltuk a légkör egész Földre kiterjedő mozgását, és leírtuk az időjárásunkat befolyásoló legfontosabb képződményeket, a ciklonokat és anticiklonokat. A légköri mozgási skála bemutatását egy kisebb kiterjedésű, lokális, de esetenként nagyhatású légköri képződménnyel, a zivatarfelhővel zárjuk. A zivatarfelhőket mint minden felhőt, levegő és vízpára keverékéből álló gáz és a vízpárából kicsapódott nagyon finom méreteloszlású diszperz vízcseppek és jégzemcsék alkotják. A jégzemcsék döntően a zivatarfelhő tetején, szétterjedő alakjáról üllőnek nevezett fehér „koronában” helyezkednek el.

Az eddigiekkel ellentétben a zivatarfelhőkben fontos szerepet játszanak a heves vertikális mozgások.

### 7.5.1. Összetétel, energia

A méretek legjobban néhány összehasonlító adattal érzékeltethetőek. A zivatarfelhőhöz hasonlóan fejlődő, kicsiny nyári gomolyfelhő vízszintes kiterjedése nagyjából  $50 \cdot 50 m^2$  magassága  $30 m$ , azaz térfogata kb.  $7,5 \cdot 10^{-5} km^3$ . Ebben a felhőben jó közelítéssel  $75 t$  levegő  $20-100 kg$  vízgőz és vízcseppek formájában  $10-50 kg$  folyadékvíz található. A kisebb méretű zivatarcellák  $2 km \cdot 2 km \cdot 5 km = 20 km^3$  térfogatában  $20$  millió tonna levegő mellett  $100-300$  ezer tonna vízgőz, és felhőelemek formájában körülbelül ugyanennyi folyadékvíz van. Ez a hatalmas mennyiségű vízpára a felhő kevesebb, mint egy órányi életciklusa során az alsó légrétegekből a heves feláramlás során a magasba kerül, és ott kicsapódik. Kicsapódáskor minden tonna párából mintegy  $2000 MJ$  hő szabadul fel, azaz a zivatarfelhőben összesen  $2-6 \cdot 10^6 MJ$  hő keletkezik, ami az egy órányi élettartammal számolva  $5000-15000 Mwatt$  teljesítménynek felel meg. (A paksi atomerőmű négy blokkjának elektromos teljesítménye kb.  $2000 Mwatt$ .) Érthető tehát, hogy ez a hatalmas energia, még akkor is, ha igen nagy térfogatban és óriási tömegű levegőben oszlik el, pusztító erejű szélvihart kelthet.

### 7.5.2. A zivatarfelhők életciklusa

Az első kérdés, tehát az, hogy miért keletkezik a levegőben a nagy páratartalmú levegőt felfelé szállító áramlás, az úgynevezett **konvekció**?

Az ok ugyanaz, mint a nagy légkörzést hajtó folyamatok esetén; a napsugárzás és a földi **hőmérsékleti sugárzás** terjedési és elnyelődési folyamatai. A rövidhullámú napsugárzást a levegő lényegében átengedi, így a napsugárzás a Földet melegíti fel. A felmelegedő Föld azután hosszuhullámú sugárzást bocsát ki, amit a levegő elnyel. Ez a hosszuhullámú sugárzás melegíti fel a levegőt. A melegedés miatt a Föld közelében a levegő

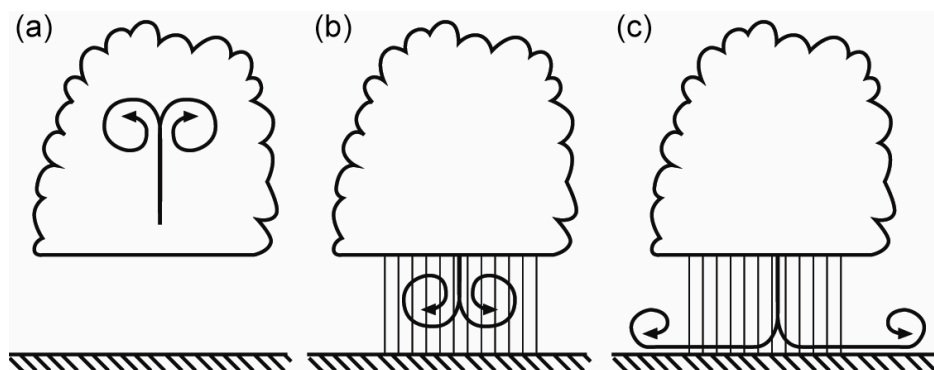
kitágul,

sűrűsége csökken, s a környező hidegebb levegőben buborékként felszáll. A felhajtóerő az Archimedes-törvénnyel magyarázható.

A hőmérséklet-különbség miatt kialakuló feláramlást szabad konvekciónak nevezzük. (A szabad konvekcióval azonos hatású folyamatokat indíthat a feláramló levegőben a kényszerített konvekció, amely akkor jön létre, ha a horizontálisan – vízszintes síkban – mozgó, vízpárában gazdag meleg levegőt hideg levegőtömb, vagy földrajzi akadály – hegy – kényszeríti emelkedésre.)

Az emelkedő levegő a légnyomás csökkenése miatt nagymértékben tágul, s emiatt gyorsan hűl. (Ezt a folyamatot a szódásüveg patronából kiáramló és a gyors tágulás miatt lehülő széndioxid tágulásához hasonlóan képzelhetjük el.) Az ilyen tágulást adiabatikusnak (hőcserementesnek) tekinthetjük, amelynek során a környezet és a vizsgált gáz nyomása pillanatszerűen kiegyenlítődik, de hőcsere nem lép fel. Az emelkedő levegő – egyéb hatások híján – százméterenként egy fokot hűlne, s hamarosan elérné a környezet hőmérsékletét, azaz gyorsulása megszűnne. Az emelkedő levegő azonban komoly „hőtartalékkal” rendelkezik. Amikor hőmérséklete eléri a harmatpontot, akkor páratartalma elkezd kicsapódni. A felszabaduló hő a százméterenkénti hűlést kb.  $0.6^\circ C$ -ra csökkenti. (A páratartalom kicsapódása a termik emelkedése szempontjából éppen olyan, mint amikor az emelkedő hőlégballonban bekapcsolják a ballont fűtő gázégőket, a melegítés miatt csökken a ballon levegőjének sűrűsége, a felhajtóerő pedig növekszik.)

Végül azonban az emelkedő levegő hőmérséklete kiegyenlítődik a környezetével, a gyorsulás megszűnik, s a még lendületben lévő levegő egyensúlyi helyzeténél kissé tovább emelkedve szétterül a magasban. A **troposzféra** határára érkező levegő hőmérséklete már olyan alacsony, hogy a felsodort vízcseppek is kifagynak, kialakul a jégtűkből álló hófehér üllő.



7.5.1. ábra: Örvények keletkezése lefelé áramló levegőben

Eddig a termik emelkedésére koncentráltuk figyelmünket, érdemes azonban a környezettel és a kicsapódó vízgőz mozgásával is foglalkozni. Amikor a termik emelkedése elkezdődik, akkor a felszálló levegő helyére a környezetből levegő áramlik, ami folyamatosan nedves és meleg levegővel táplálja a termiket. A felhő derekára (5–6km) érve megindul a vízpára kicsapódása, a felhőcseppek növekedésnek indulnak, és esőcseppekké válnak. A felhőcseppeket az emelkedő levegő felfelé sodorja, a nagyobbra nőtt esőcseppek azonban lefelé mozognak, és lefelé mozgó, hideg légáramot keltenek. A lefelé zúduló hideg levegő a talajba ütközve szétterül, és oldalirányban kiáramlik. Ezt a zivatarfelhőből fújó erős hideg szelet nevezzük kifutó szélnek, amit néhány percen belül



többnyire heves esőzés követ. A szétterülő hideg levegő a környező levegőbe ütközve kétoldalt visszapördül és ellentétes irányban forgó örvényeket alkot (7.5.1. ábra), ugyanakkor elvágja a feláramló meleg levegő utánpótlásának útját. A nedvesség eső, esetleg jég formájában kihullik a felhőből, a felhő életciklusa befejeződik.

### 7.5.3. Zivatarláncok és szupercellák

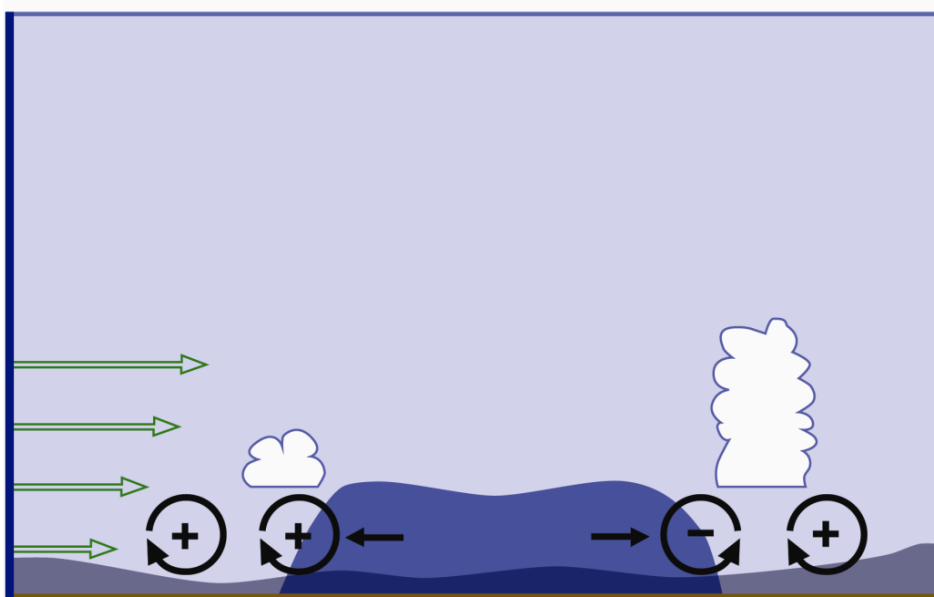
A fentiekben leírt életciklus azonban gyakran módosul, és egyetlen zivatarfelhő helyett cellás szerkezetbe rendeződő zivatarok sora alakul ki. A zivatarláncok kifejlődését a levegő örvénylése okozza. Az örvénylő mozgás megértéséhez a szélnyírás fogalmával kell megismerkednünk. Általános tapasztalat, hogy a szélerősség (az áramló levegő vízszintes sebessége) a magassággal nő.

A magassággal növekvő szélmező az óramutató járásával megegyező irányú horizontális örvényességgel rendelkezik. Ezt egyszerűen megérthetjük, ha az áramlásba vízszintes tengelyű lapátkereket képzelünk. A lapátokba ütköző szél a felső lapátokat nagyobb erővel löki meg, mint az alsókat, emiatt a lapátkerék forgásba jön.

Ha a szélnyírás, és a vele járó vízszintes örvénylés nem nagyon erős, akkor a már leírt események következnek be. A hideg levegő elvágja a feláramlást tápláló meleg levegő utánpótlását és a zivatarcella megszűnik.

Erős szélnyírás esetén azonban a lefelé áramló és talajba ütköző hideg levegőben keletkező vízszintes tengelyű örvények kölcsönhatásba léphetnek a felhő környezetében lévő, szélnyírás keltette örvényekkel. A szétáramló hideg levegő örvénye a zivatarfelhő előoldalán a szélnyírás miatti örvényekkel ellentétes, hátoldalán azonos forgásirányú. A felhőből kiáramló hideg levegő örvényeinek és a környező légáramlás szélnyírásából adódó örvények kölcsönhatnak egymással. Mindkét örvény magával ragadja a levegőt, s ennek eredményeként a zivatarfelhő előoldalán a két örvény között erős feláramlás, hátoldalán pedig az egymás ellen ható két örvény miatt csak gyengébb feláramlás keletkezhet. A két örvény kölcsönhatása tehát a leépülő zivatarfelhő előoldalán újabb termiket generálhat, amiből új zivatarfelhő alakulhat ki. Ez a hatás vezet a többcellás zivatarfelhők kifejlődéséhez (7.5.2. ábra).

Amennyiben a horizontális szélnyírás különlegesen erős, akkor a lefelé áramló és a talajon vízszintesre forduló mozgású hideg levegő nem képes arra, hogy elvágja az alsó szinten nagy sebességgel a felhőbe áramló meleg levegő útját, sőt kényszerített **konvekció**val megerősíti a meleg levegő feláramlását. A zivatarfelhő ilyenkor kettészakad, és a két felhőrész egymástól távolodva kezd mozogni. Az egymás tükörképeként keletkező felhők egyike fejlődhet azután hatalmas, hosszú ideig élő, pusztító erejű szupercellává. A szupercellák alján kialakuló tornádó örvények forgása azért erősödik fel, mert a felhőben lefelé áramló és visszapördülő vízszintes tengely körül örvénylő levegőt a feláramlás újra megemeli és ezzel örvénylését függőleges tengelyűvé alakítja.



7.5.2. ábra: A zivatarfelhő és környezetének örvényessége közötti kölcsönhatás

## 7.6. A tengerek áramlásai

A légkörhöz hasonlóan az óceánok vize is folytonos mozgásban van. A nagy légköri áramláshoz hasonlóan itt is megtalálhatóak a hatalmas óceáni vízkörzések, és megjelennek a különböző méretű nagy, közepes és egészen kicsiny örvények is. Ezt a széles skálájú mozgásrendszert a Földet egyenetlenül melegítő napsugárzás energiája tartja fenn és részleteiben többféle dinamikai hatás alakítja ki. Teljes analógiát azonban mégsem kereshetünk a légkör és a tengerek mozgása között, mert a levegő és a víz felmelegedése döntően különbözik. A levegő a bejövő rövidhullámú napsugárzást átengedi és alapvetően a Föld által kisugárzott hosszuhullámú sugárzás hatására melegszik fel. Az atmoszféra tehát alulról melegszik, ami természetes módon hoz létre benne **konvekciót**, biztosítva ezzel a függőleges irányú átkeveredést. Ezzel szemben a tengerek felülről melegednek, és a tengervíz mélységi átkeveredése pusztán a melegedés hatására nem jönne létre. A tengerek mélységi áramlásai – mint látni fogjuk – csak több dinamikai tényező együttes hatására következnek be, és a folyamatok sokkal lassúbbak, mint a légkörben.

### 7.6.1. A tengerek mozgását alakító dinamikai hatások

A következőkben sorra vesszük a tengerek mozgását alakító dinamikai hatásokat:

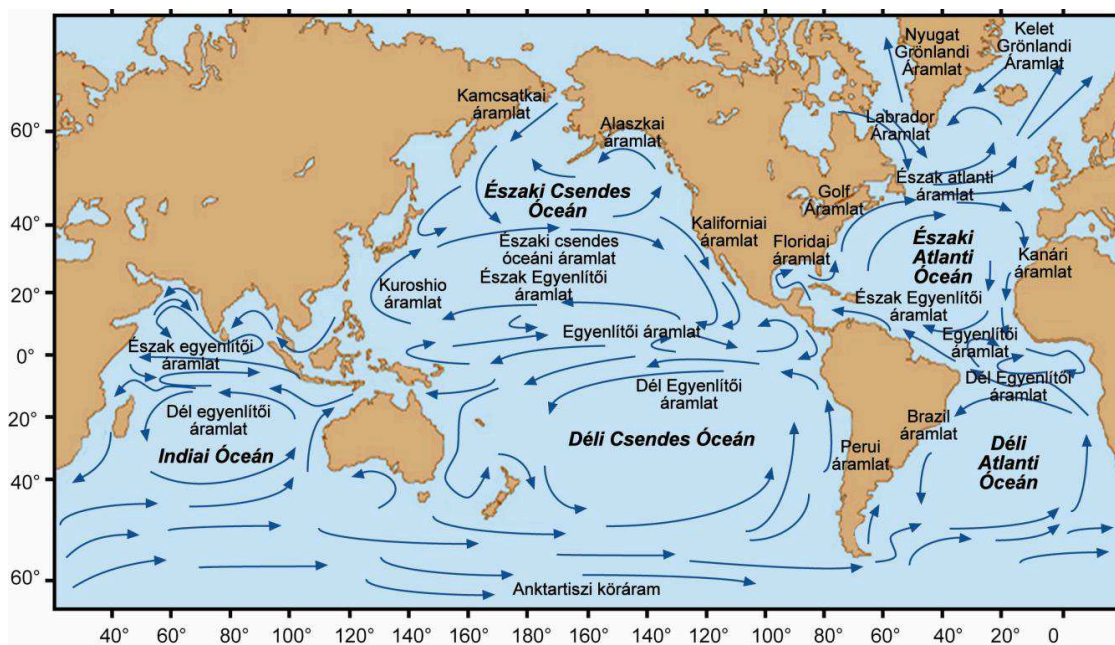
1. A Coriolis-erő, melynek szerepe azonos a légkörben tapasztalttal. A Coriolis-erő a horizontális áramlásokat az északi féltekén jobbra, a délin balra téríti.
2. A felszín felett fújó szél, ami a tenger vékony felszíni rétegével súrlódva összekapcsolja a nagy légköri mozgásrendszert a tengeráramlásokkal.
3. A tengervíz sűrűségének változásából adódó felhajtóerő. A tengervíz sűrűségét a hőmérséklete mellett a sótartalom határozza meg. Ha a tenger felszínén a víz sűrűbbé válik, mint a mélyebb rétegekben, akkor a rétegződés instabillá válik és a felszíni nagyobb sűrűségű víz lesüllyed.

4. A Nap és a Föld vonzásának napi periodikus változása, ami az árapály jelenségét okozza. Bár az árapály jelensége a Földön mindenütt észlelhető, a nagy áramlási rendszerek kialakulását nem befolyásolja lényegesen, ezért a következőkben hatását mindenütt figyelmen kívül hagyjuk.

A szél a tengermozgás horizontális sebességeloszlását, a sűrűségeloszlás pedig a vertikális átkeveredést szabja meg. A sűrűség változása miatt létrejövő és mélységi átkeveredést is biztosító nagy áramlási rendszert **termohalin cirkulációnak** nevezzük. A teljes mozgásrendszert természetesen most is a három dinamikai hatás, továbbá a szárazföldekkel való kölcsönhatások együttese alakítja ki.

A következőkben a légköri áramlásokhoz hasonlóan a tengeráramlások esetén is a pillanatnyi és helyi mozgások részletezése helyett az átlagos mozgásrendszer legfontosabb vonásai és a dinamikai hatások összefüggéseinek érzékeltetésére törekszünk. Ezért az egyszerűség kedvéért a szél hatását és a sűrűségkülönbség miatt kialakuló mélységi áramlásokat egymástól elválasztva tárgyaljuk.

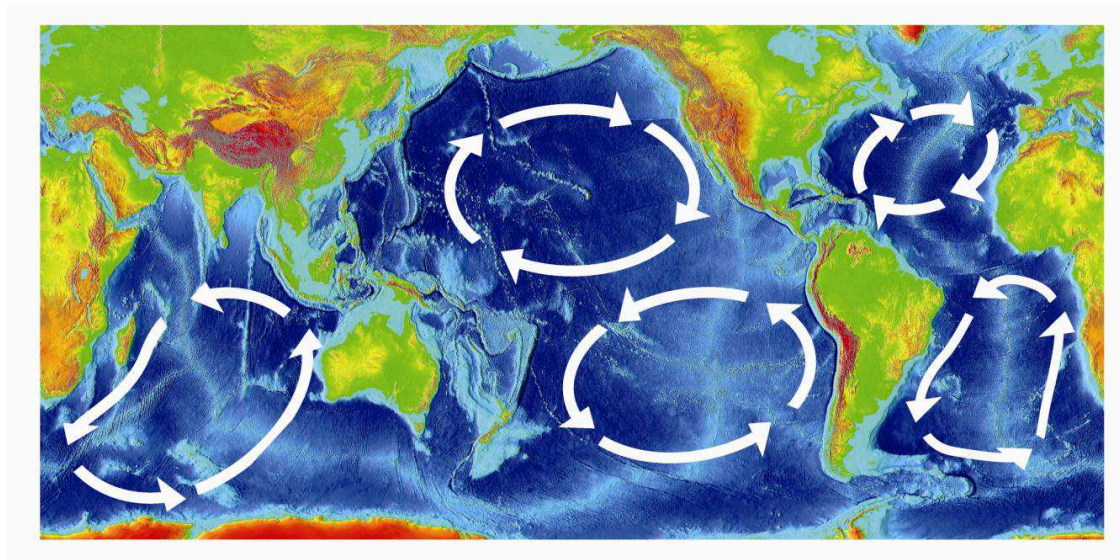
### 7.6.2. A szélfűtött tengeráramlások



7.6.1. ábra: A tengeráramlások áttekintő képe az északi félteke nyarára vonatkozóan

A 7.6.1. ábra az északi félteke nyarára átlagolt tengeráramlási képet mutatja. Látszik, hogy a légkörhöz hasonlóan a felszíni tengeráramlásokban az Egyenlítő környékén jelentkezik a keleties irányú összeáramlás, míg a közepes szélességeken a tengeráramlások is nyugatias irányúak. Ez természetes is, hiszen a tengeráramlások is az egyenetlen melegedés kiegyenlítésére indulnak meg, és a Coriolis-erő, valamint a szárazföldek eltérítő hatására térnek el eredeti irányuktól módosítva az áramlási képet. Adott áramlási részletet, például a **Golf-áramlást** vizsgálva, ez a hasonlóság már nem olyan szembeötlő. Még inkább eltérnek a képek, ha adott pillanatban vizsgáljuk adott helyen a szél és tengermozgás sebességét. Ennek oka az, hogy a tengeráramlásokat nem képzelhetjük a tengeren belül állandósult nagy folyóknak, még az olyan stabil képződmények is, mint a

Golf-áramlás folytonosan változtatják helyüket, hosszabb időre stabilizálódó, majd megszűnő meandereket alkotnak és örvények, örvénysorok szakadnak le róluk. Pusztán a sebességkép alapján nem egyszerű megérteni, hogy a szél hogyan alakítja a felszíni tengeráramlásokat.



7.6.2. ábra: Az öt nagy anticiklonális köráram

Összességében azonban az átlagolt áramlási képen jól felismerhető öt nagy tengeri köráramlás ([gyre](#)); az Észak- és Dél-atlanti, az Észak- és Dél-Csendes-óceáni, valamint az Indiai Óceáni köráramlás (7.6.2. ábra). Ezeknek az áramlásoknak jól felismerhető sajátossága, hogy anticiklonálisak. A nagy tengeri medencék északi és déli köráramai ugyanis rendre az északi és déli féltekére esnek. Az [anticiklonális áramlás](#) iránya az északi féltekén az óramutató járásával ellentétes, a délin megegyező irányú, és éppen ilyen irányt mutatnak a nagy tengeri köráramok is. Mint már megállapítottuk, az áramlások mind az északi, mind a déli féltekén jól követik az Egyenlítő környéki keleti passzát és a mérsékelt övek nyugati szelének irányát.

A sarkok felé még néhány további jellegzetes áramlás is kialakul. A sarkköri alacsony nyomású zónában mind az Észak-atlanti, mind az Észak-Csendes-óceánban ciklonális köráramlás található, a Déli féltekén pedig az Antarktisz körül cirkumpoláris áramlás alakult ki.

### 7.6.3. A szél és a tengerfelszín kölcsönhatása

A tengerfelszín felett fújó szél egyrészt áramlásba hozza a vizet, másrészt hullámokat kelt a felszínen. Nyilvánvaló, hogy minél nagyobb a szél sebessége, annál nagyobb a létrehozott áramlás sebessége. A tengerfelszínrel súrlódó szél által létrehozott súrlódás jellegű nyírófeszültséget szélsúrlódásnak nevezzük. A [súrlódási feszültség](#) a vízfelszínre a szél irányában hat, nagysága pedig a

$$\tau = cv^2 \quad (7.1.)$$

tapasztalati összefüggéssel adható meg, ahol  $v$  a szélesebesség,  $c$  pedig a légköri körülményektől függő állandó. Értéke a szélesebességgel növekszik. Tapasztalati tény, hogy

a szél hatására keletkező tengeráramlás sebessége nagyjából 0,03-szorosa a szél sebességének.

A víz felületén ható nyíróerő a folyadék mélyebb rétegeit is mozgásba hozza, a folyadékrétegek közötti erőhatást viszkózus erők közvetítik. **Lamináris (réteges) áramlás**ban az úgynevezett **molekuláris viszkozitást** kell figyelembe venni. A tengerek áramlása azonban nem lamináris, hanem örvényes, ami hatékonyabb átkeveredést biztosít. Az így keletkező viszkózus erőt örvényes, vagy turbulens viszkozitásnak nevezzük. Amennyiben nem lenne turbulens viszkozitás, akkor a felszíni szél hatását már 2m mélyen sem lehetne észlelni. Mindazonáltal, az, hogy a felszíni nyírás milyen mélyre hatol a tengerbe, erősen függ a felszín közeli réteg átkeveredtségétől, azaz attól, hogy a tenger felszíni rétege mennyire homogén. Homogén rétegben, amelynek sűrűsége csak csekély mértékben változik a mélységgel, a turbulens viszkozitás hatása könnyen érvényesül. Amennyiben a folyadék rétegezett, azaz sűrűsége erősen változik a mélységgel, a viszkózus erők jóval kevésbé képesek a felszíni nyíró erők közvetítésére. Amennyiben a tenger mélyvízi rétege, ahol a hőmérséklet lényegében már nem a felszíni folyamatoktól függ, (ezt nevezzük **termoklin határ**nak) nagyon erős hőmérsékleti ugrással kezdődő réteg, akkor a felszíni nyírás szinte egyáltalán nem hozza mozgásba ezt a réteget, a szél hatása a keskeny felszíni rétegre korlátozódik, amely a szél hatására elsiklik az alatta lévő vízrétegen.

### ***Az Ekman-spirál***

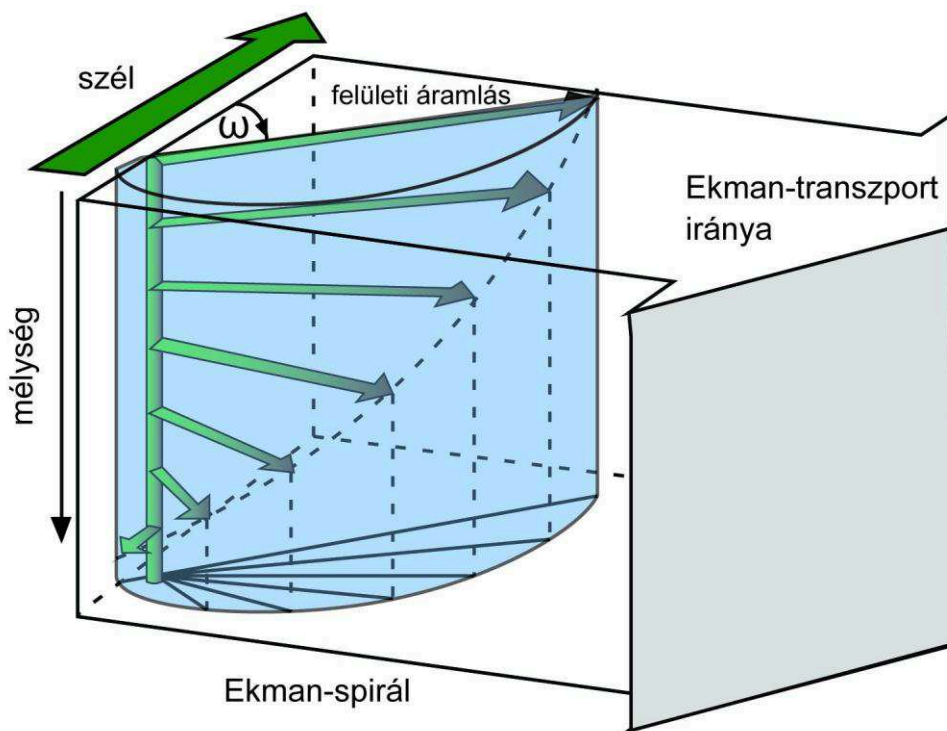
Amikor a nyugvó vízfelszín felett fújni kezd a szél, akkor a meginduló vízárám először gyorsul, majd eléri stacionárius sebességét. Az állandósult áramlás azonban meglepő tulajdonságokat mutat.

1890-ben Nansen Norvég sarkkutató hajója belefagyott a sarki jégbe, és több mintegy éven át sodródott vele. Nansen azt tapasztalta, hogy a szél hajtotta áramlás nem a szél irányába mutat, hanem attól jobbra mintegy 20–40°-kal eltér. A meglepő tapasztalat magyarázatát Ekman svéd oceanológus adta meg. Ekman azt vizsgálta, hogy a szél által a felszínre kifejtett nyírási erő, a folyadék rétegei között ébredő viszkózus erő és a Coriolis-erő hatására hogyan alakulhat ki az óceán minden rétegében állandósult sebességű (stacionárius) áramlás. Azt vette figyelembe, hogy stacionárius áramlás esetén az óceán minden rétegében zérusnak kell lennie az erők eredőjének. A felületi rétegre a szél által kifejtett erő a szél irányába mutat, az állandósult áramlás iránya azonban nem egyezhet meg a szél irányával, hiszen ebben az esetben a felszíni rétegre az alatta lévő réteg a szélesebbéggel ellentétes irányú erőt fejtene ki, s ekkor a sebesség irányára merőleges Coriolis-erő hatását nem egyensúlyozná semmi. Az áramlás iránya tehát eltér a szél irányától, és ebben az esetben a felszín alatti réteg által gyakorolt viszkózus erő egyensúlyt tarthat mind a szélnyírási feszültséggel, mind a Coriolis-erővel. Bontsuk a tengert gondolatban nagy számú vékony vízszintes rétegre. A rétegek mindegyikére elmondható, hogy a felette lévő réteg az ottani sebesség irányában húzza, az alatta lévő rétegnek pedig olyan irányba kell áramlani, hogy a viszkózus erő egyensúlyt tarthasson a felső réteg által kifejtett erővel és a Coriolis-erővel. Emiatt az áramlás sebessége az északi féltekén a mélységgel folyamatosan jobbra, a délin pedig balra fordul.

A mennyiségi viszonyokat is figyelembe véve Ekman megállapította, hogy a sebesség nagysága a mélységgel exponenciálisan csökken, valamint, hogy az idealizált, (végtelen nagy és mindig vízszintes felületű) óceán felszínén az áramlás sebessége 45°-os szöveget

zár be a szél irányával. Az egyes vízrétegek sebességvektorainak végpontja, mint azt a 7.6.3. ábra mutatja, spirális vonalon helyezkedik el. Ezt nevezzük Ekman-spirálnak. A sebesség nagyságának exponenciális csökkenése miatt a felszíni mozgás behatolása a tengerbe bizonyos mélység után már elhanyagolható. Ezt a mélységet önkényesen azzal a mélységgel szokás azonosítani, ahol a spirálisan elforduló sebességvektor iránya éppen ellentétes a felszíni áramlási iránnyal. A szél által mozgásba hozott áramlási réteg az Ekman-réteg.

Amennyiben az Ekman-réteget nem bontjuk további rétegekre, hanem egyetlen mozgásegyenletet írunk fel rá, akkor megállapíthatjuk, hogy stacionárius áramlás esetén a szélnyírási feszültségnek kell egyensúlyt tartani a Coriolis-erővel. Ez csak abban az esetben lehetséges, ha az áramlás iránya merőleges a szélnyírási erőre. Az Ekman-réteg tömegközéppontja tehát éppen a felszíni szélesebbségre merőlegesen mozog.



7.6.3. ábra Az Ekman-spirál

A valóságban a tengeráramlások nem pontosan követik Ekman levezetésének eredményeit. A felszíni áramlás például többnyire kisebb szöggel tér el a széliránytól, mint az Ekman által megjósolt  $45^\circ$ . Ez lehet a szárazföldek közelségének, vagy annak a következménye, hogy a tenger nem elég mély a teljes spirál kifejlődéséhez és a tengerfenéken fellépő sűrűlódás befolyása nem hanyagolható el.

Mindenképpen igaz azonban, hogy a tengeráramlás iránya az északi féltekén jobbra tér el a széliránytól, valamint hogy az Ekman-réteg átlagos, a tömegközépponthez köthető mozgása jó közelítéssel merőleges a szélirányra.

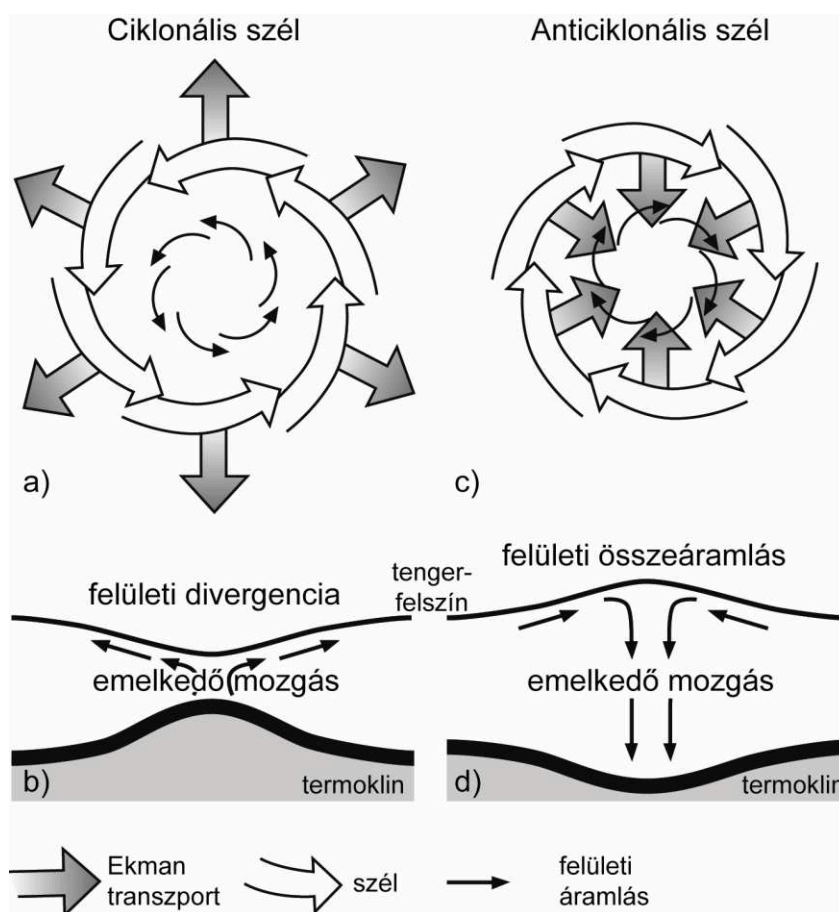
#### ***A ciklonális és anticiklonális áramlás hatása a tengermozgásra***

Az előzőekben az egyenletesen adott irányban fújó szél tengermozgásra gyakorolt hatását vizsgáltuk. Most a ciklonálisan, illetve anticiklonálisan körbe áramló levegő hatására kialakuló tengermozgással foglalkozunk. A szélnyírási hatását ebben az esetben is döntően

az Ekman által használt gondolatmenettel értelmezzük. Figyelembe kell vennünk azonban azt is, hogy a körmozgást végző levegő hatására kialakuló szélnyírási feszültség hatására a tengervíz nemcsak vízszintes, hanem függőleges mozgást is végez, és a stacionárius állapot kialakulása után a vízfelszín nem marad vízszintes.

Ciklonális mozgás esetén az Ekman-féle gondolatmenet alapján megállapíthatjuk, hogy az érintő irányú szélsébségből eredő szélnyírási feszültség miatt a felszínen a szélsébségtől kifelé forduló áramlás keletkezik, az Ekman-rétegben pedig az átlagsebesség radiálisan kifelé mutat. A szétáramlás miatt az alacsony nyomású terület alatt a vízfelszínen bemélyedés keletkezik és a szétáramló víz pótlására a mélyből feláramlás indul. Emiatt a **termoklin** határ felemelkedik. A befelé dőlő vízfelszín miatt a hidrosztatikai nyomás kifelé nő, így a felszínen kifelé áramló víz a hidrosztatikai nyomás **gradiens** ellenében áramlik.

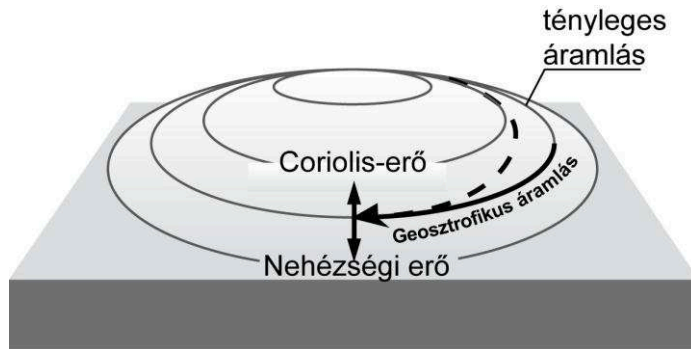
Anticiklonális esetben a helyzet éppen fordított, a szélnyírási feszültség miatt az anticiklon közepe felé irányuló áramlás keletkezik, és az átlagos áramlás ebben az esetben az anticiklon közepe felé irányul. Emiatt a tengerfelszín „felpúposodik” és az összeáramló víz lefelé kezd áramlani, következésképpen a termoklin határ is lefelé húzódik. (7.6.4. ábra).



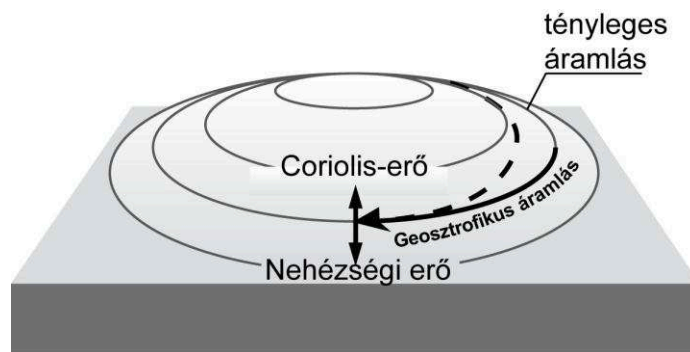
7.6.4. ábra: A vízfelszín dőlése a szél hatására

Ennek következtében alakulnak ki a nagy óceáni medencék anticiklonális köráramai. A passzátszelek és az erős nyugati szelek miatt az Ekman-sodrás mindkét féltekén „befelé sodorja és közepén felpúpozza” a tengervizet. Ez a vízdomb kifelé mutató **nyomási**

**gradiens erő**t hoz létre, amely körül, ha például szél miatti súrlódási erő elhanyagolhatóvá válik, a légköri anticiklonokhoz hasonló módon, a



7.6.5. ábrának megfelelően a Coriolis-erő miatt **anticiklonális áramlás** alakul ki.



7.6.5. ábra: Anticiklonális áramlás „vízdomb” körül

A Golf-áramlásnak megfelelő  $1-3 \frac{m}{s}$  sebességű áramláshoz a tengerfelszínnek  $100km$ -en  $1-3m$ -t kellene emelkedni. Ez az emelkedés  $10\,000km$ -en is legfeljebb  $300m$ -t jelent. A tengerfelszín „domborzata” ma már a műholdfelvételek alapján ilyen pontossággal is jól térképezhető.

A fenti gondolatmenet természetesen csak a felszíni áramlások értelmezésére alkalmas, mert a tenger mélyebb rétegeiben kialakuló horizontális nyomás gradiens kialakulásához nemcsak a felszín magasságkülönbségeiből adódó nyomás, hanem a víz sűrűségének sótartalom és hőmérséklet-eloszlás miatt fellépő változásai is hozzájárulnak.

#### 7.6.4. A mélységi áramlások

A szél hajtotta nagy óceáni köráramlatok a pólusok felé hideg, az Egyenlítő felé meleg tengervizet szállítanak. Ezek az áramlások, mint már megállapítottuk, az óceánok felső rétegében zajlanak, melynek vastagsága  $1km$  nagyságrendű. A köráramlatok a globális klímában legfeljebb néhány tíz évnyi skálán okoznak változásokat. A tengerészek már régen észrevették azonban, hogy a tengervíz nemcsak a felületi rétegben, hanem a mélyrétegekig átkeveredik. Ez a tengeráramlásoknak a szél hajtotta áramlásokra alapozott értelmezése alapján nem magyarázható, s ezek az óceán teljes mélységében lejátszódó folyamatok már évszázados, vagy néhány évezredes skálán is befolyásolhatják a klímát.

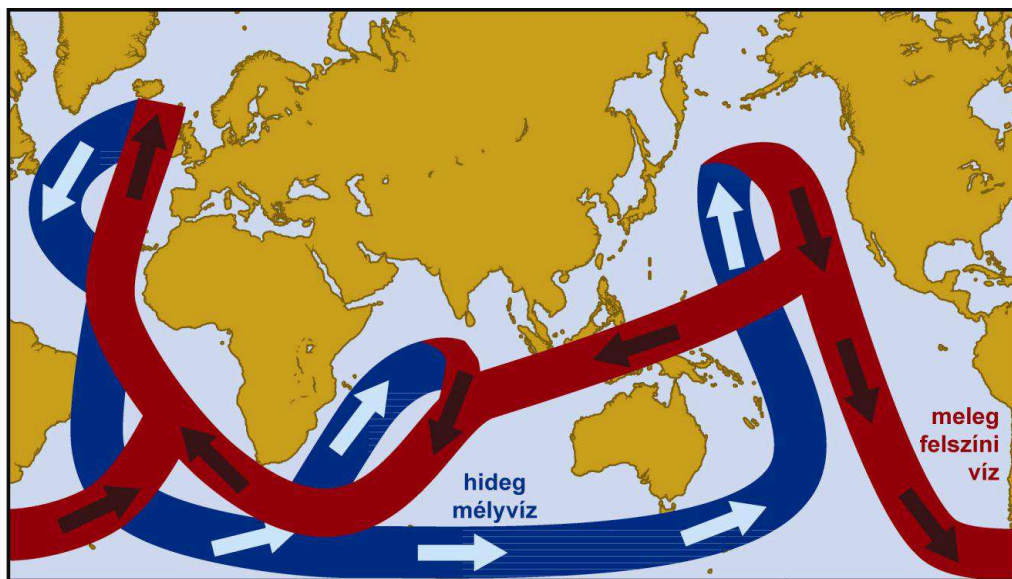
Megállapítható, hogy a tengerekben vertikális, mélységi cirkuláció is zajlik. Ezt a folyamatot **termohalin cirkuláció**-nak nevezzük, mert benne a hőmérsékleti különbségek mellett döntő szerepet játszik a tenger sótartalmának változása is. A magasabb szélességek



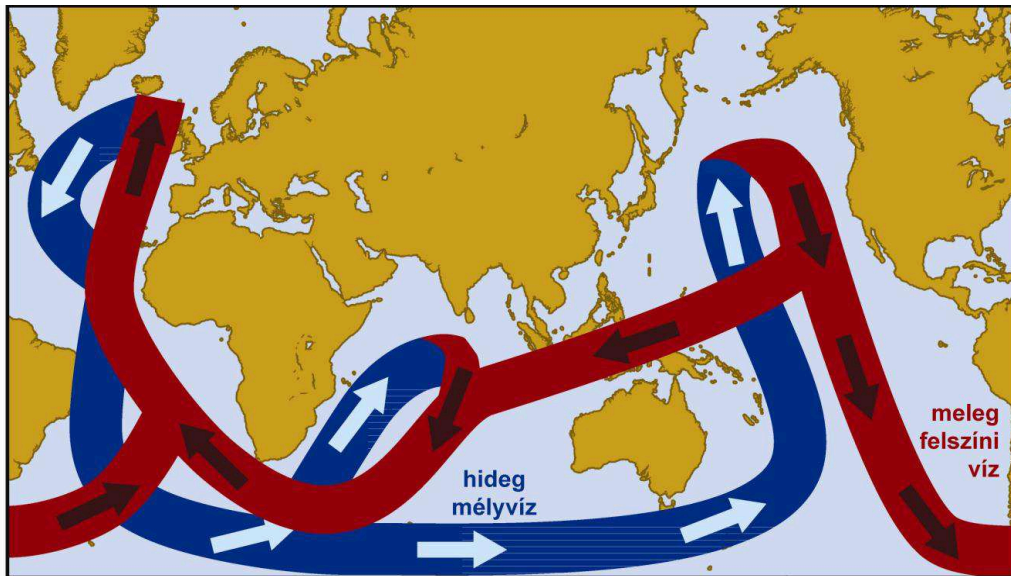
sugárzási hiányos területein a tengerek hideg vize alábukik és a tenger mélyén szétterülve az alacsonyabb szélességek felé halad. A mélyben áramló víz a kontinuitás miatt természetesen valahol ismét a felszínre emelkedik, majd meleg áramlat formájában a pólusok felé vándorol. A következőkben ennek a mélységi vízkörzésnek a tulajdonságait vázoljuk.

