



# Környezetmérnöki alapok

*Felkészülési jegyzet*  
*építőmérnök (BMEEOVKAT41) és*  
*környezetmérnök (BMEEOVKAKM1)*  
*hallgatók számára*

BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék

2021



A *Környezetmérnöki alapok* elsősorban szemléletformáló, gondolkodásra ösztönző tárgy. Célja olyan ökológiai és természettudományos, valamint műszaki, környezet tervezési és ökonómiai háttér ismeretek alapszintű elsajátítása, melyek az építőmérnöki és környezetmérnöki szakma műveléséhez, a mérnöki tevékenység környezeti vonatkozásainak megismeréséhez elengedhetetlenek. Jelen segédlet részben lefed, részben kiegészíti az előadási órák anyagát. Az ábraanyag az órán vetített, letölthető ppt file-okban található.

A jegyzetet összeállították:

Budai Péter (PhD)

4. Környezet és energia

Clement Adrienne (PhD, docens)

3. Anyagforgalom és anyagfelhasználás, szennyezések

Kardos Máté Krisztián (PhD, adjunktus)

3. Anyagforgalom és anyagfelhasználás, szennyezések

4. Környezet és energia

Kozma Zsolt (PhD, docens)

1. Bevezetés, antropocén

2. Rendszerdinamika, a Föld-rendszer korlátai

6. Ökoszisztéma szolgáltatások

5. Környezeti katasztrófák

7. A környezeti hatások és a jólét aggregált indikátorai

# Tartalomjegyzék

1	Bevezetés, antropocén .....	5
1.1	Anropocén – egy új korszak, „az ember kora” .....	5
1.2	A Holocén – ami az Antropocént megelőzte.....	5
1.3	Az Antropocén üzenete.....	6
1.3.1	A Föld-rendszer gondolata.....	6
1.3.2	A Nagy Gyorsítás .....	7
1.4	Az IPAT modell .....	10
1.5	Mit gondolunk magunkról és a világról?.....	12
1.5.1	A társadalom szintjén.....	12
1.5.2	Az egyén szintjén.....	13
1.6	A modern környezetvédelem-környezetpolitika néhány mérföldköve .....	14
1.6.1	Rachel Carson: Silent Spring (Néma tavasz).....	14
1.6.2	Club of Rome, The limits to growth (Római klub, A növekedés határai) .....	14
1.6.3	Fenntartható fejlődés, Brundtland bizottság.....	14
1.6.4	Millenium Ecosystem Assessment .....	15
1.6.5	ENSZ Környezetvédelmi és Fenntarthatósági Világtalálkozók .....	15
1.6.6	IPCC jelentések.....	16
1.6.7	Antropocén és Planetary Boundaries 2009, 2015 .....	16
1.7	Felkészítő kérdések .....	16
1.8	Irodalom.....	17
2	Rendszerdinamika, a Föld-rendszer korlátai.....	18
2.1	Bevezetés .....	18
2.1.1	Egyszerű kérdések: ugyanaz az erdő, város, ember?.....	18
2.1.2	Az egyszerű kérdések valójában bonyolultak .....	18
2.1.3	Nehéz kérdések: ugyanaz a Föld? .....	20
2.2	Komplex rendszerek és elemeik.....	21
2.2.1	A komplex rendszer fogalma.....	21
2.2.2	Komplex rendszerek elemei.....	21
2.2.3	További rendszer-jellemzők.....	24
2.3	Sajátos rendszerdinamikai viselkedésformák és tulajdonságok.....	27
2.3.1	Lineáris változás .....	27
2.3.2	Nem-lineáris változás .....	28
2.3.3	Regime shift .....	29
2.3.4	Túllövés és összeomlás (overshoot, overexploitation) .....	30
2.3.5	Reziliencia, redundancia, diverzitás .....	31
2.3.6	Golyós példa – a regime shift és a reziliencia szemléltetése .....	31
2.3.7	A jelenlegi éghajlatváltozás és a regime shift .....	33

2.4	A Meadows házaspár üzenete rendszerdinamikáról, fenntarthatóságról .....	35
2.4.1	A rendszerelemek hatékonysága .....	35
2.4.2	A fogáspontok és a közlekedés .....	35
2.4.3	A növekedés határai – a World3 modell eredményei.....	36
2.5	Planetary boundaries – a Föld-rendszer korlátai .....	39
2.6	Melléklet: A paradigmaváltás két hazai példája .....	40
2.6.1	Kisbalaton.....	40
2.6.2	Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése .....	41
2.7	Klímacélok szemléltetése .....	42
2.8	Felkészítő kérdések .....	43
2.9	Irodalom.....	44
3	Anyagforgalom és anyagfelhasználás, szennyezések .....	46
3.1	A környezet és elemei .....	46
3.2	Néhány kiválasztott anyag természetes (geokémiai) és az emberiség által módosított körforgalma .....	47
3.2.1	Vízkészletek, a vízkörforgás.....	47
3.2.2	Szén .....	48
3.2.3	Nitrogén .....	50
3.2.4	Foszfor.....	53
3.3	Környezeti hatások, a környezetszennyezés folyamata .....	55
3.3.1	Fogalommeghatározások .....	55
3.3.2	Levegő szennyezési alapismeretek és példák .....	57
3.3.3	A vizek szennyezése: kronológia .....	65
3.4	Lehetséges válaszok a környezetszennyezésre.....	71
3.5	Felkészítő kérdések .....	71
3.6	Irodalom.....	72

# 1 Bevezetés, antropocén

A fejezetet írta: Kozma Zsolt

## 1.1 Anropocén – egy új korszak, „az ember kora”

A 21. század elejére egyre több a tudományos bizonyíték arra, hogy (i) a korai civilizációk kezdete óta viszonylag stabil Föld-rendszer működése átalakulóban van, és (ii) ennek az átalakulásnak az egyik fő hajtóereje az emberi civilizáció (IPCC 2007, MEA 2005). A rendelkezésre álló ismeretek lényege leegyszerűsítve: a változás *ténye bizonyos, az irányja bizonytalan*, viszont a modern emberi civilizáció számára összességében *nagy valószínűséggel inkább kedvezőtlen*. A változás, mint folyamat előre haladottsága aktív tudományos vita tárgya, így az is kérdéses, hogy milyen mértékben megfordítható, mekkora mozgástere van az emberiségnek. Egyre inkább egyöntetűbb az érintett szakterületek kutatóinak álláspontja azzal kapcsolatban, hogy a zajló átalakulás léptéke az emberi történelem léptékét meghaladja, már a földtörténeti időskálán is számottevő (Ellis, 2015; Steffen et al. 2011; Steffen et al. 2015).

A fentieket felismerve többek között a Nobel díjas Paul Crutzen vezetésével 2000-ben vezető földtudományi kutatók egy új geológiai időszak, az **Antropocén** („az ember kora”) bevezetését javasolták (Steffen et al. 2011). A javaslat nyomán a Nemzetközi Rétegtani Bizottság<sup>1</sup> önálló munkacsoportot állított fel, hogy a kérdést tudományos szempontból mérlegeljék. A munkacsoport 2016-ban megállapította, hogy indokolt az új időszak bevezetése. Jelenleg az új kor formális bevezetésének előkészítése, pontos geológiai definiálása zajlik. Az antropocén-javaslat valószínűsíthető elfogadása egyben azt is jelenti majd, hogy földtörténeti/geológiai értelemben a **Holocén véget ér**. Ezért érdemes néhány szót ejteni utóbbi sajátosságairól.

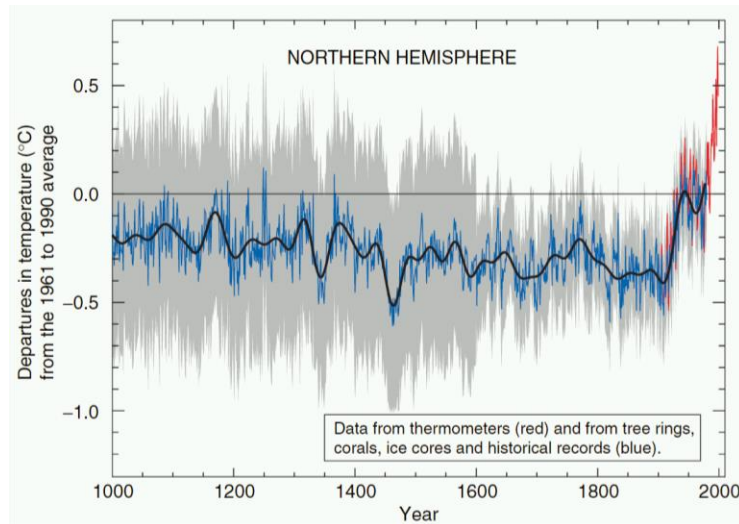
## 1.2 A Holocén – ami az Antropocént megelőzte

A biológiai értelemben vett modern ember (*Homo sapiens*) megjelenése még bőven a Holocén előtt, a paleolitikumban megtörtént. A Holocén jelentőségét az adja, hogy a Föld-történet során ritkán tapasztalt stabil és kedvező környezeti körülmények jellemezték (lásd. az átlaghőmérséklet, mint mértékadó környezeti változó alakulását: 1-1. ábra és 1-2. ábra). A kiegyensúlyozott viszonyoknak köszönhetően ez a periódus lett a mesterséges társadalmi-gazdasági rendszerek kialakulásának korszaka (Ellis, 2015). Ismét csak leegyszerűsítve: a modern emberiség környezeti szempontból „csak a Holocént ismeri”, ehhez alkalmazkodott, erre optimalizálta a bonyolult és egyre törekenyebb civilizációját.

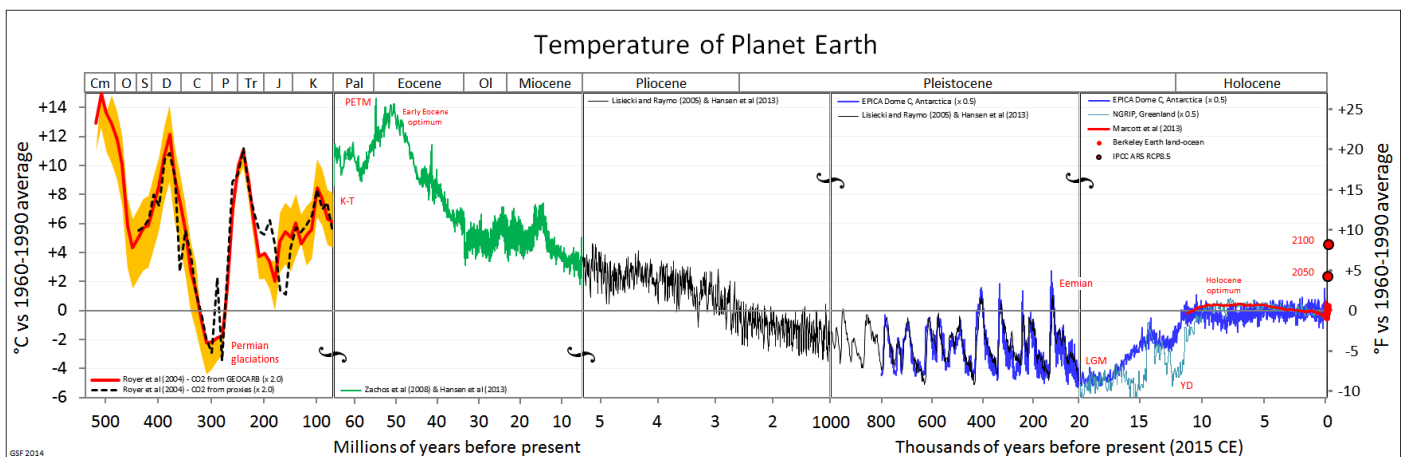
A Holocén stabil évezredek egyben az ember-környezet viszonyrendszer gyökeres átalakulását is elhozták, ami ekkorra elvált az eredendő (öröklött, ösztönösen jelentkező) alkalmazkodásra alapuló, a vadászó-gyűjtögető életmód során kialakult viselkedésformától<sup>2</sup>. A Holocénban bontakozott ki igazán az a három sajátosság, amiben a *Homo sapiens* a többi fajtól lényegesen eltér és aminek – legalább átmeneti – sikerét köszönheti (Ellis, 2015): 1. Tudatos eszköz- és tűzhasználat 2. Az ökoszisztéma tudatos átalakítása, a környezeti feltételek befolyásolása „élőhely-alkotás” érdekében (ecosystem engineering, niche-creation) 3. Szociális viselkedés (egyéni és társas cselekvések, „társadalmi evolúció”). Az emberi természetátalakítás első két jelentősebb megnyilvánulása, a nagyvadak (megafauna) módszeres kipusztítása, majd a mezőgazdaság elterjesztése is szorosan kötődik a Holocénhez (Surovell, 2007; Ellis, 2015). A mezőgazdaság hatásai geológiai, evolúciós, ökológiai és klimatológiai értelemben egyértelműen kimutathatóak (légköri széndioxid és metánkoncentráció, házasítás, invazív fajok, sivatagosodás, történelmi folyóvölgyek degradációja, stb.).

<sup>1</sup> A földtörténettel, annak időbeli osztályozásával foglalkozó nemzetközi tudományos szervezet. Az Antropocén Munkacsoport: <http://quaternary.stratigraphy.org/working-groups/anthropocene/>

<sup>2</sup> A vadászó-gyűjtögető, helyhez és felhalmozott készletekhez nem kötődő életmód öröksége számos ösztönös viselkedési mintánkban fellelhető (legismertebb az egy fő által érdemben belátható kapcsolati háló, közösség 100-200 fős mérete, másik szemléletes példa az egyedfejlődés csecsemőkori szakasza).



1-1. ábra – A „hokiütő diagram” néven elhíresült ábra, ami az északi félteke elmúlt 1000 évnyi mért/rekonstruált hőmérsékleti ingadozásait mutatja be az 1961-1990 közötti referencia időszakhoz mérten (kép forrása: IPCC, 2001)



1-2. ábra – Az utolsó 500 millió év rekonstruált hőmérsékleti viszonyai. Az ábra a 1961-1990 közötti referencia időszak átlagához képesti hőmérséklet-eltérést mutatja be (kép forrása: [http://qerqs.net/all\\_palaeotemps/](http://qerqs.net/all_palaeotemps/))

Ezért az Antropocénről szóló vitában a valódi kérdés nem az, hogy valóban új korszakot nyitottunk-e a Föld történetében. Sokkal inkább az, hogy tudományos értelemben *mikor kezdődött ez az új korszak*. Így beszélhetünk *korai* vagy *késői antropocén* elméletekről. Előbbiek a mezőgazdaság elterjedéséhez, utóbbiak az ipari forradalom kezdetéhez, illetve a második világháborút követő példa nélküli gazdasági fellendüléshez, a **Nagy Gyorsításhoz** (Great Acceleration, lásd. 1.3.2 alfejezet) kötnék az új korszak hivatalos kezdetét.

## 1.3 Az Antropocén üzenete

### 1.3.1 A Föld-rendszer gondolata

Az antropocén-javaslattal az azt felvető kutatók nem csupán egy aránylag szűk szakértői közösséget, leginkább a földtörténettel, rétegtannal foglalkozó geológusokat célozzák meg. A javaslat célja a társadalom szemléletének alapvető átalakítása. Segítségével a szűkebb szakmai közösség hatékonyan tudja kommunikálni a szélesebb, laikus társadalom felé az emberi hatás és az azzal együtt járó veszélyek mértékét.

Az Antropocén egyik fontos üzenete: ember és környezete, vagyis a Föld oszthatatlan egységes rendszert alkot. A Föld-rendszer élő és élettelen alkotói, elemei folyamatos kölcsönhatásban vannak egymással, ami meghatározza a bolgión zajló anyag-, energia- és információáramlás sorsát. Ezt fejezi ki az Antropocén és az utóbbi években szintén egyre gyakrabban alkalmazott Föld-rendszer fogalma is: „mesterséges” és „természetes” tényezők és körfolyamatok állandó kölcsönhatásban állnak egymással.

*In the context of global change, the Earth System has come to mean the suite of interacting physical, chemical, and biological global-scale cycles (often called biogeochemical cycles) and energy fluxes which provide the conditions necessary for life on the planet. ...*

*...Human beings, their societies and their activities are an integral component of the Earth System, and are not an outside force perturbing an otherwise natural system. There are many modes of natural variability and instabilities within the System as well as anthropogenically driven changes. By definition, both types of variability are part of the dynamics of the Earth System. They are often impossible to separate completely and they interact in complex and sometimes mutually reinforcing ways. (Steffen et al., 2004)*

A felvetés nem újkeletű, a földi folyamatok rendszerszintű tanulmányozása legalább az 1930-as évekig visszanyúl, elsők között az ökológia és a földrajztudományok terén jelent meg. A rendszerszemlélet, mint tudományos módszertan megalkotásához többek között Ludwig von Bertalanffy (Sasvári, 2020) és László Ervin munkássága is hozzájárult (Steffen, 2004). A folyamatosan terjedő rendszerszemlélet és az azt alátámasztó egyre több bizonyíték az elmúlt két évtizedben tudományos paradigmaváltáshoz vezetett el: a 19-20. században kialakult klasszikus tudományterületi felosztás/lehatárolás (műszaki, társadalom- és természettudományok) már csak korlátozottan alkalmas a jelenleg zajló társadalmi-környezeti folyamatok megértésére, előre jelzésére, hatékony befolyásolására. Ez a tény és a Föld-rendszer gondolata rendkívüli módon felértékeli

- a határterületi tudományok (pl. környezetmérnökség, mérnökökológia, egészségügyi mérnök, mérnök-közgazdász, tájépítészet, urbanisztika, stb.),
- a horizontális tudás (több tudományterületre kiterjedő nem elmélyült, de átfogó ismeretanyag)
- és a sokszempontú, holisztikus elemzési és döntési folyamat (pl. ökoszisztéma szolgáltatások keretrendszer) szerepét.

Ezek gyakorlati megvalósítói a más szakterületek irányába nyitott és kommunikálni képes szakemberek. A különféle **környezetmérnöki** tárgyak és képzések célja épp ezen szemlélet és szakértői réteg kinevelése a mérnök-társadalmon belül.

### 1.3.2 A Nagy Gyorsítás

Az Antropocén-javaslat másik meghatározó üzenete az emberi hatás súlyára vonatkozik. A 20. században végbemenő civilizációs (műszaki, gazdasági, társadalmi, stb.) és környezeti (geológiai, földtani, éghajlati, hidrológiai, ökológiai, stb.) változások több szempontból is újszerűek, a korábbi folyamatoktól eltérőek:

- a változás sebessége (pl. karbon, nitrogén, és foszfor kibocsátás, burkolt felületek arányának növekedése) több esetben nagyságrendileg növekedett,
- a változás léptéke globális lett (pl. nemzetközi áruforgalom, turizmus, infokommunikáció),
- a meglepetések (pl. bioakkumuláció, ismeretlen hatású új vegyületek, vegyi és nukleáris katasztrófák, szaporodó zoonózisok és pandémiák),
- és a Föld-rendszer működésére, rugalmasságára gyakorolt negatív hatás (pl. élőhelyvesztés, éghajlati rendszer átalakulása miatt az önszabályozó képesség leromlása).

Az átalakulás különösen a 2. világháború után, az 1950-es évektől vált intenzívvé, néhány évtizedre exponenciális jellegűvé. Ezért az időszak jelentőségét felismerve annak jelölésére bevezették a **Nagy Gyorsítás** elnevezést (Steffen et al., 2011).

Természetesen ez a mértékű átalakulás nem előzmények nélküli. Az évezredek ember-természet viszonyrendszerben számos mérőföldkő volt<sup>3</sup>, amik közül bizonyos szempontból kiemelhető az ipari forradalom. A Nagy Gyorsítás

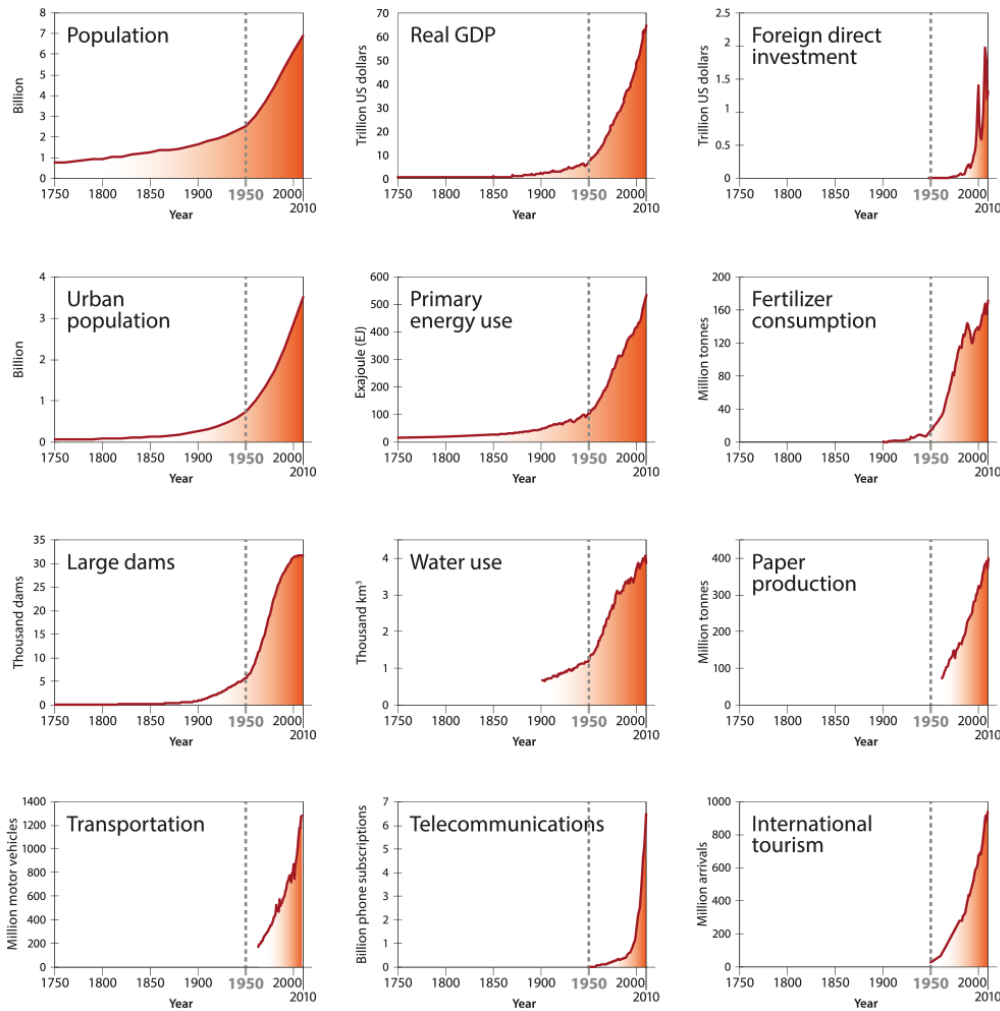
---

<sup>3</sup> Tűzhasználat, annak alkalmazása a vadászat, majd később a mezőgazdaság során. A megafauna kiirtása az újonnan meghódított szigeteken és kontinenseken (Ausztrália, Új Zéland, Polinézia, Amerika, Madagaszkár, stb.). Növény és állat háziasítás, nemesítés. A mezőgazdaság elterjesztése. Öntözéses mezőgazdaság és vízrendezési munkák. Hierarchikus társadalmak kialakítása. Mindezek során az absztrakt gondolkodás, az információ átvitel és tárolás különböző állomásai (képi ábrázolás, beszélt majd írott nyelv, nyomtatás, infokommunikáció) (források: Ellis (2011), Ellis et al. (2013); Diamond (2009); Tim Urban at Wait but why – Neuralink: <https://waitbutwhy.com/2017/04/neuralink.html#part1>)

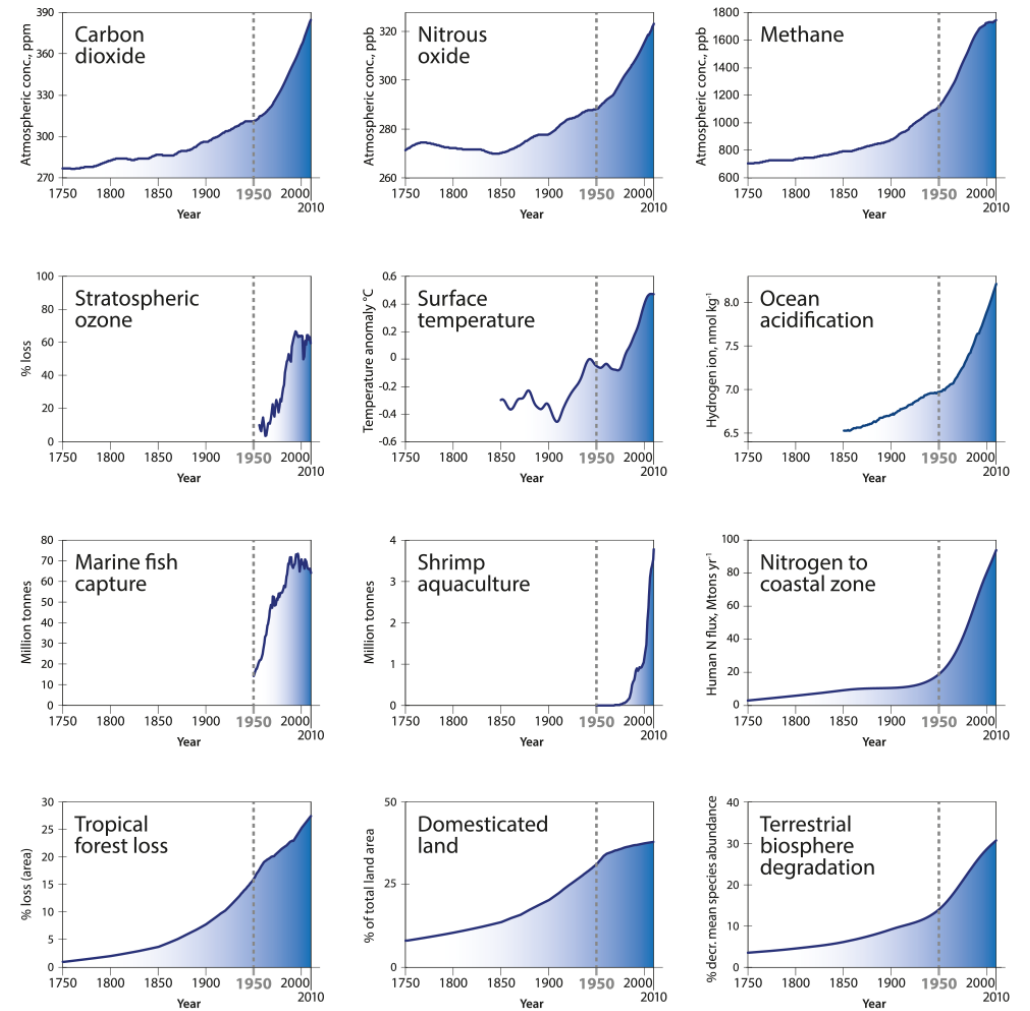
előfutaraként számos újszerű jelenséget hozott. Ha a bioszférára fókuszálunk, akkor az újítások közül három igen lényeges említhető: (i) fosszilis üzemanyaggal hajtott gépek és mérnöki megoldások helyettesítik az emberi és állati erőt a földmunkák, vízrendezési munkák, anyagmozgatások során; (ii) vegyipari nitrogénfixáció (Haber-Bosch szintézis, lásd. a 3.2.3 alfejezetet), ami lehetővé tette a műtrágyázás széleskörű elterjedését; (iii) Biotechnológia: higiénia, növényvédő szerek és állatgyógyászat.



## Socio-economic trends



## Earth system trends



1-3. ábra – A Nagy Gyorsítás: A társadalmi-gazdasági folyamatok és a Föld-rendszer állapotának válogatott mutatói az ipari forradalom kezdete óta. Forrás: Steffen et al. (2011).  
<http://www.iqbp.net/news/pressreleases/pressreleases/planetarydashboardshowsgreataccelerationinhumanactivitysince1950.5.950c2fa1495db7081eb42.html>

Az ember-környezet viszonyrendszerben az ipari forradalom utáni következő igazán meghatározó mérföldkő a 2. Világháború volt. A békekötéseket követően a élet-halál harc érdekében felfuttatott hadiipar kapacitásai felszabadultak. Ez a rendkívüli műszaki-gazdasági potenciál az újjáépítés mellett annak a folyamatnak lett a hajtómotorja, ami elvezetett a globalizált jóléti fogyasztói társadalomhoz. A társadalmi-gazdsági trendeket és a Föld-rendszer azokra adott késleltetett választát mutatja be a 1-3. ábrán látható elhíresült grafikon-sorozat.

#### 1.4 Az IPAT modell

Az Antropocén vagy a környezetvédelem gondolatiságával szemben szkeptikusok gyakran kérdőjelezik meg azt, hogy az emberiségnek valóban meghatározó szerepe van-e a kibontakozó környezeti válságban. Laikusok és szakemberek között, vagy akár szakmai berkeken belül is mind a mai napig kiélezett viták alakulnak ki a téma kapcsán (gyakran felmerülő kritikus megjegyzés pl. „milyen beképzelt dolog azt gondolni, hogy az ember átalakíthatja a földi folyamatokat”). Többek között ezért is hasznos a természeti-környezeti rendszerre gyakorolt emberi hatás számszerűsítése. Ez azonban rendkívül nehéz feladat. A tárgy keretében több módszer is megjelenik majd, elsősorban a környezeti indikátorokkal foglalkozó fejezetben. Ezek közül az egyik, meglehetősen leegyszerűsítő, ugyanakkor igen szemléletes eszköz az IPAT modell (Chertow, 2000):

$$I = P \times A \times T$$

Ahol	I	-	human Impact: valamely emberi tevékenység környezetre gyakorolt hatásának mértéke
	P	-	Population: népesség [fő]
	A	-	Affluence: vagyon, amint a modell a bruttó nemzeti termék (GDP) segítségével mér [€]
	T	-	Technology: technológiai szint, amint a modell gyakran a bejegyzett szabadalmak számával mér [db]

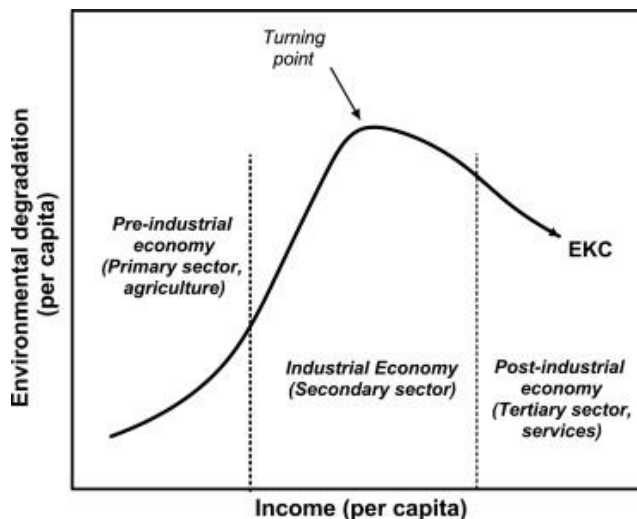
Az összefüggés tehát valamely emberi tevékenység környezeti hatását egyenes arányosságba állítja a népességgel, a birtokolt vagyonnal/gazdasági teljesítőképességgel és a műszaki-technológiai színvonallal. A modell alkalmazható egy-egy termékre, szolgáltatásra (pl. közlekedés széndioxid kibocsátása), nemzetre, környezeti elemre (lokális levegőtisztaság, globális üvegházhatású gázok), vagy átfogóan az emberiség globális hatására értelmezve. Az IPAT előnye, hogy az időbeli változásokat nagyon hatékonyan szemlélteti. További pozitívuma, hogy ráirányítja a figyelmet a folyamatok összetettségére: a környezeti problémák gyökere nem pusztán a túlnépesedés. Nem is csak az iparosodás és a bővülő technológiai eszköztár. Szintén nem önmagában a mértéktelen fogyasztás. Sokkal inkább ezek együttes hatása. Ezt mutatja be az 1-1. táblázat, ami három ország ökológiai lábnyomban, illetve bolygók számában<sup>4</sup> kifejezett környezetterhelését veti össze. A három országot a szemléletesség kedvéért, önkényesen választottuk ki. Ezek a viszonylag szegény, de rendkívül népes India, a számunkra viszonyítási pontnak számító Magyarország és a relatíve gazdag, közepes lélekszámú USA.

1-1. táblázat – IPAT modell: három ország becsült környezetterhelése. Adatok forrása: 2019 Global Footprint Network. National Footprint and Biocapacity Accounts, 2019 Edition, <https://www.footprintnetwork.org/resources/data/>.

Ország	Népesség [millió fő]	Bruttó hazai termék (egy főre jutó GDP) [\$]	Fajlagos ökológiai lábnyom [globális hektár/fő]	Föld bolygók száma (ha mindenki adott ország módjára élne)
India	1 324	1 862	1.2	0.7
Magyarország	9.8	14 997	3.6	2.2
Egyesült Államok	322	52 319	8.1	5.0

<sup>4</sup> Szemléletes arányszám, ami azt mutatja meg, hogy figyelembe véve a Föld biológiai kapacitását, hány Föld bolygóra lenne szükség ahhoz, hogy a bolygó teljes népességét eltartsa feltételezve, hogy mindenki adott ország ökológiai lábnyomának megfelelően fogyaszt.

Szemléletessége ellenére az IPAT modellel szemben számos kritika is felmerül, amik közül kiemelendő az, hogy a leírt kapcsolat bizonyosan nem lineáris arányosság (ez a fenti táblázatból, illetve általában véve az ökológiai lábnyomra vonatkozó adatokból is levezethető). Vélhetően nem is feltétlen pozitív irányú a kapcsolat, mivel a technológiai megoldások a hatékonyság növelésével sok esetben csökkenthetik a fajlagos terhelést<sup>5</sup>, a nagyobb GDP kedvezőbb feltételeket teremthet a költséges környezetkímélő technológiák alkalmazásához<sup>6</sup>, stb. Egy társadalom gazdasági és technológiai fejlettsége, illetve a környezetre gyakorolt hatásai közötti nemlineáris kapcsolat lehetséges leírását adja a környezeti-Kuznetz görbe elmélet (pl. Kaika és Zervas, 2013). Ennek lényege az a feltételezés, hogy az iparosodás és jövedelem mértékétől függően változik az egy főre vetített környezeti terhelés – az iparosodás kezdeti szakaszában növekedve, míg a poszt-indusztriális társadalmak esetében egyre inkább csökkenve (1-4. ábra).



1-4. ábra– A Környezeti Kuznetz-görbe (1955) elméleti alakja. Forrás: Kaika and Zervas (2013).

Az összefüggés fő mondanivalóját megtartva egy jobb leírást jelent az alábbi képlet, melynek pontos kidolgozására aktív tudományos kutatás zajlik (Chertow, 2000):

$$I = f(P, A, T)$$

A fentieket figyelembe véve érdemes az 1-5. ábrát értelmezni, ami az emberiség IPAT modellel becsült összegzett környezeti hatását, annak nagyságrendi, robbanásszerű növekedését mutatja be a 1900-2018 közti időszakra (Steffen et al. 2011. nyomán).

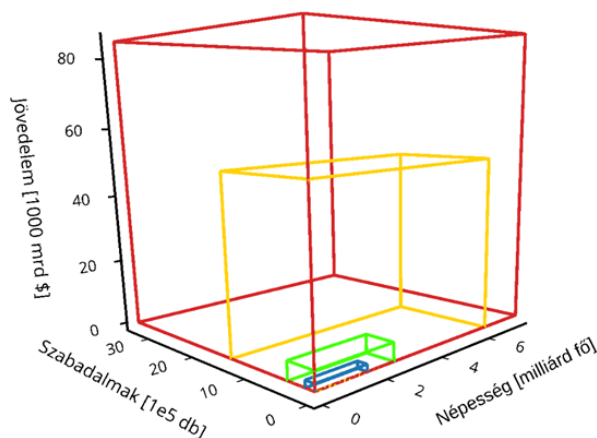
<sup>5</sup> Pl.: A korszerű szennyvíztisztító telepek a szennyvíziszapból termelt biogáz révén energetikailag önellátóak. Ezt a technológiai újítást megelőzően viszont a szennyvíztisztítás egyik legjelentősebb üzemeltetési költségét az energia biztosítása jelentette.

