

Tartalomjegyzék

Alapfogalmak	1
Bioszféra, környezet	1
Környezetszennyezés, környezetvédelem	2
Üvegházhatás és globális felmelegedés	6
Világméretű változások mutatói	11
Levegő és éghajlat	11
Levegő, levegőszennyezés, levegőminőség és szabályozása	20
Levegőszennyezés (légszennyezés)	22
A levegőszennyezés forrásai	24
Levegőminőség és szabályozása	26

ALAPFOGALMAK

Bioszféra, környezet

A **bioszféra** (ökoszféra) a szerves élet elterjedésének területe (az élet színtere) a Föld felületén. Becslések szerint a Föld 4.6 milliárd éves, de közel 1 milliárd évig csak élettelen anyagokból állt. Ismereteink szerint az élet kb. 3.5 milliárd évvel ezelőtt jelent meg a Földön, ahol az élő anyag megjelenése három lényeges változást idézett elő: (1) megváltozott a légkör összetétele; (2) a kőzetöv (a litoszféra 10-40 km vastagságú szilárd felső rétege) legkülső élettelen rétegén megjelent a szárazföldi élet (növények) és létrehozta a talajtakarót (pedoszféra), majd (3) az élővilág elterjedt és létrehozta a bioszferát. Élőlények az élet keletkezésének hagyományos elmélete szerint először a hidroszférában szaporodtak el (bár az utóbbi egy-két évtizedben más elméletek is megjelentek), majd a szárazföldön és végül a légkör alsó rétegében (troposzféra). Így tehát a bioszféra

- a **földkéregnek** (litoszféra)
- a **vizeknek** (hidroszféra) és
- a **légkörnek** (atmoszféra)

azt a részét foglalja magában, melyet az élő szervezetek benépesítenek, vagyis az élőlények lakóhelye, amit élőlények hoztak létre élőlények számára. Így tehát a bioszféra lényegében a földfelszín körül kialakult vékony burok, amely a földkéreg felső részéből, a légkör földfelszínnel érintkező néhány km-es alsó övezetéből és a Föld vizeinek összességéből áll, vastagságát 15-16 km-re becsülik. Rövidebben fogalmazva a bioszféra a szilárd földkéreg, a levegő és a vízburok élővilága. Az élővilág fejlődése, az egész Föld benépesítése, ehhez a légkör átalakítása (pl. a szén-dioxid koncentráció csökkenése, illetve az oxigénkoncentráció fokozatos növekedése és a mai szint elérése) és a talajtakaró kialakulása becslések szerint 3.5 milliárd év alatt ment végbe. Ez nem volt zökkenőmentes folyamat, minthogy időközben öt kihálási időszak is fellépett, de ezek alapjaiban nem veszélyeztették a földi életet, tehát a létrejött földi rendszer már akkor eléggé állandó (stabilis) volt. A bioszféra szervezettsége fokozatosan fejlődött az élet megjelenésétől napjainkig.

A **bioszféra** az alábbi **természetes** és **mesterséges alkotóelemeket** tartalmazza:

- a **föld** (alapközet, ásványvagyon; barlangok, termőföld és talaj, domborzat);
- a **levegő** (belső légkör: troposzféra, sztratoszféra; felső vagy külső légkör);
- a **víz** (felszíni vizek: óceánok, tengerek, folyóvizek, tavak; felszínalatti vizek);
- az **élővilág** (**állatvilág**: védett és nem védett vadon élő állatok, háziállatok; **növényvilág**: erdők, gyepek, nádasok, mezőgazdasági növények; **gombák**; **mikroorganizmusok**);
- a **táj** (természetes táj, kultúrtáj, védett és nem védett táj);

- **az épített környezet** (lakóterületek, ipartelepek, mezőgazdasági települések, közlekedési útvonalak stb.).

Az első öt a bioszféra természetes alkotóelemei, az épített környezet az ember által létrehozott mesterséges alkotóelem. Az elemek közül az **élővilágot** gyakran **szárazföldi bioszféra**ként említik. A bioszférát csak harmonikusan működő élővilág képes fenntartani. Ezt a **harmóniát**, vagyis az élővilág, illetve a bioszféra egyensúlyi viszonyait azonban az **emberi beavatkozás megváltoztatta**. Ebben fontos szerepet játszott a letelepedéssel együtt járó **mezőgazdasági tevékenység** (az első falvakat 9-10 ezer éve építették), amely a felszín átalakításával, a talaj megváltoztatásával, és értelemszerűen a növény- és állatvilág sokféleségének csökkenésével járt, bár ez ekkor még nem volt számottevő. Az ember **különösen a 18. századtól** induló ipari forradalom után lett környezetének alakítója, amikor az energiatermelés, illetve az energiafelhasználás, s ennek köszönhetően **az ipari termelés alapvető tevékenységgé vált**. A gyors ipari fejlődés hatására, de különösen a **20. század elejétől, egyre növekvő mértékű** ez a beavatkozás: gondoljunk pl. az élővizeknek hulladékokkal, a levegőnek káros égéstermékekkel történő szennyezésére, a talaj romlására, a mezőgazdasági területek zsugorodására, az erdőterületek csökkenésére és így a természetes ökoszisztéma visszaszorítására, az életközösségek szegényedésére stb.

A bioszférában létező növényi és állati eredetű anyagok tömegét 10^{15} kg-ra becsülik (könnyen kiszámítható, hogy ehhez képest az emberiség összes tömege elhanyagolható), mely elhanyagolható akár a Föld, akár pedig a hidroszféra, illetve az atmoszféra tömegéhez képest (ezek rendre $5.98 \cdot 10^{24}$, $1.38 \cdot 10^{21}$, illetve $5.2 \cdot 10^{18}$ kg). **A bioszféra alkotóelemei összefüggenek** egymással, kölcsönhatásban vannak, bármelyik károsodása kihat a környezet egészére, végső soron az emberre is, tehát a bioszféra **védelme** hatékonyan csakis **egységes szemlélettel valósítható meg**.

Az ember léte szempontjából is fontos tudnunk, hogy az **élővilág** lehet **autotróf és heterotróf**. Az autotróf szervezetek szerves anyagokból építik fel szervezetüket, vagyis az életükhöz szükséges energiát más élőlényektől függetlenül állítják elő, melynek módja a napenergia vagy a kémiai energia hasznosítása, tehát a fotoszintézis vagy a kemoszintézis. **Autotróf** szervezetek a **növények** és a mikroorganizmusok egy kisebb része. Az autotrófia görög eredetű szó, és a növényi szervezeteknek az a képessége, hogy szerves anyagokat saját táplálkozásukra szervessé alakítják. A **heterotróf** szervezetek más szervezetek, vagyis lényegében az autotróf szervezetek által előállított, energiában gazdag szerves anyagok fogyasztásával és elbontásával nyerik az életműködésükhöz (anyagcseréjükhez, létfenntartásukhoz) szükséges energiát, mely lehet légzés vagy fermentáció. **Heterotróf** szervezetük az **állatok**, a **gombák**, a mikroorganizmusok nagy része, és az **ember** is. Ezért is gond az autotróf és a heterotróf szervezetek közötti arány változása az autotróf szervezetek hátrányára (persze: inkább a heterotróf ember hátrányára!). A heterotróf szervezetek közül csak a gombák (melyek sem nem növények, sem nem állatok, hanem korhadékbontó, élősködő vagy együtt élő szervezetek) és a baktériumok képesek a fehérjék építőköveit képező aminosavak előállítására, a többi heterotróf szervezet a fehérjéket készen kapja, e nélkül nem léteznének, az ember sem. Így tehát a **heterotróf szervezetek rá vannak utalva az autotróf szervezetekre, sőt: nélkülük egyszerűen nem létezhetnek, maga az ember sem!** És főleg az autotróf élővilágot pusztítjuk, tehát egyszerűen kifejezve a helyzetet: **magunk alatt vágjuk a fát!**

Környezetszennyezés, környezetvédelem

Az **ember** (mint már utaltunk rá) tevékenysége révén megváltoztatja a környezeti elemeket, melynek során **szennyezőket juttat a környezetbe**, tehát szennyezi a környezetet, környezetszennyezést „követ” el. A szennyezés a **szennyező forrásból** származik, a szennyezés **kibocsátásával (emisszió)**. Ez lehet **természeti** és **nem természeti** (vagyis biogén illetve emberi, azaz antropogén) eredetű. Az **antropogén** szennyező forrás lehet **primer**, illetve **szekunder**. A primer szennyező források a szennyező anyagokat termelik és a légkörbe, vízbe, talajba juttatják. A szekunder szennyező források azok, ahonnan a levegőből, a vízből vagy a talajból az egyszer már eltávozott, eltávolított, illetve a termelésből már kivont szennyező anyagok ismét visszakerülnek a légkörbe, vízbe, talajba (pl. a légkörbe pernyehányók, meddőhányók; utakra, talajra, épületekre kiülepedett és a szél által felkavart por; szemételepek, szennyvizek, melyekből az elnyelt gázok, oldószerek gőzei kilépnek). Az

emisszió lehet **introvert** (szűk környezetben ható, pl. üzemen belül) és lehet **extrovert** (létesítményen kívül ható), s értelemszerűen az introvert hatás ellen könnyebb védekezni.

A **környezetszennyezés** - mint láttuk - **egyidős az emberrel!** A kezdetekben és az első ókori társadalmakban ez csak helyi (lokális) szinten, esetleg nagyobb területi (regionális) léptékben jelentkezett, a globális környezetszennyezés megjelenését az ókori görög-római időkre teszik. A **környezetszennyezés** kifejezés alatt olyan **jelenséget, folyamatot** értünk, mely a **környezetet vagy az embert közvetlenül vagy közvetve veszélyezteti, vagy károsítja, valamely környezeti elem** (föld, levegő, víz, élővilág, táj, épített környezet) **fizikai, kémiai vagy biológiai szennyeződését, károsodását eredményezi, természetes jellemzőit hátrányosan megváltoztatja, módosítja.** Környezetszennyezéssel **környezetszennyező anyag** jut a környezetbe, mely általános értelemben **bármilyen káros folyamatot elindító anyag** lehet. Így tehát szennyező anyag minden olyan elem, vegyület vagy anyag, amely valamely adott közegben (tehát a levegőben, a vízben, a talajban) természetes körülmények között nem vagy más eloszlásban (koncentrációban) fordul elő, de bármelyik közegbe bejuttatva ott káros hatást fejt ki, vagy káros hatás forrásává válhat. A szennyező anyag káros lehet a környezet minőségére, a növény és állatvilágra, az ember egészségére illetve anyagi javaira, a környezetet előnytelenül megváltoztathatja, tulajdonságait befolyásolhatja, megakadályozhatja, vagy befolyásolhatja a környezet jogszerű használatát. A **szennyező anyagok egy része egyszerűen fizikai jelenlétével, másik része kémiai és biológiai hatásával veszélyezteti a környezetet.** Eredetük – mint láttuk - lehet természetes vagy mesterséges. A bioszféra tekintetében beszélhetünk **légszennyező-, vízszennyező- és talajszennyező anyagokról.** A szennyező anyagok lehetnek molekuláris méretűek, illetve a molekuláris méretnél nagyobb, a hordozó közegben finoman eloszlott (ún. diszpergált) anyagok, méretükből adódóan kezelési módjuk is eltér. **Jogi értelemben** csak akkor beszélünk környezetszennyezésről, ha a környezet valamely elemébe kibocsátott szennyező anyag mennyisége meghaladja a törvényileg meghatározott **kibocsátási határértéket** illetve, ha a szennyező anyag mennyisége a környezet valamely elemében meghaladja a törvényileg rögzített határértéket. A környezetszennyezés elkerülése rendszerint ráfordításokkal jár. E szempontból meghatározzák a **környezetszennyezés optimális szintjét,** ennek megállapítása sokszor igen bonyolult, de valószínűsíthető, hogy értéke meghaladja a zéró kibocsátást.

A **kibocsátott szennyezés** az atmoszférában, a hidroszférában és a litoszférában **terjed (terjedés vagy transzmisszió),** de közben hígul (így hatása mindenképpen csökken) és át is alakulhat (pl. kémiai reakciók révén, pl. a napsugárzás hatására vagy egyszerű kémiai kölcsönhatás eredményeként), melynek eredményeként hatása erősödhet is (ún. szinergizmus lép fel), mivel ekkor akár károsabb anyagok (komponensek) is keletkezhetnek. A transzmissziót a közvetítő közeg fizikai, kémiai és biológiai állapota és egyéb körülmények határozzák meg (domborzat, áramlás, árnyékolás stb.). A kibocsátott szennyező anyag mennyiségétől és annak terjedésétől függően a közvetítő/befogadó közegben valamilyen mértékű **szennyező anyag koncentráció** alakul ki, mely az **immisszió** (főleg a légszennyezés mértékének megadására használják). A kibocsátás illetve a terjedés révén a szennyeződés eljut az ember szervezetébe és javaiba, az embert és javait károsítja, ennek mértékét a szennyezés mértéke (nagysága), fajtája, a hatás időtartama (expozíció) stb. határozza meg.

Ha egyidejűleg több szennyező anyag van jelen, kölcsönhatásuk szempontjából elvileg háromféle eset lehetséges: a szennyező anyagok nem hatnak egymásra, tehát külön-külön fejtik ki hatásukat; a szennyező anyagok erősítik egymás hatását, ún. **szinergikus hatás** (szinergizmus) lép fel (pl. növényvédő szerek esetében gyakran előfordul); a szennyező anyagok gyengítik egymás hatását, ún. **antagonizmus** lép fel.

A **környezetszennyezés teljes folyamata** tehát a következő:

forrás ⇒ emisszió ⇒ transzmisszió ⇒ immisszió

A szennyezést kibocsátó **források** többféle szempontból **osztályozhatók**, s így lehetnek:
helyhez kötött vagy mozgó,
pontszerű, vonalszerű vagy kiterjedt (felületi, azaz diffúz) illetve
ipari, mezőgazdasági, települési, közlekedési stb.

szennyező források. A forrás lényegében a berendezésnek, létesítménynek az a pontja, illetve felülete, amelyből, illetve amelyről a szennyező anyag a környezetbe kerül. A **pontforrásokra** alapvetően jellemző, hogy a kibocsátott szennyező anyag mennyisége a kibocsátott közeg térfogatáramának és az általa hordozott szennyező anyag koncentrációjának mérésével egyértelműen meghatározható. A **diffúz** szennyezés vonal mentén vagy területen megoszló forrás. Ilyen esetben általában jellemző, hogy a nagyszámú forrás és/vagy a kedvezőtlen térbeli elhelyezkedés következtében a kibocsátás mennyisége nem vagy csak igen pontatlanul mérhető. Ebből értelemszerűen következik, hogy a pontforrás ellen lényegesen könnyebb védekezni, mint a kiterjedt forrás ellen. Levegőszennyezés tekintetében pontforrás egy kürtő vagy egy kémény, diffúz forrás egy település lakóépületeinek kéményei. A közúti közlekedés tekintetében egy jármű pontforrás, de a közutak mentén vonalforrás van. Vízszennyezés tekintetében a Dunába vezetett szennyvízcsatorna pontforrás, de a lefolyó csapadékvíz diffúz szennyezés. A talaj tekintetében a később tárgyalt (száraz vagy nedves) kiülepedés okoz diffúz szennyezést, az olajkifolyás (vezetékéből, járműből) pontforrás, esetleg vonalforrás.

Az ember tehát tevékenysége révén módosítja környezetét, abba beavatkozik, mely lehet hasznos vagy káros, s utóbbit általában igyekezett elkerülni úgy, hogy - tapasztalva a káros hatást - tevékenységét módosította. Ma már általában nem elegendő a káros (mellék)hatás tapasztalata (tehát az észlelés) után módosítani tevékenységünket, hanem a káros hatás elkerülésére kell törekedni, amit összehangoltan, tervszerűen kell megtenni, amely tevékenység a **környezetvédelem**. A környezetvédelem **céltudatos, szervezett társadalmi tevékenység**, melynek **célja az emberi tevékenységből fakadó káros következmények megelőzése és kiküszöbölése az élővilág és az ember károsodás nélküli fennmaradása érdekében, az embernek megfelelő életkörülmények biztosítása, az anyagi és a szellemi javak fenntartása, védelme, a környezet fejlesztése, megóvása**. A környezetvédelem tudományos alapjait elsősorban a műszaki tudományok, az alkalmazott természettudományok és a közgazdaságtan adják (de a környezettudomány kifejezés is használatos), **hatékonyságát a környezethasználók felelőségén alapuló törvényi szabályozás és intézményrendszer biztosítja**. Hazánkban a környezetvédelem törvényi szabályozására először 1976-ban került sor, majd ezt követte a jelenleg is hatályos szabályozás (I. az 1976.-ik évi II. törvényt és az 1995.-i évi LIII. törvényt).

A **Környezetvédelmi Törvény** (pontosabban: az 1995. évi LIII. törvény a környezet védelmének általános szabályairól) a következőképpen határozza meg a környezetvédelmet: „olyan tevékenység és intézkedések összessége, amelyeknek célja a környezet veszélyeztetésének, károsításának, szennyezésének megelőzése, a kialakult károk mérséklése vagy megszüntetése, a károsító tevékenységet megelőző állapot helyreállítása.” A Törvény szerint **a környezet védelmének alapelvei „az elővigyázatosság, a megelőzés és a helyreállítás”**.