#### 7.6.4.1. A termohalin cirkuláció

A **termohalin cirkuláció** lényegét legjobban szemléltető „**nagy óceáni szállítószalag**” elképzelést



7.6.6. ábra) Broecker alkotta meg 1991-ben. A vázlat mutatja, hogy a szállítószalag kiterjed mind az északi, mind a déli félteke tengereire, és a mélyben mozgó hideg áramlat utánpótlása valahol az Atlanti-óceánon van. Mindazonáltal a termohalin cirkuláció pontos hajtóereje máig is vitatott és jelenleg is kutatott téma. Egyes tulajdonságait azonban már biztosan megismertük. Az Atlanti-óceánon észak felé mozgó meleg áramlat a légkörrel való kölcsönhatás, a párolgás, a csapadékhullás és a hőcsere miatt kihűl, sűrűsége mind a hőmérséklet-csökkenés, mind a sótartalom növekedése miatt megnő. A vízoszlop rétegződése instabillá válik, és az áramlat alábukik. A lefelé áramló víz nagy mélységig átkeveredik és a konvektív keverés hatására nagy tömegű homogén „víztest”, úgynevezett mély óceánvíz keletkezik. Az újonnan keletkező víztömeg az alámerülés helyétől horizontálisan távolodik, tulajdonságait (sótartalom, hőmérséklet, sűrűség) csak fokozatosan, újabb víztömegekkel keveredve változtatja meg. Ezután a mély óceánvíz ismét felemelkedik, a felette lévő rétegekkel turbulensen keveredve megváltoztatja tulajdonságait és visszaáramlik keletkezési helye felé.



7.6.6. ábra: A nagy tengeri szállítószalag

A nagy szállítószalagot vizsgálva felmerül a kérdés, vajon miért nem keletkezik mély óceánvíz a Csendes-óceánon. A Csendes- és az Atlanti-óceán közötti különbség kétségtelenül indokolható a szárazföldek elhelyezkedésével, illetve a tengerfenék domborzatával, hiszen az Atlanti-óceán zártabb melléktengerei jobban kedveznek a sótartalom megőrzésének és további dúsulásának, mint a Csendes-óceán nagy nyílt tere. Az igazi ok azonban akkor található meg, ha megvizsgáljuk a két térség párolgási és csapadékviszonyait, valamint a felszíni vízáram hőmérsékletét és sótartalmát.

Az Atlanti-óceán felszíni sótartalma 35, a Csendes-óceáné csak 32 ezrelék. Az Észak-Atlanti-óceán édesvíz utánpótlása (csapadék és folyóvíz) 104 cm/év, párolgása 103 cm/év. A Csendes-óceán északi részére vonatkozóan ugyanezek az adatok rendre 91 cm/év és 55 cm/év. Megtaláltuk tehát a döntő különbséget. A Csendes-óceán vize sokkal inkább hígul, mint az Atlanti-óceáné.

Meglepő a Csendes-óceán csekély párolgása! A nagy szállítószalag azonban magyarázatot ad erre is. Az Atlanti-óceánon a szállítószalag folyamatosan meleg vizet hoz a felszínre. A Csendes-óceánon pedig éppen a mélyből felbukó hidegebb víz kerül szét. A hideg tengerfelszín lehűti a felette lévő levegőt és így csökkenti annak párabefogadó képességét, s ezzel csökken a tenger párolgása is. A tenger sótartalma nem növekszik. A számítások szerint a Csendes-óceán felszínéről a víz, csekély sótartalma miatt még akkor sem süllyedne a mélybe, ha hőmérséklete  $0^{\circ}\text{C}$  lenne. Paradox módon tehát éppen a felszín alacsony hőmérséklete akadályozza meg, hogy a Csendes-óceánban a víz sűrűsége elegendő nagy legyen az alábukáshoz és óceáni mélyvíz képzéséhez.

## 7.7. Függelékek

### 7.7.1. A Coriolis-erő

A légkör és a tengerek áramlásának leírásában is döntő szerepet játszik a Coriolis-erő. A fogalom azért nehéz, mert nem valódi erőről van szó, hanem olyan gondolati konstrukcióról, amely az eredetileg inerciarendszerben érvényes Newton-törvényeket a forgó Földhöz rögzített gyorsuló koordinátarendszerben is érvényben tartja.

A probléma megértéséhez vizsgáljuk olyan test mozgását, amely eredetileg az Egyenlítőn helyezkedett el, és együtt mozgott a forgó Földdel, majd egy hosszúsági kör érintője mentén  $v$  sebességgel elindult északi irányba. Mivel az Egyenlítőn szerzett kelet felé irányuló sebességét tehetetlenségénél fogva megtartja, a külső szemlélő (pl. az állócsillagokhoz rögzített inerciarendszerből) úgy észleli, hogy az Egyenlítőtől távolodva a test egyre inkább előresiet az eredeti helyzetét megadó hosszúsági körhöz képest. A magasabb szélességeken ugyanis a Föld forgásából adódó kerületi sebesség kisebb, mint az Egyenlítőn. A Földhöz képest tehát a test pályája a sebesség irányától jobbra tér el. A déli pólus felé mozgó testek esetén ez a gondolatmenet természetesen bal felé irányuló eltérésre vezet. Hasonlóképpen gondolható végig a horizontális síkban tetszőleges irányban mozgó testek mozgása az állócsillagok rendszeréből. Mindig azt kapjuk, hogy a Földhöz képest az északi féltekén jobbra, a délin balra tér el eredeti irányától. Ezek a gondolatmenetek azonban egyediek és bonyolultak.

Általános gondolatmenetekkel belátható, hogy a Földhöz rögzített koordinátarendszerben a horizontális mozgások egyszerűen leírhatóak, ha a valódi erőket kiegészítjük a

$$\mathbf{F}_{Co} = m\mathbf{v} \times \mathbf{k} (2\Omega \sin \varphi) \quad (7.2.)$$

erővel, ahol  $\mathbf{v}$  a test horizontális sebesség,  $\Omega$  a Föld szögsebessége,  $\varphi$  a földrajzi szélesség,  $\mathbf{k}$  pedig az adott helyen függőleges irányba mutató egységvektor.

Megjegyezzük még, hogy a nehézségi gyorsulásba épített centrifugális erő is a Coriolis-erőhöz hasonló tehetetlenségi erő, továbbá hogy a Coriolis-erő is rendelkezik további, de a légkör és a tengerek szempontjából elhanyagolható összetevőkkel.

### 7.7.2. Bibliográfia

Czelnai Rudolf: A világóceán, Vince Kiadó, Budapest, 1999

Mészáros Ernő: A Föld rövid története, Vince Kiadó, Budapest, 2003

Péczely György: Éghajlat, tankönyvkiadó, Budapest, 1981

Potter, T. D., and Colman, B., R., Handbook of Weather, Climate and Water, Wiley, New Jersey, 2003

### 7.7.3. Fogalomtár

**Anticiklon:** légköri képződmény, amelyben az északi féltekén az óramutató járásával megegyező irányban, a déli féltekén azzal ellentétes irányban áramlik a levegő

**Anticiklonális áramlás:** közelítőleg körpályán vagy annak egy részívén futó áramlás, amelyben az északi féltekén az óramutató járásával megegyező irányban, a déli féltekén azzal ellentétes irányban áramlik a levegő

**Baktérítő** : a Baktérítő az [Egyenlítőtől](#) délre  $23^\circ 26' 22''$ -en helyezkedik el. Azoknak a pontoknak a határgörbáját jelöli, amelyeknél délebbre már nem fordul elő, hogy a [Nap](#) sugarai merőlegesen

esnek a Földre. Ez a baktérítón az [év](#) egy napján, az északi féltekén észlelt téli [napfordulókor](#) ([december 21.](#) vagy [22.](#)) fordul elő. Neve onnan ered, hogy 2000 évvel ezelőtt amikor az elnevezést adták, a téli napforduló idején a Nap a [Bak csillagképben](#) tartózkodott. Napjainra azonban a Föld forgástengelyének kismértékű elmozdulása miatt napfordulókor a Nap már a [Nyilas csillagképben](#) tartózkodik. A Baktérítő a trópusi övezet déli határa, innen kezdődik a déli mérsékelt övezet.

**Ciklon:** légköri képződmény, amelyben az északi féltekén az óramutató járásával megegyező irányban, a déli féltekén azzal ellentétes irányban áramlik a levegő. Az anticiklonokkal szemben a ciklonokban egy hideg és egy meleg front is található. Amikor a hátul haladó hideg front a ciklon fejlődése során utoléri az előtte lassabban mozgó meleg frontot akkor okkludált front keletkezik.

**Coriolis paraméter** : az  $f = 2\Omega \sin \varphi$  összefüggéssel definiált mennyiség, ahol  $\Omega$  Föld szögsebessége,  $\varphi$  pedig a földrajzi szélesség.

**Doldrum:** az Egyenlítő közelében elhelyezkedő szélcsendes zóna

**Ekliptika:** A Föld keringési síkja a Naprendszerben

**Ekman réteg:** A szél által mozgásba hozott áramlási réteg

**Ekman spirál:** A szélfúttá óceán felszínén az áramlás sebessége  $45^\circ$  –os szöget zár be a szél irányával. Az áramlás iránya a mélységgel tovább fordul az északi féltekén az óramutató járásával megegyező irányba. Így az egyes vízrétegek sebességvektorainak végpontja spirális vonalon helyezkedik el. Ez az Ekman spirál. (Hasonló szélfordulás tapasztalható a légköri határrétegben is.)

**Ferrel:** William Ferrel (1817-1891) amerikai meteorológus

**Ferrel cella:** A nagy atmoszférikus légkörzés három cellából áll. Ferrel cellának az egyenlítői és a sarki légkörzés között elhelyezkedő fordított körülfárasú légkörzési részt nevezzük.

**Futóáramlás:** A nagy atmoszférikus légkörzés celláinak találkozásánál (a 30. és a 60. szélességi kör környékén) a magasban a tropopauza közelében éles hőmérséklet különbség alakul ki, s ennek valamint a Coriolis erőnek következtében nagysebességű nyugatias futóáramlások keletkeznek. Ezeket nevezzük futóáramlásnak, vagy „jet stream”nek.

**Geosztrofikus mozgás:** A gradiens erő és a Coriolis erő egyensúlyának bekövetkeztekor létrejövő egyensúlyi mozgás. Sebessége az  $u = \frac{gradp}{\rho f}$  összefüggéssel adható meg.

**Golf áramlás:** A Golf-áramlat a nagy óceáni áramlási kör része erős, meleg és gyors [atlanti-óceáni](#) áramlat. A [Mexikói-öbölben](#) indul, az [Amerikai Egyesült Államok](#) és [Újfundland](#) keleti partjai mellett elhaladva kel át az óceánon.

**Gradiens:** A fizikai mezők térbeli változásának mértéke.

**Gyre:** Az örvénymozgások gyűjtőneve. Speciálisan a tengeri köráramlások elnevezése.

**Hadley:** George Hadley (1685-1768), angol jogász, amatőr meteorológus

**Hadley cella:** A nagy atmoszférikus légkörzés három cellából áll. Hadley cellának az Egyenlítő közelében elhelyezkedő légkörzési részt nevezzük.

**Hőmérsékleti sugárzás:** A testek hőmérsékletük függvényében különböző frekvencia eloszlású elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. Ezt nevezzük hőmérsékleti sugárzásnak. Spektrális eloszlását többnyire a fekete test sugárzást leíró Planck görbével adjuk meg.

**Intertropikus összeáramlási zóna:** A két félteke összeáramló passzát szele által az egyenlítő mentén létrehozott összeáramlási zóna (InterTropic Convergence Zone, röviden ITCZ). Ebben a zónában a legmagasabb a hőmérséklet, és igen gyakori a hosszú szélcsendes időszak.

**Jet stream:** lásd futóáramlás

**Konvekció:** A környezeti áramlások esetén vertikális áramlást jelenti, amelyben a levegő, vagy a víz függőleges mozgása hőt is szállít.

**Környezeti áramlás:** Szűkebb értelemben a légkör és a tengerek áramlása. Tágabb értelemben a fogalom tartalmazhatja a folyók és tavak vizének mozgását is.

**Lamináris áramlás:** A lamináris, vagy réteges áramlásban a folyadékrétegek egymással párhuzamosan, látható keveredés nélkül mozognak

**Molekuláris viszkozitás:** A diffúzió által közvetített nyíróerőt kialakulása

**Nagy óceáni szállítószalag:** a termohalin cirkuláció miatt kialakuló a teljes világóceánra kiterjedő áramlási kör, közismert ábrázolását Broecker alkotta meg 1991-ben.

**Nyomási gradiens erő:** a lokális nyomáskülönbségből származó erő

**Planck-görbe:** lásd hőmérsékleti sugárzás

**Rossby:** Carl-Gustaf Arvid Rossby (1898-1957) svéd meteorológus. Elsőként adta meg a nagy skálájú légköri mozgások folyadékdinamikai leírását.

**Passzátszél:** mind a déli mind az északi félteke  $30^\circ$ -os szélességi köre táján a magasban felhalmozódó levegő a talajon magas nyomást (szubtrópusi magas nyomás) hoz létre, ami miatt az Egyenlítő felé fújó szél keletkezik. Az Egyenlítő felé fújó szelet a Coriolis erő az északi féltekén jobbra a délin balra téríti, ezért a szubtrópusok és az egyenlítő között az északi féltekén északkeleti, a délin délkeleti szelek fújnak. Őket nevezzük passzát szélnek, illetve angol nyelven „trade-wind”

**Ráktérítő:** A Ráktérítő az [Egyenlítőtől](#) északra a  $23^\circ 26' 22''$  szélességen helyezkedik el. Azoknak a pontoknak a határgörbét jelöli, amelyeknél északabbra már nem fordul elő, hogy a [Nap](#) sugarai merőlegesen esnek a Földre. Ez a ráktérítőn az [év](#) egy napján, a déli féltekén észlelt téli [napfordulókör](#) (június [21.](#) vagy [22.](#)) fordul elő. Neve onnan ered, hogy 2000 évvel ezelőtt amikor az elnevezést adták, a téli napforduló idején a Nap a [Rák csillagképben](#) tartózkodott. Napjainra azonban a Föld forgástengelyének kismértékű elmozdulása miatt napfordulókör a Nap már az [Ikrek csillagképben](#) tartózkodik. A Ráktérítő a trópusi övezet északi határa, innen kezdődik az északi mérsékelt övezet.

**Súrlódási feszültség:** A súrlódási erő következtében keletkező nyírófeszültség

**Termohalin cirkuláció:** A tengerek mélységi vertikális cirkulációja, amelynek hajtóereje a sótartalom- és a hőmérséklet-különbségek miatt kialakuló sűrűség különbség. Jellemző vonása, hogy a magasabb szélességek sugárzási hiányos területein a tengerek hideg vize alábukik és a tenger mélyén szétterülve az alacsonyabb szélességek felé halad.

**Termoklin:** A tenger felszínén lévő homogénnek tekinthető jól átkeveredett réteg alatt helyezkedik el a termoklinnek nevezett réteg, amelyben a hőmérséklet és a sűrűség erőteljesen változik a mélységgel. Ez a réteg az állandó hőmérsékletűnek tekinthető mélytengeri réteggel tart. Nagyságrendileg a felszíni réteg 100, a termoklin 1000m vastagságú, a pontos érték azonban erősen függ a körülményektől

**Trade-wind:** passzát szél

**Troposzféra:** A légkör alsó 8-12 km vastagságú rétege. Ebben zajlanak az időjárási folyamatok

## 8. A BIOLÓGIAI DIVERZITÁS, JELENTŐSÉGE ÉS VÉDELME (SZABÓ MÁRIA)

### 8.1. A biológiai diverzitás értelmezése

A **bioszféra** mint legmagasabb biológiai szerveződési szint, 4,6 milliárd éves bolygónk egyedülálló képződménye. Kialakulásának feltétele a Föld kialakulása és az élet keletkezése volt. A tudomány mai állása szerint élet jelenleg csak a Földön van. Az élet első biztos nyomai közel 3,5 milliárd évesek (Vida G., 2005). A **prokarióta** szervezetek hosszú ideig, közel 2 milliárd évig uralták a Földet. Az első **eukarióta** élőlények 1,5–1,7 milliárd évvel ezelőtt jelentek meg, és 600 millió évig csak egysejtű szervezetekként éltek. Az ivaros szaporodás megjelenése (kb. 900 millió évvel ezelőtt) az adaptív génkombinációk gyors elterjedését tette lehetővé a populációban, ami újabb és újabb élőhelyek meghódítását tette lehetővé, elősegítve a nagyobb földrajzi elterjedést az adott élőlény számára. A soksejtű szervezetek nagy valószínűséggel egymástól függetlenül, több csoportból jöhettek létre. Feltételezések szerint legalább 16 eukarióta vonal létezik. Az autotróf vonalon a magasabb rendű növények, míg a heterotróf vonalon a gombák és a többsejtű állatok alakultak ki. A bioszféra a litoszféra/pedoszféra, a hidroszféra és az atmoszféra határán jött létre, s az élőlények megjelenése jelentős mértékben befolyásolta, illetve módosította a három szférában lezajló folyamatokat.

A bioszféra evolúciója szempontjából a legfontosabb átalakulás a légkör széndioxid-szintjének csökkenése, az ezzel párhuzamos az oxigénszint növekedés, illetve az ózonpajzs kialakulása volt. A szilúr és a devon időszak határán szárazföldre kilépő növényzet a karbon időszakban már teljesen meghódította a Föld szárazulatait és jelentős tényezőjévé vált a bioszféra működésének. A szárazföldi élőlényközösségek fajgazdagságának (biodiverzitásának) növekedése mellett a működési változatosság (funkcionális diverzitás) is egyre nagyobb lett.

A **biológiai diverzitás** alatt az élővilág sokféleségét értjük (Juhász-Nagy, 1993). Joggal merül föl az a kérdés, hogy miért vált olyan fontossá a biodiverzitás, hogy két egymás utáni ENSZ világkonferencia – **Környezet és Fejlődés Konferencia (Rio de Janeiro, 1992)**, a Fenntartható Fejlődésről (Johannesburg, 2002) – egyik fő témája a fenntarthatóság mellett a biológiai sokféleség megőrzésének kérdése volt. A kérdésre a válasz az alábbiakban foglalható össze. A biológiai diverzitás azért globális fontosságú, mert

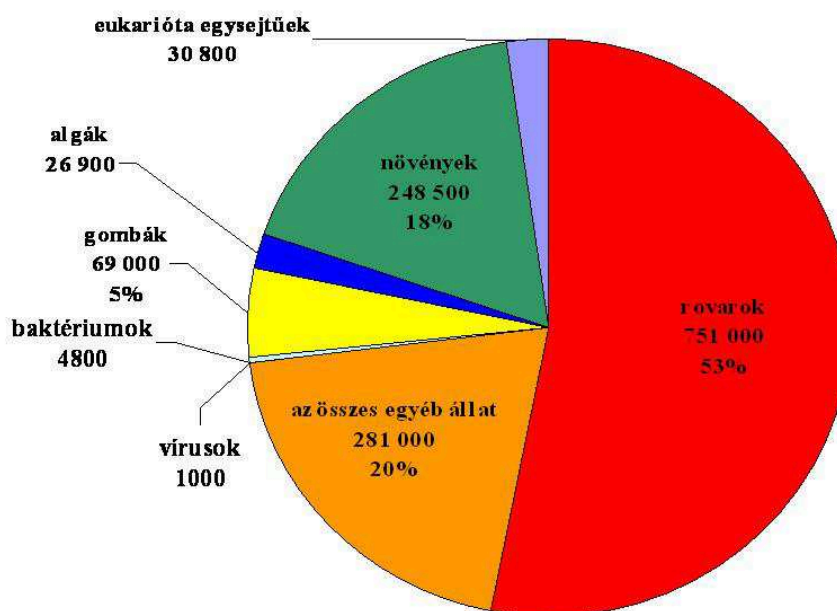
- alapja a bioszféra fejlődésének és stabilitásának (bár a részleteket még nem ismerjük);
- jelentős szerepet játszik az alkalmazkodóképességben, hatékonyságban (adott hely anyag és energia kihasználása nagyobb biodiverzitással nagyobb lehet) és a fennmaradásban (perzisztenciában);
- a biológiai szerveződés összes szintjén (egyed alatti, egyedi és egyed feletti szintek) értelmezhető;
- nem egyszerűen alkotórészek sokféleségét jelenti, hanem a folyamatok és a kapcsolatok változatosságát is.

A diverzitás alatt nem csak a fajok sokféleségét és mennyiségi viszonyait értjük, ide tartozik a fajon belüli genetikai összetétel (genetikai diverzitás), valamint – az egyed feletti organizációs szinteken – a közösségek (társulások, élőlényközösségek) és a tájak sokfélesége is.

A **genetikai diverzitás** azért kulcsfontosságú, mert ez az alapja a fajok evolúciós alkalmazkodóképességének. Az élőlények által hordozott genetikai információ az evolúció hajtóereje, immunrendszeri és alkalmazkodási forrás, és nemcsak faji, hanem azon felüli egyedülállósága is páratlan értékű. A genetikai információ gazdagsága évmilliárdok alatt szelektálódott ki, hogy alkalmazkodjon és megfeleljen bolygónk állandóan változó szükségleteinek. Az emberi beavatkozások ellen is ez a változékonyság nyújtott védelmet számos fajnak, míg mások pontosan ennek a segítségével szereztek előnyt vagy húztak hasznot a változásokból.

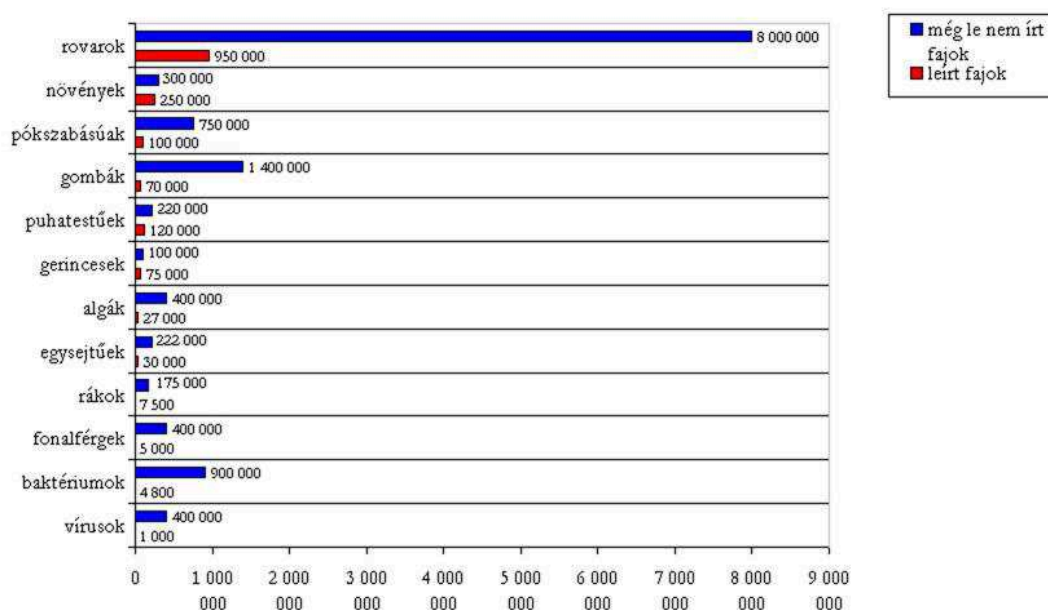
A **fajdiverzitás/fajgazdagság** arról ad képet, hogy egy adott földrajzi térség, pl. hegységen, folyóvízben, kontinensen vagy a bioszférában hány faj él. Ez nem más, mint egy flóra-, illetve faunalista. A fajdiverzitás globális eloszlását tekintve, a környezeti tényezők (klíma, talajviszonyok stb.) kedvezőtlenebbé válásával, azaz a trópusoktól a sarkok irányában, szembejövő a diverzitás mértékének csökkenése. Az éghajlati korlátokon túl a jelenséget magyarázza az a tény is, hogy a trópusok evolúciósan idős térség, ahol a speciáció (fajfejlődés), **koevolúció** előrehaladottabb, mint a viszonylag fiatalabb mérsékelt övön. Míg a genetikai diverzitás mértékét nehéz számszerűsíteni, faj szinten ma mintegy 1,4 millió taxont azonosítottak (8.1.1. ábra).

Wilson (1992) adatai szerint a kutatók összesen 1 413 000 fajt írtak le; a fajok legtöbbje a rovarok közé tartozik



8.1.1. ábra: A bioszféra ismert fajainak megoszlása (Wilson, 1992 nyomán)

A leírt fajok mintegy 60%-át rovarok alkotják; a még ismeretlen rovarfajok száma akár 8 millió is lehet (8.1.2. ábra). A taxonómiaiailag jól feltárt madarak és emlősök fajsza ma az ismert fajok alig 1%-a. A bioszféra becsült fajsza mára vonatkozólag számos becslés látott már eddig is napvilágot. Feltételezések szerint a jelenleg létező összes fajsza m 10 és 30 millió közötti, vagy még ennél is több, akár az 50 milliót is elérheti. Mindezek alapját azok a terepi kutatási eredmények jelentik, amelyek az utóbbi évtizedek során láttak napvilágot. Ezek közül néhány példa: Borneó szigetén a trópusi esőerdő 10 egyenként egyhektáros területén több, mint 700 fafa él. Ennyi őshonos fa jellemzi az egész Észak-Amerikai kontinentst. Még nagyobb fajgazdagság jellemzi Dél-Amerikában a hegyi esőerdőket. Peruban kettő, egyenként egy hektárnyi erdőterületen 300 fafa él. Ugyancsak Peruban az akáciafa egyetlen hüvelytermésében annyi hangyafa él (szám szerint 43), amennyi a Brit-szigeteken honos! A mélytengerek élővilága és a talajlakó élőlények (baktériumok, gombák, talajatkák) szinte ismeretlenek.



8.1.2. ábra: Az élőléncsoportok ismert és a becsült fajsza mai (Hammond, 1992)

A **közösségi diverzitás** a fajösszetételen túl attól is függ, hogy hány egyed tartozik egy populációhoz, azaz a fajok tömegességi viszonyait is figyelembe veszi. Az ökológiában diverzitás alatt legtöbbször az így értelmezett *faj-egyed diverzitást* értjük. Ez a sokféleség elméletileg nyilván akkor maximális, ha a közösség összes egyede más-más fajhoz tartozik, és akkor minimális, ha valamennyi egyed azonos fajú. A valós társulások e két véglet között helyezkednek el. A diverzitás becslésére használatosak az ún. diverzitási mutatók, melyek közül itt a Shannon-Wiener indexet tárgyaljuk. Ennek számításánál a társulást alkotó minden egyes populációnak a részesedését (pl. egyedszámát, biomasszáját, borítását) vesszük figyelembe a társulás egészének függvényében. A diverzitási indexet az alábbiak szerint kapjuk:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log p_i, \quad (8.1.)$$

ahol  $H'$  a Shannon-Wiener diverzitás mérőszáma,

$p_i$  az  $i$  fajhoz tartozó egyedek aránya a mintában,



$S$  pedig az összes fajszám a mintában.

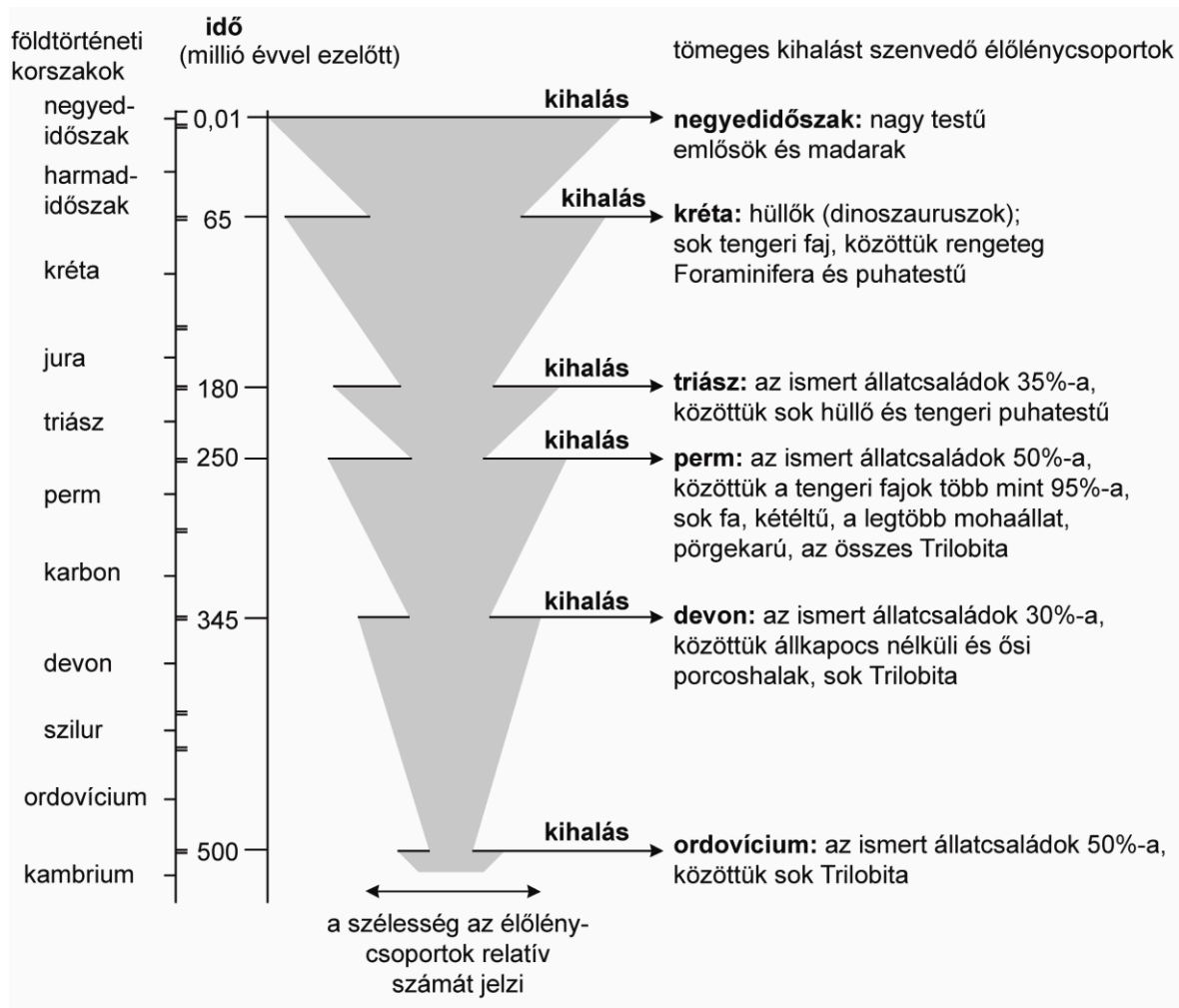
A diverzitás értéke 0 és 1  $S$  között változhat. Két közösség közül annak nagyobb a diverzitása, amelyiket több faj alkotja (azonos egyedszám, biomassza, borítás mellett), illetve azonos fajszám esetén az, amelyikben az egyedek (biomasszaértékek, borításértékek) minél egyenletesebben oszlanak el a fajok között. Látható tehát, hogy a diverzitás értéke a fajszám mellett az egyenletességtől (ti. az egyedek hogyan oszlanak meg a fajok között) is függ. Az egyenletesség akkor maximális, ha minden fajhoz egyenlő számú egyed tartozik. Egy fajszegényebb közösség is lehet diverzebb egy fajgazdagabbnál, ha az egyedek eloszlása egyenletes.

**Tájdiverzitás** egy nagyobb földrajzi térség vagy régió tájszerkezetben megnyilvánuló sokféleség. Egyik értelmezése szerint elsődleges fontosságú az, hogy hányféle közösség fordul elő az adott földrajzi területen. Egy másik értelmezési mód szerint tájdiverzitás alatt a folttypusok (élőhelytypusok) száma és gyakorisága értendő. A táji sokféleség nemcsak földrajzi, tájökölógiai és természetvédelmi, hanem esztétikai szempontból is fontos. A foltdiverzitás a tájökölógia fontos fogalma, nagysága függ a folttypusok számától és azok előfordulási gyakoriságától.

**Regionális** szinten a tájak sokfélesége, a tájtypusok száma és előfordulási gyakorisága szabja meg a diverzitást. Már a tájszinten is, de még inkább regionálisan a változatosságot nemcsak a természeti környezet, hanem a társadalmi-gazdasági környezet is befolyásolja. Így a földhasználati típusok sokféleségét (szántó, kert, gyümölcsös, szőlő, gyepek, faültetvények, nádas, halastavak, beépített terület, utak, egyéb nyomvonalas építmények, külszíni bányák, meddőhányók stb.) is figyelembe kell venni.

## 8.2. A sokféleség csökkenése

A bioszféra sokfélesége a Föld története során számos alkalommal lecsökkent, két esetben különösen komoly kihalások vetették vissza az élővilág változatosságát. A legdrámaibb fajkihalás a perm és a triász határán mintegy 250 millió évvel ezelőtt történt. Az ismert állatcsaládok 50 százaléka, köztük a tengeri fajok több mint 95 százaléka, számos fa, a legtöbb mohaállat, pörgekarú és az összes háromkaréjú ősrák (Trilobita) kihalt (8.2.1. ábra). Miközben a fajok száma folyamatosan emelkedett a különböző földtörténeti korok során, a nagy kihalási időszakokban egyes élőlénycsoportok nagy része kihalt. A kréta időszak végi kihalások közül leginkább a hüllők (dinoszauruszok) ismertek, de velük együtt pusztult ki sok tengeri faj, köztük Foraminiferák és puhatestűek, valamint számos szárazföldi növény- és állatcsoport is eltűnt a bioszférából. A krétakori katasztrófa azonban semmiség volt a mintegy 240 millió évvel ezelőtti, perm időszakban bekövetkezett tömeges kihalásokhoz képest, amikor az összes tengeri állatfaj 75–95 százaléka kipusztult. Ezek az arányok természetesen csak hozzávetőlegesek, de mégis azt lehet mondani, hogy a magasabb rendű szervezetek tekintetében az élővilág a perm végére csaknem kiveszett. A fajdiverzitás csak ötmillió évvel később, a földtörténeti középkor derekán tudott újra kibontakozni.



8.2.1. ábra: Kihalási időszakok a földtörténeti múltban (Standovár–Primack, 2001)

A földtörténet során többször bekövetkezett fajkihalások után az élővilág változatossága lassan elérte, sőt túl is haladta a kihalás előtti sokféleséget azáltal, hogy újabb élőlénycsoportok alakultak ki. Nem tudható pontosan, hogy a kihalások mennyi idő alatt következtek be, hiszen a kormeghatározás ebben az időléptékben igen pontatlan, néhány millió év „tévedés” is lehetséges. Egy faj megjelenése a bioszférában – geológiai időben mérve – csak átmeneti jelenség; a fajok élettartama mintegy 10 millió év körül lehet. A fajok kipusztulása (extinkció) természetes jelenség. Az emberi tevékenység által felgyorsított extinkció pontos mértéke már a fajok hiányos feltártsága miatt is nehezen becsülhető. Nagyon valószínű, hogy a bioszférában jelenleg folyó, az emberi tevékenység hatására történő fajkipusztulás a leggyorsabb a Föld élővilágának történetében. A madarak és emlősök esetében eddig 400 faj (és alfaj) kipusztulását regisztrálták, ami a leírt fajok 3–4%-a. Egyes elemzések már előre jelezték a fajszám 15–20%-ának kipusztulását az ezredfordulóra. A jelenlegi fajkipusztulás rátája mintegy 400-szorosa annak, amit a nagy földtörténeti korszakok végén kitéző katasztrófák idejéből ismerünk (Wilson, 1986). Az emberiség a huszadik század közepére megtizedelte természetes környezetét, és ezzel párhuzamosan könnyed nemtörődomséggel a végletekig kiaknázza a bolygó nem megújuló energiaforrásait. Sikeresen gyorsítottuk fel pl. a felszíni vizek, a vizes élőhelyek, a trópusi esőerdők és a mérsékeltövi lombhullató erdők tönkremenetelét, és ezzel hatékonyan segítettük elő több millió éve léte-

ző fajok sokaságának végső pusztulását (Wilson, 2008). Tekintettel arra, hogy a Föld eltartó képessége véges, ideje lenne végre észrevenni, hogy nem képes már növekedésünket tovább támogatni. A fentiekből kitűnik, hogy az élővilági változatosság fogalmába a génektől a tájtípusokig több dolog sokfélesége beletartozik. Így annak ellenére, hogy a globális biodiverzitás-csökkenés hallatán a legtöbben a fajok kihalására gondolunk, mindig szem előtt kell tartani azt, hogy „sokféle sokféleség” létezik, és az élő rendszerek fenntartásában valamennyinek lehet jelentősége.

### 8.3. A biológiai sokféleség jelentősége

Az élővilági változatosság a biogeográfia és az ökológia mellett a természet- és környezetvédelem kulcsfontosságú fogalma. A sokféleség megőrzése a természetvédelem egyik kiemelkedően fontos feladata. Meadows (1995) szerint a biodiverzitás az élet múltbéli adaptációinak az eredménye és alapja a további alkalmazkodóképességnek. A sokféleségnek nem csak azonnali és potenciális gazdasági értéke van, pl. halászat, vadászat, erdészet, turizmus, rekreáció, gyümölcsök, gyógyszerek, de maguk a természet által nyújtott „szolgáltatások” is nélkülözhetetlenek. Ezek közé tartozik többek között a megporzás, az elhalt szerves anyag lebontása, a fotoszintézis, a víztisztítás, az áradásszabályozás, a kártevők szabályozása, a táplálékhálózatban betöltött szerep.

A természetvédelem globális célja a bioszféra természetes működésének biztosítása, ami elsősorban a túlzott emberi beavatkozások káros hatásának mérséklését jelenti. Ennek érdekében védett területeket hoznak létre: nemzeti parkot, tájvédelmi körzetet, természetvédelmi területet. A védett területek kialakításának jelentőségét jól példázza az, hogy az utóbbi évtizedek során rohamosan növekedett a védett területek nagysága a világban és hazánkban is. A huszadik század végére a szárazföldek közel 3%-a védett, a tengereknél ennél kisebb az arány, 1% alatt van.

A Földön, az Egyenlítőtől a sarkok felé haladva csökkenő diverzitási gradiens a jellemző. A **trópusi esőerdők** – síkvidéki és hegyi esőerdők egyaránt (8.3.1., 8.3.2., 8.3.3. ábra) kiemelkedően nagy fajgazdagsággal rendelkeznek, amelynek okairól fent már szó esett. A tengerek nagy diverzitású élőhelyei a **korallszirtek** (8.3.4. ábra). A **szigetek** (izolátumok) különleges, **bennszülött faj**okban gazdag élővilága többek között Darwin munkásságának köszönhetően régóta ismert (8.3.5. ábra). Az **élőhelyszigetek** (ökológiai izolátumok) – mint amilyen a földrajzilag jelentős mértékben elszigetelt Kárpát-medence és a Föld többi zárt medencéje – a valódi szigetekhez hasonlóan sajátos arculatú, nagy diverzitású élővilággal rendelkeznek. A Kárpát-medence Európa különböző régiói növényzetének a találkozóhelye, ami nem csupán a fajok egyszerű „összeverődése”, hanem egyéni módon alakítja, módosítja a szomszédos és távolabbi területek felől érkező hatásokat. A fentiek miatt az Európai Unió Élőhely Irányelve (NATURA 2000) a Kárpátokat (alpin régió) és a medence belső területeit, a Pannon térséget tekinti önálló, de egymással szoros kapcsolatban álló biogeográfiai egységnek (8.9. ábra). A Pannon életföldrajzi régió a flóra és a vegetáció, a fauna és a táj egyes elemeiben is különleges vonásokat hordoz.



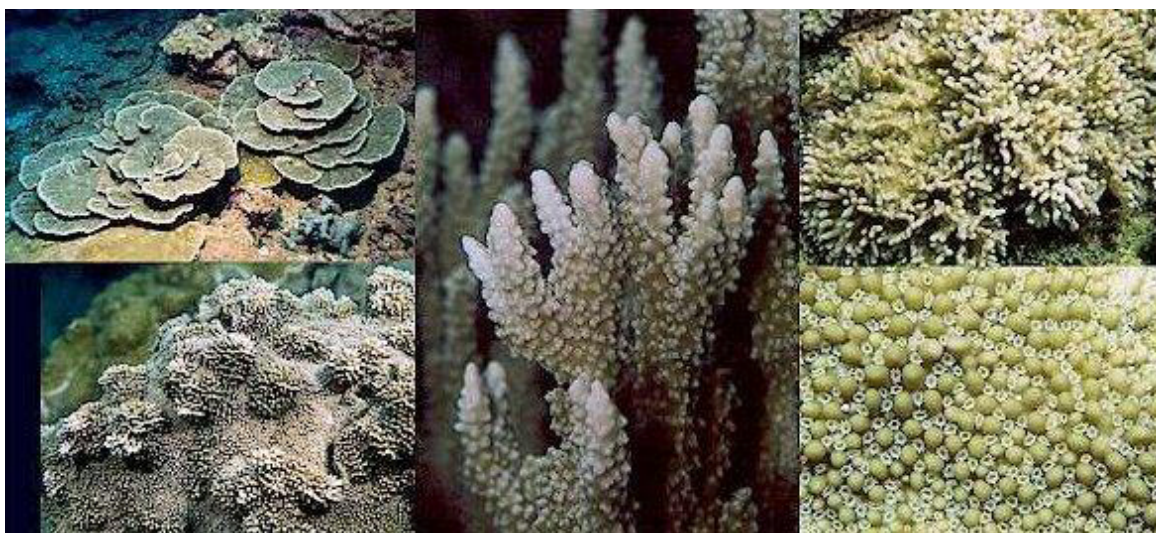
8.3.1. ábra: Síkvidéki esőerdő Borneó szigetén (Horváth Gergely felvétele)



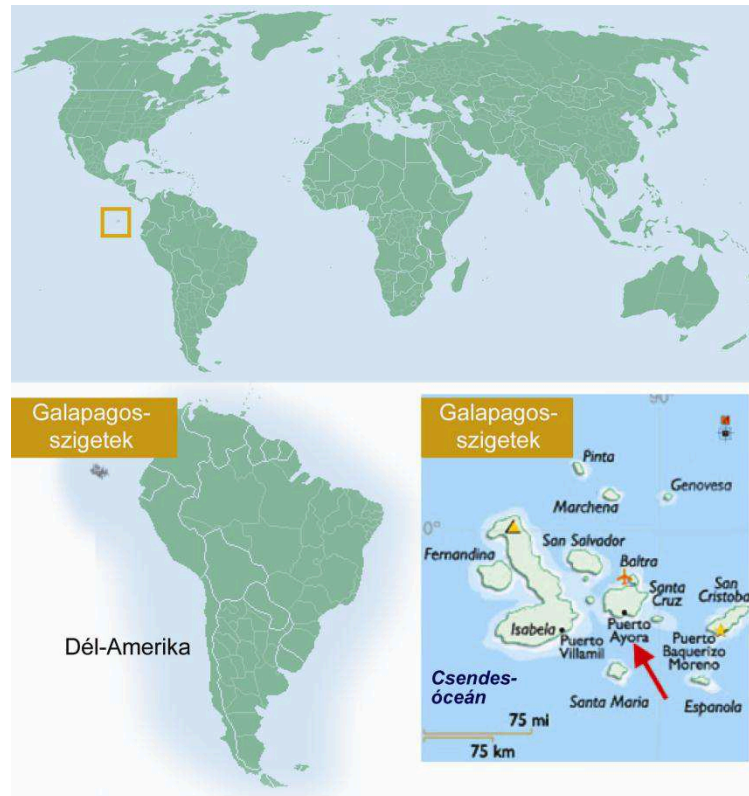
8.3.2. ábra: Hegyi esőerdő az Erawan nemzeti Parkban, Thaiföldön (Mari László felvétele)



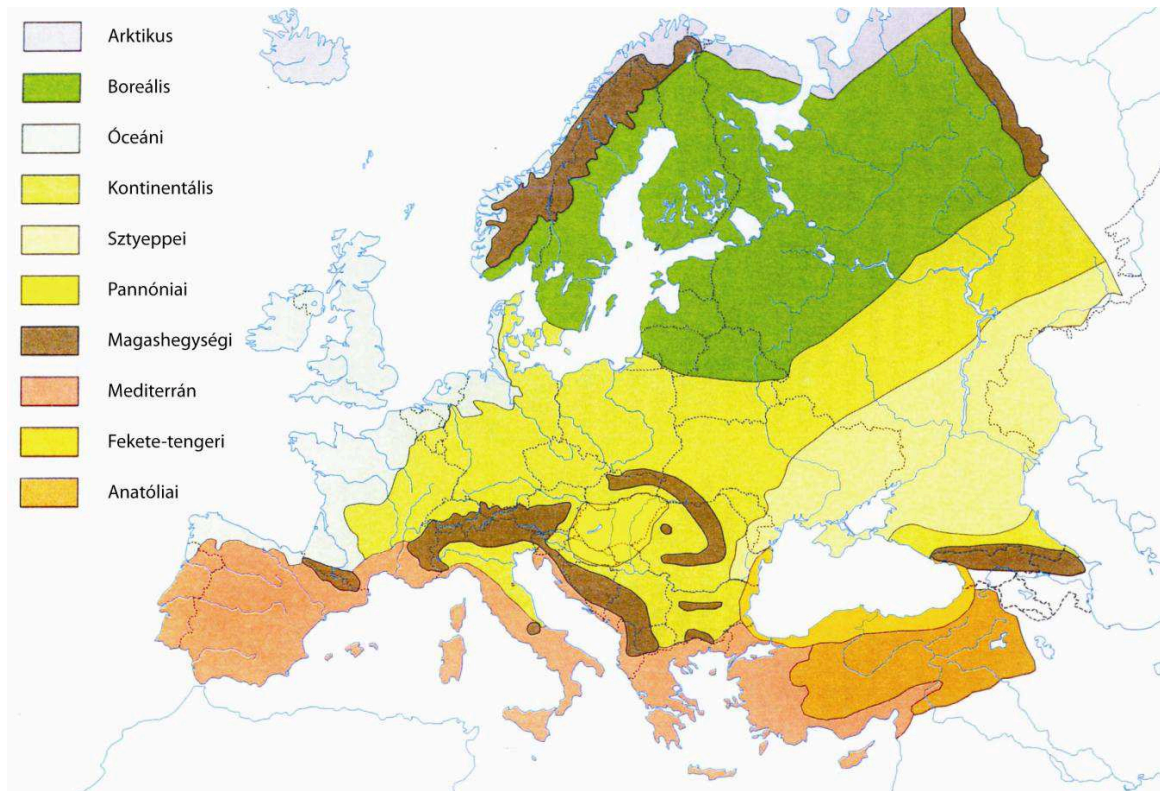
8.3.3. ábra: Hegyi esőerdő a Ngorongoro-kráter peremén, Tanzániában (Szabó Mária felvétele)



8.3.4. ábra: A korallszirtek a meleg tengerek partközeli élőhelyei



8.3.5. ábra: A Galapagos-szigetecsoport szigetei Dél-Amerika partjaitól 1000 km-re húzódnak



8.3.6. ábra: Európa életföldrajzi területei (NATURA 2000)

A Föld kis diverzitású élőhelyei a szélsőséges környezeti tényezők által meghatározott térségekre jellemzők. Ide sorolhatók a sivatagok/félsivatagok (8.3.7. *ábra*), a tajga (8.3.8. *ábra*), a tundra, a magashegységek (8.3.9. *ábra*) és magas fennsíkok.