<sup>6</sup> Pl.: Az elektromos autók/megújuló energiatermelő rendszerek elterjesztéséhez szükséges technológiai fejlesztések, gyártási kapacitás, töltőhálózat/decentralizált energetikai rendszer kialakítása rövid távon hatalmas befektetést igényel. Ezért a technológia a bevezetés kezdetén piaci alapon nem életképes és jelentős állami/egyéb forrásból származó támogatásra szorul.

$$I = P \cdot A \cdot T$$

1900  
1950  
2000  
2018

I	Impact	Környezeti hatás
P	Population	Népesség
A	Affluence	Jövedelem
T	Technology	Technológia



1-5. ábra – Az IPAT modellel becsült globális környezeti terhelés változása. Saját szerkesztés Steffen et al. (2011) ábrája nyomán. Adatok forrása: <https://www.worldometers.info/gdp/>, <https://www.worldometers.info/world-population/>, [https://www.wipo.int/pressroom/en/articles/2019/article\\_0004.html](https://www.wipo.int/pressroom/en/articles/2019/article_0004.html)

## 1.5 Mit gondolunk magunkról és a világról?

### 1.5.1 A társadalom szintjén

Az évezredek óta tartó folyamat a Nagy Gyorsításban teljesedett ki: mára egy faj, a modern ember olyan meghatározó tényezőjévé, hajtóerejévé vált a Föld-rendszer működésének, amire a 4,5 milliárd éves földtörténet során csak kevés példa van. Látva az emberi jólét megteremtésével járó környezeti hatásokat, számos súlyos kérdés adódik:

*Vajon a modern technológia és a tudás alapú társadalom képes megbirkózni a kor kihívásaival vagy gyorsabban generál új problémákat, mint ahogy a régieket megoldaná? A korlátlan fejlődésbe vetett haladáshit megfelelő hozzáállás-e a 21. században is, vagy alapvetően kellene újragondolnunk a civilizációnkat? És ha egy-két helyi társadalom képes is újra értelmezni szerepét és viszonyát a Föld-rendszeren belül, képes lehet-e enek a szélesebb körű érvényesítésére egy globalizált, versenyorientált világban?*

A modern társadalmi, szűkebben véve a műszaki megoldások alapja éppen az a kimondott vagy ki nem mondott elméleti feltevés, hogy

- (i) a lehetséges beavatkozásaink különféle hatásait mérnöki és egyéb módszerekkel előre fel tudjuk mérni,
- (ii) a kedvező/kedvezőtlen hatások értékelése alapján racionálisan ki tudjuk választani az egyén/társadalom számára optimális alternatívát,
- (iii) amit a gyakorlatban is meg tudunk valósítani.

A (ii) pontban pedig burkoltan az a feltevés is megjelenik, hogy tetszőleges kérdéskör esetén létezik közmegegyezéssel elfogadott egyéni/társadalmi „optimum”, amit egyértelműen ismerünk is. A 20. század története, a Nagy Gyorsítás és az Antropocén bizonyos értelemben ezen feltevések hosszabb távú tapasztalati cáfolata.

Ezért további nehéz kérdések merülnek fel:

*Valóban előre tudjuk-e jelezni a hatalmas anyag- és energiaforgalmat generáló emberi beavatkozások környezetre gyakorolt rövid- és hosszú távú hatását? Tudjuk-e, hogy az egyre növekvő műszaki-gazdasági potenciállal milyen irányba alakítjuk át a környezetet? És valóban képesek vagyunk a racionális társadalmi-gazdasági viselkedésre, az optimális döntés kiválasztására? Tudunk-e definiálni olyan lokális/globális környezeti állapotot, ami egyéni/társadalmi optimumot jelent? Egyáltalán tudjuk-e, mi az az egyéni/társadalmi optimum, amiért dolgozunk (pl. mérnökként)?*

A kérdések természettudományi és mérnöki vonatkozású részére a rendszerdinamikával és a Föld-rendszer korlátaival foglalkozó 2. fejezet mutatja be a tudomány álláspontját. A kérdések másik része sokkal inkább szociális és egyéni, szubjektív jellegű. Ezekre az alábbi pontban térünk ki röviden.

### 1.5.2 Az egyén szintjén

A témakörnek nagyon fontos személyes és lélektani vonatkozásai vannak, amiket nagyon leegyszerűsítve a következő kérdés foglal össze:

*Egyénként és a társadalom aktív tagjaként (pl. mérnökként) milyen életstratégiával viszonyulunk a kibontakozó környezeti válsághoz?*

Ezt járja körül Paul Chefurka 2012-es rövid írása, a *Climbing the Ladder of Awareness* (durva magyarításban „Felfelé a tudatosság lépcsőfokain”: <http://www.paulchefurka.ca/LadderOfAwareness.html>). Az írás fő állítása az, hogy bár a környezeti válság megértése és feldolgozása egy összefüggő folyamat, mégis az emberek gondolkodása és viszonyulása nagy általánosságban öt fő szakaszba sorolható be. Az egyén ideális esetben ezek között a fázisok között a tudatosodási folyamat részeként haladhat „felfelé”. Mivel ez egy kellemetlen szembesülési feladat, Chefurka személyes tapasztalata szerint az egyre előrehaladottabb fázisban levő emberek száma nagyságrendileg, vagyis szakaszonként kb. tizedére csökken. Az öt fázis jellemzése (Chefurka nyomán saját szabad fordításban):

1. *„Se kép, se hang”*: Ezt a szakaszt az a hibás helyzetértékelés vagy érdektelenség uralja, hogy az emberi civilizációval nincs gyökeres gond, az időről-időre felmerülő részproblémák pedig a technológiai fejlődés révén mind kezelhetőek. Ebben a fázisban az emberek alapvetően zavartalanul élik életüket, a látóterükbe kerülő környezeti problémákat pedig inkább időszakos zavaró kellemetlenségnek tartják.
2. *Egy alapvető probléma észlelése*: legyen az társadalmi egyenlőtlenség, gazdasági válság, műanyag szemét, pálmaolaj, erdőirtás, városi légszennyezés, éghajlatváltozás, olajcsúcs, stb. Egy konkrét probléma (valójában a rendszerszintű válság egy tünetének) észlelése és elköteleződés annak megoldására. A folyamatnak ebben a fázisában az emberek hajlamosak aktív szerepvállalásra az adott ügy előre mozdítása érdekében, ami sokszor a többi válságtünettel szembeni érzéketlenséggel párosul.
3. *Számos probléma tudatosítása*: Az egyre több tünet és bizonyíték hozzájárul a komplexitás részleges érzékeléséhez. Az egyén számára kihívást jelent, hogy rangsorolja a problémákat azok súlyossága és sürgőssége szerint. Ezért ebben a fázisban az emberek nyitottsága korlátozódik és egyre inkább vonakodva hajlandóak újabb problémák befogadására. Ennek hátterében az a félelem áll, hogy az újabb és újabb ügyek bevonása csak szétforgácsolja az erőfeszítéseket és elvonja a figyelmet a „legfontosabb” (legfontosabbnak vélt) problémáról.
4. *A számos probléma között fennálló kölcsönhatások és kapcsolatok észlelése*: A lényeglátó, rendszerszintű gondolkodás kezdete. Annak belátása, hogy az egyik ügy megoldása akár ronthat is a többi problémán<sup>7</sup>. Ez egyben azt is jelzi, hogy az egyén megérti: *nem különálló problémák körével* van dolgunk, hanem egy *átfogó környezeti-civilizációs válsággal*. Ekkor merül fel komolyan annak a lehetősége is, hogy *erre a válságra nincs megoldás*. Az ide eljutó emberek jellemzően visszább vonulnak hasonlóan gondolkodók szűkebb közösségeibe, ahol tapasztalatcserére és a folyamatok mélyebb megértésére fókuszálnak. Ezek a körök jellemzően kis létszámúak, mivel feltételezik a személyes párbeszédet, továbbá a belátásnak erre a szintjére csak kevés ember jut el (akar eljutni).
5. *Annak tudatosítása, hogy a környezeti-civilizációs válság egész életünket átszövi*: Ide értve gyakorlatilag minden tettünket, életünk minden egyes vonatkozását a fogyasztási szokásainktól indulva a személyes kapcsolatokon át a bioszférára gyakorolt tudattalan hatásokig. Ennek belátásával átszakad minden mentális korlát, és minden tünet, probléma befogadást nyer, figyelmet érdemel. A „megoldás” gondolata kiüresedik, mint fölösleges időhúzó tevékenység.

Chefurka tapasztalata szerint az 5. szakaszban igen nagy esélye van annak, hogy az érintett személy depresszióssá váljon<sup>8</sup>. Az, hogy ki hogyan birkózik meg ezzel a kétségbeeséssel, krízissel, nagymértékben a személyiség függvénye.

<sup>7</sup> Pl. a szennyvíztisztítás története, lásd. következő fejezet. Az elektromos autózás kérdésköre.

<sup>8</sup> Ezt a hatást természettudósok, azon belül elsősorban klímakutatók körében is megfigyelték, a jelenség létét tudományosan igazolták: <https://eos.org/features/the-emotional-toll-of-climate-change-on-science-professionals>

Nagy általánosságban három fő irány látszik (értelemszerűen egyenként ezek valamilyen kombinációja is működhet): *tartós depresszió és megkeseredés*, a *belső út* és a *külső út*. A belső út egy mélyen személyes, befelé forduló, mentális stratégia. A külső út pedig a gyakorlati cselekvésre helyezi a hangsúlyt, a válságkezelés jól átgondolt, gyakran tudományosan is alátámasztott módjaira fókuszál: a helyi léptékű alkalmazkodás (adaptáció) megvalósítása közösségépítéssel, az erőforrás felhasználás és az (ön)ellátó folyamatok rezilienciájának növelésével, az anyagáramok helyi szintű zárásával. Chefurka elsősorban rendszerkritikus, alulról jövő ikonikus kezdeményezéseket említi példaként (permakultúra mozgalom, Transition Network). Véleményünk szerint egy nagyobb léptéken megvalósuló alkalmazkodási folyamatnak, „külső útnak” nélkülözhetetlen szereplői a jól felkészült, tájékozott és etikus mérnökök, akikre már lokális szintű ellátó rendszerek tervezése és üzemeltetése során is nagy szükség van.

## 1.6 A modern környezetvédelem-környezetpolitika néhány mérföldköve

### 1.6.1 Rachel Carson: Silent Spring (Néma tavasz)

Az amerikai tengerbiológus által írt regény a modern környezetvédelem egyik fontos kiinduló pontját jelenti. A 1962-ben kiadott műben egy képzeletbeli történet olvasható, ami egy madárdal nélküli néma tavaszt vetít előre. A madarak feltételezett hiányával Carson a növényvédő szerek, elsősorban a kártevők ellen alkalmazott peszticidek túlzott alkalmazására próbálta ráirányítani a figyelmet. A mű valós alapproblémából indult ki, ekkorra ugyanis kezdtek megmutatkozni a DDT széleskörű mezőgazdasági alkalmazásának hátulütői. Ezek hosszútávú veszélyeit Carson a korszak elérhető tudományos kutatási eredményei alapján tisztán látta, bizonyos tekintetben az idő a felvetéseit igazolta (a 60-as évek közepén néhány sas populációban már megfigyeltek nagyarányú, DDT-re visszavezethető egyedpusztulást). A problémát a vegyipari cégek heves kritikája ellenére a nyilvánosság elé tárta, amivel jelentősen hozzájárult a környezetvédelmi mozgalmak térnyeréséhez, a jogi szabályozás átalakulásához. Részben a munkája következményeként említik a nagypresztizsú US EPA (United States Environmental Protection Agency) megalapítását is.

### 1.6.2 Club of Rome, The limits to growth (Római klub, A növekedés határai)

Az 1960-as évek végén nemzetközileg elismert tudósok, gazdasági szakemberek és közéleti személyiségek alapították meg a Római Klubot. Felkérésükre készültek különböző tudományos kutatóhelyeken az első világmodellek, közöttük Meadows és Maitland (1972) „A növekedés határai” című kiadvány. A világmodellek, melynek változói a népesség, nyersanyagok, egy főre jutó élelem, ipari termelés és a környezetszennyezés voltak. A Föld eltartóképességét vizsgálva a kutatók a 21. századra készítettek előrejelzést, melynek részeként több forgatókönyv is készült: normál változat, nulla növekedés, dupla ill. korlátlan nyersanyagkészlet. Kivétel nélkül mindegyik előrejelzés a 21. század derekára nagy valószínűséggel bekövetkező súlyos környezeti katasztrófát prognosztizált. Végül készült egy ún. stabilizált világmodell is, de csak elméleti síkon, tudva, hogy ez nem megvalósítható. Az 1990-es évek elején megismételték a számításokat, eszerint a helyzet valamelyest javult (a tudományos és technikai ismeretek fejlődése következményeként), de a tennivalók sürgősek, ha a katasztrófát el akarjuk kerülni.

### 1.6.3 Fenntartható fejlődés, Brundtland bizottság

1983-ban az ENSZ Közgyűlés felkérése megalakult a Környezet és Fejlődés Világbizottság (Gro Harlem Brundtland, norvég miniszterelnök asszony vezetésével), melynek célja egy átfogó program kidolgozása a Földet veszélyeztető környezeti válság kezelésére. A program 1987-ben elkészült, Our Common Future („Közös Jövőnk”) címmel, tartalmazva mindazon elveket és követelményeket, melyek betartása esetén a földi viszonyok stabilizálhatóak. Ebben az alábbiak szerint határozták meg a *fenntartható fejlődés* mára közhellyé vált fogalmát: „olyan fejlődés, amely kielégíti a jelen szükségleteit anélkül, hogy veszélyeztetné a jövő nemzedékek esélyét arra, hogy ők is kielégíthessék szükségleteiket”. A szükségletek értelmezése: Ahol ezeket a szükségleteket még nem tudták kielégíteni, ott a gazdasági növekedés, az előállított termékek mennyiségi gyarapodása elkerülhetetlen. A fejlett országokban a kíméletesség elvén ható, nem mások rovására történő növekedés lehetséges.

#### 1.6.4 Millenium Ecosystem Assessment

Az ENSZ megbízásából 2005-ben közzétett Millenium Ecosystem Assessment (MAE, 2005, <https://www.millenniumassessment.org/en/index.html>) két ok miatt is korszakos kutatási jelentésnek tekinthető. Egyrészt a földi ökoszisztémáról addig készült legátfogóbb elemzés, amihez több, mint 1360 kutató járult hozzá. Módszertanát tekintve az IPCC szintetizáló jelentésekhez hasonló: új kutatás helyett a meglévő tudás áttekintése, összegzése alapján készült. Ebből világosan kiderült, hogy a 20 században a földi ökoszisztéma állapota gyors romlásnak indult az emberi tevékenység eredményeként. A jelentés másik fontos eredménye az ökoszisztéma szolgáltatások fogalmi keretrendszerének széles körű elterjedése. Ennek célja, hogy az ember-természet kapcsolatrendszer lehető legtöbb elemét számszerűsítse természettudományos és lehetőség szerint közgazdasági értelemben is.

#### 1.6.5 ENSZ Környezetvédelmi és Fenntarthatósági Világtalálkozó

1992-ben, Rio de Janeiróban rendezték az ENSZ következő környezetvédelmi világkonferenciáját. Az elfogadott Riói Nyilatkozat 27 általános érvényű elvet tartalmaz a környezetkímélő gazdasági fejlődés irányairól. A konferencia eredményként megszületett egy akcióterv Agenda21 címmel, melynek koordinációjára az ENSZ létrehozta a *Fenntartható Fejlődés Bizottságot*. Emellett két nemzetközi egyezményt is megnyitottak aláírásra: az Éghajlatváltozási keretegyezményt (*Kiotói jegyzőkönyv* ratifikálta 1997-ben, és a *Biodiverzitás egyezményt*.

2000, New York: a Millenium Development Goals (Milleniumi Fejlesztési Célok) elfogadása. Nyolc általános célkitűzés megfogalmazása, amelyek a következő 15 évre meghatározták az ENSZ fő cselekvési területeit. A szegénység és éhezés felszámolása (1. cél), a nemi esélyegyenlőség (3. cél) vagy a gyermekhalandóság csökkentése (4. cél) mellett fő célkitűzésként került be a környezetvédelem és fenntarthatóság erősítése (7. cél).

2002, Johannesburg: Fenntartható Fejlődés Világtalálkozó: legfőbb eredmény a társadalmi fejlődés és környezetvédelem között feszülő konfliktusok tárgyalása, de emellett annak felismerése, hogy a világ helyzete a Riói értekezlet óta sem javult. Lényegében a 10 évvel ezelőtti feladatok ismétlése, vállalások újrafogalmazása történt, kevés eredménnyel.

2012, Rio 20+ konferencia, melynek az egyik fő sajtóüzenete önmagában beszédes volt: „The Speeches are over, now the work begins” („Vége a szónoklatoknak, most kezdődik a munka”)

2015, New York: Hogy a kihívásnak kellő érvényt szerezzen, az ENSZ a 2015-2030 közti időszakra vonatkozó célkitűzéseit teljes mértékben a fenntarthatóságnak dedikálta: a Millenium Development Goals 15 éves fejlesztési stratégia folytatásaként elfogadták a [Sustainable Development Goals](#) (Fenntartható Fejlődési Célok) keretrendszerét.

Ez a stratégia a 2015-2030-as időszakra határoz meg 17 olyan célkitűzést, melyek elősegítik a fenntartható fejlődés gyakorlati megvalósulását. A célok között a környezetvédelmi vonatkozású kérdések komolyabb súllyal (öt közvetlenül kapcsolódó cél) jelennek meg: Tiszta víz és alapvető köztisztaság (6. cél), Felelős fogyasztás és termelés (12. cél), Fellépés az éghajlatváltozás ellen (13. cél), Óceánok és tengerek védelme (14. cél), Szárazföldi ökoszisztémák védelme (15. cél)

A fenntartható fejlődésre számos megfogalmazás, értelmezés terjedt el. Pl: olyan szociális jólét, amely nem jár a Föld ökológiai eltartó képességét meghaladó gazdasági növekedéssel. Mára a fogalom meglehetősen elcsépeltté vált, sok esetben a helytelen értelmezés miatt is. Azonban mint szemléletmód, a mindennapi életünkben, a mérnöki gyakorlatban is alkalmaznunk kell, a körültekintő tervezéssel, az elővigyázatosság elvének alkalmazásával.

A fenntarthatóság gyakorlati cselekvésre fordítását tárgyalja Somogyi Zoltán (a 3. IPCC jelentésben résztvevőként Béke Nobel díjban részesülő erdész kutató) jegyzete (Somogyi, 2013).

#### 1.6.6 IPCC jelentések

Az éghajlatváltozás Kormányközi Panel (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1990 óta teszi közzé általános jellegű értékelő jelentései (assessment report) és egy-egy tématerületre fókuszáló különjelentéseit (special report). Ezek lényegi üzenetei az idő előrehaladtával:

- (i) a földi éghajlat jelenleg zajló változása bizonyított,
- (ii) a változás sebessége meghaladja a földtörténetben megfigyelt korábbi átalakulásokét, a hatások hosszú távúak, az új egyensúlyi állapot tartós lesz (100-1000 éves időskálán mozog)
- (iii) a változás jelenleg reálisan már nem fordítható vissza és nem is állítható meg, csupán a sebességére és mértékére van ráhatásunk,
- (iv) a várható, részben már megfigyelt hatások területileg nagy különbségeket mutatnak, helyileg akár pozitívan is befolyásolhatják az életkörülményeket, de összességében az éghajlatváltozás nagyon kedvezőtlenül fogja érinteni az emberiséget,
- (v) az átalakulási folyamat egyik fő hajtóereje az emberi tevékenység, azon belül is elsősorban az üvegházhatású gázok kibocsátása, továbbá a területhasználat révén a természetes felszínborítás (növényzet) és vízkörforgás radikális átalakítása,
- (vi) mindezekért a kiváltó folyamatok mérséklése (*mitigáció*) mellett a fő feladatot a várható hatásokra való felkészülés (*adaptáció*) jelenti.

Az összegző jelentések publikálása mellett az IPCC jelentősen hozzájárul az éghajlati hatáselemzésekhez azzal, hogy egységes módszertant és kibocsátási forgatókönyveket biztosít a kutatóközönség számára. Ezek segítségével közép- és hosszútávú meteorológiai, hidrológiai, mezőgazdasági, stb. hatáselemzések készíthetők.

Az IPCC-hez kapcsolódóan 2020-ben alapult meg a HUPCC (Hungarian Scientific Panel on Climate Change – Magyar Éghajlatváltozási Tudományos Testület). A Testület célja, hogy az éghajlatváltozással kapcsolatos legújabb tudás és kutatási eredmények magyarországi vonatkozásait tudományos értékelő jelentésekben összegezze, az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testületének (IPCC) munkásságának nemzeti szintre honosított mintája alapján.

A HUPCC szervezésében 2021. áprilisában zajlott le az [Első Országos Interdiszciplináris Éghajlatváltozási Tudományos Konferencia](#), amelyen a BME több kara és tanszéke is képviseltette magát. A BME VKKT bemutatkozó előadása [itt érhető el](#).

#### 1.6.7 Antropocén és Planetary Boundaries 2009, 2015

A 21. század első két évtizedének két meghatározó gondolati újítása fenntarthatósági-földtudományi területen az Antropocén és a Planetary Boundaries (Föld-rendszer korlátai). A jegyzet mindkét témát részleteiben tárgyalja.

### 1.7 Felkészítő kérdések

1. Hivatalosan jelenleg melyik földtörténeti korban élünk?
2. Hogy hívják azt a kort, aminek hivatalos bevezetését tervezi a Nemzetközi Rétegtani Társaság?
3. Mi az antropocén-elmélet központi gondolata, ami indokolhatja egy új földtörténeti kor bevezetését?
4. Mik az antropocénre utaló geológiai és egyéb környezeti bizonyítékok?
5. Jelenlegi ismereteink szerint hozzávetőlegesen mikorra tehető a mezőgazdaság – mint az emberiség első globális jelentőségű természetátalakítási tevékenységének – kialakulása?
6. Mit próbálnak számszerűsíteni az IPAT modellek?
7. Miért nem feltétlenül igaz az IPAT modellekben alkalmazott egyenes arányosság? (pl. nagyobb gazdasági vagy nagyobb környezetterhelést eredményez)



8. A környezeti-fenntarthatósági tématerületen mit nevezünk „Nagy gyorsításnak” („Great acceleration”)?
9. Nagyságrendileg mennyi nagyméretű (15 métert meghaladó vízszint különbséget kiváltó) duzzasztómű található a Földön?
10. Mik az IPCC jelentések legfontosabb üzenetei?

## 1.8 Irodalom

Chertow, M. R. (2000). "The IPAT Equation and Its Variants". *Journal of Industrial Ecology*. 4 (4): 13–29. <https://doi.org/10.1162/10881980052541927>

Ellis, E.C., Kaplan, J.O., Fuller, D.Q., Vavrus, S., Goldewijk, K.K., Verburg, P.H (2013) Used planet: A global history. *Proceedings of the National Academy of Sciences* May 2013, 110 (20) 7978-7985; <https://doi.org/10.1073/pnas.1217241110>

Ellis, E.C. (2015) Ecology in an anthropogenic biosphere, *Ecological Monographs*, 85(3), 2015, pp. 287–331, <https://doi.org/10.1890/14-2274.1>

Diamond, J. (2009) *Összeomlás – Tanulságok a társadalmak továbbéléséhez*. Typotex Kiadó, Budapest.

IPCC (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg1/technical-summary/>

Kaika D., Zervas E. (2013). The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory — PartA: Concept, causes and the CO2 emissions case. *Energy Policy* 62(2013) 1392–1402 <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.131>

Sasvári, P. (szerk.) (2020) *Rendszerelmélet*. Ludovika Egyetemi Kiadó Nonprofit Kft. – Ludovika Press, Budapest, Magyarország, 198 p.

Somogyi, Z (2013) *A fenntarthatóság általános elmélete. Tézisek és hipotézisek a fenntarthatóságról*. <http://www.scientia.hu/fenntarthatosag/index.php>

Steffen, W., Sanderson, R.A., Tyson, P.D., Jäger, J., Matson, P.A., Moore III, B., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H.-J., Turner, B.L., Wasson, R.J. (2004) *Global Change and the Earth System: A Planet under Pressure*. Series: Global Change - The IGBP Series (closed). 1st ed. 2004. 2nd printing, 2004, XII, 332 p. 258 illus., 145 in color. With CD-ROM. Hardcover, ISBN 978-3-540-26594-8

Steffen, W., Persson, A., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K., Crumley, C., Crutzen, P., Folke, C., Gordon, L., Molina, M., Ramanathan, V., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, H. J., & Svedin, U. (2011). The Anthropocene: from global change to planetary stewardship. *Ambio*, 40(7), 739–761. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0185-x>

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M, Biggs, R., Carpenter, S.R, de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S. (2015) Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347:6223, 1259855, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1259855>

Surovell, T.A (2007) Extinctions of big game. In: D.M. Pearsall (Ed.), *Encyclopedia of Archaeology* (2007), pp. 1365-1374. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-012373962-9.00033-9>

## 2 Rendszerdinamika, a Föld-rendszer korlátai

A fejezetet írta: Kozma Zsolt

A fejezet tárgya: Mi a közös egy erdőben, egy városban, egy emberben, a bankszámlánkban, egy nyúlpopulációban és a Föld-rendszerben? Mi az a rendszerdinamika? Miért kell ezzel környezeti problémák kapcsán foglalkozni? Mit takar a „Föld-rendszer korlátai” elmélet?

### 2.1 Bevezetés

#### 2.1.1 Egyszerű kérdések: ugyanaz az erdő, város, ember?

Felvezetésként tekintsünk néhány szemléletes hétköznapi példát!

*Mennyi változás érhet egy **erdőt**, hogy az erdő maradjon?*

Az XY Nemzeti Park erdejében egy évben mekkora területet, hány köbméter fát, a teljes állomány hány százalékát vághatnak ki anélkül, hogy évtizedes távlatban képes legyen a megújulásra és ugyanaz az erdő maradjon? Számít-e az, hogy ezt tarvágással vagy szálalásos erdőgazdálkodás keretében teszik?

*Mennyit változhat egy **város**, hogy lényegileg még ugyanaz maradjon?*

Évente hány százalékkal nőhet az személyautók forgalma? A tehergépjármű forgalom? Vagy a kerékpáros forgalom? Egy új villamoshálózat kiépülése lényegi változás? Hány új lakó költözhet a kertvárosi részbe anélkül, hogy alvó településsé váljon (ahova jóformán csak aludni járnak haza a munkába ingázók)? Hány új szórakozóhely nyílhat anélkül, hogy bulinegyeddé váljon a belváros? Hány százalékkal növekedhet/csökkenhet a lakosság vízfogyasztása és szennyvíz kibocsátása anélkül, hogy a közműrendszert újra kelljen tervezni? Mi történik, ha egyre több ingatlan tulajdonos tér át a csapadék visszatartására ciszternákkal, zöldtetővel, esőkertekkel? És ha kivágják a fákat a ligetekből, utcákból, és a korábbi zöldfelületeket leburkolják parkolóknak? Vagy építenek a helyükre egy új bevásárlóközpontot? Vagy ötöt?

*Mennyi változás fér bele, hogy valaki ugyanaz az **ember** maradjon?*

Ugyanaz marad, ha érettségi után munkába áll? Vagy eljön az egyetemre? És ha idő előtt abbahagyja az egyetemet? Vagy elmegy külföldre tanulni/dolgozni? Ugyanaz marad, ha vegetáriánus lesz? Elkezd sportolni/abbahagyja a sportot? Esetleg elkezd dohányozni? Vagy épp abbahagyja a dohányzást. De közben kiderül, hogy tüdőrákos lett?

#### 2.1.2 Az egyszerű kérdések valójában bonyolultak

A fenti kérdéseket azért is nehéz megválaszolni, mert maga a kérdésfeltevés sem teljesen egyértelmű. Pontosan mit jelent az, hogy „ugyanaz az erdő”, „ugyanaz a város”, „ugyanaz az ember”? A kérdések persze pontosíthatóak (csak az erdő példáját tekintve): ugyanaz az erdő két állapota, ha közel azonos kor- és fajösszetételű, anyagforgalom szempontjából hasonló viselkedésű faállomány, stb. A válaszadás mégis nehéz, hiszen a vizsgált dolgok (erdő, város, ember) eleve folyamatos változásban vannak (lásd. a 2-1. táblázatban felsorolt példákat). Bár bizonyos sajátosságaik időben közel állandóak, más jellemzők akár ugrásszerűen is megváltozhatnak, megint más jellemzők pedig aránylag lassú alakulást mutatnak. Szintén nehezíti a feladatot a tény, hogy a vizsgált dolgok számos különböző összetevőből, alkotó elemből épülnek fel. Ezek az összetevők pedig szintén változnak és hatással vannak egymásra. Az erdő, a város vagy az ember nem csak belső, hanem külső hatások miatt is változhat. Végül az is bonyolítja a helyzetet, hogy a három példát egymáshoz képest is különböző időbeli lépték jellemzi, ezért eltérő módon tudjuk a változás mértékét, az egyes külső (jellemzően ember-léptékű) beavatkozások hatását megbecsülni.

2-1. táblázat – Az erdő, város és ember néhány rendszerdinamikai szempontból fontos sajátossága

	<b>Erdő</b>	<b>Város</b>	<b>Ember</b>
<b>„Állandó” sajátosság</b>	Egy átlagos levél fotoszintetizáló képessége	Közutak átlagos átteresztő képessége	Egy liter vér oxigénszállító képessége
<b>„Lassan” változó jellemző</b>	A faállomány összegzett biomasszája	A bejövő éves átlagos gépjárműforgalom	Az izmok munkavégző képessége
<b>„Gyorsan” változó jellemző</b>	A fákon levő levélmennyiség	Adott napon bejövő gépjárműforgalom	Pillanatnyi pulzusszám
<b>Alkotó elemek</b>	Élő és élettelen környezeti tényezők, élőkön belül növény, állat, gomba, mikroorganizmusok, élettelenen belül klíma, domborzat, talaj, földtan, stb.	Közlekedési infrastruktúra és a közlekedők, közművek, épületállomány, zöldfelületek	Keringés, emésztés, idegrendszer, vázrendszer, izomzat, zsírszövetek, bőr, szaru
<b>Alkotó elemek közti kapcsolat</b>	(i) A kártevők hatással vannak a fák biomasszájára.	(i) Az épületállomány átalakulása (pl. kertvárosiasodás) hatással van a közlekedésre.	(i) az izomzat és a zsírszövetek aránya hat a keringésre
<b>(i) különböző rendszerelemek közti</b>	(ii) A felnövekvő fák záródó lombkoronája lelassítja a következő generáció növekedését	(ii) a gépjárművek úthosszra vetített számának növekedése fantom dugók kialakulásához vezet, ami miatt még jobban növekszik a gépjárművek száma	(ii) az izommunka miatt termelődő hő egy ideig javítja, majd egy idő után rontja a keringés és izomzat teljesítőképességét
<b>(ii) azonos rendszerelemek közti</b>			
<b>Belső folyamat</b>	Biomassza-produkció a fotoszintézis révén	Gépjárműforgalom	Az emésztés útján nyert energia szállítása a keringéssel és használata gondolkodás/izomzat/zsírképződés útján
<b>Külső befolyásoló folyamat, tényező, beavatkozás</b>	Erdőgazdálkodás	Nemzetközi tranzitforgalom	Járványos betegség, baleset
<b>Jellemző időlépték nagyságrendje</b>	~10-100 év	~1-10 év	~1 év

Látható, hogy az „erdő”, „város”, „ember” alapvető sajátossága az eltérő sebességű, de állandó változás. Ez kedvező esetben dinamikus egyensúlyi állapotot (pl. a helyi klímazónának megfelelő zárótársulás) vagy kiszámítható trendet (pl. történelmi városkép kialakulása, kiszámítható léptékű emberi öregedés) eredményez. A vizsgált három rendszer pillanatnyi állapota és annak változása is jellemezhető mérőszámok, *változók* segítségével. Továbbá a változás

háttérben mindig valamilyen külső hatás vagy belső kölcsönhatási folyamat áll. Ezért a fenti kérdések újrafogalmazhatóak, pontosabbá, de egyben körülményesebbé téve azokat (megint csak az erdőre szorítkozva):

*Mennyi külső vagy belső hatás érhet egy erdőt anélkül, hogy az korábbi dinamikus egyensúlyi állapotától eltávolodjon és idővel egy új, lényegileg eltérő egyensúlyt érjen el?*

### 2.1.3 Nehéz kérdések: ugyanaz a Föld?

A fenti rövid elemzés alapján látható, hogy a szemléletés kedvéért aránylag egyszerűnek, hétköznapiak szánt példák is meglehetősen összetettek. Ezek megértése után próbáljunk meg választ adni a következő kérdésre, ami a fentiekhez mérten nagyságrendekkel bonyolultabb rendszerre, a Földre vonatkozik:

*Mennyi változást (emberi beavatozást) bír el a Föld, hogy „ugyanaz a Föld” maradjon?*

A filozófikusnak tűnő kérdés a tantárgy és általában a fenntarthatósági témakör szempontjából kulcsfontosságú! A kérdés a környezetvédelem/fenntarthatóság központi tárgya, azok elsődleges céljáról szól. A környezetkárosításról, környezeti problémákról ugyanis számtalan közhelyes megállapítás ismert. Ugyanakkor arányaiban lényegesen kevesebb a konkrétum. Ráadásul azok többsége is lokális tünetekre, részproblémákra (pl. a műanyag hulladékra, a folyók szennyezésére, egy hulladéklerakó rekultivációjára, egy kihalás szélén álló faj néhány egyedből álló populációjára) fókuszál. Mintha az emberi egészséget pusztán a vércukorszinttel, a testtömeg indexszel vagy az ép fogak számával próbálnánk jellemezni. Holott ennél jóval összetettebb a kérdés.

A példa kedvéért következik néhány részletező kérdés a teljesség ígéye nélkül: Évente, területarányosan mennyi műtrágyát alkalmazhatunk anélkül, hogy hosszú távra vagy akár visszafordíthatatlanul átalakítanánk a tápanyagok lokális/globális körforgását? Ha mégis átalakítjuk, akkor milyen mértékben tehetjük ezt? Mennyi tisztítatlan/tisztított szennyvizet vezethetünk a felszíni vizekbe<sup>9</sup>? Hány hektár élőhelyet semmisíthetünk meg erdőirtással és infrastruktúrális beruházásokkal (pl. lakóparkok, ipari parkok, logisztikai központok, autopályák, vízlépcsők építésével)? Az emiatt kihaló fajok számára létezik valamilyen ökológiai küszöbérték, vagy egy „elviselhető társadalmi határ”? Van ilyen határ a kifejezetten ember által előidézett környezeti katasztrófákra (a hidrológiai ciklus és a felszínborítás módosítása miatt bekövetkező földcsuszamlás, árvíz, szárazság, hóhullám, tűzvész)? Mekkora műszaki beavatkozásra (pl. hány új árapasztó tározóra, hány kilométer töltésmagasításra/mobilgátra) van szükség, hogy az előidézett változást (pl. a trendszerűen növekvő árvíz kockázatot) elviselhető szinten tartsuk? Mekkora széndioxid kibocsátást bír el a légkör, hogy az éghajlat még „ugyanaz” maradjon? De ha az éghajlat nem is marad ugyanaz, milyen mértékű klímaváltozást bír el a hidrológiai ciklus vagy az ökoszisztéma? Nagyon leegyszerűsítve és sarkítva: Hány megtett utaskilométer vezet egy városi villámárvízhez vagy egy faj kihalásához? És hány faj kihalása mellett lesz még „ugyanaz” az ökoszisztéma?