Az **elővigyázatosság** elvét az 1992-ben Rio de Janeiróban megtartott ENSZ konferencia (Konferencia a Környezetről és Fejlődésről) nyilvánította a környezetvédelem alapelvevé, mely szerint **„ahol súlyos vagy visszafordíthatatlan kár fenyeget, a teljes tudományos bizonyosság hiánya nem használható föl indoklásként a környezetromlást megakadályozó, a hatékonysággal arányos költségekkel járó intézkedések elhalasztására”**. Ez azt jelenti, hogy a „tudományos bizonyosság hiánya” nem ad felmentést a környezetvédelmi problémákkal való foglalkozás alól, vagyis az ilyen problémákat reális veszélyforrásként kell kezelni és meg kell tenni a megfelelő megelőző intézkedéseket. Ezzel

kapcsolatban leggyakrabban a **globális felmelegedést** említik (l. részletesebben később), mely alatt a Föld átlagos hőmérsékletének emelkedését értjük. Ennek során emelkedik az óceánok és a felszínközeli levegő hőmérséklete, utóbbi rendszerint a talajszinttől 2 m magasságban értendő. **A globális felmelegedés súlyos és visszafordíthatatlan hatása valószínűsíthető, de tudományosan egyértelműen még nem bizonyított, hogy emberi hatásra következik be.** Így az elővigyázatosság elve alapján kötelesek vagyunk mindent megtenni - a költségekre is tekintettel - a globális felmelegedés elkerülésére, illetve ma már inkább csak a mértékének csökkentésére, függetlenül attól, hogy az előrejelzések bizonytalanságokat tartalmaznak. A Maastrichti Szerződés is tartalmazza az elővigyázatosság elvét (Szerződés az Európai Unióról, 1992).

Sokan bírálják, s minden valószínűség szerint joggal, a környezetvédelem ilyen valóság megfogalmazását, vagyis lényegében csak a természettudományi és a műszaki (technikai, technológiai) feladatokra történő szűkítését. E bírálók abból indulnak ki, hogy az emberiség környezetkárosító (természetátalakító) tevékenységének mértéke alapvetően három tényezőtől függ: a világnépesség nagyságától, az egy főre jutó fogyasztás (termelés) mértékétől és az egységnyi gazdasági termelés (az egy fogyasztó számára előállított termékmennyiség) környezeti hatásától. Így csak e három tényező (de legalább az utóbbi kettő) egyidejű csökkentésével lehet a környezetkárosító (környezetpusztító) tevékenység mértékét csökkenteni, s nem elégséges csak a harmadik csökkentését, vagyis a környezetkímélő technológiák alkalmazását érteni környezetvédelem alatt, mivel ez önmagában nem lesz képes ellensúlyozni az első kettő növekedésének hatását. Nekünk, mérnököknek, viszont a harmadik tényezőre van ráhatásunk. Lényegében ezt fejezni ki az ún. **IPAT egyenlet**. E szerint az ember környezeti hatása (**I**: impact) három tényező szorzata, melyek a népesség létszáma (**P**: population), a ráhatás (**A**: affluence) és a (az elérhető) technológia (**T**: (available) technology), vagyis **I = P · A · T**. Az összefüggés lényegében megfelel a fentiekben leírtaknak. Így tehát a fogyasztói társadalom, vagy egy gazdagabb állam, illetve bármely állam egy gazdagabb csoportja nagyobb hatást gyakorol a környezetre, mint a szegényebb társadalmak vagy egy szegényebb embercsoport.

A környezetvédelem tehát az embert, valamint természetes és művi környezetét védi a szennyezőktől, az ártalmaktól, melyek lehetnek:

- **kémiai ártalmak,**
- **zaj- és vibrációs ártalmak,**
- **mechanikai ártalmak (pl. por),**
- **sugárártalmak,**
- **idegi ártalmak.**

Hogyan véd?

- **az emisszió megelőzésével, kiküszöbölésével, csökkentésével** (gyakran „csővégi” megoldásként emlegetik, pl. porleválasztás, szennyező gázkomponens leválasztása vagy átalakítása; hulladékszegény, hulladékmentes, környezetbarát technológiák, tisztább termelés kialakítása; a leghatékonyabb megoldások alkalmazása: az **elérhető legjobb technika** – **BAT**: Best Available Technology vagy Best Available Techniques);
- **a káros emisszió továbbjutásának vagy átalakulásának megakadályozásával** (pl. erdők telepítése, észlelő - monitoring - hálózatok kialakítása stb.);
- **az immiszió elleni védekezéssel** (pl. zajhatás ellen, belégzés ellen stb.).

A környezetvédelmi problémák megoldásához szükséges műszaki ismereteket szükségszerűen tantárgyakba rendezzük, melyek a **környezetvédelem műszaki területei**. **Ezek:**

- **levegőtisztaság-védelem;**
- **víz tisztaság-védelem;**
- **zajvédelem;**
- **talajvédelem;**

- **hulladékok kezelése.**

Itt ismételtten hangsúlyozzuk, hogy a bioszféra alkotóelemei összefüggenek egymással, kölcsönhatásban vannak, bármelyik károsodása kihat a környezet egészére. Tehát a tárgyalásként alkalmazott felosztás nem válhat öncélúvá, minthogy az egyes elemek védelme egymástól elkülönítetten nem valósítható meg. Így pl. a levegő védelmét gyakran úgy oldjuk meg, hogy a szennyező anyagot vízzel távolítjuk el a levegőből, vagyis a szennyező anyagot vízbe visszük át. Ez értelemszerűen nem jelentheti a probléma végleges megoldását, minthogy a környezet egészének védelmével kell foglalkoznunk, jelen esetben tehát gondoskodnunk kell a szennyezett víz kezeléséről is (ezzel kapcsolatban az európai uniós előírásokkal összhangban megfogalmazott kormányrendelet előírásaira utalunk, vagyis az „egységes szennyezés megelőzés és ellenőrzés elvére”; IPPC; 1. a 193/2001. (X. 19.) kormányrendeletet). A **környezetvédelmi célok eléréséhez szükségesek intézmények** (pl. minisztérium, felügyelőség, önkormányzat), továbbá **gazdasági, etikai és jogi feltételek, eszközök, szabályozások**, mint pl. törvények, kormány- és miniszteri rendeletek, utasítások, Európai Unió előírásai, szabványok (EMAS: Eco-management vagy Environmental Management and Audit System, MSZ EN ISO 14000 szabványsorozat).

ÜVEGHÁZHATÁS ÉS GLOBÁLIS FELMELEGEDÉS

A **globális felmelegedést** említik leggyakrabban az emberi „**puszta tudomásulvétel**” („nincs mit tenni” hozzáállás) alátámasztására, minthogy már a XIX. század elején felismerték, hogy a légkörben található **szén-dioxid** üvegházhatást (greenhouse-effect) idéz elő, koncentrációjának növekedése pedig az átlagos hőmérséklet emelkedését okozza a Földön. Ennek ellenére szinte semmit nem tettünk megelőzésére, mérséklésére. Az elővigyázatosságra is a leggyakrabban emlegetett példa.

Melegház, **üvegház, üvegházhatás**: az üveg átengedi a napfényt, de megakadályozza a hő távozását, nagyrészt azzal, hogy az üvegházon belüli melegebb levegőt nem engedi összekeveredni a külső hidegebb levegővel, tehát csapdába ejti a hőt. Így az **üvegházon belül magasabb hőmérséklet alakul ki, mint rajta kívül**, vagyis a belső tér magasabb hőmérsékletén alakul ki termikus egyensúly a külső hidegebb hőmérsékletű térrel. Hasonló a helyzet a ma már gyakrabban használt fóliasátorral is, ahol a műanyagfólia tölti be az üveg szerepét, minthogy ugyancsak átengedi a napsugarakat és megakadályozza a belső meleg levegő kilépését. Lényegében ezt teszi a szén-dioxid is, a többi hasonló tulajdonságú, többnyire három- vagy még többatomos gázzal együtt: átengedik a Napból érkező nagyobb hőmérsékletű, rövid hullámhosszúságú napsugarakat, de a Föld által kisugárzott kisebb hőmérsékletű, nagyobb hullámhosszúságú infravörös sugarakat elnyelik (abszorbeálják), tehát csapdába ejtik a hőt (mérnöki szempontból szükséges megjegyezni, hogy az üvegház – melegház - a konvekciós hőveszteséget csökkenti a belső melegebb és a külső hidegebb levegő összekeveredésének megakadályozásával, amíg a légköri üvegházhatás a sugárzásos hőveszteséget gátolja, így a hőátvitel mechanizmusa tekintetében eltér a két jelenség; az üvegház említett konvekciós hatásáról egyébként könnyen meggyőződhetünk egy tető- vagy oldalablak kinyitásával, s ez szolgál szükséges hűtésére is, túlmelegedés esetén). E gázok molekulái az elnyelt hőt molekuláris ütközéssel adják át az atmoszféra egyéb komponenseinek (emlékeztetünk a molekulák Brown-féle hőmozgására). Az **üvegházhatás pozitív eredményeként a Föld átlagos hőmérséklete nem -18 °C (255 K), ami az ilyen összetételű atmoszféra nélkül lenne, hanem +15 °C, vagyis az üvegházhatás 33 °C-kal növeli a Föld átlagos hőmérsékletét.** E növekedést a következő táblázatban megadott gázok idézik elő a második oszlopban megadott mértékben (Rákóczi, 1998):

Gáz	Hozzájárulás K-ben
Vízgőz	20.6
szén-dioxid	7.2
troposzférikus ózon	2.4
Dinitrogén-oxid	1.4
Metán	0.8
a többi gáz (főleg CFC-k)	0.6

A **255 K (vagy -18 °C) a Föld egyensúlyi hőmérséklete**. Ez a hőmérséklet létezne a Földön az atmoszféra üvegházhatása nélkül, mely hőmérség felírásával egyszerűen számítható.

Az **üvegházhatás** tehát a **légkör hővisszatartó képessége**, amely (rövidebben kifejtve) az üvegházhatású gázok azon tulajdonságán alapszik, hogy a Naptól érkező sugárzást átengedik, de a Föld kisugárzását akadályozzák, tehát kevésbé nyelik el a nagyenergiájú sugárzást, mint a kisebb energiáját. **Az üvegházhatás mértéke a Nap sugárzásától, az üvegházhatású gázok légköri koncentrációjától, illetve az atmoszféra sűrűségétől függ.** Az üvegházhatás nem csak a Földre jellemző, mértéke különösen jelentős a Vénuszon, amit állandó felhőréteg borít és átlagos felszíni hőmérséklete 462 °C (felszínét elérő energia 99.9 %-a a bolygón marad, légköre 96.5 % szén-dioxidot tartalmaz, a maradék főleg nitrogén, tömegre vetítve).

Az üvegházhatást Jean Baptiste Joseph **Fourier** francia matematikus-fizikus **fedezte fel 1824-ben** (1768-1830; aki a hővezetés törvényszerűségének is felfedezője, továbbá a trigonometrikus függvények – a Fourier-sorok - megalkotója), kísérletileg John **Tyndall** angol fizikus **igazolta 1858-ban** (1820-1893), **számszerűleg először 1896-ban** Svante **Arrhenius** svéd fizikus-kémikus **vizsgálta** (1859-1927; a kémiai reakciók hőmérséklet-függésének leírása tőle származik; 1903-ban kémiai Nobel díjat kapott).

Ez a jelenség az ún. **légköri üvegházhatás**, melynek a fentebbi hőmérsékletnövekedés a pozitív eredménye az életfeltételek szempontjából, és a folyamatban résztvevő gázok az ún. **üvegházhatású gázok** (a szakirodalomban gyakran az **ÜHG**, illetve az angol GHG rövidítéssel találkozunk, azaz: Green House Gases). Hangsúlyozni kell, hogy ez az üvegházhatás **a természetes összetételű légkör (optikai) tulajdonsága, nem emberi tevékenység következménye!** A táblázatból látható, hogy ebben a vízgőznek van a legnagyobb szerepe, a második legfontosabb kémiai komponens a széndioxid, melynek légköri koncentrációja az iparosodás előtt nem érte el a 0.03 térfogat %-ot. **Alapvető gond**, hogy a fosszilis energia (azaz: a meg nem újuló energiák: szén, kőolaj, földgáz) eltüzelése, illetve az energiafogyasztás rohamos növekedése és több más tényező (pl. az erdők fogyása stb.) hatására **növekszik a szén-dioxid koncentrációja a légkörben** (illetve általában az üvegházhatású gázok koncentrációja), minthogy a széntartalmú anyagok eltüzelésekor mindig keletkezik szén-dioxid, és ez a koncentrációnövekedés a **globális felmelegedés** egyik okozója. A tüzelési folyamat természetes és szükséges része életünknek, így tehát a széndioxid koncentrációjának növekedése az atmoszférában rövidtávon elkerülhetetlen. De növekedett más üvegházhatású gázok koncentrációja is, és feldúsulásuk a légkör hőhátartásának módosulásához vezet, mely az ún. **sugárzási kényszer**. Ennek folyamánként növekszik az atmoszféra által visszatartott energia mennyisége, vagyis a Föld eredőben egyre kevesebb energiát képes kisugározni a világűrbe, a beérkező energiából egyre több marad itt, s ezzel növekszik a Föld átlagos hőmérséklete, nagyobb hőmérsékleten következik be a termikus egyensúly, tehát ún. globális felmelegedés jön létre. A félreértések elkerülése érdekében megemlítjük, hogy **az üvegházhatású gázok nem fűtik a földet**, hanem az alsóbb légrétegek melegedésével és a magasabb légrétegek hűtésével **a hőmérséklet függőleges eloszlását változtatják meg**.

A globális mérések kezdete óta a **Föld átlagos tengeri és szárazföldi felszíni hőmérséklete 1880 és 2020 között 0.94 °C-szal emelkedett**, és az időszak második felére a **növekedés mértéke megkétszereződött**. Jégminták elemzéseiből arra jutottak, hogy a **XX. század az elmúlt hatszáz év legmelegebb évszázada volt**. Adatok szerint a XV. század óta az Északi-félteke **legmelegebb nyarait az elmúlt évtizedekben éltük át**, minthogy 1880 és 2017 közötti időszak 18 legmelegebb évéből 17 a XXI. században van. Az 1983-2012 közötti 30 év valószínűleg a legmelegebb periódus volt az elmúlt 1400 évben. A Meteorológia Világszervezet szerint **a földtörténet legmelegebb éve 2020 lett, holtversenyben 2016-tal**, a hőmérsékletemelkedés **0.94 °C**, amíg 2019 a második legmelegebb év lett, hőszerekordok dőltek meg a legtöbb nyugat-európai országban, Franciaországban június 28-án 46 °C-t mértek, a világ nagy része melegebb volt a korábbiaknál, amíg Észak-Amerika egyes részei a szokásosnál hidegebbnek bizonyultak. Az adatok szerint a 2015 és 2019 közötti időszak a legmelegebb egymást követő öt év volt az időjárási feljegyzések 150 évvel ezelőtti kezdete óta, az átlagos hőmérséklet ebben az időszakban világszerte 1.1 °C-szal volt magasabb, mint 1850-1900 közötti időszakban. A legmelegebb évtized pedig a 2020-szal mögöttünk hagyott évtized lett. A legnagyobb melegedés az Északi-sarkon és Szibéria északi részein következett be, itt több helyen 6 fokkal is meghaladta az éves átlaghőmérséklet az 1981-2010-es normált. A melegedés kimutatható mind a tengeri, mind a szárazföldi térségekben, bár sem térben, sem időben nem egyenletesen oszlik el a Földön, de Grönland és Himalája térségét kivéve a 20. században mindenütt kismértékű emelkedés következett be, s az utóbbi két-három évtizedben a melegedés fokozódott. **E változásnak természetes és emberi tevékenységből eredő okai is vannak, de a meteorológusok és az éghajlatkutatók 95/97 %-a az okok között legnagyobb hatásúnak az üvegházhatású gázok antropogén eredetű koncentrációjának növekedését tartják**. A teljes képhez hozzátartozik, hogy az említett mértékű **melegedés nem tekinthető rendkívülinek**, hiszen nagymérvű és gyors éghajlatváltozás korábban is fellépett (így az utolsó jégkorszak alatt 20 ezer-100 ezer évvel ezelőtti időszakban, illetve a jelenlegi interglaciális - vagyis két eljegesedési korszak közötti - időszakban, tehát az utolsó 10 ezer évben).