8.3.7. *ábra*: Homoksivatag Marokkóban (Mari László felvétele)



8.3.8. *ábra*: Tajga a Rokua Nemzeti Park területén, Finnországban (Mari László felvétele)



8.3.9. ábra: A Kilimanjaro (Szabó Mária felvétele)

#### 8.4. A Kárpát-medence biodiverzitása

Vannak élőlények, amelyek mindenhol előfordulnak a Földön, ún. „világpolgárok”. A másik végletet azok a fajok képviselik, amelyek csak egyetlen szűk területen élnek. Ezeket nevezzük bennszülött, endemikus fajoknak, és ők képviselik az élővilág egyik legnagyobb értékét. Az izolátumok különösen gazdagok lehetnek bennszülöttekben. Egyes állatcsoportokban, pl. a puhatestűeknél feltűnően nagy, mintegy 30% a bennszülött fajok aránya, ilyen pl. a kárpáti forráscsiga. Számos bennszülöttje van a barlangoknak is. Aggtelek barlangjainak nevezetessége pl. a szemcsés vakászka. Az erdélyi tarsza és az erdélyi avarszöcske a Keleti-Kárpátokból és Erdély hegyeiből terjedt át Magyarországra, a Bereg-Szatmári síkra és az Északi-középhegység keleti részére. Bennszülött alfajunk a rákosi vipera (8.4.1. ábra), amely hazánk egyik leginkább veszélyeztetett állata.



8.4.1. ábra: Rákosi vipera ([www.rakosivipera.hu](http://www.rakosivipera.hu))



Az endemikus növények két leghíresebbike a dolomitlen (8.4.2. *ábra*) és a tornai vértő. Mindkét faj csak a Kárpát-medencében fordul elő. Jelentős még a magyar kikerics (8.4.3. *ábra*) és a mediterrán eredetű bánáti bazsarózsa. A bennszülöttek jórészt a negyedidőszaki flóraváltozások során keletkeztek Pannóniában. Közülük a magyar mézpázsit sajnos már kipusztult.



8.4.2. *ábra*: Dolomitlen ([www.terra.hu](http://www.terra.hu))



8.4.3. *ábra*: Magyar kikerics (ELTE Növényrendszertani és Ökológiai tanszék archivuma)

A bennszülöttek egy része egyben **maradvány, reliktum** is. Ezeket szokás „ereklyefajokként” emlegetni. Bennszülött harmadidőszaki maradvány a keleti ajtócsiga és a bánáti csiga. A legtöbb **maradványfaj** a maitól eltérő éghajlatú időszakok hírmondója, mint a Vértesben fennmaradt keleti gyertyán, amely 250 000 évvel ezelőtti melegkori (tercier) maradvány. Melegkori maradványaink zöme ennél fiatalabb, a negyedidőszak melegebb klímafázisaiból, illetve a **posztglaciális** meleg-száraz időszakából maradtak fenn, pl. a cselling-páfrány, a magyar kikerics (8.4.3. *ábra*), az állatok közül a Metelka-medvelepke és az öves szkolopendra.

A jégkorszakban Kárpát-medencében uralkodó havasi-alhavas fajok egy része a későbbi holocén kor száraz-meleg fázisaiban a hűvös-nedves szurdokvölgyekben vagy az északi kitettséggű sziklalejtőkön maradtak fenn. Ilyen a havasi iszalag (8.4.4. *ábra*) és a havasi hagyma. Alpin állatfajok élőhelyei szintén a hideg mikroklímájú élőhelyek, pl. Alpokalja, a Magas-Bakony, a Bükk szurdokvölgyei és az Aggteleki karsztvidék. Jégkori maradvány pl. az alpesi göte és a kárpáti kékcsiga (8.4.5. *ábra*), mindkét faj védett hazánkban.



8.4.5. *ábra*: Kárpáti kék meztelencsiga (Kőszeginé Tóth Judit felvétele)

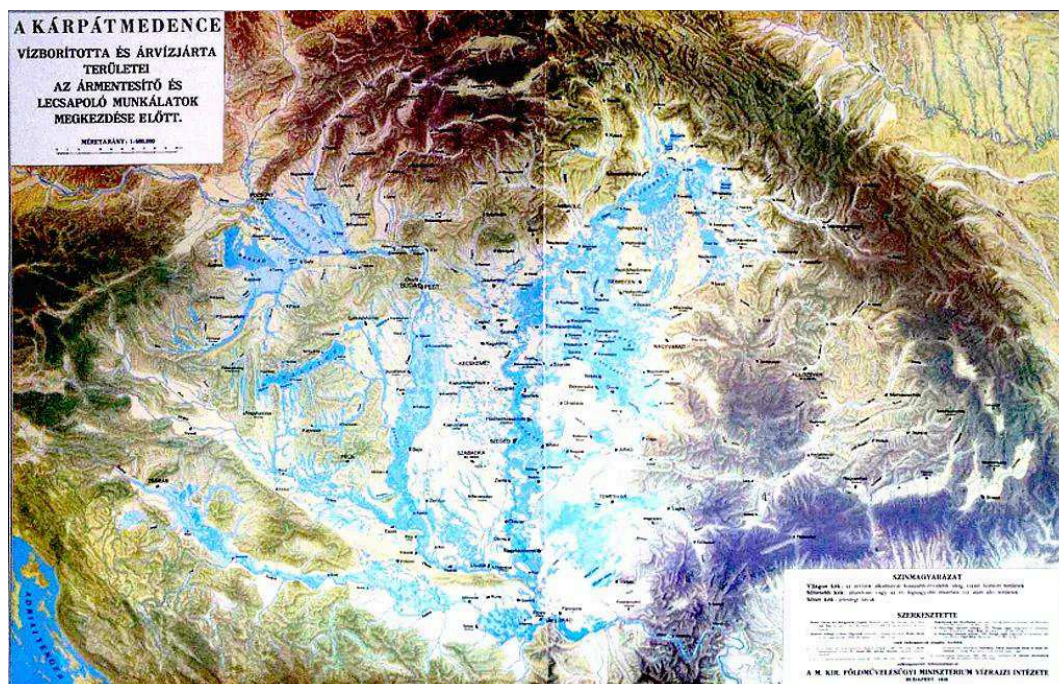


8.4.4. *ábra*: Havasi iszalag ([www.terra.hu](http://www.terra.hu))

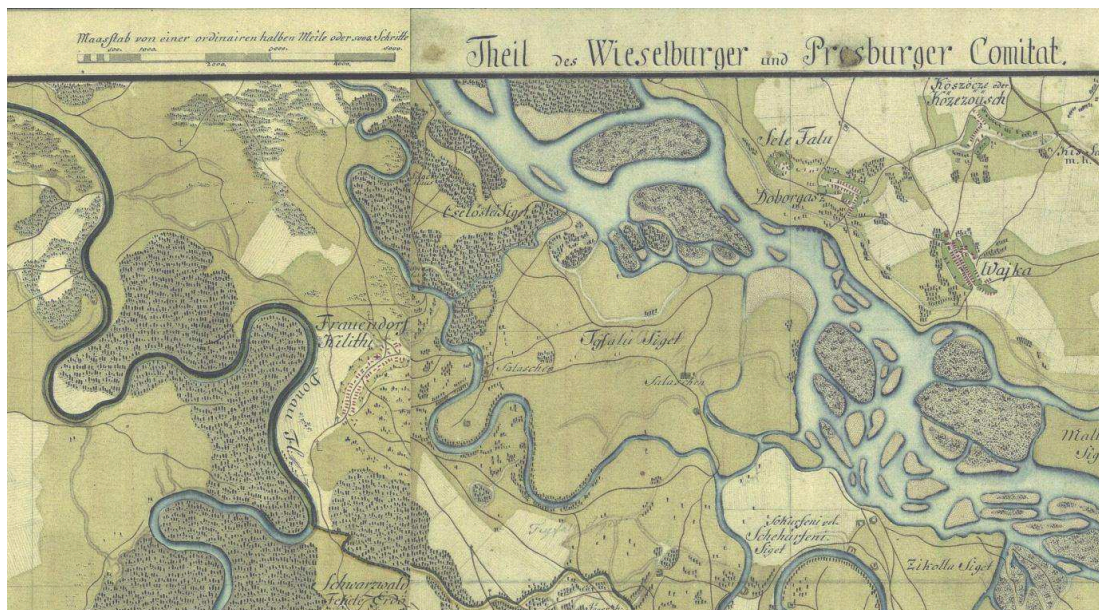
## 8.5. Vizes élőhelyek a Kárpát-medencében

A vizes élőhely (*wetland*) mint önálló fogalom a vízi és a szárazföldi élőhelytípusok mellett egyenrangú harmadikként a 20. század utolsó évtizedében vált elfogadottá (Mitsch–Gosselink, 1993). Nemzetközi szinten azonban már korábban felismerték jelentőségét és értékeit. Ennek eredményeként jött létre 1971. február 2-án az iráni Ramsarban aláírt nemzetközi egyezmény, amely a vizes területek megőrzéséről, védelméről és bölcs hasznosításáról szól. A Ramsari Egyezmény néven ismertté vált szerződés 1975-ben lépett hatályba. A csatlakozó országok száma meghaladja a 170-et, a Ramsari területek közel 70 millió hektárt tesznek ki a Földön. Magyarország eddig 23 vizes élőhelyet jelentett be ilyen területként.

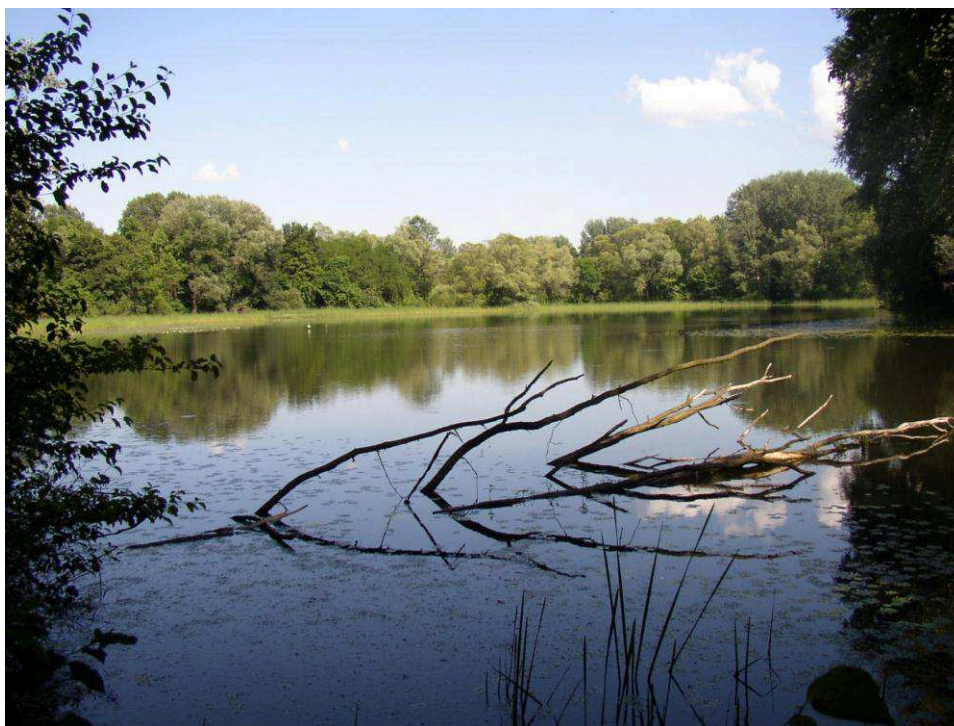
A vizes élőhelyek a Kárpát-medence jelentős tájképi meghatározói voltak elsősorban a múltban, de a jelenben is kiemelkedő természeti értékeket képviselnek. Ez az élőhelytípus szenvedte el – az erdők mellett – a legnagyobb pusztulást és átalakítást Európában az emberiség történelme során. Magyarország az egyik olyan ország, ahol a folyószabályozások, a lápok és mocsarak lecsapolása következtében jelentős vizes élőhelyek szűntek meg. Hazánk jelenlegi területére vetített ártér eredetileg 23 000 km<sup>2</sup>, az összterület 25%-a volt (8.5.1. ábra). A magyarországi Felső-Duna szakasz több száz ágra szakadt fonatos ágrendszere alakította ki Európa egyedülálló vizes élőhely rendszerét, a Szigetközt és a Csallóközt (8.5.2. ábra). A folyószabályozások és ármentesítési munkálatok eredményeként ez a szűk hullámtérre, 1500 km<sup>2</sup>-t alig meghaladó területre csökkent, amely az ország területének mindössze 1,7%-a. A Tisza-völgyben kerekén 1000 km<sup>2</sup>, a Duna-völgyben közel 520 km<sup>2</sup> hullámtér (aktív ártér) maradt fenn. A szabályozásokkal számos holtág keletkezett, amelyek egy része a hullámtéren (8.5.3. ábra), másik része mentett oldalon található (8.5.4. ábra). Az előbbieket a diverzitás megőrzése szempontjából „szerencsésebbek”, hiszen az évenkénti áradások friss vízzel töltik fel, illetve mossák át a holtágakat



8.5.1. ábra: A Kárpát-medence folyó menti vizes élőhelyei a folyószabályozások előtt  
(forrás: Magyarország Nemzeti Atlasza, 1989)



8.5.2. ábra: A Felső-Szigetköz táji sokfélesége az Első katonai felmérés térképlapján (1784)



8.5.3. ábra: Tiszai holtág a hullámtéren, Boroszlókert (Szabó Mária felvétele)



8.5.4. ábra: Jellegzetes mentett oldali tájhasználat a Tisza mentén (Szabó Mária felvétele)

A vizes élőhelyek jellemzője a kiemelkedően biodiverzitás táj, társulás és fajszinten egyaránt. Ártereken fontos szerepe van az ökotonoknak, amely két formáció (habitusában eltérő élőlényközösség) határán szegélyszerűen kialakult átmeneti természetű élőhely. A szegélyeken kialakult közösség fajai mindkét szomszédos társulásból származnak, így a fajsűrűség kiemelkedően nagy. Természetvédelmi és ökológiai szempontból az ilyen helyek gyakran kitüntetettek, mivel számos ritka maradványfaj él itt, illetve innen történhet a fajok elterjedése. Nagy valószínűséggel az **ökoton**ok léte volt az ősi árterek legjellemzőbb vonása, ami a térben és időben mozaikos tájszerkezet kialakulását eredményezte. Ez a tájmintázat térben és időben gyorsan átrendeződhet. A változatos folttípusokat és **szukcessziós** állapotokat létrehozó természetes zavarások fontos szerepet játszanak a táji diverzitás fenntartásában.

A vizes élőhelyek és a társadalom kapcsolata szinte az emberiséggel egyidős, így példájukon jól tanulmányozhatók a természeti és a társadalmi környezet kölcsönhatásai. A vízrendezési és folyószabályozási munkálatok következtében jelentős mértékben átrajzolódtak a Kárpát-medencében az egykori vízjárta területek. Az ősi ártéren évszázadok alatt kialakult vizes élőhelyek ezt követően hullámtérre és mentett oldalra különültek el. Az alacsony ártéri élőhelyek hajdani nagy területe a keskeny hullámtérre korlátozódott. Emellett a gazdasági tevékenység kiterjesztése is tovább zsugorította az ártéri élőhelyeket. A magas ártér kiemelkedő, viszonylag védett részeire települt a népesség. A települések területi terjeszkedése, a mezőgazdasági területek magas részaránya mára alig hagyott természetes élőhelyeket folyóink mentett oldalán. A folyók szabályozása – ez a természetes állapotot megváltoztató emberi beavatkozás – a társadalmi-gazdasági előnyök mellett később számos probléma gyökerévé vált. A sokféleség szempontjából egyértelműen hátrányos következményekkel járt, mivel a táj homogenizálódását eredményezte azáltal, hogy jelentős mértékben csökkentette a táji diverzitást.

## 8.6. A diverzitást veszélyeztető tényezők

Az emberi faj (*Homo sapiens*) kialakulásakor a bioszférában még rendkívüli volt az élőlények sokfélesége, a biológiai változatosság. Ám a humán népesség terjeszkedni kezdett, eleinte csak kevésbé, később egyre jobban átalakította a természeti környezetet, és a biológiai diverzitást 65 millió éve – a földtörténeti középkor vége óta – rendkívül alacsonyra vetette vissza. Az utóbbi tízezer év új korszak a biológiai változatosság történetében. A rohamosan növekvő létszámú emberiség közvetlenül vagy közvetve egyre több fajnak okozza a kipusztulását. Legnagyobb veszélynek a szigeteken és egyéb elzárt élőhelyeken élő fajok és a tavak élőlényei vannak kitéve. Hosszasan lehetne sorolni azokat a katasztrófákat, amelyeket az emberiség meggondolatlansága okozott. A továbbiakban ezek közül fogunk néhányat áttekinteni.

### 8.6.1. Idegenhonos fajok

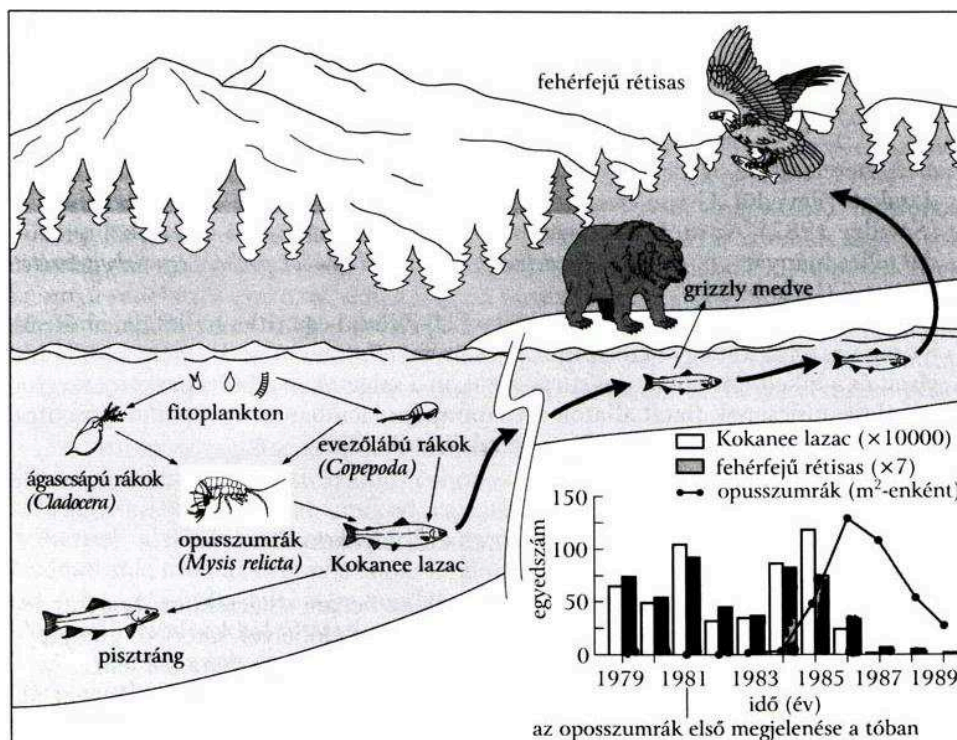
Amikor Charles Darwin 1830-ban Dél-Amerikában két európai növényfaj megjelenését és nagy területeken történő elterjedését figyelte meg lakott területek közelében és természetes élőhelyeken egyaránt, a jelenséget még különleges esetként említette. A nem őshonos, ún. idegenhonos fajok megjelenése, gyakran robbanásszerű elszaporodása és gyors terjedése ma viszont már világszerte gyakori jelenség. A legtöbb országban a flóra és a fauna nem őshonos fajainak száma és aránya ma ijesztően magas, hogy még a közel természetes élőhelyek közösségeiben is felbukkanhatnak a nem honos fajok. Az idegen és invazív váló fajok megjelenése egyike a biodiverzitásra nagy veszélyt jelentő tényezőknek, s a szakemberek többsége is az élőhelypusztítással együtt a legnagyobb veszélynek véli. Napjainkban a nemzetközi kereskedelem és az utazás rohamos fejlődése miatt az idegenhonos fajok új területeken történő megjelenésének és elterjedésének kockázata elkerülhetetlenül növekszik.

Minden olyan faj, amely emberi beavatkozás következményeként kerül új élőhelyre, tehát nem természetes úton (pl.: migráció), idegen fajnak minősül. A szakirodalom számos, többé-kevésbé szinonim elnevezéssel illeti őket, pl. behurcolt, nem honos, exogén, adventív faj. Az agresszív faj, **invazív faj** kifejezések már szűkebb jelentéssel bírnak. Hazánkban egyre inkább használatos a találó özönnövény elnevezés az invazív növényfajokra.

Az idegenhonos fajok lehetnek bevándoroltak vagy behurcoltak. A behurcoltak két nagy csoportja a kultúr- (termesztett, illetve telepített-honosított) és a nem kultúrnövények. Az ember közvetlen vagy éppen közvetett segítségével bekerült fajok közül mindazoknak, amelyek a természetes vegetációban nemcsak előfordulnak, hanem terjedni is képesek, agriofiton a nevük. Ezek egy része még Amerika felfedezése előtt (archofiton), más része pedig később (neofiton) terjedt el (Szabó–Kalapos, 2005).

Amint láthattuk, az új növény- és állatfajok természetes módon, de még inkább ember általi szándékos vagy gondatlan bevitellel terjedhetnek el olyan területeken, ahol korábban nem voltak jelen. Előfordulhat, hogy az újonnan elterjedt idegen faj nem okoz problémát, és a flóra vagy a fauna újabb egzotikus komponensévé válik. Ugyanakkor számos esetben előfordul, hogy azonnal vagy akár sokéves késéssel nehézségeket okoznak. A betelepített fajok megzavarhatják a táplálkozási kapcsolatokat, a táplálékláncot és hálózatot. A 8.6.1. ábra egy ilyen esetet mutat be. Egy tóba (Észak-Amerika, Flathead-tó) betelepítettek egy ott nem őshonos kiskirályfajt, az oposszumrákot a Kokanee lazac táplálékbázisának növelése céljából. Úgy vélték, hogy így a lazacállomány rövidesen megnő a horgászok örömeire. A

természetes tápláléklánc csúcsán a lazacot fogyasztó pisztráng, a grizzly medve és a fehérfejű réti sas áll. A lazac zooplankton (ágascsapú és evezőslábú kistrákok) fogyaszt, ezek pedig planktonikus algákkal (fitoplankton) táplálkoznak. Az a váratlan dolog történt, hogy a betelepített oposszumrák nagyon sok zooplanktont fogyasztott el, így a lazacnak a betelepítés ellenére sokkal kevesebb táplálék maradt. Ez nyilvánvalóan a lazacok egyedszámának csökkenését eredményezte, amelynek következménye a fehérfejű réti sas állományának drasztikus megritkulása lett.



8.6.1. ábra: Az oposszumrák betelepítésének következményei (Margóczy 1998, nyomán)

A jövevényfaj akkor válik problematikus, ha a honos fajokkal való versengésből sikerrel kerül ki. Annak ellenére, hogy számos tudományos munka született az invázió ökológiájáról, tudásunk e témakörben még eléggé hiányos. Az invázió folyamata függ egyrészt magának a fajnak a tulajdonságaitól, másrészt a „fogadó” közösség állapotától. A tapasztalatok szerint számos invazív faj hosszú évekig passzív állapotban marad, majd egyszer agresszíven előtör, és dominánssá válik az adott élőhelyen. Ennek okait eddig még nem sikerült kellően tisztázni.

Az invazív fajok legpusztítóbb hatása a szigeteken figyelhető meg. Emellett a nagy számú bennszülött fajokkal (endemizmussal) rendelkező tavakban is megfigyelhető a behurcolt fajok negatív hatása. Általában elmondható, hogy az antropogén hatás alatt álló közösségek fogékonyabbak az invazív fajokra, mint a természetes, vagy természetközeli. Előrejelzések szerint a globális klímaváltozások is kedveznek majd az invázióknak. Több sziget, illetve szigetcsoport (pl. Ausztrália, Mauritius, Új-Zéland) flórájának és faunájának változásáról, a behurcolt fajoknak a biodiverzitására kifejtett hatásáról, az invazív fajok visszaszorításának lehetőségeiről és a természetvédelem erőfeszítéseiről már eddig is számos tanulmány látott napvilágot. Jól ismertek az Új-Zéland szigetcsoportjára behurcolt fajok inváziójának következményei. Mintegy 1000 éve, a polinéziai népcsoport megjelenése óta, de különösen az elmúlt 200 évben nagyon sok új faj került a szigetekre. Ezek jelentős mértékű ökológiai változásokat, és az őshonos fajok visszaszorulását, illetve

kihalását eredményezték. A legnagyobb romboló hatást a biológiai diverzitásra kétséget kizáróan a behurcolt fajok okozták. Az állatvilág legnagyobb veszteségeit elsősorban a betelepített ragadozók okozták. Új-Zélandon ugyanis – a kisméretű denevérek kivételével – nem őshonosak az emlősök. A biológiai invázió a polinéziaiak által behurcolt kutyákkal és kiore patkányokkal kezdődött. A kiore kiirtott számos énekesmadár fajt, röpképtelen rovarot és számos hüllőt.

Az európaiak letelepedését követően az idegen fajok beáramlása jelentősen megnőtt: az utóbbi 200 évben 80 gerincest, ezek közülük 34 emlősfajt hurcoltak be a szigetekre. Az európai ragadozó emlősök, pl. a vándorpatkány, a hermelin és a házimacska kilenc bennszülött madárfaj kipusztulását okozta. A növényevő emlősök, pl. az ecsetfarkú oposzum, a gímszarvas és a kecske szelektív legelési szokásaikkal az eredeti növényzet szerkezetét és fajösszetételét változtatták meg. Az ismert kipusztult növényfajok száma elmarad ugyan a kihalt állatfajok számától, de 1840 óta 3 bennszülött növényfaj pusztult ki. Az új-zélandi szigetsoport jelenleg a Föld egyik, idegen fajok által legnagyobb mértékben uralt térsége.

A fajok elterjedésének természetes akadályai az ún. barrierek, pl. a hegyek, a tengerek, a folyók, a sivatagok, az erdőterületek stb. egyre kevésbé jelentenek akadályt, hiszen az emberek egyre többet utaznak, gyakran szándékuk ellenére szállítva a „potyautasokat”. Tapasztalhattuk, hogyan terjedtek el magas hegyeinkben a tájra korábban soha nem jellemző nitrogén igényes növények, mint pl. a ragadós galaj, a kányazsombor, valamint a taposást jól tűrő fajok, pl. a nagy útifű és a madárkeserűfű. Sótűrő növények pl. a mézpázsit, sóvirág tűnnek fel Európa útjai mentén a szórósók alkalmazásának következményeként.

Magyarországon is elég kétségbeejtő jelenség a különféle özönnövények és gyomok agresszív terjedése elsősorban azokon a területeken, ahol elegyesen ültetett fenyvesek, valamint akácok találhatók. Az akácültetvények a talaj nagy nitrogéntartalma miatt kedveznek a nitrogén igényes gyomfajok terjedésének is. A selyemkóró (8.6.2. ábra) elsősorban homokterületeinken, így a Kiskunsági Nemzeti Parkban súlyos, egyelőre megoldhatatlannak tűnő természetvédelmi problémát jelent. Parlagterületeken, de erdőnyiladékokban is terjed. A parlagokat gyakran uralja a vadmender és a parlagfű. Ez utóbbi, pollenjének allergén mivolta miatt az emberi egészségre nézve súlyos károsodást okozhat. Hazánkban a kisparaszti állattartás visszaszorulása, egyes területen a teljes megszűnése azt eredményezi, hogy a gyepeket nem kaszálják, nem legeltetik, emiatt az özöngyomok gáttalanul terjednek, kiszorítva több őshonos fajt. Ezek közül több faj is Észak-Amerikából származik, mint pl. az akác, a gyalogakác, a bíbor nyenyúljhózzám, a parlagfű, a zöldjuhar és az amerikai kőrös. A Dunántúlon a kanadai aranyvessző azért terjed vészesen, mert a vizes élőhelyek, elsősorban a mocsár- és a láprétek használata (kaszálás, legeltetés) megszűnt. Akkor lehetne eredményesen fellépni az özönnövények térhódítása ellen, ha visszatérne az állattenyésztés, és ezzel párhuzamosan a legelő- és gyephasználat.





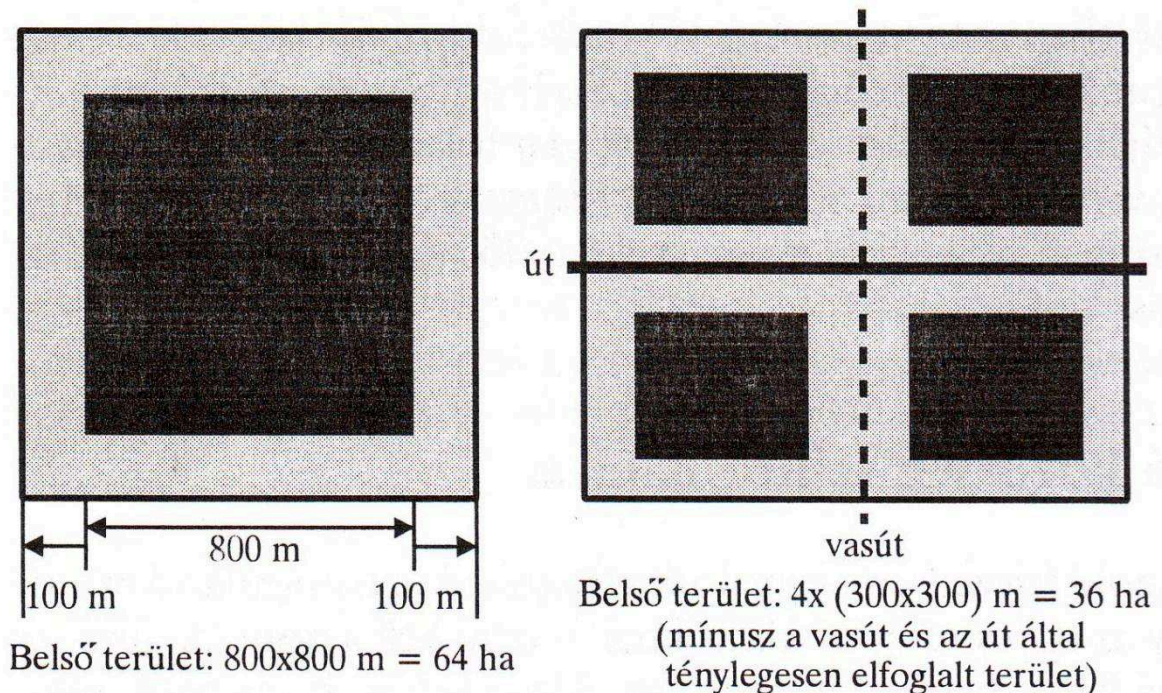
8.6.2. ábra: Selyemkóró, az egyik legelterjedtebb özönfaj hazánkban (Szabó Mária felvétele)

Az idegen fajok szándékos behozatala leggyakrabban valamilyen rövid vagy hosszú távú haszon reményében történik (lásd 8.6.1. ábra). A várt haszon általában gazdasági, de a kellemes és vonzó környezet iránti egyéni vagy közérdek is gyakori ok. Így az indíték lehet pl. a biotermék-produkció növelése halastóban, mezőgazdaságban, erdészetben, vagy szép park, kert kialakítása, egzotikus dísznövényekkel beültetve. Mindezek gyakran komoly mellékhatásokkal vagy azonnali katasztrófákkal járnak. Idegenhonos fajok behozatala járhat haszonnal, de környezeti kárt is okozhat. Sok problémát okoznak azok a turisták is, akik egzotikus dísznövényekkel megrakodva térnek haza nyaralásukból, illetve akik nyaralás előtt a legközelebbi tóba eresztik akváriumi halaikat.

#### 8.6.2. Élőhelyek beszűkülése és feldarabolódása

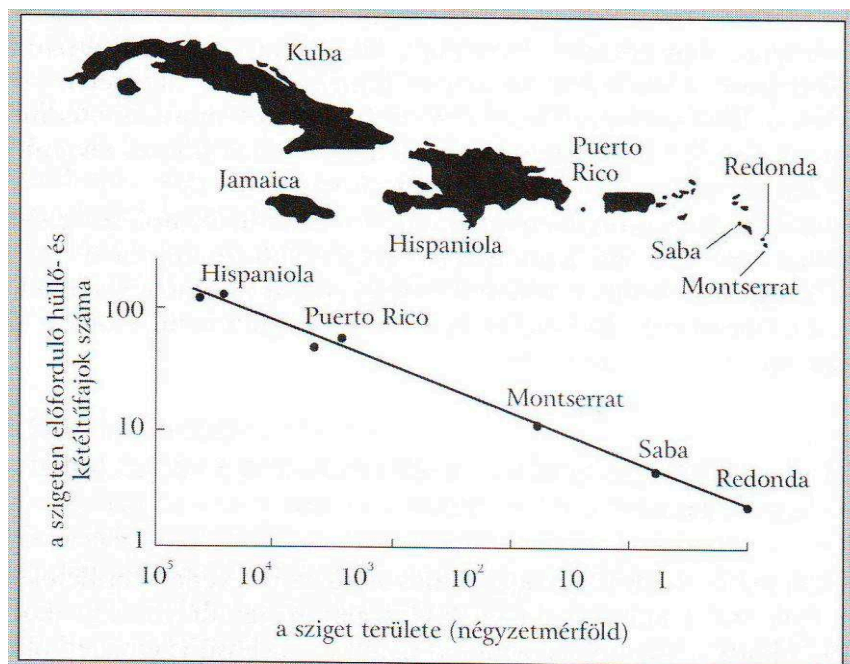
Bármilyen súlyosak is a helyi jellegű fajkipusztulások, többnyire eltörpülnek az élőhelyek területcsökkenését és a nagy összefüggő területű élőhelyek feldarabolódását (fragmentációját) és izolációját követő fajkihalás mellett. Az élőhelyek feldarabolódása egyike a természet pusztulását okozó legfontosabb tényezőknek. Fragmentációról akkor beszélünk, amikor egy jelentős kiterjedésű összefüggő élőhely több kisebb részre

darabolódik fel és az élőhelyfoltok elszigetelődnek egymástól, az élőhely belső területe csökken a megnövekedett szegélyhatás következtében (8.6.3. ábra). Az így létrejött kisebb területű foltok élőhelyszigeteknek tekinthetők. A foltokban elszigetelt és kis egyedszámú populációk alakulnak ki, amelynek leggyakoribb következménye azok genetikai diverzitásának csökkenése, majd a populáció kipusztulása. Az élőhelyek beszűkülése ugyanis jelentős hatással van a fajok sokféleségére („területhatás”). Napjainkra már könyvtárnyit tesz ki a terület nagysága és a megtelepedő fajok száma (egyensúlyi fajszám) közötti összefüggés vizsgálatairól szóló szakirodalom.



8.6.3. ábra: Élőhely-fragmentáció (Margóczy 1998, nyomán)

Szigetvilágokban, pl. Karib-szigetek, Csatorna-szigetek, Nyugat-Indiai szigetvilág, Henderson-szigetek, Polinézia a fajszám szorosan összefügg a sziget területével. A Karib-térség szigetein élő hulló és kétéltű fauna egyensúlyi fajszámának növekedését az sziget területének függvényében mutatja be a 8.6.4. ábra. A sziget méretével nő a fajgazdagság, a leggyakoribb esetben a sziget területének negyedik gyöke szerint (szigetbiogeográfia elmélet, MacArthur–Wilson, 1967). Mindez érvényes az élőhelyszigetekre is, pl. a szántókkal vagy füves területtel körbevett erdőfoltokra is. A területnagyság tízszeres növekedése hozzávetőlegesen a fajszám kétszeres emelkedését eredményezi, egytizedére való zsugorodása viszont felére csökkenti az egyensúlyi fajszámot. A terület-fajszám összefüggés segítségével megbecsülhetők az élőhelyek beszűkülését és a fragmentációt követő fajvesztések, illetve meghatározható a védett területek optimális mérete.



8.6.4. ábra: A Karib-szigeteken élő fajok számának alakulása és a szigetek területe (Wilson, 1989 nyomán)

Az utóbbi évtizedekben szinte az egész világ a trópusi esőerdők irtásából eredő fajkipusztulásokról beszél. A talajsajátságok és az éghajlat alapján a trópusi esőerdők területe a huszadik század végére eredeti kiterjedésüknek alig több mint felére szűkültek be, s minden évben területük egy százaléka tűnik el az erdőirtás következtében. Ezzel a terület csökkenéssel az esőerdő fajainak 0,2–0,3 százaléka tűnik el örökre. Ha az esőerdő fajait óvatos becsléssel csak 2 milliónak vesszük, ez évente 4000–6000 faj kihalását eredményezi, amely az ember megjelenése előtti kipusztulási arány sebességét nagyságrendekkel felülmúlja (Wilson, 1989). Az élőhelyek pusztulása azonban nem csak a trópusi esőerdőket érinti, az élőhely-beszűkülés következményei a Föld más részein is érezhetők. Elsősorban a mérsékeltövi erdők, a sztyeppék, korallzátonyok, tavak (pl. a Bajkál-tó) és a vizes élőhelyek, vagyis a hajdani nagy kiterjedésű árterek maradványai és a lecsapolt lápok és mocsarak a leginkább veszélyeztetettek.

Egy adott tájrészlet – bármennyire egységesnek látszik – egyrészt különböző habitatok mozaikja, másrészt sokféle különleges mikrohabitatot tartalmaz, pl. forrást, vízfolyást, láprétet, mocsárrétet, leszakadást stb. A táji változatosság csökken a feldarabolódás és élőhely beszűkülés miatt, mivel kisebb területen jóval kisebb valószínűséggel fordul elő többféle élőhely, illetve mikrohabitat.

Magyarországon az eredeti növénytakarónak ma mindössze 15 százaléka található meg. 2002-ben indult a MÉTA-program (Magyarország élőhelyeinek térképi adatbázisa, Molnár Zs. et al., 2007), amelynek célja az ország nagyléptékű élőhely térképének és élőhely adatbázisának elkészítése, a természetes növényzeti örökség tudományos értékelése. A nagyszabású felmérés eredményeként kiderül, hogy mi maradt meg napjainkra a sajátos pannon tájból. A Kárpát-medence belső tere ugyanis az Európai Unió külön életföldrajzi régiója, lásd 8.9. ábra), tekintettel arra, hogy az alföldi pannon táj a keleti puszták ide szakadt darabja, az itt jellemző fajok közül többnek ez a legnyugatibb előfordulása. Eleink az erdőssztyeppen, ezen a ligetes mozaikos táj mentén vándorolva jutottak el a Kárpát-medencébe. Ám ez a vegetációtípus mára 98 százalékban eltűnt

hazánkból. Ma a pannon alföldi táj jellemző vegetációtípusát a *szikes puszták*, a *lössztyepp*ek és a *homokbuckák árvalányhajás gyepei* jelentik. A pannon régió jellegzetes fajai és élőhelyei, az ún. pannonikumok Európa egyéb részein ismeretlenek.

### 8.6.3. Az emberi tevékenység hatásai

Az ember tevékenysége élőlények hosszú sorának a kihalásáért felelős, még ha ez egyesek szerint akár természetes folyamatnak is tekinthető, elvégre az ember is a természet része. Hosszú időn át tartotta magát az a nézet, hogy a mamutok a jégkorszak végén, 10–12 ezer évvel ezelőtt pusztultak ki. Ez a nézet megdőlt akkor, amikor a tudósok a Szibérián túli Wrangler-szigeteken felfedeztek háromezer éve elpusztult mamutokat. Ezek az egyedek csupán azért élhették túl jócskán a fajtársaikat, mert emberi tevékenységtől távoli területen éltek. Hasonló sorsra jutott a házi szarvasmarha őséneke tekintett őstulok is, amelynek utolsó egyedeit Magyarországon az 1400-as években, Lengyelország területén pedig az 1600-as években ejtették el. Szintén közismert a Mauritius szigetén egykor élő röpképtelen dodómadár esete is. A faj a gyarmatosítás áldozatául esett: a gyarmatosítók több, a szigeten nem honos ragadozót vittek be hajóikon, ráadásul a dodó tojása és maga az állat is ízletes csemegének számított. A madárfaj az 1800-as évek végére tűnt el végleg. Az új-zélandi szigetvilágban a polinéz letelepedés számlájára írható 35 madárfaj kihalása. Emberi vadászat irtott ki egy teljes, szintén röpképtelen madárcsaládot, a moákat is.

A Föld kontinenseinek antropogén bolygatottsága, a bioszféra állapotának romlása az 1990-es évek közepére már ijesztő méreteket öltött (lásd: 1. fejezet, Környezet és fenntarthatóság, 1.2.4. ábra), annak ellenére, hogy addigra a nemzetközi egyezmények száma közel kettőszázra emelkedett.

A gazdasági tevékenység közvetlen, illetve közvetett hatásai ugyancsak befolyásolják a biológiai sokféleséget. A bányászat, az energia ipar, a mező- és erdőgazdálkodás a kezdetektől markáns tájtalakítással, élőhely-fragmentációval és -degradációval jár. Jó példa erre a bánya meddők és erőművi salakhányók táj-, közösségi és faji diverzitást csökkentő hatásai (8.6.5. ábra). Ezen túlmenően számos invazív növényfaj megtelepedésére és terjedésére nyújt lehetőséget, ami a Kárpát-medence biodiverzitása, a Pannon életföldrajzi régió egyedisége szempontjából kifejezetten káros.