*Utóbbi kérdéssel kapcsolatban érdemes felidézni a biodiverzitás jelentőségét szemléltető egyik legismertebb metafórákat: „Paul Ehrlich amerikai biológus a fajok számának csökkenését egyszer a repülőgép szárnyán található szegecsek véletlenszerűen történő eltávolításának hasonlatával érzékeltette. Lehet, hogy a repülőgép egy ideig tovább repül, de egy bizonyos pont elérésekor katasztrófális meghibásodás következik be.” (EC, 2021) A metafora üzenete az, hogy (i) a sok befolyásoló tényező és a bonyolult kölcsönhatás rendszer miatt nem tudunk biztos küszöbszámot adni a biztonságosan eltávolítható szegecsek/elveszíthető fajok számára, de (ii) azt biztosan tudjuk, hogy minden szegecs eltávolításával/faj kihalásával növekszik a repülőgép/ökológiai katasztrófa esélye ezért folyamatosan növekszik az ezzel járó társadalmi kockázat is.*

A fenti kérdések sorát folytatva: Ismerjük-e egyáltalán a Föld kritikus rendszereit és ezek kapcsolatrendszerét? Vagyis azt, hogy hogyan viszonyul egymáshoz az ökoszisztéma, a légkör és az éghajlat, a hidrológiai ciklus, a tápanyagkörforgás, a pedoszféra, vagyis általában a Föld-rendszer egyes elemei? Hogy hatnak egymásra a helyi változások és a globális átalakulás? Mekkora időbeli tehetetlensége van a folyamatoknak? Ha még most cselekszünk, akkor megállíthatóak a kedvezőtlen trendek, vagy már visszafordíthatatlan a változás?

<sup>9</sup> A felsorolt kérdések egy részére ismert a tapasztalati úton beszerzett válasz. Pl.: a műtrágya felhasználás és a tisztítatlan szennyvíz kibocsátás eredményeként hazai viszonylatban a 20. század végére elértünk egy lényegi, igen kedvezőtlen környezeti átalakulást: a talajvíz és a források kivételével a felszíni vizek jó közelítéssel az egész országban alkalmatlanok emberi fogyasztásra.

## Egyáltalán, mit jelent az, hogy „ugyanaz a Föld”?

Az erdő-város-ember példánál láttuk, hogy a kérdés nem kellően pontos és ezért újrafogalmazható. Ez a Föld esetében így szólhat: Mi az a bio-fizikai jellemzőkkel, paraméterekkel leírható dinamikus egyensúlyi állapot, amiben jelenlegi ismereteink szerint szeretnénk a Föld-rendszert megőrizni? Ahhoz, hogy ezekre a kérdésekre tudományos igényű és a műszaki gyakorlat számára is használható választ adhassunk, elkerülhetetlenül foglalkoznunk kell a rendszerdinamikával.

## 2.2 Komplex rendszerek és elemeik

### 2.2.1 A komplex rendszer fogalma

Az erdő, a város, az ember és a Föld közősek abban, hogy matematikai szempontból **komplex rendszereknek** tekintjük őket. A komplex rendszerek a rendszerek egy részcsoportját képezik. Mindkét fogalomkör definiálása nehéz, tudományterülettől függően számos meghatározás található rájuk (Ladyman, 2013; Sasvári, 2020). Ezek nyomán:

**Rendszereknek** egymással kölcsönhatásban álló elemek sokaságát tekintjük, amelyek működésére és egymással való kapcsolatára valamilyen törvényszerűségek érvényesek.

A **komplex rendszerek** olyan rendszerek, amelyeknek összetettségükből fakadóan több fontos, megkülönböztetett sajátosságuk van:

- (i) alkotóelemeik bonyolult, hierarchikus függőségi viszonyban állnak egymással, ezért a rendszer egésze több, mint az alkotórészek összessége,
- (ii) a komplex rendszer és környezete között folyamatos anyag-, energia- és információáramlás áll fenn,
- (iii) aminek során a komplex rendszer képes az önszabályozásra és ennek révén a környezettel gyakran dinamikus egyensúlyi helyzetet alakít ki, továbbá
- (iv) a kölcsönhatások összetettsége miatt a rendszer viselkedése nehezen leírható és modellezhető.

Ezek a kapcsolódások okozzák a komplex rendszerek jellemző tulajdonságait, amelyek nem vezethetők le pusztán az egyes rendszerelemek saját tulajdonságaiból (lásd. még a 2.3 pont): nemlineáritás, váratlan viselkedésformák, spontán rendeződés, adaptáció, önszabályozás, dinamikus egyensúlyra törekvés, tehetetlenség és memória/emlékezet/hiszterézis.

Könnyen belátható, hogy az anyagi világ komplex rendszerek sokaságából épül fel (tulajdonképpen maga is egy nagy komplex rendszer), ezért egy adott probléma kapcsán részletesen vizsgált rendszer és annak külső környezete közti lehatárolás jellemzően önkényes és gyakorlatias szempontok alapján történik<sup>10</sup>.

Az eddigi példákból is kitűnik, hogy a természetes és mesterséges rendszerek viselkedése számos hasonlóságot mutat, ezért célravezető a tanulmányozásukhoz is közel azonos megközelítést, a rendszerdinamikát használnunk. A **rendszerdinamika**/rendszer-elmélet/általános rendszer elmélet a komplex rendszerek viselkedésével foglalkozó átfogó tudomány (von Bertalanffy, 1968), amit viszonylag ritkán tanulmányoznak/oktatnak alap kutatás/alaptantárgy jelleggel, önálló témakörként (bár erre is van számos nemzetközi és hazai példa is: Sasvári, 2020). Sokkal inkább nem nevesített módszerként, problémamegoldásra alkalmazott matematikai eszközként ismerhetjük. Számos mérnöki eljárás is ide sorolható. Ilyenek a fizikai-kémiai-biológiai folyamatokat rendszerszemlélettel, az anyag- és energiamérlegből kiindulva integrál- és/vagy differenciálegyenletek segítségével leíró módszerek, melyeket széleskörűen alkalmaz az anyagtudomány, a szerkezettan, az áramlástan, a hidrológia, a hidrodinamika, a bio-kémia és fizikai-kémia, stb.

### 2.2.2 Komplex rendszerek elemei

A fejezet 2.1 bevezetőjében szereplő erdő, város és ember mind komplex rendszerek, amelyeknek néhány jellemzőjét a szemléltetés kedvéért a 2-1. táblázat mutatja be. Ezek a jellemzők matematikai szempontból is besorolhatók<sup>11</sup>, mivel a komplex rendszerek általánosságban egymástól jól elkülönülő fő alkotóelemekből épülnek fel. Az alábbiakban ezeket ismertetjük. Néhány rendszerelemnél szerepel egy-egy kifejezetten odavágó mérnöki/hétköznai példa, emellett mindegyiknél feltüntetjük az előadáson elhangzott három példa vonatkozó részét is. A három példa:

<sup>10</sup> Pl. a Balaton vízmérlegének tanulmányozása során valószínűleg a tavat és a felszíni-felszín alatti vízgyűjtőjét választjuk a komplex rendszernek, míg a külső környezetet elsősorban a meteorológiai és hidrogeológiai viszonyokkal jellemezzük. De természetesen ettől eltérő megközelítés is szóba jöhet.

<sup>11</sup> Tanulságos fakultatív házi feladat az erdőre, városra és emberre felvázolt példákban szereplő sajátosságokat megfeleltetni a rendszerdinamikai elemeknek (változó, fluxus, paraméter, visszacsatolás). Erre a jegyzet nem tér ki, a kidolgozott megoldásért zh-pluszpontok járnak.

- (i) kifolyás tartályból kis nyíláson keresztül (tágabban értelmezve egy természetes vagy mesterséges víztározó vízmérlege),
- (ii) egy faj populációjának időbeli változása,
- (iii) egy bankszámlán elhelyezett pénz egyenlege.

Az egyenletekben feltüntetett matematikai megfogalmazások nem általános érvényűek, csak szemléltetésképp szerepelnek. A matematikai leírást mindig adott problémára kell elvégezni!

### Változó

A rendszerben jelen levő anyag/energia mennyiségéről ad információt. Első megközelítésben a rendszerállapot legfontosabb jellemzője, ezért mérnöki szempontból számunkra a *változó* időbeli (és/vagy térbeli) *megváltozása* az elsődleges kérdés.

$$\frac{d \text{Változó}}{dt} = ?$$

Órai példák: (i) vízszint a tartályban, (ii) populáció egyedszáma, (iii) bankszámlán levő pénz összege.

### Fluxus

A rendszerelemek, illetve a rendszer és a környezete közti anyag-, energiaáramlás időegységre vetített mértéke, ami a változó megváltozását előidézi.

$$\frac{d \text{Változó}}{dt} = \text{Bemenő fluxus} - \text{Kimenő fluxus}$$

Bemenő fluxus az órai példákban: (i) hozzátáplált víz térfogatárama, (ii) szaporodás, (iii) kamat

Kimenő fluxus az órai példákban: (i) nyíláson át kifolyó víz térfogatárama, (ii) pusztulás, (iii) pénzfelvétel, vásárlás

### Paraméter

A rendszer viselkedését leíró, arra egyedileg jellemző, időben többé-kevésbé állandó sajátosság. Általában a ki- és belépő fluxusok nagyságát határozza meg.

$$\frac{d \text{Változó}}{dt} = \text{paraméter}_1 * \text{Változó} - \text{paraméter}_2 * \text{Változó}$$

Órai példák: (i) kifolyó nyílás veszteségi tényezője, (ii) szaporodási ráta, (iii) kamatláb

### Visszacsatolás

A visszacsatolási körök a rendszerek önszabályozó viselkedésének kulcselemei. Ezek lényege, hogy a rendszerváltozó értéke, illetve annak módosulása visszahatás a fluxusok és a paraméterek nagyságára. A visszahatás lehet *csillapító/fékező/negatív* vagy *gerjesztő/gyorsító/pozitív*. Fontos szem előtt tartani, hogy a negatív és pozitív kifejezések nem értékrendi jelzők (nem azt jelölik, hogy a kiváltott hatás „rossz” vagy „jó”), hanem matematikai értelemben utalnak a folyamat hatására. A negatív visszacsatolás önszabályozásként, önkorlátozásként is felfogható, ami úgy hat a paraméterekre/fluxusokra, hogy azok a változó csökkenését (illetve lassabb növekedését) eredményezik. A pozitív visszacsatolást a köznyelv „ördögi körnek” is nevezi, hisz a változó növekedése úgy befolyásolja a paraméterek/fluxusok értékét, hogy azok a változó további növekedését (esetleg lassabb csökkenését) okozzák. Vagyis a pozitív visszacsatolás esetén egy öngerjesztő, a hatás erősségétől függően akár a rendszer összeomlását is előidéző folyamatról van szó.

$$\frac{d \text{Változó}}{dt} = f(\text{paraméter}_1, \text{Visszacsatolás}_{1,2}) * \text{Változó} - \text{paraméter}_2 * \text{Változó}$$

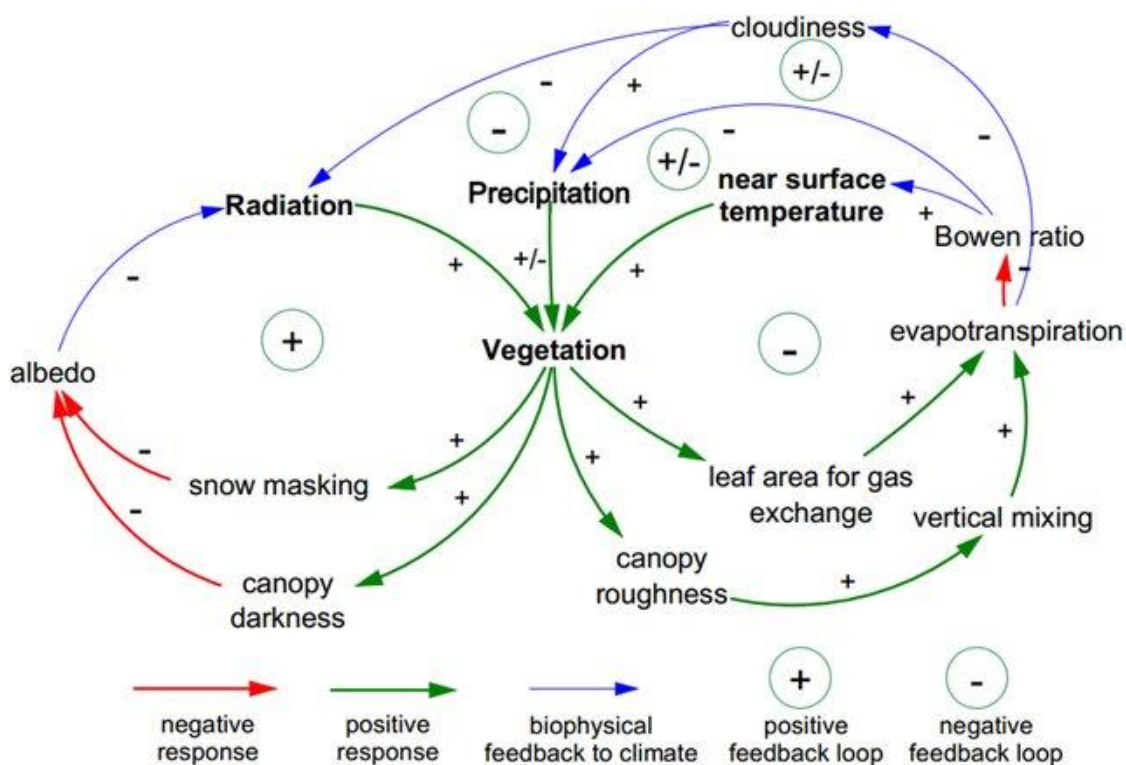
Nagyon fontos példákat találhatunk a negatív és pozitív visszacsatolásra az éghajlati rendszer esetében<sup>12</sup>. Negatív visszacsatolás (i) a légköri széndioxid koncentráció emelkedése serkenti a vegetáció fejlődését, ami a fotoszintézis révén nagyobb mértékű széndioxid megkötést eredményez, ami az üvegházhatású gáz koncentrációjának stabilizációjá

<sup>12</sup> A felsorolt példák a folyamatok irányát szemléltetik, azok fontosságára, erősségére itt nem térünk ki.

irányába hat (ii) a légkör magasabb energiataralma miatt nagyobb mennyiségű vízgőzt képes befogadni, ami növeli a globális felhőborítást, ami a napsugárzás nagyobb arányú visszaverődését okozza<sup>13</sup>.



2-1. ábra – A Hudson öböl (Kanada) térségében készült ikonikus fotó, ami egyszerre két fontos pozitív éghajlati visszacsatolást szemléltet (jégfelszínek visszaszorulása, permafroszt olvadása). Kép forrása: <https://www.flickr.com/photos/44124348109@N01/2661598702>



2-2. ábra – A sarkvidéki szárazföldi területeken bekövetkező vegetációváltozás és az éghajlat közti visszacsatolás rendszer. (Cloudiness: felhőborítottság; Radiation: besugárzás; Precipitation: csapadék; near surface temperature: felszín közeli hőmérséklet; evapotranspiration: fizikai és biológiai párolgás/párolgotatás; snow masking: hóborítás; leaf area for gas exchange: gázcsere biztosító levélfelület; canopy darkness és roughness: lombkorona árnyalata és érdessége) Forrás: Zhang et al., 2014.

A pozitív visszacsatolások rendszerint a légkör, a földfelszín és az óceánok energiaviszonyainak emelkedésével állnak összefüggésben és összességében további hőmérsékletnövekedést idéznek elő. Ilyen visszacsatolási kör (i) a gleccserek

<sup>13</sup> A víz gyors és bonyolult légköri mozgása és viszonylag rövid tartózkodási ideje miatt a hatást nehéz előre jelezni

és a sarki jégsapkák olvadása, ami a felszín színének változása miatt csökkenti a Föld átlagos albedóját, így a beérkező rövidhullámhosszú napsugárzás nagyobb hányada nyelődik el, (ii) a permafroszt területek kiolvadása, ami további széndioxid- és metánkibocsátást eredményez, növelve ezzel az üvegházhatást, (iii) a kontinentális self térség melegedése, ami az ott tárolt metánhidrát felszabadulásához vezet, szintén erősítve az üvegházhatást, (iv) vizes élőhelyek (pl. mocsarak, tőzeglápok) kiszáradása, ami lehetővé teszi az eltárolt nagymennyiségű szervesanyag széndioxid- és metánkibocsátással járó bomlását. Ezek közül két jelenséget egyszerre szemléltet a 2-1. ábrán látható elhíresült fotó.

A pozitív és negatív visszacsatolások sok esetben számos rendszeremre terjednek ki, több lépcsőben, bonyolult és kifinomult módon fejtik ki szabályozó hatásukat. Erre jó példa a felszínborítás, vegetáció és az éghajlat között fennálló kapcsolatrendszer, ahol az éghajlati jellemzők változása egyaránt előidézi többlépcsős pozitív és negatív visszacsatolásokat is. A 2-2. ábra egy ilyen bonyolult kölcsönhatás rendszert mutat be a sarkvidéki tundra területek vegetációváltozásán keresztül.

Negatív (csillapító) visszacsatolás: Ha ebben a biomban valamilyen ok miatt megnövekszik a besugárzás, illetve felszíni hőmérséklet, akkor az kedvezőleg hat a fotoszintézisre és így a növényi biomassza termelésre. Ez hosszabb távon a korábban domináns flóra átalakulásához, nagyméretű bokrok és fák elterjedéséhez vezet. A magasabb vegetáció nagyobb áramlási ellenállást is jelent, ami intenzívebbé teszi a függőleges irányú átkeveredést. Emellett a kiterjedtebb lombkorona miatt intenzívebb a levélfeleletlen végbemenő gázcsere. Ez a két tényező megnöveli a légkörbe irányuló energia- és nedvességtranszportot, vagyis erősebb evapotranspirációt idéz elő. Így kialakul egy negatív visszacsatolási kör, ugyanis az erősebb párolgás kedvez a felhőképződésnek és látens hőtranszporttal csökkenti a felszíni hőmérsékletet. Tehát a kiváltó ok (nagyobb besugárzás, hőmérséklet) miatti vegetációs válasz magát a kiváltó okot mérsékli.

Pozitív (gerjesztő) visszacsatolás: A megnövekedett növényzet, nagyobb méretű lombkorona ugyanakkor két folyamat révén is hozzájárulhat a besugárzás és a felszíni hőmérséklet növekedéséhez: egyrészt a lombzat sötétebb színe, másrészt a hófelületek kitakarása egyaránt csökkenti az albedót, ami növeli az elnyelt sugárzási energia mennyiségét és így a hőmérsékletet.

Órai példák: (i) túlfogyó bukó, (ii) túlszaporodás, (iii) hónap végére elfogy a pénz

### 2.2.3 További rendszer-jellemzők

#### **Puffer képesség**

A változó, a fluxusok és a paraméterek egymáshoz viszonyított arányából fakadó tompító hatás, tehetetlenség (köznapi értelemben mondva egyfajta teherbíró képesség). Megmutatja, hogy a rendszer állapota mennyire kitett a külső behatásoknak. Néhány ismertebb hazai állóvíz átlagos vízmérleg adatait tünteti fel a 2-2. táblázat. Ebben a tavak, tározók a térfogatuk (*változó*) szerint vannak növekvő sorrendbe állítva. A négy nagyságrendnyi tartományt lefedő térfogatokat a tápláló hozzáfolyásokkal (*fluxus*) leosztva kapjuk a Hidrológia és Vízhőgazdálkodás tárgykorból ismert fogalmat, az átlagos tartózkodási időt. Ez az arányszám jól jellemzi az egyes víztestek *tehetetlenségét*, azt a sajátosságát, hogy a kívülről jövő változásokat (pl. egy heves csapadék, egy tartós száraz időszak) mennyire képes tompítani (*pufferelni*) a rendszer. A táblázat világosan mutatja, hogy a változó mérete és a pufferképesség szerinti sorrend eltérő egymástól (pl. a kis méretű Hasznosi tározó a tartózkodási idő szerinti rangsor elejére kerülne).

A 2-2. táblázat nem csak vízmennyiségi, hanem vízminőségi oldalról is jellemzi a tavakat: minél nagyobb a tartózkodási idő, annál nagyobb mértékű a hozzáfolyásra vonatkozó elméleti (teljes elkveredést feltételező) *hígulási arány*, ami a szennyezők szétterjedését és tóbeli koncentrációját is meghatározza. Ez a fajta tehetetlenség a helyzettől függően kedvező<sup>14</sup> és kedvezőtlen<sup>15</sup> is lehet.

---

<sup>14</sup> Pl. a 2000 telén bekövetkezett tiszai cianid szennyezés során a folyón levonuló toxikus anyagok (cianid és nehézfém vegyületek) káros helyi vízminőségi hatását a vízmennyiség növelésével sikerült a hatóságoknak csökkenteni. Ez a gyakorlatban a Tiszalöki tározó és a Tisza-tó hirtelen felduzzasztását és így a pillanatnyi hígulási arány (puffer képesség) megnövelését jelentette.

<sup>15</sup> Pl. a Balaton eutrofizációja során a külső terhelést csökkentő vízminőségjavító intézkedéseket (szennyvíztisztítás, Kisbalaton) követően a tó üledékéből származó belső foszfor terhelés a nagy tartózkodási idő, és így lassú átöblítés miatt hosszú időn keresztül kifejtette még a hatását.



2-2. táblázat – Néhány hazai állóvíz átlagos vízmérleg jellemzője.

Állóvíz	Térfogat	Hozzáfolyás	Tartózkodási idő
	[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ]	[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /év]	[év]
Gödöllői-halastavak	0.60	2.46	0.2
Csór-réti-víztározó	1.03	1.15	0.9
Hasznosi-tározó	1.86	0.16	11.9
Tunyogmatolcsi-tározó	3.66	1.75	2.1
Velencei-tó nyílt vizes terület	20.87	2.73	7.7
Kis-Balaton I. tározó	23.58	4.06	5.8
Kis-Balaton II. Tározó	66.96	9.03	7.4
Tisza-tó	181.24	9.24	19.6
Balaton	2020.50	69.25	29.2

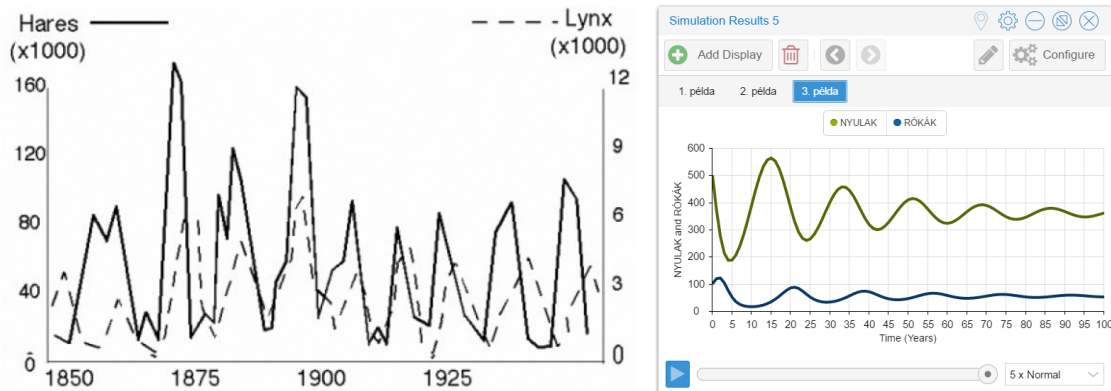
### Időbeliség

Részben ide sorolható a puffer képességből adódó gyors/lassú reakció (kicsi/nagy tehetetlenség). Emellett ide tartozik az a sajátosság is, hogy a visszacsatolások gyakran késleltetéssel fejtik ki hatásukat. Ez gyakran a rendszer dinamikus egyensúlyi állapota körüli ingadozáshoz, hullámzáshoz vezet. Könnyen megérthető példa a járművek kormányzása. A kerékpár nagyon gyorsan, egy szerzőkormányos elektromosan leszabályozott gépjármű közepesen gyorsan reagál a kormánymozdulatokra, míg ezekhez képest egy evezős csónak<sup>16</sup> vagy különösen egy folyami uszály mozgásiránya rendkívül lassan befolyásolható.

*Egy populáció túlszaporodása miatt leromolhat a környezet eltartó képessége, ami visszahat az egyedekre. Azok általánosan legyengülnek, ezért csökken a szaporodási ráta és/vagy növekszik a pusztulási ráta. Ez a populáció méretének lassabb növekedéséhez, majd akár csökkenéséhez is vezet. Ezzel viszont a környezetre nehezedő terhelés csökken, az eltartóképesség javul. Végül soron az egyedszám és a környezeti eltartóképesség egyensúlyba kerül egymással. Viszont az egyensúly eléréséig vezető hullámzás amplitúdója és időléptéke jelentős, akár a generációs idővel összemérhető lehet. Ennek a magyarázata az, hogy a túlszaporodás miatt jelentkező csillapító visszacsatolások (kisebb születési, nagyobb halálozási ráta) csak késleltetve, sokszor csak a következő generáció egyedszámán keresztül fejtik ki a hatásukat. Ennek a jellegzetes populációdinamikai hullámzásnak klasszikus példája a Hudson Bay Fur Trading Company által feljegyzett statisztika. Ez a társaság által felvásárolt nyúl és hiúz prémek időbeli alakulását mutatja be, a Lotka-Volterra egyenletek kidolgozásának egyik alapját adta<sup>17</sup>*

<sup>16</sup> Ebből fakad pl. az a szlalomozás is, amit kezdő vízitúrázóknál gyakran lehet látni.

<sup>17</sup> Lásd. még bővebben az előadáson elhangzott Nyulak és rókák példát, illetve a Lotka-Volterra egyenletek interaktív megoldását az Insightmaker honlapon: <https://insightmaker.com/insight/59921/KMA-2-EA-public>



2-3. ábra – A Hudson Bay Fur Trading Company által felvásárolt nyúl- és hiúzprémek időbeli alakulása (balra) és a préda-ragadozó populációdinamikai kapcsolat egy elméleti megoldása a Lotka-Volterra egyenletek szerint (jobbra). Képek forrása: Jafelice és de Silva (2011), <https://insightmaker.com/insight/59921/KMA-2-EA-public>

A rendszer időbeli reagálása, időbelisége azért igen lényeges sajátosság, mert amikor a rendszer átalakulásának késleltetve megjelenő jeleit észleljük, akkor már nem biztos, hogy van módunk az érdemi beavatkozásra. „Mikorra megértjük, hogy baj van, akkorra már késő.”

*A populációdinamikai példát alapul véve: elképzelhető olyan helyzet, amikor a ragadozó (róka/hiúz) olyan sebességgel fogyasztja a prédát (nyúl), hogy a préda-populáció csökkenésével kialakuló visszacsatolás nem tudja a prédára gyakorolt csillapító hatását időben kifejezteni. Emiatt a ragadozó akár a teljes préda-állományt felélheti, ami mindkét populáció teljes összeomlásához vezet.*

Órai példák: (i) a tartály leürüléséhez szükséges idő (ii) a populáció reakciója a megváltozó környezeti feltételekre (és így a módosult növekedési/pusztulási rátára) (iii) a felhalmozott vagyon pusztán kamatokból származó duplázódásához szükséges idő.

### Rendszerműködés szabályai

A változók, fluxusok, paraméterek és visszacsatolások közti kapcsolatok összessége, amik matematikai szempontból egy feltétel- és egyenletrendszerrel írhatóak le/közelíthetőek. Fizikai, kémiai és biológiai törvényszerűségek. Mesterségesen befolyásolt rendszerek esetén ilyenek még a különböző műszaki, gazdasági és jogi szabályok (pl. vonatkozó műszaki szabványok, pénzügyi korlátok, közlekedésben a Kresz, a Balaton esetében pl. a partvédelmi okok miatt meghatározott maximális megengedett vízszint, vagy a Tisza-tó rendszeres téli leeresztése a jégkarok elkerülése és a nagyobb árvízi tározókapacitás érdekében).

Órai példák: (i) a hidraulika, hidrosztatika törvényei, a túlfolyó bukó pozíciója (ii) populációdinamikai törvényszerűségek (pl. Lotka-Volterra egyenletrendszer), a populáció fennmaradásához szükséges minimális egyedszám (iii) kamatos kamat számítási képlete.

### A rendszer célja

Az a nem feltétlen nevesített feladat, aminek megoldására a rendszer spontán szerveződik, vagy létrehozták. Alapvetően határozza meg a rendszer működését és környezettel való viszonyát.

Ennek két szélsőséges, de szemléletes példája az atomenergia és a génmódosítás. Szakmai alapon rendkívül nehéz/lehetetlen megítélni azt, hogy ezek „jó” vagy „rossz” technológiák, az ezek segítségével létrehozott rendszerek (nukleáris áramtermelés/atombomba, gyógyászati célú génterápia/agrotechnológiai rendszerek) „jó” vagy „rosszak”. A megítélést sokkal inkább (i) az egyéni világlátás/életfelfogás (szubjektív elem), és (ii) a technológia hasznosításának célja (objektív elem) határozza meg. Itt csak az objektív szempontra térünk ki: az atomenergia esetében belátható, hogy ha azt villamos energiatermelésre akarjuk használni, akkor egy vitatható, de potenciálisan „jó” technológiáról van szó<sup>18</sup>. Ellenben ha hadi célokra, tömegpusztító eszközként akarjuk

<sup>18</sup> Tudva azt, hogy az nukleáris energiatermelés terén is számos nyitott kérdés és megoldandó feladat van. Pl. a túlságosan centralizált, alaperőmű-központú ellátó hálózat, a katasztrofális események társadalmi elfogadottsága, vagy a nagy aktivitású

alkalmazni, akkor nyilvánvalóan egy hatékony, de „rossz” technológia. Hasonlóképp: ha a génmódosítást pl. gyógyíthatatlan betegségek kezelésére vagy globális élelmezési problémák megoldására alkalmazzuk<sup>19</sup>, akkor vitatható, de potenciálisan „jó” módszer. Ugyanakkor ha az alapvetően mindenki számára hozzáférhető mezőgazdasági szaporítóanyagok fölötti kontroll és így gazdasági függőség és monopól helyzet kialakítása a cél, akkor egy határozottan „rossz” technológia.

A részben vagy tévesen megfogalmazott és realizált célok jelentős mértékben hozzájárulhatnak a hibás rendszerműködéshez. Különösen igaz ez akkor, ha nem egy konkrét célról, hanem összetett célkitűzés-rendszerről van szó. A rosszul definiált célkitűzés hátterében gyakran hibás, részleges helyzetértékelés áll.

*A tartályos példakört alapul véve: egy sűrű beépítésű városi övezetben létesített átmeneti záportározó esetében az elsődleges cél a csapadékból képződő lefolyási csúcsok tompítása, így az elvezető rendszer tehermentesítése és a kiöntés, villámárvíz kockázatának csökkentése. Ezzel szemben a Tisza-tó esetében az árvízi kockázatcsökkentés mellé további célok is társulnak: öntözővíz tározás, turizmus, horgászat, ökológiai igények, hajózás és villamos energiatermelés. Mivel a cél-rendszer összetett, nem pontosan rangsorolt, továbbá bizonyos célkitűzések egymásnak részben ellent mondanak, számos konfliktus (bizonyos érintettek szempontjából hibás rendszerműködés) áll elő. Pl.: az árvízvédelem miatti téli leeresztés turisztikai, horgászati és ökológiai szempontból káros.*

Órai példák: (i) városi környezetben csapadékvíz időszakos tározása, a csapadékelvezető rendszert érő löketszerű terhelések csillapítása (ii) fajfenntartás, siker az evolúciós versenyben (iii) „sok pénz” vagy stabil pénzügyi helyzet.

### **A rendszertervezés paradigmája**

Csak mesterségesen létrehozott rendszerek esetén beszélhetünk róla: az a vezérlő elv, szemlélet, ami a rendszertervezés egészét meghatározta. A tervezési paradigma határolja be azt, hogy egyáltalán milyen célokat tudunk/akarunk megfogalmazni. A paradigmaváltás jelentőségét bővebben a 2.6 pont bontja ki.

## **2.3 Sajátos rendszerdinamikai viselkedésformák és tulajdonságok**

Fentebb (fejezet) már megjelent, hogy az állandó változásban levő komplex rendszerek a külső feltételek módosulására válaszolva folyamatos változásban vannak, ami általában azt jelenti, hogy rendszerint (de nem kötelező érvényűen) dinamikus egyensúlyi állapotra törekszenek a környezetükkel és próbálják fenntartani saját magukat. Ez természetes és mesterséges viszonyok között is egy kedvező sajátosság, hisz a külső környezetet nagyfokú sztochasztikus viselkedés, változékonyság jellemzi<sup>20</sup>, így a rendszer stabilitásának alapja, hogy tud-e alkalmazkodni a változó feltételekhez.

### **2.3.1 Lineáris változás**

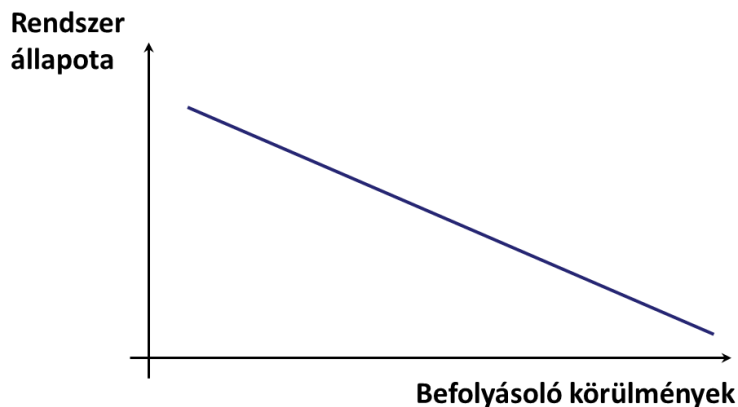
Ez első megközelítésben azt is sugallhatja, hogy a külső környezeti hatótényezők változása esetén az egyes rendszerek viselkedése kiszámítható és ezért jól előre is jelezhető. Ráadásul az emberi gondolkodás hajlamos feltételezni, hogy ez a kiszámítható kapcsolat lineáris jellegű, vagyis matematikai szempontból jól közelíthető egyenes arányossággal. Emellett a változás meg is fordítható (reverzibilis átalakulás): ha a befolyásoló hatótényezőt visszaállítjuk a korábbi értékére, akkor a rendszer is visszatér az ahhoz tartozó állapotába. Vagyis a megváltozott körülmények mellett a komplex rendszer felépítése, viselkedése nem változik meg (a változók, fluxusok, paraméterek és visszacsatolások rendszere változatlan). Ezt szemlélteti a 2-4. ábra. Ez a viselkedésforma valós rendszerek esetén általában a befolyásoló körülmények egy bizonyos tartományában igaz is.

---

radioaktív hulladék végleges, százezer év nagyságrendű időléptékre szóló elhelyezése, amire jelenleg sehol nincs működő megoldás.

<sup>19</sup> Számos kutatóhely, szakmai műhely cáfolja ennek a célnak a létjogosultságát ökológiai, gazdaságossági, morális alapon. A kérdés igen messzire vezet: ugyanis egy túlnépesedési (egy túlzott növekedésből fakadó) problémát egy túltermelési (túlzott növekedéssel) válasszal akarunk megoldani, ami a társadalom részéről egy pozitív visszacsatolási válaszként s felfogható. Bővebben lásd. még a **Error! Reference source not found.** fejezetet.