A globális felmelegedés, vagyis a hőmérséklet-emelkedés hatására:

- a magashegyi **gleccserek** visszahúzódtak, a tavaszi hóolvadás időpontja, a folyók és a tavak jegének megolvadása világszerte néhány nappal korábbra tevődött, amíg a befagyás későbbre tolódott;
- az Északi-sark központi részén a **jégtakaró** jelentős mértékben **elvékonyodott**, a teljes északi-sarki jégtakaró **kiterjedése** nyáron 10-15 %-kal **csökkent**, amíg a globális kontinentális jégtakaró 10%-kal csökkent az 1970-es évek óta;
- a trópusi óceánok felszíni hőmérséklete mintegy fél fokkal nőtt, különösen nagy a hőmérséklet-emelkedés a Csendes Óceán nyugati és az Indiai Óceán keleti részében, amelyek egyébként is a trópusi tengerek legmelegebb térségei. Ennek hatására emelkedett a **trópusi tengerek párolgása**, így a trópusokon a levegő nedvességtartalma az utóbbi évtizedekben megnőtt, s ez ugyancsak tetemes hőmennyiséget juttatott a légkörbe. Az óceáni területek feletti felhőzet mennyiségének növekedését már közel 60 éve kimutatják. Érdekességgént megjegyezzük, hogy Ázsia és Észak-Amerika nagy részén viszont csökkent a légkör páratartalma;
- az elmúlt száz évben **a tengerek vízszintje hozzávetőlegesen 10-25 cm-rel emelkedett**, melyből 2-7 cm az óceánok felmelegedésére és hőtágulására, 2-5 cm a gleccserek és a sarki jégtakaró olvadásának hatása, a szintnövekedés további összetevői nehezen számszerűsíthetők. A tengerek így szárazföldeket öntöttek el, mely tovább folytatható;

- a **vegetációs időszak** a mérsékelt égövben **meghosszabbodott**, a növények virágzása korábbra tolódott, a költöző madarak korábban érkeznek és korábban raknak fészket, számos növényfaj, valamint rovarok, madarak és halak élőhelye magasabb földrajzi szélességekre tolódott;
- megváltoztak a **csapadékviszonyok**, egyes helyeken sokkal több, másutt kevesebb a csapadék, ami **áradásokat, árvizeket**, illetve tartós **szárazságot, aszályt** okoz. Sok helyen növekszik az esőmentes napok száma és tartóssága, így az aszályos időszakok esélye és hosszúsága. Elemzések szerint az **árvízi kockázat** különösen növekszik Közép- és Nyugat-Európában. Összességében a világ szárazföldi területein az 1960-as évekig növekedett a csapadék mennyisége, míg az utóbbi 30 évben csökkenés mutatható ki. Mindezek nagymértékben zavarhatják a mezőgazdaságot;
- egyes területeken jelentősen növekedett a **rendkívüli meteorológiai események** (hurrikánok, tornádók, tartós és/vagy heves esőzések, ezek következményeként az áradások) gyakorisága és hevesége. A tartós esőzés földcsuszamlást okozhat, melynek leggyakoribb oka a talaj állékonyságának (rézsűszögének) csökkenése, a nagyobb vízfelvétel miatt. Az **éghajlat változékonyabbnak és szélsőségesebbnek** tűnik, de **jelenleg még nem áll rendelkezésre elegendő adat ennek tudományos igazolására a Föld egészét tekintve**. Tehát az egész földkerekséget tekintve semmi sem támasztja alá a természeti katasztrófák számának és erősségének növekedéséről szóló megállapításokat, kivéve régiókat és rendszerint szűkebb időtávokra, de ezek sem egyértelműek (tehát egyesek szerint növekszik, más adatsorok szerint viszont csökken a változékonyság, illetve a szélsőséges események száma);
- a hőmérséklet-emelkedés önmagában is egészségügyi problémákat okozhat, mivel fokozza a malária, az álomkór és más trópusi betegségek elterjedését, a hőség és a légszennyezés a halálozás mértékét növelheti;
- a hőmérséklet- és csapadékviszonyok változása megváltoztatja a vegyi anyagok (növényvédő és rovarirtó szerek) hatását is. Megváltozik terjedési viszonyuk is (aszály esetében a folyók vízhozama csökken, ezzel növekszik a szennyezők koncentrációja, csapadékosabb időszakban viszont több vegyszer kerülhet a vizekbe a mezőgazdasági területekről, a szélviszonyok is változnak stb.) és megváltozik felhasználási igényük is (pl. a nagyobb párolgás okán). A hőmérséklet- és nedvességtartalom-változás hatására megváltozik bomlási folyamatuk is, illetve a környezeti és egészségügyi hatásuk;
- a melegedés hatásának tudják be, hogy a XX. század közepe óta csökken a legkisebb és a legnagyobb napi hőmérsékletek különbsége (napi hőmérsékletingás), mert az éjszakák jobban melegedtek a nappaloknál (Európa egyes részeire és hazánkra ellentétes folyamatot tapasztaltak). A hőmérsékletingás csökkenésének feltehető oka a felhőzet nagyobb mértékű kiterjedése, mely akadályozza mind a nappali felmelegedést, mind az éjszakai lehűlést. Hazánkban a hőmérsékletingás 4-6 °C-t tesz ki decemberben, míg a melegebb hónapokban 11-13 °C között alakul.

A klímaviszonyok megváltozása veszélyezteti a természetes ökoszisztémát, a mezőgazdaságot, az emberi településszerkezetet: az erdők területe csökken; a párolgás mértéke növekszik; a folyók vízhozama csökken; az öntözési igény növekszik; a vízminőség romlik, melyek gyakran egymást is erősítő hatások. Ez igaz hazánkra is, minthogy nőtt a **heves esők** részaránya, az **árvizek** megjelenése, gyakrabban jelentkezik **aszályok** és **hőhullámok**, gyakoribbak a **jégesők** is, és a néha galambtojás nagyságú jég nemcsak jelentős gazdasági kárt okoz, de az emberi életet is veszélyeztetheti, gyakran emberi felelőtlenséghez társulva. Kimutatható, hogy a téli félévben lehulló csapadék mennyisége csökken, így csökken a felső termőréteg nedvességtartalma, de a talajvízszint is. A nyári félévre csökkenés alig látszik, de a heves esőzések, felhőszakadások gyakorisága növekszik, amikor akár néhány

óra alatt egy-két havi átlagos csapadékmennyiség is leeshet. Ilyen esőzéseknél nagyobb az elfolyás részaránya, így kevesebb víz szivárog a talajba, mellyel növekszik a szárazság esélye.

Összefoglalva: megváltozott a légkör összetétele, magasabb az átlagos hőmérséklet, terjed a sivatagosodás, melegednek a tengerek és az óceánok, olvadnak a gleccserek és a jégmezők, gyakoribbak az erdő- és bozóttüzek, a hóhullámok, illetve helyenként és időközönként a tartós aszályok és az özönvizek. Mindezek a világgazdaságot is fenyegető kockázatot jelentenek. A becsült éghajlatváltozás mértékét nagy tudományos bizonytalanság terheli (melyről később még lesz szó), de minden kétséget kizáróan rendkívül gyorsan következik be, földtörténeti időléptéket tekintve. Veszélyességét tehát elsősorban nem a változás mértéke, hanem gyorsasága jelenti. Egyetértés mutatkozik abban, hogy ez az éghajlatváltozás már megkezdődött és elkerülhetetlen, és – bár különböző megjelenési formákban és mértékben, de – előbb vagy utóbb mindenütt bekövetkezik, s ebben felfedezhetők az emberi beavatkozás jelei. Talán abban is egyetértés van, hogyha az üvegházhatású gázok emberi tevékenységből eredő kibocsátását 2050-re az 1990. évi kibocsátás felére csökkentenénk, az éghajlatváltozás legsúlyosabb következményeit még megelőzhetnénk, katasztrofális ökológiai, gazdasági és társadalmi hatását valószínűleg elkerülhetnénk. A fogalmazással érzékeltetni kívántuk, de nyomatékosításként le is írjuk, hogy az éghajlatváltozás megvalósulásával, okaival stb. kapcsolatban természetesen nincsen mindenben egyetértés a kutatók között. Mindezekről később még szó lesz, de itt szükséges megjegyezni, hogy amikor a médiumokban emlegetik az üvegházhatást, akkor szinte mindig az emberi tevékenység által előidézett hatására – tehát a globális felmelegedésre - gondolnak, s nem a természetes légköri üvegházhatásra, illetve annak az élet szempontjából kedvező hatására.

Az üvegházhatású gázokon kívül vannak olyan gázok, melyek közvetett úton, másodlagos hatások révén járulnak hozzá a globális felmelegedéshez, melyek az **indirekt üvegházhatású gázok**. Ilyenek a **nitrogén-oxidok** (nitrogén-monoxid és nitrogén-dioxid), a **szén-monoxid** és a **nem-metán illékony szerves vegyületek** (vagyis NO és NO₂, vagy röviden: NO_x; CO; NMVOC vagy gyakran csak VOC). E gázkomponensek kémiai folyamatok révén elősegítik az ózonképződést, az ózon viszont – mint láttuk – üvegházhatású gáz. Közvetve a **kén-dioxid** is részt vesz a globális felmelegedésben, mivel kémiai reakcióba lépve lebegő részecskék (szulfitok, szulfátok) alakulnak ki, s ezek módosítják a sugárzási kényszert (aeroszolok). Ezért szükséges e gázok légköri kibocsátásával is foglalkoznunk.

A **napsugárzás** (napfény) energiája a Nap belsejében 20-50 millió K hőmérsékleten zajló fúzióból származik, aminek teljesítményét $3 \cdot 10^9$ EW-ra becsülik. Ez hevíti 6000 K körüli hőmérsékletre a Napot körülvevő fotoszférát és ez a burok sugározza ki az elektromágneses hullámokat a világűrbe. A **napsugárzás 99 %-a 0.17-4 μm (170-4000 nm; 1 m= 10⁹ nm) hullámhosszak közötti elektromágneses sugárzás, maximuma** (legnagyobb sugárzási erősség) **a látható sugárzás** (a kék fény) **tartományában 474 nm (≅ 0.5 μm) hullámhossznál van** (a napsugárzás 7 %-a a röntgen és az ultraibolya - ibolyántúli -, 46 %-a a látható fény és 47 %-a az infravörös tartományban van). E sugárzást az atmoszférán való áthaladás során döntően a kisebb hullámhossz tartományban **veszteségek** érik az **elnyelés** (abszorpció), a **szóródás** (diszperzió) és a **visszaverődés** (reflexió) révén. Az elnyelés és a szóródás a sugárzás gyengülését (extinkció) okozzák. A légkört alkotó gázok elnyelése bizonyos hullámhosszakra korlátozódik (vagyis az elnyelés szelektív), s így egyes hullámhosszúságú sugarak egyáltalán nem vagy csak legyengülve érkezik meg a Föld felszínére, tehát a Föld felszínét elérő sugárzás spektruma eltér a napsugárzásétól. Az elnyelés hatására a Föld felszínét elérő sugárzásból teljesen hiányoznak a 0.29 μm-nél (290 nm-nél) rövidebb hullámhosszúságú sugarak, mivel e sugarakat (a sztratoszférában) elsősorban az ózon (290-320 nm között) és egyéb gázok elnyelik (az oxigén, a vízgőz, a szén-dioxid és a nitrogén, melyek rendre a 200, 180, 165 és 100 nm-nél kisebb hullámhosszú sugárzást nyelik el). Ez igen fontos a földi élet szempontjából, mivel e rövidhullámú (nagy energia tartalmú, a fotoszintézishez szükséges szén-dioxid és vízgőzmolekulák szétbontására képes) sugarak az élő sejteket roncsolják, s ha ezek elérnék a Föld felszínét, a szerves élet csakhamar megszűnne. A napsugárzás egyébként

(elsősorban az infravörös) tartományában is tapasztaltak csökkenést, elnyelési sávokat, döntően a troposzférában lévő vízgőz és szén-dioxid hatására. Így a **Föld felszínét elérő sugárzás** lényegében **290-2200 nm hullámhossz tartományt öleli fel**, de túlnyomó része 400-800 nm hullámhossz tartományba esik, **maximuma 555 nm-nél van** (sárga fény).

A **Föld felszínéről kiinduló sugárzás legnagyobb része 4-100 µm hullámhosszak közötti elektromágneses sugárzás**, melynek **maximuma 10 µm táján van**, s e sugárzás teljes egészében az **infravörös tartományba esik**. Tehát a Nap sugárzási spektruma jól elkülönül a Föld sugárzási spektrumától. A Föld infravörös sugárzásának egy része nem képes az atmoszférán áthatolni a már korábban is tárgyalt elnyelés miatt, melyben meghatározó a vízgőz és a szén-dioxid, de más gázok is nyelnek el sugárzást. Az atmoszférában jelenlévő nagymennyiségű vízpára a spektrum nagy részét abszorbeálja (20 µm feletti, illetve az 5-8 µm közötti hullámhosszúságú sugarakat), de elnyelő képessége 8-20 µm hullámhosszak között csökken, tehát itt marad egy ún. „légköri ablak”. A szén-dioxid a 3.5-4 µm és a 12-17 µm hullámhossz közötti sugárzásokat abszorbeálja, s van még egy gyenge elnyelési sávja 10 µm körül és az ózonnak egy erős elnyelési sávja a 9.6 µm hullámhossznál, de e két utóbbi hatása jelentéktelen. Így végül **8-13 µm hullámhosszak közötti tartományra szűkül a „légköri ablak”** (s fontos, hogy ide esik a sugárzás maximuma), melyben a **Föld kisugárzása akadálytalanul kijut a légkörön át a világűrbe**. Az elnyelt energiát a gázok aztán minden irányban ismét kisugározzák, illetve szétszórják, melynek eredményeként tehát a Föld által kisugárzott energia egy része ismét visszajut a Föld felületére és azt melegíti. Ennek végső eredménye, hogy a Föld felszínének átlagos hőmérséklete a kellemes 15 °C, és nem -18 °C, ami az atmoszféra hiányában kialakulna. Ezt a melegítési hatást nevezzük **(légköri) üvegházhatásnak** a működő üvegházak analógiájára, noha az utóbbihoz még hozzátartoznak egyéb folyamatok, mint például a felmelegedett levegő összetétele és a hideg áramlatok kizárása. A légköri üvegházhatás tehát olyan természetes folyamat, amelytől létünk függ.

VILÁGMÉRETŰ VÁLTOZÁSOK MUTATÓI

A környezetbe való emberi beavatkozás hatására világméretű változások kezdődtek el és/vagy valósultak meg. Az alábbiakat és/vagy a bennük bekövetkezett változásokat tekintik e folyamat mutatóinak:

a levegő és éghajlat;

a víz és vízkészlet, vízfelhasználás;

a biológiai változatoság (biológia sokféleség, biodiverzitás);

a népesség;

az energia, energiaforrás, energiafogyasztás.

A következőkben a levegő és éghajlat témakört tárgyaljuk és a benne végbemenő változásokat mutatjuk be.

Levegő és éghajlat

(globális felmelegedés, savasodás, szmogok, ózonréteg károsodás)

A földi életet többek között a légkör számunkra kedvező összetétele biztosítja. Ebben két igen kis koncentrációban és kis mennyiségben jelenlévő, de alapvető fontosságú alkotóelem az **ózon** és a **szén-dioxid**. Az ózon véd meg az ultraibolya sugárzástól, nélküle nem lenne élet a földön, a szén-dioxid pedig - más üvegházhatású gázokkal együtt - biztosítja a kellemes klímát, az üvegházhatás révén. Az emberi tevékenység hatására azonban megváltozott a légkör összetétele, s ennek részeként az ózon mennyisége csökkenni kezdett a sztratoszférában és növekedni a troposzférában, a szén-dioxid mennyisége, de főleg koncentrációja „gyorsan” növekszik. A **változásokat** elsősorban a **globális felmelegedés**, a **savas esők**, a **szmogok**, az **ózonréteg elvékonyodása** (ózonlyuk), illetve **károsodása** és a **fokozódó korrózió** jelzik. A savas eső kifejezést 1872-ben vezette be Robert Angus Smith angol kémikus; hatásában „kiemelkedő” volt az 1952. évi londoni szmog; az első fotokémiai szmogot 1943-ban Los Angelesben észlelték; az ózonréteg károsodását, néhány hétig tartó ritkulását először az 1970-es években tapasztalták az Antarktisz felett. A kén-dioxid és nitrogén-oxidok kibocsátásának csökkentése sikeresen megvalósult, elsősorban Európában és Észak-Amerikában. Látni fogjuk, hogy az ózonritkulás problémájának kezelése egy másik példa a valóban sikeres nemzetközi összefogásra, amíg a szén-dioxid és más üvegházhatású

gázok kezelése lényegében megoldatlan probléma. Megoldására a kiotói megállapodás mellett az éves klímakonferenciákon, majd 2015. decemberében Párizsban tettek kísérletet, kétes sikerrel (l. később).

A **légkör (atmoszféra)** a Földet körülvevő, **a gravitáció által megtartott gázburok**, a benne található gázelegy a **levegő**. A légkör függőleges irányban kb. 3000 km-ig terjed, felső határa élesen nem határozható meg, fokozatosan megy át a bolygóközi térbe. A levegő tiszta állapotban színtelen, szagtalan, környezetünk egyik alapvető eleme. A levegő mennyisége $5.2 \cdot 10^{18}$ kg, mely a Föld tömegének mintegy egymilliomoda, a bioszféra egyetlen eleme, mellyel minden ország területével arányosan rendelkezik. A **levegő** mintegy 50 vegyületet tartalmazó **többkomponensű gázelegy**, összetétele tekintetében **sokkal régebben állandó, minthogy ember él a Földön**. A **száraz levegő 99.96 %-ban oxigén, nitrogén és nemesgázok** (főleg argon) **keveréke**, melyek a **levegő állandó alkotói**. Átlagos moláris tömege 28.96 (közelítőleg 29). Az **erősen változó** komponensek közé tartozik a **vízgőz**, melynek koncentrációja igen széles tartományban változik (40-40000 ppm között, tehát akár 4 % (v/v) is lehet), de **átlagosan** mintegy 4000 ppm, tehát **0.4 %** (v/v, tömegre 0.25 %), összes légköri mennyisége $13 \cdot 10^{12}$ t (13000 km^3), átlagos tartózkodási ideje 9 nap, vagyis évente mintegy negyvenszer cserélődik ki. Az atmoszféra fontos **alkotói a nem gázállapotú anyagok is**, mint a **levegő szilárd és cseppfolyós részecskék (aeroszolk)**. A levegő összetétele a természeti folyamatok eredményeként helyileg és időszakosan ingadozhat (természeti katasztrófák, tűzhányók, rothadás stb.), de az emberi emisszió is változásokat idéz elő.

Az említett problémákat a kis koncentrációban jelenlévő komponensek, az ún. **nyomgázok** okozzák. E komponensek között kiemeljük a **szén-dioxidot**, a **metánt**, a **kén-dioxidot**, a **nitrogén-oxidokat**, továbbá a **freonokat**, minthogy ezek okozzák a korábban felsorolt problémákat. A nyomgázok közül a szén-dioxid a leggyakoribb a levegőmolekulák között, és 2013. májusában átlépte 400 ppm értéket, vagyis akkor 400 szén-dioxid molekula volt a levegőt alkotó egy millió gázmolekula között (2500 molekulából egy szén-dioxid molekula volt). Tény, hogy a 19. század (lényegében az iparosítás) kezdete óta jelentősen nőtt a fosszilis tüzelőanyagok elégetésének mértéke, ezzel egyidejűleg világméretűvé vált az erdők pusztulása/irtása és erre az időszakra esik a földművelés gyakorlatának jelentős mértékű megváltozása is. Ezek együttes hatására felborult az egyensúly az atmoszférába bocsátott és az onnan eltávolított szén-dioxid mennyisége között, ennek eredményeként világméretben közel egyenletesen megnőtt az atmoszférában a **szén-dioxid koncentrációja**, s ma **közel 60 %-kal haladja meg a másfél évszázaddal ezelőtti értéket**. A légköri levegőbe az élő szervezetek és a talajban lejátszódó oxidációs folyamatok eredményeként állandóan kerül szén-dioxid, de ezt a zöld (autotróf) növények asszimilációs folyamataikhoz a fotoszintézis révén felhasználják. A kutatók úgy vélik, hogy a levegő szén-dioxid egyensúlyát főleg az emberi tevékenységből eredő szén-dioxid kibocsátás bontja meg, és az üvegházhatás fokozódása révén a **globális felmelegedés** jelenségét eredményezi. Ugyancsak igen kis koncentrációban található a **kén-dioxid** (a legnagyobb gázkibocsátás helyén is legfeljebb 50 kén-dioxid molekula található a levegőt alkotó 1 milliárd gázmolekula között, vagyis a koncentráció 50 ppb), de mégis felelős a **savas esőkért**, a **savas ülepedésért**, a fémek és a kőzetek, illetve a mészkővel borított történelmi épületek ún. **civilizációs korróziójáért**. Ezért határozták el kibocsátásának csökkentését **Helsinkiben (1985)** és **Oslóban (1994)**. Ennél még kisebb gyakorisággal található **nitrogén-oxid** molekulák a légkörben, de részben felelősek a savas esőkért és az ózonlyuk kialakulásáért. Ezért döntöttek kibocsátásának csökkentéséről **Szófiában (1988)**. Különleges helyet foglalnak el a **halogénezett szénhidrogének** (klórozott-fluorozott szénhidrogének), melyek **a múlt század közepén jelentek meg a légkörben**. A problémákat okozó komponensek tehát:

szén-dioxid (CO₂)
metán (CH₄)
kén-dioxid (SO₂)
nitrogén-oxidok (NO_x)
halogénezett szénhidrogének (CFC-k).