8.6.5. ábra: Salakhányó, mint tájidegen elem (Szabó Mária felvétele)

## 8.7. Záró gondolatok

Az emberiség eleinte lassan, majd az elmúlt évszázadban robbanásszerűen szaporodni és terjeszkedni kezdett, és több lépésben markánsan átalakította a természeti környezetét. A világnépesség száma 1999 őszén átlépte a 6 milliárdot. A 20. században több ember született, mint amennyi fajunk történelmében azt megelőzően élt. 1800-ban ez a szám körülbelül 1 milliárd, de még 1900-ban is csupán 1,6 milliárd lehetett. Amikor a Homo sapiens elérte a hatmilliárdot, egyúttal egy másik határt is átlépett: százszorosan meghaladta bármely nagytestű faj biomasszáját, mely valaha élt a Földön. Sem az emberiség, sem a bioszféra többi élőlénye nem lenne képes még egyszer elviselni ilyen léptékű gyarapodást száz év alatt (Takács–Sánta, 2008, Wilson, 2008).

Fentiek következményeként az emberiség a biológiai diverzitást igen alacsony szintre vetette vissza. Következményeit még megjósolni sem lehet, hiszen a bolygónk bioszférájában élő fajok valódi értéke nem ismert, s nem is vizsgálta senki. A rohamosan csökkenő biológiai változatosság az elmúlt fél évszázad környezeti változásai közül két ok miatt is a legfontosabbnak tekinthető. Egyrészt azért, mert teljesen visszafordíthatatlan, másrészt mert csökkenti a bioszféra védekezőképességét a zavaró hatásokkal szemben. Könnyen belátható, hogy minél erőteljesebben átalakítja az emberiség a természeti környezetet, annál több és többféle zavarásféléssel „bombázza” a bioszférát, s benne természetesen önmagát is. Ezt az egyre növekvő zavarás-sokféleséget („perturbációs diverzitást”) az élővilág kizárólag a saját sokféleségének növekedésével védhetné ki. Ezzel szemben az élővilági sokféleség drámai csökkenése tapasztalható, amellyel óriási, s az idő múlásával egyre helyrehozhatatlanabb hibát követ el az emberiség.

Bolygónk léte, ellentétben a Naprendszer többi bolygójával, nagymértékben függ a felszínét borító élő buroktól, a bioszférától, amely az élet fenntarthatóságának feltételeit biztosítja. A bioszféra aktivitásának köszönhetően a talaj, a víz és a légkör százmillió évnyi fejlődés után érte el jelenlegi állapotát és minőségét. Ebben a rendkívül bonyolult szférában élőlények milliói kapcsolódnak egymáshoz az energiaáramlás, a biológiai és a globális biogeokémiai ciklusokon keresztül. Amikor fajokat pusztítunk ki, élőhelyeket szüntetünk meg vagy idegenhonos fajokat hurcolunk be egy területre, tönkretesszük azt a legfontosabb örökséget, amit bolygónk kínál az emberiségnek, s ezzel a saját fajunk létét is veszélybe sodorjuk.

## 8.8. Függelékek

### 8.8.1. Bibliográfia

- Hammond, P.M.: Species inventory. In: Global Diversity: Status of the Earth's Living Resources (Ed. WCMC), 1992., Chapman and Hall, London pp. 17-39.
- Juhász-Nagy, P.: *Eltűnő sokféleség.* – Scientia Kiadó, 1993., Budapest. 147 p.
- MacArthur, R.H. – Wilson, E.O.: *The Theory of Island Biogeography.* – Princeton University Press, Princeton, 1967 New Jersey. 203 p.
- Magyarország Nemzeti Atlasza. Szerk.: Pécsi, M., Bassa, I., Beluszky, P., Berényi, I. Kartográfiai Vállalat, 1989. Budapest,
- Margóczy, K.: *Természetvédelmi biológia.* JATE Press, 1998., Szeged
- Meadows, D.H.: *Biodiversity: The key to saving life on Earth.* – In: POLJAM, L.P. (szerk.): *Environmental ethics. Readings in theory and application.* Jones and Bartlett Publishers, National Academic Press, 1995., Boston. pp: 156-158.

Molnár Zs. – Bartha S. – Seregélyes T. – Illyés E. – Botta-Dukát Z. – Tímár G. – Horváth F. – Révész A. – Kun A. – Bölöni – J., Biró M. – Bodoncz L. – Deák J. Á. – Fogarasi P. – Horváth A. – Isépy I. – Karas L. – Kecskés F. – Molnár Cs. – Ortmann-né Ajkai A. – Rév Sz.: A grid-based, satellite-image supported, multi-attributed vegetation mapping method (MÉTA). Folia Geobotanica 42(2007): 225–247.

Standovár, T – Primack, R.B.: A természetvédelmi biológia alapjai. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2001., Budapest. 542 p.

Szabó M. – Kalapos T.: Társulások szerveződése és működése, az ökológiai rendszer. – In: NÁNÁSI I. (szerk.): Humánökológia. Medicina Kiadó, 2005., Budapest. pp. 71-137.

Takács-Sánta, A.: Bioszféra-átalakításunk nagy ugrásai. – L'Harmattan Kiadó, Budapest, 2008. 115 p.

Vida G.: A bioszféra evolúciója, a biodiverzitás. – In: NÁNÁSI I. (szerk.): Humánökológia. Medicina Kiadó, 2005. Budapest. pp. 53-70.

Wilson, E. O.: Veszélyben a biológiai változatosság. – Tudomány, 11(1989). szám, pp: 44-50.0

Wilson, E.O.: The diversity of Life. The Belknap Press of Harvard University Press, 1992., Cambridge, UK.

Wilson, E. O.: Az élet jövője. – Akkord Kiadó, 2008., Budapest. 290. p.

### 8.8.2. Fogalomtár

**Bennszülött (endemikus) faj:** Olyan állat- vagy növényfaj, amelynek elterjedése a Föld viszonylag kicsi területére korlátozódik. A Kárpát-medencére jellemzők az ún. pannon-endemizmusok (pilisi len, magyar kikerics, magyar kökörccsin, rákosi vipera, fekete rajzocsiga, szemesés vakászka)

**Biológiai diverzitás:** Biológiai sokféleség, melynek két komponense a rendszer elemeinek száma és az elemek mennyiségi kiegyenlítettége.

**Bioszféra:** A Föld élőlények által benépesített kérgé.

**Egyenletesség:** A faj/egyed diverzitást becsülő indexek kapcsán használjuk. Értéke 0 és 1 között változhat. Kifejezi, hogy az egyedek milyen módon oszlanak el a fajok között. Maximális az egyenletesség (E=1) ha minden fajhoz ugyanannyi egyed tartozik. Számítása: a diverzitást elosztjuk a maximális diverzitás értékével.

**Eukarióta:** minden olyan élőlény, amelynek sejtjeiben maghártyával körülvett valódi sejtmag van. Ezen belül található a bázikus fehérjékkel kombinált DNS-t tartalmazó kromoszómák, melyek mitotikus v. meiotikus osztódásra képesek. Az eukarióta sejtek többféle, membránhoz kötött sejt szervecskét is tartalmaznak, mint pl. mitokondriumok, lizoszómák, plasztiszok stb. ezekben zajlik a sejt funkciók jelentős része. Az eukariótákon belül a növényvilág, állatvilág, gombavilág és az eukarióta egysejtűek különíthetők el.

**Foraminifera:** lukacsosvázú (vagy lukacsoshéjú) egysejtű eukarióta állatok. Jellemzőjük az állabak. Legtöbbjüket meszes héj vagy váz borítja.

**Invazív faj:** Tájidegen faj, amely agresszíven és nagy tömegben terjed, túróképessége, szaporodó- és terjedőképessége révén elfoglalja a természetes vagy az ember által létrehozott élőhelyeket, módosítja és veszélyezteti azok stabilitását, fennmaradását, és ezáltal ökológiai, gazdasági és/vagy egészségi károkat okoz.

**Koevolúció:** együttes evolúció, pl. a virágok és a megporzó rovarok egymáshoz történt alkalmazkodottsága, a gazdaszervezet és parazitája egymást befolyásoló fejlődése

**Maradvány (reliktum) faj:** adott területen korábbi földtörténeti korokból fennmaradt fajok (keleti gyertyán, tőzegáfonya, fűrészlábú szöcske, havasi cincér)

**Ökoton:** Két eltérő jellegű közösség határának átmeneti területe. Jelölheti az átmeneti zóna fizikai és kémiai tulajdonságait vagy az ott kialakuló (a két határközösségtől eltérő) közösséget.

**Posztglaciális:** Az utolsó jégkorszakot követő meleg időszak

**Prokarióta:** az élővilág egyszerű felépítésű képviselői. Egysejtűek. Nincs elkülönült sejtmagjuk. Az öröklődési anyag egyetlen DNS-gyűrűben tárolt. A DNS-hez nem kötődnek bázikus fehérjék. A sejtben sejtszervecskék nincsenek. A sejtek szerveződése legfeljebb kolóniák v. fonalas telepek kialakulásához vezethet. Két fő csoportjuk van: a baktériumok és a kékeszöld algák (cianobaktériumok).

**Riói Konferencia:** az ENSZ 1992 júniusában szervezett világkonferenciája Rio de Janeiróban hivatalos nevén ENSZ Konferencia a Környezetről és Fejlődésről (UN Conference on the Environment and Development). A konferencia elfogadta a biodiverzitás-védelmi, valamint a klímaváltozási egyezményt.

**Szukcesszió:** határozott irányú közösségszerveződési folyamat. Olyan dinamikai folyamat, amelynek során élőlényközösségek tér-idő átalakulásai játszódnak le, vagyis adott helyen az élőlényközösségek időbeni egymásra következése.

## 9. A BIOSZFÉRA SZENNYEZŐI (TORKOS KORNÉL)

### 9.1. A bioszféra állapotát befolyásoló antropogén hatások

A 19. század első évtizedeiben az emberiség még csak természetes anyagokat használt. Az ipari forradalom hozta létre a nagyipart, a tömegtermelést. A szükségletek kielégítésére egyre több mesterségesen előállított anyagra és egyre több energiára volt szükség. Fellen-dült a vegyipar.

Az utóbbi 150 évben az ipari termelés volumenének exponenciális növekedési üteme nemcsak gyökeres életmód-változtatást eredményezett, hanem környezetünk állapotát is jelentősen, jobbra negatívan befolyásolta.

Minden olyan hatást, amely a természeti környezet állapotában maradandó változást okoz, a környezeti „katasztrófák” fogalmkörébe sorolhatunk. Ilyen hatások lehetnek az emberi tevékenységtől függetlenek (pl. földrengések, szökőárok, vulkánikus és egyéb geo-lógiai változások), illetve az emberi tevékenységtől függő, azaz antropogén hatások.

Az antropogén hatások bemutatására az alábbi jelenségeket érintjük:

- talaj- és vízszennyezők,
- levegőszennyezők globális adatai,
- globális felmelegedés,
- savas esők,
- „ózonlyuk” problémakör.

A környezet állapotát jelentősen befolyásoló szennyező anyagok nagyobb részét szerves vegyületek alkotják. Mindazon szerves vegyületek, amelyek az ipari tevékenység kö-vetkeztében fordulnak elő a környezetünkben, szennyező anyagnak minősülnek. Óvatos becslések szerint az ismert szerves vegyületek száma jóval meghaladja az egymilliót. Kör-nyezetszennyezés szempontjából csak azokat a szerves vegyületeket tartják számon, ame-lyek a levegőben, vízben, illetve talajban egészségre ártalmas mennyiségben fordulhatnak elő. Ilyen listák először az Egyesült Államokban készültek. Az USA Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA, Environmental Protection Agency) nagyhatalmú szövetségi intézmény, amelynek szigorú előírásai megfellebbezhetetlen erővel bírnak. Az Európai Unió által ki-alakított határértékek és előírások alapjául az EPA szabályozása szolgált. Jelenleg az Euró-pai Unió által kialakított listán 130, a természetes vizekben előforduló szerves vegyület, illetve vegyületcsoport szerepel [1]. Ezt úgy kell érteni, hogy például a poliklórozott bifenilek (PCB) 209 izomervegyületet tartalmaznak, vagy a poliaromás szénhidrogének (PAH) közül 16 vegyületet kell mérni, de a listán csak egy-egy tételt jelentenek. Az ilyen típusú vegyületeket általában csoportosan és nem egyedileg kell meghatározni. Hasonló megállapításokat kell tenni azon vegyületcsoportokra, amelyek elsősorban talajban vagy aeroszolokban adszorbeált formában fordulnak elő. Ilyenek például az ún. dibenz-dioxinok, dibenz-furánok, amelyek ugyancsak több izomervegyület formájában fordulnak elő és a legveszélyesebb környezetszennyezők közé tartoznak. Néhány kivételtől eltekintve (tankhajóbaesetek, nagymértékű talajszennyezések stb.) a meghatározni kívánt szennyező



anyagok koncentrációja a környezeti mintákban 10-4%-nál (<1 ppm, ppb, ppt) kisebb érték. Ez a tény óriási kihívást jelent az analitikus vegyészek számára. A meghatározási módszerek napjainkban is folyó intenzív fejlesztése két fő irányt jelez, nevezetesen az analitikai mérési módszerek érzékenységének növelését, valamint az adott mátrixtól történő elválasztás hatékonyságának, szelektivitásának növelését. A továbbiakban röviden áttekintjük a környezetszennyezés szempontjából legfontosabb vegyülettípusokat.

#### 9.1.1. A bioszféra antropogén eredetű szennyezőinek főbb csoportjai

##### **Talaj, víz**

Szénhidrogének

*alifás, aromás, PAH*

Műtrágyák

*pétisó, szuperfoszfát stb.*

##### **Peszticidek**

*fungicid, herbicid, inszekticid*

Halogéntartalmú hulladékok

*dioxinok, dibenzfuránok, PCB-k*

##### **Levegő**

*CO<sub>2</sub> NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O) SO<sub>2</sub>, stb.*

#### 9.1.2. A szennyezők kibocsátásáért felelős területek

##### **Motorizáció**

*kohóipar, műanyag, mógumi, akkumulátor (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Pb, stb.)*

##### **Energiaipar**

*hőerőművek, kőolajtermékek, földgáz*

*CO<sub>2</sub> SO<sub>2</sub> CO<sub>2</sub>*

*(savas esők)*

##### **Vegyipar**

*műtrágya, gyógyszer, műanyag, növényvédő szerek (pesticidok), klórozott hulladékok*

##### **Kommunális hulladékok**

*nehézfémvegyületek (galvániszap, háztartási hulladékok stb.)*

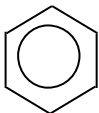
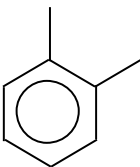
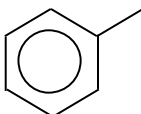
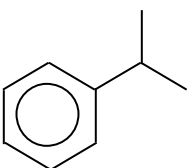
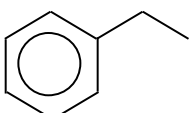
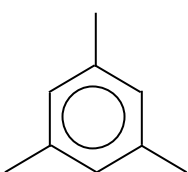
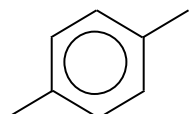
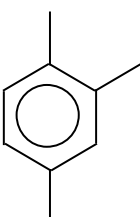
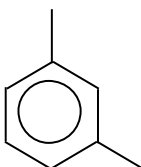
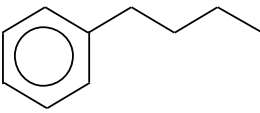
## 9.2. Legfontosabb környezetszennyező vegyületek típusai

### 9.2.1. Alifás és monoaromás szénhidrogének és halogénezett származékaik

Az e csoportba tartozó vegyületek a kőolaj-feldolgozás termékei. Felhasználási területük igen széleskörű. Üzemanyagként vagy vegyipari alapanyagként kerülnek felhasználásra. A gondatlan kezelés, vagy egyéb szabálytalanság következtében a talajba, illetve felszíni vizekbe kerülő üzemanyag, olaj elsősorban az ivóvízbázisra jelent komoly veszélyt. A nagymértékű talajszennyezésekre hazánkban is voltak sajnálatos példák. Nagy veszélyt jelentenek a tankhajóbalesetek, amelyek sok esetben regionális méretű ökológiai katasztrófát okoznak. A talajszennyezések általában lokalizálhatók, szemben a vízszennyezésekkel, amelyek a közeg tulajdonságaiból adódóan igen nagy területet érinthetnek. Ez a körülmény indokolja, hogy a figyelem elsősorban a természetes vizekre (felszíni és talajvíz) irányul. E vegyületcsoportból az Európai Unió listáján az alábbi vegyületek, illetve vegyületcsoportok szerepelnek [2, 3]:

## a. Illékony monoaromás szénhidrogének (BTEX)

Az elnevezés a benzol, toluol, etil-benzol és a xilolok neveiből alakult ki. Főleg ipari szennyvizekből üzemanyag-szennyezés következtében kerülnek a vizekbe. A 9.1. táblázat tartalmazza ezen vegyületcsoport tagjai.

<i>BTEX-ek</i>	<i>Szerkezeti képlet</i>	<i>BTEX-ek</i>	<i>Szerkezeti képlet</i>
benzol		o-xilol	
toluol		kumén	
etil-benzol		mezitilén	
p-xilol		ps-kumén	
m-xilol		n-butyl-benzol	

9.1. táblázat: Illékony monoaromás szénhidrogének és szerkezeti képleteik

## b. Illékony alifás halogenidek

Ezen vegyületcsoportból (9.2. táblázat) elsősorban a diklór-metánt, a tetraklór-metánt, a triklór-etént, a tetraklór-etént és az 1,1,1,-triklór-etánt használja az ipar, ezen belül is a fő felhasználók a gyógyszer-, festék- és műanyagipar. A diklór-metánt széles körben használják, mint extrahálószer, a tetraklór-etén pedig a vegytisztításban nyer alkalmazást.

<i>Illékony halogenidek</i>	<i>Szerkezeti képlet</i>
1,1-diklór-etén	$\text{CCl}_2=\text{CH}_2$
diklór-metán	$\text{CH}_2\text{Cl}_2$
1,1-diklór-etán	$\text{CHCl}_2-\text{CH}_3$
kloroform	$\text{CHCl}_3$
1,1,1,-triklór-etán	$\text{CCl}_3-\text{CH}_3$
szén-tetraklorid	$\text{CCl}_4$
1,2-diklór-etán	$\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CH}_2\text{Cl}$
triklór-etén	$\text{CCl}_2=\text{CHCl}$

9.2. táblázat: Illékony alifás halogenidek és szerkezeti képletük

A víztisztítás utolsó lépéseként aktív klórt használnak fertőtlenítésre. A maradék szerves anyag, valamint a jelenlevő klorid- és bromidionok reakciójából keletkeznek az ún. haloformok (trihalometánok, THM), kloroform, bróm-diklór-metán, dibrom-klór-metán, bromoform, amelyek a tisztított ivóvízben kimutathatóak [4].

#### c. Aromás halogénezett szénhidrogének

E vegyületcsoportból (9.3. táblázat) elsősorban a benzol klórozott származékai jelentősek, mivel ezek halogéntartalmú növényvédő szerek gyártásának alapanyagai, illetve melléktermékei. Jelentős mennyiség került a környezetbe az 1960–80-as években. Sajnos hazánkban is több ezer tonna ilyen anyag vár megsemmisítésre, az óriási méretű talaj- és vízszennyezésről nem is beszélve. Egyes tagjaik karcinogén, mutagén és teratogén hatású veszélyes anyagok [5].

#### 9.2.2. Poliaromás szénhidrogének (PAH-ok)

A PAH-ok a környezetben mindenhol jelen vannak nyomnyi mennyiségben, mivel szerves anyagok égésének termékei. Lakatlan vidékek PAH háttérszintje valószínűleg főként a természetes erdőtüzekből származik. De a modern, sűrűn lakott területek PAH terhelése emberi tevékenység révén keletkezik. A figyelem középpontjába toxicitásuk miatt kerültek. A levegőben lévő szilárd részecskék (aeroszol) felszínére adszorbeálódnak, innen a talajba, és vizekbe (főként üledékbe) kerülnek [7].

Ismert tény az, hogy a PAH-ok az élő szervezetre nagyon károsak, és az élőlények bőrére, szervezetébe, illetve tüdejébe jutva rákot okozhatnak [8]. A tumorok keletkezése kétlépcsős folyamat. Vannak iniciáló és promoter ágensek. A promoterek olyan anyagok, melyek hosszabb időintervallumban hatnak, emellett egy iniciáló komponens egyszeri hatása okozza végül a tumorok kialakulását. A PAH-ok elsősorban iniciáló ágensek. Karcinogén hatásuk mellett mutagén hatást is kimutattak. Újabban a figyelem a PAH-ok nitrát-

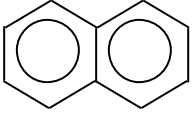
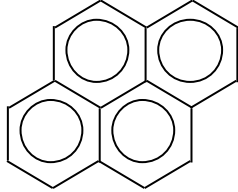
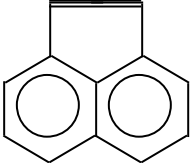
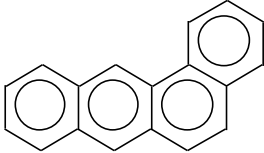
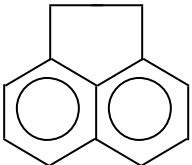
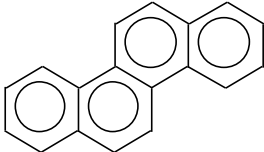
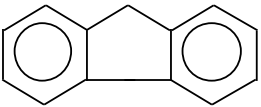
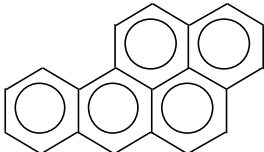
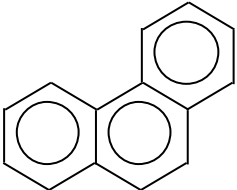
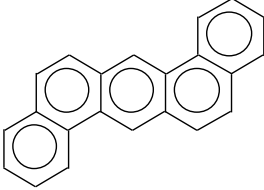
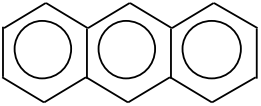
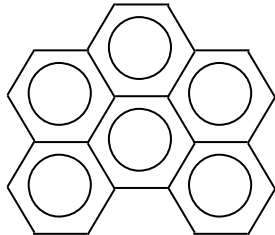
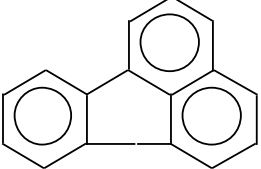
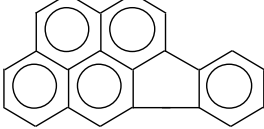
származékaira terelődött, melyek könnyen képződnek a levegőben levő NO<sub>2</sub> hatására. Ezeknek az anyagoknak hihetetlenül megnőtt a mutagén hatásuk.

<i>Vegyület</i>	<i>Fizikai tulajdonságok</i>					<i>Toxicitás</i>
	Fp (°C)	Op (°C)	M (g/mol)	S (víz) (µg/l)	D (Debye)	LD <sub>50</sub> (mg/kg)
mono-klórbenzol	132	-45,6	112,5	<200	1,30	2910
1,2-diklór-benzol	179	-17,0	147,0	497	1,97	500
1,3-diklór-benzol	172	-24,7	147,0	2210	1,23	500
1,4-diklór-benzol	173	53,1	147,0	<200	0,00	500
1,2,3-triklór-benzol	218	53-54	181,4	<200	2,06	756
1,2,4-triklór-benzol	214	16,95	181,4	91460	1,03	756
1,3,5-triklór-benzol	208	63-64	181,4	<200	0,00	756
1,2,3,4-tetraklór-benzol	254	47,5	215,9	233320	1,61	1500
1,2,3,5-tetraklór-benzol	246	54,5	215,9	n.a.	0,83	1500
1,2,4,5-tetraklór-benzol	246	140,5	215,9	3760	0,00	1500
pentaklór-benzol	276	86	250,3	52300	0,79	1650
hexaklór-benzol	323	230	284,8	1661	0,00	n.a.

D: dielektromos állandó, LD<sub>50</sub>: testsúlykilogrammra megadott határérték

9.3.táblázat: A klórbenzolok fizikai és biológiai jellemzői

Az EPA és az Európai Unió a 9.4. táblázatban felsorolt 16 PAH mérését írja elő.

<i>PAH</i>	<i>Szerkezeti képlet</i>	<i>PAH</i>	<i>Szerkezeti képlet</i>
naftalin		pirén	
acenaftilén		benzo(a)antracén	
acenaftén		krizén	
fluorén		benzo(a)pirén	
fenantrén		dibenz(a,h)antracén	
antracén		benzo(g,h,i)perilén	
fluorantrén		indeno(1,2,3-cd)pirén	

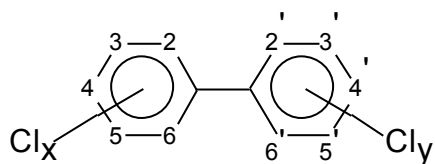
9.4. táblázat: Az EPA és az Európai Unió szerint mérendő PAH-ok szerkezeti képlete

A legtoxikusabb a benz(a)pirén és az indeno(1,2,3-cd)pirén. Főként a benz(a)pirén karcinogén hatására vonatkozóan nagyszámú szakirodalom áll rendelkezésre. Egereken és patkányokon végzett kísérletek alapján extrapolációval határozták meg azt a benz(a)pirén határkoncentrációt, amely embernél még nem okoz rákos megbetegedést. Ez az érték 0,05  $\mu\text{g}/\text{l}$ -nek adódott.

Környezetbe kerülésükért elsődlegesen a belső égésű motorok és széntüzelésű erőművek a felelősek, de a vas- és alumíniumkohászat esetében is jelentős PAH-emisszióval kell számolni [9].

### 9.2.3. Poliklórozott bifenilek (PCB)

A poliklórozott bifenilek a bifenilből származtathatók klór szubsztitúcióval. A szubsztituáló klór atomok száma 1-től 10-ig változhat, így 209 különféle szubsztituált bifenil képződhet. Az egyes ilyen bifenil származékokat a szakirodalomban congenereknek, itt a továbbiakban egyedi PCB fajtáknak nevezzük. Ezeket a IUPAC által elfogadott számozással látják el 1-től 209-ig. A számozás a következő:



ahol  $x+y = n$  és  $n = 1-10$ .

A klóratomok az aromás gyűrűre orto- (2,2',6,6'), meta- (3,3',5,5'), és para- (4,4') helyzetekben kerülhetnek.

A PCB-k általános összegképlete így a következő:  $\text{C}_{12}\text{H}_{10-n}\text{Cl}_n$ . A PCB-k így egy 10 tagból álló homológ sort alkotnak, ahol a homológok a klóratomok számában különböznek egymástól. Az egyes homológok a klóratom számától függően különböző számú izomerekből állnak.

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>izomerek száma</i>	3	12	24	42	46	42	24	12	3	1

Megemlítendő, hogy a 3 izomert számláló, egy klórral szubsztituált monoklórozott bifenilek csoportja, az egy klóratom ellenére a nomenklatúra szerint a PCB-k közé tartozik.

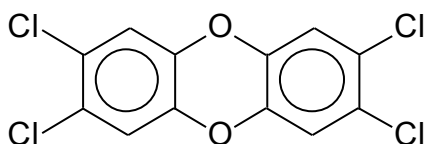
A PCB-k gyártását, felhasználását a hatvanas évek végén, a hetvenes évek első felében betiltották, de addig igen jelentős mennyiség került a környezetbe. A sarki jégtakarók alatt néhány méterrel is kimutatták nyomaikat, az ipari országokban emberek vérében ugyancsak kimutatható a PCB-k nyomai. Elterjedtségüknek magyarázata, hogy igen széles körben kerültek felhasználásra bizonyos értelemben kedvező tulajdonságaik miatt [10]. Rendkívül stabil, hőhatásoknak ellenálló, kiemelkedően jó elektromos szigetelő tulajdonságú vegyületek. Felhasználták hidraulikus berendezések közvetítő közegeként, elektrolit kondenzátorok és egyéb nagyfeszültségű berendezések (transzformátorok) szigetelő közegeként, vagy szigetelésjavító adalékként. Égetéssel nem semmisíthetők meg, mivel ez esetben klórozott dibenz-dioxinok, klórozott dibenz-furánok képződnek, amelyek néhány tagja ugyancsak toxikus hatású. A PCB-k felezési ideje a környezetben évtizedekben mérhető a körülményektől függően [11].

A PCB-k nagymértékben lipofil tulajdonságúak, így például állati szövetekben, halakban, az anyatejben, májban feldúsulnak. A mérgezett anyáktól született csecsemők nagy részénél fejlődési rendellenességek voltak megfigyelhetők. Egy 1968-ban Japánban bekövetkezett mérgezést követően kezdték behatóbban vizsgálni a PCB-k toxikus hatásait.

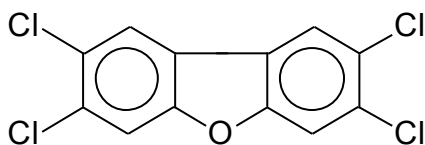
#### 9.2.4. Dioxinok

E vegyületcsoportba a poliklórozott dibenz-dioxinok (PCDD), és a poliklórozott dibenz-furánok (PCDF) tartoznak. Halogéntartalmú növényvédő szerek, PCB-k gyártásának melléktermékei, illetve halogéntartalmú hulladékok égetésénél keletkezhetnek, amennyiben az égetés hőmérséklete 1200 °C-nál alacsonyabb. Az így keletkező PCDD, illetve PCDF típusú vegyületek az aeroszolokban adszorbeált formában kerülhetnek ki a környezetbe. Tekintve, hogy a PCB-khez hasonlóan lipofil tulajdonságúak, feldúsulnak az állati szövetekben, tejben és így a tápláléklánc végén az emberi szervezetbe kerülnek. Toxicitásuk meghaladja a PCB-k mérgező hatását [12]. A természetben mint veszélyes szennyező anyagok mindig csoportosan, és néhány rendkívüli esettől eltekintve, szerencsére csak ritkán és nyomokban fordulnak elő.

Legismertebb képviselői:



2,3,7,8-tetrakloro-dibenz-p-dioxin (2,3,7,8-TCDD),



2,3,7,8-tetrakloro-dibenz-furán (2,3,7,8-TCDF).

A PCDD és PCDF típusú vegyületek klórszármazékai mellett ismeretesek a brómszármazékok is. Szerkezetükben, izomériájukban a PCB-khez hasonlóan igen nagy változatosságot mutatnak, mivel maximum nyolc halogént tartalmazhatnak. Legnagyobb toxicitással a fenti tetraklór származékok bírnak. A halogénezett dibenz-dioxinok és dibenz-furánok környezeti stabilitása nagy, metabolizmusuk igen lassú, ezáltal különös figyelmet érdemelnek a biológiai minták vizsgálatánál. Előfordulásuk szabálytalan módon kialakított hulladéktárolók, illetve hulladékégető berendezések közelében valószínűsíthető [13].

#### 9.2.5. Peszticidek

Ez az a vegyületcsoport, amely kizárólag mezőgazdasági felhasználásra készül. Felhasználási területük alapján három főbb csoportba sorolhatók:

1. rovarirtók (inszekticidek),
2. gombaölőszerek (fungicidek),
3. gyomirtók (herbicidek).

Az elmúlt ötven évben bekövetkezett nagymértékű terméshozam-növekedés egyebek mellett a peszticidek széleskörű alkalmazásának köszönhető. Sajnos, mint minden beavatkozás a természet rendjébe, áldozatokkal jár, ugyanis ezek a vegyületek kivétel nélkül komoly környezeti kockázatot jelentenek. Szennyezik a termőtalajt, a természetes vizeket és

a fogyasztásra kerülő élelmiszereket. A több százra tehető ismert peszticid közül több mint negyven tagjuk szerepel az Európai Unió vízszennyezőket tartalmazó listáján. A gondokat növeli, hogy metabolizmusuk során szintén képződhetnek mérgező vegyületek [3, 14].

Kémiai szerkezetüket tekintve megkülönböztetünk halogéntartalmú (főleg klór-), nitrogéntartalmú és foszfororganikus peszticideket. A legnagyobb tagszámú és igen változatos szerkezetű, tulajdonságú vegyületsoport, ezért az alkalmazott analitikai módszerek is igen sokrétűek. Az ismertebbek közül említést érdemel még az inszekticid hatású  $\gamma$ -hexaklór-ciklohexán (lindán). Az utóbbi évtizedben törekvések mutatkoznak a magasabb klórtartalmú peszticidek gyártásának és felhasználásának visszaszorítására, mivel nagymértékű toxicitásuk mellett viszonylag lassú a metabolizmusuk. Előtérbe kerülnek a foszfororganikus vegyületek, amelyek ugyancsak nagymértékben toxikusak, de gyorsabban degradálódnak [12]. A peszticidek azok a környezeti kockázatot jelentő vegyületek, amelyek felhasználásától a jövőben sem tekinthetünk el, de gyártásukat és különösen felhasználásukat ésszerű korlátok közé kell szorítani.

Az egyes hatóanyagok engedélyezéséről minden ország saját maga dönt, a nemzetközi szervezetek csak iránymutató tanulmányokkal segítik ezt a munkát, különböző országokban különböző szabályozás alatt állhat ugyanaz a vegyület.

A forgalmazott növényvédő szereken pontosan fel kell tüntetni a felhasználási területet, a szer adagolását, a kiszórás módját, időzítését, a kiszórást követő egészségügyi várakozási időt. Míg a szántóföldeken végzett növényvédelem általában jól képzett szakemberek vezetésével történik, a kiskerti alkalmazás számos veszélyt rejt magában, sajnálatos módon számos balesetet is okozva. Fontos, hogy a permetezést végző itt is tisztában legyen a legfontosabb szabályokkal. A szert a csomagoláson feltüntettek szerint kell adagolni, bekeverni. A kiszórást szélcsendes időben, kézi permetezés, szórás esetén védőfelszerelésben (maszk, védőszemüveg) és védőruházatban (kesztyű, overall) kell végezni. A növényvédő szerrel való bármilyen közvetlen érintkezés kerülendő. Az esetleges maradékot tárolás esetén felirattal kell ellátni a balesetek elkerülése érdekében. Mind a megmaradt mennyiség, mind a csomagolóanyag veszélyes hulladéknak számít. A növényvédő szerek biztonságos alkalmazásának másik feltétele az egészségügyi várakozási idő pontos betartása.

A megtermelt élelmiszernövények betakarítás után élelmiszeripari feldolgozásra vagy közvetlen fogyasztásra kerülnek. Az egyes országok rendeletekben rögzítik, hogy mekkora lehet ekkor a növény termesztése során alkalmazott növényvédő szerek maradék koncentrációja. Mind az élelmiszer feldolgozóipar, mind a közvetlen fogyasztású termékek forgalmazójának érdeke, hogy még feldolgozás, illetve forgalomba hozatal előtt bebizonyosodjon, hogy az adott termék nem tartalmaz az előírt egészségügyi határértéknél nagyobb mennyiségű szermaradványt. Ezt megfelelő gyakorisággal végzett, széles hatóanyag spektrumot lefedő monitorozással lehet elérni.



A növényvédőszer-maradékok szabályozása világszerte közös nemzetközi alapokon nyugszik. A magyar növényvédelmi szabályozás több mint száz éves múltra nyúlik vissza, amire joggal lehetünk büszkék. Konkrétan a növényvédő szereket először a Földművelési Minisztérium 1957-es rendelete nevezi meg. 2002-ben alkották meg a rendszerváltás utáni, már az Európai Unió irányelveit figyelembe vevő növényi eredetű termékekre vonatkozó 5/2002-es rendeletet, melynek legutóbbi módosítását a 21/2006 (V.15.) EüM-FVM együttes rendelet tartalmazza. Az állati eredetű termékekben található szermaradékokra a 34/2004. (IV. 26.) ESzCsM rendelet vonatkozik.

A rendeletek hatóanyag-termény párokra határoznak meg határértékeket, felsorolják, hogy egy adott hatóanyag milyen koncentrációban lehet jelen egy adott terményben. A rendelet a Magyarországon engedélyezett hatóanyagokat tárgyalja, mivel tiltott szerekre nincs tolerálható koncentráció. Amennyiben mégis kimutatható valamelyik tiltott szer egy adott terményből, az azonnal kifogásolandó, forgalomba nem hozható. (Az engedélyezett, korlátozott, illetve tiltott szerek listája megtalálható az Országos Növény- és Talajvédelmi Szolgálat honlapján: [www.ontsz.hu](http://www.ontsz.hu).) A magyar rendelet naprakészen követi az Európai Unió szabályozást.

### 9.3. Globális felmelegedés

A légkörnek az utóbbi évtizedekben észlelt néhány tized fokos felmelegedése a jelentősen megnövekedett szén-dioxid-kibocsátás rovására írható. A globális felmelegedésben még a metán és a dinitrogén-oxid is szerepet játszik, amelyek jelentős része természetes úton jut a légkörbe, de mennyiségük elenyésző a szén-dioxidhoz képest (9.5.táblázat). Ezen gázok gátolják a földfelszín hőkisugárzását, mivel az infravörös tartományban magas az abszorbancia értékük. Az elmúlt 150 évben  $\sim 1$  °C-kal emelkedett az átlaghőmérséklet.

**Albedo:** a földfelszínre jutó napenergia visszareflektált hányada. Az esőerdők irtása csökkenti a szén-dioxid „nyelő” mennyiségét, mely tovább csökkenti az albedo értékét (pozitív visszacsatolás!).

Az érzékeny globális egyensúlyra jellemző, hogy a légkörbe kerülő és a globális felmelegedésért elsősorban felelős szén-dioxidnak kb. csak kb. 7%-a antropogén eredetű (9.6.táblázat), a többi természetes úton, biológiai folyamatok során keletkezik [15].

	$CO_2$	$CH_4$	$N_2O$
<b>Koncentráció az ipari forradalom előtt (becsült érték, ppm)</b>	280	0,8	0,28
<b>Jelenlegi koncentráció (ppm)</b>	$\sim 500$	1,8	0,35
<b>Évi növekedés (%)</b>	0,5	0,9	0,25
<b>Tartózkodási idő (becsült érték, év)</b>	$\sim 5$	$\sim 10$	$\approx 150$

9.5. táblázat: Felmelegedést okozó gázok néhány adata

Különböző becslések, illetve előrejelzések alapján 2100-ra kb. 50 cm-rel emelkedik a tengerszint, valamint a növényi vegetáció 100–150 km-rel a sarkok felé tolódik.

<b>Gáz</b>	<b>Antropogén (Mt/év)</b>	<b>Biológiai (Mt/év)</b>
CO <sub>2</sub>	7000	100 000
CO	505	75
CH <sub>4</sub>	270	120
SO <sub>2</sub>	70	35
NO <sub>x</sub>	20	10
NH <sub>3</sub>	20	20
VOC	75	750
Freonok	1	0
C aeroszol	16	n.a.

9.6. táblázat: Levegőszennyező gázok globális adatai

A hazai adatok 1980 és 2000 között (9.7.táblázat) pozitív irányú változást mutatnak, amelyek részben a technológiai fejlődés, részben a nagy szennyezést okozó iparágak (kohászat, alumínium gyártás, széntüzelésű hőerőművek, stb.) visszaszorulásának is köszönhető. Meg kell azonban jegyezni, hogy a 2000 évi adatok mindezek ellenére riasztóak, további erőfeszítések szükségesek [15].

<b>Anyag</b>	<b>1980</b>	<b>1991</b>	<b>2000</b>
SO <sub>2</sub>	1633	892	390
NO <sub>x</sub>	272	187	n.a.
CO	519	915	200
CO <sub>2</sub>	90 000	71 200	45 000
Freonok	6,1	2,55	n.a.
VOC	205	143	n.a.

9.7. táblázat: Levegőszennyező anyagok kibocsátása hazánkban (x 1000 tonna)

#### 9.4. Savas esők

A levegőben a szén-dioxidon kívül jóval kisebb mennyiségben egyéb szennyező gázok (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> stb.) is előfordulnak. Eredetüket tekintve jelentős részük „természetes” úton keletkezik, de nem elhanyagolható mennyiségben antropogén folyamatok eredményeként jutnak a légkörbe. A savas karakterű oxidok (CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>) okozzák az ún. „savas” esőket. Meg kell azonban jegyezni, hogy a szén-dioxid ebből a szempontból kevésbé játszik szerepet, mivel a vízzel reagálva az igen gyenge, bomlékony szénsav keletkezik. Irodalmi adatok alapján a SO<sub>2</sub>≈60%-a, az NO<sub>x</sub>≈30%-a antropogén eredetű.

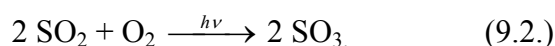
A főleg természetes úton keletkező ammónia bázikus karaktere miatt némileg csökkenti a savas karakterű oxidok mennyiségét [17].

Az ún. savas esők kialakulásáért elsősorban a kén-dioxid-kibocsátás felelős. A kibocsátott kén-dioxid átlagos meteorológiai viszonyok között a kibocsátás helyétől maximum 30–40 km távolságra juthat el. Ez két okra vezethető vissza:

- nedves, esős időjárás esetén oldódik a levegő páratartalmában, vagy az esővízben

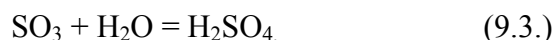


- napsütéses, tiszta levegőben az alábbi fotokémiai reakció játszódik le:



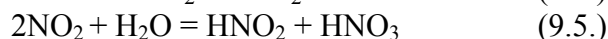
A képződő  $\text{SO}_3$  szilárd kristályos állapotú, amely a levegőben lévő aeroszolokon adszorbeálódik, és ezáltal igen nagy távolságokra eljuthat.

A kén-trioxid vízzel reagálva kénsav keletkezik:



Tekintettel arra, hogy a víz nem rendelkezik pufferkapacitással, a legkisebb mennyiségű kén-dioxid is jelentős **pH**-változást okoz.

A légkörben található nitrogén tartalmú vegyületek közül a nitrogén-monoxid és a nitrogén-dioxid járul hozzá a savas esők kialakulásához.



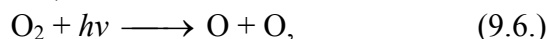
Meg kell jegyezni, hogy a fenti reakcióegyenletek az igen sokrétű részfolyamatok végterményét tükröző sztöchiometriai egyenletek, sőt a képződő savak is továbbreagálnak a vizekben, talajokban található ionokkal.

### 9.5. Az „ózonlyuk” problémakör

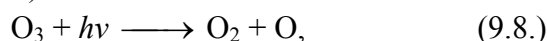
A légköri oxigén megjelenése tette lehetővé a földi élet kijutását a szárazföldre az őstengerekből. A napsugárzás ún. „kemény” UV összetevője hatására képződik a sztratoszféra alsó rétegeiben az oxigén allotróp módosulata, az ózon, amely megakadályozza ezen UV sugárzás átjutását a felszínre. A napsugárzás 180–320 nm hullámhossz tartományba eső UV összetevője hasítja a DNS molekulát, ezért kiemelten fontos az ózonréteg fennmaradása, illetve tulajdonságainak, változásainak beható ismerete. A 15–25 km magasságban képződő ózont képzeletben összenyomva légköri nyomáson kb. 3 mm vastag réteget képezne.

A napsugárzás hatására ózon keletkezik és elbomlik. Ha ebbe a körfolyamatba olyan idegen anyag kerül, amely ezt a folyamatot megszakítja, akkor az ózonréteg maradandóan károsodik.

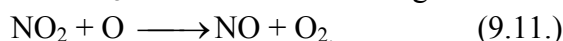
Az ózon képződése (180–210 nm):



Az ózon bomlása (200–320 nm):

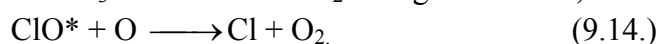
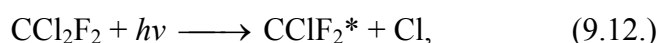


Az ózonréteg károsításáért egyebek mellett a nitrogén-monoxid is felelős. A sztratoszféra alsó rétegeiben a nitrogén-monoxid kibocsátásáért a 9–12 ezer méter magasságban közlekedő sugárhajtású repülőgépek felelősek.



Tehát a képződő  $\text{NO}_2$  az ózon képződése szempontjából fontos oxigénatomokat vonja ki a körfolyamatból.

Az ózonréteg károsításában ugyancsak fontos „szerepet” játszanak az ún. **CFC**-k (klór-fluor karbon) vegyületek.