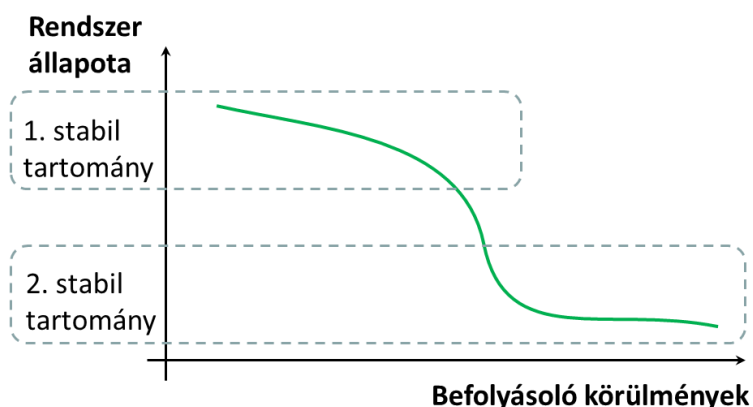
<sup>20</sup> Pl. az időjárás napos, évszakos vagy éves-évtizedes léptékű változása együtt jár az ökoszisztémákat, vagy az épített környezetet érő csapadék-, hő- vagy szélterhelés módosulásával.



2-4. ábra – A rendszer állapota a befolyásoló körülmények függvényében – lineáris viselkedés

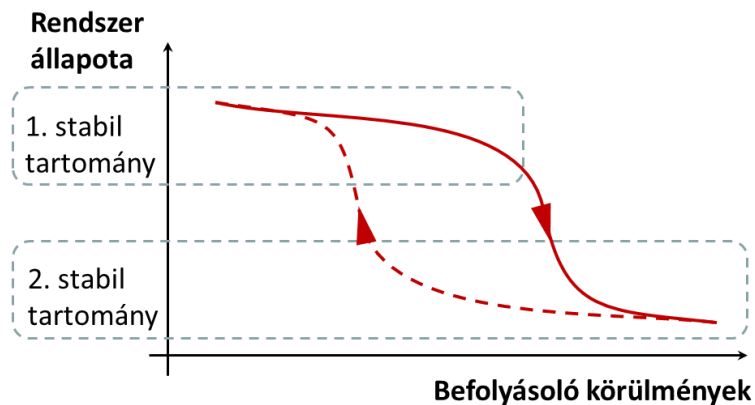
### 2.3.2 Nem-lineáris változás

Viszont számos környezettudományi példa azt mutatja, hogy a rendszer megváltozott külső feltételekre adott válasza nehezen vagy nem előre jelezhető, határozottan nemlineáris, sőt nehezen vagy nem megfordítható (hiszterézis jellegű vagy irreverzibilis átalakulás). Ennek a meglepetésszerű viselkedésnek a háttérében a rendszer belső átrendeződése áll: a változók közti kapcsolatok (fluxusok) és a visszacsatolások lényegileg módosulnak. Szintén tapasztalati ismeret az, hogy a nagyarányú, gyakran meglepetésszerű átalakulások két viszonylag stabil, de jelentősen eltérő dinamikus egyensúlyi állapot között mennek végbe (2-5. ábra).



2-5. ábra – A rendszer állapota a befolyásoló körülmények függvényében – nemlineáris viselkedés

A nemlineáris, meglepetésszerű viselkedésnek számos szemléletes példája van. A kiinduló hétköznapi rendszerekre visszautalva: egyes **erdős** területek sok esetben a helyi klíma fokozatos és lassú átalakulása miatt változnak viszonylag rövid időn belül füves sztyeppé/szavannává/prérvé vagy akár sivatagos területté (lásd az órán elhangzott példát a Szaharáról). A közúti, főleg a **városi** közlekedésben jól ismert jelenség a fantom dugó: egy útszakaszon a gépjárművek áthaladása bizonyos gépjármű sűrűség alatt közel állandó, vagy a gépjárművek számával arányosan csökken. Ugyanakkor egy kritikus gépjárműsűrűség fölött a vezetők reakcióidejéből (*időbeliség*) adódóan ugrásszerűen lelassul a forgalom és látszólag minden külső ok (sávelhúzás, baleset, elromlott jelzőlámpa, stb.) nélkül torlódás alakul ki. A dohányzás **emberi** egészségre gyakorolt rendkívül káros hatása jól dokumentált. A panaszok, problémák eleinte enyhék és arányosak a dohányzás intenzitásával és időtartamával. Viszont egyúttal megnövelik a légzőszervi és keringési problémák (tüdőrák, infarktus, agyvérzés, stb.) kockázatát. Bármelyik is következik be, az drasztikus életminőség romláshoz/halálhoz vezet (2-6. ábra). Az építő- és környezetmérnöki gyakorlatban szintén sok ilyen esettel találkozhatunk (rugalmas-rugalmatlan alakváltozás, titrálás, stb.)



2-6. ábra – A rendszer állapota a befolyásoló körülmények függvényében – nemlineáris viselkedés hiszterézissel

### 2.3.3 Regime shift

A szakirodalom erre a fajta lényegi rendszer átalakulásra **regime shift**-ként (durva magyarításban rezsimváltás vagy egyensúlyi állapot-váltás) hivatkozik és igen nagy jelentőséget tulajdonít neki.

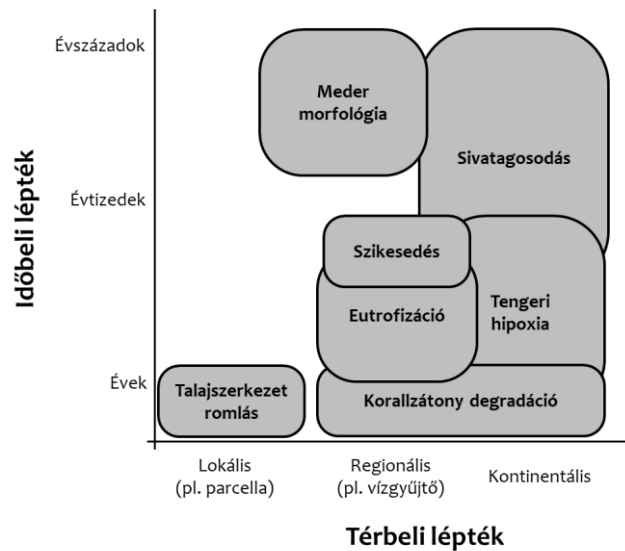
Regime shift-nek nevezzük a környezeti rendszerek olyan nagyarányú és tartós átalakulását, ami a rendszer felépítését, belső szerkezetét (a paramétereiket, változók közti kapcsolatokat, fluxusokat, visszacsatolásokat) és viselkedését, funkcionalitását is lényegileg érinti. A 2-7. ábra a különböző környezeti regime shift-ekre hoz példákat tér- és időlépték szerint. A két lépték között bizonyos mértékű kapcsolat fedezhető fel: a térben kiterjedtebb folyamatok jellemzően hosszabb időskálát is érintenek, nem is feltétlen a kialakulásuk, hanem elsősorban a hatásaik nyomán (lásd. órai példa a Szahara sivatagosodásáról).

A regime shift-ek néhány meghatározó általános tulajdonsága:

- Gyors: a rendszerviselkedés jellemző időléptékéhez mérten hirtelen következik be
- Meglepetésszerű: nehezen vagy nem lehet előre jelezni
- Nehezen, vagy nem megfordítható. Előbbi gyakran hiszterézis viselkedés formájában jelenik meg. A 2-6. ábrán a folytonos és a szaggatott vonal közti különbség jelöli ezt: a rendszer valamely változója a rendszer korábbi állapotától függően más pályát jár be a befolyásoló körülmény mentén („emlékezete” van a rendszernek).

A fenti jellemzők háttérében az áll, hogy a regime shift során a rendszer egy új stabil egyensúlyi állapotba kerül, a viselkedését meghatározó belső folyamatok (változók, paraméterek, fluxusok és visszacsatolások) alakulnak át. Ezek visszarendeződése erőforrás- és időigényes, valamint gyakran nem is lehetséges.

*Nem véletlen, hogy a természetvédelmi tevékenység középpontjában a természeti értékek (elsősorban az élőhelyek, az ott jelen levő ökoszisztémák) megőrzése áll. Ennek biztosítása ugyanis arányaiban kisebb ráfordítással lehetséges, mint egy degradálódott állapot helyre állítása. Pl. egy-egy vizes élőhely kiszáritása (lecsapolása, a tápláló felszíni/felszín alatti víz kitermelése) vagy kiszáradása néhány év-évtized alatt teljesen végbe mehet, ami az ott jelen levő vízkedvelő növényfajok helyi kipusztulásához vezet. Ha felmerül az élőhely helyreállításának igénye, akkor a hidrológiai viszonyok, vízjárás viszonylag gyorsan átalakítható a korábbi egyensúlyi állapotnak megfelelően. A vizes élőhelyre jellemző vegetáció társulások visszarendeződése ugyanakkor lényegesen hosszabb időt vehet igénybe, vagy a megváltozott talajtani, vízkémiai, stb. viszonyok miatt nem is történik meg. Ennek háttérében állhat pl. az élőhelyen évszázadok alatt, anaerob körülmények között kialakult, majd a kiszáradást követően levegőre kerülő tőzegréteg bomlása, amivel a tőzeg nyújtotta funkciók (víztartó képesség, lassan, kiegyenlítően hozzáférhető tápanyagforrás) elvesznek. Egy hazai vonatkozású példát [bemutató előadás](#), és a kapcsolódó cikkek (Decsi et al., 2017; Decsi et al., 2020).*

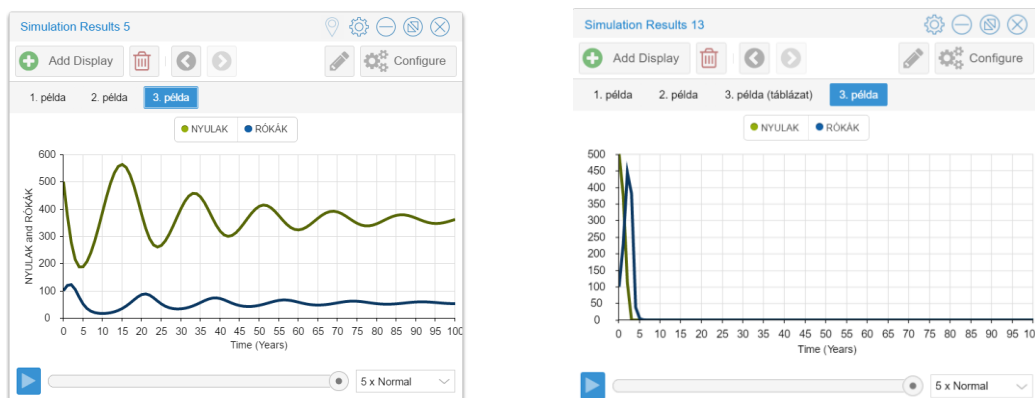


2-7. ábra – Környezettudományi példák a regime shift-ekre, azok tér- és időbeli léptéke. Kép forrása: <https://www.regimeshifts.org/>

### 2.3.4 Túllövés és összeomlás (oveshoot, overexploitation)

A túllövés-ként aposztrofált jelenség akkor következik be, ha egy készlet (változó) vagy egy egész komplex rendszer esetében a belépő fluxust tartósan meghaladja a kilépő fluxus és ez a készlet olyan mértékű kiürüléséhez vezet, ami ellehetetleníti rendszer további működését.

Ennek egyik jellegzetes ökológiai példája egy populáció hirtelen túlszaporodása, amely olyan mértékben fogyasztja túl a táplálékát biztosító környezetet, hogy az nem képes megújulásra. Ebben az esetben a környezet eltartó képessége tartósan lecsökken, ami a fogyasztó populáció összeomlásához, az egyedszám hirtelen csökkenéséhez vezet. Önmagában a túlszaporodás nem feltétlenül okoz problémát, ahogy azt a préda-ragadozó populációk dinamikus kölcsönhatása esetén korábban már láttuk. Ha a ragadozók szaporodása és ezért préda-fogyasztása nem túl gyors, akkor nem következik be túllövés és összeomlás, pusztán csak egy időben késleltetett populáció csökkenés (2-8. ábra, bal oldali kép). Ha azonban a túlszaporodás (fogyasztásnövekedés) túlságosan gyorsan következik be, akkor az a túlfogyasztott nyúlpopuláció kihalásához vezet. Ami ebben az elméleti példában egyben a rókapopuláció pusztulását és így a rendszer összeomlását is jelenti (2-8. ábra, jobb oldali kép).



2-8. ábra – Préda-ragadozó populációdinamikai kapcsolat elméleti megoldása a Lotka-Volterra egyenletek szerint: egy egyensúlyi helyzetre (balra) és a túllövés miatt összeomló populációk esetére (jobbra). Képek forrása: <https://insightmaker.com/insight/59921/KMA-2-EA-public>

A fenti példából látható, hogy az egyszerű túlszaporodás miatti negatív visszacsatolást és az összeomlással járó túllövést nem választja el éles határ. Adott körülmények mellett pusztán a ragadozó-populáció fogyasztási sebességének<sup>21</sup> és a préda-populáció szaporodási sebességének arányától függ, hogy összeomlással jár-e a ragadozók túlszaporodása.

<sup>21</sup> A ragadozó milyen gyorsan fogyasztja el a préda-populáció egyedeit.

A túllövés a regime shift egy szélsőséges eseteként is felfogható: ilyenkor a befolyásoló körülmény a túlfogyasztás mértéke vagy tartóssága, ami egy ponton túl a rendszer állapotának hirtelen, nagyarányú átalakulásához, belső szerkezetének megváltozásához vezet.

### 2.3.5 Reziliencia, redundancia, diverzitás

A reziliencia magyarra leginkább rugalmasságként, zavarástűrőként vagy köznapi értelemben véve ellenálló képességként értelmezhető fogalom. Azt fejezi ki, hogy egy rendszer milyen mértékű zavaró hatás ellenére képes visszatérni korábbi stabil állapotába, mennyire képes megőrizni működési sajátosságait, funkcionalitását. Vagyis a rugalmasság, mint rendszertulajdonság azt mutatja meg, hogy mennyire ellenálló adott rendszer a regime shift-ekkel szemben. Ez a sajátosság együttesen jellemzi a rendszerdinamikai jellemzők kapcsolatrendszerét, a paraméterek, a változók, fluxusok és a köztük levő visszacsatolások kölcsönhatásait.

Könnyen belátható, hogy a rendszerek összetettsége általában véve növeli azok rugalmasságát, zavartűrő képességét. Elegendő Paul Ehrlich már bemutatott analógiájára gondolni, ahol a fajok jelentőségét egy repülőgép szegecseihez hasonlította. A rendszerelemek (változók) és az azok által betöltött funkciók (fluxusok, visszacsatolások) számának növelése azt jelenti, hogy egy-egy rendszerelem, kapcsolat kiesése esetén számos további, azonos szerepet betöltő rendszerelem áll még rendelkezésre, a komplex rendszer állapota nem romlik jelentősen. Nagyobb rugalmassághoz vezethet:

- (i) a redundancia: több, azonos szerepet betöltő, azonos működési elvű funkció párhuzamos jelenléte
- (ii) a diverzitás: ugyanazt a szerepet több különböző működési elvű funkció tölti be

A redundancia és diverzitás tudatosan alkalmazott tervezési elvek kritikus műszaki infrastruktúra (pl. atomerőmű) létesítése során, de valójában szinte általános érvénnyel kellene használni ezt a két elvet az építőmérnöki, környezetmérnöki gyakorlatban. A szélsőséges helyzetek gyakoribbá válása miatt ugyanis a környezeti rendszerek rezilienciája, zavartűrő képessége egyértelműen felértékelődik már a közeljövőben. Olyan stabil, rugalmas ellátó rendszerekre (közművek, közlekedés, mezőgazdaság, stb.) van szükség, amelyek jól viselik a szélsőséges időjárási, hidrológiai, ökológiai, stb. helyzetek előre nem ismert sorozatát. Ez pedig azt feltételezi, hogy a még napjainkban is megszokott maximalizáló tervezési, üzemeltetési gyakorlattól jelentősen el kell térni a reziliencia (biztonság) javára.

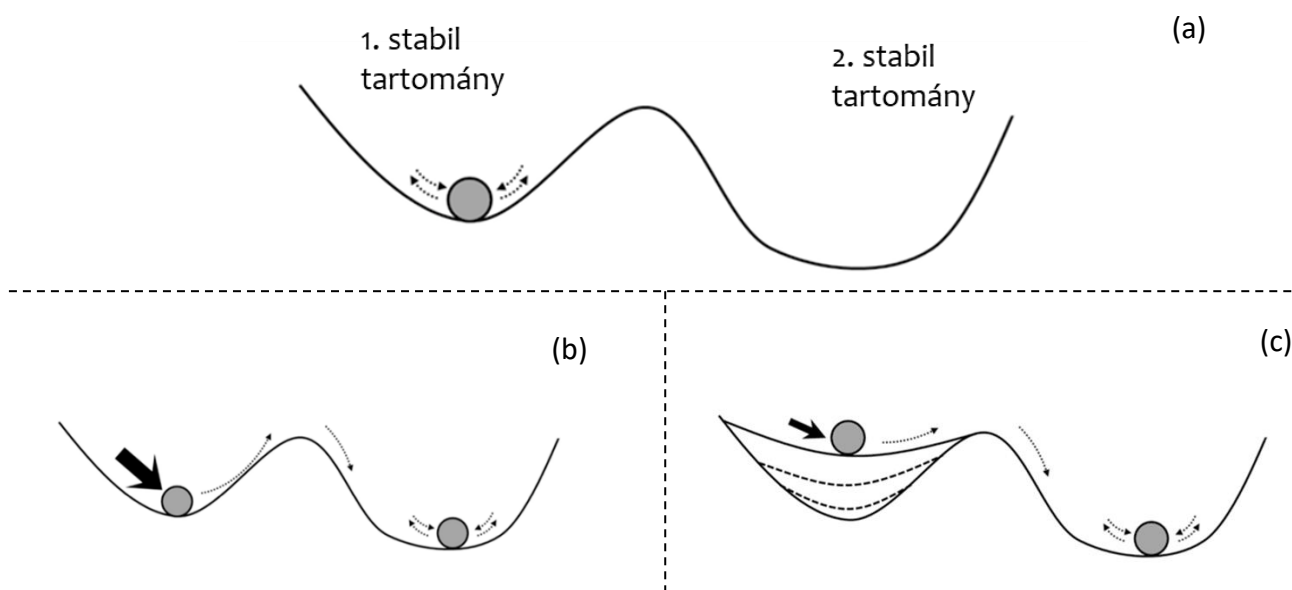
A fejezet elején szereplő köznapi példákkal (erdő, város és ember) feltett egyszerű kérdések („Mennyi változás érhet egy erdőt, hogy az erdő maradjon?”) tulajdonképpen ezen rendszerek rugalmasságára, zavarástűrő képességére vonatkoztak. A következő pontban bemutatott golyós példa pedig szintén a reziliencia egyik értelmezése, hisz ott a rugalmasság annak a mértéke, hogy mekkora hatás szükséges a golyó egyik völgyből a másikba való elmozdításához.

### 2.3.6 Golyós példa – a regime shift és a reziliencia szemléltetése

A regime shift, mint a komplex rendszerek egy sajátos viselkedési formája nagyon szemléletesen bemutatható a 2-9. ábrával. Ezen egy elképzelt völgyes-dombos terep és az azon mozgó golyó látható. A terep, mint a lehetséges rendszerállapotok összessége és a golyó, mint a rendszer pillanatnyi helyzete együttesen felfogható egy komplex rendszer állapotát leíró analógiaként. A golyót egy lejtőről (*labilis helyzetből*) elindítva az értelemszerűen valamelyik völgy (*stabil helyzet*) legalsó pontjára fog legurulni. A golyó kisebb lökések (zavarások, a környezet irányából érkező külső hatások) miatt kimozdulhat a helyi minimum pontról, de többnyire vissza is gurul oda. Ha kellően nagy lökés éri a golyót, akkor viszont elhagyja a korábbi stabil helyzetét és egy másik köztes (*metastabil*) vagy egyensúlyi (*stabil*) pontba, a másik völgybe fog eljutni. A köztes, metastabil helyzetek a völgyek közti dombtetőkként, nyeregpontokként is felfoghatók, ahol a golyó mozgásának iránya bizonytalan kimenetelű, a korábbi mozgásának és a pillanatnyi feltételeknek a függvénye. Ezeket a helyzeteket *tipping point*-nak, *átbillenési pont*nak, esetleg *megfordítási pont*nak nevezhetjük. Ezek az utolsó olyan állapotok, ahonnan a rendszer még viszonylag kis hatással visszajuttatható a korábbi stabil helyzetbe. A golyós példa és a komplex rendszerek, azok regime shift-jei közti analógia részletes kibontását mutatja be a 2-3. táblázat, amiben a jobb érthetőség miatt egy konkrét példa, egy tó vízminőségi/trofitási állapota is szerepel.

Az analógia egy lehetséges továbbgondolását jelenti az, ha a dombos-völgyes terepet nem kétdimenziósként képzeljük el, hanem három-, négy, ... n-dimenziósként. Ekkor egy-egy koordináta irány egy-egy környezeti hatótényezőként, illetve rendszerjellemzőként fogható fel. Ezekből értelemszerűen nem csak egy, hanem kettő, három, ... n-1 darab

van<sup>22</sup>. Így a golyó valójában egy n-dimenziós terepen mozog, amin egy-egy völgy a különböző irányokban eltérő alakú. A valóságban ez annak a sajátosságának feleltethető meg, hogy a rendszerek az egyes belső tulajdonságaikra és külső körülményekre eltérően érzékenyek, azoknak különböző mértékű megváltozását<sup>23</sup> viselik el regime shift nélkül.



2-9. ábra – A regime shift-et és a rezilianciát szemléltető golyós példa. Képek forrása: <https://www.regimeshifts.org/>

2-3. táblázat – A golyós példa, mint a komplex rendszerekben megfigyelhető regime shift analógiája

Golyós példa	Komplex rendszer regime shift-je	Órai példa
Terep és golyó együtt	Maga a komplex rendszer	Egy tó és annak trofitási állapota
Golyó helyzete	Rendszer pillanatnyi állapota	A trofitás aktuális szintje (pl. a tó oligotróf, a korláatosan elérhető tápanyagok miatt nincsenek kedvezőtlen algacsúcsok)
Völgyek	Stabil egyensúlyi helyzetek	(i) Oligotróf állapot (kedvező vízminőség, alacsony alga biomassa, sok makrovegetáció, kevés foszfor az üledékben) (ii) Eutróf állapot (kedvezőtlen vízminőség, magas alga biomassa, csökkenő makrovegetáció, az üledék foszfortartalma magas)
Átgurulás egyik völgyből a másikba	regime shift, egyensúlyi állapot-váltás	Külső vagy belső forrásból érkező tápanyagterhelés hatására jelentősen megnövekszik az algák biomassa produkciója, a tó oligotrófból eutróffá válik
Két völgy közti domb	Átbillenési pont, Tipping point	Az a kritikus tápanyag koncentráció, ami még limitáló hatással van az algapopuláció szaporodására

<sup>22</sup> A Table 3-ban szereplő vízminőségi példában a kiemelt környezeti hatótényező a tápanyagok, elsősorban a foszforformák koncentrációja. De ilyen hatótényező lehet a vízhőmérséklet, a beérkező fényintenzitás, a tápláléklánc magasabb szintjeinek összetétele és mennyisége, az esetleges toxikus vegyületek, stb.

<sup>23</sup> Az emberi szervezet nagyságrendileg eltérő ideig tolerálja pl. az élelem, a folyadék, illetve az oxigén hiányát.

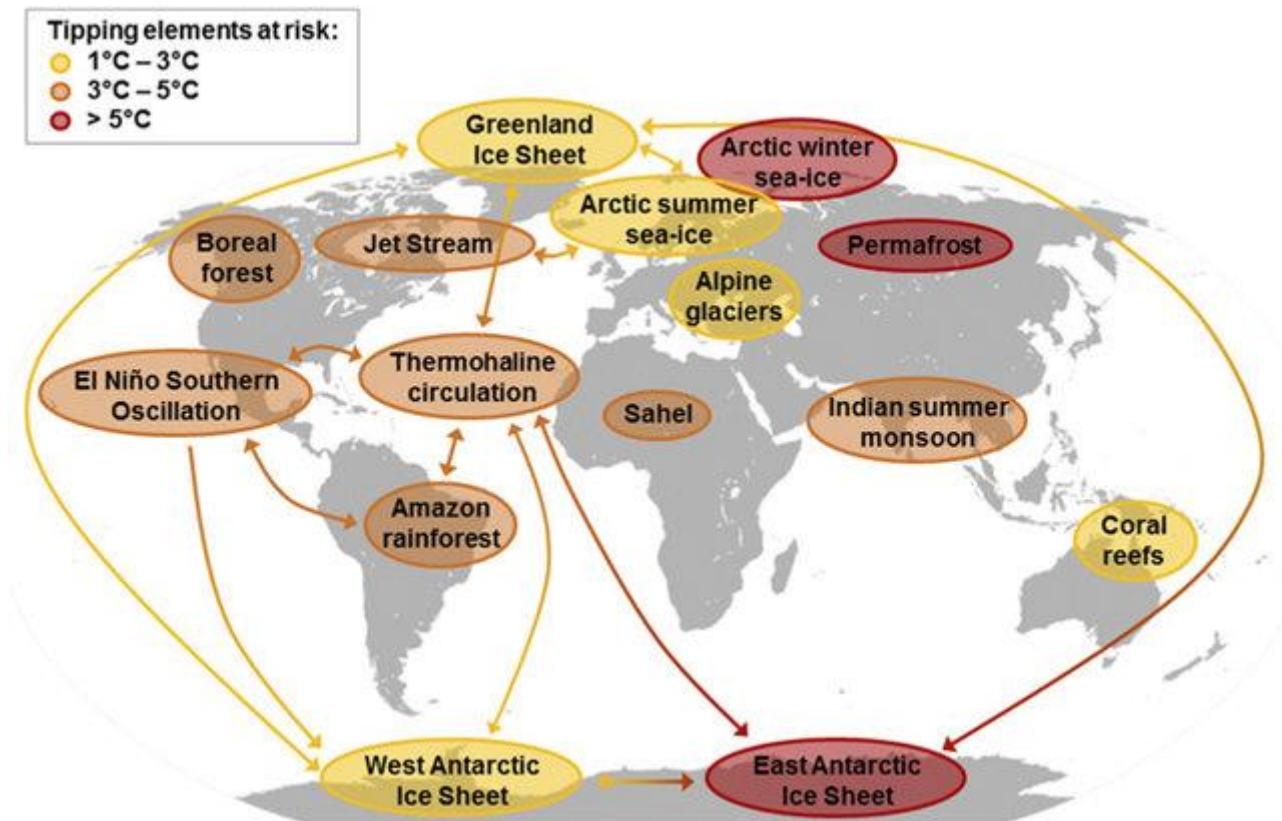


Völgyek mélysége	A rendszer rezilienciája, rugalmassága, a negatív visszacsatolások	„Mély a völgy”, reziliens a rendszer pl. attól, ha számottevő makrovegetáció van a tóban. A parti nádas és a hínár az árnyékoló hatása miatt korlátozza az algák szaporodását, mérsékli az üledék felkeveredését, így csökkenti az onnan származó belső tápanyag terhelést.
Lökés a golyón	Külső hatás a környezet irányából	Külső tápanyagterhelés (pl. szennyvíz-, vagy mezőgazdasági eredetű).
Feltöltődő völgy	Belső átalakulási folyamat, ami csökkenti a stabilizáló negatív visszacsatolásokat	A makrovegetáció eltűnése (pl. nádirtás) csökkenti a tó rezilienciáját, mivel az árnyékoló és üledék stabilizáló hatás elveszik.

A golyós példa nem csak a regime shift jelenségét szemlélteti érzékletesen, hanem több más rendszerjellemzőt is. Így pl. az időbeliséget, tehetetlenséget, a rugalmasságot, továbbá általában véve a rendszer tudatos befolyásolására rendelkezésre álló mozgásteret is. Ennek az megfordítási pontok környezetében van igazán nagy jelentősége, hisz a rendszer pillanatnyi állapota nagyon hasonló lehet egy billenési pont közelében, de annak két oldalán, viszont a hosszabb távú spontán változás két akár lényegesen eltérő helyzethez (völgybe) vezethet. Amikor a spontán változás egyértelművé válik, akkor viszont ez a folyamat öngerjesztővé válik és csak nehezen, vagy nem megfordítható (a golyó gyorsulva gurul lefelé egy másik völgybe, a mozgását egyre nehezebb befolyásolni).

### 2.3.7 A jelenlegi éghajlatváltozás és a regime shift

Fontos látni, hogy a *regime shift-tipping point-reziliencia* témakör a környezettudományok terén számos ponton előfordul, a legkülönbözőbb ökológiai és környezeti rendszerek esetén találhatunk rá példákat (lásd. fentebb is, illetve [bővebben](#)). A témakör alaposabb megértéséhez ugyanakkor talán az egyik legjobb és legfontosabb környezettudományi példa az éghajlat viselkedése. Ez emberi léptékkal nézve egy nagy tehetetlenségű, időben lassan reagáló bonyolult sztochasztikus rendszer. Az éghajlat változásait nehéz észlelni, mivel a rendszer pillanatnyi állapota és annak trendszerű alakulása csak célzott, hosszútávú megfigyelésekkel és összetett elemzésekkel érhető tetten. Az éghajlatváltozással kapcsolatos kutatások és vita középpontjában évtizedeken keresztül a változás ténye és annak okai álltak. Korunk egyik nagy kihívását/problémáját az jelenti, hogy amikor (elmúlt évtized) már széleskörűen egyértelmű és többnyire elfogadott lett a változás ténye, akkorra a folyamat már veszélyesen megközelítette az átbillenési pontokat, vagy túl is jutott néhányon azok közül. Ez azért különösen kedvezőtlen, mert az egyes éghajlati átbillenési jelenségek egymással is kapcsolatban állnak, ha az egyik “átbillenés” bekövetkezik, az egyfajta dominóhatásként közelebb hozhatja a többi pont meghaladását is (2-10. ábra).

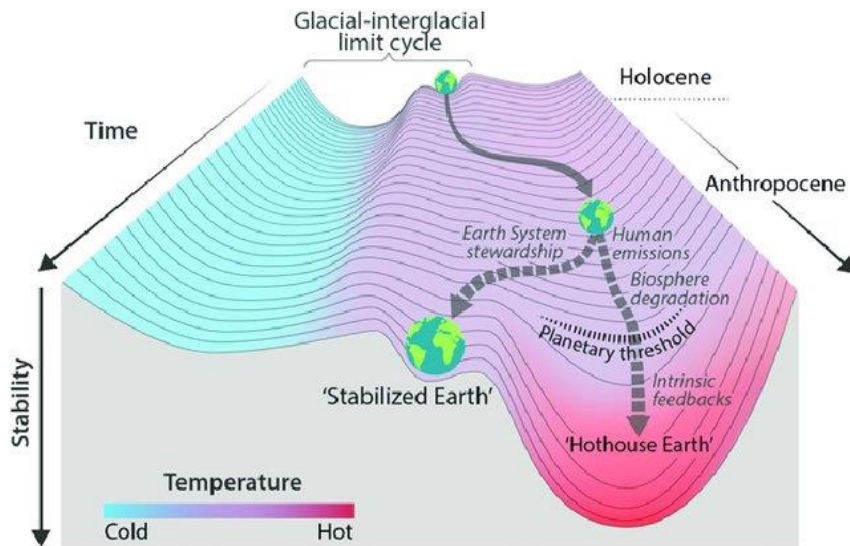


2-10. ábra – Az éghajlati rendszer lehetséges átbillenési pontjai és az azok közti kapcsolatok. A színek az ipari forradalomhoz képesti globális átlaghőmérséklet növekményt, mint kiváltó okot jelölik. (Greenland Ice sheet – Északi sarki jégtakaró; Arctic winter sea-ice – sarkvidéki tengeri jég (tél); Arctic summer sea-ice - sarkvidéki tengeri jég (nyár); Boreal forest – tajga; Jet stream – futóáramlat; Permafrost – permafroszt; Thermohaline circulation – meleg és hideg tengeráramlatok; Alpine glaciers – alpi gleccserek; El Nino Southern oscillation – El Nino jelenség; Sahel – Száhel övezet; Indian summer monsoon – indiai monszun; Coral reefs – korallzátonyok; West/East Antarctica ice sheet – Nyugat/Kelet-Antarktisz-i jégmező) Kép forrása: Steffen et al. (2018)

Az IPCC 2019-es Különjelentése az alábbiak szerint definiálja az éghajlati rendszer esetén a tipping point-okat:

*A level of change in system properties beyond which a system reorganises, often in a non-linear manner, and does not return to the initial state even if the drivers of the change are abated. For the climate system, the term refers to a critical threshold at which global or regional climate changes from one stable state to another stable state. Tipping points are also used when referring to impact: the term can imply that an impact tipping point is (about to be) reached in a natural or human system. (IPCC, 2019)*

Jelen ismereteink szerint az éghajlat az emberiség számára egy sokkal kedvezőtlenebb stabil helyzet irányába mozog (Steffen et al., 2018), ahonnan a rendszer nagy tehetetlensége miatt csak nagyon nehezen lenne visszafordítható (IPCC, 2021). Steffen és munkatársai (2018) az éghajlati rendszer ezen küszöbön álló, Antropocénban bekövetkező átbillenési folyamatát és a lehetséges jövőbeli pályáit a golyós példa segítségével jelenítették meg. A 2-11. ábra arra utal, hogy az eddigi kibocsátási tendenciák folytatódása esetén a Föld éghajlata az ún. „melegház” állapotba fog kerülni és ott hosszú távon (évezredek időléptéken) meg is reked. Ezt a földtörténet során már többször kialakult éghajlatot a Holocénben tapasztalható képest >5 C fokkal magasabb átlaghőmérséklet jellemzi, ami a jelenlegi bioszféra és egyben az kortárs emberi civilizáció végét is jelenti.



2-11. ábra – Golyós példa és a a földi éghajlat: a Föld éghajlatának múltbeli pályája a Holocénban és két lehetséges útja az Antropocénban. Kép forrása: Steffen et al. (2018)

## 2.4 A Meadows házaspár üzenete rendszerdinamikáról, fenntarthatóságról

### 2.4.1 A rendszerelemek hatékonysága

A Meadows házaspár évtizedek óta nemzetközileg elismert szaktekintélyei a rendszerdinamika tudományának. Meghatározó szerepük volt a **World 3** modell kidolgozásában és az ezzel végzett kutatásokat összegző, „A növekedés határai” című fenntarthatósági alapmű megírásában (lásd. Meadows et al., 1972, és a 2.4.3 alfejezet). Donella Meadows nevéhez köthető egy másik igen jelentős, komplex rendszerekkel kapcsolatos gondolat: Leverage points (durva magyaráttal „fogáspontok”) (Meadows, 1999).