Az éghajlatváltozásban legnagyobb hangsúly a **globális felmelegedés**en van. Okaként főleg azt tekintik, hogy az elmúlt másfél-két évszázad során jelentős mértékben növekedett az **üvegházhatású gázok** légköri koncentrációja (szén-dioxid, metán, dinitrogén-oxid és freonok), a 20. században mindegyiknél jelentős a növekedés és a század második felében (kiemelten az utóbbi két-három évtizedben) tovább gyorsult. Adatok szerint **az ipari forradalom óta a szén-dioxid koncentrációja közel 60 %-kal, a metáné közel 150 %-kal, a dinitrogén-oxidé mintegy 20 %-kal haladja meg az ipari forradalom előtti értékeket.** Egy kilogrammra vetítve a metán üvegházhatása 25-szöröse, a dinitrogén-oxidé pedig 298-szorosa a szén-dioxidénak (100 éves időtávra). A mesterséges eredetű **freonok** korábban nem voltak jelen a légkörben, kimutatható mennyiségben csak az 1950-es években jelentek meg. Ennek hatására növekszik a visszatartott kisugárzás mennyisége, mely a földfelszín felmelegedéséhez vezet, erősödött az egész Földre kiterjedő éghajlatváltozás kockázata. Legnagyobb mértékű változás kétségtelenül a szén-dioxid kibocsátásában következett be: az ipari kibocsátás 1860-ban 140 millió, 1910-ben 1.1 milliárd, **1990-ben 21 milliárd** és 2000-ben 23 milliárd tonna volt, míg **napjainkban 35 milliárd tonna körül alakul.** Ennek háromnegyedét a fejlett ipari országok bocsátják ki és közel 60 %-át öt ország adja, a népesség 40 %-ával. A 2015-ben kibocsátott érték 36 milliárd tonna volt, a legfőbb kibocsátó öt ország és részesedésük a következő: Kína: 30 %; USA: 14 %; India: 7 %; Oroszország: 5 % és Japán: 3 %. Az Európai Unió (EU 28) együttesen a kibocsátás 10 %-át adta. **A szén-dioxid kibocsátás 1990 óta közel kétszeresére emelkedett, a növekedés az elmúlt években töretlen volt, az 1997-ben elfogadott és 2005-ben hatályba lépett kiotói megállapodás ellenére. A metán és a dinitrogén-oxid koncentrációja elsősorban mezőgazdasági okok következtében növekedett.** Emlékeztetőül: az üvegházhatás előidézésében legnagyobb hatású a vízgőz, melyet rendszerint nem vagy ritkábban emlegetjük a globális felmelegedés kapcsán, mivel légköri mennyiségét az emberi tevékenység - a jelentős kibocsátás ellenére - nem tudja megváltoztatni, hiszen egyrészt igen nagy mennyiséget tartalmaz belőle a légkör, másrészt átlagos légköri tartózkodási ideje rövid (9 nap). Az átlagos hőmérséklet növekedésével a légkörben tartózkodó vízgőz mennyisége értelemszerűen növekszik, de ennek hatása kisebb a többi üvegházhatású gázhoz képest (amint említettük is).

A **szén-dioxid** koncentrációjának alakulása az iparosítás előtti időszakról napjainkig, illetve a becsült érték 2100-ban a következő:

iparosítás előtt (1000-1750 között)	280 ppm
1800-as évek végén	300 ppm
1980	339 ppm
1990	354 ppm
2000	368 ppm
2016	404 ppm
2023. március 25.	420.56 ppm (növekvő fázisban)
2100	600 ppm vagy akár még nagyobb.

Megjegyzések: (1) az utolsó érték extrapoláció, feltételezve a mai kibocsátási szintet; (2) a szén-dioxid koncentrációjával megegyően csökkent az oxigén koncentrációja, melyet mérésekkel kimutattak; (3) a klímakutatók többsége szerint a 450 ppm-es légköri szén-dioxid-koncentráció már visszafordíthatatlan következményekkel járna az éghajlatváltozás szempontjából, de a földtörténetben előfordult már 1800 ppm-es

légköri koncentráció is, mégsem lett belőle a bioszférára, a társadalomra nézve pusztító esemény (kataklizma: Wikipédia: Szén-dioxid).

A szén-dioxid koncentrációját 1958 óta mérik igen nagy pontossággal, Hawai Mauna Loa hegyén, ebben **Charles Keeling** úttörő szerepét kell kiemelni. Régebbi korok légköri szén-dioxid koncentrációjára a jégfúrással felszínre hozott jégmintákba zárt légbuborékok vizsgálatából következtetnek. Ezekből megállapították, hogy **a szén-dioxid koncentrációja ma nagyobb, mint bármikor az elmúlt 800 ezer évben és feltehetően nagyobb, mint bármikor az elmúlt 20 millió évben, és az elmúlt pár ezer évben egészen a 19. század közepéig gyakorlatilag állandó volt 270-280 (275-285) ppm közötti értékekkel.** Ezt az időszakot követően folyamatosan növekedve érte el a mai szintet, melyhez a múlt század utolsó negyedében átlagosan 1.5 ppm értékkel, a 2000-es években átlagosan 2 ppm értékkel növekedett évente. **Sok ezer vagy több tízezer évvel ezelőtt az emberiségnek nem volt köze a szén-dioxid koncentráció nagymérvű változásaihoz, de az utóbbi másfél évszázadban bekövetkezett folyamatos növekedés az emberi tevékenység - a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának – eredménye, vagy az is lehet.** Megjegyezzük, hogy **a légkör szén-dioxid tartalma a szerves élet egyik forrása,** hisz a zöld növények a fotoszintézis útján az élő anyagukba építik azt.

Hazánkban az 1980-as évek elejétől heti gyakorisággal mérik a szén-dioxid koncentrációját a K(ecske)pusztai és a hegyhátsági állomásokon (1980-tól, illetve 1993-tól), hetenként. A mérések növekedést mutatnak, mely megfelel a globális változásnak, de valamivel felette halad, melyet az ország földrajzi fekvése indokol (óceánoktól távol, szennyezőforrásokhoz közel, zárt medence). A változás nem egyenletes. Az ország éves középhőmérsékleti értékeiről már írtunk, de a kisebb terület miatt nagyobb a változékonyság, az évszakok tekintetében nem egyenletesen, tavasszal és nyáron nagyobb hőmérséklet-emelkedés következett be. **A melegedési tendenciát a nyarak tükrözik leginkább.** Az éves csapadék mennyisége csökkent, 109 év alatt 7 %-os a csökkenés. Az országos évi csapadékösszeg 1971 és 2000 közötti átlaga 568 mm. A csapadék térben és időben nagyon változó, így a – az éghajlatváltozás hatására bekövetkező – tendenciákat nehezebb kimutatni, mint a hőmérséklet esetén. Míg az évi középhőmérséklet az elmúlt 30 évben szignifikáns növekedést mutat, addig a csapadék változása még egy hosszabb, 50 évet felölelő időszakban sem mutatható ki egyértelműen (bár vannak olyan források is, melyek szerint az átlagos csapadék mennyisége 640 mm-ről 560 mm-re csökkent, a téli csapadék nagyobb, a nyári kisebb mértékben csökkent). A sztratoszféra hőmérsékletcsökkenésére 20 km magasan 2.7 °C értéket mértek. Az ózon koncentrációjának csökkenése – a világra jellemző helyzettel megegyezően – az 1990-es években volt a legnagyobb, a „gyógyulás” nálunk is megkezdődött, de koncentráció még mindig kisebb a sokéves átlagnál. (Éghajlatváltozás. Országos Meteorológiai Szolgálat)

Jégmag: a régmúltban felgyűlt, az idők folyamán újrakristályosodott hó és jég mélyebb rétegeiből vett minta, melyet jégfúrással hoznak felszínre. A jégmag minden egyes szelete a múltból szolgál bizonyítékokkal. Általában az Antarktisz (mely a legfontosabb mintavevő hely) és Grönland mélyéből, illetve gleccserekből gyűjtenek jégmagokat. A jégmag csapdába esett levegőbuborékokot tartalmaz, melyek összetétele, különösen az oxigén- és a hidrogénizotópok aránya segít a minta keletkezési idejében uralkodó klíma meghatározásában. Ha deutériumból sok van egy jégmintában, az nagyobb hőmérsékletre (melegebb klímára) utal, ha kevés, akkor hidegebbre. A jégmagokból így a légköri gázok koncentrációja számítható. Az Antarktisz jegéből (az orosz Vosztok állomás) 320000, 420000 és 720000 éves mintákat is vettek, így ennyi évre tekinthetünk vissza a Föld légköri viszonyaira.

Elsőként **Charles David Keeling** (1928-2005) amerikai kutató irányításával mérték meg a légkör szén-dioxid koncentrációját a hawaii **Mauna Loa** (Hosszú-hegy, 4170 m, pajzs vulkán) vulkanikus hegy északi lejtőjére telepített obszervatóriumban (Mauna Loa Observatory), általa kifejlesztett műszerrel, 1958-tól napjainkig. A Mauna Loa a földkerekség legnagyobb vulkánja, 1843 óta 33-szor tört ki, utoljára 1984-ben. Az obszervatórium 3400 méterrel a tengerszint felett van, jóval az emberi behatás magassága felett, lakott területektől távol, így az

emberi tevékenység és a növényzet hatása elenyésző, tehát az egyik legjobb helyszín a földkerekség atmoszférájában bekövetkező változások kimutatására. A mérési eredményeket a vulkánikus szén-dioxid kibocsátás hatásának kiküszöbölése céljából helyesbítik. Az eredményeket grafikonon ábrázolják, és ez a **Keeling-görbe**. Az obszervatórium adatai szerint a szén-dioxid éves átlagos koncentráció az 1958-ban mért 315 ppm-ről már (2016. február) 406 ppm-re emelkedett (ugyanebben az időszakban az Antarktiszon a változás: 315-393 ppm). Charles Keeling egyértelműen a fosszilis tüzelőanyagok elégetésének tulajdonította a szén-dioxid koncentráció folyamatos emelkedését. A grafikonon kb. 3-9 (átlagosan 5) ppm-es szezonális ingadozás is megfigyelhető, vagyis a görbe **fűrészfog-jellegű**, aminek az északi félteke erdeiben zajló évszakos változás az oka. Az erdők ugyanis minden tavasszal hatalmas mennyiségű szén-dioxidot vonnak ki az atmoszférából a fotoszintézis révén, ami a Keeling-görbén a koncentráció visszaesésében jelenik meg. Az őszi beköszöntével viszont növekedni kezd a szén-dioxid koncentráció, a szerves anyagok természetes lebomlása következtében keletkező szén-dioxid révén. A Keeling-görbe azonban azt is mutatja, hogy minden tavasszal egy kicsivel nagyobb szén-dioxid koncentrációról indul a csökkenés, mint előző évben, tehát lassan növekszik a légköri koncentrációja. A XX. század végétől a szezonális ingadozás nagyobb mértékét is megfigyelték. Ma kb. 100 hasonló meteorológiai állomás működik Földünkön, így a Mauna Loa állomásról származó adatokat független források is megerősítik.

Az üvegházhatású gázok az egész Földre kiterjedő melegedést okoznak (tehát hatásuk globális), szemben a kén-dioxid és az aeroszol részecskék hatásával, mely jobban követi a kibocsátás földrajzi eloszlását (de ezt a szélrendszer természetesen módosíthatja). A globális felmelegedés mértékéről és hatásairól korábban szövegtünk.

Az ENSZ égisze alatt nemzetközi intézkedések is születtek az éghajlatváltozás kockázatainak vizsgálatára, így pl. megalakult az **Éghajlat-változási Kormányközi Testület (IPCC)**, 1988. novemberében. E szervezet világviszonylatban foglalkozik e kérdéssel, saját kutatást nem folytat, a megjelent tudományos közleményeket elemzi, vizsgálatairól jelentésekben számol be. **Tudományos állásfoglalást tartalmazó jelentéseket 4-6 évenként ad ki**, ezek közös megállapodáson (**ENSZ konszenzuson**) alapulnak, szélsőséges álláspontokat nem tartalmaznak, mely munkája eredményességére akár hátrányos is lehet. A Testület 1990-ben, 1996-ban, 2001-ben, 2007-ben, 2013-ban és 2021/2022-ben adott ki jelentést. A hosszabb távú vizsgálatokhoz egymástól jelentősen eltérő **forgatókönyveket (scenáriókat) dolgoztak ki**, melyekben különböző feltételekkel éltek pl. a gazdasági növekedés mértékére, a felhasznált energia forrására - ez az ún. energia-mix -, a népesség növekedésének mértékére, a környezetvédelmi tevékenység felgyorsulására, illetve ennek hatására stb., majd ezekre becsülték a szennyező anyagok kibocsátását és a klímaváltozás mértékét. Az első **jelentések csak valószínűsítik, az újabbak már egyértelmű kapcsolatot mutatnak ki az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése és a felmelegedés között**. A **2007-ben kiadott negyedik jelentés** az átlagos hőmérséklet növekedésére **2100-ra 1.1-6.4 °C-t becsül, de legnagyobb valószínűséggel 2-4.5 °C közötti hőmérsékletnövekedés várható, a legjobb becslés kb. 3 °C, 1.5 °C alatti növekedés nagyon valószínűtlen, de a 4.5 °C-ot meghaladó emelkedés sem zárható ki**. Az idők folyamán a kijelentések tudományos bizonyossága erősödött, és kézenfekvőbbé vált, hogy komolyan számolnunk kell a nagyobb mértékű változásokkal, ezek következményeivel, melyek csak hathatós intézkedésekkel kerülhetők el. A Testület szerint **az elmúlt fél évszázadban bekövetkezett melegedés példa nélküli legalább a megelőző 1300 évben, a sarkvidékek viszont csak kb. 125 ezer évvel ezelőtt voltak ilyen melegek**. Nagyon valószínűnek tartják, hogy a 20. század közepe óta megfigyelt globális átlagos hőmérsékletemelkedés nagy része **az üvegházhatású gázok antropogén kibocsátásának a hatása**. A hazánkat is érinti a nyári csapadékmennyiség csökkenése, a növekvő vízellátási gondok, a hóhullámok egészségügyi kockázatának növekedése, az erdők termőképességének romlása stb.

Az üvegházhatású gázok mellett vannak **további légköri "melegítő" hatások**, melyek: a troposzférikus ózonkoncentráció emelkedése, a fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származó aeroszolok mennyiségének növekedése, a repülőgépekből a légkörbe kerülő

égéstermékek hatása, valamint a Nap sugárzásának változásai. A sugárzási kényszer megváltozásához sokkal kisebb mértékben járulnak hozzá a **légkört "hűtő" folyamatok**: a sztratoszférikus ózonkoncentráció csökkenése, a szulfát-aeroszolok és a szerves anyagok égetéséből származó aeroszolok mennyiségének növekedése, valamint a földhasználatban bekövetkezett változások. Az aeroszolok visszaverődés és elnyelés révén csökkentik a Föld felszínét elérő sugárzás mennyiségét (közülük elsősorban a szulfát- és a nitráttartalmú lebegő részecskék, melyek nagyrészt a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása révén kerülnek a légkörbe). Becslések szerint az aeroszolok sűrűn iparosodott területeken az üvegházhatásnak akár a felét is ellensúlyozhatják. E jelenségek tehát **a globális felmelegedés mértékét csökkentik, közülük legjelentősebb az aeroszolok hűtőhatása** (l. később).

A globális felmelegedéssel kapcsolatban **eltérő vélemények** is megfogalmazódnak (amint már említettünk is), döntően okával kapcsolatban. Ezek alapja az a tény, hogy a **Föld 4.6 milliárd éves története alatt jelentős mértékű éghajlatváltozás ment végbe, emberi beavatkozás nélkül is**. Ezt ugyan ma még nem vagyunk képesek tudományos pontossággal teljesen megmagyarázni, de tény, hogy a **Föld a jelenlegi átlagos hőmérsékletnél sokkal többször volt melegebb, mint hidegebb!** Igaz ez az utóbbi 350-400 millió évre is, amikor az atmoszféra oxigéntartalma már a jelenlegi szint körül volt. Az utolsó néhány százezer évre ismereteink részletesebbek, az antarktisi és a grönlandi **jégminták** izotópos **elemzése**i alapján, melyekből a légkör összetételének változása mellett a földfelszín átlagos hőmérsékletének változására is következtethetnek. A kételyek azonban **nem a bekövetkező globális felmelegedést vitatják**, hanem azt, hogy ehhez az **emberi kibocsátás milyen mértékben járul hozzá**, illetve azt, hogy ezt alapvetően az emberiség által kibocsátott szén-dioxid okozza-e. E kérdésre pl. az is alapot adhat, mely szerint az utóbbi 160 ezer év nagy részében a szén-dioxid koncentráció (amint írtuk is) 190-280 ppm között változott, amikor emberi beavatkozásról, illetve emberi eredetű szén-dioxid kibocsátásról nem beszélhetünk. Korábban is előfordultak a jelenleginél 2-3 °C-kal melegebb időszakok, ugyancsak emberi beavatkozás nélkül. Így tehát **a természet is létrehozott a jelenleginél melegebb klímát**. Az emberi tevékenység hatását vitatók szerint a ma észlelhető klímaváltozás nem köthető közvetlenül a szén-dioxid koncentráció növekedéséhez, hanem egy ciklikus geofizikai folyamat eredménye, amely az Antarktisz-kutatások szerint mindig is létezett, s hasonló változások az elmúlt évmilliók során sokszor bekövetkeztek. De ennek az álláspontnak a képviselői sem gondolják, hogy az emberiség korlátlanul bocsáthat ki szén-dioxidot.