A CFC típusú vegyületek ( $\approx 300$ ) gyártását és alkalmazását jelentős mértékben korlátozták, illetve részben betiltották. Bizonyos szempontokból előnyös tulajdonságaik miatt azonban klímaberendezésekben, hőszivattyúkban, valamint tűzoltó készülékekben jelenleg is használatban vannak.

## 9.6. Függelékek

### 9.6.1. Bibliográfia

- Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, Washington DC 17th Edition, (1989) ISBN 0-87553-161-X
- EPA's Sampling and Analysis Methods Ed. by Lawrence H. Keith  
Lewis Publishers, Inc., (1992) ISBN 0-87371-443-4
- Water Analysis (Organic Micropollutants) Ed. by Pat Sandra, Hewlett-Packard No. 5962-6216E, (1994)
- Federal Register 44, 233, (1979), Part III
- Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 57 (5), 729-36, (1996)
- Linde AG, (1996) Specialty Gases Product Catalog
- Fishbein L., (1979) Potential Industrial Carcinogens and Mutagens, Elsevier Publ. Co.
- van Duven, B. L., Katz, C., Goldschmidt, B. M., (1993) J. Nat. Cancer Inst. 51(2), 703-5
- Heo, G. S., Suh, J. K., (1990) „New On-Line Concentrator for LC-GC: Analysis of PAHs with LC-GC” J. of High Res. Chro. 13, 748-53
- Hutzinger, D., Safe, S., Zitko, V., (1974) The Chemistry of PCBs, CRC Press Cleveland, Ohio (USA)
- Erickson, M.D., (1986) Analytical Chemistry of PCBs, Butterworth Publishers, Stoneham, MA (USA)
- Fairchild, E. J., (1977) Registry of Toxic Effects of Chemical Substances, US DHEW, Publ. No. 78-104, NIOSH, Cincinnati, OH
- Tanabe, S., (1988) „PCB Problems in the Future Foresight from Current Knowledge” Environ. Pollut. 50(1-2), 5-28
- Analytical Reference Standards and Supplemental Data EPA - 600/4-84-082, (1984)
- Mészáros Ernő (1997) Levegőkémia Veszprémi Egyetemi Kiadó
- Papp S., R Kümmel (1992) Környezeti Kémia Tankönyvkiadó
- Horváth László (1986) Savas Eső Gondolat Zsebkönyvek

### 9.6.2. Fogalomtár

**Albedo:** a földfelszínre jutó napenergia visszareflektált hányada.

**Antropogén hatás:** a környezet állapotát befolyásoló emberi tevékenység

**Bioszféra:** litoszféra – talaj  
hidroszféra – felszíni, felszí alatti vizek  
atmoszféra – levegő

**BTEX:** illékony aromás szénhidrogén

**CFC:** klór-fluor szénhidrogén

**Környezeti katasztrófa:** olyan hatás, amely a természeti környezet állapotában maradandó változást okoz

**PAH:** poliaromás szénhidrogén

**PCB:** poliklórozott bifenil

**Peszticid:** növényvédőszer, inszekticid – rovarölő szer

fungicid – gombaölő szer  
herbicid – gyomirtó szer

**pH:** vizes oldatok kémhatását jelző érték; 0 – 7 savas  
7 semleges  
7 – 14 lúgos

**ppb:** billiomod ( $10^{-9}$ ) rész „

**ppm:** milliomod ( $10^{-6}$ ) rész tömeg/tömeg, vagy térfogat/térfogat egységben kifejezve

**ppt:** trilliomod ( $10^{-12}$ ) rész „

**VOC:** (volatile organic carbon) illékony szénhidrogén

## 10. A SZENNYVIZEK KEZELÉSE (BARKÁCS KATALIN)

### 10.1. A szennyvizek keletkezése és környezeti hatásai

A vizek előfordulási formái közé természetes és mesterséges víztípusok egyaránt tartoznak, a főbb csoportokat a felszíni és felszín alatti vizek, a csapadékvíz, a szennyvizek és újrahasznosított vizek alkotják. A szennyvizek sajátos csoportot alkotnak a víztípusokon belül, a hatályos hulladéktörvény meghatározása szerint a szennyvizeket a folyékony hulladékokhoz soroljuk, s minden olyan vizet, amely már valamilyen módon felhasználásra került, szennyvíznek tekintünk.

A szennyvizekben található komponensektől függően a szennyezés

- különféle halmazállapotú oldott vagy külön fázist alkotó,
- továbbá szerves és szervetlen anyagokból állhat.

Külön említést érdemel, hogy a szennyezés lehet energiával (hőszennyezés) valamint élő szervezetek (fertőzésveszélyt jelentő kórokozók) jelenlétével összefüggő is. A hőszennyezésnek kiemelt szerepe van, a vegyületek oldhatósága, a kémiai-, biokémiai folyamatok sebességének hőfok függése miatt ugyanis a vízi életfeltételeket jelentősen befolyásolja.

A szennyvizek a *kibocsátó forrástól függően*

- *kommunális,*
- *ipari*
- és *mezőgazdasági* eredetűek lehetnek.

A kommunális eredetű szennyvíz másképp fogalmazva települési szennyvizet jelent, a háztartási kibocsátások mellett a települési szociális hálózat; az intézmények, szolgáltatók szennyvizeit egyaránt tartalmazza, ipari szennyvíz azonban csak csekély hányadát képezi.

Az ipar hazánkban – tömegben kifejezve – a szennyezőanyagok közel felét bocsátja ki, a másik feléért a mezőgazdaságot és a háztartásokat együttesen terheli a felelősség. Bár egy-egy iparág szennyvizeinek szerves szennyezettsége igen nagy, mégis országosan az összes szerves anyag-kibocsátás egyharmada a kommunális szennyvízkibocsátásokból származik. Az *ipari szennyvizek* iparáganként, üzemenként jellegzetesen eltérő összetételűek. *Szénhidrogén* tartalmúak, amennyiben olajfinomítóknak, vegyipari alapanyagot gyártó üzemekben keletkeznek, *nehézfém* tartalmúak a fémfeldolgozó-, galvanizáló-, elektrolizáló üzemek, *zsír és fehérje* tartalmúak a vágóhidak, tejipari- és húsfeldolgozó üzemek szennyvizei. Szintén szerves szennyezőkben dúsak, így *színezékeket* tartalmaznak a festégyárak, textilfestő üzemek, *szénhidrátokat* a cellulózgyárak, cukorgyárak szennyvizei. Ezzel szemben szervetlen szennyezettséggel, nagy *sótartalommal* rendelkeznek a *hőerőművek* szennyvizei és a *bányavizek* is. A papírgyárak, a fémfeldolgozó üzemek szennyvizeinek, valamint a bányavizeknek jelentős az előbbieken említett *lebegőanyag-tartalma* is.

A kibocsátás módja szerint a szennyvizek *pontszerű kibocsátások* (ezalatt azt értjük, hogy térben azonosítható helyen kerülnek a szennyvizek elvezetésre), és bár *időben*

*folyamatos* kibocsátásoknak tekinthetők, térfogatuk és szennyezőanyag-tartalmuk időben rendszerint igen változó.

A környezetvédelem terén minden esetben a leghatékonyabb lépés nem a szennyezett víz kezelése, hanem a szennyezés megelőzése. A megelőzés lehetősége e téren azzal kezdődik, hogy lehetőleg kisebb szennyezettségű és/vagy kisebb mennyiségű szennyvíz kibocsátására kell törekedni. Az iparban ez könnyebben megoldható, a csökkentésre lehetőséget nyújt pl. a nyers-, segédanyagok kiváltása, a meglévő technológia megváltoztatása, víztakarékos eljárás alkalmazása, a csatornába vezetést megelőző szennyvízkezelés, a keletkezett szennyvíz újrahasznosítása és a szennyező anyagok visszanyerése.

Mielőtt a szennyvizek a környezetbe kerülnek (tekintve, hogy a környezeti elemeket – talaj, természetes vizek – öntisztító kapacitásukat meghaladó mértékben terhelhetik) előzetesen tisztítani kell. A kommunális szennyvizek is kezelés nélkül – a bennük jelenlevő mikroorganizmusok miatt – már eleve közvetlen fertőzési veszélyt jelentenek a környezetre, másrészt pl. szerves anyag-tartalmuk lebomlása során sok oxigént igényelnek, ami a befogadó víz oldott oxigén-készletének jelentős csökkenését eredményezi.

A szennyezettséget, illetve a **vízminőséget** minden esetben több paraméter együttese határozza meg. A szennyezettség szempontjából meghatározó az, hogy a befogadó közeg összetételének változása milyen mértékű (vagyis a rendszeren belül valamely természetes alkotóelem koncentrációja milyen mértékben változik meg – nő, vagy csökken), illetve a rendszerbe természetes összetevőitől alapvetően eltérő minőségű szennyező kerül-e be. A szennyvizek minőségének jellemzésekor tekintetbe kell vennünk a kibocsátó forrást (víz eredete) és azt is, hogy a szennyvíz hová kerül, hová vezetik el (a befogadó lehet csatorna, élővíz, talaj). Amennyiben pl. élővíz a befogadó, minden esetben az adott vízi ökoszisztéma határozza meg, hogy a szennyvíz milyen minőségi feltételek mellett kerülhet bele. Ennek megfelelően az élővizekbe vezetett szennyvizek esetén területi kategóriáktól függően írnak elő komponensenként határértékeket.

A vízjogi szabályozások szerint napjainkban a „szennyező fizet” elv érvényesül, vízminőség-védelmi bírságok szabhatók ki: „A vizeket fertőző, vagy károsan szennyező üzemeket szennyvízbírság, a szennyvízelvezető- és tisztító közműveket ártalmas szennyező anyaggal károsító, s ezzel a vizek tisztaságát veszélyeztető üzemeket csatornabírság fizetésére kell kötelezni.” A csatornába vezetett szennyvizek minőségének is meg kell felelniük tehát a csatornába engedhetőségre előírt határértékeknek. Emellett a környezetterhelési díjtételek egyúttal technológiai határértékeket is előírnak, ami egy-egy kibocsátóra vonatkozóan komponensenként éves szinten kiengedhető mennyiséget határoz meg, és amit szintén be kell tartania a szennyvízkibocsátóknak.

Nemcsak a szennyvízkibocsátásra vonatkozóan létezik határértékrendszer (komponensenként megengedett koncentrációértékek, emissziós határértékek), hanem külön szabályozás alá esik a befogadó vízközegek minőségének, szennyezettségének megítélése is. Ez utóbbiak az *imissziós* határértékek, ezekhez viszonyítva jellemzik az adott helyen mért paraméterértékek alapján egy adott víztest minőségét. Megjegyezzük, hogy a szennyvíz kibocsátását követően egy-egy komponenst nemcsak tovább szállít a víz, miközben a komponens koncentrációja csökken a hígulás következtében, hanem a komponensek át is alakulhatnak (a terjedést és átalakulást együttesen nevezzük *transzmisszió*nak).

A szennyvizekben előforduló, a vizeket szennyező anyagok sokfélék. A vízben való megjelenésük szerint az eredetileg szobahőmérséklet közelében gáz-, illetve folyékony- és szilárd halmazállapotú anyagok a vízben nem elegyedő fázisként és/vagy oldott anyagként egyaránt jelen lehetnek. A lebegő szilárd (szuszpendált) anyagok részecske méretük és összetételük szerint lehetnek könnyen ülepedő, valamint nehezen elválasztható, stabil kolloid részecskék. A folyadék halmazállapotú anyagok, amennyiben vízben nem oldódóak a vízben eloszolva emulziót, vagy elkülönülő folyadékfázist alkothatnak. A gáz halmazállapotú vegyületek is oldódhatnak fizikailag és kémiaiilag is a vízben, vagy különálló fázist képezhetnek.

A szuszpendált, azaz a vízben külön fázisként megjelenő szilárd anyagok, szerves (élő és élettelen) és szervesetlen anyagokból álló kis szemcseméretű anyagok (pl. folyók partvonalára mentén lerakódó iszap) hatása a vízminőség alakulására igen sokrétű. Ezen zavarosságot okozó anyagok a vízközegben diszperziót létrehozva befolyásolják a vízközeg fényáteresztő képességét, ezáltal a természetes egyensúlyi folyamatokat. Eleve lehet a szilárd részecskéknél veszélyes tulajdonságú összetevőjük, illetve nagy fajlagos felületük révén képesek az akkumulációra, azaz jelentős mértékben koncentrálnak a vízben oldott szennyező komponenseket, lehetnek továbbá oxigénfogyasztók, stb. is.

Az olajok és úszó anyagok kedvezőtlen esztétikai hatásuk mellett gátolják az víz oxigénfelvételét, és a vízbe-oldódásuk, lebomlásuk során káros tulajdonságú metabolitok (bomlástermékek) is keletkezhetnek. Sokféle toxikus és karcinogén vegyület, ami biológiailag nem, vagy csak nehezen bontható (pl. szerves mikro-szennyezők) fordul elő a szennyvizekben. Az oldható szerves anyagok azok, amelyek lebomlásuk során az oldott oxigén mennyiségét nagymértékben csökkentik, emellett több köztük íz- és szagrontó hatású is.

A szennyezésként jelen levő oldott szerves anyagok káros hatása abban nyilvánul meg, hogy a vizek sótartalmát, **halobitási fokát** növelik, ezáltal a vízi életfeltételeket módosítják. Külön kedvezőtlen az, ha savak és lúgok, vagy növényi tápanyagnak minősülő nitrogén- és foszfor-vegyületek (makro-tápelemek) kerülnek ki a szennyvizekkel az élő vizekbe, amelyek a növényi túlburjánzást segítve elő növelik a befogadók **trofitásfokát**.

A szennyvizek minősítésekor alkalmazott paraméterek közül itt csak a szerves anyag-tartalmat jellemző összegparaméterek fogalmát és meghatározási elvét emeljük ki. Tekintettel arra, hogy a szennyvízben sokféle szerves vegyület van egyidejűleg jelen, a szerves anyag-tartalom meghatározása nem végezhető el úgy, hogy a vegyületeket egyenként minőségileg azonosítjuk és mennyiségüket megmérjük. Ezért a szerves anyagok együttes mennyiségének jellemzésére bevezették az ún. összegparaméterek, a KOI, BOI és TOC meghatározását.

A kémiai oxigénigény (KOI) mértékegysége: O<sub>2</sub> mg/L, az oxidálható anyagokra, standard körülmények közt az oxidálható szerves anyagokra fogyott oxidálószerrel egyenértékű oxigén mennyiségét jelenti. Meghatározása oxidimetriával, K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> vagy KMnO<sub>4</sub> oxidálószerrel történhet. Szennyvizek esetén a dikromátos KOI-t alkalmazzák, ekkor tömény kénsavas közegben 150 oC-on, 2 kétórás forralást követően a feleslegben maradt reagens visszamérésével állapítják meg a szerves anyagok oxidálószer-fogyasztását.

A **BOI<sub>5</sub>** (az ötnapos biokémiai oxigénigény) szabványos körülmények közt a szennyvizek szerves anyagának biológiai bontásához szükséges oxigénmennyiséget méri,



azaz a szennyvízben levő biológiailag bontható szerves anyagok oxigénigényét határozza meg.

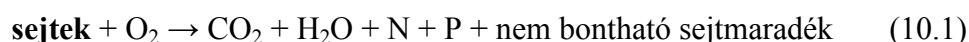
A **TOC** (összes szerves széntartalom) szintén a szennyvizek szerves anyag-tartalmát jellemző összegparaméter, az utóbbi időben terjedt el használata. A TOC a szennyvízben jelen levő szerves vegyületek oxigénigénye helyett azok széntartalmának meghatározásával jellemzi koncentrációjukat.

A szennyvizek környezeti hatásai tekintetében a minőség (összetétel) és mennyiség egyaránt fontos szerepet játszik. Ezért a kezelendő szennyvíz mennyiségével és szennyezettségével kapcsolatban is elterjedten alkalmazzuk az ún. **lakosegyenérték** (LE) fogalmát. Ez tehát egyrészt azt jelenti, hogy átlagosan egy fő naponta mennyi szennyvizet hoz létre. Ez adja a szennyvízkezelés kor a tisztítótelep napi egy főre vonatkozó átlagos **hidraulikus** (térfogati) **terhelését** is. Értéke hazai viszonyok közt jelenleg napi 150 liter fejenként, azaz: 150L/fő\*d (a nemzetközi jelölésrendszer szerint a d=day – napot jelent). A lakosegyenérték másik értelmezése szennyvizek esetén a keletkező szennyvíz szennyezőanyag-tartalmát veszi figyelembe. Eszerint az átlagos szociális feltételek között egy személy után naponta keletkezett szennyezőanyag mennyiségének biológiai tisztításához szükséges oxigénmennyiséggel (ez 20–70 g oxigén/nap intervallumon belül változó) fejezzük ki a lakosegyenértéket. A számszerű átlagérték ez esetben 1 LE = 60 g oxigén/d\* fő, ahol az oxigén a szennyvíz biokémiai oxigén-igényét jelenti, vagyis a kibocsátott szennyező anyagok biológiai lebontásának oxigén-igényét.

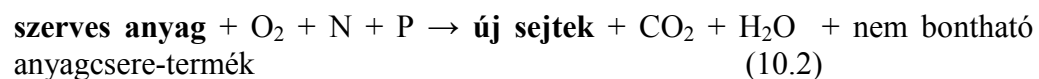
Megállapíthatjuk az előbbi oxigénfogyasztás adat ismeretében, hogy ha önmagában csak háztartási forrásból származó, átlagos minőségű és mennyiségű szennyező anyagot tartalmazó szennyvíz a természetes befogadóba kerül, akkor ezen vizek öntisztító kapacitását jelentősen terheli, lévén az **öntisztulás**ért felelős mikroorganizmusok a víz oxigénkészletét ezen szennyező anyagok lebontása során nagymértékben csökkentik.

Az élő vizekben az öntisztulásért felelős baktériumok a levegővel érintkező, oxigént tartalmazó (aerob) közegben saját légzésük és a tápanyagbontás során is oxigént fogyasztanak.

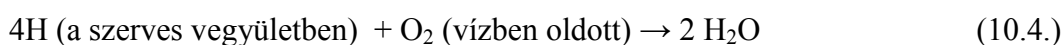
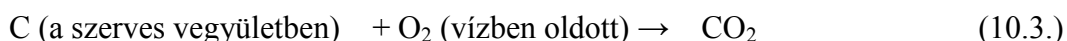
Endogén, azaz sejtlégzés esetén az oxigénfogyasztás a következőképp írható le:



Szubsztrát légzés, azaz a tápanyag lebontása esetén pedig a következő folyamat játszódik le:



Vegyünk példaként egy hétköznapi, jól bontható szerves anyagot szubsztrátként, olyan növényi olajat, amit a háztartások sütés-főzés során felhasználnak. Amennyiben ez a vízbe kerül, az olaj széntartalmából és hidrogén tartalmából a biológiai lebontás (szervetlen anyaggá alakítás, vagyis mineralizáció) során széndioxid és víz képződik.



A sztöchiometriai viszonyok ismeretében kiszámítható, hogy 3 mg/dm<sup>3</sup> szerves széntartalomra a mineralizáció során kerekén 9 mg oxigén fogy. Egyetlen csepp olaj bontása során tehát (ami kb. 0,03 ml térfogatot jelent!) kiszámítható, hogy mintegy 5 liter

víz oldott oxigén-tartalma is elfogyhat! A számításakor itt csak az olajszenyeződés lebontásának oxigénigényét vettük figyelembe, s nem tekintettük az élő sejtek tápdúsabb közegben történő szaporodásának fokozódását, s az ezzel kapcsolatos [endogén légzés](#) oxigénigényét.

## 10.2. Szennyvíztisztítás

A szennyvíztisztítás feladata – az előzőekben említettek alapján tehát – a szennyező anyagok olyan mértékű eltávolítása, hogy a vízben maradó szennyezéseket a befogadó öntisztító folyamatai lebontani képesek legyenek úgy, hogy a vízhasználati lehetőségek ne csökkenjenek, a vízminőség ne változzon. A természetes öntisztulás folyamata a vízi ökoszisztémáknak azt a tulajdonságát jelenti, hogy a víztestek a bennük zajló ökológiai folyamatok révén képesek a szennyezések elviselésére, csillapítására, hatásuk kiegyenlítésére. Az öntisztulás nem tulajdonítható pusztán biokémiai folyamatoknak, fizikai-kémiai (csapadékképződés, komplexképződés, semlegesítés, stb.), kolloidkémiai folyamatok (koaguláció, adszorpció) egyaránt szerepet játszanak benne. Az öntisztulási kapacitás véges egy-egy víztest estében, a túlzott terhelés képes teljesen tönkretenni, megszüntetni. Különösen igaz ez a kis vízhozamú vízfolyásokra, ahol a bekerülő szennyezés hatását nem mérsékeli megfelelő hígulás.

A különböző tisztítási módszerek, illetve azok kombinációi a kommunális szennyvizek kezelésekor olyan feltétellel jöhetnek szóba, hogy alkalmazkodni tudjanak a gyakran változó vízmennyiséghez és vízminőséghez, és ne legyenek érzékenyek egyes üzemeltetési paraméterek változására sem. Fontos szempont az is, hogy tekintettel a tisztítandó szennyvíz nagy mennyiségére, lehetőség szerint a választott tisztítási eljárások kis fajlagos költségigényűek legyenek. Emiatt egyértelmű, hogy a szennyvizek kezelése kémiai módszerek alkalmazásával gyakorta nem jöhet szóba, és elsősorban fizikai és biológiai módszerekkel lehet a tisztítás olcsó és széleskörű. A biológiai szennyvízkezelési módszerek fejlődése a múlt század elejétől indult meg, az ehhez kapcsolódó mikrobiológiai ismeretek meghatározóak napjaink gyakorlatában.

A biológiai szennyvíztisztításkor alapvetően megkülönböztetünk *természetes* és *mesterséges* módszereket. A természetes biológiai szennyvíztisztítási megoldásoknál a szerves anyag lebontása ökoszisztémák igénybevételével történik. Ilyen esetekben nem [műtárgy](#)akban és gépi berendezések segítségével megy végbe a folyamat, hanem természetes úton. Előnye az, hogy kis műszaki beavatkozást igényel, és nagyrészt természetes energiaforrások felhasználásával valósul meg. Általában azonban nagy felületeket, térfogatokat és hosszú kezelési időt igényelnek ezek a módszerek. A szennyvizek természetes tisztítása történhet talajba juttatással (pl. öntözéssel), vagy közvetlenül élővízbe vezetéssel is (ilyenek az aerob, anaerob, vagy fakultatív termőtavak). Természetes eljárás a növényekkel vagy gyökérszűrős mezőkkel (pl. nádas) történő szennyvíztisztítás is, valamint a szennyvizek erdő és mezőgazdasági hasznosítással egybekötött tisztítása és elhelyezése. Mindezen esetekben sem alkalmazható azonban a keletkező szennyvíz közvetlenül, a legtöbb esetben szükség van a szennyvizek megfelelő előkezelésére (előzetes mechanikai tisztítására). A természet-közeli eljárásokat, amelyek alkalmazása kisebb települések szennyvizeinek kezelésére terjedt el, csak részben tekinthetjük mesterségesnek, ilyenek pl. a növényeket alkalmazó és a hibrid (vegyes) rendszerű élőgépes technológiák.

A mesterséges tisztítási módszerek a természetes eljárásokhoz képest fajlagosan kevesebb hely- és időigényűek. A tisztítás műtárgyakban, gépi berendezések segítségével, energia felhasználásával megy végbe. Ez esetben – a kommunális rendszert tekintve – a lakóházakból a szennyvíz többé-kevésbé zárt szennyvízgyűjtőkbe, vagy megfelelő szennyvízgyűjtő csatornarendszerbe kerül. A közcsatornával gyűjtött lakossági szennyvizet általában a szennyvíztisztítóban történő kezelést követően a legközelebbi befogadóba (patakba, folyóba, tóba, stb.) bocsátják.

A háztartási szennyvizek tisztítása általában három fokozatban valósul meg. Először megtörténik a mechanikai tisztítás, melynek során a szennyvizek fizikailag leválasztható úszó és lebegő anyagait távolítják el rácsok, ülepitők segítségével. Célja a szennyvíz biológiai tisztításra történő előkészítése. A második fokozatban, vagyis a biológiai tisztítás során, a mechanikai úton el nem távolítható szerves anyagok lebontása következik be a szennyvízben található, illetve az e célra kitenyésztett mikroorganizmusok segítségével. A harmadik tisztítási fokozat során (kémiai kezelés) leggyakrabban az oldott ásványi anyagok eltávolítása és a fertőtlenítés történik.

### 10.2.1. A mechanikai tisztítási fokozat

A mechanikai, azaz a fizikai kezelés a szennyvíztisztítás első fokozata, primer tisztításnak is nevezzük. Célja a nem oldott halmazállapotú, víztől eltérő fajsúlyú, így a víz felületén úszó vagy a vízfázisban lebegő, illetve ülepedő-képes anyagok fizikai elválasztása. Ezek a fizikai műveletek egyúttal a technológia további részét tekintve a berendezések, többek között a szivattyúk védelmét is szolgálják. A mechanikai tisztító folyamat leggyakrabban durva szűrést, ülepitést és **flotálást** jelent. Ez utóbbi folyamat is fizikai fázisválasztás, csak ebben az esetben a gravitáció hatására nem ülepedés, hanem a víznél kisebb sűrűségű anyagok vízfelszínre való felúsztatása történik. Így választhatók el pl. a víztől és gyűjthetők a vízfelszínen, majd onnan lefölközhetők a zsírok, olajok.

A szűréshez használt műtárgyak a szennyvizek esetében rácsok, vagy más néven gerebek, ezek a szennyvízben úszó darabos anyagok kiszűrését szolgálják. A könnyen kiülepithető lebegőanyagok gravitációs eltávolítását pedig a homokfogók és ülepitő medencék valósítják meg.

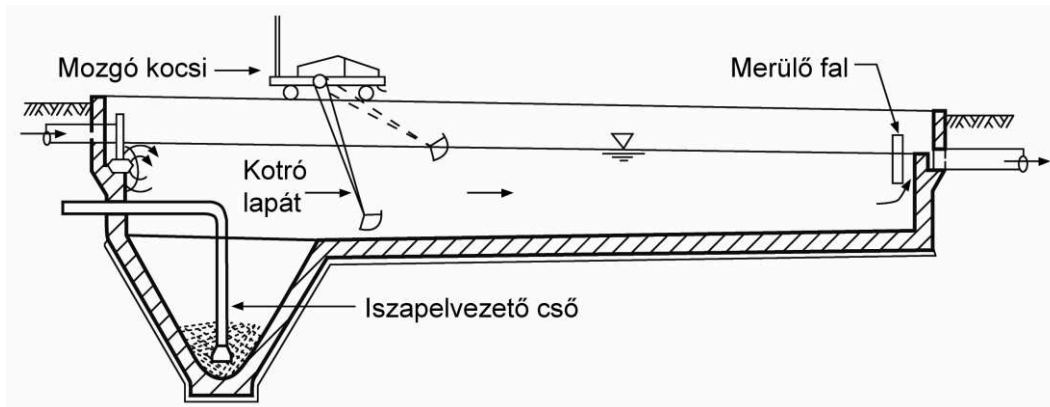
A *szennyvízrács* lehet durva- és finomrács. A durvarács az átlagosan 50 mm-t meghaladó, a finomrács pedig az 50 mm-nél kisebb méretű úszó vagy lebegő anyagokat tartja vissza. A rácsokon fennakadó szennyezők eltávolítása történhet gépi vagy kézi úton. A víz áramlási sebességét itt megfelelő értéken kell tartani ahhoz, hogy a homok ne a rácsoknál ülepedjen ki. A rácsról eltávolított, összegyűjtött anyagokat (rácsszemét) a szeméttelpekre vagy hulladékégetőkbe viszik, miután a bennük lévő vizet eltávolították.

A **homokfogó** a rácsokat követően a 0,1 mm-nél nagyobb szemcseátmérőjű, és a víznél nagyobb fajsúlyú homokszerű anyagok kiülepitésére, valamint a szennyvíznél könnyebb olajok és zsírok eltávolítására alkalmas berendezés (10.2.1. ábra). A homokfogóban az áramló vízből a homok és egyéb nagyobb szemcseméretű részecskék lerakódnak. A leülepedett szilárd fázist szivattyúval vagy kaparókanállal, kotrólapátokkal távolítják el a rendszerből. A szennyvíz átvezetését tekintve a homokfogók hosszanti átfolyásúak. Amennyiben a homokfogót levegőztetik, a levegőbefúvás következtében az olajok és zsírszerű anyagok a medence aljáról felfelé áramló finom levegőbuborékokkal együtt felúsznak a vízfelszínre, a homok leülepedik az aljzatra, és így könnyen eltávolíthatók a rendszerből. A zsírokat lefölközik, a homokot kikotorják. A szennyvíz lebegőanyag-tartalma

ennek a műveletnek a végére jelentősen lecsökken. Az így leválasztott iszapot – lévén alapvetően homokot tartalmazó – külön kezelik.

Az *ülepítő* feladata a homokfogót követően a szennyvízben visszamaradó finom szemcsék, úszó és lebegő anyagok eltávolítása. A leggyakrabban használt ülepítő medence típusok a hosszanti- és a sugárirányú átfolyásúak.

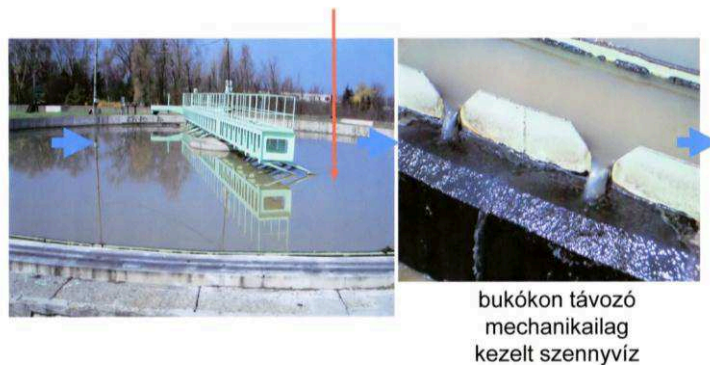
A *hosszanti átfolyású ülepítő* alakja téglalap, rendelkeznek továbbá energiatörő elemekkel, ezeknek a feladata az egyenletes vízsebesség biztosítása. A víznél nagyobb sűrűségű lebegő anyagok itt a homokfogókhöz képest biztosított hosszabb tartózkodási idő alatt a medence alján gyűlnek össze, eltávolításukat kotrószerkezettel oldják meg.



10.2.1. ábra: Homokfogó – hosszanti átfolyású ülepítő berendezés

A *sugárirányú átfolyású ülepítő* kialakítása henger formájú és az aljuk kissé kúpos, ilyen például a Dorr típusú ülepítő (10.2.2. ábra), amelynek átmérője leggyakrabban 30 méter, mélysége 4 méter is lehet. A medence közepére egy hengeres térbe vezetik a szennyvizet, itt energiatörő elemek lassítják a vízáramlást. Ezután jut csak az ülepítő térbe, ahol sugárirányban a medence szélei felé áramlik, miközben a lebegő anyagok a medence alján gyűlnek össze. A tisztított víz fogazott bukóéleken keresztül kerül ki az ülepítőből. A víz tetején lévő úszó iszapot a kotrószerkezet felső részére szerelt fölözőszerkezet távolítja el. A medence alján összegyűlt iszapot a lassan forgó kotrólemezek kaparják az iszapgyűjtőbe (zsomp).

### ELŐÜLEPÍTŐ sugárirányú átfolyású Dorr típusú medence



10.2.2. ábra: Dorr típusú ülepítő

A mechanikai fokozat ülepítő medencéit előülepítőknek nevezzük, jelezvén, hogy a tisztítási folyamat biológiai lépcsőjét megelőző ülepítést szolgálja. Az előülepítőben kiüledő iszap a primer iszap, ezt a biológiai lépcső utóülepítőjéből kikerülő főlös, más néven szekunder iszappal rendszerint együtt kezelik a továbbiakban.

### 10.2.2. A biológiai tisztítási fokozat

A második (szekunder) fokozat a kommunális szennyvíz kezelésekor aerob biológiai tisztítást fed. A mechanikai fokozattal, az első lépcsővel együtt ez alkotja a hagyományos kétfokozatú, azaz kétlépcsős szennyvízkezelő eljárást.

A biológiai szennyvíztisztítási eljárásokban a mikroorganizmusok irányított tevékenységét (**fermentáció**) hasznosítják, amelynek „nyersanyaga” (**szubsztrát** = tápanyag a mikroorganizmusok számára) a szennyvíz finom lebegő, kolloid, és oldott szerves anyaga. A reakciótermékek részben szilárdak (baktériumszaporulat), kiülepíthetők; részben pedig gázalakúak (pl. CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>), amelyek a levegőztetés során távoznak a szennyvízből. A reakciótermékek egy része oldatban marad (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), tovább nem bomlik, stabilizálódik. A biológiai szennyvíztisztításhoz reaktorokat (fermentorokat) használnak, ezekben játszódnak le a biokémiai folyamatok.

A biológiai tisztítás során a szennyvizekben jelen levő anyagok biológiai bonthatósága a meghatározó. Biológiai bonthatóságnak (biodegradálhatóságnak) nevezzük a vegyületeknek, elsősorban a szerves anyagoknak azt a tulajdonságát, hogy azokat a baktériumok (**aerob/anaerob folyamat** útján) anyagcseréjükhez fel tudják használni, miközben a folyamat részben vagy egészben halmazállapot változással (gázképződés) és összetétel-változással (mineralizálódás – ásványosodás) jár. A mikrobiológiai átalakítási folyamatokat a mikroorganizmusok bonyolítják le, miközben ezek a szervezetek táplálkoznak és szaporodnak, a szennyező komponenseket fogyasztják táplálékként, illetve átalakítják azokat. A sejttömeget ezután fáziszétválasztási művelettel lehet elkülöníteni a tisztított vízfázistól.

A mikrobiológiai folyamatokat befolyásoló legfontosabb tényezők:

- az eltávolítandó komponens kémiai szerkezete, pl. a szénhidrogének közül főként a nyílt láncú szénhidrogéneket bontják a mikrobák,
- a komponens biológiai bonthatósága (biológiai hozzáférhetősége); ha pl. a molekula nem tehető vízzoldhatóvá, akkor nem bontható le,
- elektron-akceptor jelenléte könnyíti a folyamatokat,
- a szennyező komponens koncentrációja is meghatározó – **EC** (effektív/hatásos koncentráció) – hatás összefüggés,
- nedvességtartalom, pl. ha egy tömény szénhidrogén elegyből hiányzik a víz, akkor nem tudnak elszaporodni a mikroorganizmusok, nem válik bonthatóvá,
- tápanyagok (N, P, K, nyomelemek) koncentrációja, ha nincsenek megfelelő mennyiségben, akkor szükség van a tápanyagpótlásra (műtrágyázás alkalmazása),
- pH, a legtöbb élő szervezet a semleges pH-tartományban működik optimálisan. A savtermelő baktériumok a pH=3–4-et is elviselik. Ha a rendszernek nincs pufferkapacitása, akkor ez legtöbbször gondot okozhat a folyamat lejátszódásakor,
- aerob, illetve anaerob körülmények (oxigénellátottság),
- hőmérséklet: **mezofil** (35–45°C) illetve **termofil** viszonyok; a termofil baktériumoknak a nagyobb hőmérséklet (55–60°C) a kedvező.

Lényeges a biokémiai folyamatok során a homogenitás biztosítása; a kezelendő anyag és a kezelésre alkalmazott anyagok/sejtek minél tökéletesebb eloszlása. A lebontást befolyásolja a jelenlévő aktív szervezetek mennyisége, a metabolizmus (anyagcsere) sebessége, a műtárgybéli tartózkodási idő, a szervesanyag-terhelés (időegység alatt bevezetett szerves anyag mennyisége a műtárgy egységnyi térfogatára vonatkoztatva), az aktív szervezetek számára szükséges körülmények és a mikro- és makro-tápanyagok jelenléte (pH, hőmérséklet, N és P vegyületek). Átlagosan kb. 100 kg BOI-t jelentő szerves anyag esetében az optimális lebontáshoz 5 kg N-t és 1 kg P-t tartalmazó, a baktériumok számára felvehető formában jelen levő vegyületre van szükség. A mikroorganizmusok szaporodása tápanyag felesleg mellett exponenciális jellegű, lassuló szaporodás tapasztalható azonban tápanyag korlát mellett, valamint tápanyag hiány esetében sejtpusztulás, autóoxidáció, a sejtek anyagának felhasználása következik be.

A mikrobiológiai folyamatok oxigénellátottsága szempontjából ha a

- szerves anyagok átalakítása oxigén jelenlétében, vagyis aerob körülmények között zajlik, az oxidációs folyamat során  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , (kis mennyiségben  $\text{NH}_3$ ) képződik, és a szerves vegyületek szervetlenné átalakítása, **mineralizálás** játszódik le,
- szerves anyagok átalakítása anaerob körülmények között megy végbe, akkor biogáz ( $\text{CH}_4$ , kisebb hányad  $\text{CO}_2$ ),  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  keletkezik. A képződött biogáz hasznos anyag, amelynek energiája ellátja a termelőgazdaságot. (A biogáz trágyából, hígtrágyából vagy szennyvíziszapból is előállítható.)

*Az aerob oxidáció*

- sebessége nagyobb, mint az anaerob folyamaté, alkalmazása ezért kisebb szerves anyag koncentrációjú szennyvizek esetén gyakoribb,
- a tisztítást a vízben már eleve jelenlevő vagy mesterségesen nagy tömegben kitenyésztett baktériumok végzik.

Az aerob oxidáció folyamata tehát tömören így jellemezhető:

szerves anyag + baktérium + oxigén  $\rightarrow$  a baktérium táplálkozik, szerves anyagot bont, valamint szaporodik és új sejtek jönnek létre. A szubsztrát lehet ammóniumion is, ez esetben az aerob oxidáció végterméke megfelelő baktériumok jelenlétében a nitrátió (10.2.3. ábra).

*Az anaerob lebontás*

nagy szennyezettségű vizek kezelésére (rothasztás), illetve pl. a nitrátok nitrogéngázzá történő átalakítására (10.2.3. ábra) terjedt el.

Az anaerob lebontás több részfolyamatból tevődik össze, ezek:

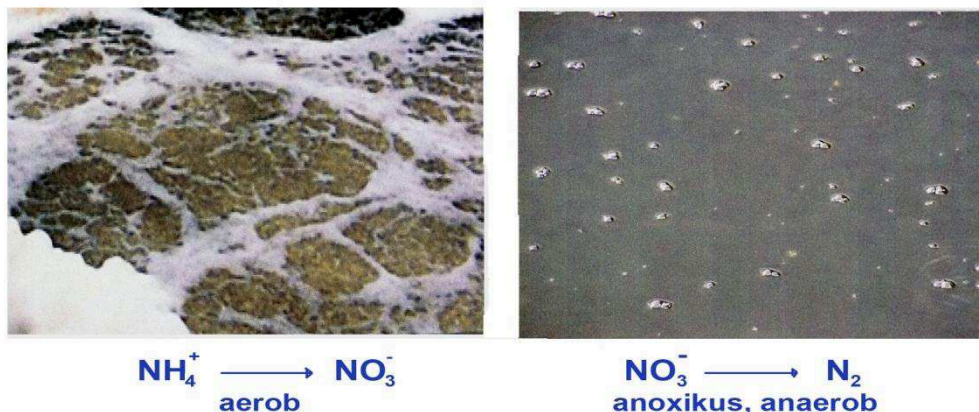
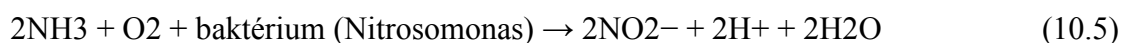
1. szakasz: uralják a savtermelő baktériumok.

Szerves anyag + savtermelő baktériumok  $\rightarrow$  a baktériumok a szerves anyagot alkoholig, karbonsavig oxidálják (közben a pH csökken) valamint szaporodnak, s új sejtek jönnek létre. (35–55 °C).

2. szakasz: a metántermelő baktériumok tovább bontják anaerob körülmények között az előzőleg képződött termékeket, miközben biogáz (metán, széndioxid) képződik, ami tartalmaz még kén-hidrogént, ammóniát és vízgőzt. A sejtek ez esetben is szaporodnak.

A kommunális szennyvíz szerves anyaga szénhidrátokból, fehérjékből, zsírokból, lipidekből álló elegy, ezek lebontása zajlik a biológiai folyamatok során. 5 nap alatt a házi szennyvíz összetevőinek 65%-a oxidálódik, bonyolult összetételű vegyületek esetén

azonban ennél kevesebb, kb. 40%. Az aerob szennyvíztisztítás során továbbá az ammónia átalakul nitrátiónná, ha a **nitrifikáció** számára kedvezőek a feltételek (pl. pH, oxigéntartalom, hőmérséklet, tápelem-arányok).



10.2.3. ábra: Nitrifikációs-denitrifikációs folyamatok

A mikroorganizmusok *szaporodási formája* alapján is jellemezhetjük a tisztítási folyamatokat. Eszerint megkülönböztetünk **eleveniszapot-** és **biofilmet** alkalmazó rendszereket. Az eleveniszappal történő tisztításkor a mikroorganizmusok a szennyvízben homogéne eloszlata, szuszpendált formában, ún. iszappelyhekben fordulnak elő. A biofilmes rendszerekben a mikroorganizmusok valamilyen szilárd hordozó felülethez tapadva, rögzített formában találhatók, így végzik el a szerves anyag lebontását.

Az *eleveniszapos szennyvíztisztítás* a világ jelenleg üzemelő egyik legnagyobb biotechnológiai iparága. Az eleveniszap olyan vegyes biológiai kultúra, mely képes megbirkózni a szennyvízzel érkező különböző kémiai összetételű, illetőleg molekula-, vagy részecskeméretű szerves anyagfélések hihetetlenül széles skálájával. A tisztítási folyamatért az iszappelyhek formájában lebegésben-, életben tartott biomassza felelős, ez végzi a szennyező anyagok eltávolítását. Az eleveniszapban a mikroorganizmusok egymáshoz tapadt formában, apró pelyhekben élnek és szaporodnak, e pelyhek mérete 30–70 mikrométer körüli. Ezek a pelyhek a keverés nyíró hatására ciklikusan kisebb egységekre aprózódnak, majd újra nagyobb egységekké állnak össze. A rendszerben a folyamatos átkeveredés és a diffúzió szállítja a tápanyagokat (szerves anyagok, oxigén, tápelemek) a sejtek membránjához. Így ciklikusan bizonyos koncentráció gradiens alakul ki az eleveniszap-pehely (flokulum) egységein belül (pl. oxigénhiányos körülmények a pelyhek belsejében), amelyet azonban az időszakos átkeveredés nagyrészt kiegyenlít.

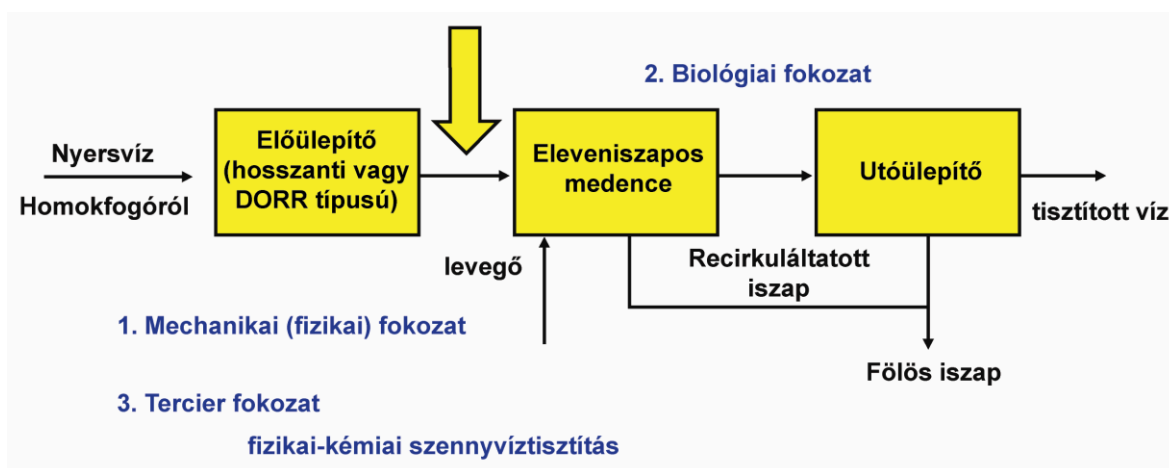
A mikroorganizmusok tápanyag-ellátottsága térben kellően egyenletes, ami szelekciójukra kevésbé biztosít lehetőséget, viszont a mindenkori tápanyaghoz történő lassú adaptációhoz megfelelő. (A biomasszában jelen levő, különböző tápanyagokat hasznosító fajok keverékénél a leglassabban szaporodók határozzák meg a tisztítás időigényét.) A tisztítási folyamatban a szennyvízzel érintkező mikroorganizmusok bontják a szennyvíz szerves anyagait, ezeket a mikroorganizmusok élő sejtanyagává, valamint

szervetlen anyagokká alakítva át jelentősen csökkentik a szennyvíz szennyezőanyag-tartalmát.