A rendszerelemek külső megváltoztatása az egész rendszer viselkedését is módosítja. Vagyis a komplex rendszereket öntudatlanul vagy célzottan változásra kényszeríthetjük azzal, hogy bizonyos elemekre hatást gyakorlunk. Azonban „ugyanakkora” (ugyanolyan idő-, erőforrás ráfordítású) beavatkozás, erőfeszítés eltérő mértékben változtatja meg a rendszerviselkedést attól függően, hogy az melyik rendszerelemet éri. Meadows saját szakmai tapasztalata alapján egy olyan általános hatékonysági sorrendet állított fel, ami ez alapján rangsorolja a rendszerdinamikai elemeket. A sorrend az általában legkevésbé hatékonytól a leghatékonyabbig:

- Paraméterek
- Puffer képesség
- Változók és fluxusok kapcsolatrendszere
- Időbeliség, késleltetések
- Csillapító és gerjesztő visszacatolások
- Információterjedés
- A rendszerműködés szabályai
- Önszerveződés
- A rendszer célja
- A rendszertervezés paradigmája
- Hajlandóság a paradigmaváltásra

### 2.4.2 A fogáspontok és a közlekedés

A fogáspontok koncepciót a korábban már szereplő város példáján könnyen lehet szemléltetni. Egy nagyváros közlekedési problémáit javíthatjuk a közlekedési lámpák szinkronizálásával (*paraméterek*) vagy új parkolók, sávok, lámpás kereszteződések/körforgalmak kialakításával (*változók, fluxusok, puffer képesség*), az üzemzavarok, meghibásodások, balesetek esetén a forgalomtechnikai, rendőri, műszaki beavatkozások gyorsításával (*időbeliség*). Ezek az elsődleges mérnöki eszközök gyakran állnak a rendszeroptimalizáció középpontjában, sokszor a

problémamegoldás csak ezekre terjed ki. Ugyanakkor egy határon túl csak korlátozott mozgásterű és gyakran viszonylag költséges részmegoldásoknak tekinthetőek, hiszen erősen függenek külső feltételektől (pl. mekkora anyagi keret, hány lámpás kereszteződés, fizikailag mennyi beépíthető tér áll rendelkezésre). Nagy általánosságban kedvezőbb/alternatív beavatkozási lehetőséget jelent a *visszacsatolások* erősítése (pl. P+R parkolók és tömegközlekedés terjesztése, ingyenessé tétele, dugódíj bevezetése, szmogrendelet szigorítása), az *információ terjedés* elősegítése (valós idejű forgalmi adatok, hírek online és közúti felületeket), illetve a *rendszerműködés szabályainak* módosítása (Kresz-módosítás, pl. buszsáv használatra jogosultak körének változtatása). A befektetett munkához mérten igazán nagyarányú változást a *rendszer céljának* felülvizsgálatával és a **tervezési paradigma újragondolásával** érhetünk el. Vagyis ha hajlandóak vagyunk a megváltozó feltételek és igények függvényében rendszeresen újradefiniálni a közlekedési rendszer célját. Újragondolni, azt, hogy pl. (i) a személy- és teherszállítás, (ii) a robbanómotor, az elektromos és az emberi hajtás, illetve (iii) az egyéni és közösségi közlekedési formák milyen arányaira akarjuk szabni a közlekedési rendszert. És ha hajlandóak vagyunk megváltoztatni azt a szemléletmódot, amivel a rendszert és annak célját tervezzük. Pl. célként nem az áthaladó egységjárművek, hanem a megtett utaskilométerek számának maximalizálását tűzzük ki. Végül akár átértékeljük a vizsgált rendszer (közlekedés) és a befoglaló külső környezete (a város) közti kapcsolatot: elfogadjuk azt, hogy nem a várost (levegőminőséget, zajterhelést, fenntarthatóságot, élhetőséget, stb.) kell a közlekedésnek alárendelni, hanem épp a közlekedést kellene a városhoz (levegőminőséghez, zajterheléshez, fenntarthatósághoz, élhetőséghez, stb.) igazítani<sup>24</sup>.

A felvázolt sorrend szerint az egységnyi befektetett munkára/erőfeszítésre/időráfordításra eső hatékonyság a gyakorlatitól a elméleti megoldások irányába haladva növekszik. Ez nagyon fontos tanulság, viszont egyben félreértésre is alapot adhat. Ugyanis a fogáspontok elmélet hatékonysági, de nem fontossági sorrendről szól! Fontos megérteni, hogy a célok felülvizsgálata, a paradigmaváltás önmagában nem elégséges feltétele a rendszer megváltoztatásának, javításának. Az új alapelveket és célokat át is kell ültetni a gyakorlatba: épp a kevésbé hatékony fogáspontokon, aprólékos mérnöki tervezésen és kivitelezésen keresztül.

*A közlekedési példánál maradvá: a közúti jelzőlámpák harmonizációja adott cél esetén (pl. áthaladó egységjárművek számának maximalizálása zöldhullámmal a legforgalmasabb útvonalakon) korlátos beavatkozási lehetőséget jelent, az optimalizációba fektetett munka egyre kevésbé térül meg. A cél újragondolása (pl. az egységjármű helyett a megtett utaskilométer vagy a kisebb károsanyag kibocsátás és a jobb levegőminőség előnyben részesítése) után viszont gyors és nagyarányú változás érhető el azzal, ha a lámpaváltásokat a személygépkocsik helyett a tömegközlekedési eszközök haladási dinamikájához igazítjuk.*

Szintén fontos látni, hogy Meadows egy általános érvényű sorrendet vázolt, amittől egyedi esetekben lehet eltérés. Nem feltétlenül szükséges a rendszert alapjaiban (célok, paradigma szintjén) átalakítani. A rendszerműködés következetes értékelése teszi lehetővé, hogy adott probléma esetén kiválaszthassuk a beavatkozás megfelelő helyét, vagyis a leghatékonyabb fogáspontot. Ehhez adott esetben akár elegendő lehet a hatékonysági sorrend legalján szereplő elemeken változtatni.

*A dugók vagy a közlekedési rendszer más hibáinak megszüntetése sok esetben lehetséges egyszerű fogalomtechnikai megoldásokkal, pl. a problémás keresztezésekbe érkező jármű terhelés időbeli kiegyenlítésével. A települések határában gondot (zajterhelést, balesetveszélyt) okozhat a külterületről érkező járművek nagy sebessége, amelyek a lakott területre lépve nem lassítanak azonnal az ott megengedett értékre. Ezt elvben a Kresz vagy az a rendőri ellenőrzés (rendszerműködés szabályai) szigorításával is lehetne orvosolni. Azonban az útpálya kismértékű átalakítása (járdasziget, körforgalom kiépítése) lényegesen hatékonyabb megoldást jelent.*

#### 2.4.3 A növekedés határai – a World3 modell eredményei

A 2. világháborút követő rohamos gazdasági növekedés hívta életre 1968-ban a Római Klub nevű nemzetközi magánszervezetet. A klub tagjai (jellemzően kutatók, gondolkodók) az emberiség előtt álló kihívásokra keresték-keresik a válaszokat. Ennek részeként kezdeményezték többek között azt az úttörő kutatást, amit a Meadows házaspár vezetett és aminek eredményeit „A növekedés határai” (Limits to Growth, röviden LtG, Meadows et al., 1972) című

<sup>24</sup> Tudva azt, hogy a város által támasztott számos igény, cél egyike épp maga a közlekedés.

könyv foglalja össze. A kutatás mérföldkőnek tekinthető a fenntarthatósággal foglalkozó tudományok körében, mert elsőként mutatott rá szélesebb körben és tudományosan megalapozott módszertan segítségével a korlátlan, exponenciális jellegű gazdasági növekedés abszurditására és hosszú távú veszélyeire. Röviden: jelen civilizációnk fenntarthatatlanságára. Az elemzés alapvetése (hipotézise) az volt, hogy a globális civilizációs folyamatok és az erőforráshasználat fő mutatói modellezhetőek rendszerdinamikai alapon. Az ambíciózus elemzés lényege szó szerint egy „világmodell” megalkotása volt, ami a társadalom múltbeli viselkedése alapján képes annak a jövőbeli folyamatait is becsülni különböző lehetséges forgatókönyvek mentén. A LtG célja tehát nem egy konkrét előrejelzés elkészítése volt, hanem az eltérő demográfiai és erőforráshasználati stratégiák hatásainak trendszerű kijelölése, a civilizáció és a környezeti erőforrások viselkedési tendenciájának bemutatása. A kutatás az MIT<sup>25</sup>-n zajlott, a hetvenes évek viszonyaihoz mérten úttörő módszerekkel (egy sokváltozós komplex egyenletrendszer, modell dinamikus, kvantitatív szimulációja). A World3 az egyik első komoly rendszerdinamikai alkalmazás volt.

A figyelembe vett legfőbb társadalmi és környezeti mutatók:

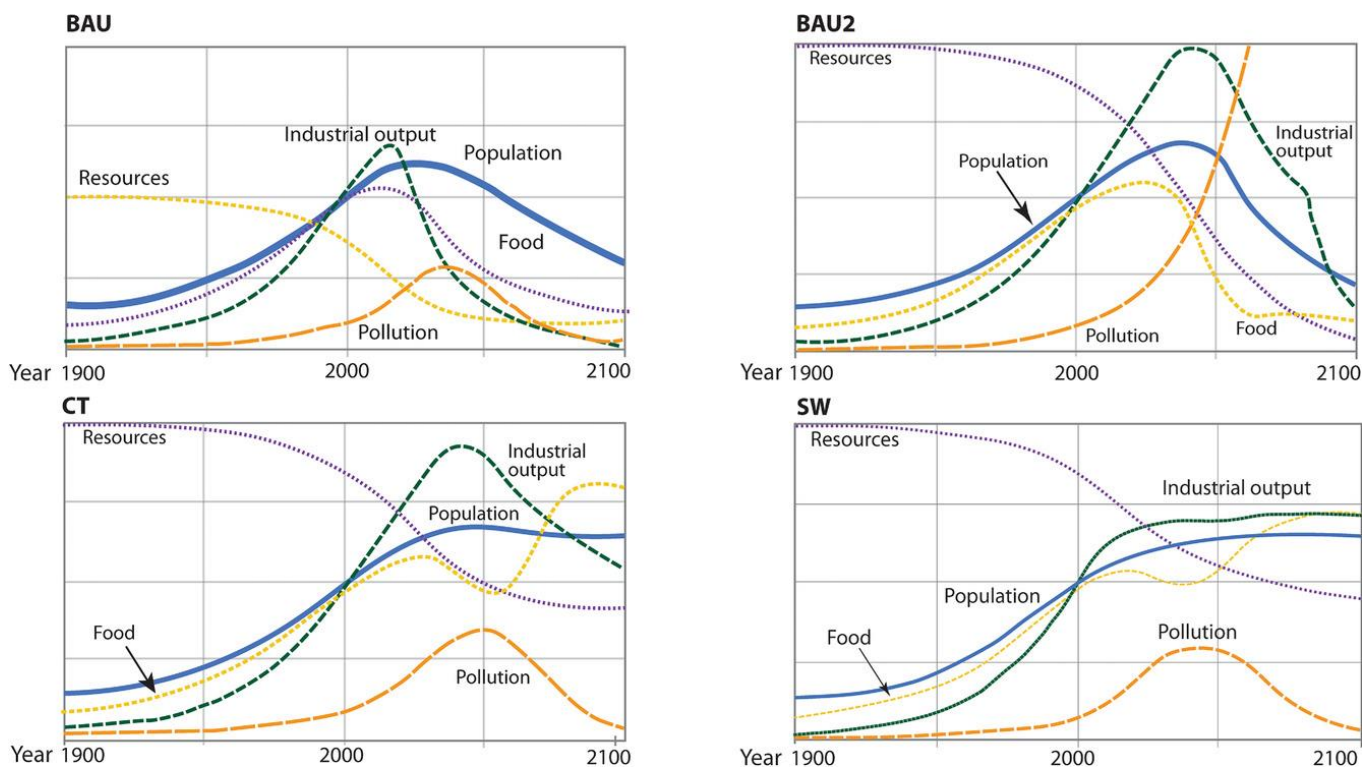
- Globális népesség és demográfiai jellemzők (korcsoportok, születési ráta, várható élettartam, stb.)
- Mezőgazdasági termelés (egy főre jutó élelmiszer, talajtermékenység, agrár eredetű szennyezés, stb.)
- A nem-megújuló erőforrások készletei (fossziliis energiahordozó, fémek, stb.)
- Ipari termelés és szolgáltatások (egy főre jutó fogyasztási javak, elérhető szolgáltatások, stb.)
- Perzisztens szennyezés (szén-dioxid légköri mennyisége)

A model eredeti és később felülvizsgált változataival a 1900-2100 közti kétszáz évet szimulálták. Az 1900-1970, illetve egy későbbi változatban a 1970-2012 időszak valós adatai a modell kalibrálására szolgáltak. Ennek során a szerzők igyekeztek úgy beállítani a különböző modellparamétereket, hogy a számítási eredmények (pl. a népesség vagy az egy főre jutó élelem, alakulása) a lehető legjobban közelítsék a valóságban megfigyelteket. Az 1970-2100 (2013-2100) időszakra pedig a modellt prediktív jelleggel használták, amivel több jövőre vonatkozó forgatókönyvet (szcenáriót) vizsgáltak. Ezek a forgatókönyvek a számítás kezdetén rendelkezésre álló nem-megújuló erőforrások mennyiségében, a technológiai fejlődés feltételezett sebességében, illetve a társadalom lehetséges fogyasztási és demográfiai válaszaiban különböztek. A négy leggyakrabban említett scenárió (2-12. ábra):

- „Szokásos ügymenet” (Business as Usual, BAU) – Ez az 1900-1970 közti civilizációs viselkedési minták kivetítése a jövőre vonatkozóan, annak feltételezése, hogy az emberiség nem változtat múltbeli szokásain és a gazdaság a korlátlan növekedés lehetőségét feltételezve exponenciális jelleggel bővül.
- Szokásos ügymenet dupla kezdeti nyersanyag készlettel (BAU2) – A „szokásos ügymenet” hozzáállás vizsgálata egy látszólag kedvezőbb induló feltételezéssel: a rendelkezésre álló nyersanyagok mennyisége duplája a korban feltételezett készleteknek (ezzel vehető figyelembe pl. új lelőhelyek felfedezése)
- Technooptimista fejlődés (Comprehensive Technology, CT) – Ez a forgatókönyv a BAU2-re épít, de a technológiai fejlődés, az erőforrások hatékonyabb használata nagy hangsúlyt kap (a termelési technológia fejlődése miatt korábban gazdaságosan nem kitermelhető készletek bevonása, kisebb termelési veszteségek)
- Stabilizált fejlődés (Stabilized World, SW) – egy technológiai, fogyasztási és demográfiai szempontból is alkalmazkodó, önkorlátozó társadalom feltételezése.

---

<sup>25</sup> Massachusetts Institute of Technology, a világ egyik vezető műszaki felsőoktatási-kutatási intézménye



2-12. ábra – A „Növekedés határai” kutatás World3 modellel végzett számítási eredményei négy forgatókönyvre. Resources: erőforrások; Industrial output: ipari termelés; Population: népesség; Food: élelem; Pollution: szennyezés. Kép forrása: Herrington (2020).

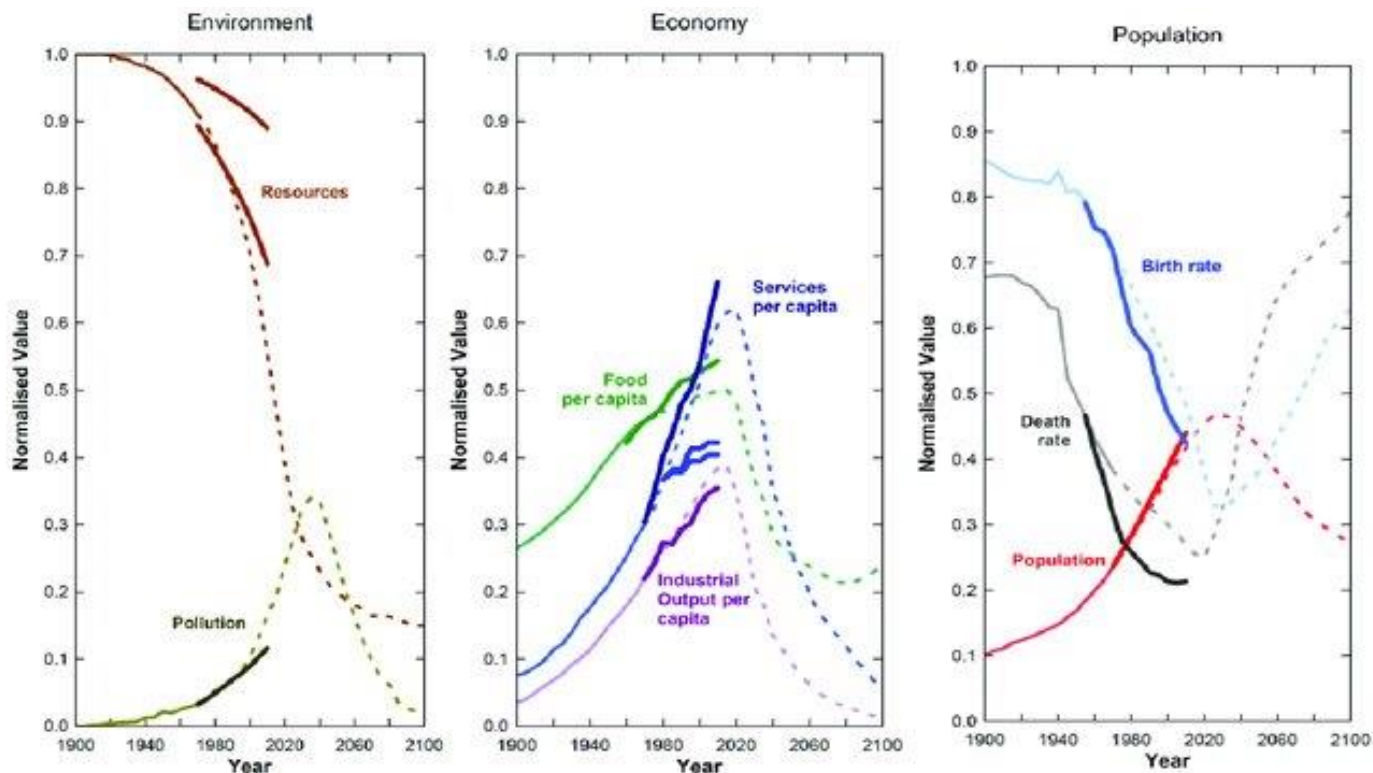
A forgatókönyvek közti különbségek 2020 környékén kezdenek megmutatkozni, majd azt követően azok többsége a 2030-2050 közötti időszakra jelentős gazdasági és társadalmi válságot, illetve összeomlást vetít előre. Ekkor a népesség és különösen az egy főre jutó fogyasztási javak, szolgáltatások és élelmiszer mennyisége – gyakorlatilag a modern felfogásban értelmezett életszínvonal – csökken drasztikusan. A BAU és BAU2 esetében egyértelműen összeomlásról beszélhetünk, aminek kiváltó oka előbbinél az erőforrások kimerülése még az előtt, hogy erre a társadalom és gazdaság reagálni tudna; utóbbinál pedig a szennyezés mértéke okoz katasztrófát (~éghajlatváltozás). A technooptimista CT forgatókönyv csak mérsékelten jelent kedvezőbb kimenetet: ugyan a népességszám kiegyenlítődsét vetíti előre, de mellette szintén jelentős életminőség romlással számol. Egyedül a stabilizált forgatókönyvben feltételezett erőforráshasználati és demográfiai pálya mellett marad a korábbiakban elért színvonalon az életminőség.

A LtG megjelenését követően nagy port kavart, és azóta is komoly utóélete van. A szerzők a World3 modellt többször felülvizsgálták, újrakalibrálták és újrapublikálták. A modellelemzéseket számos negatív és pozitív kritika érte és éri napjainkig. A negatív kritikák lényege felsorolásszerűen: a World3 túl egyszerű, illetve túl bonyolult leképezése a valóságnak, a gazdasággal és a technológiai fejlődéssel kapcsolatban alkalmazott feltételezések hibásak, a számítások bemeneti adatai rossz minőségűek (pl. alulbecsült nyersanyag készlet), a különböző nyersanyagok túlságosan egyöntetűen jelentek meg, stb.

A pozitív kritikák a World3 úttörő rendszerdinamikai megközelítését és prediktív erejét méltatják. Ennek alapját több esetben a 1970 óta megfigyelt adatokkal való összevetés adja. Ezek közül kiemelkedő Turner munkája, aki „Is global collapse imminent?” („Valóban elkerülhetetlen a globális összeomlás?”) című 2014-es elemzésében rámutatott, hogy 1970-2010 között a BAU forgatókönyvben modellezett változók jó egyezést adnak a valóságban megfigyelt folyamatokkal (2-13. ábra). Következtetése lesújtó, mert lényegében azt állítja, hogy bár egyértelmű figyelmeztetést kapott, az emberiség az elmúlt 50 évben semmilyen érdemi változtatást nem tett az előre jelzett összeomlás elkerülésére.

Ezt némileg árnyalja Branderhorst (2020) és Herrington (2020) tanulmánya. Mindkettőjük összevetette a World3 által szimulált és valóságos trendeket. Ez alapján az egyezés a BAU2, illetve bizonyos változókra a CT forgatókönyvek esetén erősebb, mint a BAU scenárióra. Vagyis koránt sem egyértelmű, hogy a folyamatok a legrosszabb forgatókönyv jellegzetességeit követik, az elmúlt évtizedekben a hatékonyságnövelés hatása már felfedezhető. Az értékelést nehezíti a tény, hogy a forgatókönyvek közti különbség a 2020-as évek után mutatkozik meg, így egyelőre nincs

egyértelmű tapasztalati bizonyíték a kérdés eldöntésére. Feltételezve az összeomlás felé tartó civilizációt, az igazi visszasságot az jelenti, hogy mire elegendő adat áll majd rendelkezésre a modell helyességének belátására, akkor már késő lesz cselekedni.



2-13. ábra – A „Növekedés határai” BAU („szokásos ügymenet”) forgatókönyv eredményeinek (szaggatott vonalak) összevetése a 1970-2010 közötti valós adatokkal (folytonos vonalak). Balra környezeti változók: erőforrások (Resources) és szennyezés (Pollution); Középen egy főre vetített (per capita) gazdasági és társadalmi mutatók: élelem (Food) demográfiai változók, ipari termelés (Industrial output) és szolgáltatások (Services); Jobbra demográfiai mutatók: népességszám (Population), születési ráta (Birth rate), halálzási ráta (Death rate).

A World3 modell bárki számára könnyen futtatható változata elérhető az [insightmaker](https://insightmaker.org/)-en.

## 2.5 Planetary boundaries – a Föld-rendszer korlátai

A szükséges rendszerdinamikai ismeretek birtokában térjünk vissza a fejezet elején feltett nagyon fontos kérdésre:

***Mennyi változást (emberi beavatozást) bír el a Föld, hogy „ugyanaz a Föld” maradjon?***

Erre a kérdésre az Antropocén-javaslat adja meg a választ, aminek nagyon leegyszerűsítve a lényege az, hogy ma már nem „ugyanaz a Föld”, mint ami az elmúlt ~14000 évben volt!

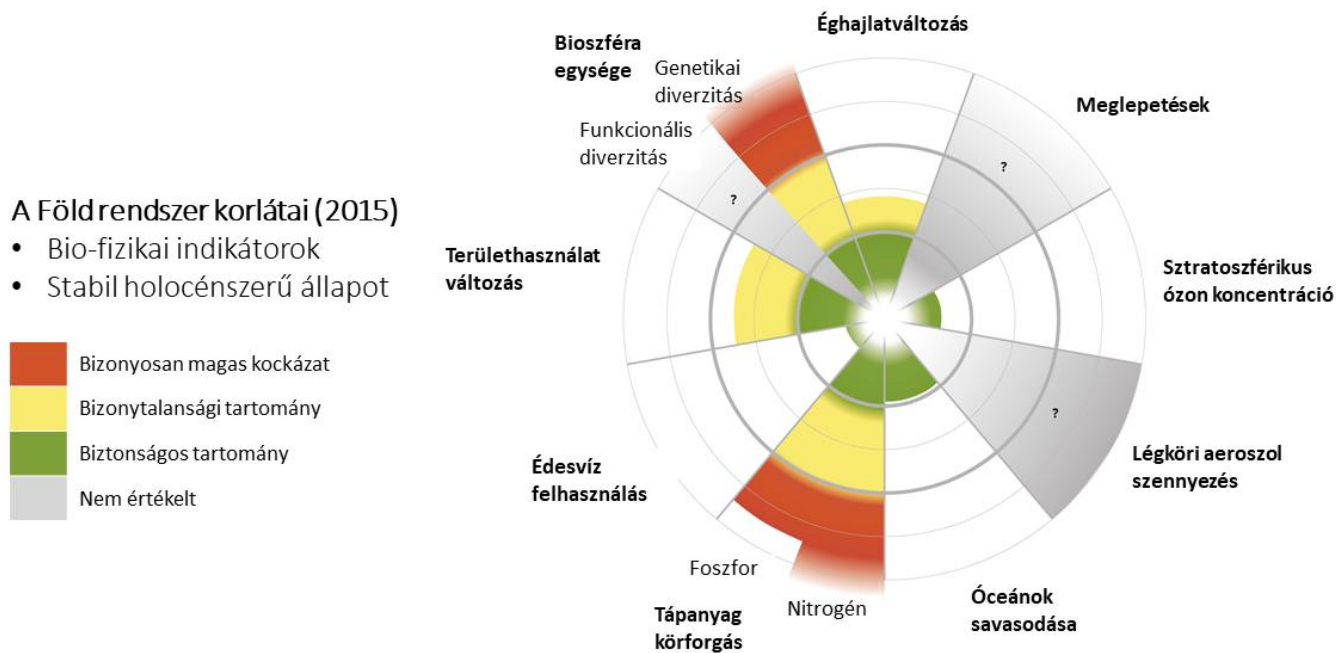
Ugyanis (i) a Föld egy olyan komplex rendszer, ami alapvetően dinamikus egyensúlyra törekszik, (ii) az emberi tevékenység eredményeként épp elhagyja a legutóbbi egyensúlyi állapotot (a Holocént), viszont (iii) csak nagyon korlátozottan jósolható meg az, hogy milyen lesz az új egyensúly, de vélhetően lényegesen rosszabb a mostaninál. Ezért az emberiség érdeke, hogy az átalakulás folyamatát lassítsa. Aminek megvalósítása egy olyan bonyolult egymásba ágyazott rendszerek rendszerénél, mint a földi élet, nem nyilvánvaló.

Ebben nyújt segítséget a Planetary boundaries („Föld-rendszer korlátai”) keretrendszer. Ennek lényege, hogy könnyen értelmezhető határértékeket ad meg a Föld legjelentősebb alrendszereire vonatkozóan. A határértékek az egyes alrendszerek jól mérhető és meghatározó bio-fizikai változóira vonatkoznak (globális vagy regionális értelemben). Az elővigyázatosság és fokozatosság elvét követve két határérték kijelölése történt meg minden alrendszerre: 1. a biztonságos tartomány határa és 2. a bizonytalansági tartomány határa. Utóbbi testesíti meg azt az ismeretünket, hogy a regime shift bekövetkezése nehezen előre jelezhető. Ezért a 2. határérték túllépése esetén az alrendszer átbillenésének esélye már olyan nagy, ami elfogadhatatlan magas kockázattal jár.

A kilenc meghatározó földi alrendszert és a hozzájuk rendelt legfontosabb változókat a 2-4. táblázat foglalja össze. A 2015-ös helyzetképet pedig a 2-14. ábra szemlélteti (két alrendszer esetében nem történt még átfogó értékelés). Ebből kitűnik, hogy az ökológiai rendszer és a tápanyag körforgás esetén már olyan mértékű emberi beavatkozás történt, amik visszafordíthatatlan és hosszú távú változást idéznek elő. A helyzetkép értelmezésénél szem előtt kell tartani, hogy az átbillenéseknek alrendszerenként változó súlyú következményei lehetnek. Emellett az alrendszerek egymással kölcsönhatásban állnak. Például az éghajlatváltozás felgyorsítja a fajpusztulást, a területhasználat váltás és az édesvíz használatot. De a területhasználat is befolyásolja az éghajlatváltozás sebességét. Tehát a Planetary boundaries nem egy fontossági sorrendet ad meg, hanem a földi rendszer átalakulásának előrehaladottságáról, a lehetséges emberi mozgástérről ad képet és rámutat a kritikusan megváltozott alrendszerekre.

2-4. táblázat – a Planetary boundaries keretrendszerben figyelembe vett földi alrendszerek és azok jellemzésére használt bio-fizikai változók.

Földi alrendszer	Biofizikai kontroll változók
Éghajlatváltozás	Széndioxid légköri koncentrációja [ppm]
Meglepetések	<i>kidolgozás alatt</i>
Sztratoszférikus ózon koncentráció	Sztratoszférikus ózon koncentráció [DU]
Légköri aeroszol szennyezés	Légköri szállópor koncentráció [ppm]
Óceánok savasodása	Karbonát ion koncentráció [ ]
Tápanyag körforgás (N, P)	óceánok emberi eredetű foszforterhelése [%], emberi eredetű légköri N <sub>2</sub> megkötés [Mt/év]
Édesvíz felhasználás	globális édesvíz felhasználás [km <sup>3</sup> /év]
Területhasználat változás	Szántóvá alakított természetes élőhelyek aránya [%]
Bioszféra egységes	Fajpusztulás sebességes [kipusztult faj/1mió faj/év]



2-14. ábra – A Föld rendszer korlátai, a Planetary boundaries koncepció Steffen et al. nyomán. Kép forrása: <https://www.eea.europa.eu/soer-2020/soer-2020-visuals/status-of-the-nine-planetary-boundaries/view>

## 2.6 Melléklet: A paradigmaváltás két hazai példája

### 2.6.1 Kisbalaton

A hazai környezetvédelem és vízügy gyakorlatában a paradigmaváltás két nevezetes példája a Kisbalaton visszaállítása és a Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése. A Kisbalaton védműrendszert a Balaton eutrofizációjának mérséklése érdekében hozták létre. Az 1970-es, 80-as évekre a Balaton tápanyag túlterhelése, és annak eredményeként az algák



biomassza termelése olyan mértékűvé vált, ami jelentősen rontotta az ökológiai állapotot, a tó vízminőségét és turisztikai vonzerejét. Az elsősorban lebegőanyaghoz kötött foszforként megjelenő tápanyag terhelés legjelentősebb része a Zala folyón keresztül érkezett, a folyóba bevezetett tisztított és tisztítatlan kommunális szennyvízből (pontszerű szennyezés), továbbá a mezőgazdasági területekre kijuttatott műtrágya fölöslegből (nempontszerű, diffúz szennyezés) származott. Az eutrofizáció kezelése során a pontszerűen alkalmazott „csővégi” technológiák (szennyvíz csatornázás és -tisztítás kiépítése és a meglévő telepek korszerűsítése, foszforeltávolítás bevezetés) mellett kulcsszerep jutott a Kisbalaton rekonstrukciójának. A Zala folyó torkolatától felvízi irányban elhelyezkedő természetközeli tározótér ugyanis jelentős mértékű foszforvisszatartást biztosít. A kialakított áramlási viszonyok miatt az áramlási sebesség lecsökken, megnövekszik a tartózkodási idő, ami hosszabb időn keresztül kedvező feltételeket teremtett a kiüledési folyamatoknak. Ennek eredményeként a folyó vize lényegesen kevesebb foszforformát szállít a Balatonba. Ez a megoldás igazi paradigmaváltást jelentett a 80-as években! Ugyanis a jól kézben tartható és előre jelezhető, tisztán műszaki jellegű létesítmények és technológiák mellett egy nehezen kiszámítható, bizonytalan és csak részben feltárt viselkedésű természetközeli rendszerre alapozott. Az egykori nagy kiterjedésű, 19. században lecsapolt vízi világ részleges helyreállításának a vízminőségi hatásokon túl több további hozadéka is lett: a Kisbalaton Ramsari oltalom alatt álló vizes élőhely, ami a vonuló madarak számára fontos pihenőhely; emellett általában véve is ökológiailag kiemelten értékes terület; a víztest hidrológiai hatásai kedvezőek; a Tisza-tó mellett az élőhely restaurációs célú mérnöki beavatkozások meghatározó hazai jó példája; a tudományos kutatás számára nagyon hasznos „teperi kísérlet”; Az elmúlt évtizedek tapasztalata alapján a Kisbalaton rekonstrukciója a paradigmaváltás egy alapvetően sikeres itthoni példája.

## 2.6.2 Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése

A szemléletváltás egy hasonló léptékű, de kevésbé jól sikerült esete a Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése (VTT). A projekt megvalósult fő célja a Tisza-völgy árvízvédelmének javítása és részben új elvi alapokra való helyezése. Utóbbi azt jelentette, hogy a VTT a tervezett és műszakilag jól előkészített árapasztást az árvízvédelmi rendszer elemei közé emelte, hat már meglévő és további öt tervben levő nagy (összességében 1 milliárd köbméteres nagyságrendű) befogadó képességű árapasztó tározó kiépítésével. Ehhez hasonló műszaki megoldásokra korábban a Tisza-völgyben rendszerszinten nem, csupán töltésrobbantással előidézett véstározás jelleggel volt lehetőség (kivétel volt ezalól pl. a Körösök vizét befogadó Mályvádi-tározó). A terv kidolgozása előtt az uralkodó vízgazdálkodási paradigma néhány ki nem mondott eleme: (i) vízmérnöki eszközökkel a vízjárési viszonyokat a területhasználók igényeihez kell igazítani; (ii) a mentett oldali területek gazdasági értéküktől függetlenül minden eszközzel védendőek; (iii) az ár- és belvízvédelem célja a vizek gyors levezetése; (iv) a cél a megnyugtató és „végleges” árvízi biztonság megvalósítása (Koncsos, 2011). A VTT-t megelőző korszak vízügyi álláspontját jól jellemzi az alábbi idézet: *„A jövő árvízvédelmére gyökeresen új koncepció nem alakítható ki..., de nincs is rá szükség.”* (Szlávik, 2000). Fontos megjegyezni, hogy ennek a szemléletnek a kialakulása összetett társadalmi folyamat eredménye. Így nem csak a vízügy hozzáállását tükrözte, hanem a korszak (elsősorban mezőgazdaság) területhasználóinak elvárását, illetve általában az ember-táj viszonyról alkotott felfogást is. Ettől a szemléletmódtól tért el gyökeresen a VTT koncepció, amelynek kiinduló célja az árvízvédelem mellett részben a Tisza-völgy tájhasználatának komplex, sokszempontú újragondolása is volt. Az ezredforduló rekord árvizei és belvíz elöntései ugyanis rámutattak az addig szinte kizárólag gátakból (2940 km) és csatornákból (42600 km) álló ár- és belvízvédelmi rendszer gyengeségeire, így a védekezés hatékonyságába és gazdaságosságába vetett bizalom alapjaiban rendült meg. A VTT eredeti céljai közé tartozott az árvízi kockázatcsökkentés mellett a földhasználat racionalizálása és a helyi megélhetési viszonyok javítása. A kiinduló elgondolást a természetközeli árvízi kockázatcsökkentés és a komplex tájhasználati tervezés jelentette: a folyóvölgy mélyen fekvő, belvizes, rossz agrár adottságú területei alkalmasak időszakos víztározásra, ahova a folyón levonuló áradás egy része kisléptékű műszaki megoldásokkal kivezethető, így az árhullámok tetőző vízszintje és tartóssága, vagyis végső soron a katasztrófális események valószínűsége csökkenthető. Ez többszörös haszon, mivel az árvíz kockázat mérséklése mellett területi vízgazdálkodási, vízminőségi (diffúz tápanyagterhelések kontrollja), helyi klimaszabályozó és további ökológiai célokat is szolgál (víz visszatartás, talajvíz utánpótlás, élőhelyek vízellátása). Továbbá az elárasztások miatt kieső (mélyártéren jellemzően gyenge) szántóföldi termés hozam más művelési módokból (gyepgazdálkodás, gyümölcsös, halászat, erdőgazdálkodás) származó bevétellel pótolható. Az elgondolás több eleme is gyökeres változást jelent: (i) a vízgazdálkodási, területhasználati, környezetvédelmi és gazdasági célokat nem alá-fölérendelt, hanem egymás mellé

rendelt viszonyban kezeli, (ii) nincs korlátlan árvízi biztonság, (iii) a tervezés alapját az árvíz kockázat<sup>26</sup> csökkentése jelenti. Mivel a kis műszaki beavatkozást igénylő mélyártéri tározás nagy területekre kiterjedő rendszeres elöntést jelentene, így egyben a tározóterekben feltételezi az intenzív szántóföldi művelés felhagyását is. Ami viszont feltételezi a szakmák közötti konfliktuskezelő párbeszéd meglétét (*önszerveződés*), a kölcsönös függőség és közös érdekek felismerését (*információterjedés, célok, tervezési paradigma*) és a korábbi szemléletmód gyökeres átalakítását (*paradigmaváltás*) minden érintett részéről. A VTT azért bizonyult félsikernek, mert ez utóbbiak érdemben a mai napig nem valósultak meg, aminek hátteréről és okairól Borsos (2010) írt részletes elemzést. Így a gyakorlatban a terv egy szinte kizárólag vízügyi projektekre korlátozódott: a megépült tározóterek a mélyárterek töredékét fedik le, így ugyanakkora vízmennyiség befogadásához lényegesen nagyobb vízmélységeket kell biztosítani (az elmaradt paradigmaváltás miatt a gyakorlati problémamegoldás az árvízvédelmi rendszer korrekciójára és műszaki optimalizációjára, vagyis a *paraméterek, változók és fluxusok kapcsolatrendszerére* korlátozódott). A nagy mennyiségű víz kivezetéséhez nagy műtárgyakra van szükség (*paraméterek, időbeliség*). Mivel így elárasztás esetén szinte bizonyos a növénypusztulás, a mezőgazdasági és az ökológiai célok is sérülnek (*célok*). Ezért a tározókat csak kritikus, katasztrófával fenyegető árhullámok esetén nyitják meg (*tervezési paradigma*). Ami miatt viszont az egyéb területi vízgazdálkodási célok (vízvizsztatartás, talajvízutánpótlás, belvízrendezés) sérülnek.