Hogyan tovább klímaváltozás? Az ENSZ sok éven át törekedett a kiotói megállapodást követő nemzetközi klíma megállapodás elfogadtatására a 2012. utáni időszakra, figyelemmel a változásokra és a tapasztalatokra. **Cél, hogy az üvegházhatású gázok éves kibocsátását a jelenlegi közel 50 milliárd tonna értékről 35 milliárd tonnára csökkentsék 2050-ig, mellyel a becsült hőmérsékletemelkedés 2 °C alatt lenne tartható.** A becslések szerint ugyanis ezt az értéket túllépve visszafordíthatatlan folyamatok indulnak el a klímaváltozásban, az emberiség „veszélyzónába” kerül. A minden év decemberében megrendezett tárgyalásokon nem sikerült előre lépni, de **2015. decemberében Párizsban** felcsillant a remény, hogy áttörés következett be, s megszületett a **Párizsi Megállapodás**, hiszen a résztvevő 192 ország elfogadta az **első egyetemes klíma-megállapodást**. Ebben az aláíró államok vállalták, hogy 2100-ig 2 °C alatt tartják az átlagos hőmérsékletemelkedést az „iparosodás előtti mértékhez” képest, és rögzítették elkötelezettségüket arra is, hogy lehetőség szerint 1.5 °C alatt tartásuk ezt az értéket („erőfeszítéseket tesznek, hogy a növekedés 1.5 °C alatt legyen”). Ez utóbbi cél a tengerszint emelkedésével fenyegetett országok törekvése volt, amit 100 országnál több támogatott, de nem kapott nemzetközi elfogadottságot. Távlati cél, hogy 2050 utánra az emberi tevékenységből eredő szén-dioxid kibocsátás és a bioszféra általi szén-dioxid elnyelés egyensúlyban legyen, tehát üvegházhatású „**gázsemlegesség**” (**karbon**

semlegesség) jöjjön létre. A konferencia előtt az egyes országok felajánlásokat (nemzeti hozzájárulásokat, angolul nationally determined contributions) tettek kibocsátásuk csökkentésére („előzetes szándékok”), a célok teljesülését a megállapodás szerint először 2023-ban vizsgálják meg. A vállalásokban lényegében a „**közös, de megkülönböztetett felelősség elve**” kell, hogy érvényesüljön a fejlett és a fejlődő országok érdekellentéte miatt. Ugyanis jelenleg közel azonos a fejlett és a fejlődő országok üvegházhatású gáz kibocsátása, de történelmileg elsősorban a fejlett országok felelősek a jelenlegi helyzetért, a fejlődő országok pedig elsősorban gazdasági eredményeiket és életszínvonalukat (annak növekedését) féltették, s nem foglalkoztak kibocsátásaikkal. A hivatkozott elv szerint az első lépcsőben a fejlett országoknak kibocsátásuk tényleges csökkentését kell vállalniuk, a fejlődő országoknak pedig kibocsátásuk szabályozására kell vállalkozniuk. A vállalásokat 2023-mat követően ötévente kell megújítani, emelt szinten. A Párizsi Megállapodás **2016. november 04.-én hatályba lépett**

Ez az első olyan megállapodás, amely valamennyi országot egy közös cél érdekében egyesíti, ami a 2 °C hőmérsékletemelkedés elkerülése. Kötelező érvényű előírások, számszerűsített értékek nem szerepelnek a megállapodásban, a részleteket az évente szervezett klímakonferenciák lettek volna hivatottak kidolgozni. A konferencia előtt az egyes országok **felajánlásokat** (nemzeti hozzájárulásokat, angolul nationally determined contributions) tettek az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére („előzetes szándékok”), de a becslések szerint ezek nem elégségesek a vállalt célok teljesítéséhez, hiszen 3.5 °C hőmérsékletemelkedést jelentenének. A megállapodás nem jár következménnyel, ha az országok nem teljesítik a hozzájárulásukat, a megegyezés ilyen szempontból tehát gyenge. A hangsúlyt lényegében az **ösztönzésre**, s nem a kipellengérezésre helyezi a megállapodás.

Sokan úgy gondolták, hogy a **Párizsi Megállapodás** olyan új korszakot nyitott a világban, mely **derűlátásra ad alapot**, s úgy vélték, hogy 2050-re főként a megújuló és az új technológiákkal előállított energiaforrások fedezik az emberiség energiaigényét. Erre rácafélt a közben eltelt pár év, hiszen nem sikerült előre lépni az évenkénti konferenciákon. Történik mindez akkor, amikor az Éghajlat-változási Kormányközi Testület 12 évet adott az emberiségnek a cselekvésre a 2018. október 08.-án megjelentetett közleményében. Nem történt előrelépés az ENSZ Közgyűlésen sem, 2019-ben.

Sokak szerint (szerintem is) valódi eredmény a legifjabb nemzedék megjelenése, minthogy a szervezők lehetőséget adtak a megjelenésre a jövőjük miatt aggódó „tizenéves aktivistáknak”, akik jogosan kérik számon a világ politikusain „a **tutyimutyi felelőtleniséget** és **diplomatikusan időhúzást**”. A svédországi iskolákban sztrájkot szervező **Greta Thunberg** (született: 2003. január 03., Stockholm) felszólalása felhívta a figyelmet arra, hogy az idős döntéshozók fontolva haladásával nem lehet megmenteni a felnövekvő generációk jövőjét.

A 2021/2022-ben megjelent az Éghajlat-változási Kormányközi Testület új jelentése az ENSZ főtitkára szerint **vörös riasztás az emberiségnek!** A Jelentés megerősíti, hogy 125 ezer éve nem volt ilyen magas az átlagos hőmérséklet, és legalább az elmúlt 2000 évben nem volt ilyen ütemű melegedés a Földön, melyet egyértelműen az emberi eredetű kibocsátások okoznak. A Jelentés talán legfontosabb „üzenete”, hogy a riasztó tendencia ellenre fizikailag még lehetséges a felmelegedés 1.5 °C alatt tartása, mely csakis rajtunk, az emberiségen múlik. Mit kell tenni ehhez? Amit eddig is tudtunk, csak egy kicsit szigorúbb ütemtervvel: 2030-ra közel felére kell csökkenteni az üvegházhatású gázok kibocsátását, vagyis 25-30 md tonnára, s 2050-re a globális nulla szintet kell elérni. A 2021. decemberi klímacsúcson (Glasgow) állítólag születtek kedvező intézkedések egyes államok részéről, de ennek eredményére szerintem várni kell, mert ígéretekben a politikusok sosem szegények, másrészt néhány nagy kibocsátó nem tett újabb vállalásokat (Kína, India, Brazília). Fontos: nyugtával dicsérjük a napot!

A környezet (a felszíni vizek és a talaj) **savasodása** (a pH érték csökkenése) az utóbbi évtizedekben vált ismertté, melyet a **savas ülepedés** okoz. A savas ülepedéssel a légkörben lévő savas kémhatású, illetve savképző anyagok (kén-dioxid, nitrogén-oxidok, szulfátok,

nitrátok) kiülepednek a légkörből. A gáznemű komponensek, a szilárd anyagok és az aeroszol részecskék egy része közvetlenül is kiülepedik a felszínre (talajra, tárgyakra, növényzetre stb.), mely a **száraz kiülepedés**. A szennyezők másik része a levegőben és a csapadékban savvá alakul, így a csapadékban oldva hagyja el a légkört, s ez a **nedves kiülepedés**. A csapadék a természetes légkörben is kissé savas kémhatású, így **savas csapadékról akkor beszélünk, ha a csapadék kémhatása 5 alá csökken, mely emberi beavatkozás nélkül nem fordulna elő**. Hazánkban a csapadék átlagos pH-ja 4.5 körül van, az északi féltekén az 1970-es évek óta az ülepedő anyagok kémhatása erősen savas. Európai átlagban – s nagyrészt hazánkban is – a nedves ülepedés (savas csapadék) okozza a savas ülepedés mintegy felét. A savas ülepedés hatására a vizek, a tavak és az élővilág mellett az épített (művi) környezet is károsodik. A tavak és a talajvíz savasodása jól mérhető. Savasodik a talaj is, pH-ja csökken, s ez a savas kémhatás kivonja a tápanyagokat, a **kalcium, a magnézium és a kálium ionokat**, amely ezek **hiányához** vezet. A talaj savasodásának eredményeként **a talajban lévő nehézfémek** (Cd, Hg, Pb, Sn stb.) **oldhatóvá válnak** és a talaj mélyebb rétegeibe szivárognak, illetve a talajvízbe kerülnek. Az oldott állapotba került nehézfémeket a növények is felveszik, szervezetükbe építik, s elfogyasztásukkal a nehézfémek **a táplálékláncba kerülnek**, károsítva az ember és az állatok egészségét. A talajban élő mikroorganizmusok is elpusztulhatnak, melynek egyik hatása egyes fajok pusztulása erdeinkben. E jelenség az északi féltekén kontinentális méreteket öltött. A savas esőt okozó anyagok nemcsak a kibocsátás helyén tudják kifejteni hatásukat, hanem attól sok száz, illetve több ezer kilométer távolságra is, mivel a szélrendszer akár a néhány napos tartózkodási idő alatt is lehetővé teszi ilyen távolság megtételét. Ez tehát nemzetközi probléma, s ennek megfelelően igyekeztek kezelni.

A **füstköd (szmog) a légszennyező anyagoknak a határértéket nagy területen, hosszú időn át, jelentős mértékben meghaladó felhalmozódása**. Kialakulását a nagymértékű emisszió, a kedvezőtlen meteorológiai körülmények (szélcsendes időszak, illetve 2 m/s alatti szélsébség) és a domborzati viszonyok határozzák meg. Két típusát különböztetik meg: a **London-típusú redukáló** és a **Los Angeles-típusú oxidáló füstködöt** (utóbbit fotokémiai füstködnek is nevezik). Az első London-típusú füstködök völgyekben elhelyezkedő iparvidékeken és Londonban (innen az elnevezés) következtek be. A fotokémiai füstködöt 1943-ban Los Angelesben észlelték először. Hazai nagyvárosokban az 1960-as években először a London-típusú, majd az 1980-as évektől a Los Angeles-típusú szmogok jelentek meg. **A redukáló füstködök a mérsékelt égövben október-február között fordulnak elő, főleg fosszilis tüzelőanyagok emissziójából keletkeznek** (fűtés, ipari és erőművi tüzelőberendezések). **A fotokémiai szmog erős napsütésben, szélcsendes időben a legerősebb, főleg közlekedési eredetű kibocsátásokból keletkezik**, a nyári hónapokban (június-szeptember). Ez a tulajdonsága különbözteti meg legjobban a hagyományos (London-típusú) szmogtól, azt ugyanis a napsütés eloszlatja. Az eddigiekből következik, hogy a **London-típusú** (mely **este és reggel a legerősebb**) füstködben a kén-dioxid, a korom és a szén-monoxid, a **Los Angeles-típusú** füstködben (mely **a déli órákban a legerősebb**) az ózon, a nitrogén-oxidok, a szén-monoxid és a szénhidrogének játsszák a fő szerepet.

Az **ózonlyuk** az ózon elbomlása révén keletkezik. Az **ózon** a légkörben csak igen kis mennyiségben és kis koncentrációban fordul elő (3500 millió tonna, a teljes légkörben átlagos koncentrációja 430 ppb vagy 300 dobson, a troposzférában ma már 40 ppb, korábban 30 ppb), de ennek ellenére a szó szoros értelmében **életfontosságú**, mely szerepét már régóta ismerjük. Ugyanis a Nap ultraibolya-sugárzásának jelentős részét elnyeli (UV-C és UV-B sugarakat), ezzel megakadályozza, hogy ez a rendkívül veszélyes sugárzás a Föld felszínére jusson (**ózonpajzs**). Csaknem teljes az elnyelés a 200-300 nm hullámhosszúságú sávban, tehát abban a tartományban, mely huzamos besugárzás esetén bőrrákot okoz. Egyáltalán nincs elnyelés az

UV-A sugarak tartományában (280-320 nm), melyekről a közelmúltban megállapították rákkeltő hatásukat. Az ózon nélkül sem állati, sem növényi élet nem volna lehetséges - legalábbis a szárazföldön. Ha nem tudnánk megőrizni az ózont, a szárazföldek szikla- és homoksivatagokká válnának.

A levegőszennyezés hatásának tulajdoníthatóan a légköri ózonnal kapcsolatban **két ellentétes tendencia** tapasztalható: **a sztratoszférában csökkenési folyamat figyelhető meg, amíg a troposzférában (főleg az északi félgömbön) az ózonkoncentráció növekszik, egyértelműen antropogén hatásra.** Mindkettő jelenség probléma, de nem azonos súlyú.

Vizsgálatokkal kimutatták, hogy a **nitrogén-oxidok** - mind az NO, mind az NO₂ - **katalizálják az ózon bomlását** egyszerű oxigénmolekulákká, s mivel a sztratoszférában a szuperszonikus repülőgépek kibocsátanak nitrogénoxidot (is), veszélyt jelentenek az ózonrétegre (katonai repülőgépek 20-25 kilométeres magasságban is repülnek, de egyes személyszállító gépek is közlekednek 10-12 km-es magasságban, vagyis utóbbiak a troposféra és a sztratosféra határán). Ennél **sokkal nagyobb veszély** a légkörbe került **freonok** által előidézett ózonbomlás. Ugyanis a halogénezett szénhidrogének (fantázianevűk freonok) az atmoszféra alsó rétegében hosszú ideig megmaradnak, végül a sztratoszférába vándorolnak, ahol a különleges sarki időjárás, illetve az ultraibolya sugárzás lehetővé teszi bomlásukat, miközben **klóratom hasad le**, mely az ózonnal reagálva csökkenti a sztratosféra ózontartalmát (az ózonréteg helyileg elvékonyodik). Hasonló hatással vannak a felső légrétegekbe feljutó nitrogén-oxidok, szén-dioxid és egyéb légszennyező gázok.

Az Antarktisz feletti sztratoszférikus ózontartalom átmeneti, néhány hétig tartó ritkulását már az 1970-es években jelezték, de a **freonok ózonbontó hatását tudományosan 1988-ban igazolták.** A kedvezőtlenebb mérési eredményekre először 1985-ben figyeltek fel, amikor az ózoncsökkenés egyetlen év alatt igen nagy volt, **az ózonlyuk keletkezését 1988-ban igazolták.** Ezt az **Antarktisz feletti ózonréteg csökkenést** nevezik szemléletesen, bár nem egészen pontosan "ózonlyuknak". Az ózonlyuk keletkezésekor nagy területen az ózonkoncentráció az eredeti érték felére csökken (150 dobson alá, tehát ténylegesen ózonlyuk még egyszer sem jött létre), de néhány hét után visszaáll a természetes állapot. A csökkenés az antarktisi tavasz kezdetén (szeptember-október) rendszeresen megismétlődik, egyre nagyobb területen, de a 2000 utáni években már augusztus elején jelentkezett, s szeptemberre az ózonkoncentráció a 30-40 évvel korábbi átlagérték felére csökkent és gyakran kitarított egészen december elejéig. Csökkenést észleltek az Északi-sark felett is, sőt egyre kisebb szélességeken. A **sztratoszférikus ózonréteg** védelmét szolgáló **Bécsi Egyezmény** megkötésére **1985-ben** került sor, és **1987-ban** aláírták a **Montreali Egyezményt.** Később ezt kiegészítették és - a fejlődő országoknak adott néhány éves türelmi idő után - az ózont károsító anyagok kibocsátásának teljes tilalmában egyeztek meg. Ha ezeket az előírásokat minden ország betartja, ötven-hatvan évre lesz szükség az eredeti állapot helyreállításához.

A **troposzférában viszont ózon keletkezését mutatták ki**, a 20. század folyamán eleinte mérsékeltebben, de az 1970-es évektől fokozottabban, melynek **forrása a nitrogén-monoxid.** E vegyületet ugyanis a szerves anyagok nitrogén-dioxiddá oxidálják, s ennek fotokémiai bomlásából származó oxigénatom a levegő oxigénmolekulájával ózont képez. Összetett mechanizmuson keresztül hasonló hatással van a szén-monoxid is. A troposzférában az ózonkoncentráció legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint a sztratoszférában. A **troposzférikus ózon másodlagos szennyező**, a nagy ózonkoncentráció izgatja az emberek szemét és nyálkahártyáját, megtámadhatja a növények és fák leveleit, felerősítheti a savas esők hatását. Koncentrációjának csökkentése nem egyszerű feladat.

A **nitrogén-oxidok** elnevezés a különböző arányú nitrogén-oxigén vegyületek összefoglaló neve, melyekre az NO_x jelölést alkalmazzák. Szűkebb értelemben a nitrogén-monoxid és a nitrogén-dioxid keverékét nevezik így, tágabb értelemben ide sorolják az egyéb nitrogén oxidokat is (pl. N₂O, N₂O₃, N₂O₅). Szúrós szagú, nem éghető, de égést, oxidációt

okozó, igen mérgező gázok, vízzel érintkezve erősen maró savakat adnak. Bizonyítottan meghatározó szerepet játszanak a **fotokémiai szmog** kialakulásában, valószínűsíthető szerepük az **ózon-lyuk** vagy **ózonréteg-ritkulás** előidézésében. Részben természetes forrásokból (talaj kibocsátás, villámlás, biomassza), részben emberi tevékenység (égés és egyéb ipari folyamatok, közlekedés) révén kerülnek a légkörbe. Részt vesznek a **savas esők** kialakulásában. Nitrogén-oxidok minden tüzelési folyamatban keletkeznek, a tüzeléstechnikai jellemzőktől függő mennyiségben.