Az eleveniszapos rendszerek estében mindig figyelembe kell venni a befolyó szennyvíz térfogat- és összetételbeli változásának a tápanyagellátásra gyakorolt negatív hatását, s ezzel a tápanyagnak minősülő szennyező anyagok, valamint a belőlük kialakuló biomassza koncentrációjának és összetételének óránkénti, napi, továbbá évszakos ingadozásait. A szennyvíz hőmérséklete is közvetlen hatással van a légbevitelrel elérhető oxigéntartalomra, illetve a mikroorganizmusok anyagcseréjére, szaporodási sebességére is. Az eleveniszapos rendszerek hatékonysága kedvező, megbízhatóságuk, sokoldalúságuk és felhasználhatóságuk rugalmassága miatt a levegőztetéssel végzett szennyvíztisztítási módszerek közül elterjedten alkalmazni fogják hosszú ideig ezt a módszert.

Az eleveniszapos tisztítás meghatározó művelete a levegőbevitel, ez biztosítja a rendszer megfelelő oxigénellátását. Történhet a légbevitel pl. felületi levegőztetők segítségével is, de e levegőztetési módszernek a hátránya, hogy hatékonysága nem megfelelő, és alkalmazásakor fokozott az aeroszol-képződés és cseppkihordás is. A finombuborékokat biztosító, műtárgy alján elhelyezett levegőztetőkkel (lézerperforált gumimembrán/kerámia levegőztető csövek) kedvezőbb hatékonyság érhető el. E levegőztetők elterjedésének oka emellett az is, hogy nemcsak a hatékony oxigénbevitelt, de egyben a rendszer (tisztítandó víz –eleveniszap) homogenizálását is biztosítják.

Az eleveniszapos rendszer esetén – tekintve, hogy a mikrobák nem helyhez kötöttek, hanem pelyhes szerkezetű iszap-szuszpenziót alkotva lebegnek a szennyvízben – a kellő, lebontást biztosító tartózkodási időt követően ezeket az iszappelyheket el kell választani a tisztított víztől. Az eleveniszapos tisztító rendszerek ezért két részből állnak, műtárgyuk a biológiai medence mellett az utóülepítő (10.2.4., 10.2.5. ábra). Az első műveleti egységbe, a biológiai medence vízébe oxigént juttatunk levegőztetéssel, ami az eleveniszapot lebegésben és áramlásban tartja. A második egységben az eleveniszapot ülepítéssel választjuk el a tisztított víztől. Az ülepített iszap egy részét recirkuláltatni kell, hogy az eleveniszapos biológiai medencében állandó iszapkoncentrációt biztosítsunk, a másik része (az iszapszaporulat, azaz fölös iszap) az előülepítő iszapjával együtt kevert iszapként további kezelést igényel.



10.2.4. ábra: Az eleveniszapos szennyvíztisztítási folyamat blokk-sémája



## AEROB ELEVENISZAPOS ELJÁRÁS HOSSZANTI ÁTFOLYÁSÚ LEVEGŐZETŐ ÉS UTÓÜLEPÍTŐ MEDENCÉK



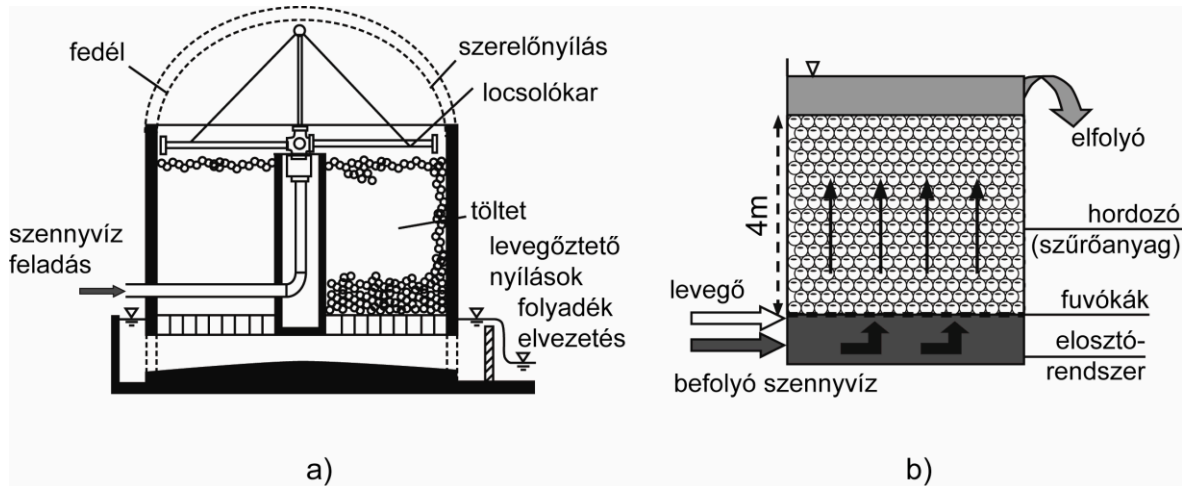
10.2.5. ábra: Az eleveniszapos medencék és utóülepítők

Az eleveniszapos rendszer sajátos változatának tekinthetők az oxidációs árkok. Kialakításuk szerint ezek két félkörrel lezárt egyenes szakaszokból álló, trapéz keresztmetszettel rendelkező árkok, ahol a víz áramlását rotorokkal oldják meg. Nagy előnyük, hogy tisztítás közben jelentősebb szagképződés nem tapasztalható. A szennyvíz áramlási sebességet egy adott, optimális értéken tartják, hogy az ülepedés az árokban menjen végbe, és innen lehessen az iszapot eltávolítani. Ennél a technológiánál a szerves anyag oxidálása, a nitrogénvegyületek nitrifikációja, valamint **denitrifikációja** egyaránt lezajlik.

A kezdetben épített szennyvíztisztító telepek kizárólagosan szakaszos, vagy csak részben folyamatos üzeműek voltak, sokoldalúságuk miatt ezek az eljárások napjainkban kezdenek újra népszerűvé válni. A ma üzemelő lakossági szennyvíztisztítók döntő többsége azonban jellemzően folyamatos üzemű eleveniszapos rendszer. Ez a megoldás egyszerűbb, biztonságosabb üzemeltetést és gyakorta térfogat-megtakarítást jelent. Léteznek az eleveniszapos tisztítási eljárásnak olyan továbbfejlesztett változatai is, amelyeknél az eleveniszapos lépcső után rögzített filmes (lásd Dél-pesti Szennyvíztelep) vagy hibrid (eleveniszapot és biofilmet tartalmazó) reaktort alkalmaznak. Elterjedtek továbbá két- vagy többfokozatú biológiai eljárások is, ahol az eleveniszapos rendszer kiegészítik anoxikus, oxikus zónákkal, kialakításuk elsősorban a biológiai foszfor- és nitrogéneltávolítást szolgálja.

A **fixágyas eljárások**. A berendezésekbe ezen eljárások esetén ún. szilárd hordozókat helyeznek, azaz felületnövelés céljából szilárd töltőanyagot, és a tölteten kialakuló biofilm végzi el a lebontást, átalakítást. A fixágyas eljárások egyik változata az ún. csepegtetőtesztés tisztítás. A csepegtetőtesztés henger alakú műtárgyak, amelyek töltetei nagy fajlagos felületű anyagok pl. bazalttufa, kőzúzalék, műanyagok (10.2.6.a. ábra).

A berendezésbe felülről kerül szórófejek segítségével a tisztítandó víz, a rendszer aljáról történik a légbefúvás és a lefelé „csepegő” szennyvizet is a berendezés alján vezetik el, miután a töltetfelületen található biofilm elvégezte a szennyezők kívánt átalakítását. A fixágyas eljárások másik változata elárasztott rendszerű, azaz a tisztított szennyvíz bevezetését és a levegőztetést a műtárgy alján valósítják meg és a tisztított vizet a berendezés felső részéről vezetik el (10.2.6.b. ábra).



10.6. ábra: A fixágyas biológiai eljárások műtárgyai

(a–csepegtetőtestes, b–elárasztott rendszerű)

A töltetek felületén mikroorganizmusok által létrehozott biológiai hártya alakul ki. A mechanikai tisztítást követően a vizet átengedik a tölteten, az ott létrejött hártyán az oldott és kolloid szerves anyagok adszorbeálódnak, majd lebomlanak. A lebomlást mikrobák segítik elő azzal, hogy felhasználják ezeket az adszorbeált anyagokat az életfolyamataik fenntartásához. Oxigénellátásról légbefúvással gondoskodnak. Kis beruházási költsége és egyszerű üzemeltetése miatt ez az eljárás nagyon népszerű.

### 10.2.3. A kémiai tisztítási fokozat

A kémiai kezelés, azaz a tercier (harmadlagos) tisztítási fokozat során rendszerint a biológiai tisztítást követően a szennyvízben még jelen levő anyagokat (mint például: foszfátok, mikroorganizmusok) távolítják el. Egyébként olyan esetekben is alkalmazzák, ahol a biológiai kezelés nem is jöhet valamilyen oknál fogva szóba (pl. szerves és/vagy toxikus szennyezők jelenléte). E tisztítási lépcsőben csökkenthetik egyes ionok koncentrációját, valamint oldott komponenseket, toxikus elemeket alakítanak át vízben rosszul oldódó vegyületekké. A kémiai kicsapást szilárd-folyadék fázis szétválasztás (ülepítés vagy flotálás) követi. A lebegőanyag, elsősorban kolloid diszperziók eltávolítása, koagulációs és flokkulációs eljárásokkal történik. A kicsapásnál használt vegyszerek gyors bekeverése eredményeként a nagyon finom részecskék mikro-pelyhekké tömörülnek (koagulálás), az oldott ionok a kicsapó szerekekkel nehezen oldódó vegyületeket képeznek, melyek így elválaszthatókká válnak és az ülepítő medencében eltávolíthatóak. Ilyen folyamat például a foszfáteltávolítás, amikor a reaktív foszfáttartalmat alumínium-, vas- vagy kalcium-sókkal csapják ki. Ezen kívül speciális ipari szennyező anyagokat is, így pl. a nehézfémeket, szulfidokat, cianidokat gyakorta szintén csapadékképzéssel távolítanak el.

A csapadékképzés a szennyvíztisztítási folyamat különböző műveleti lépcsőiben történhet, azaz a terciér tisztítás elnevezés nem a kémiai kezelés tisztítás-technológiai helyét jelöli a folyamatban. Így kémiai kezelés alkalmazható a következő változatokban:

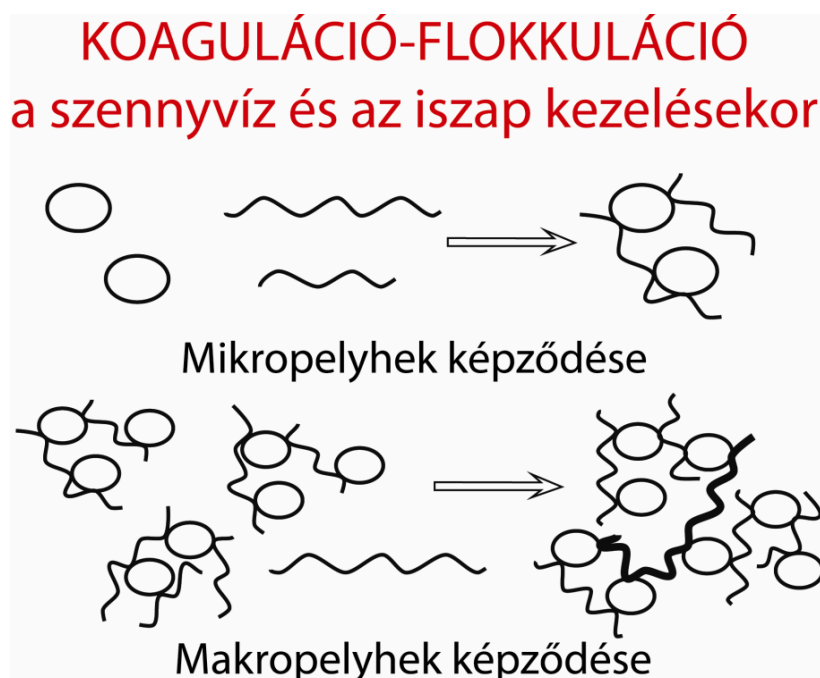
*elő-kicsapás:* a kicsapó szert az előülepítés előtt adagolják,

*szimultán kicsapás:* a kicsapó szert a biológiai tisztítás során, a tisztító egységbe adagolják,

*utó-kicsapás:* a kicsapó szert a biológiailag tisztított, elfolyó vízhez adják.

A tisztítás hatékonyságának növelése érdekében a koagulálást követően flokkulációs eljárást alkalmaznak (10.2.7. ábra). A flokkuláló szerek (polielektrolitok) adagolása, homogén eloszlása után a szennyvizet kis intenzitással kevertetik a nagyobb pelyhek kialakítása érdekében, ezáltal elősegítik az egyébként még nehezen ülepsző anyagokat ülepedését (10.2.8. ábra). A flokkulációval kialakított pelyhek különböző mechanikai fázis-elválasztási eljárásokkal már könnyen eltávolíthatóak. A koagulációs-flokkulációs kémiai folyamatokat és a fizikai fázis-elválasztást együttesen alkalmazó eljárást **derítésnek** nevezzük.

Koaguláló szerként általában kalcium-hidroxid, vas(II)-, vas(III)- és alumíniumsókat, segédderítő szerekként kaolint és bentonitot (agyagásvány tartalmú kőzet-szuszpenziót), flokkuláló szerként pedig nagy molekulatömegű vízzeloldható polielektrolitokat alkalmaznak a gyakorlatban.



10.2.7. ábra: A koaguláció és flokkuláció folyamata

Kémiai tisztítási lépésként oxidatív folyamatokat is használnak a szennyezők eltávolítására, így oxidációt, azaz fertőtlenítést alkalmaznak a tisztított vízben még jelen lévő mikrobák, főleg a patogén szervezetek elpusztítására is. Leggyakrabban használt oxidáló szerek: klór, klór-dioxid, ózon, hidrogén-peroxid, UV-besugárzás, ezek közül a szennyvízkezelés terén a klór használata terjedt el.

A kémiai tisztítást napjainkban a szennyvíztelepeken többségében a foszforeltávolítás céljából történő vegyszer (pl. vas-klorid) adagolás (derítő eljárás) és a fertőtlenítést biztosító klórozás jelenti.

## DERÍTÉSI VIZSGÁLATOK



10.2.8. ábra: Laboratóriumi derítésvizsgálatok

A hagyományos kétlépcsős fizikai-biológiai szennyvíztisztítás hatásfoka átlagosan a lebegőanyag eltávolítást tekintve 90%, ugyancsak 90% KOI-t okozó szerves anyag, továbbá 25–30% N- és P-vegyület távolítható ezzel az eljárással. A tercier, azaz kémiai kezeléssel ezzel szemben – ha ezt az eljárást önmagában alkalmazzák – 90% lebegő anyag-, 90% P-vegyület-, 25% N-vegyület- és 75% KOI-tartalom csökkentés érhető el. Így belátható, hogy az esetek többségében ma már a fizikai-biológiai és kémiai tisztítási folyamatok együttesére van szükség ahhoz, hogy a környezetünk védelme érdekében hozott egyre szigorodó kibocsátási követelményeknek megfelelően a szennyvizek minősége.

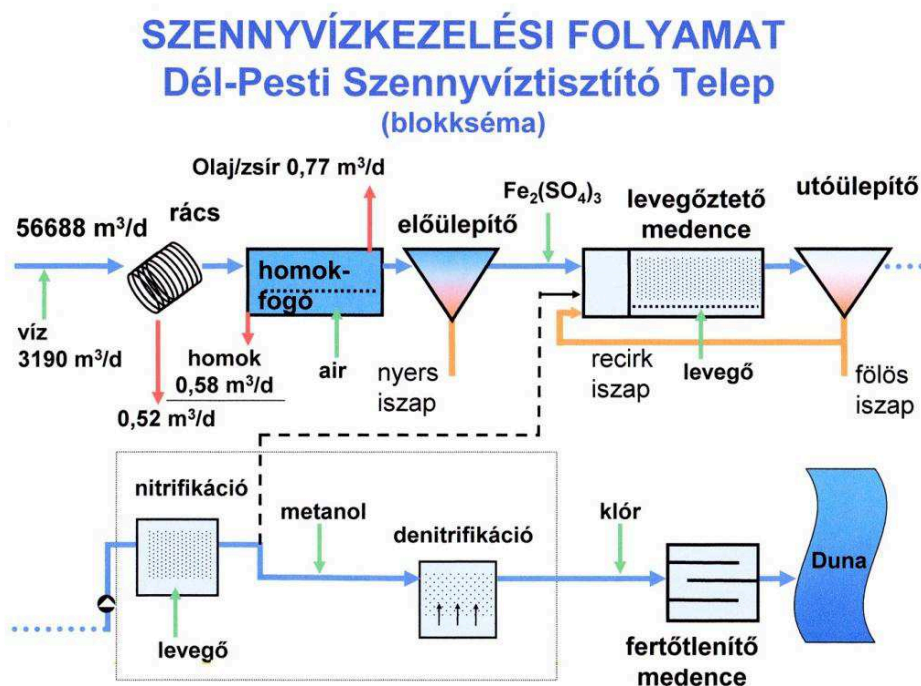
**Hatásfok** alatt értjük egy műveleti egységbe vagy az egész műveletsorra bevezetett szennyvíz adott komponens-koncentrációjának megváltozását a műveleti egységből (műveletsorról) való kilépéséig a bevezetett (kiindulási) koncentrációra vonatkoztatva. Ha egy ülepítőbe kerülő szennyvíz lebegőanyag-tartalma pl. 250 mg/L, s ez a víz az ülepítőt úgy hagyja el, hogy benne csupán 200 mg/L lebegőanyagot tudunk meghatározni, akkor ennek az ülepítőnek a hatásfoka  $(250-200/250)*100 = 20\%$ , azaz a lebegőanyag-tartalomból ennyit tartott vissza a példában szereplő adatok esetén a műtárgy.

### *A Dél-Pesti Szennyvíztisztító Telep*

A hazánkban elterjedten alkalmazott szennyvíztisztítási technológiát a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telep működésén keresztül mutatjuk be. A 10.1. táblázatban a telepre érkező és a telepet elhagyó tisztított szennyvíz néhány fontosabb átlagadatát tüntettük fel.

Három kezelési lépcsőben (három fokozat) távolítják el ezen a telepen a szennyvízből a szennyező anyagokat (10.2.9. ábra). Az első lépésben mechanikai tisztítás történik. A darabos anyagok kiszűrésére szolgálnak a rácsok, ezt követi a víznél könnyebb, azzal a

vízzel nem elegyedő, külön fázist alkotó szennyezések eltávolítása, ahol a homokfogó aljáról történő levegőztetéssel segítik az ilyen anyagok elkeveredett frakcióinak felszínre jutását, s egyúttal az apró szemcsés hordalék is kiülepszik. Ezután a még könnyen kiülepíthető lebegőanyag eltávolítása következik a gravitációs elven működő előülepítő medencében.



10.2.9. ábra: A Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepi szennyvízkezelés folyamata

A második fokozatban eleveniszapos biológiai tisztítás zajlik, a fokozat elején a reaktív foszfortartalomtól vegyszeres kezeléssel (derítéssel) csapadékot képeznek, a nitrátion-tartalom pedig anaerob medencében elődenitrifikáció során távolítódik el. Az ezt követő levegőztetett eleveniszapos medencében történik a szerves anyagok lebontása és az ammóniumion-tartalom részleges nitrifikációja. A levegőztetett medencében felszaporodott eleveniszap folyadékfázistól való elválasztása az utóülepítő medencében zajlik. A nitrogénformák eltávolítását a bioszűrő (Biofor) egység végzi, ami fixfilmes rendszerű műtárgy. Először levegőztetett környezetben nitrifikáció zajlik, ahol az eleveniszapos medencében megkezdődött ammóniumion-átalakítás folytatódik, ezután anaerob medencékben, szintén fixfilmes rendszerű denitrifikáció során a légkörbe távozik a szennyvízből a nitrogénvegyületekből képződött végtermék, a nitrogén gáz. A befogadóba bocsátás előtti utolsó lépés a tisztított víz fertőtlenítése, ez megakadályozza a szennyvízben előforduló patogén szervezetek természetbe kerülését. A fertőtlenítést a dél-pesti telepen klórral végzik az üdülési szezon időszakában. A tisztított, telepről elfolyó szennyvíz éves átlagadatait és a telepen betartandó határértékeket a 10.1. táblázat adatai alapján hasonlíthatjuk össze. Látható, hogy a határértékeknek a tisztított szennyvíz minősége megfelel, s ezt a tisztítás-technológia 90% körüli, illetve e feletti hatásfoka eredményezte. A nitrát-nitrogén esetén hatásfokot nem számíthatunk, csupán a határértékkel lehet összevetni e komponens esetén a tisztítás eredményességét, hiszen e vegyület az aerob szennyvízkezelési lépések során keletkezik, a nyers szennyvízben koncentrációja eleve elhanyagolhatóan kicsi.

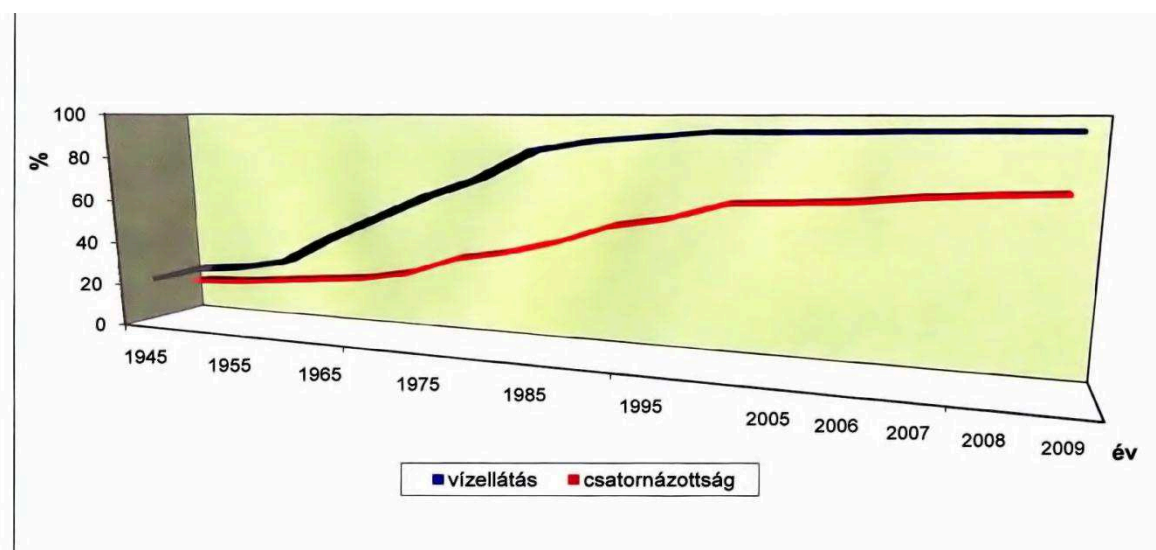
	Befolyó nyers szennyvíz	Elfolyó, tisztított szennyvíz	Határértékek	Eltávolítás hatásfoka
	mg/L			%
KOI	600	45	50	93
BOI <sub>5</sub>	200	15	–	93
NO <sub>3</sub> -N	0,2	6,0	9,2	–
NH <sub>4</sub> -N	40	1,0	2,0	98
összes P	15	1,6	1,8	89
lebegőanyag	250	5,0	100	98

10.1. táblázat: A nyers- és tisztított kommunális szennyvíz összetétele és az adott paraméterek határértékei a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen

Az utóülepítő medencékből igen nagy mennyiségű, ún. „fölösiszap” kerül ki, melynek további kezelése anaerob, biogáz termelő fermentorokban történik. A rothasztás során csökken az iszap térfogata és energiatartalma is felhasználhatóvá válik. A keletkező biogázt kénmentesítés után gázmotorokban áramtermelésre használják fel, amely a szennyvíztelep energia-szükségletének 85%-át fedezi. A fermentorokból származó iszap nagy víztartalmú, ezért elszállítása előtt víztelenítik.

A hazai vízminőség-védelem lényeges kérdése jelenleg is a szennyvizek csatornában történő minél teljesebb körű elvezetésének és a megfelelő szintű szennyvízkezelésnek a biztosítása, azaz a közműolló kedvező irányú alakítása. A közműolló időben növekvő eltérést jelentett a közműves ivóvízellátás és csatornázottság kapacitása között. Az ivóvízhálózatba bekötött felhasználók száma, és így az általuk igénybe vett víz mennyisége rohamosan növekedett az utóbbi évszázad második felében, s ezt a csatornák kiépítése, a szennyvizek csatornában történő elvezetése csak sokkal kisebb mértékben követte. Ez azt a problémát veti fel, hogy a tisztítatlan szennyvíz a környezetbe kerülhet, a csatorna helyett egyedi tározókban elhelyezett szennyvíz további sorsa ugyanis nem mindig egyértelmű, sokszor nem kerül elszállításra, vagy ezt követően tisztítótelepre. Ez az elsődleges közműolló napjainkra már kedvező irányú változást mutat, azaz ez a kapacitásbeli különbség az ivóvízellátás-csatornázás közt az utóbbi években már csökkenni kezdett, ahogy ez a 10.2.10. ábrán látható. Az ábra a hazai **elsődleges közműollóra** vonatkozó adatok változását az ellátásba bekapcsolt lakos-létszámot (vízmennyiséget) kifejező százalékban mutatja be a múlt század közepétől napjainkig.

Az elsődleges közműolló megléte mellett további problémát jelent azonban még a csatornában elvezetett szennyvízmennyiség és a szennyvíztisztítási kapacitás közt meglévő eltérés. Ezek egymáshoz viszonyított, szintén időben eltérő mértékű változása a **másodlagos közműolló**. Budapest helyzete e téren már kedvező, tekintve, hogy 2010. augusztusától üzemel a Csepeli Központi Szennyvíztisztító Telep. A korábbi helyzetet jellemző közel 40%-nyi másodlagos közműolló létéhez képest, amely az ország egészére nézve átlagosan jellemző mértékű eltérést mutatta a megvalósított szennyvízelvezetés és szennyvíztisztítás kapacitása közt, ez az új tisztítótelep jelentős javulást eredményezett a fővárosban. Budapesten ez a központi szennyvíztisztító a meglévő két másik tisztítóteleppel együtt (Észak- és Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepek) biztosítja azt, hogy a fővárosban naponta átlagosan keletkező 600–650 ezer köbméter szennyvíznek ma már 90%-a megfelelő tisztítást kap.



10.2.10. ábra: Az elsődleges közműháló hazai alakulása

### 10.3. Függelékek

#### 10.3.1. Bibliográfia

Benedek P., Valló S.: Vízisztítás – szennyvíztisztítás zsebkönyv, 4. átdolgozott kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1990 [oldalszám](#)

Barótfi I.: Környezettechnika kézikönyv, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2000 [oldalszám](#)

Förstner U.: Környezetvédelmi technika, Springer Hungarica Kiadó Kft., Budapest, 1993 [oldalszám](#)

Ligetvári F.: Környezetünk és védelme, 3. kötet, Ökológiai Intézet a Fenntartható Fejlődésért Alapítvány, Miskolc, 2000 [oldalszám](#)

Lindquist A., Hahn H., Hoffmann E.: [Chemical Water and Wastewater Treatment-IX](#), [oldalszám](#)  
Published by IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London, UK, 2007 [oldalszám](#)

Sperling M.: [Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal, Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors, Basic Principles of Wastewater Treatment](#), [oldalszám](#)

Published by IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London, UK, 2007 [oldalszám](#)

#### 10.3.2. Fogalomtár

**aerob folyamat:** a vízben a fizikai-kémiai és biológiai folyamatok megfelelő koncentrációjú oldott oxigén jelenlétében, azaz oxigénellátott körülmények közt zajlanak

**anaerob folyamat:** a folyamatok oxigénhiányos, oxigénmentes közegben mennek végbe

**biofilm:** szilárd ún. hordozóanyagok felületén mikroorganizmusok által létrehozott biológiai hártya

**biokémiai oxigénigény (BOI):** a vizekben lévő biológiailag bontható szerves anyagok bakteriális bontása során meghatározott idő alatt fogyott oxigén mennyisége ( $O_2$  mg/dm<sup>3</sup>). A vízben jelen levő szerves anyagok biológiai lebonthatóságáról ad információt, általában egységnyi térfogatú vízre vonatkoztatva az öt napos oxigénfogyasztást határozzák meg (BOI<sub>5</sub>).

**denitrifikáció:** nitrát-ionok mikrobiológiai úton bekövetkező redukciója, a folyamat végterméke nitrogén gáz

**derítés:** fizikai-kémiai eljárás; oldott komponensek csapadékba vitele, a kisméretű szilárd részecskék destabilizálása, agglomerálása, nagyméretű pelyhek ún. flokulumok létrehozása vegyszerek adagolásával, ezt követi egy fázisválasztó művelet (pl. ülepités, flotálás vagy szűrés) alkalmazása

**EC:** effektív, azaz hatásos koncentráció. A toxikológiában olyan komponenskoncentrációt jelent a vízközegben, ami a vizsgált élő szervezetek valamely kiválasztott sajátságát, valamely szerv, szövet, enzimrendszer működését már befolyásolja (pl. a testtömeg, májfunkció, enzimaktivitás, stb. változását idézi elő)

**eleveniszap:** a szennyvizek biológiai tisztítási műveletei során a mikroorganizmusok a szennyvízben homogéne eloszlata, szuszpendált formában, un. iszappelyhekben fordulnak elő

**elsődleges- és másodlagos közműolló:** az elsődleges közműolló időben növekvő eltérést jelent a közműves ivóvízellátás és csatornázottság kapacitása között. Az ivóvízhálózatba bekötött felhasználók száma, és így az általuk igénybe vett víz mennyisége rohamosan növekedett az utóbbi évszázad második felében, s ezt a csatornák kiépítése, a szennyvizek csatornában történő elvezetése csak sokkal kisebb mértékben követte. A csatornában elvezetett szennyvízmennyiség és a szennyvíztisztítási kapacitás közt meglévő eltérés pedig, ezek egymáshoz viszonyított, szintén időben eltérő mértékű változása a másodlagos közműolló.

**endogén légzés:** a baktériumok tápanyag – azaz szubsztrát – távollétében is fennálló sejtlégzése

**fermentáció:** erjesztés, biokémiai folyamat, valamilyen szerves anyag enzimátikus átalakítása (erjesztéssel állítják elő pl. a sört, bioecetet, bort)

**fixágyas biológiai kezelés:** a berendezésekbe felületnövelés céljából szilárd töltőanyagot, un. hordozókat helyeznek, a tölteten kialakuló biofilm végzi el a szennyezőanyagok lebontását, átalakítását

**flotálás:** fázisválasztó művelet, külön fázist alkotó komponensek felúsztatása

**halobitási fok:** a vizek sótartalmának – az összes ion koncentrációjának – mértéke. A sótartalom mértéke szerint a vizek un. fokozatokba sorolhatók.

**hatásfok:** eltávolított ill. átalakított szennyezőanyag mennyiség az eredeti szennyezőanyag mennyiségre vonatkoztatva (dimenzió nélküli hányados, illetve ez a hányad százalékban kifejezve)

**hidraulikus terhelés:** egy műveleti egységre ill. tisztítási folyamatokat ellátó műveletsorra kerülő anyagáram, azaz az időegység alatt kezelt anyag térfogata (pl. m<sup>3</sup>/h), amit szokás a berendezések esetén azok egységnyi térfogatára vagy felületére vonatkoztatva is megadni

**homokfogó:** a szennyvízkezelés mechanikai elválasztást biztosító műtárgya, a vízfázistól a homokoszerű anyagok ülepitéssel, a zsírok-olajok flotálással történő elválasztását biztosítja

**KOI:** kémiai oxigénigény (KOI, angol megfelelője COD) [O<sub>2</sub> mg/liter] az oxidálható anyagokra elfogyott oxidálószerrel egyenértékű oxigén mennyisége, szabványos



körülmények közt meghatározva az oxidálható szerves anyag-tartalom jellemzésére alkalmazott összegparaméter

**lakosegyenérték:** víz esetén egy fő által egységnyi idő alatt (pl. naponta) átlagosan felhasznált vízmennyiség

**mineralizálás:** szerves anyagok átalakítása, lebontása szervesetlen vegyületekké

**mezofil:** középhőmérsékletű (biológiai eljárások esetén 35–45 °C)

**műtárgy:** berendezés, műveleti egység, amelyben a technológiai eljárás folyamatai megvalósulnak

**nitrifikáció:** az ammónium-ion aerob mikrobiológiai átalakulási folyamata, amelynek végterméke a nitrátion

**öntisztulás:** természetes tisztulás, emberi beavatkozás nélkül végbemenő folyamat, ami a víztestbe kerülő szennyezőanyag-tartalom csökkenését, eltűnését eredményezi. Összetett folyamat, fizikai (pl. keveredés, ülepedés), kémiai (oxidáció, koaguláció, csapadékképződés, stb.) és biokémiai (fotoszintézis, mineralizáció) részfolyamatokból áll.

**szubsztrát:** a mikroorganizmusok tápanyaga

**termofil:** megemelt hőmérsékletű (biológiai eljárások esetén 50-60 °C)

**TOC:** Total Organic Carbon, összes szerves széntartalom

**trofitási fok:** a szervesanyagból szerves anyagot létrehozó és ezzel a víz minőségét befolyásoló adottságok és jelenségek gyűjtőfogalma. A szervesanyag növényi tápanyagok minősége, mennyisége és változása határozza meg a vízben a trofitás mértékét, a szerves anyagot építő fotoautotróf élőlények (algák és vízinövények) minősége, mennyisége és működésük (trófia) vízminőséget alakító, befolyásoló folyamatait jelenti. Trofitás szempontból a természetes vizek több kategóriába sorolhatók, így pl. vannak többek közt oligo-, mezo- és eutróf vizek.

**vízminőség:** több (fizikai, kémiai, biológiai) paraméter együttese határozza meg; a felhasználási cél és a víz eredetének (vízkivétel helyének) függvényében

**vízszennyezés:** az adott vízre vonatkozó határértéktől eltérő komponens koncentrációval illetve paraméter értékkel jellemezhető. Minden olyan jellegű hatás vízszennyezést okoz, amely a felszíni és a felszín alatti vizek minőségét úgy változtatja meg, hogy a víz, mint élettér a benne zajló természetes életfolyamatok számára korlátozódik vagy megszűnik, illetve az emberi célokra történő felhasználása csökken vagy lehetetlenné válik. A szennyezés az adott vízi ökoszisztéma összetételének változását jelenti a természetes összetevőkhöz képest úgy, hogy a rendszeren belül valamely természetes alkotóelem koncentrációja megváltozik, és/vagy a rendszerbe természetes összetevőitől alapvetően eltérő minőségű komponens kerül.

## 11. SUGÁRZÁSOK A KÖRNYEZETÜNKBEN (KISS ÁDÁM)

### 11.1. A sugárzásokról

A természetben lezajló különféle folyamatokból, jelenségekből és az emberi tevékenységek következtében környezetünkben folyamatosan sugárzás ér minket. A sugárzások forrás és minőség szerint egyaránt többféleképpen feloszthatók. Minőség szempontjából alapvetően a környezeti sugárzások két csoportját<sup>1</sup> különböztethetjük meg:

- elektromágneses sugárzások,
- radioaktív sugárzások.

A környezeti sugárzások távoli forrásokból elektromágneses hullámok, vagy részecskék formájában energiát juttatnak el a megfigyelőhöz. A sugárzások nagy részére érzékszerveink teljesen érzéketlenek<sup>2</sup>. Kivételt az elektromágneses hullámok látható és ahhoz közeli hullámhosszú tartománya jelent csak. Az egyed akár halált okozó dózisú radioaktív sugárzást is megkaphat anélkül, hogy ő abból bármit észrevenne. Ezért a sugárzások megfigyelésére sugárérzékelőket, detektorokat kell alkalmaznunk.

A sugárzások egészségügyi hatással járhatnak. Ez a tény és az, hogy legnagyobb részüket közvetlenül nem érzékeljük sok emberben indokolt és indokolatlan félelmeket keltenek, kérdéseket vetnek fel.

A fejezet célja egyrészt a környezeti sugárzások alapvető fizikai tulajdonságainak áttekintése, másrészt a témakör fontosságának a környezet értékelése szempontjából történő bemutatása. Végül a környezet sugárzási állapotára vonatkozó néhány kérdést vetünk fel.

### 11.2. Az elektromágneses sugárzások

Az elektromágneses sugárzások óriási területet, nagyon gazdag jelenségek kört foglalnak magukba. A széles frekvencia- és hullámhossztartományok nagyon változatos tulajdonságú sugárzásokat fognak át. Környezeti szempontból az is fontos, hogy a különböző hullámhosszú sugárzások hatnak a biológiai rendszerekre és kölcsönhatásaik összetett jelenségeket mutatnak.

A környezeti elektromágneses sugárzások forrása lehet természetes és mesterséges egyaránt. A természetes sugárzások fő forrása a Nap: a Naptól származó elektromágneses sugárzás jelenti a földi biológiai lét alapját.

Mik azok az elektromágneses hullámok? Mielőtt erre rátérnénk tekintsük át azt, hogy egyáltalán hullámok alatt mit értünk.

---

<sup>1</sup> Szigorúan véve ide tartoznának még a hangsugárzások is, de azok egészen más fizikai folyamatokból származnak és egészen más jellegűek. Ezért itt nem foglalkozunk velük.

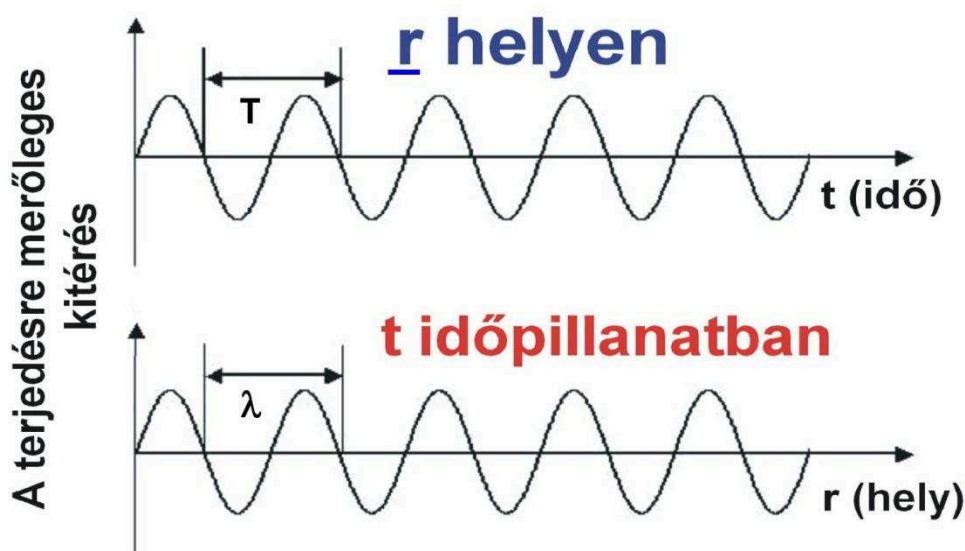
<sup>2</sup> Természetesen eltekintünk az extrém nagy intenzitású, azonnali fizikai változásokat létrehozó sugárzások esetétől.

## 11.2.1. A hullámokról

A hullám haladó zavar. A hullámok alapvető tulajdonsága, hogy a jelenség nem jár anyag mozgásával, haladásával, és a hullám energiát közvetít. E két tulajdonságot jól szemlélteti a horgászcsónak mellett elmenő motorcsónak. A horgászcsónakot jól meghimbálja a motorcsónak hulláma, tehát energiát közvetít felé, miközben a motorcsónak közelében lévő víz természetesen nem jut el a horgászcsónakig.

A hullámok lehetnek transzverzálisak és longitudinálisak. A transzverzális hullámnál a hullámmozgást végző közeg egy részecskéje a hullám haladási irányára merőlegesen végez rezgőmozgást, míg a longitudinális hullám esetén a közeg részecskéinek rezgőmozgása párhuzamos a terjedés irányával. Transzverzális hullámra példa a rezgő húr vagy dob rezgései (és mint látni fogjuk az elektromágneses hullámok), míg a hanghullámok levegőben longitudinálisak.

A hullámokat a hullámhossz, a periódusidő és a terjedési sebesség jellemzi. A hullámhossz és a periódusidő értelmét jól mutatja a 11.2.1. ábra: a hullámhossz egy meghatározott  $t$  időpontban két azonos fázisban lévő pont távolsága ( $\lambda$  — alsó ábrarész), a periódusidő egy meghatározott  $r$  helyen az az idő, amelyik eltelik közöttük, hogy ugyanabba rezgésállapotba kerüljön a részecske ( $T$  — felső ábrarész).

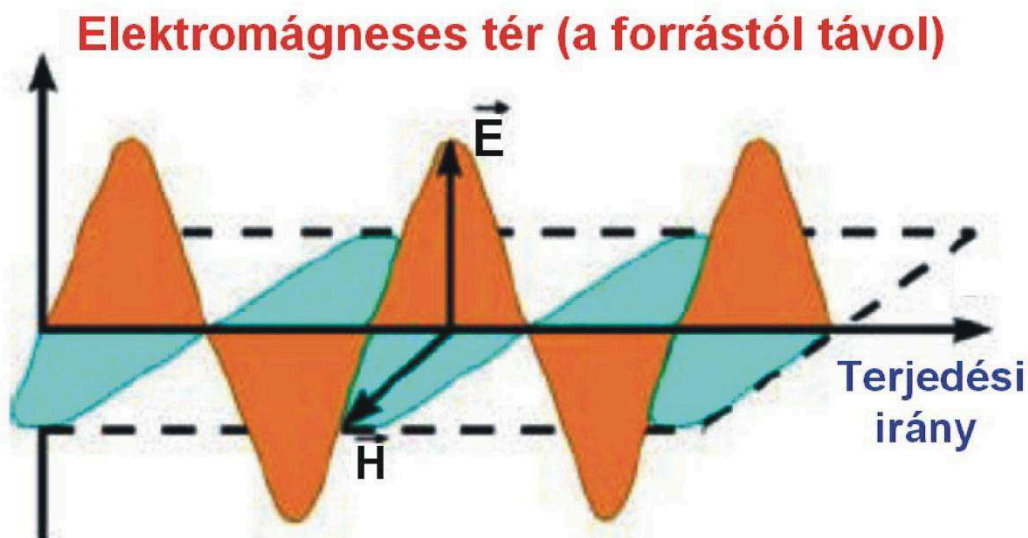


11.2.1. ábra: A részecske terjedésre merőleges kitérése egy meghatározott helyen az idő függvényében (felső ábra) és egy időpillanatban a hely függvényében (alsó ábra) transzverzális hullámnál.

Bevezetjük a hullám frekvenciáját,  $\nu$ -t, amely a periódusidő reciproka:  $\nu = 1/T$ . A frekvencia egysége a Hertz (Hz),  $1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$ . A hullám sebessége  $c = \lambda/T = \lambda \cdot \nu$ .

## 11.2.2. Az elektromágneses spektrum

Az elektromágneses (EM) hullámok transzverzális hullámok, amelyekben az elektromos térerősség  $\underline{E}$  és a mágneses térerősség  $\underline{H}$  végez rezgéseket. Az EM hullámok vákuumban is kialakulhatnak, kialakulásukhoz a fizika megállapítása szerint nincs szükség anyagi közegre. Az 11.2.2. ábra az EM hullámok tér szerinti periodikus tulajdonságait mutatja be. Az ábra jelzi, hogy az elektromos és mágneses tér a forrástól távol egymásra és a hullám terjedési irányára egyaránt merőlegesek.



11.2.2. ábra: Az elektromágneses hullámoknál az elektromos és a mágneses tér nagysága változik térben és időben periodikusan. A terek egymásra és a terjedési irányra egyaránt merőlegesek

Az EM hullámok sebessége vákuumban  $c=299\,792\,458$  m/s, ami nagyon közel van a  $c=3\cdot 10^8$  m/s-hoz (300 000 km/s). A sebesség kisebb, ha az EM hullámok nem vákuumban, hanem valamilyen közegben terjednek. Ilyenkor a sebességük jellemző a közegre.