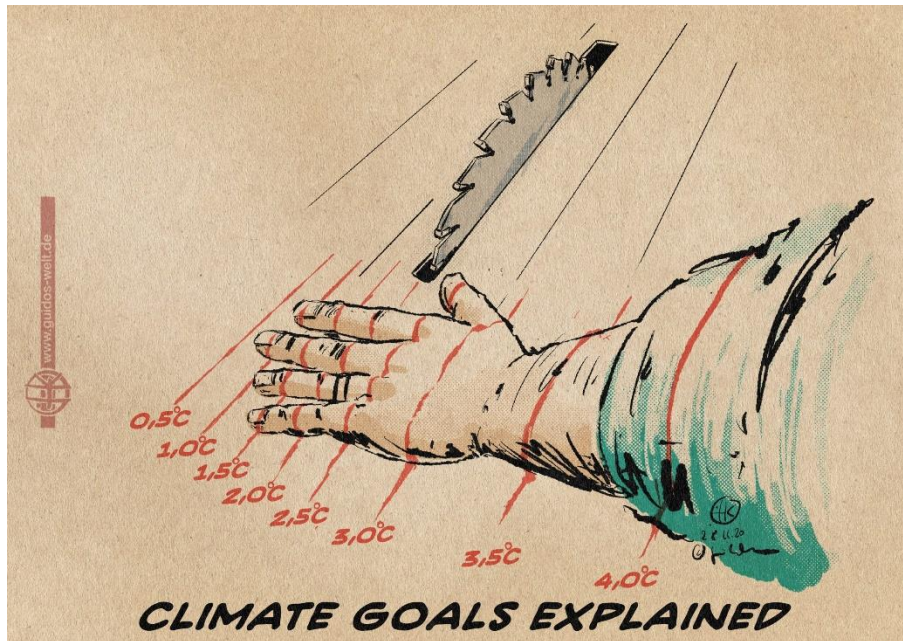
A témában a VTT-vel párhuzamosan (részben annak előkészítéseként) született meg egy valóban paradigmaváltó koncepció. Ezt Koncsos László jegyzi (Koncsos, 2006), központjában a természetközeli árvíz kockázatcsökkentés áll. Ezt a Tisza-völgyben az egykori vizes élőhelyek, a folyók menti mélyártéri területek rendszeres (akár árvizenkénti/évenkénti) szelid (kisebb tározóterek, fokozatos elárasztása kisebb méretezésű árvízvédelmi infrastruktúra segítségével) elárasztásával tervezi elérni a stratégia. A koncepció szigorúan véve csak az árvíz kockázat csökkentésére fókuszál, arra lett tudományos igénnyel kidolgozva, de eredményei és alapfelvetése egyértelműen tovább mutatnak: megalapozzák a víz nagy területekre kiterjedő visszatartásának elvi lehetőségeit a Tisza-völgyben, és részleges válaszokat adnak a tájhasználat, a területi vízgazdálkodás, az éghajlati adaptáció számos kihívására is.

## 2.7 Klímacélok szemléltetése

Egy közérthető magyarázat arra, hogy a megnyugtatóan hangzó klímacélok és kibocsátáscsökkentési vállalások valójában olyan önámítások, amik hamis biztonságérzetet keltenek az emberekben. A [Párizsi Klímaegyezmény](#)ben a 21. század végére megcélzott, és jelen állás szerint tarthatatlan 1.5-2 Celsius fokos hőmérséklet emelkedés nem egy jó, kívánt célállapot lenne! Sokkal inkább egy olyan "kényszerű, de még vállalható kompromisszum", mint az, hogy az egész kézfejük helyett csak az első ujjperceinket vágja le a körfűrész. A globális kibocsátások jelenlegi trendjei alapján jóval valószínűbb a század végi 3,5-4 fokos globális átlaghőmérséklet emelkedés...

---

<sup>26</sup> A kockázat a kár várható értéke, ahol a védekezés költsége is a károk közé sorolandó.



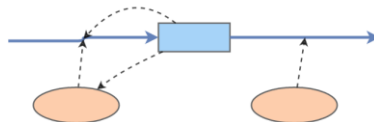
2-15. ábra – Klímacélok szemléletes magyarázata. Kép forrása: <https://www.guidos-welt.de/klimaeuphemismen/>

A rajz elsősorban az üvegházhatású gáz kibocsátás csökkentés ("klíma mitigáció") fontosságára hívja fel a figyelmet. Helyi szinten viszont még ennél is fontosabb az alkalmazkodás, az adaptáció. Vagyis a felkészülés a valószínű szélsőséges hatásokra. A rajz logikáját követve ezt egy munkavédelmi kesztyű szemléltethetné: hiába kapja meg a körfűrész pl. a tenyerünket (3,5 fok), a sérülés egy részét felfogja a kesztyű (adaptáció). Minél jobb a vágásbiztos kesztyűnk (minél jobban felkészülünk, alkalmazkodunk), annál kisebb a sérülés.

És mit tehetünk az adaptációért? Minél több jól megtervezett és karbantartott víz- és zöldfelület, rugalmasan kialakított közmű rendszerek, nagyobb arányú támaszkodás a helyi erőforrásokra, stb.

## 2.8 Felkészítő kérdések

1. Hosszútávon és nagy általánosságban egy inkább egyszerű vagy egy inkább összetett rendszer tekinthető stabilabbnak, fenntarthatóbbnak?
2. A Föld energia szempontjából nyílt vagy zárt rendszer?
3. A Föld anyag szempontjából – egyelőre – nyílt vagy zárt rendszer?
4. Mi a közös a bankszámlánkban, Budapest közlekedésében, egy nyúlpopulációban egy kis kifolyó nyílással rendelkező víztartályban az a közös?
5. Változó, fluxus, paraméter, visszacsatolás – helyezze el ezeket a fogalmakat az alábbi ábrán (a fogalmak több helyen is szerephetnek, ezért minden vonatkozó helyen jelölje őket!



6. Mi az üzenete Donella Meadows „Leverage points” (magyarul kb. „Fogáspontok”) elnevezésű elméletének és a hozzá tartozó szemléletes „emelőkaros” ábrájának?
7. Kifolyás tartályból kis nyíláson keresztül – rendszerdinamikai szempontból állítsa párokba az alábbi fogalmakat:

Vízszint a tartályban	Fluxus
Veszteségtényező	Változó
Kifolyási sebesség	Visszacsatolás
Túlfolyó/bukó	Paraméter

8. Rendszerdinamikai szempontból állítsa párba az alábbiakat:

Pozitív visszacsatolás	A rendszerműködés csillapítása
A rendszerműködés gerjesztése	Negatív visszacsatolás

9. Nevezzen meg legalább egy negatív visszacsatolást az éghajlati rendszer működése szempontjából!

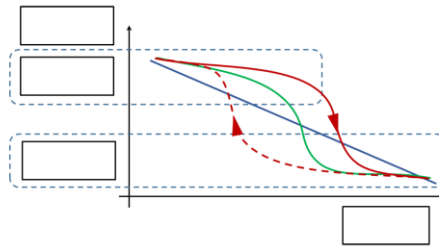
10. Nevezzen meg legalább egy pozitív visszacsatolást az éghajlati rendszer működése szempontjából!

11. Rendszerdinamika és környezettudományok terén milyen jelenséget nevezünk „átbillenésnek”, „regime shift”-nek?

12. Sorolja fel a rendszerdinamikából ismert „átbillenés”, „regime shift” jellemző tulajdonságait!

13. Soroljon fel legalább három biofizikai példát a „átbillenésre”, „regime shift-re”!

14. Írja be a fekete téglalapokba az ábráról hiányzó feliratokat!



15. Milyen fő társadalmi-gazdasági-környezeti folyamatokat számszerűsít a „Növekedés határai” című tanulmány alapját képező „World3” modell? Nevezzen meg legalább három ilyen területet!

16. Mik a „Növekedés határai” című tanulmány legfontosabb megállapításai?

17. Válassza ki az alábbiak közül az hamis állításokat!

a. Mivel a szennyezések környezeti és egészségi hatásai nagyon jól előre jelezhetőek, ezért a környezeti határértékek kijelölése egyértelmű feladat.

b. Az egészségügyi és környezeti határértékek általában konzervatívak, vagyis a biztonság javára szigorúak

c. Az egészségügyi és környezeti határértékek lehetőség szerint bio-fizikai alapúak (tudományosan igazolt okozati hatásmechanizmusra épülnek)

d. A „Földrendszer korlátai” („Planetary boundaries”) keretrendszer a klasszikus egészségügyi és környezeti határérték rendszerekhez hasonló alapelvekre épül.

18. Mi a „Földrendszer korlátai” („Planetary boundaries”) koncepció lényege?

19. Válassza ki azt, hogy melyik két alrendszer esetében juttatta az emberi tevékenység a a kockázatos tartományba a Föld-rendszert?

## 2.9 Irodalom

Borsos, B. (2010) Érdekek és érdektelenség a Tisza mentén. Esettanulmány a Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztéséről. In: Lányi András és Farkas Gabriella (szerk.) Miért fenntarthatatlan, ami fenntartható? Környezet és Társadalom. XXI. századi forgatókönyvek. L'Harmattan, Budapest, pp. 127–145.

Branderhorst, Gaya. 2020. Update to Limits to Growth: Comparing the World3 Model With Empirical Data. Master's thesis, Harvard Extension School. <https://nrs.harvard.edu/URN-3:HUL.INSTREPOS:37364868>

EC - Európai Bizottság (2021) Természetvédelmi eszköztár - A biodiverzitás csökkenése, természetvédelem és az EU cselekvési terve a természetért.

[https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/biodiversity\\_advocacy\\_toolkit\\_web\\_hu\\_v1.0.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/biodiversity_advocacy_toolkit_web_hu_v1.0.pdf)

Decsi, B., Ács, T., Kozma, Zs. (2017) A kállósemjéni Nyárjas láp vízháztartási vizsgálata In: Blanka, V; Ladányi, Zs (szerk.) Interdiszciplináris táj kutatás a XXI. században : a VII. Magyar Tájökológiai Konferencia tanulmányai Szeged, Magyarország : Szegedi Tudományegyetem Földrajzi és Földtudományi Intézet (2017) 656 p. pp. 127-135. , 9 p.

Decsi, B., Ács, T., Kozma, Z. “Long-term Water Regime Studies of a Degraded Floating Fen in Hungary”, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 64(4), pp. 951–963, 2020. <https://doi.org/10.3311/PPci.16352>

Herrington G. (2020) Update to limits to growth: Comparing the world3 model with empirical data. Journal of Industrial Ecology. 2020;1–13. <https://doi.org/10.1111/jiec.13084>

- IPCC (2019) IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Jafelice, R.M., da Silva, P.N. (2011) Studies on Population Dynamics Using Cellular Automata, in: Salcido, A. (ed.) Cellular Automata - Simplicity Behind Complexity, IntechOpen, DOI: 10.5772/15939. Available from: <https://www.intechopen.com/chapters/15062>
- Koncsos, L. (2006) A Tisza árvízszabályozása a Kárpát-medencében (NKFP-3/A 0039/2002 kutatás rövid összefoglalása). Magyar Természetvédők Szövetsége, Budapest. ISBN 978-963-86870-9-8
- Koncsos, L. (2011) Árvízvédelem és stratégia. In: Somlyódy, L. (szerk.) (2011) Magyarország vízgazdálkodása: helyzetkép és stratégiai feladatok. Magyar Tudományos Akadémia, Köztisztviselői Stratégiai Programok, Budapest.
- Ladyman, J., Lambert, J., Wiesner, K. (2013) What is a complex system?. Euro Jnl Phil Sci 3, 33–67 (2013). <https://doi.org/10.1007/s13194-012-0056-8>
- Meadows, D.H.; Meadows, D.L.; Randers, J.; Behrens III W.W. (1972) The Limits to Growth; A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. New York: Universe Books. ISBN 0876631650.
- Meadows, D.H. (1999) Leverage Points: Places to Intervene in a System. The Sustainability Institute, Hartland VT.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M, Biggs, R., Carpenter, S.R, de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S. (2015) Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science 347:6223, 1259855, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1259855>
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M, Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C.P., Barnosky, A.D., Cornell, S.E., Crucifix, M., Donges, J.F., Fetzer, I., Lade, S.J., Scheffer, M., Winkelmann, R., Schellnhuber, H.J. (2018) Trajectories of the Earth System in the Anthropocene, Proceedings of the National Academy of Sciences Aug 2018, 115 (33) 8252-8259; <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
- Turner, G. M (2014) Is Global Collapse Imminent? MSSI Research Paper No. 4, Melbourne Sustainable Society Institute, University of Melbourne. [https://sustainable.unimelb.edu.au/sites/default/files/docs/MSSIResearchPaper-4\\_Turner\\_2014.pdf](https://sustainable.unimelb.edu.au/sites/default/files/docs/MSSIResearchPaper-4_Turner_2014.pdf)
- von Bertalanffy, L. (1968) General System Theory: Foundations, Developments, Applications. New York, Braziller. ISBN 978-0807604533
- Zhang, W., Jansson, C., Miller, P. A., Smith, B., and Samuelsson, P. (2014) Biogeophysical feedbacks enhance the Arctic terrestrial carbon sink in regional Earth system dynamics, Biogeosciences, 11, 5503–5519, <https://doi.org/10.5194/bg-11-5503-2014>

### 3 Anyagforgalom és anyagfelhasználás, szennyezések

A fejezetet írta: Clement Adrienne és Kardos Máté Krisztián

Az emberi tevékenység által igénybe vett egyik fő környezeti erőforrás-csoportot a bennünket körülvevő (és általunk elérhető) világban fellelhető különféle anyagok képezik. A rendkívül változatos felépítésű és előfordulású anyagok emberi beavatkozás híján is folyamatos körforgásban állnak – részben az élettelen környezeti tényezők, részben pedig az élővilág révén (megjegyezve, hogy végső soron mindkét tényező hajtóereje a földi rendszerrel kívülről közölt energia). Ebben a körforgásban minden természetes állapotban fellelhető anyagféleségnek meghatározott helye és szerepe van: a periódusos rendszer elemeiből felépülő legkülönbözőbb anyagok – a kémia tudományága által leírt módokon – eltérő időbeli és térbeli léptékben egymásba alakulnak.

Az anyagforgalom témakörét e tárgy keretében – gyakorlatias okokból – a Föld, mint rendszer szempontjából vizsgáljuk. Ebben a vonatkozásban csekély elhanyagolással megállapítható, hogy a természetes folyamatok által irányított anyagforgalom zárt, körkörös rendszert képez, amely összetett, egymáshoz kapcsolódó alrendszerekből áll össze. Természetesen a földi rendszer mintegy 4,5 milliárd éves története során (annak is leginkább a kezdeti szakaszában) jelentős „anyagimport” zajlott (földközeli pályán keringő aszteroidák becsapódása), a bolygó kialakulását követően azonban az ilyen események gyakorisága és jelentősége lecsökkent. A planétát alkotó anyagok körforgásában – a rendszer zárt jellegét megtartva – ezt követően is jelentős változások történtek (elég csak megemlíteni, hogy az őslégkör összetétele jelentősen különbözött a maitól, de markánsan eltérő köztes állapotok is előfordultak). Anyagforgalom szempontjából tehát a földi rendszer lassú fejlődés során jutott el az általunk „természetesnek” vett állapothoz, melyben ugyancsak meghatározó szerepet játszott az időközben kialakult és egyedülálló fejlődési pályát bejárt élővilág is.

Néhány tízezer évvel ezelőtt az élővilág részeként lépett színre az ember és vált fokozatosan egyeduralgó fajjává. Szellemi képességeinek köszönhetően nemcsak egyre nagyobb teret volt képes elfoglalni a többi élőlénytől, hanem a bolygó anyagforgalmára gyakorolt hatása is egyre meghatározóbb lett. A legnagyobb ugrást ezen a téren csak az utóbbi egy-két évszázad során tette meg (bár lokális léptékben már az ókorból és a középkorból is lehet példákat hozni). Mélyreható elemzésre e jegyzet keretei között nem vállalkozhatunk, ezért inkább néhány látványos és demonstratív példával szemléltetjük az ember hatását a földi anyagforgalomra. Választásunk a vízre és a szénre, mint a földi élet két nélkülözhetetlen összetevőjére; valamint a két legfőbb növényi tápelemre: a nitrogénre és a foszforra esett – azért is, mert ezek tekintetében nem egy vonatkozásában feszegetjük vagy már át is léptük a Föld-rendszer korlátait.

#### 3.1 A környezet és elemei

Környezet alatt az élő szervezeteket körülvevő élő (biotikus) és élettelen (abiotikus) földi tartományok együttes rendszerét értjük. Térbeli kiterjedése az élővilág életterével, a bioszférával azonos. Elemei: litoszféra (földkéreg), hidroszféra (vízburok), atmoszféra (légkör), bioszféra (élővilág), táj és az épített (művi) környezet. Ez utóbbi az emberi társadalom átforgalmazta, a természetből saját maga számára leválasztott élettere. A fejlett országokban a lakosság több mint kétharmada (Európában 74%) városokban él, és ez az arány folyamatosan növekszik.

Amint a négy kiválasztott anyag példáján is látni fogjuk: a(z ember nélküli) természet, az ökoszisztémák jó működésének a lényege, hogy az anyagok *körforgása zárt*: az elhasznált anyagok újrafelhasználása igen nagy arányú. Egy-egy ciklusban az anyagok több mint 99%-a visszaforg az eredeti kiindulási felhasznált vegyületek formájában, és nagyon kicsi része az, ami nehezen bontható szervesanyag vegyületek formájában kivonódik a ciklusból. Emiatt a környezetnek a ciklusonkénti változása nagyon kicsi.

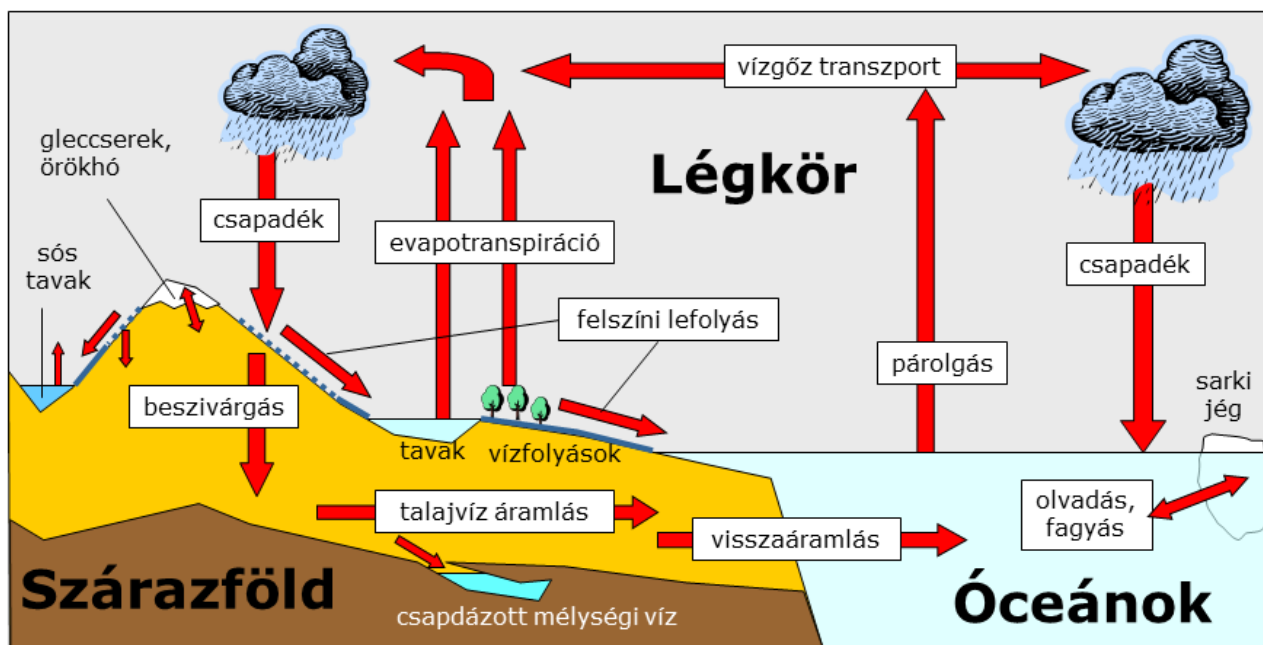
Ezzel szemben a társadalom alapvetően *nyílt anyagforgalmat* hoz létre: a természetből az ember nagy mennyiségű alapanyagot vesz ki, melyekből termékeket állít elő. Mivel az alapanyagok felhasználása nem 100 %-os, ezért már a kitermelt alapanyagok egy része – hulladékként – visszakerül a természetbe. A termékéből a fogyasztás során elhasznált termék keletkezik, az elhasznált termék pedig szintén visszakerül a természetbe – legtöbbször különböző szennyezések formájában. Az újrahasznosítás úgy az alapanyagok, mint a termékek szintjén minimális. A nyitott ciklusban tehát a

természet és a társadalom anyagot cserél; ennek léptéke pedig – ahogy látni fogjuk – a természetes anyagforgalmakkal összemérhető.

## 3.2 Néhány kiválasztott anyag természetes (geokémiai) és az emberiség által módosított körforgalma

### 3.2.1 Vízkészletek, a vízkörforgás

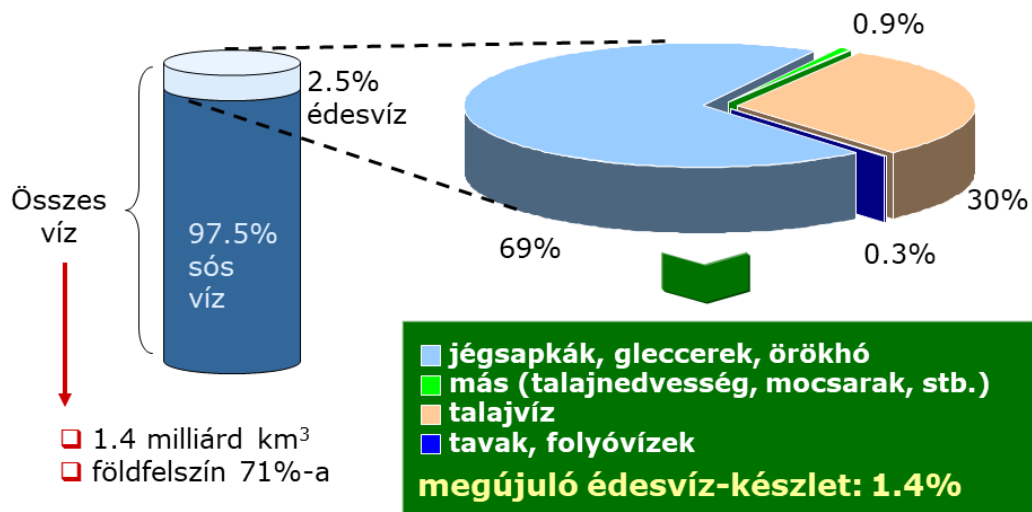
Földünkön a víz mindhárom fázisban megtalálható. Ennek oka a vízmolekulák különleges kristályszerkezetében rejlik. A fázisváltások teszik lehetővé a víz hidrológiai körforgását a napenergia hatására. A folyamat nagyléptékű desztillácóként képzelhető el. A vízmolekulák párolgás révén az óceánból a légkörbe lépve hátrahagyják a sókat és szennyezőanyagaikat, amely eredményeként "tisztá" édesvíz jut a szárazföldekre. A lehulló csapadék a talajból és a kőzetekből különböző anyagokat old ki, miközben a felszíni vizekbe (majd a folyókon keresztül a tengerekbe és az óceánokba) fut, vagy a viszonylag lassan megújuló felszín alatti vizekbe szivárog.



3-1. ábra – A víz geokémiai körforgalma. Forrás: saját szerkesztés (Budai Péter)

A víz az egyetlen folyadék, amelynek a sűrűsége a hőmérséklet függvényében "anomálishan" maximummal bír (4°C-on), ez a magyarázata a mély tavak rétegződésének és a sekély tavakétól alapvetően eltérő viselkedésének. A jég térfogati tágulása okozza a kőzetek fizikai mállását, amely a talajképződés első lépése. A természetes vizeken képződő jég megvédi az alatta levő víztömeget és az élővilágot a lehűléstől és befagyástól. A víz forrásával járó térfogati munkát hasznosítja az ipari társadalom kulcsfontosságú technikai újítása, a gőzgép, ma pedig a hő- és atomerőművekben a gőzturbina. A víz mindent old, ami képes a kötésben részt venni. Az élet, a fehérjemolekulák hidratált állapota ezért alakulhatott ki az ősóceánokban, de a genetikai információt hordozó DNS sem létezne víz nélkül. A légkör teljes oxigéntartalma, amely lehetővé tette az élet kifejlődését, a víz fotólíziséből származik a fotoszintézis során.

A Föld globális vízkészlete állandó, mintegy 1400 millió km<sup>3</sup>. Bolygónk felszínének 71%-át víz borítja. Megújuló erőforrásként évente mintegy félmillió km<sup>3</sup> víz lép a folytonos, nagy körforgásába és szállít magával sokféle más anyagot. Előbbi számos térben és időben változó, kicsi ciklus eredője (ez az oka, hogy a vízzel kapcsolatos gondok térségenként változó módon jelentkeznek). A teljes vízkészlet kicsiny hányada, csupán 0.6 %-a hasznosítható édesvíz (folyókák, tavak és felszín alatti vizek). A globális vízigény ennek nem több mint két ezreléke (ezen belül 80 % az öntözés). A gondot a térben és időben roppant egyenlőtlen elosztás jelenti: vízhiány, aszály, és árvíz. A vízzel ezért "gazdálkodni" kell, amit a hazai szakma több száz éve hozzáértéssel tesz is.



3-2. ábra – A globális vízkészletek százalékos megoszlása. Forrás: saját szerkesztés (Budai Péter)

Jelenleg a népesség 4-6 %-a küszködik a fizikailag elégtelen mennyiségű vízből adódó gondokkal, ám gazdasági okok miatt mintegy 20 % nem jut biztonságos ivóvízhez, elsősorban a Közel-Keleten és Afrikában. A népességnövekedési becslések szerint a 21. század végén a Föld lakossága meghaladhatja a 10 milliárdot. Miután a szaporulat elsősorban a vízben ma is szegény ázsiai és afrikai térségekben nagy (a népesség sok országban 20 év alatt megduplázódik), 2025-re a fenti arány – az éghajlatváltozás hatásainak függvényében – akár tízszeresére is nőhet. A probléma – elsősorban a fejlődő országokban, a rájuk jellemző városiasodás miatt – felerősödve jelentkezik (átláthatatlan vízi infrastruktúra, felszín alatti vizek túlzott mértékű kihasználása, a járványok nagy száma, az árvizekkel szembeni kiszolgáltatottság stb.). Jelenleg közel 1 milliárd ember él biztonságos ivóvízellátás nélkül, 2-3 milliárd pedig nem rendelkezik megfelelő szennyvízelvezetéssel. Számuk huszonöt éven belül megkétszereződhet.

### 3.2.2 Szén

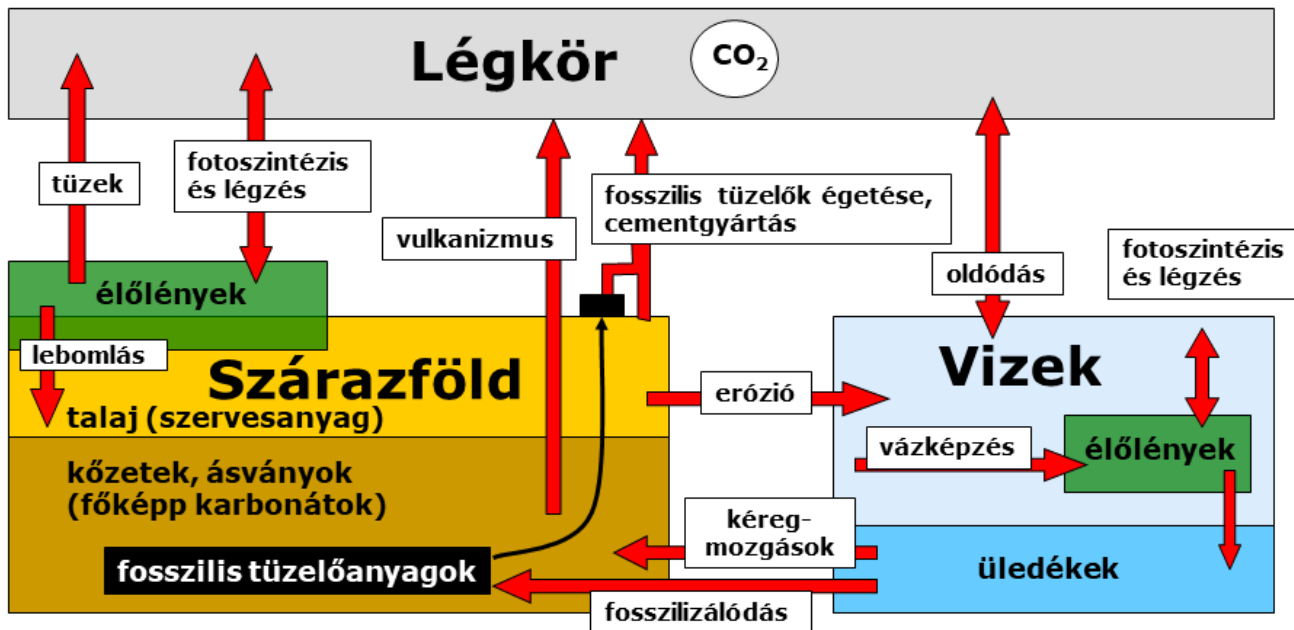
#### 3.2.2.1 Természetes előfordulás és körforgás

A szén a természetben rengeteg formában fordul elő. Szerves formában valamennyi élőlény alkotó eleme, a szénhidrátok, lipidek révén. Szervetlen formában is találkozhatunk vele a természetben mindhárom halmazállapotban. Az égésterméként, illetve az élőlények kilégzéskor keletkező gáz fázisú széndioxid (CO<sub>2</sub>) a légkör negyedik legjelentősebb összetevője; a szintén gáz fázisú szénmonoxid (CO) a tökéletlen égés terméke, instabil, hamar széndioxiddá alakul. A kilégzéssel ellentétes folyamat a fotoszintézis, amely a légkör széndioxidját szénre és oxigénre bontja; a szenet beépíti, az oxigént pedig visszaengedi a légkörbe.

A légkörből a vízbe beoldódó széndioxid oldott (hidro) karbonátokat képez. Kiülepedve pedig szilárd fázisú kalcium- és magnéziumkarbonáttá (CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>) alakul. Ezekből a karbontájkészletekből keletkeztek a földtörténeti évmilliók során nagy nyomáson, anaerob környezetben a fosszilis készletek: a kőszén, a kőolaj és a földgáz. A természetben a szén kristályos elemi formában is megtalálható (grafit, gyémánt).

A szárazföldi biomasszában tárolt szénkészlet az egyenlítő menti őserdőkben a legjelentősebb: 200 t/ha körüli. A talajokban raktározott szénkészlet azonban ezeken a vidékeken igen alacsony, az éppen az északi és a déli sarkkör vidékén található tundra, sztyeppe talajokban ölt hasonló nagyságot.

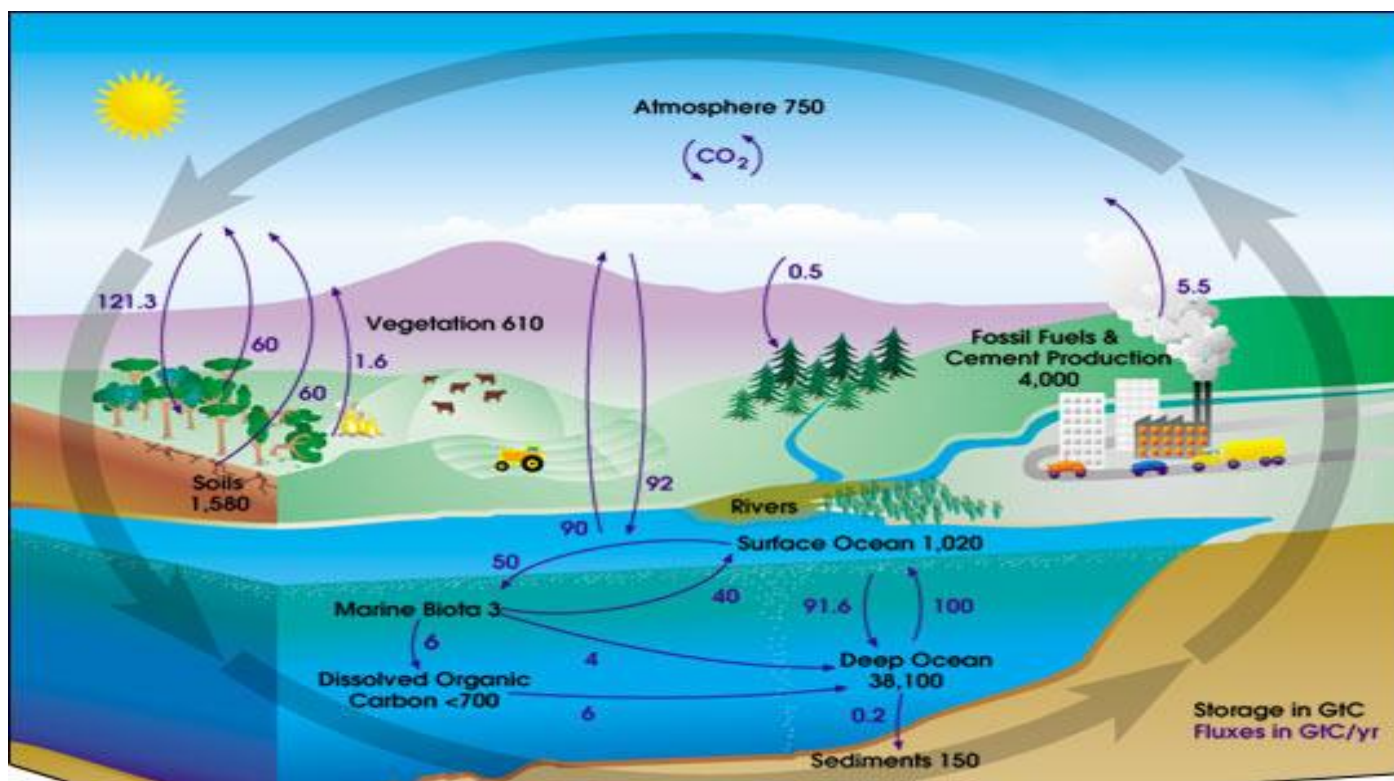




3-3. ábra – A szén jelenkori geokémiai körfolyamata. Forrás: saját szerkesztés (Budai Péter)

### 3.2.2.2 Emberi beavatkozások a természetes körfolyamatba

A fosszilis szénkészletek kitermelése napjanikig is folyamatosan növekvő méreteket ölt annak ellenére, hogy azok használata a klímaváltozás legfőbb okozója. A kőszent elsősorban erőművek nyersanyagaként; a kőolajat üzemanyagként és vegyipari alapanyagként, a földgázt pedig főképpen fűtésre, valamint üzemanyagként használjuk. Ezzel jelentősen beavatkozunk a természetben egyébként egyensúlyban lévő széndioxid termelő és azt fogyasztó folyamatokba.