A **freonok** klórozott-fluorozott szénhidrogének (teljesen klórozott-fluorozott szénhidrogének, röviden CFC-k, az ún. kemény freonok; részlegesen klórozott-fluorozott szénhidrogének, röviden HFC-k, az ún. lágy freonok; a kemény freonok a szén mellett csak klórt és fluort tartalmaznak, a lágy freonok tartalmaznak hidrogént is; chlorofluorocarbonok illetve hydrochlorofluorocarbonok). A **CFC-ket szintetikusán 1928-ban állították elő**, s a 20. század 30-as éveitől gyártottak ilyen vegyületeket (Du Pont, ma Chemours). Előzetes **vizsgálatokkal kimutatták**, hogy nem lépnek kémiai reakcióba (kémiailag stabilak), a hőhatásnak ellenállnak, nem égnak és az élővilágra kevéssé veszélyesek, s e mellett olcsók. Nem-mérgező voltak miatt ideális **környezetbarát anyagoknak** is tartották őket. Elterjedten alkalmazták cseppfolyósított alakban aeroszolok hajtógázaként, műanyagok habosítására és tűzoltó készülékekben ugyancsak habosításra, **hűtőgépek hűtőközegeként**, vegytisztításban és elektronikus alkatrészek tisztítására. E kedvező tulajdonságaik miatt felhasználásuk gyorsan növekedett. A későbbi vizsgálatokkal kimutatták azonban, hogy **a sztratoszférikus ózonréteg elsődleges károsítói, összetett kémiai reakciók közben az ózont lebontják**, mely az ózonréteg vékonyodásához vezet (ózon-lyuk). Légkörmelegítő hatásuk messze felülmúlja a többi üvegházhatású gáz légkörmelegítő hatását. Elsőként 1978 januárjában Svédország tiltotta be használatukat. A sztratoszférikus ózonréteg védelmére először a 1987-ben elfogadott, majd 1997-ben felülvizsgált és módosított **Montreali Egyezmény** több lépcsőben korlátozta használatukat, s mára már a világ minden jelentős országa aláírta a jegyzőkönyvet (Magyarország 1989-ben). A 2007 szeptemberében Montrealban rendezett konferencián megállapodás született arról, hogy az előirányozottnál tíz évvel hamarabb mondanak le az "ózungyilkos" anyagokról: az iparosodott államok így már 2020-ig, a fejlődő országok pedig 2030-ig beszüntetik a HFC-anyagok felhasználását (a lágy freonok ózonbontó képessége csekély, melegítő hatásuk igen jelentős). Az 1980-as évek végén a sztratoszférában a klórkoncentráció 3 ppb körül volt, s ezt legalább 2 ppb-re kell csökkenteni ahhoz, hogy az ózonlyuk megjelenése előtti állapot visszaállhasson. Számítások szerint erre 60 évet becsülnek.

A **freonok** (vagy akár a **DDT**) **felhasználásának története** arra **figyelmeztet** bennünket (persze csak akkor, ha észre vesszük), hogy az emberi tevékenység hatásai igen sokszor nem becsülhetők előre, gyakran csak utólagosan észleljük ezeket. Nehéz olyan emberi tevékenységet elképzelni (ha nem lehetetlen!), amely semmilyen hatással nincs a környezetre. Ilyen módon a **környezetbarát kifejezés használata** (technológiára, iparra, közlekedésre stb.) **rendszerint nem indokolt**. Így tehát tulajdonképpen „csupán” olyan technikai, technológiai megoldásokat kell keresnünk és találnunk, melyek a környezetre a legkevésbé hatnak, azt a legkisebb módon befolyásolják, módosítják. A freonhoz kapcsolódó további probléma az, hogyan lehet az atmoszférában felhalmozott nagymennyiségű freont mielőbb „eltüntetni”.

Levegő, levegőszennyezés, levegőminőség és szabályozása

A levegő védelmével kapcsolatos egyes szabályokról rendelkező 306/2010. (XII. 23.) kormányrendelet a levegő védelméről használja a „környezeti levegő” kifejezést, mely: „a légkör egésze, a munkahelyek és a zárt terek levegőjének kivételével”. Ebből adódóan a rendelet hatálya nem terjed ki a természetes és mesterséges eredetű ionizáló és nem ionizáló

sugárzásból keletkező légszennyezésre, a levegő munka-egészségügyi védelmére, továbbá a zárt terek levegőminőségének szabályozására. A rendelet célja a környezeti levegő minőségének tartós és hatékony megóvása és javítása, az emberi egészség védelme és a környezet állapotának megőrzése érdekében, s azokra a természetes és jogi személyekre, továbbá jogi személyiséggel nem rendelkező szervezetekre vonatkozik, akik (vagy amelyek) tevékenysége, létesítménye, terméke levegőterhelést okoz, vagy okozhat. E szervezetek a „levegőterhelők” (légszennyezők). Értelemszerűen a környezeti levegő védelme érdekében szükséges intézkedésekkel foglalkozunk.

A levegő összetételéről már beszéltünk, s kiemeltük a szén-dioxid szerepét az üvegházhatás előidézésében. A korábban megadott gáz- és gőz halmazállapotú komponensek mellett a levegő tartalmaz még **aeroszolókat**, **szilárd szennyezőket** és **illékony szerves vegyületeket (VOC)**.

Az **aeroszolok** a légkörben finoman eloszlott/eloszlatott, diszpergált szilárd és cseppfolyós részecskék, a részecskék összetételétől, halmazállapotától, koncentrációjától, méreteloszlásától, alakjától és egyéb tulajdonságaiktól függően igen változatos tulajdonságokkal rendelkeznek. Egy részük az emberi tevékenység következménye. A **részecskék mérete 10^{-3} - $10\ \mu\text{m}$ között** van, tehát a molekula csoportoktól a viszonylag gyorsan ülepedő részecskékig terjed. Irodalmi adatok szerint az egész földfelületre vonatkozóan általában 250-500 darab aeroszol részecske van $1\ \text{cm}^3$ levegőben (óceánok felett kevesebb, szárazföldek felett több, szennyezett levegőben lényegesen több). Tartózkodási idejük a troposzférában 5-40 nap között van, a magasabb légrétegekben ennél lényegesebb hosszabb. Összetett aeroszol a **füstköd** (szmog). Aeroszolókat alkotnak a **kipufogógázok**, a városi, háztartási vagy ipari **szállóporok**, a **kéményfüst**, a **köd** és a **felhők**. Aeroszolok keletkeznek a túlnyomásos flakonokból vagy tartályokból porlasztott permetekből (festékek, dezodorok, vegyszerek stb.). Egyre jobban kezdenek terjedni az aeroszolként adagolható gyógyszerek is. Ezekon kívül az igen változatos tulajdonságokkal rendelkező mesterséges vagy természetes aeroszolok sokasága szinte kimeríthetetlen. Az aeroszolok részben a **globális alapszennyezést** (gyakran háttérszennyezésként említik) **okozzák**. A **részecskék száma térben és időben igen változó, függ a részecskék méretétől, a földrajzi szélességtől, a tengerszint feletti magasságtól, az időjárástól**. Negatív hatásuk elsősorban az **atmoszféra zavarosságának előidézésében, a látótávolság csökkentésében, a beérkező napsugárzás gyengítésében (szórásában), így a földfelszín hűlésében jelentkezik**. Az aeroszol részecskék nagysága mellett **alakjuk is egészen különböző, s részben ebből adódik az a jellegzetességük, hogy tömegükhöz képest felületük nagy**. Ezért a részecskék **az atmoszférában a nehézfémek előfordulásának leggyakoribb lelőhelyei**. Egyes esetekben súlyos egészségkárosodást okozhatnak.

A **szilárd szennyeződések** fő alkotói az égésből eredő **pernye** és **korom**, a talajfelszínről, a cementiparból, a kohászatból és számos más iparból származó **por**, amelynek összetétele igen változó. A természetes légkörben lehetnek **lebegő élő szervezetek** is (baktériumok, vírusok, algák, spórák, pollenek), közülük az **allergén pollenek** okozzák a legtöbb gondot. Legfőbb képviselőjük a **parlagfű**. A szilárd szennyeződések vízben oldódó és vízben oldhatatlan, szerves és szervetlen, illetve mérgező (toxikus) és közömbös frakciókra oszthatók. A légköri szilárd szennyeződések durva frakcióját **ülepedő pornak** (szedimentum) nevezik, a hosszabb ideig lebegve maradó kisebb részecskék alkotják a **szálló port**. Egészségügyi szempontból a **2.5- $10\ \mu\text{m}$ mérettartományú** részecskék a legveszélyesebbek, mely az ún. **inhalációs porfrakció**, minthogy bejuthatnak a tüdőbe és szilikózist okozhatnak. Ugyanis a $10\ \mu\text{m}$ méret feletti részecskéket a felső légutak visszatartják, a $0.25\ \mu\text{m}$ alattiakat pedig a tüdő nem tartja vissza, kilégzéssel a szabadba jutnak. **Egyes esetekben súlyos egészségkárosodást okozhatnak**: irritálják a bőrt, a szem kötőhártyáját, a légutak nyálkahártyáját, különböző légzőszervi megbetegedéseket okoznak (pl. asztma, tüdőrák),

allergiát okozhatnak, szöveti elváltozásokat idézhetnek elő a tüdőben (pl. **szilikózis, azbesztózis**). A legveszélyesebb a 2.5 µm alatti frakció, amely eljut a tüdőhólyagokba és ott leülepszik, ezzel rontja annak gázcsereelő képességét, és gyulladást okoz. Az oxigén-felvétel romlása közvetve terheli a szív- és érrendszert. Bontásukra, illetve leválasztásukra alkalmazott műveletek: ülepités, sűrítés, centrifugálás, koagulálás, szűrés.

Az **illékony szerves vegyületek (VOC; NMCH; NMVOC)** a levegőben előforduló szénhidrogén-származékok (metán kivételével) gyűjtőfogalma. A napsugárzás hatására a nitrogén-oxidokkal reakcióba lépve részt vesznek a **fotokémiai köd** (füstköd) kialakításában, a reakció során **ózon** képződik. Egy részük rákkeltő. Néhány ilyen vegyület: aceton, benzin, benzol, diklór-etán, etil-alkohol, kloroform, metil-alkohol, szén-tetraklorid, toluol, triklór-etán, xilol. Forrásuk részben természetes is lehet, de a szennyezés meghatározó részét a gépjárművek és az ipar bocsátja ki.

Aeroszol: olyan diszperz rendszer, melynek diszpergáló (folytonos) közege gázhalmazállapotú (pl. levegő), diszpergált részecskéi pedig kolloidális méretű, finoman elosztatott szilárd szemcsék vagy folyadék részecskék (előbbi füst, utóbbi köd). Negatív hatásuk elsősorban a **látótávolság csökkentésében**, a beérkező **napsugárzás szórása** révén annak gyengítésében és így a földfelszín hűlésében nyilvánul meg (a vizsgálatok szerint éves átlagban 0.4 %-kal csökkentik a Föld felületét elérő napsugárzást, vagyis növelik az ún. albedot). A 0.2-10 µm átmérőjű részecskék az atmoszféra ún. zavarosságát idézik elő, ami jelentős mértékben hat az időjárás alakulására. Az aeroszol részecskék nagysága mellett **alakjuk is egészen különböző**, a kondenzációval keletkezők általában gömb alakúak, míg a talaj eredetűek, a felszín mállásával keletkezők formája szabálytalan. Részben ebből adódik az az általános jellegzetességük, hogy **tömegükhöz képest felületük nagy**. Óceánok felett 10-100 darab/cm³ a gyakori koncentráció, míg szárazföldek felett vidéki, közvetlenül nem szennyezett területeken 10³-10⁴ darab/cm³, szennyezett városi levegőben 10⁵ darab/cm³. A magassággal az óceánok felett nem változik a koncentráció, szárazföldek felett a magassággal először exponenciálisan növekszik, majd kb. 4-5 km körül állandóvá válik, elérve az óceánok feletti értéket. Az aeroszolok tartózkodási ideje a troposzférában 0.01-0.1 év, a magasabb légrétegekben ennél lényegesen nagyobb (sztratoszférában 0.5-5 év, de a mezoszférában 5-10 év is lehet).

Szilárd halmazállapotú szennyeződések (por, részecskék): A légzőszervekbe való lejutás eltérő mechanizmusa miatt megkülönböztetjük a 10 µm-nél kisebb részecskéket (**PM10** frakció = Particulate Matter 10 µm) és a **PM2.5** frakciót. A hosszabb ideig lebegve maradó kisebb részecskék neve **szálló por** (e frakció nemzetközi elnevezése: TSP=Total Suspended Particulates). A légkörben lebegő élő szervezetek (baktériumok, vírusok, algák, spórák, pollenek) neve aeroplankton. A természetes, szabad légkörben ezek közül az allergén pollenek okozzák a legtöbb gondot. Közismert képviselőjük a **parlagfű** (Ambrosia elatior). Megkülönböztetünk toxikus és közömbös porokat, melyekre eltérő emissziós és immisziós határértékek vonatkoznak (a toxikus porokra természetesen szigorúbb előírások érvényesek). Toxikus hatásúak a biológiailag aktív mezőgazdasági szerek porai, mint a peszticidek, fungicidek, herbicidek, de toxikus por az ólom is, valamint a különféle rákkeltő vegyületek, elsősorban a 3,4 benzpirén.

Illékony szerves vegyületek (Volatile Organic Compounds; VOC): olyan szénhidrogén-származékok (metán kivételével), melyek gőznyomása 20 °C (293.15 K) hőmérsékleten egyenlő vagy meghaladja a 0.01 kPa értéket illetve a felhasználás körülményei között ezzel azonos illékonyaságúak (I. a 10/2001. (IV. 19.) KöM rendeletet és módosítása a 21/2005. (VIII. 26) KvVM rendelettel: az egyes tevékenységek és berendezések illékony szerves vegyület kibocsátásának korlátozásáról). A rendelet szerint a kátránypárlatok is illékony szerves vegyületnek tekinthetők, ha 293.1 °K-on gőznyomásuk 0.01 kPa vagy ennél nagyobb. Az EU meghatározása szerint „bármely olyan vegyület, melynek a kezdő forráspontja kisebb vagy egyenlő 250 °C-szal”, illékony szerves anyag. Az atmoszférában a legtöbb VOC atropogén eredetű, melynek az évente kibocsátott mennyiségét 1.42·10⁸ t C/év értékre becsülik. Károsítják a légzőszerveket, a növényi sejteket, légúti megbetegedést okoznak, irritálják a szemet, a szerkezeti anyagok korrózióját idézik elő. Forrásuk részben természetes is lehet, de a szennyezés meghatározó részét a gépjárművek és az ipar bocsátja ki. A közúti VOC-emisszió mintegy 70 %-a az autók kipufogógázaiból ered, az üzemanyag tökéletlen égése miatt. A további mintegy 30 % a tankolás közbeni illetve a tankból történő elpárolgás eredménye. Kibocsátásuk csökkentésére vonatkozó Genfi Jegyzőkönyvet (1991) Magyarország 1995 szeptemberében írta alá.

Levegőszennyezés (légszennyezés)

Kibocsátás (emisszió) révén a **levegő minőségét károsan befolyásoló szilárd-, cseppfolyós-, gáz- vagy gőz-halmazállapotú légszennyező anyagok jutnak a légkörbe**, s e folyamat a **légszennyezés**. Lehetnek **elsődleges** és **másodlagos légszennyező anyagok**. Az

elsődleges szennyező anyagok a légkörben nem mennek keresztül kémiai átalakuláson és így változatlan formában ülepednek ki. A másodlagos szennyező anyagok a légkörbe jutást követően a napsugárzás hatására átalakulnak (fotokémiai reakció) vagy a légkörben jelenlevő más anyagokkal lépnek kémiai reakcióba, melynek révén általában a kibocsátottnál károsabb anyagok, illetve vegyületek keletkeznek (szinergizmus). **A légszennyező anyagok többsége már megtalálható a légkörben**, káros hatásuk döntően az emberi tevékenységből adódó mennyiségi növekedésükből ered. A leggyakoribb és a legnagyobb mennyiségben kibocsátott légszennyező anyagok: por, pernye, korom, kén-dioxid, nitrogén-oxidok, szén-dioxid és szén-monoxid. A technika fejlődése révén új szintetikus vegyületek is a légkörbe kerülhetnek, melyek új veszélyforrást jelentenek (pl. freonok, illékony szerves illetve aromás vegyületek). Levegőtisztaság-védelmi szempontból a légszennyezőket - az egészségre és a környezetre gyakorolt hatásuk alapján - veszélyességi szempontból négy csoportba sorolják (I. a 4/2011. (I. 14.) VM rendeletben), melyek

- **I: különösen veszélyes anyagok;**
- **II: fokozottan veszélyes anyagok;**
- **III: veszélyes anyagok és**
- **IV: mérsékelten veszélyes anyagok.**

Az I. veszélyességi fokozatba tartoznak a leginkább mérgező (toxikus) hatású anyagok (pl. nehézfémek és vegyületeik, a rákkeltő hatású vegyületek, korom stb.), a legkevésbé veszélyesek a IV. veszélyességi fokozatba tartoznak (pl. aceton, etilalkohol, mérgező anyagot nem tartalmazó ülepedő por stb.).