A fizika rámutatott arra, hogy az elektromágneses jelenségekben az EM hullámok kettős természetet mutatnak. Egyrészt az arra rákérdező kísérletekben egyértelmű hullámtulajdonságokat mutatnak. Így az elhajlás, az interferencia és a polarizáció mind megfigyelhetők a velük végrehajtott kísérletekben. Ugyanakkor más körülmények között, például a fotoelektromos jelenségeknél, vagy a nm ( $10^{-9}$  m) hullámhosszú EM hullámokkal elektronokon végrehajtott szórás-kísérletekben<sup>3</sup> egyértelmű részecsketulajdonságokat mutatnak az EM hullámok. A vizsgálatok szerint a kettős természet, tehát a hullám és részecsketulajdonságok együttes fellépte az EM jelenségkör általános tulajdonsága.

További vizsgálatok kiderítették, hogy az EM tér kvantált. Ez azt jelenti, hogy  $\nu$  frekvencia esetén a térben csak egy meghatározott nagyságú energiamennyiség egészszámú többszörösének megfelelő energia lehet jelen, úgy, mintha osztatlan részecskék építenék fel a teret. Ez a kvantumenergia arányos a  $\nu$  frekvenciával:

$$E = h \cdot \nu \quad (11.1)$$

képlet szerint. Itt  $h$  az un. Planck-állandó, értéke  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Js.

Az előzőekből következik, hogy az EM hullámokat egyszerre jellemzi a  $\lambda$  hullámhossz, a  $\nu$  frekvencia és az  $E$  kvantumenergia. Ezek a mennyiségek egyértelműen megfelelnek egymásnak, bármelyiket ismerjük a másik kettő kiszámítható belőle a

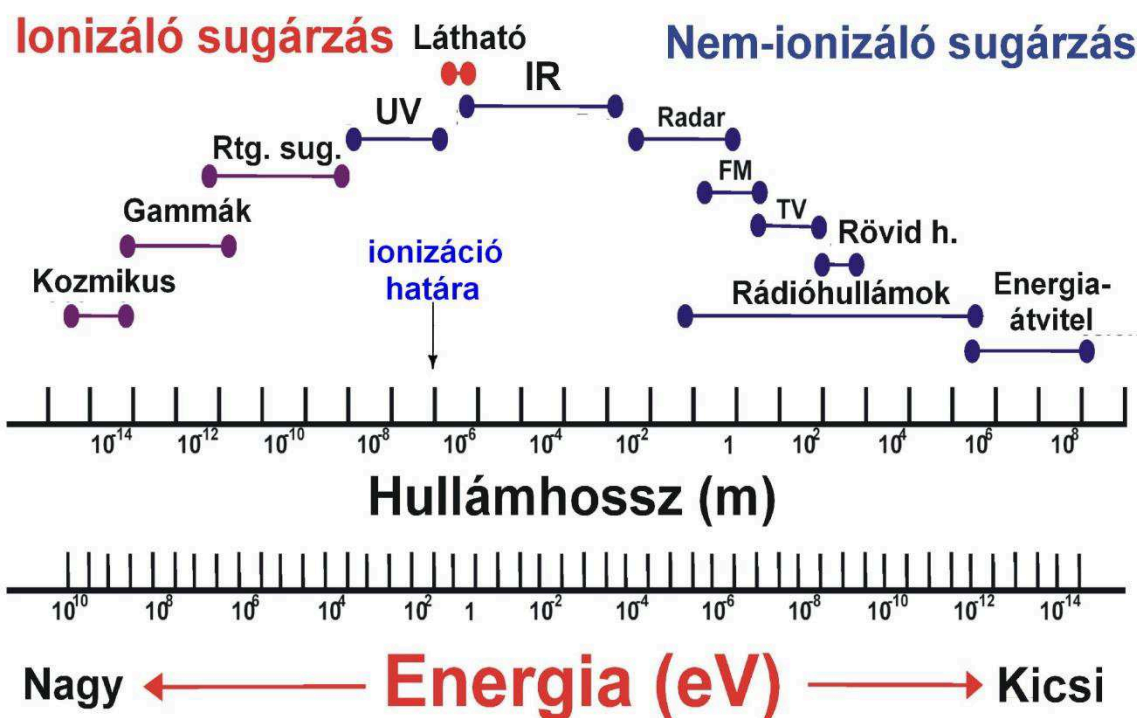
$$c = \lambda \cdot \nu \text{ és az } E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (11.2)$$

<sup>3</sup> Ez az un. [Compton-effektus](#).

összefüggések felhasználásával. Az alábbi táblázat a példa kedvéért mutat be néhány összetartozó hullámhosszat, frekvenciát és kvantumenergiát.

<i>hullámhossz</i>	<i>frekvencia</i>	<i>kvantumenergia</i>
100 km	$3 \cdot 10^3 \text{ Hz}$ (3 kHz)	$1,2 \cdot 10^{-11} \text{ eV}$
1 km	$3 \cdot 10^5 \text{ Hz}$ (300 kHz)	$1,2 \cdot 10^{-9} \text{ eV}$
1 m	$3 \cdot 10^8 \text{ Hz}$ (300 MHz)	$1,2 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$
10 cm	$3 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ (3 GHz)	$1,2 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$
1 mm	$3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$ (300 GHz)	$1,2 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$
500 nm	$6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ (600 THz)	2,5 eV
1 nm	$3 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$ (300 PHz)	$1,2 \cdot 10^3 \text{ eV}$ (1,2 keV)
$1 \cdot 10^{-12} \text{ m}$	$3 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$	$1,2 \cdot 10^6 \text{ eV}$ (1,2 MeV)
$1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$2,5 \cdot 10^{23} \text{ Hz}$	$10^9 \text{ eV}$ (1 GeV)

11.1. táblázat: Néhány összetartozó hullámhossz, frekvencia és kvantumenergia az elektromágneses jelenségkörnél<sup>4</sup>



11.2.3. ábra: Az elektromágneses spektrum a hullámhosszak és a nekik megfelelő kvantumenergiák logaritmusos ábrázolásával.

Az elektromágneses jelenségkör óriási területet fog át a sztatikus, vagy igen alacsony frekvenciájú terektől a megfigyelt legnagyobb, néhány GeV ( $10^9$  eV) energiájú gamma kvantumokig. Az 11.3. ábra az EM spektrum fő területeinek vázlatát mutatja be. Az energiaátviteli rendszereknek (pl. 50 Hz) megfelelő jelenségek hullámhossza igen nagy (50 Hz-nek 6000 km felel meg). Ennél rövidebb hullámhosszúak a telekommunikációban alkalmazott hullámok, amelyek a km-es hullámhosszaktól (hosszú és középhullámú

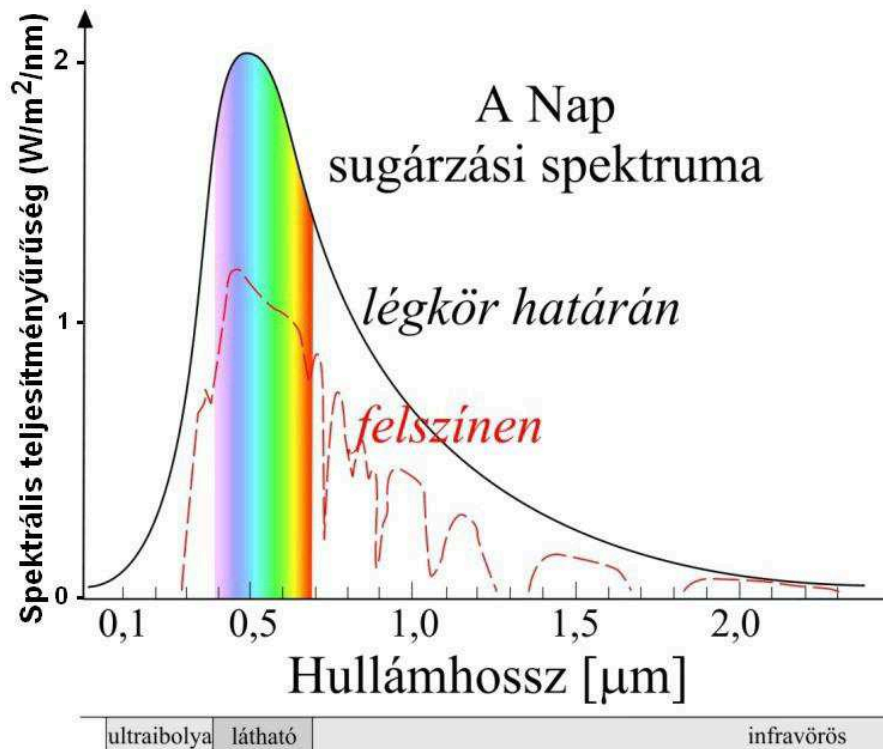
<sup>4</sup> A mikrofizikában az energiát eV-ban szokás megadni. Ez az az energia, amit egy elektron akkor nyer, ha 1V potenciálkülönbségű helyek között elmozdul.  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

rádióadások) a néhány cm-es mobiltelefon hullámhosszakig tartanak. Rövidebbek a radar és a mikrohullámú sugarak hullámhosszai. Az optikai tartománynak az 1mm és a ~10 nm közötti hullámhosszakkal bíró sugárzásokat nevezzük. Ez magában foglalja az infravörös (1mm-től 780 nm-ig), a látható (780 nm-től 380 nm-ig) és az ultraibolya (380 nm-től ~10 nm) tartományokat. Ennél is rövidebb hullámhosszúak a **Röntgen-sugarak**, gamma sugarak és a kozmikus tartomány<sup>5</sup>.

Az elektromágneses spektrum környezeti szempontból való értékelésének legfontosabb pontja az az energia, amelynél, vagy a nála nagyobb energiáknál bekövetkezhet az anyag ionizációja. Biológiai rendszerekre ugyanis minőségileg más, drámaian nagyobb hatással vannak az ionizálni képes sugárzások. Ez a pont 10-15 eV körül van, aminek  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  Hz (3 PHz) frekvencia és  $\sim 100$  nm felel meg. Ezt a pontot a 11.2.3. ábrán feltüntettük, ettől jobbra a nem-ionizáló tartomány, míg balra az ionizálni képes sugárzások vannak.

### 11.2.3. Az elektromágneses sugárzások környezetünkben

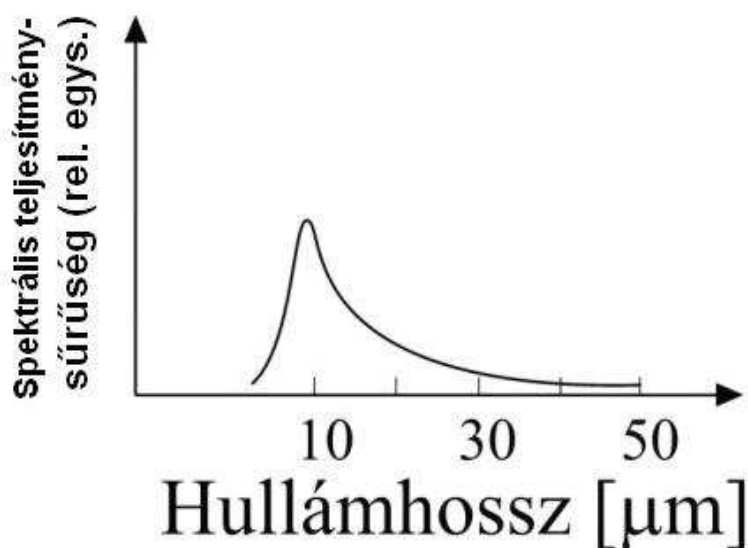
A Földön a kimagaslóan legintenzívebb EM sugárzó a Nap. A napsugárzás a Föld korongjára vonatkoztatva  $\sim 178$  PW ( $178 \cdot 10^{15}$  W) teljesítménynek felel meg. A **spektrális teljesítménysűrűség**-eloszlást a 11.2.4. ábrán mutatjuk be. A sugárzási spektrum alakja a légkör határán egy 5900 K hőmérsékletű test sugárzásának felel meg. A Föld felszínén, az eloszlás más, a légkört alkotó összetevők (a fő komponenseken kívül elsősorban a vízgőz) a rájuk jellemző hullámhosszakon gyengítik a beérkező sugárzást. Megjegyezzük, hogy a Nap sugárzásának maximuma az 500 nm (0,5 $\mu$ m) köré, tehát a látható tartományba esik.



11.2.4. ábra: A Nap sugárzásának teljesítménysűrűség-eloszlása a légkör határán és a Föld felszínén.

<sup>5</sup> Ez utóbbi tartományok között (éppúgy, mint a hosszabb hullámhosszú tartományoknál sem) nincsenek éles határok: általában Röntgen sugaraknak azokat a sugarakat nevezik, amelyek az atomburok átalakulásával keletkezhetnek. Ez energiában a néhány 100 eV-től úgy 100 keV energiáig tarthat.

A Föld EM sugárzása nagyságrendekkel kisebb intenzitású, mint a bejövő sugárzásé. Az átlagosan  $63 \text{ mW/m}^2$  sugárzás maximuma  $\sim 10 \text{ }\mu\text{m}$  körül van (11.2.5. ábra). Tekintve, hogy a légkör EM sugárzásokkal kapcsolatos abszorpciós tulajdonságai erősen függenek a hullámhossztól ez a bejövő és a kimenő sugárzás közötti hullámhossz-eltolódás megmagyarázza a légkör üvegházhatását. A beérkező napsugárzás legnagyobb intenzitást mutató részei rövid hullámhosszúak (11.2.4. ábra), amire a légkör alkotó részei különböző mértékben ugyan, de átlátszóak. Így az energia nagyobb része megérkezik a Föld felszínére. A kisugárzás azonban hosszú hullámhosszakon az infravörösben történik. Ezekre a hullámhosszakra a légkör több alkotója sem átlátszó, a vízgőz, a széndioxid, a metán stb. nem engedi, hogy az energia eltávozzon a Földről.



11.2.5. ábra: A Föld EM sugárzása. A teljesítménysűrűség maximuma az infravörös tartományba esik, lényegesen nagyobb hullámhossznál van, mint a Nap bejövő sugárzásáé.

Más hullámhossz-tartományokban a mesterséges, az ember által keltett EM sugárzások figyelhetők meg. Kis túlzással azt állíthatjuk, hogy Földnek alig van olyan pontja, ahol az elterjedt energiaátviteli rendszerek 50, vagy 60 Hz-es jelei megfigyelhetetlenek lennének. A hosszú, a közép és rövidhullámú rádióadások szintén besugározzák a Föld nagy részét. Az ultrarövid hullámú rádióadások és a televíziós műsorszórás térerősséget jelent lényegében minden emberek lakta területen. A radarberendezések intenzív sugárzását a rendvédelmi szervek, a légi irányítás és a katonaság alkalmazza.

Az EM besugárzások terén korunk egyik legnagyobb változását a néhány év alatt általánosan elterjedt mobiltelefonok okozzák. Ma már szinte mindenki rendelkezik ilyen készülékekkel. Maga a készülék kétirányú. A mobil egyrészt veszi a környéken lévő, központi adó (a cellaadó) jeleit, másrészt maga a készülék is sugározza a központi egység felé jelentkezéseit és az információt vivő EM sugarakat. Amikor telefonon beszélünk, akkor általában fülünkhöz tartjuk a készüléket, aminek következtében a telefon közvetlen közletről sugározza be a fület és az ahhoz közel lévő szerveket így az agyat is. Bár az emberiség nagy tömegeit érinti a probléma, de ma még meglepően keveset tudunk ennek a sugárzásterhelésnek az egészségügyi hatásairól.

A modern világ háztartásaiban és a mindennapi életben számos olyan berendezéssel találkozunk, amelyek kisebb vagy nagyobb intenzitású EM sugárzásokat bocsátanak ki. Ilyen a legtöbb háztartási gép, a mindennapi kényelmet, vagy a társadalom fenntartása

szempontjából is fontos közberendezés (pl.: tömegközlekedési járművek elektromotorjai, elektromos távvezetékek, a fémkereső detektorok).

Mindezek a sugárzások a nem-ionizáló sugárzásokhoz tartoztak. Számos forrás van környezetünkben, ahonnan ionizáló EM sugárzások érhetnek. Ezek közül a legintenzívebbek a természetes radioaktivitással kapcsolatosak. Ezekkel a következő fejezetben foglalkozunk. Meg kell azonban említenünk, hogy az egészségügy gyakorlata diagnosztikai és terápiás céllal széles körben alkalmaz ionizáló EM sugarakat. Ilyen diagnosztikai eljárások a Röntgen-átvilágítás, vagy a computer-tomográf felvételek. Ezekkel élete során előbb, vagy utóbb mindenki találkozik.

#### 11.2.4. Az EM sugárzások sugár-egészségügyi problémái

Az EM spektrum egyes részei sugár-egészségügyileg eltérő tartományok. Ezzel kapcsolatban rengeteg kérdés merül fel.

- Az egyes tartományokban melyek a biológiai rendszerekre vonatkozó káros jelenségek?
  - Melyek a káros jelenségek kialakulásának feltételei?
  - Milyen mennyiségekkel jellemezhetjük az egyes besugárzási folyamatokat?
  - Milyen legyen az egyes hullámhossz-tartományba eső sugárzások legcélszerűbb sugárzásmérése, dozimetriája?
  - Hogyan kell a legcélszerűbben védekezni a káros jelenségekkel szemben?

Ezek csupán a legfontosabb kérdések voltak, de az ezekre adható válaszok még részletes elemzést követelnek. Az azonban bizonyos, hogy a környezeti hatások és a sugár-egészségügyi vonatkozások szerint más-más tulajdonságú tartományokat különböztethetünk meg. Ezek külön tárgyalandók.

- Az alacsony frekvenciák (<3 kHz) tartománya.
- Nagyfrekvenciás terek (10 kHz — 300 GHz, ami energiában neV-tól meV kvantumenergiáknak felel meg).
- Optikai tartomány, ami felöleli az infravörös, a látható és az ultraibolya sugárzásokat (hullámhosszban  $1\text{mm} > \lambda > 100\text{nm}$ , frekvenciában 300GHz-től 3PHz)
- Ionizáló sugárzások (Röntgen, gamma sugárzás,  $\lambda > 1\text{nm}$ ).

Az EM sugarakkal főleg sugár-egészségügyi téren kapcsolatos kérdések a közérdeklődés fókuszában vannak. A kutatások azonban általában nehezek, idő és forrásigényesek.

### 11.3. A természetes radioaktív sugárzások

Környezetünkben jelen vannak a természetes okú radioaktív sugárzások is. Ezeknek közös jellemzője, hogy energiájuk nagyobb, mint az ionizáláshoz szükséges  $\sim 10\text{eV}$ . A radioaktív sugárzások lehetnek részecske és EM sugárzások egyaránt, amelyek energiája általában nagyságrendekkel meghaladja az ionizáláshoz szükséges energiát.



A radioaktív atommagok bomlások három fajtáját ismerjük.

- Az  $\alpha$ -bomlásnál egy két protonból és két neutronból álló  ${}^4\text{He}$  atommag, az un.  $\alpha$  részecske hagyja el az atommagot. A bomlásnál a bomló atommag tömegszáma 4-el, a rendszáma 2-vel csökken.

- A negatív  $\beta$ -bomlásnál a bomláshoz vezető kölcsönhatás pillanatában keletkezett elektron és antineutrínó távozik. Ilyenkor az atommag tömegszáma változatlan marad, a rendszáma pedig eggyel nő.

- A  $\gamma$ -bomlásnál egy EM kvantum keletkezik, de az atommag maga változatlan marad.

Az atommagokban a protonokat és a neutronokat az un. erős kölcsönhatás rendezi egységbe. Ennek a kölcsönhatásnak ugyan rövid (néhányszor  $10^{-15}$  m) a hatótávolsága, de olyan távolságokon, amely az atommagban lévő protonok és neutronok átlagos távolságát jellemzi, mintegy 20-szor erősebb, mint az EM kölcsönhatás. Így az atommagokban óriásiak a nukleonok kötési energiái, az atommagok átalakulásánál mintegy 6 nagyságrenddel nagyobb energia szabadul fel, mint az atomburok átalakulásánál, ami a kémiai folyamatokat jellemzi. Így az atommagok bomlásakor minden esetben ionizáló sugárzás hagyja el az atommagot.

A környezetünkben előforduló ionizáló sugárzásokat eredetük szempontjából több csoportba oszthatjuk. Ezek a hosszú felezési idejű **izotópok**, a kozmikus sugárzás, a Földön folyamatosan keletkező izotópok és az ember által előállított, szétszóródott radioaktivitás.

### 11.3.1. A hosszú felezési idejű radioaktivitás a Földön

Ebbe a csoportba azok a radioaktív sugárzó izotópok tartoznak, melyeknek olyan hosszú a felezési idejük, hogy túléltek az atommagok kialakulása óta eltelt időt. A tudomány mai ismeretei szerint a Föld anyaga mintegy 6 milliárd évvel ezelőtti szupernóva robbanásban keletkezett, a Föld 4,5 milliárd éves. A máig sugárzó izotópok felezési idejének a milliárd év nagyságrendbe kell esnie. Itt kell tárgyalnunk azokat a radioaktív izotópokat is, amelyeknek maguknak esetleg sokkal rövidebb a felezési idejük, azonban bomlástermékei hosszú felezési idejű izotópoknak, azokkal együtt egy un. radioaktív családot képviselnek.

Láttuk, hogy a radioaktív bomlásoknál a tömegszám vagy 4-el változik, vagy nem változik. Így az egy bomlási családba tartozó izotópok tömegszámánál a 4-el való osztás utáni maradék azonos. Ezért a nehéz bomló izotópoknál 4 radioaktív család alakulhat ki.

- A  $4n$  típusú család anyaeleme a tórium 232-es izotópja ( ${}^{232}_{90}\text{Th}$ ). Ennek felezési ideje 14 milliárd év. A tórium-232 és leányelemei alkotják a tóriumsort.

- A  $4n+1$  típusú tömegszámmal bíró izotópok közül a leghosszabb felezési idejű a neptúnium-237 ( ${}^{237}_{93}\text{Np}$ ). Ennek felezési ideje csak 2,2 millió év, sokkal rövidebb, mint a Föld életkora. Ezért ilyen radioaktív család a természetben nem létezik.

- A  $4n+2$  típusú magok közül a leghosszabb felezési idejű az urán-238 ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ ), amelynek felezési ideje 4,5 milliárd év. A hozzá tartozó radioaktív család az uránsor.

- A  $4n+3$  formában felírható izotópok közül a leghosszabb felezési idejű az urán-235 ( ${}^{235}_{92}\text{U}$ ). A felezési ideje 700 millió év, éppen elegendően hosszú ahhoz, hogy még létezhessen a Földön. Ezt a radioaktív családot aktíniumsornak nevezzük.

Urán és tórium sok van a Földön. Az urán **ppm** mennyiségben szinte mindenütt megtalálható. A nagy felezési idő különbségek miatt a 238-as tömegszámú uránizotóp részaránya sokkal nagyobb, mint az U-235-ös izotópé, 99,3% szemben az utóbbi 0,7%-os részarányával.

Érdemes megjegyezni, hogy az uránsor tagja a radon ( $^{222}_{86}\text{Rn}$ ), amelynek felezési ideje 3,8 nap. A radon — szemben a bomlássor többi elemével — nemesgáz. A radont kémiai kötések nem akadályozzák abban, hogy a környezettől függően kedvező esetben akár több 10 métert is migráljon, kijusson a talajból. Bomlásakor polónium-218 izotóp keletkezik, amelyik kémiaiilag aktív. Ha a levegőben bomlott el a radon, akkor a leányeleme általában a levegőben lebegő egyik aeroszolra ül rá. Az így radioaktívvá vált aeroszol viszont belélegezve bent maradhat a tüdőben. A radon komoly sugár-egészségügyi kockázatot jelenthet.

Az előbb tárgyalt nehéz izotópokon kívül a Földön még mintegy 20 hossz felezési idejű, természetes radioaktív izotópot ismerünk. Ezek közül környezeti szempontból kiemelkedik a kálium-40 izotóp ( $^{40}_{19}\text{K}$ ), amelynek felezési ideje 1,28 milliárd év. Ez a kálium izotóp 0,012%-ban jelen van a kálium természetes izotóp-összetételében és gyakorlatilag mindenütt jelen van. Érdemes megjegyezni, hogy a kálium-40 bomlásterméke az argon-40 ( $^{40}_{18}\text{Ar}$ ), amely a légkör oxigénen és nitrogénen kívüli harmadik összetevőjének, az argonnak 99,6%-át adja.

### 11.3.2. A kozmikus sugárzás

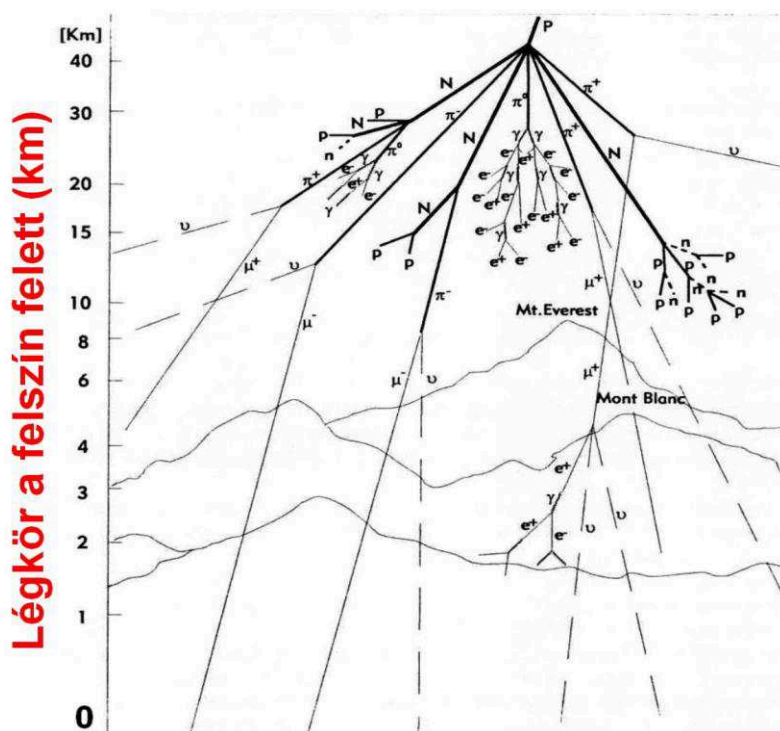
A világűrben a Földet folyamatosan nagy energiájú sugárzás éri. Ennek oka az, hogy különböző violens asztrofizikai folyamatokban nagy energiájú részecskék, elsősorban protonok és gamma fotonok keletkeznek, amelyek elérhetik a Földet. A kozmikus sugárzás vizsgálata a fizika egyik érdekes területét jelenti.

A kozmikus sugárzás a Földre a légkörön át érkezik. A nagyenergiájú részecskék, főleg a protonok a sztratoszférában magreakciókat hoznak létre, amelyből ún. kozmikus záporok indulnak el (11.3.1. ábra). A kozmikus záporokból rengeteg nagyenergiájú részecske (protonok, neutronok, pionok, mümezonok stb.) indul, amelyek elérik a Föld felszínét és hozzáadódnak a környezeti sugárzásokhoz. A természetes sugárzási terhelés mintegy 8%-át a kozmikus sugárzás okozza.

### 11.3.3. A folyamatosan keletkező radioaktív izotópok

Néhány radioaktív izotóp azért van jelen környezetünkben, mert folyamatosan keletkeznek. Ezek közül a két legismertebb és környezettudományi szempontból fontos atommag a trícium ( $^3_1\text{H}$ ) és a radiokarbon ( $^{14}_6\text{C}$ ).

Mindkét izotóp úgy keletkezik, hogy a sztratoszférában nagyenergiájú kozmikus protonok nagyenergiájú neutronokat hoznak létre. Ezek a neutronok azután a légköri nitrogénnel és oxigénnel kölcsönhatva hozzák létre a tríciumot (t) és radiokarbont (a  $^{14}\text{N}(n,t)^{12}\text{C}$  és az  $^{16}\text{O}(n,t)^{14}\text{N}$  reakciókkal a tríciumot, a  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  folyamattal pedig a radiokarbont).



11.3.1. ábra: A nagyenergiájú kozmikus sugárzásban érkező részecskék kozmikus záporokat váltanak ki.

A trícium a hidrogén radioaktív izotópja,  $\beta$ -bomlással bomlik 12,3 év felezési idővel és 18,6 keV teljes bomlási energiával. A trícium bomlásának megfigyelését a környezeti kutatásokban vizek élettartamának meghatározására szokták alkalmazni. Nehézséget okoz azonban az, hogy a tríciumra nincsen hatékony keveredési mechanizmus és ezért az egyenetlen sűrűségű keletkezése miatt a kiindulási koncentrációt nem könnyű megállapítani.

A radiokarbon felezési ideje 5730 év, teljes bomlási energiája 156 keV. A radiokarbon keletkezése után gyakorlatilag azonnal széndioxidként a levegő része lesz. A széndioxidra hatékony természetes keveredési mechanizmus létezik, ezért a radiokarbon koncentrációja a Föld egész légkörében azonos. A radiokarbon a fotoszintézis útján beépül a növényekbe és bejut a táplálékláncba. Így az anyagcserét folytató élőlényekben lévő a szerves szénben kialakul egy egyensúlyi aktivitás. A radiokarbon miatt mindannyiunk teste radioaktív, a bennünk lévő szén egy grammjára nézve 13,5 Bq/g aktivitás van jelen. Ez az egyensúly mindaddig fenn áll, ameddig a biológiai rendszer anyagcserét folytat. Ha az anyagcsere megszűnik, vagyis a szervezet meghal, akkor a földi maradványok széntartalmában csak csökkenhet a radiokarbontól származó aktivitás. Ez lehetőséget ad kormeghatározásra, amely tekintettel az 5730 éves felezési időre, a történelmi korokra terjed ki. — A kormeghatározáson kívül a radiokarbon több más környezettudományi jellegű vizsgálatban felhasználásra kerül. Ilyen például a légkör és az óceánok széndioxiddal kapcsolatos kölcsönhatásának vizsgálata.

#### 11.3.4. Civilizációs eredetű radioaktivitás

A bioszféra radioaktivitásához hozzájárult az ember is. A II. Világháború utáni, az akkori szuperhatalmak, a Szovjetunió és az Egyesült Államok közötti fegyverkezési verseny folyamán egészen 1963-ig, a légtér atomfegyver-kísérletek megtiltásáig<sup>1</sup> egy sor légtér

<sup>1</sup> 1963-ban kötötték meg az Atomstop egyezményt. Ehhez az egyezményhez Magyarország is csatlakozott.

kísérletet hajtottak végre az atomfegyverkezésben részt vevő hatalmak. E kísérletek során, de más a nukleáris technikák elterjedésével kapcsolatban, valamint az atomenergia felhasználásával összefüggésben komoly mennyiségű radioaktivitás került ki a bioszférába. E radioaktivitások két prominens izotópja a hasadáskor a többiekénél nagyobb valószínűséggel keletkező cézium-137 ( $^{137}_{55}\text{Cs}$ ) és a stroncium-90 ( $^{90}_{38}\text{Sr}$ ). Mindkettő felezési ideje 30 év körül van (a pontos felezési idők 30,07, illetve 28,78 év).

A dóziseket a fegyverkísérletek, valamint az egyéb módon, például az eddigi két legnagyobb atomerőmű baleset, a csernobili (1986) és a Japánban lévő fukusimai (2011) katasztrófák által a bioszférába juttatott radioaktivitások együttes járuléka határozza meg.

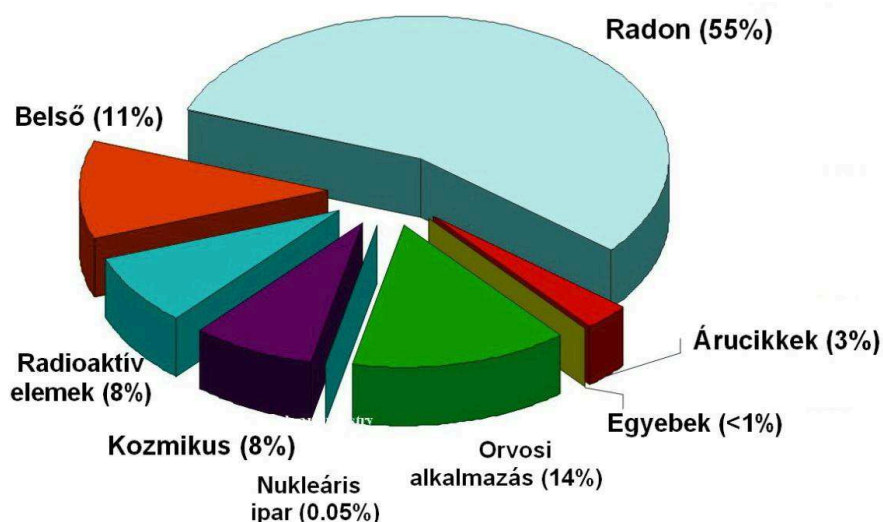
A dózis a civilizációs eredetű radioaktivitástól kevesebb, mint ezred része a természetes radioaktivitástól származó dózissnak.

#### 11.4. A környezeti sugárzások hatásainak összefoglalása

Az EM és a radioaktív sugárzások a természetben és környezetünkben mindenütt jelen vannak, a sugárzások a természet részei. Így a környezet teljes sugármentesítése értelmetlen és lehetetlen illúzió.

A biológiai rendszerekre való hatásuk szempontjából az a lényeges kérdés, hogy a sugárzások ionizálnak-e vagy nem. Az ionizáló sugárzásoknak jelentős biológiai hatásuk van, amelyeket a tudomány jól ismer. Az ionizáló háttérsugárzások forrásait azonosítani tudtuk. Az embert ért háttérsugárzások eredetét a 11.4.1. ábrán foglaltuk össze.

A 11.4.1. ábrából látható, hogy az ionizáló sugárzások dózisének több, mint a felét a radonterhelésből származtatjuk. Érdeemes felhívni a figyelmet arra, hogy a modern világban nem elhanyagolható részarányt jelentenek az orvosi alkalmazásból származó sugárterhelések. A 14%-os részarálynál felmerül az a kérdés, hogy egészségügyi szempontból vajon valóban előnyösebb-e a dózisterhelés vállalása, mint az a kár, amit az ionizáló sugarakkal történt besugárzás okoz.



11.4.1. ábra: A radioaktív háttér-sugárzás forrásai. A „Belső” jelölésű forrás-rész a szervezetben természetes okok miatt jelenlévő radioaktív izotóptól származik.

A környezeti radioaktív háttér-sugárzásoktól Magyarországon évente  $\sim 3$  mSv dózist kapunk. Ekkora sugárzástól a sugárbiológiai kutatások eredménye szerint  $\sim 1.5 \cdot 10^{-4}$  a valószínűsége annak, hogy az egyed a következő 20 évben rákot fejleszt ki.

Az ionizáló sugárzások elleni védekezésnek nemzetközi ajánlások alapján jól szervezett rendszabályai vannak. — A nem-ionizáló sugárzások biológiai hatása sokkal kisebb. Ugyanakkor számos kérdést vetnek fel azok a tények, hogy az emberiség nagy többsége folyamatosan ki van téve nem-ionizáló sugárzásoknak. A környezeti sugárzások témakörénél felvetett problémák megoldásánál nemcsak természettudományos szempontok, de társadalmi vonatkozások is erősen szerepet játszanak.

## 11.5. Függelékek

### 11.5.1. Bibliográfia

Környezet- és természetvédelmi lexikon I. II. kötetek, főszerkesztő: Láng István, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2002

Kiss Ádám, Tasnádi Péter: Környezetfizika

### 11.5.2. Fogalomtár

**Compton-effektus:** az a jelenség, hogy az anyagok nagy energiájú ( $> 1$  MeV) gamma sugarakkal történő besugárzásánál egy nagy energiájú elektron kilökése mellett a besugárzónál nagyobb hullámhosszú, másodlagos gamma sugárzás is fellép

**eV (elektronvolt), keV (kiloelektronvolt), MeV (megaelektronvolt):** eV az az energia, amelyet egy elektron 1V potenciálkülönbségű pontok között elmozdulva nyer, a keV ennek ezerszerese, a MeV ennek a milliószorosa

**izotóp:** azonos rendszámú, de különböző neutronszámú atommagok

**Kelvin hőmérséklet ( $K$ ):** a testek un. abszolút hőmérséklete, amely az abszolút 0-tól, -273,15 °C-tól számított hőmérsékletet jelent

**ppm (*part pro million*):** egy milliomod rész

**Röntgen-sugarak:** atomfizikai folyamatokban előállított nagy energiájú ( $\sim 1$  keV-től 40-60 keV) elektromágneses sugárzás

**Sievert ( $Sv$ ):** a sugárvédelmi dózis egysége; a félhalálos dózis emberre  $\sim 4$  Sv egészségteljes besugárzás esetén

**spektrális teljesítménysűrűség:** az EM sugárzások teljesítményének hullámhossz (frekvencia) szerinti eloszlása.

## 12. AZ EMBERISÉG SORSKÉRDÉSE: AZ ENERGIA (KISS ÁDÁM)

A civilizált emberi társadalmak bonyolult kapcsolatainak fenntartásához az egyes ember anyagi szükségleteinek kielégítése mellett társadalmilag és gazdaságilag fontos rendszerek kifejlesztésére, fenntartására és működtetésére van szükség. Mindehhez sok más egyéb előfeltétel és követelmény mellett folyamatos energiaellátásra is szükség van. Ha ebből a gondolatból kiindulva elemezzük egyedi és társadalmi életünket, belátjuk, hogy napjaink életének minden mozzanatában folyamatosan szükségünk van energiára. Ráadásul a környezetünkben lévő minden tárgy, berendezés megépítése is energiát követel előállításának során.

Az energiaellátást hétköznapjainkban olyan természetesnek vesszük, hogy csak akkor tűnik fel hiánya, ha egy este áramhiány miatt nem tudjuk bekapcsolni a televíziót, felengedett a mélyhűtő, vagy nem lehet üzemanyagot kapni az autóból. Pedig a folyamatos és biztonságos energiaellátás egyáltalán nem természetes, hanem komoly társadalmi együttműködés eredménye.

Az energetikáról szóló fejezetnek hármas célja van:

- megmutatni az energiafogyasztás szerepét a társadalom alakításában,
- bemutatni jelenlegi energiaellátási rendszerek nehézségeit és azt, hogy azok hosszú távon fenntarthatatlanok,
- körvonalazni a biztonságos energiaellátás jövőbeni kihívásait.

Tárgyalásunk fókuszába a problémák megismertetését helyezzük. Rá kívánunk mutatni arra, hogy a jelenlegi energiaellátás is rengeteg bizonytalanságot és kockázatot tartalmaz. A nehézségek, a most látható fejlődési irányok bizonytalansága és az emberi társadalmak már most meglévő óriási energiaéhsége együttesen arra utalnak, hogy az energetika, a biztonságos, az igényeknek megfelelő energiaellátás az emberiség egyik sorskérdésévé vált.

### 12.1. Az energia és energetika fogalmai, alkalmazott egységei

Az energia a természettudományokban és a műszaki életben munkavégző képességet jelent. A fizika fejlődése során az eredetileg a mechanikai munkával kapcsolatban bevezetett mennyiség más jelenségkörökben is hasznosnak bizonyult. A kísérleti tapasztalat megmutatta, hogy az energia fogalmát célszerű kiterjeszteni a hőtani, az elektromágneses, atomfizikai és részecskefizikai jelenségekre és rendszerekre, általában minden vizsgált jelenségkörre. Az energia fogalmát a természettudomány ma széles értelemben értelmezi, az energiatípusok egymásba történő átalakulásának folyamatait érti és a gyakorlatban is felhasználja. A tágabb értelemben vett energia- és tömegmegmaradás a mai fizika egyik legfontosabb, bizonyított alaptörvénye.

Az energetika a társadalmak energiatermelését és energiaellátását jelenti. Az energetika hangsúlyosan nem fizika, hanem a társadalmi-gazdasági élet fontos önálló területét jelenti. Az energetika használja a fizika által bevezetett egységeket.

Az energia alapegysége a Joule (J). 1 J az a munka, amit 1 Newton erő irányában elmozdulva egy méter úton végez ( $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$ ). Az energetikában széles körben használt mennyiség a kilowattóra, amely 3,6 MJ-nak felel meg<sup>1</sup>. — Néha használják még a kalóriát, jele: Kal=4,19 kJ.

A leggyakrabban elkövetett hiba az energetikában, hogy a teljesítményt és a munkát összekeverik. A teljesítmény az időegység alatt elvégzett munka. Egysége a Watt (W)=1J/s, vagyis 1W teljesítménynél 1J munkát 1s alatt végzünk el.

Az energiahordozók, a szén, a kőolaj és a földgáz minősége függ attól, hogy honnan származik, nem pontosan egyformák, energiataralmuk is más és más lehet. — A szén esetén olyan nagyok az eltérések, hogy célszerű volt bevezetni az Egyezményes Tüzelőanyag (ETA) fogalmát:

1 ETA t szén energiataralma  $7 \cdot 10^6 \text{ Kal} = 8140 \text{ kWh} = 29310 \text{ MJ}$ , ami  $\sim 30 \text{ GJ}$ .

Átlagosan a kőolaj energiataralma  $\sim 44 \text{ MJ/kg}$ , a normál állapotú (1 atmoszféra nyomás,  $0^\circ \text{C}$  hőmérséklet) földgázé  $\sim 40 \text{ MJ/m}^3$ . Így körülbelül egyforma az energiataralma:

1 t olaj (44 GJ)  $\sim 1160 \text{ m}^3$  (normál állapotú) földgáz ( $39,8 \text{ MJ/m}^3$ )  $\sim 1,5 \text{ ETA t szén}$  (29,3 GJ/t)

## 12.2. Az energiafogyasztás és az emberiség civilizációs fejlődésének kapcsolata

Az emberi történelem során a civilizációs változások és az egy fő által átlagosan ugyanannyi idő alatt elfogyasztott energia mennyisége érdekes kapcsolatot mutat: ahogy az emberi társadalmak egyre bonyolultabbak lettek, a civilizáció fejlődött, úgy növekedett a fejenkénti energiafogyasztás. Ez a látszólag teljesen független két szempont szorosan összekapcsolódott és a fejenkénti energiafogyasztás jól jellemzi a civilizációs állapotot.

Arról, hogy a régmúlt emberei mennyi energiát fogyasztottak csak a megfelelő korszak tanulmányozásával szerezhethetünk ismereteket, végezhetünk becsléseket. Fel kell idéznünk, hogy hogyan élhettek elődeink és mindennapi életük elképzelésével tehetünk arra becsléseket, hogy különböző célokra mennyi energiát fogyaszthattak.

A 12.1. táblázat egy ilyen, megfelelő óvatossággal kezelendő becslést tartalmaz öt különböző társadalomról: a mintegy 10 ezer évvel ezelőtti vadásztársadalomról, az 5 ezer évvel ezelőtti földművelő társadalomról (Mezopotámia), egy 500 évvel ezelőtti fejlett középkor végi társadalomról (XV-XVI. századi Németalföldről), a XIX század eleji ipari társadalomról és végül a mai világ legfejlettebb társadalmáról, napjaink Egyesült Államáról. A táblázatban felölelt időszak 10 ezer év mintegy 4-500 emberöltőt (20-25 év generációs időt számítva) tehet ki, amely rövid ahhoz, hogy ezalatt az emberi faj komoly változáson esett volna át. Tíz évszázad előtt élt őseink társadalma ugyanolyan emberekből állt, mint a maiak.

<sup>1</sup> Megjegyezzük, hogy az energetikában gyakran használják a kJ, MJ, GJ, TJ, PJ és EJ mennyiségeket, amelyek rendre  $10^3$ ,  $10^6$ ,  $10^9$ ,  $10^{12}$ ,  $10^{15}$  és  $10^{18}$  joule-t jelentenek.