3-4. ábra – A szén jelenkori készletei és körforgalma. Forrása: [www.center4climatechange.com](http://www.center4climatechange.com)

A szén körforgásának egyik jelentős eleme a műanyagok. A világ kőolajtermelésének jelenleg kb. 4%-át fordítjuk műanyagok gyártására. További 4% szükséges a gyártási folyamatok energiaigényének fedezésére. A hangzatos

újrahasznosítás azonban sokszor csak álom marad. A műanyag valójában csak néhányszora hasznosítható újra, és mindig alacsonyabb és alacsonyabb minőségű termék lesz az eredmény (PET palack pl. nem készíthető műanyagból, csak nyers kőolajból). A műanyag legnagyobb részét még a fejlett országokban sem hasznosítják újra. Európában a műanyag hulladék 26%-a (6,6 millió tonna) került újrafeldolgozásra 2012-ben, 36%-ot energetikai célra „hasznosítottak” (hulladékégetés), a fennmaradó 38% pedig hulladéklerakókba került. Az Egyesült Államokban a műanyag hulladék mindössze 9%-a (2,8 millió tonna) került újrafeldolgozásra 2012-ben, a maradék mintegy 32 millió tonna szemét hulladéklerakókba került. A probléma egyre ismertebb, egyre több kormány, szervezet, egyén dönt úgy, hogy törekszik arra, hogy kevesebb műanyagot használjon vagy legalábbis kevesebb szemetet termeljen. Az EU műanyag szívószálakat tiltó rendelete azonban inkább szánalmasnak mondható, csepp (sem) a tengerben.

### 3.2.3 Nitrogén

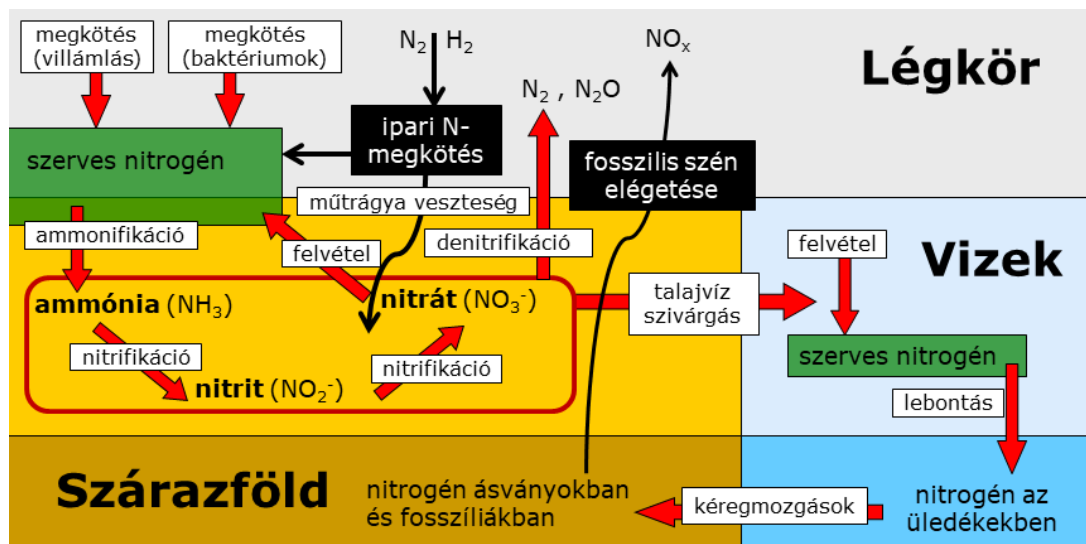
A növények növekedését számos külső tényező befolyásolja, mint például a rendelkezésre álló fény, a környezeti hőmérséklet, vagy a – rendszerint oldott vagy légnemű formában – hozzáférhető szervesetlen ásványi anyagok (tápelemek) mennyisége. A tápelemek közül legnagyobb mennyiségben szénre (C), illetve nitrogénre (N), foszforra (P) és káliumra (K) van szüksége a növényeknek – ezeket összefoglaló néven makroelemeknek hívjuk. Természetesen a sor folytatódik a kisebb mennyiségben igényelt tápelemekkel: Ca, Mg, S (mezoelemek), Fe, Zn, Cu stb. (mikroelemek). A mezőgazdasági termelés növelésének lehetőségeit kutató szakemberek a XIX. század első felében jutottak el arra a felismerésre, hogy a tápanyagok mennyiségén felül a köztük fennálló arányok is meghatározók. Tudománytörténeti érdekesség, hogy ezt a Liebig-elvként ismert törvényszerűséget eredetileg egy *Carl Sprenger* nevű német botanikus fogalmazta meg (részben egyik diákja, a lengyel nemzetiségű *Felicjan Sypniewski* megfigyeléseire építve), az ötlet széles körű népszerűsítésében azonban *Justus von Liebig* báró, a kor neves kémikusa vállalt oroszlánrészt, így végül az ő neve kapcsolódott hozzá. **A Liebig-féle minimum-elv azt mondja ki, hogy a növények növekedését mindig az igényekhez képest legkisebb mennyiségben jelenlevő környezeti tényező határozza meg.** A tápanyagok közül ez pedig leggyakrabban a nitrogén vagy a foszfor. Ide vonatkozóan említést érdemel az amerikai tengerbiológus, *Alfred C. Redfield* 1934-ben publikált megállapítása, mely szerint a vízi ökoszisztémák alapját képező fitoplankton (mikroszkopikus növényi élőlények) biomasszájának átlagos C:N:P aránya 106:16:1. Ettől az aránytól az egyes fajokra és élőhelyekre jellemző értékek kis mértékben eltérnek, ám az arányosság a nyílt tengerekben, a parti vizekben, sőt az édesvízi ökoszisztémákban is többnyire konstans módon fennáll. Hasonlóképpen, a szárazföldi növények esetében is található ilyen optimális arány. Mivel a környezetben a növények számára hozzáférhető szénkészlet (CO<sub>2</sub>, azaz széndioxid formájában) gyakorlatilag korlátlan mennyiségben van jelen, így végeredményben a hozzáférhető nitrogén- és foszforformák mennyisége szab gátat a biomassza produkciónak.

#### 3.2.3.1 Természetes előfordulás és körforgás

A **nitrogén** kulcsfontosságú elem az élőlények számára: alkotórésze például az aminosavaknak és az ezekből felépülő fehérjéknek, de az öröklődésben döntő szerepet játszó anyagoknak is alapvető alkotóeleme (nukleinsavak: DNS, RNS). Az emberi test mintegy 3 tömegszázalék nitrogént tartalmaz, ezzel a nitrogén – az oxigén, a szén és a hidrogén után – a negyedik legnagyobb arányban előforduló elem testünkben. A környezetben szervesetlen molekulák építőelemeként nagy mennyiségben jelen van: legjelentősebb tározója a földi légkör, melynek 78 térfogatszázalékát N<sub>2</sub> gáz alkotja, de kis mennyiségben található benne ammónia (NH<sub>3</sub>) és különböző nitrogén-oxidok (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O stb.) is. Szilárd formában számos nitrát- és ammónium-vegyület része, illetve oldott formában is előfordul (nitrát: NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; nitrit: NO<sub>2</sub><sup>-</sup>; ammónium: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Fontos momentum, hogy a növények számára csakis az utóbbiak hozzáférhetők.

A légköri N<sub>2</sub> → hozzáférhető N átalakítás igen nehézkes folyamat, mivel a N≡N hármas kötés a természetben megtalálható kémiai kötések egyik legerősebbike; felbontása meglehetősen energiaigényes. Természetes körülmények között erre csak néhány baktérium (pl. *Azotobacter*- és *Clostridium*-fajok, vagy a pillangósvirágú növényekkel szimbiózisban élő *Rhizobium*-fajok), illetve a kéalgák képesek. (A *Rhizobium*-fajok a N-megkötés energiaigényét a gazdanövénytől kapott szénhidrátokból fedezik.) A N<sub>2</sub> megkötésének másik – kisebb volumenű – természetes útja a villámlás, melynek során a kis térfogatban rövid idő alatt felszabaduló nagy energia bontja meg a hármas kötetést, az így létrejövő reaktív N-gyökök pedig a környezetükben lévő oxigénnel reakcióba lépve nitrogén-oxidokat (összefoglaló jelölésük: NO<sub>x</sub>) képeznek; ezek aztán a légkörből – a csapadék közvetítésével – a földfelszínre juthatnak. A N-megkötés korlátossága miatt az ökoszisztémák számára kiemelt jelentőséggel bír a korábban megkötött

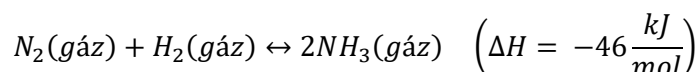
szerves N-formák újrahasznosítása, melynek révén a holt szerves anyag N-tartalmának összességében több, mint 90%-a visszaforgatódik az élő rendszerbe. A szerves anyagok lebontása során a szerves nitrogén-formákból az erre szakosodott mikroorganizmusok közreműködésével ún. **mineralizáció** útján  $\text{NH}_4^+$  (ammónium ion) keletkezik. Az ammónium már közvetlenül is felvehető, de további, erre a feladatra specializálódott baktériumtörzsek képesek ezt két lépésben előbb nitríté (*Nitrosomonas*), majd nitráttá (*Nitrobacter*) oxidálni. Ez utóbbi, kétlépéses folyamat a **nitrifikáció**. A feleslegben lévő  $\text{NO}_3^-$  eltávolításáról (végső soron  $\text{N}_2$  gázzá alakításáról) megint más baktériumtörzsek (pl.: *Pseudomonas*) gondoskodnak, ezt a folyamatot pedig **denitrifikáció**nak hívjuk. A nitrogénciklusban az imént felsorolt fő folyamatokon túl továbbiak is helyet kapnak, ezeket most nem részletezzük.



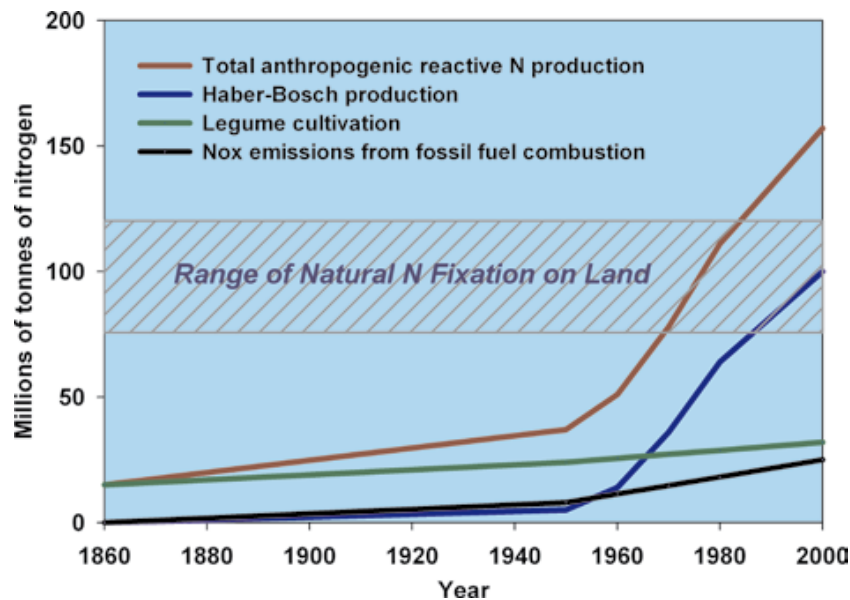
3-5. ábra – A nitrogén természetes körforgása (színes) és az antropogén anyagáramok (fekete dobozok és nyilak). Kép forrása: saját szerkesztés (Budai Péter)

### 3.2.3.2 Emberi beavatkozások a természetes körfolyamatba

A nitrogén mesterséges megkötésének módját két német kémikus: F. Haber és Bosch dolgozták ki; előbbi munkájáért 1918-ban kémiai Nobel-díjat kapott. A folyamat során magas (100 - 250 atm) nyomáson és hőmérsékleten (350 – 550 °C), magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) katalizátor jelenlétében a légköri nitrogénből ammónia képződik. A szükséges magas energiát, amit a természetes megkötés esetén a villámlás illetve a mikroorganizmusok biztosítanak, itt mesterséges forrásból hőként illetve nyomásként viszik be.

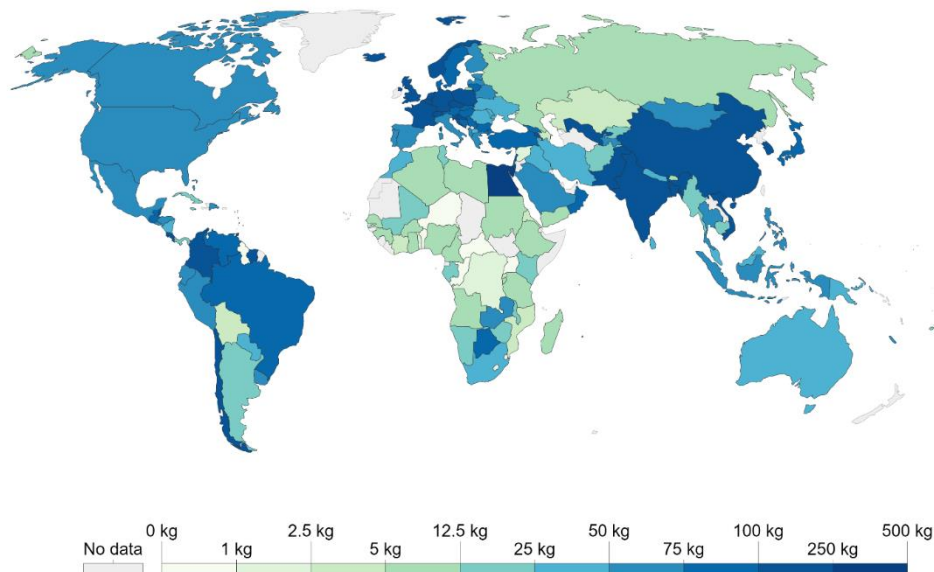


A módszer alkalmazásával a nitrogén termelésének a légköri  $\text{N}_2$  mennyiség szab határt; praktikusán korlátlan termelés vált lehetővé. Az így termelt nitrogén ammónia gázt a mezőgazdaság (műtrágyák) valamint a vegyipar (pl. robbanószerke) hasznosítja. A mesterséges nitrogén megkötés mértéke a 2000-es évek eleje óta meghaladja a természetes folyamatokét (~100 mio t/év), és az így előállított műtrágya az ipari mezőgazdaság elengedhetetlen „nyersanyaga”: az óvatos becslések szerint is a ma élő népesség 30-50%-ának élelmezése alapul olyan élelmiszeren, amelyet műtrágya nélkül nem lehetett volna előállítani.



3-6. ábra – Reaktív nitrogén a környezetben. Forrás: [UNEP](#)

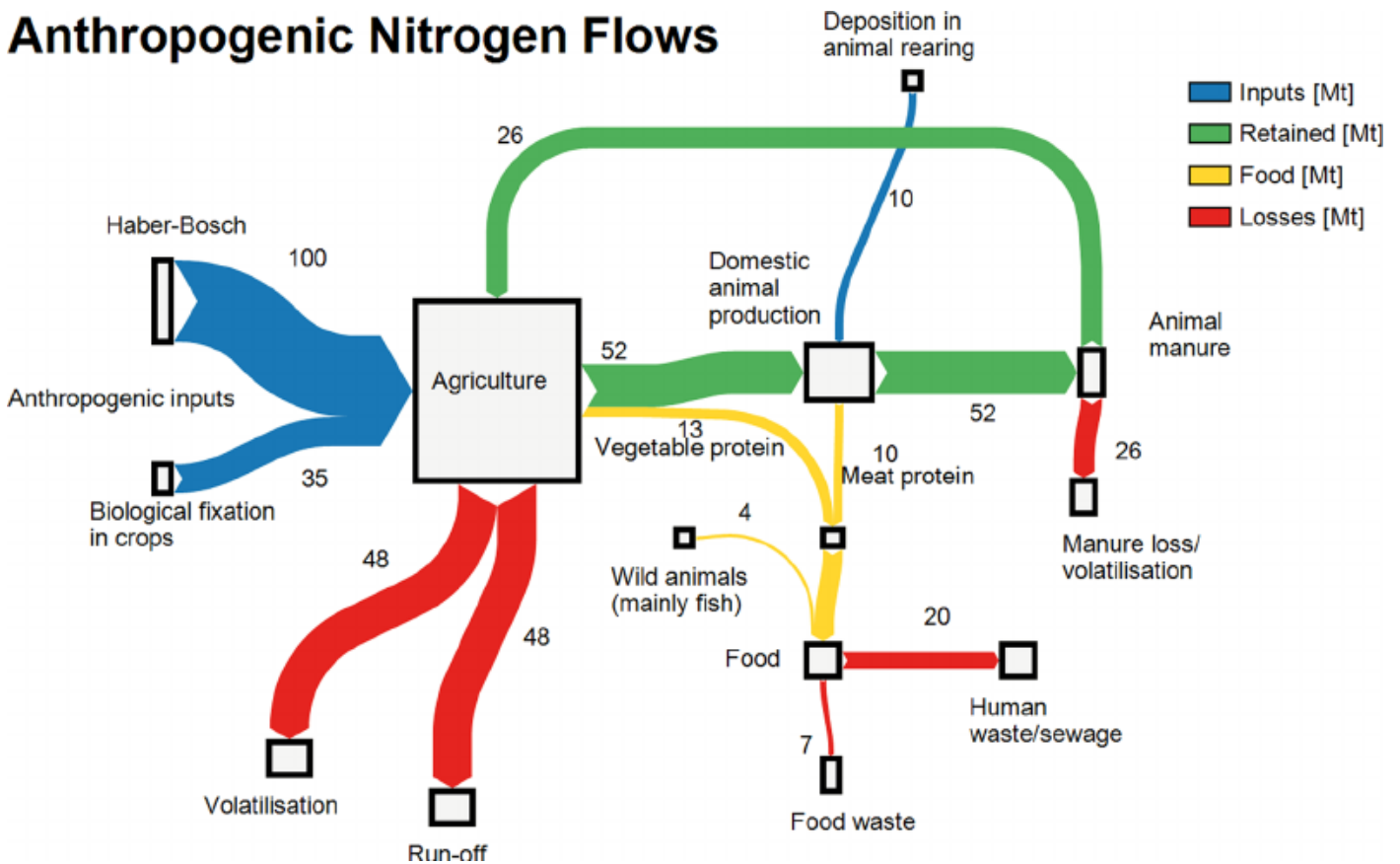
Mivel a nitrogén mesterséges előállítása magas energia- és ezért magas költségigényű folyamat, ezért a magasabb jövedelmű országok lényegesen több műtrágyát használnak mint az alacsonyabb jövedelmű országok. Míg az Egyesült Királyságban például 160-170 kg-t használnak hektáronként, Magyarországon ugyanez az érték 60-70. Ehhez képest az Afrikai országokban a műtrágyahasználat nullához közeli vagy alig néhány kilogramm/hektár. Nitrogénhatékonyság / „nitrogénfelhasználási hatékonyság”: megmutatja, hogy 1 kg kijuttatott nitrogénből a természetett növény mennyit vesz fel. Átlagos értéket 50%, azonban helyenként sokkal alacsonyabb is lehet. Hasonlóan a hús- és tejtermékekre is számíthatunk nitrogénhasználati hatékonyságot, ezt általában 10% körüli érték.



3-7. ábra – A nitrogén műtrágya használata világszerte (kg/ha szántóföld). Adatforrás: ENSz-FAO. Ábra: [www.OurWorldInData.org](http://www.OurWorldInData.org)

Több, mint kétszeresére nőtt tehát a nitrogén-ciklus bemenő anyagárama. A veszteségek miatt rengeteg reaktív nitrogén végzi a környezetben (talajban, de elsősorban természetes vizekben), ahol környezeti problémákat (eutrofizációt, ld. 3.3.3.3 fejezet) okoz. A 3-8. ábra rámutat a nitrogén emberi eredetű felhasználása során kialakuló veszteségek keletkezési helyeire és a hasznosulás hatékonyságára (a pirossal jelölt veszteségek, illetve a zölddel jelölt visszaforgatott és sárgával jelölt élelemként hasznosuló nyilak aránya). A veszteségek túlnyomó része a mezőgazdasági hasznosítás során, a szántóföldi termelés egyes szakaszaiban alakul ki (a kijuttatott N-formák volatizációja és döntően felszín alatti vízkészletekbe való bemosódása miatt).

# Anthropogenic Nitrogen Flows



3-8. ábra – A nitrogén antropogén eredetű anyagforgalma, hasznosulási és veszteség formák. Kép forrása: [Matassa et al. \(2015\)](#)

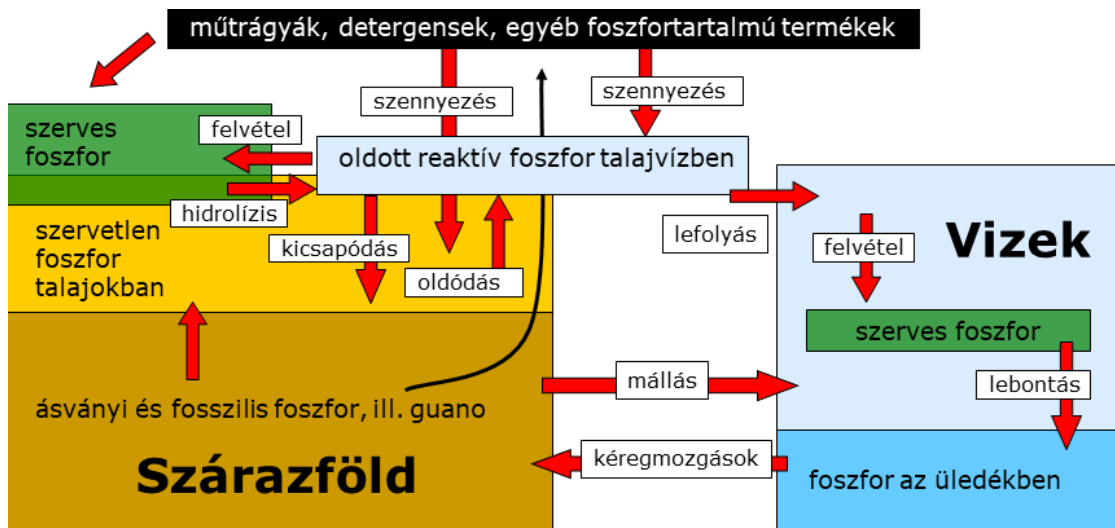
Inputs: belépő anyagáramok; Retained: visszatartott, visszaforgatott anyagáram; Food: élelem; Losses: anyagáram veszteségek; Antropogén inputs: emberi eredetű N-megkötés; Biological fixation in crops: növényi eredetű N-fixáció; Agriculture: mezőgazdaság; Volatilisation: gázképződés; Run-off: felszíni/felszín alatti lefolyás; Vegetable protein: növényi fehérje; Meat protein: állati eredetű fehérje; Domestic animal production: haszonállat tenyésztés; Deposition in animal rearing: felhalmozódás állattartó telepeken; Animal manure: szerves trágya; Manure loss/volatilisation: kimosódás/gázképződés szerves trágyából; Wild animals (mainly fish): vadon élő állatok (főként halak); Human waste/sewage: Emberi ürülék/szennyvíz;

További emberi beavatkozás a természetes nitrogén körfolyamatba a NO<sub>x</sub> gázok kibocsátása a fosszilis tüzelőanyagok égetése révén (közlekedés, energia ipar). A NO<sub>x</sub> gázok a széndioxidnál többszörte erősebb üvegházhatású gázok (ÜHG).

## 3.2.4 Foszfor

### 3.2.4.1 Természetes előfordulás és körforgás

A **foszfor** életfolyamatokban betöltött szerepe igencsak sokrétű, szinte minden anyagcsere folyamatban részt vesz. Építőeleme számos sejtalkotó vegyületnek: sejtmembránok, nukleinsavak fontos alkotórésze. Nélkülözhetetlen a fotoszintézisben, a légzésben és más alapvető biológiai szintézisfolyamatokban. Nagy jelentősége van a sejtek energiaháztartásában (ATP, ADP molekulák), az energia tárolásában és szolgáltatásában. Fő alkotóeleme a csontoknak, és kulcsszerepet játszik az örökletes tulajdonságokat hordozó vegyületekben (DNS, RNS stb.) is. A természetben nagy reakcióképessége miatt elemi formában nem, csak más atomokkal alkotott vegyületeiben fordul elő, ezen belül is legnagyobbbrészt szilárd halmazállapotban: elsősorban foszforásványokban (pl. apatit), kisebb mennyiségben – főleg régebben – szerves üledékekben (pl. guanótelepek). Emellett oldott formában, ortofoszfát ionként (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) is megtalálható, melynek kiemelt jelentősége, hogy a növények a számukra létfontosságú foszfort kizárólag így tudják felvenni.



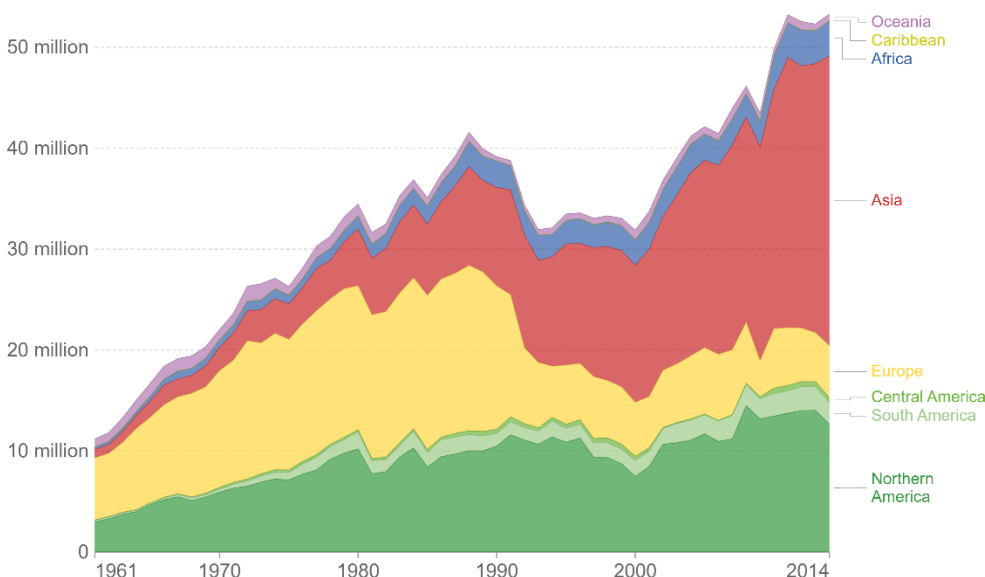
3-9. ábra – A foszfor természetes körforgása (színes) és az antropogén anyagáramok (fekete dobozok és nyilak). Kép forrása: saját szerkesztés (Budai Péter)

### 3.2.4.2 Emberi beavatkozások a természetes körfolyamatba

Amint a 3.2.1. fejezet bevezetőjében láttuk, a foszfor a növényi növekedés kulcsfontosságú eleme, gyakran maga a limitáló tényező. A foszfor azonban nem csak a mezőgazdaságban tölt be fontos szerepet. Jelentős felhasználási területe még a mosó- és tisztítószerke előállítás és az élelmiszeripar is.

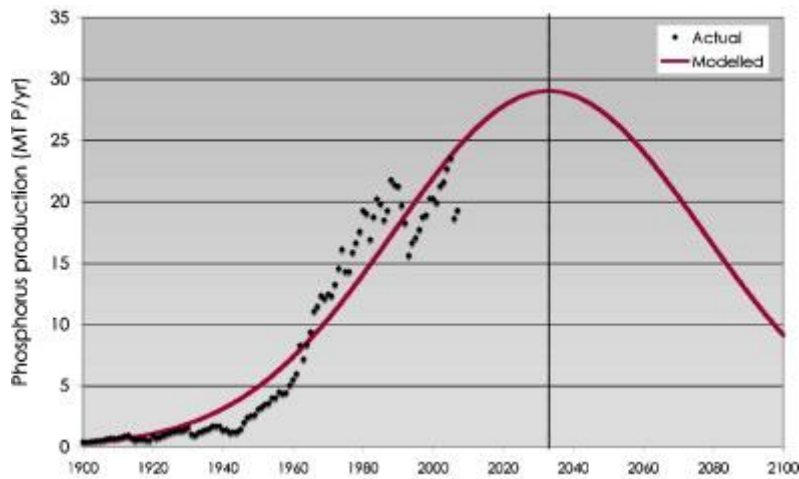
A foszfor emberi „előállítás” kezdetben a – többnyire Dél-Amerikában található – guanótelepek kitermelésével történt (a guanó madár- és denevérürülék takar). Ezek kimerülésével már csak a foszforásványok maradtak. A foszfor mesterséges kinyerésének feltalálása J. Bennet Lawes nevéhez fűződik; elsőként ő állított ugyanis elő szuperfoszfátot foszfátásványokból kénsavval 1842-ben.

Ma már tehát jellemzően bányászott foszfátásványokból állítják elő. Érdekesség, hogy a világ foszforkészletének háromnegyede egyetlen ország: az észak-afrikai Marokkó területén található; a többi országnak nagyságrenddel kevesebb apatit jutott. Ezzel szemben a legnagyobb termelők az USA, Kína, Marokkó és Oroszország.



3-10. ábra – Foszfát műtrágya termelés (tonna műtrágya / év). Forrás: [OurWorldInData](http://OurWorldInData)

A nitrogénhez képest fontos különbség, hogy a foszfor nem áll rendelkezésre korlátlanul. Ezért várható, hogy – az olajhoz hasonlóan a primer foszfortermelés mértéke egy csúcspont elérése után csökkenni fog, és elvezet a gazdaságosan kitermelhető készletek teljes kiaknázásáig. Egyes kutatások szerint ez már a 2030-as években megtörténhet.



3-11. ábra – A „foszforcsúcs”: a foszforteremelés múltbeli és modellezett jövőbeli alakulása. Függőleges tengely: Foszfor ásvány kitermelés [ $10^6$  t P / év] Forrás: [Cordell et al. \(2009\)](#)

### 3.3 Környezeti hatások, a környezetszennyezés folyamata

A 3.2 fejezetben megismertük néhány kiválasztott anyag természetes körforgását és azt, hogy az ember ebbe hol, hogyan, milyen léptékben avatkozik bele. Fókuszáljunk most erre az utóbbira: milyen hatással van az ember a környezetre? Ezek a hatások lehetnek pozitívak, azonban a figyelmünket sokszor inkább a negatív hatások keltik fel. Azok a helyzetek / pontok, ahol az ember valamilyen anyagot enged a környezetbe, ezzel – legtöbbször – elszennyezve azt. Ez utóbbi egyébként a klasszikus környezetvédelem kiindulópontja, mely az ember által okozott szennyezést vizsgálja, azt igyekszik minimalizálni. Vizsgálódásunkhoz – első lépésben – határozzunk meg néhány alapfogalmat!

A *környezeti hatás* az emberi tevékenység által okozott, környezeti szempontból értékelhető állapot változás. Folyamata: Hatótényező (a hatás kiváltója) → hatásfolyamat → hatásviselő (a hatásnak kitett élőlény, környezeti elem) és hatásterület (az a terület, ahol a környezeti tényezők a tevékenység következtében számottevően megváltoznak).

A környezeti hatások többféleképpen rendszerezhetők:

- (i) vannak közvetlen, és közvetett hatások
- (ii) térbeli kiterjedés szerint a hatás a lokálistól a regionálison és a kontinentálison át a globálisig terjed.
- (iii) időbeliség szerint megkülönböztethetünk időben állandósult és lökésszerű (havária), sztochasztikus (véletlen jellegű) valamint determinisztikus hatásokat
- (iv) léteznek szinergikus (egymást felerősítő) hatások
- (v) beszélhetünk több közeget érintő hatásokról (pl. savasodás)
- (vi) megkülönböztethetünk reverzibilis (visszafordítható) és irreverzibilis (vissza nem fordítható) hatásokat.

#### 3.3.1 Fogalommeghatározások

A **környezetszennyezés** a Környezet- és Természetvédelmi Lexikon szerint „a környezetet, ill. az embert közvetve vagy közvetlenül veszélyeztető vagy károsító jelenség, folyamat, negatív környezeti hatás, amely valamely környezeti elem (föld, víz, levegő, élővilág, táj) fizikai, kémiai vagy biológiai szennyeződését, károsítását eredményezi.” Egy másik definíció szerint pedig „az emberi társadalom környezetének kedvezőtlen irányú megváltoztatása, a környezeti elemek (levegő, víz, talaj stb.) előnytelen összetétel-változásával és minőségromlásával járó tevékenység, illetve jelenség. Beszélhetünk fizikai (zajszennyezés, hőszennyezés, fényszennyezés, radioaktív szennyezés), kémiai (légszennyezés, felszíni és felszín alatti vizek szennyezése, talajszennyezés), vagy biológiai természetű (mesterségesen átalakított – például génmódosított – vagy tájidegen élőlények betelepítése/alkalmazása) környezetszennyezésről.”

Milyen **környezetszennyező anyagokat** ismerünk? Mikor mondjuk egy anyagra, hogy az a környezetet szennyezi? Az előbb már említett lexikon szerint a környezetszennyező anyagok „a környezetet, ill. az embert közvetve vagy közvetlenül veszélyeztető vagy károsító jelenségeket, negatív környezeti hatásokat okozó anyagok (anyagkeverékek), amely koncentrációjuknál fogva vagy ettől függetlenül, egyszerűen a környezetben való megjelenésük révén a

környezet szennyeződését okozzák.” Ugyanebben a lexikonban a szennyező anyag szócikk állítása: „Szennyező anyag: 1) minden, hatását tekintve veszélyes elem, vegyület vagy anyag, amely az adott közegben (talaj, víz, levegő) természetes körülmények között nem vagy más eloszlásban fordul elő; 2) az a vegyi anyag, amely a környezetben a szennyezettségi határérték alatt fordul elő. Eredetét tekintve lehet természetes vagy antropogén.” Fontos megjegyezni, hogy az idő előrehaladtával egyre bonyolultabb, veszélyesebb környezetszennyező anyagokkal kell foglalkoznia a környezetvédelemnek. Míg az ipari forradalom előtt a kibocsátott anyagok a természetből való kinyerésüket követően csak kis mértékben kerültek módosításra, addig napjainkban rengeteg szintetikus anyagot használunk; ezek alapanyagait ugyan szintén a természetből nyerésük, de a végtermék előállításához komoly változtatásokon (pl. vegyi folyamatokon, kezeléseken) mennek keresztül.

Fontos megjegyezni azt is, hogy az, hogy valamit szennyezésnek tekintünk-e, viszonyítási pont kérdése is. Az Izraeli Holt-tenger természetes sótartalma nem csak a hazai édesvizekben, de a világ legtöbb tengerében elképzelhetetlen, komoly szennyezésre utalna. A nagyon alacsony pH legtöbbször szintén emberi tevékenységre, ipari szennyezésre utal, azonban egyes vulkánok krátertavánál ez természetes jelenség. Egyes ausztrál illetve afrikai tavaknál a magas sótartalom egy különleges algafaj megjelenését okozza, rózsaszínűre színezve ezzel a vizet – a helyszínek nem hogy emberi szennyezésre utalnak, hanem egyenesen természetvédelmi oltalom alatt állnak. Az aszfalt a hatályos magyar szabályozás szerint veszélyes hulladék – de van a Földön olyan hely, ahol természetes módon megtalálható. A szennyezések drasztikus megjelenését legtöbbször az ipari forradalomhoz kötjük. Van ugyanakkor olyan hely a Földön (pl. Spanyolország, Rio Tinto), ahol már a középkorban is ércet bányásztak – mellékhatásként erősen elszennyezve az érintett terület vízfolyásait.