A légkörbe jutott szennyező anyagok a légkörben elmozdulnak, lokálisan és globálisan terjednek, eloszanak a légkörben, s ezen ún. **transzmisszió** eredményeként a környezeti levegőben kialakult szennyező anyag koncentráció a **légszennyezettség** vagy az ún. **immiszió**. A **terjedés igen összetett folyamat** (konvekció, diszperzió és diffúzió lép fel), melynek során a kibocsátott szennyezők hígulnak, koncentrálnak és átalakulnak. A szennyező anyagok légköri tartózkodását és terjedését a levegő mozgása, valamint a domborzat határozzák meg. A légköri mozgások kialakulásában a levegő állapotváltozói (hőmérséklet, nyomás, nedvességtartalom) és az időjárási viszonyok a meghatározók, de **a napsugárzás hatására létrejövő hőmérsékletkülönbségnek is nagy hatása van**. E hőmérsékletkülönbség **függőleges irányú mozgásokat** idéz elő, melynek során a földközélen felmelegedett levegőrétegek felemelkednek és helyükre a magasabb légrétegekből hidegebb levegő áramlik. Ez a függőleges irányú mozgás keveri a troposzférát, biztosítva a különböző nyomanyagok (szennyező anyagok) elkeveredését. A **vízszintes irányú légmozgás (a szél) jelentősebb** hatású a keveredés szempontjából, mivel sebessége általában sokkal nagyobb, mint a függőleges irányú mozgásoké. Értelemszerűen minél nagyobb a szélesebbesség, annál intenzívebb a keveredés. A talaj közelében a szélesebbesség mintegy 2 m/s, de a magassággal növekszik és a troposzféra felső részén eléri a 15 m/s értéket is. A tapasztalatok szerint **megfelelő keveredéshez legalább 8-10 m/s levegősebesség szükséges**, amikor a légmozgások turbulens jellegűek. A keveredést jelentősen gyorsíthatják az iránytörések is (pl. erdők, magas épületek stb.). Kis sebességű légáramlás (pl. lamináris áramlás) vagy szélcsend, illetve az ún. **hőmérséklet inverzió, valamint az izotermia kedvezőtlen a szennyező anyagok elkeveredése, s így hígulása szempontjából**. **Hőmérséklet inverzió** esetében a **magasabban lévő légrétegek hőmérséklete nagyobb, mint az alsó légrétegeké**, és ez **megakadályozza az alsó légrétegek felemelkedését**, vagyis **a levegő keveredését**. Az **inverziós réteg** tehát **záró réteggént** viselkedik, s ez különösen kedvezőtlen kisebb magasságokban kialakuló inverziós réteg esetén. Inverzió **általában kora reggel vagy éjszaka, derült égbolt és gyenge szél esetén alakul ki a talaj feletti rétegben**. A légszennyező anyagok terjedése, döntő fontosságú, meghatározásával, vizsgálatával a meteorológia foglalkozik.

Inverzió, izotermia: Az atmoszféra hőmérséklete normális körülmények esetén a Föld felszínétől távolodva csökken, ez az atmoszféra **hőmérséklet-gradiens**. Ennek értéke **-6.5 K/km**, vagyis kilométerenként 6.5 K-nel csökken a hőmérséklet (más módon kifejezve: -0.15 km/K, tehát 1 K hőmérsékletcsökkenés valósul meg kb. 150 méteren belül). A troposzféra felső határán a hőmérséklet -50 °C, -60 °C. Az **inverziós réteg záró réteggént** viselkedik, megakadályozva a függőleges irányú keveredést, a szennyező anyagok hígulását. E gátolt keveredés következtében a talaj közeli rétegekben **füstköd** (szmog) alakulhat ki. Ha az **inverziós réteg 700 m alatt** van, szennyezés szempontjából **veszélyes helyzet** alakulhat ki, míg **300 m alatti inverziónál a helyzet kritikus**. Bizonyos esetekben előfordulhat az is, hogy egy-egy réteg hőmérséklete nem változik a magassággal. Ilyenkor izotermiáról beszélünk, mely ugyancsak gátolja a függőleges keveredést (és egyébként a felhőképződést is).

A levegőszennyezés forrásai

A különféle szennyezőanyagok természetes folyamatok eredményeként, illetve az emberi tevékenység eredményeként (antropogén) kerülhetnek a légkörbe, az oxigén- és a szén-háztartás alakulását elsősorban a növényzet, másodsorban az állatvilág döntő módon befolyásolja. A légkörbe jutó szennyező anyagok tekintélyes része **természetes** (biogén) **eredetű**. Így pl.

- a **hidroszféra** aeroszolt, illetve vízcseppeket - s ezzel együtt természetesen a megfelelő só ionokat - juttat a légkörbe. A tengeri eredetű légtömegekben ezeknek az anyagoknak viszonylag magas a koncentrációja. A tengeri élővilág nagy mennyiségű anyagcsere terméket is termel, melyek oldódnak a vízben, s onnan a légkörbe távoznak. Ezek közül a szén-dioxid a legfontosabb.
- a **litoszféra** (földkéreg) felületéről főleg szilárd szennyező anyagok származnak. A sivatagi és a tengeri homok (SiO_2) az időjárástól függően gyakran igen nagy koncentrációban van jelen a légkörben. A talajok pora szerves alkotórészeket is tartalmaz, főleg azonban ásványok porából, karbonátokból, szulfátokból és oxidokból áll (pl. CaCO_3 , CaSO_4 , MgCO_3 , Al_2O_3 , ZnO , SiO_2 stb.).
- **vulkáni tevékenység** során porok, gőzök és gázok (H_2S , SO_2 , HCl , CO , CO_2) jutnak a levegőbe. **Sztyeppék, bozótok, erdők tüzeinek** égéstermékei a szén-dioxidon kívül kormot, ehhez kapcsolódva karcinogén (rákkeltő) szén-hidrogéneket hordoznak. A növények és az állatok **bomlástermékei** – mint pl. ammónia, kén-hidrogén, aminok és merkaptánok stb. - gyakran bűzösek (főleg a kéntartalmúak). Kis szénatom-számú, egyszerű szén-hidrogének részben **gázkitörések**, részben szerves bomlástermékek révén kerülnek a levegőbe. Közülük a metán jelentős koncentrációban van jelen a légkörben.

A **mesterséges eredetű** levegőszennyeződés legnagyobb részét a közlekedés, az ipar és a háztartások tüzelése okozzák, illetve kisebb részben a mezőgazdaság. Részesedési arányuk az idők során változott és változik, mert néhány évtizeddel ezelőtt a közlekedés szerepe nem volt túl jelentős, **ma viszont a legtöbb országban a közlekedés a legnagyobb szennyező**. Az egyéb eredetű szennyeződések részaránya (de gyakran kibocsátott mennyiségük is) a fejlett országokban rendszerint már csökken (az ipari szennyezések szabályozása, környezetbarát technológiák alkalmazása, a kevésbé szennyező energiahordozók és technológiák használata az erőművekben, az iparban és a háztartási tüzelésben stb. hatására). Régebben egy ország vagy terület levegőjének szennyezettsége rendszerint iparának fejlettségével volt arányos, a fejlettséget e tekintetben ma már a közlekedési szennyeződés részaránya jellemzi. A gépjárműállomány növekedése azonban nem szükségszerűen növeli arányosan tovább a szennyezettséget (főleg a gazdagabb országokban, de hazánkban is). Pár évtizede a mezőgazdaság csak kismértékű, főleg helyi jelentőségű szennyező volt, ma már a biológiai egyensúly szempontjából veszélyes szennyezők forrása.

A **közlekedés** általában port, kormot, különféle szén-hidrogéneket és származékait (pl. kén-dioxid, szén-oxidok stb.) juttat a levegőbe. A belsőégésű motorok közül a dízel-üzemű járművek kipufogógáza nitrogén-oxidokban dús, a gázolaj kéntartalma kén-dioxid alakjában jelenik meg. A benzin üzemű motorok kipufogógázai szén-monoxidot, benzingőzt, aldehideket, egyenes láncú és gyűrűs szén-hidrogéneket tartalmaznak. Az ólom-tetraetil adalékból származó ólom két-három évtizede még jelentős mennyiségű volt a levegőben, de az 1990-es évek végétől már a legtöbb országban, így hazánkban sem adagolják az üzemanyaghoz az oktánszám növelése céljából. A repülőgépek levegőszennyező hatása is igen jelentős, különösen a magasabb légrétegekben, és a fapados járatok bevezetésével. Szennyező anyagaik: aldehidek, szén-oxidok, korom. Ez a talajközeli rétegeket csak részben érinti (pl. részecskék ülepedése).

A **háztartási tüzelés**, a fűtés levegőszennyező hatásának fő oka a tökéletlen elégetés, valamint a hulladék tüzelés, illetve a lignit és az ellenőrizhetetlen összetételű vegyes tüzelés. Egységnyi elégetett tüzelőanyag mennyiség lényegesen több szennyezést okoz, ha kis tüzelő egységekben égetik el, mintha nagyüzemi kazánokban használnák fel (tehát pl. hőerőművekben). Szén használata esetén termelődik a legnagyobb mennyiségű és a legtöbb féle szennyező anyag. Előnyösebb az olajtüzelés és a gáztüzelés, minthogy pl. gáztüzelésnél szilárd szennyeződés gyakorlatilag nem keletkezik, nő viszont a nitrózus gázok emissziója. Az utóbbi évek vizsgálatai szerint hazánkban a PM10 kibocsátás 50-60 %-át a háztartási tüzelés okozza, amíg a PM2.5 kibocsátás 80-85 %-a származik e forrásból. E kibocsátók sajátos hatása a **szennyező források kis magassága**, emiatt a korlátozott hígulás és a közvetlen környezet levegőminőségének erős befolyásolása. Így az időszakosan jelentkező nagymértékű kibocsátás a lakókörnyezet jelentős szennyezetttségét okozhatja.

A **mezőgazdaság** részben ugyanolyan anyagokat juttat a levegőbe, mint amelyek természetes körülmények között is keletkeznek (pl. a litoszférából), de a mezőgazdaság kemizálásával (műtrágyák és növényvédőszeres felhasználása stb.) sok új, a természet egyensúlya szempontjából is veszélyeket rejtő szintetikus anyag került alkalmazásra. Ezek biológiailag aktív anyagok, por, illetve permet formájában gyakran kerülnek a levegőbe, különösen a repülőgépes permetezés esetében. Hazánkban mind az ammónia, mind a dinitrogén-oxid kibocsátásában meghatározó a mezőgazdaság 90 % feletti aránnyal, és 10-15 % a részesedése a PM10 kibocsátásban.

Több légszennyező gáz az **ipari termelés**, és a hozzá kapcsolódó balesetek, fűtés és közlekedés következtében kerül a légkörbe. Legveszélyesebbek a kén-dioxid, a fluor és a hidrogén-fluorid, a klór és a hidrogén-klorid, a nitrogén-oxidok és az ammónia, melyek legfőbb forrásai a következők:

- a kén-dioxid főleg kéntartalmú energiahordozók (főleg szén) eltüzeléséből ered. Hatására a fák krónikus károsodást szenvednek.
- a fluor és a hidrogén-fluorid (hidrogén-fluorsav; folyosav) a foszforsav-gyártás, foszforműtrágya gyártás, a kohászat és az alumíniumgyártás káros melléktermékei. Hatásukra krónikus károsodás keletkezik a növényeken.
- a klór és a hidrogén-klorid (sósav) a cellulózgyártásból, a műtrágyagyártásból és szerves anyagok elégetéséből ered. Hatására a szerves anyagok elroncsolódnak.
- a nitrogén-oxidok (nitrózus gázok: NO, NO₂, N₂O₃, N₂O₅) a salétromsavgyártás, a kénsavgyártás, a műtrágyagyártás, az égési folyamatok melléktermékei. Elsősorban a forrás közelében veszélyesek az emberi szervezetre.
- az ammónia főleg műtrágyagyártásból, karbamid gyártásból, koksizálóművekből, illetve mezőgazdaságból ered. Hatására a növények levelei foltosodnak.

A légszennyező anyagok származhatnak pontszerű forrásból vagy diffúz szennyező forrásból. Az emberi tevékenységből eredő ún. antropogén szennyezés mellett tehát igen

jelentős a természetben lejátszódó folyamatokból eredő ún. természetes eredetű szennyezés (pl. vulkánkitörés, erdőtüzek, földfelszín porzása, biomasz bomlás), s ezek részarányát a következő táblázat mutatja (többféle adat található az irodalomban, ezeket csak a természeti folyamatokra adtuk meg, az antropogén részarány értelemszerűen változik). A táblázat utolsó oszlopa a fosszilis (vagyis a nem megújuló, azaz a szén, az olaj és a földgáz eltüzeléséből származó) energia-felhasználás hozzájárulásának részarányát szemlélteti az emberi tevékenységből eredő szennyezésen belül.

Előadáson kiadott táblázat

A táblázatból megállapítható, hogy a természeti és az emberi eredetű szennyezés mértéke átlagosan közel azonos nagyságú, ezen belül azonban a nitrogén-oxidokra és a metánra az emberi tevékenység, a szén-dioxidra, a szénhidrogénekre, a dinitrogén-oxidra és a radioaktív anyagokra a természeti folyamatok meghatározóak. Ammóniára, kén-dioxidra és szén-monoxidra közelítőleg „egyensúly” van a kétféle kibocsátás között. Húsz európai országra 1990-ben az emberi tevékenységből eredő kén-dioxid 95 %-a, a nitrogén-oxidok 97 %-a eredt a fosszilis energia eltüzeléséből; a Helsinkiben, az Oslóban és a Szófiai Jegyzőkönyvek hatására ez jelentősen lecsökkent. Az emberi tevékenység káros hatása abban áll, hogy amíg a természeti folyamatok egyensúlyát a természet öntisztulási folyamatai (vagyis a száraz, illetve a nedves kihullás, amit előbb tárgyaltunk) helyreállítják, **az emberi eredetű szennyezés viszont megbontja az egyensúlyt**, s káros és visszafordíthatatlan folyamatokat indít el, mellyel az élő szervezeteket közvetlenül károsítja. A légkörbe kerülő nem gázhalmazállapotú anyagok (lebegő szilárd vagy cseppfolyós részecskék, porok) mennyiségét $1-2.5 \cdot 10^9$ tonnára becsülik, melynek mindössze 15-20 %-a antropogén eredetű.

A levegő öntisztulása (természetes tisztulás): A levegőnek az élő vizekhez hasonlóan van természetes öntisztulása, mely nagy szerencse, hiszen ha a légkörbe jutó idegen anyagok változatlan formában az atmoszférában maradnának, akkor a levegő összetételének változása miatt viszonylag rövid idő alatt alkalmatlanná válna az ember és más élőlények számára. Az öntisztulás révén tehát a légkörbe kerülő anyagok és a légtérben jelen lévő anyagok mennyiségében dinamikus egyensúly alakul ki és így a légtérben jelen lévő mennyiség időben állandósul. Ha a szennyező anyagok kibocsátása megnő, új egyensúlyi helyzet áll be, melynél a levegőben lévő szennyező anyag-tartalom az előzőkhöz képest magasabb. Fontos kérdés az, hogy az új egyensúlynak megfelelő atmoszférát és ennek következményeit a jelenlegi élővilág és az ember hogyan viseli el. Nem kell nagyméretű változásoknak bekövetkezni a légállapotban ahhoz, hogy néhány generáció múltán az ökoszisztémákban már valóban látványos változások következzenek be. Ez a levegőszennyeződés egyik nagy problémája, melynek veszélyessége lappangó voltában van.

Levegőminőség és szabályozása

A szabályozás célja értelemszerűen a környezeti levegő minőségének tartós megővése és javítása, megfelelő minőségű légköri levegő biztosítása az ember, az élővilág és a védendő anyagi javak igényei szerint, az emberi egészség védelme és a környezet állapotának megőrzése érdekében, a levegőszennyezés megelőzésével, csökkentésével, megszüntetésével. Ehhez szükséges meghatározni a légköri levegő megkövetelt minőségi jellemzőit, mint elérendő célt, melyhez igen sokféle követelménynek kell eleget tenni, s értelemszerűen tekintetbe kell venni a műszaki lehetőségeket is. A főbb szempontok a következők: egészségügyi, illetve toxikológiai szempontok; környezetvédelmi szempontok; gazdasági szempontok; jogi szempontok, illetve a szabályozás különféle módjainak alkalmazása (határértékek, védendő területek, a behatási időtartamok, a meteorológiai helyzet, a szennyező technológiák szerint, figyelembe véve a kibocsátás csökkentésének technikai lehetőségeit, más előírásokkal összhangban, pl. munkaegészségügy stb.).

A légszennyező anyagok koncentrációját különféle egységekben adják meg, melyek lehetnek: mg/m^3 , mg/Nm^3 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm (parts per million, tehát 10^{-6} -od rész) ahol $1 \text{ ppm} = \text{cm}^3 \text{ légszennyező anyag}/\text{m}^3 \text{ levegő}$ vagy $1 \text{ g légszennyező anyag}/\text{t levegő}$
 $1 \text{ ppm} = \mu\text{mol}/\text{mol SI egységben}$
 (vagyis a teljes térfogat vagy a teljes tömeg milliommód része, tehát 1 rész a millióból).

Ritkábban, de előfordul a ppb, illetve a ppt használata is (1 ppb=mg/t ; SI egységben 1 nmol/mol; 1ppt=1 µg/t; tehát 1 rész a milliárdból, illetve a trillióból, vagyis 10⁻⁹-ed illetve 10⁻¹²-ed rész).

A por, illetve köd koncentrációt darab/m³-ben adják meg, a leülepedő por mennyiséget pedig: g/m²hónap, illetve t/km²év.

A szabályozásban az előbbiekből érthetően fontos szerepet kap a **levegő „minősége”**. Ennek jellemzésére olyan **mérhető fizikai és kémiai mennyiségeket** használunk, amelyek a levegő felhasználása és az emberi egészség szempontjából fontosak. A levegő minősége hely és idő szerint változik, ezért általában a talaj közeli légréteg minőségét vizsgálják, vagyis azt a réteget, ahol az élőlények élnek, tehát az ún. légzési zónát. Ilyen jellemzők lehetnek a **levegő hőmérséklete, nedvességtartalma (relatív vagy abszolút formában) és a különféle szennyező anyagok jelenléte**. Tantárgyunk szempontjából ez utóbbi fontos, melyet a kibocsátás és a terjedés révén a levegőben kialakuló szennyező anyag koncentrációval jellemezhetünk. Mindezekből következik, hogy a szabályozásnak alapvetően két ága van:

- **a levegő minőségére vonatkozó előírások (levegőminőségi vagy immisszió normák) és**
- **a légszennyező anyagok kibocsátására vonatkozó előírások (emisszió normák),**

melyek értelemszerűen szoros kapcsolatban vannak egymással, hiszen a minőségi előírások csakis a kibocsátások ezekhez illeszkedő szabályozásával (korlátozásával) tarthatók be. Az előírások tehát megadják a különféle anyagok legnagyobb megengedhető koncentrációját a levegőben és a legnagyobb kibocsátható értékét (mennyiséget), ez területenként eltérő lehet.