## ENERGIAFOGYASZTÁS ÉS CIVILIZÁCIÓ

Egység: MJ/fő/nap (4.2MJ=1000Kal)	élelem (ember+ állatok)	háztartás, kereske- delem	ipar, mező- gazdaság	szállítás, híradás	X
Vadásztár. (8000 B.C.)	8.4				1
Földművelő társ. (3000 B.C.)	13	8			2.5
Középkor (XV-XVI szd.)	25	50	29	4	13
Ipari társad. (Anglia, 1900)	29	134	100	59	38
Információs társ. (USA, XXI. szd.)	42	293	381	297	120

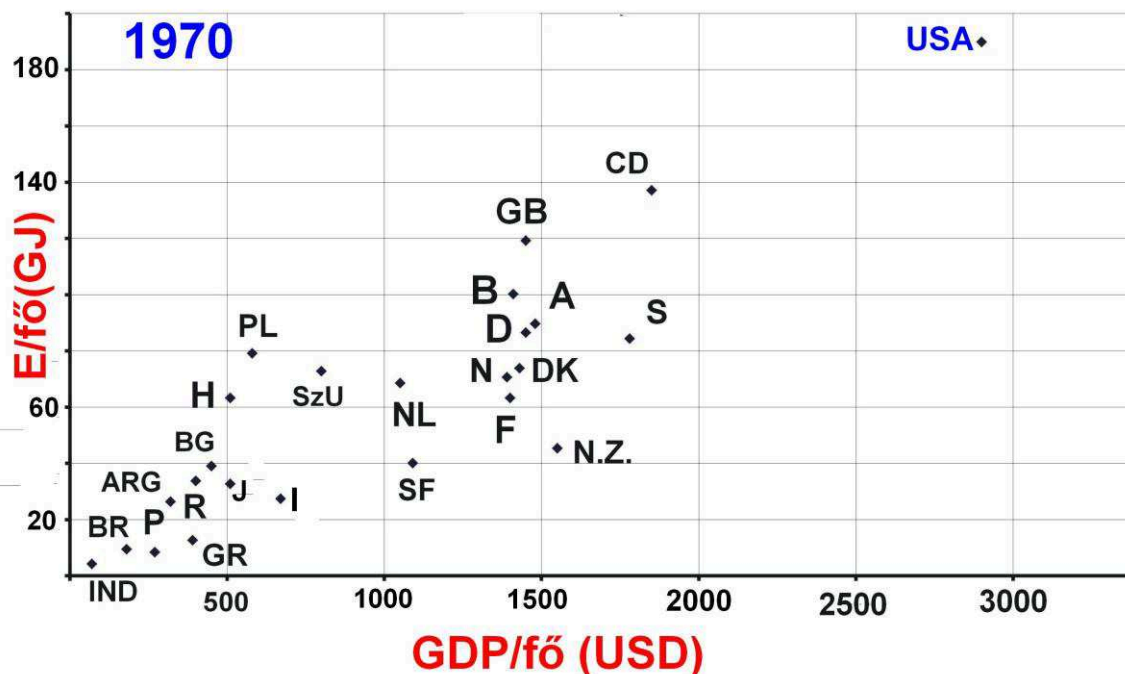
*12.1. táblázat: A fejenkénti energiafelhasználás változása a történelem során*

A táblázat első oszlopában az ember és domesztikált háziállatai által elfogyasztott élelem energia-egyenértékét, a következő háromban a társadalmi munkamegosztás három szektorában, a háztartásban és a kereskedelemben, az ipar és mezőgazdaságban, illetve a szállítás és híradásban átlagosan felhasznált energia becsült fejenkénti értékét mutatja. Az utolsó oszlopban azt látjuk, hogy a korai vadásztársadalom fejenkénti energiafogyasztásához képest hányszorosára növekedett az energiaigény. A táblázat (amelynek adatai az ókori és a középkori társadalmakra vitatható becslések) arra hívja fel a figyelmet, hogy a civilizáció változását, az emberek közötti kapcsolatok bonyolultabbá válását jól jellemzi, hogy az átlagos fejenkénti energiafogyasztás drámaian megnőtt. A mai világ legfejlettebb társadalmában, az Egyesült Államokban több mint két nagyságrenddel több energiát fogyaszt egy személy, mint a vadásztársadalom primitív körülményei között.

Az értéktermelés és az energiafogyasztás kapcsolata is figyelemre méltó. A 12.2.1 ábra az egy főre eső egy év alatt megtermelt hozzáadott érték (GDP/fő) függvényében mutatja be a szintén egy főre eső energiafelhasználást néhány országban. A kiválasztott év, amire az adatok vonatkoznak 1970. Ekkor még, az első olajválság előtt, lényegében mindenütt olcsó energia állt rendelkezésre. Az ábra adatai egyértelműen mutatják a korrelációt a két mennyiség között: ahol magasabb az egy főre eső jövedelem, ott általában magasabb az egy főre számított átlagos energiafogyasztás is. Az adatok egyértelműen mutatják az Egyesült Államok akkori kiemelt helyzetét, mind a fejenkénti jövedelem, mind az energiafogyasztás messze a többi országhoz képest. Ha az USA pontját összekötjük az origóval, akkor a többi ország adatai ezen egyenes körül szóródnak. Az, hogy az egyes társadalmak adatai melyik irányban térnek el az előbbi egyenestől, az olyan tényekre utal, amelyeket immár történelmi távlatból is meg lehet ítélni. Ha a nehézipar dominált (pl.



politikai okok miatt), akkor kevesebb érték társult a magasabb energiafogyasztáshoz (ld. a volt Szovjetunió és a volt szocialista országok), ha pedig a könnyűipar és mezőgazdaság volt erős, akkor a jövedelemhez kevesebb energiafogyasztás társult (pl. Új-Zéland, Görögország).



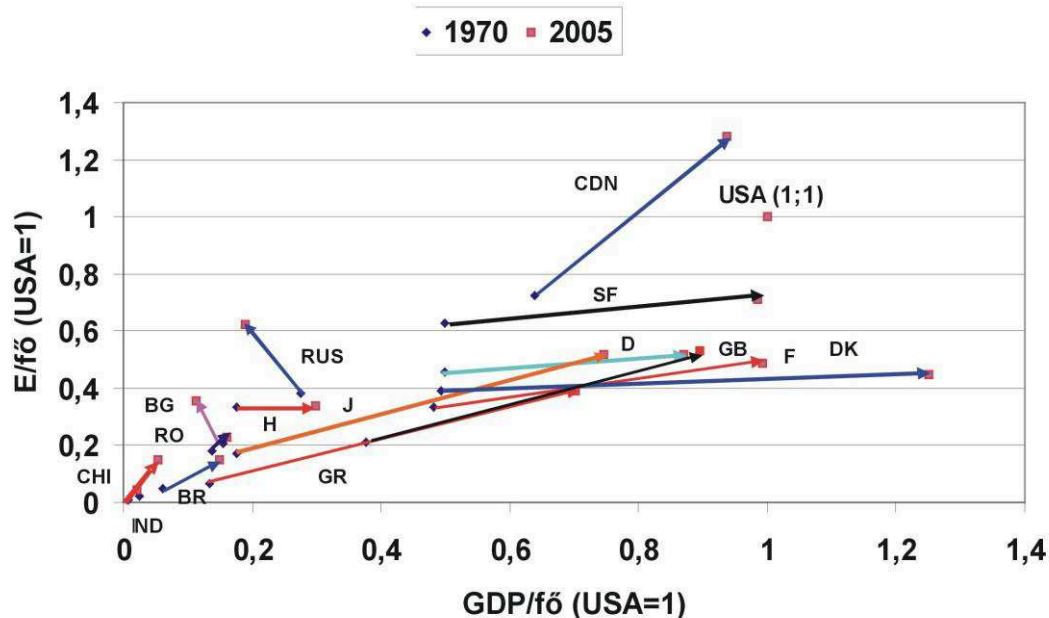
12.2.1. ábra: Az egy főre eső jövedelem (US dollárban) és az egy főre eső energiafogyasztás (GJ-ban) kapcsolata 1970-ben. Az adatok még az 1973-as első olajválság előtti viszonyokat tükrözi.

Legkésőbb 1973-ban az első olajválsággal kapcsolatban mindenki számára világos lett az energetika sorsdöntő szerepe és az, hogy a világban — geopolitikai okok miatt is — számos olyan ország és térség van, amelyeknek a biztonságos energiaellátása veszélybe kerülhet. Ráadásul az is nyilvánvaló, hogy az ásványi energiahordozók kitermelhető mennyisége is véges. A különböző társadalmak másképp és másképp válaszoltak az energiaválságra. Az 1970-ben még olyan egyszerűnek látszó összefüggések 40 év alatt bonyolultabbak lettek és a világ is megváltozott.

A 12.2.2 ábra azt mutatja, hogy miként változott néhány társadalom Egyesült Államokhoz képesti egy főre eső jövedelme és energiafelhasználása 1970 és 2005 között. Az ábrán értelemszerűen az USA-t az (1;1) pont jelzi. A többi országot egy-egy nyíl jellemzi, a nyíl az 1970-es adatokból indul és a nyíl feje a 2005-ös adatoknál van. Mindegyik nyíl külön-külön egy-egy, a kiválasztott ország történelmi változására utal és mutatja, hogy az egyes társadalmak egészen különböző módon voltak képesek szembenézni az energiaválság kihívásával.

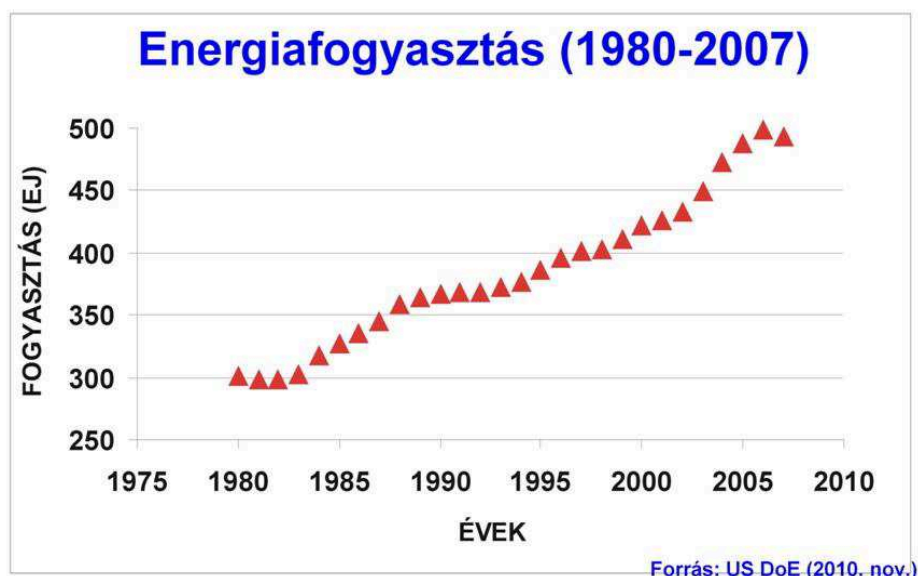
A 12.2.2. ábra világosan mutatja, hogy az Egyesült Államok helyzete 1970 és 2005 között jelentősen megváltozott. Az amerikai állampolgároknak ma messze nincs olyan kiemelkedő helyzetük, mint a korszak elején. Számos ország megközelítette az egy főre eső jövedelmükben és ezek fejenkénti energiafogyasztása a legtöbbször lényegesen az USA adata alatt maradt. Így például a Dániához (DK-jelzésű) tartozó nyíl a többihez képest hosszú és majdnem párhuzamos az x-tengellyel. Ez azt jelenti, hogy a dánok úgy növelték jelentősen, több, mint kétszeresre a jövedelmüket az amerikaiakhoz képest, hogy közben a fejenkénti energiafogyasztásuk lényegében ugyanolyan arányú maradt. (Persze ez

nem azt jelenti, hogy Dánia energiafogyasztása abszolút értékben nem nőtt, hiszen az ábrán csak viszonyítási számok szerepelnek.) — A japánok (J) és a finnek (SF) adatai szintén gazdasági sikertörténetekről beszélnek. — A kelet közép-európai országokat (köztük Magyarországot is) rövid nyilak jellemzik, azt mutatva, hogy 1970 és 2005 között az Egyesült Államokhoz viszonyított helyzetük keveset változott.



(Forrás: US DoE és IMF)

12.2.2. ábra: Néhány kiválasztott ország egy főre eső jövedelmének és fejenkénti energiafelhasználásának változása az Egyesült Államok adataihoz képest 1970 és 2005 között<sup>2</sup>.

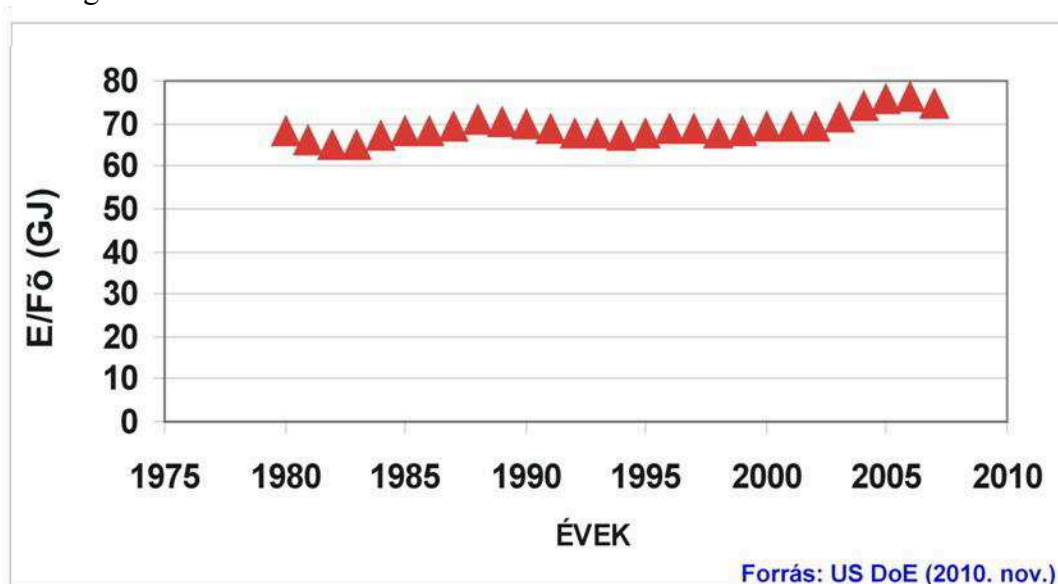


12.2.3. ábra: A Föld társadalmainak energiafogyasztása 1980 és 2007 között.

<sup>2</sup> A DoE, Department of Energy: az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma, IMF, International Monetary Fond: Nemzetközi Valutaalap.

A 12.2.3. ábrán a Föld országainak összes energiafogyasztását mutatjuk be 1980 és 2007 között. Az adatsor világosan mutatja, hogy bár az 1970-es évek kezdete óta minden politikus tudta, hogy az energiafogyasztást vissza kellene szorítani, az energiafogyasztás ennek ellenére dinamikusan növekedett, az 1980 körüli mintegy 300 EJ-ről közel 500 EJ-ra 2007-re. Ez közel kétharmados növekedést jelent a vizsgált időszak alatt.

Miért növekszik — a legtöbb politikus és vezető kimondott szándéka ellenére — az energiafogyasztás? Ahhoz, hogy erre a kérdésre magyarázatot adjunk, akkor azokat a paramétereket kell keresnünk, amelyek magával a jelenséggel korrelálnak. A kiterjedt vizsgálatok egyetlen egy ilyen paramétert találtak. Bármilyen meglepő, de ez a paraméter a Földön élő emberek száma volt! A 12.2.4. ábra szépen mutatja, hogy az egész Földre átlagosan számított fejenkénti energiafogyasztás 1980 és 2007 között néhány százalékon belül állandó volt, értéke  $\sim 70$  GJ körül mozgott. Így a fő jelenség az összes energiafogyasztás növekedése mögött az, hogy Földünk lakossága szintén kétharmadával nőtt a vizsgált időszakban.

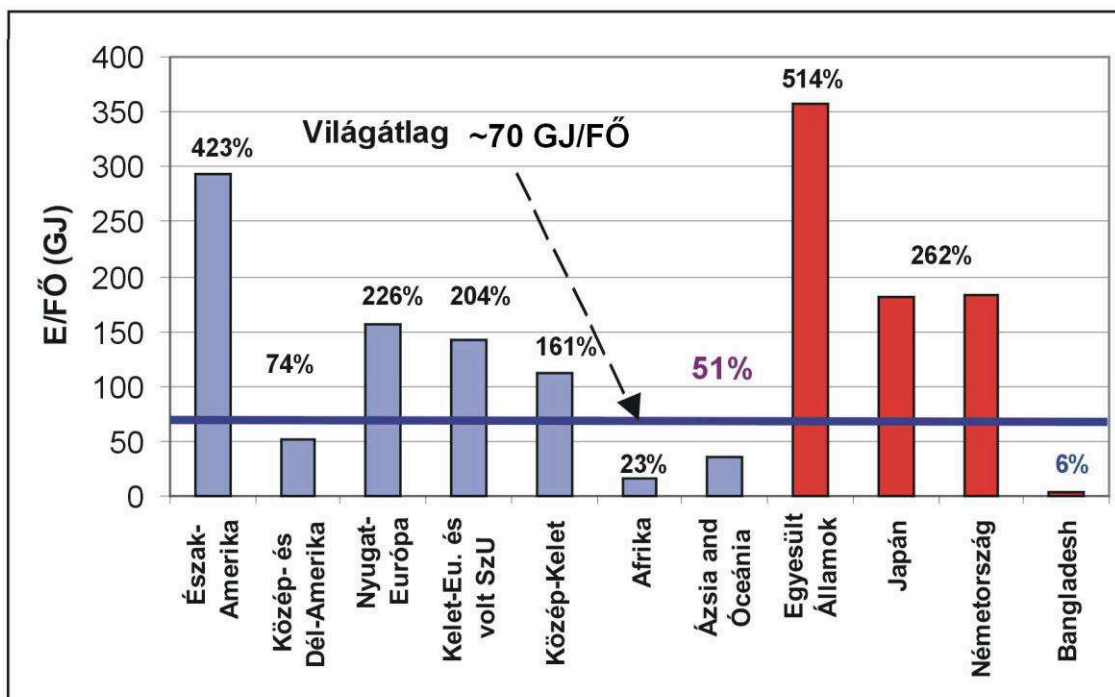


12.2.4. ábra: A Föld lakosainak egy főre számított átlagos energiafogyasztása 1980 és 2007 között.

A Föld lakosainak száma 2011-ben 6,9 milliárd fő volt. Ez a szám évente 70 millióval növekszik. A 12.2.4. ábrán látható erős korreláció arra utal, hogy ez rövid idő alatt megváltozni nem fog. Így ameddig a Föld népessége ilyen ütemben növekszik, addig az energiafogyasztás is várhatóan ugyanilyen ütemben növekedni fog.

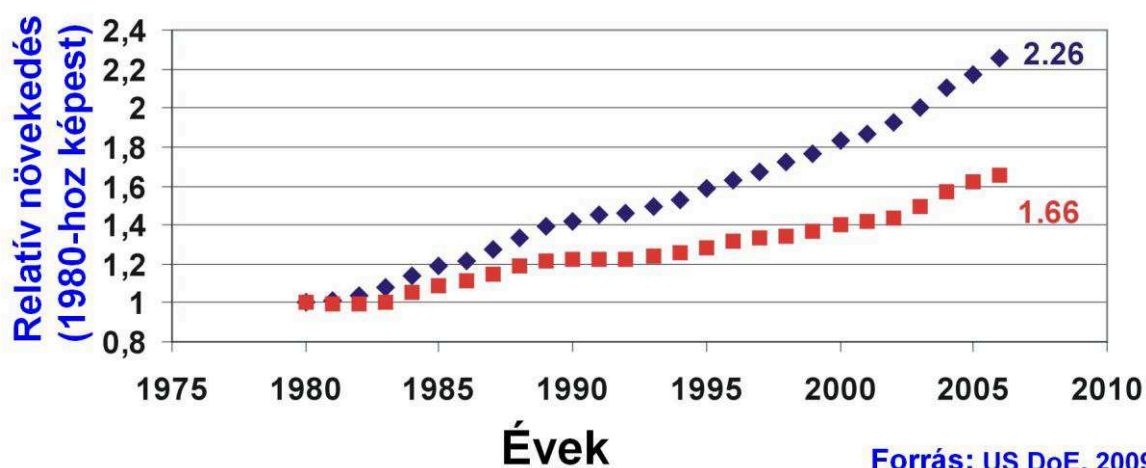
A Föld különböző régióinak az egy főre számított energiafogyasztása természetesen nagymértékben eltér egymástól. A tényleges energiafogyasztás ugyanis erősen függ a gazdasági teljesítménytől és az életszínvontól. Ebben pedig a földi régiók erősen eltérnek egymástól. A 12.2.5. ábra az egyes régióra vonatkoztatva mutatja be a fejenkénti energiafogyasztást. Látható, hogy messze az Észak-Amerikai régió energiafogyasztása a legnagyobb, több mint négyszer annyit fogyasztanak fejenként, mint a világtalag. Az európaiak több, mint kétszer annyit, az ázsiaiak, ahol pedig a Föld lakosságának 56%-a él csupán a felét. — Az országok közül egy főre számítva a legtöbb energiát az Egyesült Államokban fogyasztják a világtalagnak több mint ötszörösét, a legkevesebbet Banglades polgárai fogyasztanak, alig 6%-át világtalagnak. Érdekes megállapítani, hogy két olyan ország, Németország és Japán, amelyek a technikai színvonal közel azonos szintjén állnak,

de amelyek egymástól földrajzilag igen távol vannak, és amelyeknek hagyományai, kultúrája nagyon eltérnek egymástól, polgáraik mégis majdnem pontosan azonos mértékben fogyasztják az energiát.



12.2.5. ábra: A fejenkénti energiafogyasztás a Föld különböző régióiban és néhány kiválasztott országban.

A Föld különböző területei energiaigénye az 1980-as évek elejétől számítva jelentősen változott a többi területhez képest is. Kína például 1980 és 2010 között megnégyszerezte energiaigényét, és mintegy 20 EJ-ről közel 80 EJ-ra növekedett a fogyasztása. A kínai gazdaság figyelemre méltó fejlődése mellett meg kell említeni, hogy India is gyors ütemben bővíti gazdaságát, ami természetesen az energiaigények növekedésével jár.



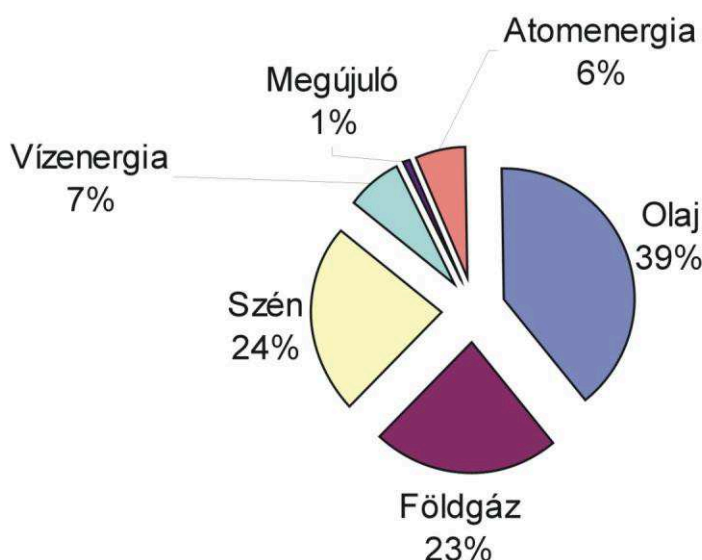
12.2.6. ábra: Az elektromos energia növekedése összes energiafogyasztásnál gyorsabban nőtt 1980 és 2006 között.

A mai fejlett világban szembeötlő az a tény, hogy az energiafogyasztáson belül jelentősen megnövekedett az elektromos energia szerepe. A 12.2.6. ábra összehasonlítva mutatja be, hogy míg a teljes energiafogyasztás 1980 és 2006 között 66%-al nőtt, az elektromos energia 2,26-szorosára emelkedett.

### 12.3. Az energiaellátás jelenlegi helyzete

A Föld társadalmainak jelenlegi (2011) energiafogyasztása ~500 EJ körül van. Ennek évi értéke tízezer dollár nagyságrendben van, ami óránként milliárd dolláros üzletet jelent. Így az energetika amellet, hogy a társadalmi-gazdasági élet kiemelt fontosságú eleme, a gazdaságnak is az egyik legfontosabb ágazata.

Miből elégíti ki az emberiség ezt az óriási energiaigényét? Az energiaellátás jelenlegi szerkezetét a 12.3.1. ábra mutatja be. Látható, hogy a 21. század első évtizedében is meghatározóak az ásványi források, a kőolaj, a földgáz és a szén. Együttesen mintegy 85%-os a részarányuk. Érdeemes megemlíteni, hogy bár az utolsó nyolc-kilenc évtizedben szinte minden megváltozott az energetikában, de a fosszilis energiahordozók részaránya ebben az időszakban mindig 85% körül volt.



12.3.1. ábra: Az energiaellátás primer források szerinti összetétele.

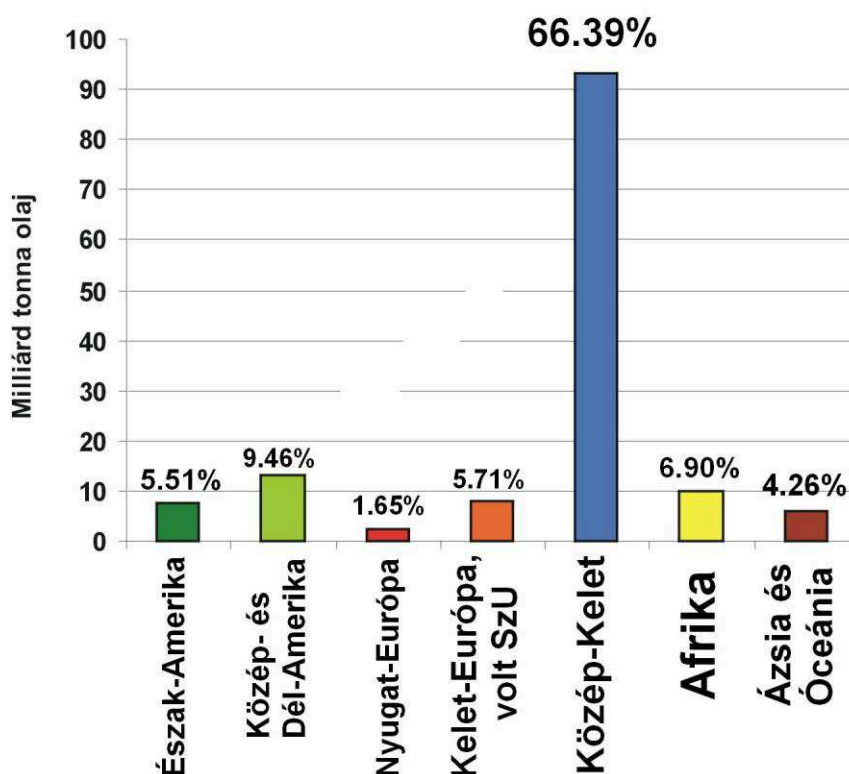
Egy ilyen összetételű energiaellátás esetén az ásványi energiaforrások felhasználható készleteinek meghatározása és elemzése központi kérdés. A készletek meghatározásával és annak megbízhatóságával kapcsolatban azonban több probléma is fellép.

- Mindenképpen kérdéses, hogy tudományosan mennyire bízhatunk meg a készletek becsléseiben? A szénkészleteket viszonylag egyszerű megbízhatóan meghatározni. Nagyobb a bizonytalanság a kőolaj és a földgázkészletekkel kapcsolatban a bonyolultabb geológia körülmények miatt.
- A készletek felhasználható részét befolyásolják technológiai körülmények. Fejlett technológiával történő kitermelésnél jelentős mértékben, akár kettes faktorial eltérhet a kitermelhető energia mennyisége ugyanarról a lelőhelyről.
- Végül nehézséget jelent, hogy egy-egy lelőhelyen meglévő készletek nagysága mindig fontos, többször politikai és gazdasági célokból manipulált, titokban tartott adat.

Úgy gondoljuk, hogy a becsült és alábbiakban közölt adatok kettes-hármas faktoron belül helyesek és semmiképpen nincsen bennük nagyságrendi tévedés. E szerint a bizonyított, még fel nem használt készletek energiatartalma

- a kőolajra nézve ~6000 EJ körül van, igen egyenetlen regionális eloszlással (12.3.2. ábra),
- a földgáz készletekből szintén mintegy ~6000 EJ termelhető ki,
- szén az van (~100000 EJ), csak kitermelni, elszállítani és felhasználni nem tudjuk komoly környezeti károk nélkül.

A Föld olajtartalékai (összesen 140 mrd. tonna ~ 6170 EJ)



12.3.2. ábra: A Föld bizonyított olajkészleteinek regionális megoszlása.

A fosszilis energiahordozók közül a mai felhasználásban több mint 60%-al résztvevő kőolajjal és földgázzal hosszú távon nem számolhatunk. A készletek korlátosak, ami belátható időn belül ellátási nehézségekre vezethet. Ráadásul a források eloszlása szembeötlően egyenetlen (olajra l. 12.3.2. ábrát, de a földgázra sem sokkal egyenetesebb), ami gazdasági és politikai függésre fog vezetni a Föld országainak többségében. Így már látványosan megindult a kíméletlen harc a szénhidrogén-készletek ellenőrzéséért.

Az ásványi energiaforrások felhasználásának hátránya, hogy drámai hatásuk van a környezetre. Ezeknek a forrásoknak az energetikai felhasználásánál széndioxid szabadul fel, ami hozzájárul a globális klímaváltozáshoz. Bár folynak kísérletek az üvegházgázok visszatartásának megvalósítására, a tényleges megoldás a nagyon távoli jövőben van.

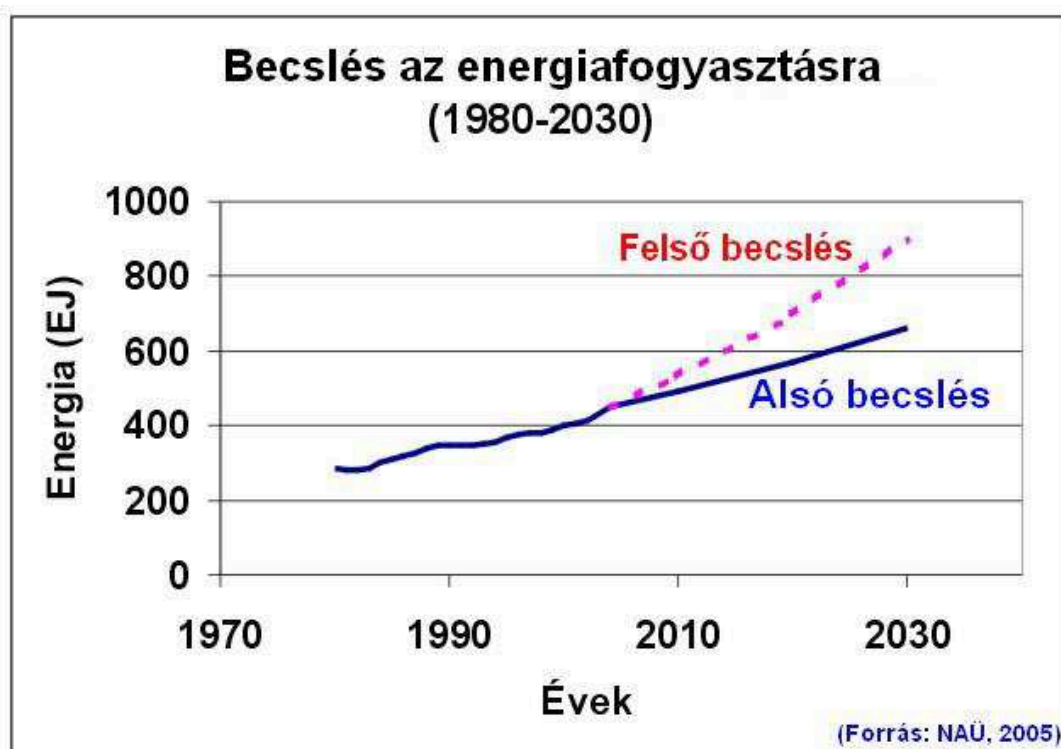
A társadalmak energiaellátásának mai rendszere egy sor kockázatot rejt magában és hosszabb távon nyilvánvalóan nem tartható fenn. Meg kell találnunk a fosszilis energiahordozók érdemi kiváltásának módját. Erre azonban az emberiségnek legfeljebb néhány évtizede van.

### 12.4. Az energiaellátás jövőbeni lehetőségei

Az emberiség célja nem lehet más, mint a folytonos és biztonságos energiaellátás követelményének teljesítése. Az energetikai jövő meghatározásánál elsősorban e cél teljesítéséhez szükséges alapvető kívánságokat és kihívásokat kell áttekintenünk.

- A Föld népessége 2050 körül 9-9,5 milliárd fő körül lesz, 2100-ban 9 és 11 milliárd közötti lakossággal számolhatunk.
- Egészen bizonyos, hogy Ázsiában jelentős gazdasági átalakulás megy majd végbe és a fő gazdasági hatalmak valószínűleg Kína és India lesznek.
- A szaharai övezettől délre mintegy 2 milliárd embert kell bevonni az energiaellátásba a következő néhány évtizedben.
- A kőolaj és a földgáz készletek korlátosak.
- Meg kell szervezni a fenntarthatóságot lokális és globális szinten.

Azt, hogy mennyi energiára lesz szükségünk természetesen nehéz megbecsülni. Tekintettel azonban arra az igen erős korrelációra, hogy a Föld lakosai fejenkénti energiafogyasztása átlagosan az elmúlt három évtizedben lényegében nem változott, a demográfiai adatokból becslést adhatunk a következő évtizedek energiaigényére.



12.4.1. ábra: A Föld társadalmainak várható energiafogyasztása 1980 és 2030 között. Az alsó becslés a demográfiai adatok alapján adódó értékeket mutatja<sup>1</sup>.

Egy ilyen becslést mutat be a 12.4.1. ábra. Az alsó becslés feltételezi, hogy érvényben marad a jelenlegi erős korreláció az emberek száma és a teljes energiafogyasztás között. A felső becslés jelentős energiaigény-növekedést is figyelembe vesz az előbb tárgyaltaknak

<sup>1</sup> NAÜ — Nemzetközi Atomenergia Ügynökség

megfelelően. A Föld teljes energiafogyasztása 2030-ra mindenképpen eléri a 650-700 EJ értéket.

A jelenlegi helyzet elemzése és a már most látható igények kielégítésének szükségessége megköveteli, hogy már most súlyos döntéseket hozzunk az energiapajzsoval kapcsolatban. Az igényelt energia biztosítására ugyanis nem sok lehetőség áll rendelkezésünkre.

- Az energiatakarékosság széleskörű alkalmazása.
- A megújuló energiatípusok bevezetése és felhasználása.
- A nukleáris energia széleskörű elterjesztése.

Világos, hogy mindegyik út igen nehéz. Szükség van a tudomány eredményeinek alkalmazására. Ráadásul mélyreható társadalmi gazdasági változások elkerülhetetlenek.

#### 12.4.1. Az energiatakarékosság lehetőségei

A társadalmi mértékű energiatakarékosság elvi megfontolások szerint három tényezőtől függ:

- A társadalom tagjai által fejenként igényelt szolgáltatásoktól.
- A szolgáltatások megadásához szükséges energiától.
- A közösség tagjainak számától.

A közösség tagjainak számát eddig még egyetlen társadalomnak sem sikerült beállítania, ellenőriznie. A szolgáltatásokhoz tartozó energiaigény a technikai, technológiai fejlettségtől függ és sokan ennek a tényezőnek a csökkentését értik az energiatakarékosság alatt. Világos azonban, hogy a legfontosabb tényező a társadalom tagjai által igényelt szolgáltatások mennyisége és minősége. Ez a legfontosabb tényező, hiszen ez a társadalom szociális, kulturális állapotától függ. A társadalmi viszonyok változása azonban hosszú időket követel, nehezen alakul át.

Energiatakarékosság szinte mindenütt lehetséges. Jellemzi azonban, hogy beruházás-igényes és szükség van az egyes lépések társadalmi befogadására is.

Mindebből következik, hogy bár a technikai lehetőségek nagyok és a politikai szándék is erős az energiatakarékosság irányába, a takarékoskodás tényleges lehetőségei társadalmilag és gazdaságilag meglehetősen korlátosak.

A takarékoskodást minden szinten támogatni kell. Az elemzések azonban azt mutatják, hogy

legfeljebb azt érhetjük el, hogy az energiafogyasztás nem növekszik, esetleg kismértékben csökken. Jelentős, meghatározó energiaigénybeli csökkenés azonban nem várható.

#### 12.4.2. Energia megújuló forrásokból

Megújulónak nevezzük azokat az energiaforrásokat, amelyek forrása történelmi nagyságrendű idők (~10000 év) alatt nem változik. Több ilyen energiaforrást azonosítottak. Ezek:

- a napenergia közvetlen alkalmazása,
- a napenergia közvetett felhasználása
  - szélenergia,
  - vízenergia,
  - biotömeg,



- hullámenergia.
- geotermikus energia,
- ár-apály energia.

Az előbb felsorolt energiatípusok mind olyanok, hogy a jelentős mennyiségű energiatermelés elvi kérdései bizonyítottan tekinthetők. Mégis alkalmazásuknál egy sor probléma merül fel.

- Az elvi megvalósítás lehetősége mellett az energiatermelésre való gyakorlati felhasználás nem mindenütt megoldott.
- Gazdasági kérdések, amelyek főleg a beruházás-igényesség és a megtérüléssel kapcsolatosak.
- Társadalmi problémák, amelyek a közösségek technológia-felvevő rugalmasságával kapcsolatosak.
- Környezeti, társadalmi és politikai feltételeknek kedvezőeknek kell lenniük.

Közös nehézsége minden megújuló energiaforrásnak a tágabb értelemben vett alacsony energiasűrűség. Ez azt jelenti, hogy amikor a megújuló forrásokból jelentős mennyiségű energiát kívánunk termelni, akkor mindig nagy területeket kell felhasználnunk, jelentős anyagmennyiségeket kell megmozgatnunk a beruházásokhoz, sok embernek az életét kell megzavarnunk. Mindegyik megújuló energia alkalmazásának van valamilyen speciális nehézsége, ami nem oldható meg könnyen.

Az elemzések azt mutatják, hogy a következő évtizedekben az energiaigény legfeljebb ~20%-át fedezhetik a megújuló források. Világos, hogy bár jelentős hozzájárulásuk lehet, önmagukban nem fogják kielégíteni az emberiség energiaigényét. Éppen ezért a megújuló energiaforrásokkal kapcsolatos illúziók társadalmilag veszélyessé válhatnak, ha fejlesztésük érdekében elmaradnak más energiaforrásokkal kapcsolatos lépések.

#### 12.4.3. Az atomenergia

A hasadós **atomenergia** az egyetlen nagytechnológia, amellyel valóban az igényekkel összemérhető nagyságrendű energia termelhető. Az atomenergia már jelenleg is óriási szerepet játszik az energetikában: a megtermelt elektromos energia ~15%-át atomerőművek állítják elő. Néhány országban, így például Magyarországon (~40%), vagy Franciaországban (~75%) ez a részarány lényegesen magasabb az átlagnál.

A nukleáris energia felhasználásával és további jelentős mértékű bővítésével kapcsolatban azonban jogos és megválaszolendő fontos kérdések merülnek fel. Ezek rövid összefoglalása a következő.

- Az atomerőművek üzemviteli biztonsága.
- Az atomiparral kapcsolatos más baleseti veszélyesség.
- Az atomfegyverek elterjedése.
- A radioaktív hulladékok elhelyezése.

A fenti problémák egyike sem oldható meg könnyen és hiteles megoldásuk szakmai kérdések sorának az elemzésével és fejlesztő munkával jár. A felvetett aggályok jogos kérdések, amelyekre a társadalom elvárja a megnyugtató választ. Különösen fontos a társadalom korrekt, szakmailag hiteles tájékoztatása és megnyugtatója a csernobili (Ukrajna, volt Szovjetunió — 1986) és a fukisimai (Japán — 2011) atomkatasztrófákra gondolva.

A nukleáris energia alkalmazásával kapcsolatban több országban jelentős a társadalmi ellenállás. [Antinukleáris mozgalmak](#) szinte mindenütt vannak. Svédország és Németország törvényi szinten lemondott az atomenergia hasznosításáról és kifutó rendszerben bezárják összes atomerőműüket.

Most valószínűnk látszik, hogy a biztonságos energiaellátás érdekében a jövőben is szükség lesz az atomerőművekre és felhasználásuk további bővítése sem elkerülhető. A megoldást a reaktorok biztonságának növelése és az ún. belsőleg biztonságos reaktorok kifejlesztése fogja jelenteni. Ezek olyan erőművek lesznek, ahol az alkalmazott eljárások a természet törvényei alapján jelentősen késleltetik — és így időt adnak szakszerű és optimális beavatkozásra — radioaktív anyagoknak a bioszférába való kijutását. A reaktorfizikai fejlesztések ma ebbe az irányba mennek. A most megépülő reaktorok biztonságát jelentősen növelték a korábbiakhoz képest. Egyúttal nagy nemzetközi összefogásban folyik a jövő minden aggályra választ adó atomerőműveinek, az új típusú, az ún. IV. generációs reaktorok kifejlesztése is.

### 12.5. A biztonságos energiaellátás fenntartásának esélye

A jelenlegi energiaellátásról felvázolt, komoly kockázatokat mutató rövid elemzés egyértelműen arra utal, hogy az energiaellátás rendszerét történelmileg nagyon rövid idő alatt új alapokra kell helyezni. A kőolaj és a földgáz készletek nyilvánvalóan korlátosak és alkalmazásuk veszélyeket rejtő környezeti ártalmakkal jár (pl. globális klímaváltozás). Ugyanakkor az energiaellátás alternatív lehetőségei, az energiatakarékosságnak, a megújuló energiaforrások és az atomenergia alkalmazásának mindegyike olyan, hogy vele egyedül az energiaellátás társadalmilag elengedhetetlenül szükséges feladata nem oldható meg.

A két-három évtizeden belül kialakuló energiaellátásban bizonyosan csökkenni fog a fosszilis energiahordozók felhasználásának részaránya. Ez már önmagában nehéz feladat lesz, hiszen alkalmazásuk részaránya volt az egyik legkevésbé változó adat az energetikában az elmúlt közel egész évszázadban. Valószínű az, hogy részarányuk nem fog drámai csökkenést mutatni.

A megújuló energiaforrások egyre fontosabbak lesznek. A már most is jelentős vízenergia mellett az energiaháztartás figyelemre méltó hányadát fedezhetik külön-külön a szél, a [fotovoltaikus energiatermelés](#) és a geotermikus energia felhasználása.

A nukleáris energiáról valószínűleg nem lehet lemondani. Ha sikerül megfelelően biztonságos körülményeket teremteni, akkor az atomenergia felhasználása komolyan bővíthet is párhuzamosan a szénhidrogének csökkentésével. — Sajnos a jelenlegi előrejelzések szerint a [fúziós energiatermelés](#) nemzetgazdasági mértékű megvalósítása csak a következő fél évszázad végére várható.

Az energetika a 21. század sorskérdése. A nehéz helyzetben és a borús perspektívák mellett egyedül a tudomány eredményeinek alkalmazása mutathatja meg azt a valószínűleg igen keskeny utat, amelyen végigmenve biztosítható a jövő társadalmainak energiaellátása.

Mindehhez szükséges, hogy az energetikai kutatások megfelelő támogatást kapjanak. A tudományos eredmények alkalmazásához további szervezési és beruházási feladatok tartoznak az energetikai rendszerek fejlesztésének minden területén.

A biztonságos energiaellátás fenntartásának előfeltétele, hogy a társadalom felismerje az energetika életbevágó fontosságát.

## 12.6. Függelékek

### 12.6.1. Bibliográfia

Vajda György: „Energiaellátás ma és holnap”, „Magyarország az ezredfordulón” sorozatban, MTA Társadalomtudományi Központ, 2004, ISBN 9635084242

Vajda György: „Energia és társadalom”, „Magyarország az ezredfordulón” sorozatban, MTA Társadalomtudományi Központ, 2009, ISBN 97896350857051

Kiss Ádám, Tasnádi Péter: Környezetfizika (megjelenés alatt)

### 12.6.2. Fogalomtár

**atomenergia:** az atommagok átalakításával megtermelt energia; ma szinte kizárólag a hasadási folyamatokban megtermelt energiát értik alatta

**antinukleáris mozgalmak:** olyan mozgalmak, amelyek meg kívánják szüntetni az atomok átalakításával folyó energiatermelést

**fotovoltaikus energiatermelés:** a Nap sugárzásából közvetlenül elektromos energiát kinyerő eljárás

**fúziós energiatermelés:** energiatermelés könnyű atommagok egyesítésével

**primer energiaforrás:** átalakítás nélküli, elsődleges energiaforrás (ilyen pl. a szén, a kőolaj)