A **levegőminőségi határértékek** a levegőben lévő légszennyező anyagok legnagyobb megengedett koncentrációját adják meg (immisszió norma). A szabályozás szerint ezek lehetnek ún. egészségügyi határértékek és ökológiai határértékek (I. a 4/2011. (I. 14.) VM rendeletben). Az **egészségügyi határérték** a légszennyezettségnek „a tudomány mindenkori szintje alapján megállapított azon mértéke” (legnagyobb koncentrációja), mely az emberi egészségre sem rövid, sem hosszabb távon nem fejt ki káros hatást, s e határértékeket az emberi egészség védelme érdekében be kell tartani. Az **ökológiai határérték** szigorúbb az egészségügyi határértéknél, s a légszennyezettség azon szintje, amelynek túllépése esetén az ökológiai rendszer károsodhat, így tehát az élővilágra és az ökoszisztémára hosszú távon ártalmatlan legnagyobb koncentrációt határozza meg. E két alapvető határérték mellett alkalmazzák még a **tűréshatárt** (mellyel az egészségügyi határérték túlléphető, bizonyos feltételekkel, mely azonban új létesítmények tervezésénél nem alkalmazható), továbbá a **tájékoztatási és a riasztási küszöbértékeket**. A **tájékoztatási küszöbérték** a légszennyezettség olyan értéke, amely az érzékeny lakossági csoportoknál (mint gyerekek, idősek, légzőszervi-, szív- és érrendszeri betegségben szenvedők, vagy kismamák) egészségügyi problémát okozhat, ezért a küszöbérték túllépése esetén a lakosságot tájékoztatni kell. A **riasztási küszöbérték** a légszennyezettség olyan értéke, amelynek rövid idejű túllépése is veszélyeztetheti az emberi egészséget, ezért a lakosságot riasztani kell és a korlátozó intézkedéseket kell tenni. A tájékoztatás, a riasztás és az intézkedés az önkormányzatok feladata. A rendelet a kiemelt jelentőségű légszennyező anyagokra, az ózonra, egyes rákkeltő légszennyező anyagokra, az azbesztre és az üledő porra (PM2.5) az ország teljes területére érvényesen meghatározza az egészségügyi határértéket, kivéve az ökológiailag sérülékeny területeket. Az ökológiaialag sérülékeny területekre értelemszerűen az ökológiai határértékeket kell alkalmazni. Ilyen ökológiaialag sérülékeny területek az erdők és a történelmi borvidékek szőlőtermelő területei, továbbá a természetvédelmi területek, arborétumok, ivóvízbázisok stb. A környezeti hatásvizsgálatok készítéséhez tervezési irányértékeket írnak elő a különféle légszennyező anyagokra. A megadottak mellett a védelmi zónákkal kapcsolatban alkalmazzák még az alsó és a felső vizsgálati küszöbértéket.

A **határértékek lehetnek éves, napos (24 órás) és órás (60 perces) határértékek**. A **rövid idejű** (napi illetve órás) határértékek célja az **akut egészség- és környezetkárosítás megelőzése**, a **hosszú idejű** (éves) határértékek pedig a **krónikus egészség- és környezetkárosítás megelőzését** szolgálják.

A következő táblázatok (melyeket nyomtatott formában kaptak meg az előadásokon) az egészségügyi és az ökológiai, a tájékoztatási és a riasztási határértékekről tájékoztatnak, a rendelet alapján, megadva az anyagok azonosító számát is (CAS szám: Chemical Abstracts Service azonosító szám).

A levegőterheltségi szint egészségügyi határértékei, célértékei, hosszú távú célkitűzései
(forrás: 4/2011.(I.14.) VM rendelet)

Kiemelt jelentőségű légszennyező anyagokra:

Ózonra:

Egyes rákkeltő légszennyező anyagokra:

Azbesztre:

PM_{2.5}-re:

Megjegyzések:

- a határérték mértékegysége általában $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a tűrés a határérték %-ában adott;
- a mértékegység ülepedő porra és néhány összetevőjére: a 30 napos határérték $\text{g}/\text{m}^2\text{hó}$, az éves határérték $\text{t}/\text{km}^2\text{év}$;
- új létesítmények tervezésénél a kiemelt jelentőségű légszennyező anyagokra megállapított tűréshatár nem vehető figyelembe;
- emissziócsökkentési terveknél a nitrogén-dioxidot kell tekintetbe venni, s a nitrogén-oxid határértékét is ebben adják meg;
- általában korlátozott a lehetséges túllépések száma (pl. a kén-dioxid óras határértéke a naptári év alatt legfeljebb 24-szer léphető túl);
- a TSPM az összes lebegő portartalom (Total Suspended Particulate Matter);
- a rákkeltő anyagok veszélyességi fokozata értelemszerűen I.

Az ökológiai rendszerek védelmében meghatározott kritikus levegőterheltségi szintek:
(forrás: 4/2011.(I.14) VM rendelet)

Koncentrációk:

Megengedett ülepedések:

Talaj közeli ózon koncentráció okozta terhelés megengedett értékei:

Megjegyzések:

- az éves határérték mértékegysége $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
- kén-dioxidra az éves határérték a téli félév (X-III. hó) féléves átlagában is betartandó;
- az E illetve a T kategória összefüggően legalább 500 illetve 100 ha nagyságú.

Tájékoztatási és riasztási küszöbértékek:

(forrás: 4/2011.(I.14). VM rendelet)

Megjegyzés:

- a határérték mértékegysége $\mu\text{g}/\text{m}^3$;
- * a tájékoztatási küszöbérték 2 egymást követő napon észlelt túllépése esetén a lakosságot tájékoztatni kell a szmogriadó tervben foglaltak szerint;
- * a riasztási küszöbérték 2 egymást követő napon észlelt túllépése esetén és ha a meteorológiai előrejelzés szerint továbbra sem várható javulás, korlátozó intézkedéseket kell tenni a szmogriadó tervben foglaltak szerint;
- ** ha a légszennyezettség három egymást követő órában meghaladja a tájékoztatási küszöbértéket, a lakosságot tájékoztatni kell;
- ** ha a légszennyezettség három egymást követő órában meghaladja a riasztási küszöbértéket vagy 72 órán túl meghaladja a tájékoztatási küszöbértéket, korlátozó intézkedéseket kell tenni a szmogriadó tervben foglaltak szerint.

A kibocsátások mérése és ellenőrzése az **Országos Immisszió-mérő Hálózat** (Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat; OLM) feladata, mely **hazánkban 1974 óta működik és 2003-ban megújult**. Jelenleg 656 mérőhelyen végeznek 24 órás és 30 napos behatással (expozíció) méréseket, melyeket egy hónapon belül dolgoznak fel. Ezek mellett 38 monitor állomás folyamatosan szolgáltat adatokat feldolgozásra, illetve 9 gépkocsiba épített monitor állomás működik. Ez a monitoring rendszer méri a szennyező anyagok koncentrációjának napi, havi és éves ingadozásait (folyamatosan, szakaszosan, időszakosan, folyamatos - on-line - egyedi vagy hálózatba kapcsolt mérőállomásokkal). Az állomások jelenleg a következő jellemzőket mérik: a kén-dioxid, a nitrogén-oxidok, korom és az ülepedő

por (PM10) koncentrációját, s ezeken túl egyes helyeken még az ólom, a szálló por és a fluorid koncentrációjának mérése a környezetvédelmi hatóságok feladata. A levegőt a mért értékek alapján minősítik egészségügyi és ökológiai szempontból, a levegő szennyezett, ha a légszennyező anyagok koncentrációi a megengedett határértékeket meghaladják. Határértéket meghaladó szennyezettség az egészségre és az élővilágra káros lehet. Az adatokat feldolgozzák, és azok pl. az interneten elérhetők.

Az alapszennyezettséget - a terjedésszámításokkal együtt - az Országos Meteorológiai Szolgálat Központi Légekörfizikai Intézete méri, nemzetközi szabványok alapján. Az e célra szolgáló állomások a szennyező forrásoktól távol működnek (Farkasfa, Nyírjes, Hortobágy, Kecskemét-pusztá, Majláth-pusztá és Fertőrákos).

Budapesten a mérőhálózatot felújították, ma összesen 11 mérőállomás működik (Széna tér; Pesthidegkút; Erzsébet tér; Baross tér; Kőbánya, Gergely utca; Kosztolányi Dezső tér; Kórákás park; Csepel, Papírgyár; Nagytétény, Kastélykert; Gilice tér, OMSZ-kert; Dózsa György út, Honvéd Sporttelep). Közülük 10 méri a kén-dioxid, 9 az ózon és 6 az aromás szénhidrogének (benzol, toluol, xilol, az ún. BTEX vegyületek) koncentrációját, mind méri a nitrogén-dioxid, a szén-dioxid, a szén-monoxid koncentrációját és a PM10 szálló porfrakciót.

A helyhez kötött légszennyező pontforrásokra a **kibocsátási határértékek** (emisszió normák) a szennyezőforrás által kibocsátható légszennyező anyag tömegáramát adják meg valamely mennyiségi egységben, a termék egységnyi mennyiségére (pl. g/kWh, g/GJ, g/t termék vagy g/m² termék) vagy esetleg a felhasznált nyersanyag egységnyi mennyiségére vonatkoztatva, melynek számértéke értelemszerűen függ

- **a légszennyező anyag tömegáramától (kg/s),**
- **a légszennyező anyag veszélyességétől, illetve minőségétől és**
- **az elérhető legjobb technikától (BAT).**

Ehhez az anyagokat különböző csoportokba és osztályokba sorolják (szilárd anyag és por; gőz- vagy gáznemű szerves anyagok; szerves anyagok; rákkeltő anyagok), s a kibocsátási határértékeket az elérhető legjobb technika figyelembevételével állapítják meg, melyeket - mint minimális követelményt - be kell tartani. Ebből értelemszerűen az is következik, hogy a megállapított határértékek a technikai, gazdasági és társadalmi fejlődéssel változnak, s így a határértéket megállapító miniszter köteles az előírásokat időszakonként felülvizsgálni és indokolt esetben módosítani. A levegőminőségi határértékek a BAT-nál hatékonyabb technika alkalmazásával is betarthatók, s így az előírt értékeknél alacsonyabb kibocsátások is elérhetők. A megfelelő megoldások kiválasztása gazdasági és műszaki kérdés.

A helyhez kötött légszennyező pontforrásokra

- **technológiai kibocsátási határértékeket,**
- **egyedi kibocsátási határértékeket vagy**
- **össztömegű kibocsátási határértékeket**

állapítanak meg.

A technológiai kibocsátási határértékek lehetnek:

- **általános technológiai kibocsátási határértékek és**
- **specifikus (technológiától függő) technológiai kibocsátási határértékek.**

Az **egyedi kibocsátási határérték** (melyet a környezetvédelmi hatóság - általában a környezetvédelmi felügyelőség és a települési önkormányzat jegyzője - határozatlanban állapít meg) mindig **szigorúbb** az országosan érvényes általános határértéknél, s olyankor állapítanak meg ilyen határértéket, ha

- a technikai színvonal nagyobb fejlettsége ezt lehetővé teszi (tehát magasabb az országos átlagnál), vagy
- az adott terület légszennyezettsége a szigorúbb előírást indokolja.

Az **általános technológiai kibocsátási határértéket** a szennyező anyag fizikai, illetve kémiai tulajdonságai és a környezetre kifejtett hatása alapján állapítják meg. E célból az anyagokat anyagcsoportokba, illetve a csoporton belül osztályokba sorolják. Ilyen csoportok a szilárd és poralakú szerves anyagok; a gőz vagy gáznemű szerves anyagok; szerves anyagok; rákkeltő anyagok. A kibocsátási határértéket az osztályba sorolt anyagok összességére határozzák meg (koncentráció a légáramban), s a légszennyező anyag tömegáramának függvényében korlátozzák.

Általános technológiai kibocsátási határértékek

1. Szilárd anyag és por alakú szerves anyagok

2. Gőz- vagy gáznemű szerves anyagok

3. Szerves anyagok

Szerves anyagok osztályba sorolása (minta)

4. Rákkeltő anyagok

Egyes technológiákra **specifikus határértékeket** állapítanak meg, melyek rendszerint **enyhébbek** az általános előírásoknál, s de **csak a meghatározott légszennyező anyagokra** vonatkoznak, így az adott technológia egyéb légszennyező anyagaina az általános előírásokat kell alkalmazni (56 területet jelöl meg a rendelet), szemléltetésül hármat mutatunk be.

Eljárás-specifikus technológiai kibocsátási határértékek három területre

Megjegyzés:

- az előírások olyan berendezésekre vonatkoznak, amelyek stacionárius üzemű, helyhez kötött motorok és tüzelőanyag felhasználásuk 50 kg/h vagy ennél nagyobb, nem vonatkoznak azokra a szükségáramforrást hajtó helyhez kötött motorokra, amelyek 50 h/év-nél rövidebb ideig üzemelnek;
- követelmény, hogy a gázolaj kéntartalma 0.05%-nál nem lehet nagyobb;
- a kibocsátási határértékeket nitrogén-dioxidban adják meg;
- a megadott határértékek a motor névleges teljesítményén mérve érvényesek;
- a kibocsátási határérték mértékegysége mg/m^3 .

A kibocsátásokra vonatkozó néhány egyéb elvárás, előírás:

- Ha egy területen a már működő légszennyező források olyan mértékben szennyeznek a levegőt, hogy az tovább nem terhelhető, akkor e területen új kibocsátás nem engedhető meg, illetve csak abban az esetben, ha a tervezett kibocsátással egyenértékű emissziót a területen kiváltanak, s az immisszió nem lépi túl a határértéket.
- A levegővédelmi követelményeket az országos, regionális, helyi és műszaki tervezés során figyelembe kell venni.
- Légszennyező létesítmények építéséhez, működtetéséhez, tevékenységek megkezdéséhez, végzéséhez a környezetvédelmi hatóság (Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség) hozzájárulása vagy engedélye szükséges.
- A környezet egészének védelmét kell elsődlegesnek tekinteni, s a levegő szennyezését csökkentő beavatkozás nem okozhatja más környezeti elem szennyezését (IPPC).
- Olyan új légszennyező források körül, amelyek a környezeti levegő minőségére jelentős hatást gyakorolnak, védelmi övezetet kell kialakítani, mely a helyhez kötött légszennyező források körül kialakított védőterület, illetve a közút mentén kijelölt védősáv lehet, s nagysága 50 és 1000 m között változhat a tevékenység légszennyező hatásától függően.
- Ha valamely területen a légszennyező anyagok koncentrációja meghaladja a levegőminőségi határértéket, szennyezés-csökkentési terveket kell készíteni.

Légszennyezési bírságot köteles fizetni az a kibocsátó (levegőperhelő), aki vagy amely a helyhez kötött légszennyező pontforrását és/vagy a bejelentésre kötelezett helyhez kötött diffúz légszennyező forrását úgy üzemelteti, hogy a kibocsátási határértéket túllépi vagy a levegővédelmi követelményeket nem teljesíti, melyet a környezetvédelmi hatóság

határozatban állapít meg. A bírság kiszabásának feltételeit, körülményeit és mértékét miniszteri rendeletek határozzák meg.

Az **elérhető legjobb technika (BAT) a leghatékonyabb mai (nem szükségszerűen csúcs) technikai színvonalat** jelenti, amellyel a kibocsátások megelőzhetők, illetve - ha a megelőzés nem valósítható meg - lényegesen csökkenthetők, s a környezet egészére gyakorolt káros hatás mérsékelhető. A „legjobb” szó a környezetvédelem szempontjából minősíti a technikát, de ennek alkalmazása nem járhat túlzott költséggel (vagyis elfogadható költséggel alkalmazható), hiszen ellenkező esetben alkalmazásának kicsi a valószínűsége. Az elérhető legjobb technikákat a termelés és a szolgáltatás különböző részterületeire az ún. **BATREF (BATReference)** dokumentumok foglalják össze, melyeket az Európai Unió környezetvédelmi szervezetének keretében állítottak össze, s részben magyarul is hozzáférhetők. E dokumentumok bemutatják azokat a már alkalmazásban lévő illetve kibontakozó (tehát a jövőben számításba vehető) technikákat, melyekkel az adott területen teljesíthetők a kibocsátásra vonatkozó előírások, s a dokumentumok a költségekre is adatokat szolgáltatnak.

Az **elérhető legjobb technika** meghatározásához használt egyes fogalmak értelmezése a következő:

- a legjobb az a technika, amely **leghatékonyabb a környezet egészének magas szintű védelme érdekében**;
- az elérhető legjobb technika az, amelynek **fejlesztési szintje már lehetővé teszi alkalmazását, elfogadható műszaki és gazdasági feltételek mellett**, gyártási, ill. előállítási helyétől függetlenül;
- a technika magába foglalja a gépi eszközöket (hardver) és létrehozásuk, ill. működtetésük körülményeit is (technológia, tervezés, építés, karbantartás, üzemeltetés, leállítás).

Tehát a BAT **nem szükségszerűen "csúcstechnika"**, hanem **a piacon elérhető, megfelelő működési referenciával és elfogadható gazdasági feltételekkel rendelkező eljárás**. A gazdasági feltételek megítélésére utal az „elérhető” kifejezés, melyben a költségek és a haszon arányát kell mérlegelni, s figyelembe kell venni azt, hogy az adott technika előállítása az EU-n belül történik-e vagy sem. Bevezetésének (alkalmazásának) összességében ésszerű keretek között lehetségesnek kell lennie (vagyis alkalmazása nem járhat túlzottan nagy költséggel). Az Európai Unió a BAT követelményt **BATNEEC (Best Available Techniques Not Entailing Excessive Costs)** követelményként pontosította. Ez olyan elérhető legjobb technika, melyben a „túlzott költséget nem okozó” kifejezés utal a bevezetés költségeinek ésszerű keretek között tartására. Így tehát a legjobb megoldások okozhatnak ugyan bizonyos **többletköltséget**, de ez **nem lehet aránytalan és túlzott**, mivel alkalmazása ekkor megkérdőjeleződik. Ez összevethető a környezetvédelem optimális szintjével.