Az **emisszió** a szennyezőanyag kibocsátása (pl. egy tankhajóból kiömlő olaj, vagy egy szennyvízbevezetés egy természetes vízbe). Lokáltság szerint az emisszió történhet pontszerűen (pl. egy gyár kéményén keresztül, vagy egy szennyvízkifolyón), vagy térben megoszlóan (vonalszerűen: egy út vagy vízfolyás mentén; diffúz: egy nagyobb területen, pl. egy város vagy egy szántóföld területén). Időszakosság tekintetében megkülönböztethetünk eseti (balesetszerű, havariaszennyezést), és folyamatos kibocsátásokat. A kibocsátott szennyezőanyagot vagy annak valamely indikátorát **tömeg/idő** dimezióval jellemezzük (pl. tonna/év, kg/nap, g/s).

A befogadóban kialakuló szennyezettségi állapotot **imisszió**nak nevezzük. A leggyakrabban vizsgált közegek a légtér; a természetes felszíni és felszín alatti vizek (vízfolyás, tó, tározó, talajvíz, rétegvíz); a talaj; vagy pedig élőlények szövetei (pl. tüdőszövet, májszövet). Az imissziót tömeg/térfogat (pl. g/m<sup>3</sup>) dimezióval jellemezzük, néha száraz anyagra vonatkozóan.

Az emisszió és az imisszió közötti folyamatot **transzmisszió**nak hívjuk. Ez fejezi ki, hogy a kibocsátás (emisszió) milyen kapcsolatban áll a szennyezettségi állapottal (imisszióval).

A transzmisszió során a szennyezőanyag térben áthelyeződik (transzport); mennyisége csökkenhet (hígulás, kiülepedés, kivegőzítés); továbbá fizikai, kémiai és biológiai átalakulásokon (metabolizmusokon) mehet keresztül (pl. adszorpció, biológiai lebontás, radioaktív bomlás, stb.). A transzmisszió függ tehát a befogadó jellemzőitől és a szennyező anyag tulajdonságaitól.

**Transzport folyamatok:** a transzmisszió leírása, a befogadó közegben szennyezőanyagok sorsát meghatározó mechanizmusok összessége. Típusai: **konvektív transzport:** a szennyezőanyag terjedése a befogadó közeg áramlási sebességétől függően. **Diffúzió:** a koncentráció kiegyenlítődésként eredményező elkeveredési folyamat, nagysága arányos a közeg két pontja közötti koncentráció eltéréssel (koncentráció gradiens). Nem konzervatív anyagok esetében a forrás/nyelő tagokat is figyelembe kell venni.

**Lamináris áramlás:** réteges (rendezett) áramlás, az áramvonalak egymással párhuzamosak. A természetben ritkábban fordul elő (pl. talajvíz).

**Turbulens áramlás:** gomolygó (rendezetlen) áramlás, melyet a sebesség véletlenszerű ingadozásaiból adódó turbulens elkeveredés jellemez.

**Turbulens diffúzió:** a sebesség turbulens ingadozása által okozott elkeveredés



**Konzervatív anyag:** olyan oldott, a környezetével reakcióba nem lépő anyag, mely a transzport folyamatok során nem távozik el a vizsgált rendszerből (a befogadóból nem távozik el, nem ülepszik, nem bomlik le, nem adszorbeálódik, nem csapódik ki, nem levegőzik ki stb.), azaz a szállító közegre felírt anyagmérleg közbenső források és nyelők nélkül zárt. A valóságban előforduló szennyezők többsége nem konzervatív anyagként viselkedik.

**Átviteli tényező (transzmissziós tényező):** a transzport folyamatok hatását kifejező tényező, valamely „1.” pontban bevezetett szennyező anyag hatása a „2.” pontban létrehozott koncentrációra. Konzervatív szennyezőknél csak az elkeveredéstől és a hígulástól, nem konzervatív anyagoknál az ülepedéstől és egyéb fizikai-kémiai-biokémiai folyamatoktól is függ. Általában (de nem minden szennyezőre!) az emisszió és az immisszió kapcsolata lineáris, azaz

$$dC_2 = a_{12} \cdot E_1$$

ahol

$dC_2$  a koncentráció változás a befogadóban („2.” pont), [tömeg / térfogat]

$E_1$  az emisszió az első pontban [tömeg / idő]

$a_{12}$  az átviteli tényező az „1.” és a „2.” pont között [idő / térfogat].

Az átviteli tényezőt mindig két pont között értelmezzük, mivel értéke függ a távolságtól (kivéve konzervatív anyag esetében a teljes elkeveredést követően. Ilyen esetben az átviteli tényező konstans).

**Tartózkodási idő:** a vizsgált térben található anyagmennyiség és a kiürülési sebesség hányadosa. A tartózkodási időt leggyakrabban  $\tau$ -val (tau, görög betű), ritkábban  $t$ -vel jelöljük, és idő dimeziójú (nap, év).

### 3.3.2 Levegő szennyezési alapismeretek és példák

A légszennyezés az Egészségügyi Világszervezet (WHO) definíciója szerint „a belső vagy külső környezet olyan kémiai, fizikai vagy biológiai hatású anyaggal való szennyeződése, mely megváltoztatja a légkör természetes állapotát.”

#### 3.3.2.1 A föld légkörének összetétele

Korábban már említettük, hogy az ipari forradalommal (1769 – ) jelentős változásnak indult a környezet szennyezésének módja. Igaz ez a légszennyezésre is. Míg a XVIII. századig a légszennyezés a háztartási kibocsátásokból (hulladékok rothadási gázai, bűzei és fűtése) valamint a kéziipar kibocsátásaiból (kovácsok, mészégetők, üvegfúvók szennyező anyagaiból) állt, addig az ipari forradalom kezdete óta egyre több ipari eredetű szennyezőanyagot (vegyszereket, gázokat, porokat) bocsát az emberiség a levegőbe. A közlekedés a belső égésű motorok feltalálásával (1861) és elterjedésével újabb szennyezési forrást jelentett. Harmadik forrásként a mezőgazdasági tevékenységeket, elsősorban a nagytablás, ipari mezőgazdaságot jelölhetjük meg. Az aratást követően hatalmas területek válnak védtelenné a szél és a víz által okozott erózióval szemben, de direkt szennyezőanyag kijuttatás is zajlik (növényvédőszeresek). Összességében jelentősen megváltozott, és napjainkig változóban van a szennyezés mennyisége és összetétele egyaránt.

A föld légkörének három legjelentősebb összetevője a nitrogén ( $N_2$ , 78%), az oxigén ( $O_2$ , 21%) valamint az argon (Ar, 0,9%) és más nemesgázok. Ezek összesen tehát a légkör 99,9%-át alkotják, tartózkodási idejük (más szóval kiürülési idejük) több ezertől több millió évig terjed, ezért **állandó alkotóknak** nevezzük őket. A maradék 0,1%-ban szerepelnek a **változó alkotók** ( $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $O_3$ ), melyek tartózkodási ideje 1-100 év, valamint az **erősen változó alkotók** ( $H_2O$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$ ), melyek tartózkodási ideje 1 év alatti.

#### 3.3.2.2 A légszennyező anyagok csoportosítása

A légszennyező anyagok lehetnek természetes vagy antropogén eredetűek. A természetes eredetű légszennyezők biológia vagy egyéb, embertől független folyamatok során keletkeznek. Ilyen például egy vulkán kitörése. [Az izlandi Eyjafjallajökull vulkán 2010-es kitörését követően egy hétig le kellett állítani a légiközlekedést Európa északi részén.]

A 3-1. táblázatban bemutatjuk a legfontosabb természetes eredetű légszennyező anyagokat és forrásukat.

3-1. táblázat – Jelentősebb természetes légszennyező anyagok és források.

Légszennyező anyag(csoport)	Természetes források
SO <sub>2</sub> (kén-dioxid)	vulkánok, erdőtüzek
NH <sub>3</sub> (ammónia)	szerves anyagok bomlása
NO <sub>x</sub> (nitrogén-oxidok)	aerob biológiai bomlás, erdőtüzek, villámlás
CH <sub>4</sub> (metán)	anaerob biológiai bomlás (mocsarak, óceánok)
por	vulkánkitörések, szélviharok (homok, talaj)
pollenek	élővilág
növényi eredetű illékony szerves vegyületek (izoprének, terpének)	élővilág
só részecskék	tengervíz
Rn (radon)	kőzetek radioaktív bomlása

Az emberi eredetű légszennyezők lehetnek elsődlegesek (ezek közvetlenül a kibocsátó forrásból jutnak a légkörbe) vagy másodlagosak (melyek az elsődleges szennyezőből keletkeznek adszorpció, kémiai, vagy fotokémiai reakciók termékeként). A 3-2. táblázatban bemutatjuk a legjelentősebb elsődleges és másodlagos légszennyező anyagokat és forrásukat illetve keletkezésük módját.

3-2. táblázat – Jelentősebb elsődleges és másodlagos antropogén légszennyező anyagok.

Szennyező	Főbb antropogén források / keletkezés módja
CO <sub>2</sub> , CO	energiaipar, közlekedés, fűtés, kohászat, cementipar, erdőirtás
NO <sub>x</sub> (NO, NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O stb.)	műtrágyázás, energiaipar, közlekedés, fűtés, szennyvíztisztítás
SO <sub>2</sub>	energiaipar, kénsavgyártás, fémkohászat, papíripar, közlekedés, fűtés
CH <sub>4</sub>	szénhidrogén-ipar, állattartás, rizstermelés, hulladéklerakók
káros hatású szerves vegyületek (policiklusos aromás szénhidrogének – PAH; illékony szénhidrogének – VOC)	szénhidrogén- és vegyipar, kohóipar, közlekedés
szálló por (particulate matter – PM)	kohászat, energiaipar, közlekedés
nehézfémek: Hg, Cd, Pb, Cu, Zn	színesfém-ipar, közlekedés, energiaipar
O <sub>3</sub> (ózon)	Oxigén gázból fotokémiai reakció során
peroxi-acetil-nitrátok (PAN)	Szénhidrogének → peroxi-acetil-gyök → peroxi acetyl-nitrát (UV, fotokémiai szmog jelenlétében).
aldehidek: formaldehid, acetaldehid, stb.	

### 3.3.2.3 A légszennyező anyagok környezeti hatásai

Történetileg a legrégebbi súlyos (regionális területi léptékű) légszennyezési probléma a **savas eső**. Ennek során a közlekedés és főleg az energiatermelés (széntüzelés) során légkörbe juttatott szén-dioxid, nitrogén-dioxid és főleg a kén-dioxid az alacsony puffer kapacitású területeken az eső pH-jának csökkenését okozza. A savas eső pusztító hatással bír mind a természeti, mind az épített környezetre (mészkö műemlékek). Mindez elsősorban Európa és Észak-Amerika északi részeit fenyegeti. A probléma orvoslására a széntüzelésű erőművekbe ma már füstgáz kéntelenítőt építenek, mely mész adagolásával megköti a kéndioxidot.

A klórozott-fluorozott szénhidrogéneket (röviden CFC-vegyületeket) a XX. század közepén a kedvező hőtágulási együtthatójuk miatt hűtőszekrények hűtőközegeként alkalmazták. A légkörbe kerülve ezek a gázok a földet védő magaslégköri **ózonréteg elvékonyodásához** vezettek, elsősorban az Antarktisz fölött. A vékonyabb ózonrétegen (klasszikus megnevezés szerint „ózonlyukon”) keresztül a normálisnál több UV-sugárzás éri el a földet, mely a műanyagok, gumik idő előtti öregedéséhez, töredezéséhez vezet. Az 1987-ben Montrealban aláírt egyezmény során a

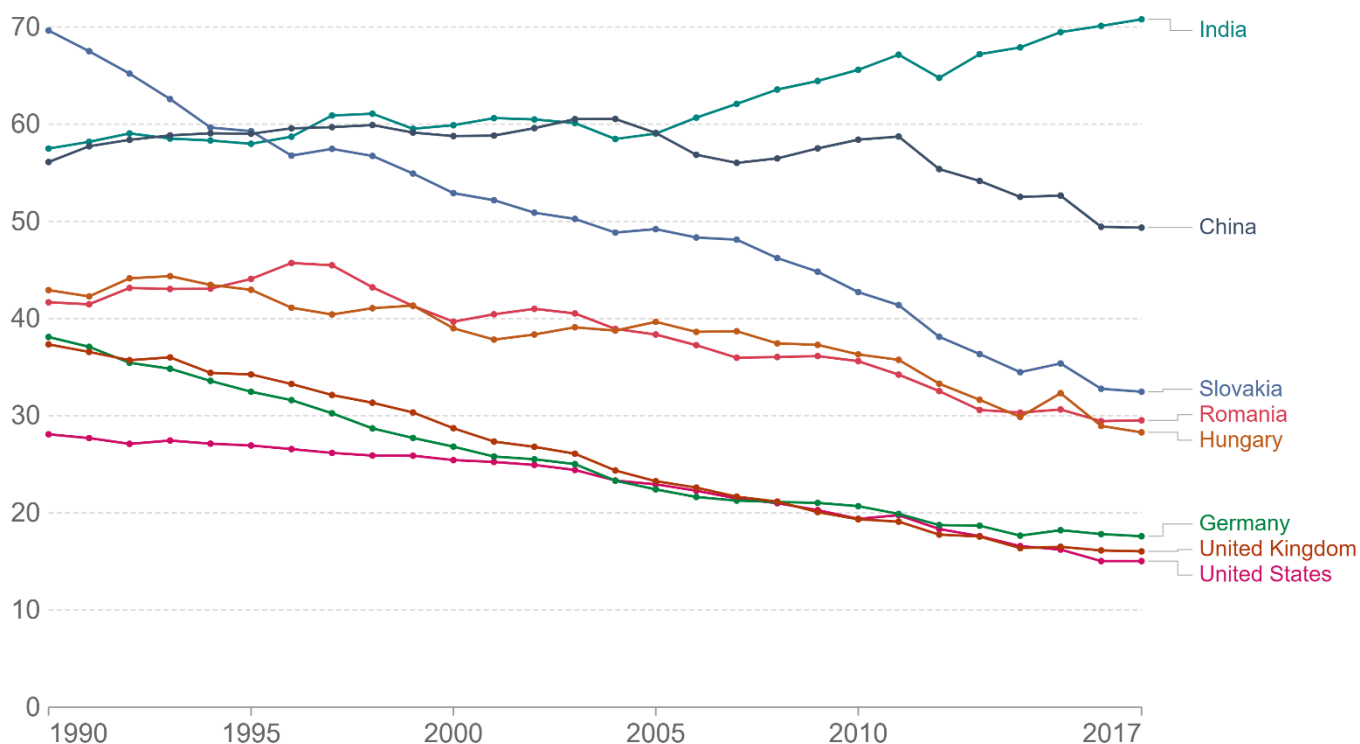
Föld országai megállapodtak a CFC gázok kibocsátásának csökkentésében, melynek hatására az ózonréteg vékonyodása megállt.

Az **üvegházhatású** gázok (röviden: ÜHG-k, angolul green house gases, GHG) csoportjába a szén-dioxid, a metán, a dinitrogén-oxid és a freon tartozik. Ezek rendre 55, 15, 6 illetve 24%-ban járulnak hozzá a földi üvegházhatáshoz, a föld melegedéséhez. Az aeroszol részecskék ezzel ellentétést hatást gyakorolnak, negatív sugárzási kényszert jelentenek.

#### 3.3.2.4 Légszennyező anyagok egészségügyi hatásai

A szénmonoxid a vér hemoglobinjából az oxigént kiszorítja (nagyvárosok közlekedési csomópontjaiban, rosszul szellőztetett alagutakban, mélygarázsokban a károsító szintet is elérheti). A kéndioxid a szem és felső légutak nyálkahártyáit izgatja, vízzel reagálva a tüdőben sav keletkezhet. A nitrogén-monoxid és a nitrogén-dioxid (gyűjtőnéven NO<sub>x</sub>) is mérgező. Vízzel való reakciójuk során a tüdőben sav keletkezhet és tágítják a vérereket. Az ózon sejtroncsoló hatású így az élővilág valamennyi alkotóján kifejti hatását. A policiklusos aromás szénhidrogének (tökéletlen) égés (belső égésű motorok, avarégetés, fatüzelésű kályhák és kazánok használata) során kerülnek a légtérbe. Számos rákkeltő vegyület van köztük. Ugyanígy az égés, égetés melléktermékei a por, a korom, és a pernye. Közülük legveszélyesebbek a 10, ill. 2,5 µm alatti szemcseméretű részecskék (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>). Felületükön egyéb szennyezők adszorbeálódhatnak (pl. Hg, Pb, melyek idegrendszeri károsodáshoz vezethetnek).

Az Egészségügyi Világszervezet becslése szerint évente 3 millió ember hal meg kültéri légszennyezéstől. A definíció szerint légszennyezés okozta halálról akkor beszélhetünk, ha valaki (hónapokkal vagy évekkel) előbb hal meg, mint az a légszennyezés nélkül várható lett volna. Sok esetben a légszennyezés súlyosbít bizonyos fenálló szív- és légzőszervi betegségeket, különösen veszélyeztetve az asztmás betegeket. A légszennyezéshez köthető betegségeknek több kiváltó oka is lehet. A légszennyezés okozta halálozásoknak három fő kiváltó oka a szilárd tüzelőanyagok beltéri égetése (háztartási légszennyezés), illetve kitettség kültéri ózon- (O<sub>3</sub>), és aeroszol szennyezésnek. Ugyanakkor a légszennyezéshez köthető halálozások száma a legtöbb országban évről évre csökken (még úgy is, hogy sok fejlődő ország népessége mindeközben növekszik). Ennek oka az egészségügyi ellátás színvonalának folyamatos növekedése. 2015-ös adatok szerint világ szinten 100.000-ból 10 ... 400 ember hal meg légszennyezetség miatt évente. A legtisztább ország Új-Zéland, míg a legmagasabb szám Afganisztánra vonatkozott. Magyarországon a 100.000 lakosra vonatkoztatott halálozások száma napjainkban 30, ami 30%-os csökkenést jelent a 90-es évek eleji értékhez képest.



3-12. ábra – Környezeti levegő szennyezéséből eredő halálesetek számának alakulása. Forrás: [OurWorldInData](https://ourworldindata.org/)

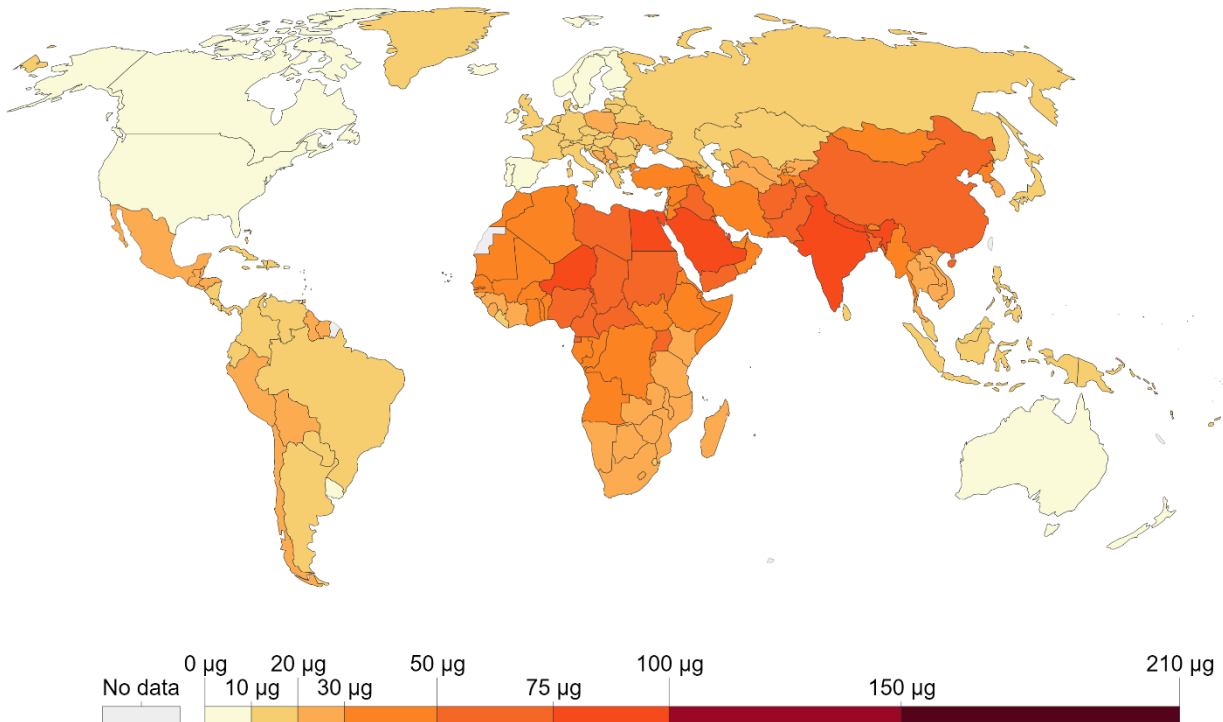
Koncentráljunk most a PM2.5-re, mely az emberi egészségre az egyik legveszélyesebb szennyezőanyagfajta! Bár számos szennyezőanyag lehet káros az egészségünkre, a 2,5 µm-nél kisebb átmérőjű részecskék különösen nagy veszélyt jelentenek, mivel ezek a tüdőbe jutva árthatnak a légzőszerveknek. A légköri aeroszol mikroszkópikus részecskék sokasága, melyek a Föld légkörében lebegnek. Forrásuk lehet természetes vagy mesterséges. Az alábbi ábrákon ezeknek a PM2.5 részecskéknek az éves átlagos koncentrációja látható µg/m<sup>3</sup> –ben kifejezve. az európai és észak-amerikai országokban, valamint Óceániában az érték 5-10 µg/m<sup>3</sup> körüli volt, ami durván 15-20-szor alacsonyabb, mint ugyanez Egyiptomban, Szaúd-Arábiában vagy Indiában ahol az értékek a 100 µg/m<sup>3</sup>-t is elérhetik.

## Exposure to air pollution with fine particulate matter, 2017



Population-weighted average level of exposure to concentrations of suspended particles measuring less than 2.5 microns in diameter (PM2.5).

Exposure is measured in micrograms of PM2.5 per cubic metre (µg/m<sup>3</sup>).



Source: Brauer et al. (2017) via World Bank

OurWorldInData.org/air-pollution/ • CC BY

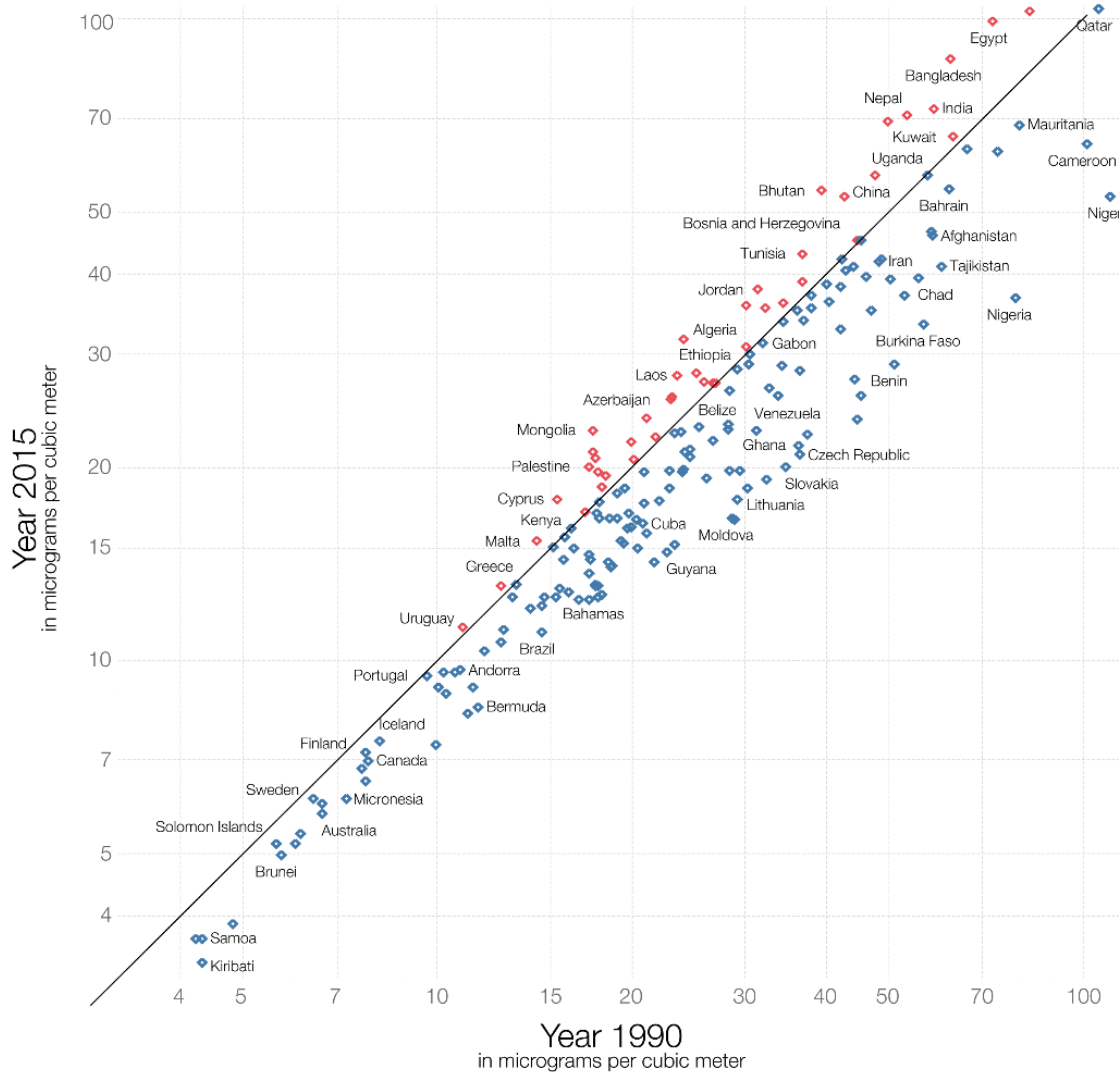
3-13. ábra – Népességgel súlyozott átlagos PM2,5 koncentráció a levegőben. Forrás: [OurWorldInData](https://ourworldindata.org).

A következő grafikon az 1990-es és a 25 évvel későbbi helyzetet mutatja.

# Exposure to particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in 1990 and 2015

Shown is the mean annual exposure to particulate matter with a diameter of 2.5 micrometers and smaller in micrograms per cubic meter for the population of 193 countries.

Countries above the black 45° line experienced an increase in exposure, the blue countries below that line experienced a decline in exposure to particulate matter.



Data source: Brauer, M. et al. 2016, for the Global Burden of Disease Study 2015. (obtained via the World Development Indicators published by the World Bank)  
The interactive data visualization is available at [OurWorldinData.org](http://OurWorldinData.org). There you find the raw data and more visualizations on this topic. Licensed under [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) by the author Max Roser.

3-14. ábra – PM<sub>2.5</sub> részecskéknek való kitettség 1990-ben és 2015-ben. Forrás: [OurWorldinData](http://OurWorldinData.org).

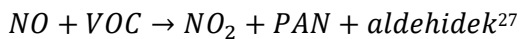
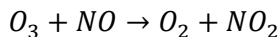
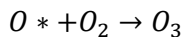
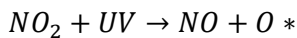
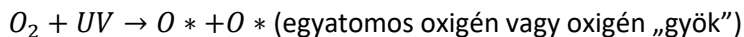
### 3.3.2.5 London típusú szmog

1952. decemberének első napjaiban ködös, szélcsendes idő volt Londonban 0 °C körüli hőmérséklettel. Különösen a kora reggeli órákban a látási viszonyok is nagyon leromlottak. Ekkoriban még London belső részeiben is sok gyár, erőmű volt található, amelyek – a házatartások jelentős részéhez hasonlóan – szén eltüzelésével nyerték a működésükhöz, melegítésükhöz szükséges energiát. A rossz levegőminőség miatt ugrásszerűen megnőtt a légzési nehézségekkel, szív- és érrendszeri problémákkal küzdők száma, megteltek a kórházak intenzív osztályai. Az időjárási helyzet és az emberi tevékenységek szerencsétlen együttállása révén a szén- és olaj égéstermékek (szénhidrogének, szénmonoxid, kéndioxid) légköri koncentrációja a szokásos és egészséges mérték többszörösére emelkedett. A jelenség itt kapta a nevét: füstköd, angolul smoke + fog = smog, magyarul inkább ennek magyarított verziója, a „szmog” honosodott meg. Csak utólag, a halálozási statisztikák vizsgálatakor derült ki, hogy a kialakult redukív körülmények miatt légzőrendszeri, érrendszeri elégtelenségben több százan haltak meg néhány nap leforgása alatt.

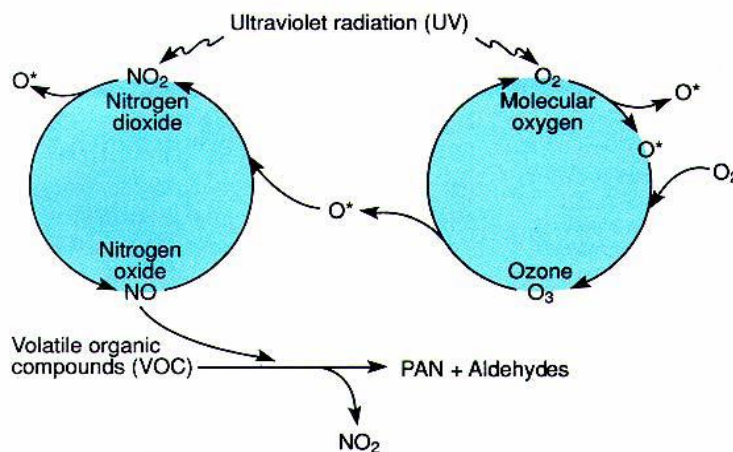
### 3.3.2.6 Los Angeles típusú szmog

A London típusú szmoggal ellentétben a Los Angeles típusú szmog nem köthető időben ennyire egzakt eseményhez. E típus kialakulásához is szükséges azonban bizonyos emberi szennyezések és időjárási körülmények kedvezőtlen együttállása. A Los Angeles típusú szmog nyáron, zavartalan napsugárzás idején alakul ki akkor, ha magas a

gépjárműforgalom, pontosabban az által kibocsátott szénhidrogének, nitrogénoxidok, szénmonoxid koncentrációja. Megjelenés, hatása nem köthető a reggeli órákhoz – a nap során más-más szennyezőanyagok koncentrációja kerül túlsúlyba – napnyugtával azonban a jelenség elmúlik. Szemben a London típusú szmoggal, itt oxidáló szmogról beszélhetünk, mely légúti panaszokat, korróziót okoz. A Los Angeles típusú szmog kialakulásában részt vevő főbb fotokémiai reakciók az alábbiak.

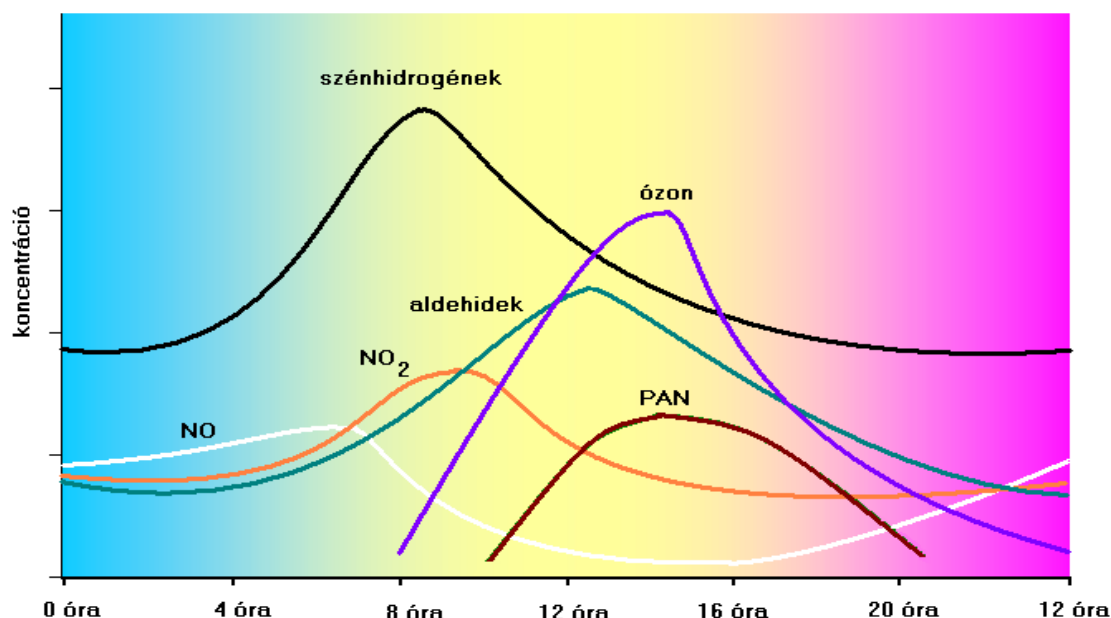


Nettó eredmény:



3-15. ábra – A Los Angeles típusú szmog kialakulásában részt vevő néhány fotokémiai reakció.

<sup>27</sup> PAN = peroxi-acetil-nitrátok



3-16. ábra – A fotokémiai folyamatokban a napsugárzás jelentős szerepe miatt a nyálkahártya irritáló vegyületek (ózon, PAN, aldehidek) koncentrációja a déli órákban éri el a maximumát, majd napnyugta után jelentősen csökken.

3-3. táblázat – A London és a Los Angeles típusú szmog főbb jellemzőinek összevetése.

	London	Los Angeles
<b>időjárás</b>	hűvös, téli idő, szélcsend, köd	zavartalan napsugárzás (UV sugárzás): tisztít idő, szélcsend
<b>emberi hatás</b>	szén- és olajtüzelés	gépjármű forgalom
<b>emberi szennyezők</b>	$C_xH_y$ , CO, $SO_2$	$C_xH_y$ , $NO_x$ , CO
<b>időbeliség</b>	kora reggeli órákban	napszakonként más-más szennyezőanyagok dominálnak. Napnyugtával megszűnik
<b>kémhatás</b>	reduktív	oxidatív
<b>környezeti hatások</b>		korrózió
<b>egészségügyi hatások</b>	légúti panaszok, szív- és érrendszeri panaszok	légúti panaszok

A felszín közeli ózon troposzférikus ózon nem keverendő össze a 15 – 35 km-es magasságban található magas légköri, ún. stratoszférikus ózonnal. Míg előbbit (másodlagos) környezetszennyező anyagként tartjuk számon utóbbi fontos szerepet játszik a föld légkörét a nap felől elérő, de az élővilág szempontjából káros UV-sugarak kiszűrésében (ld. 3.3.2.3. fejezet).

### 3.3.2.7 Légszennyező anyagok terjedése, a légszennyezés csökkentése

A kémény elhagyását követően a füstgáz még emelkedik bizonyos magasságig, majd az elméletileg vízszintes széliránynak megfelelő irányba fordulva füstcsóvát képez. A csóva középvonala a széliránnyal uralkodó irányba mutat, a csóva egyre szélesebb, a csóván belül pedig a füstgáz koncentrációja mind vízszintes, mind függőleges irányban Gauss-szerű haranggörbével írható le. A kibocsátott füstgáz koncentrációja a tér tetszőleges pontján, t időben

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(\frac{-(z - H_{eff})^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z + H_{eff})^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

ahol

$H_e$  az effektív kéménymagasság:  $H_e = H_s + \Delta h$

$H_s$  a geometriai kéménymagasság

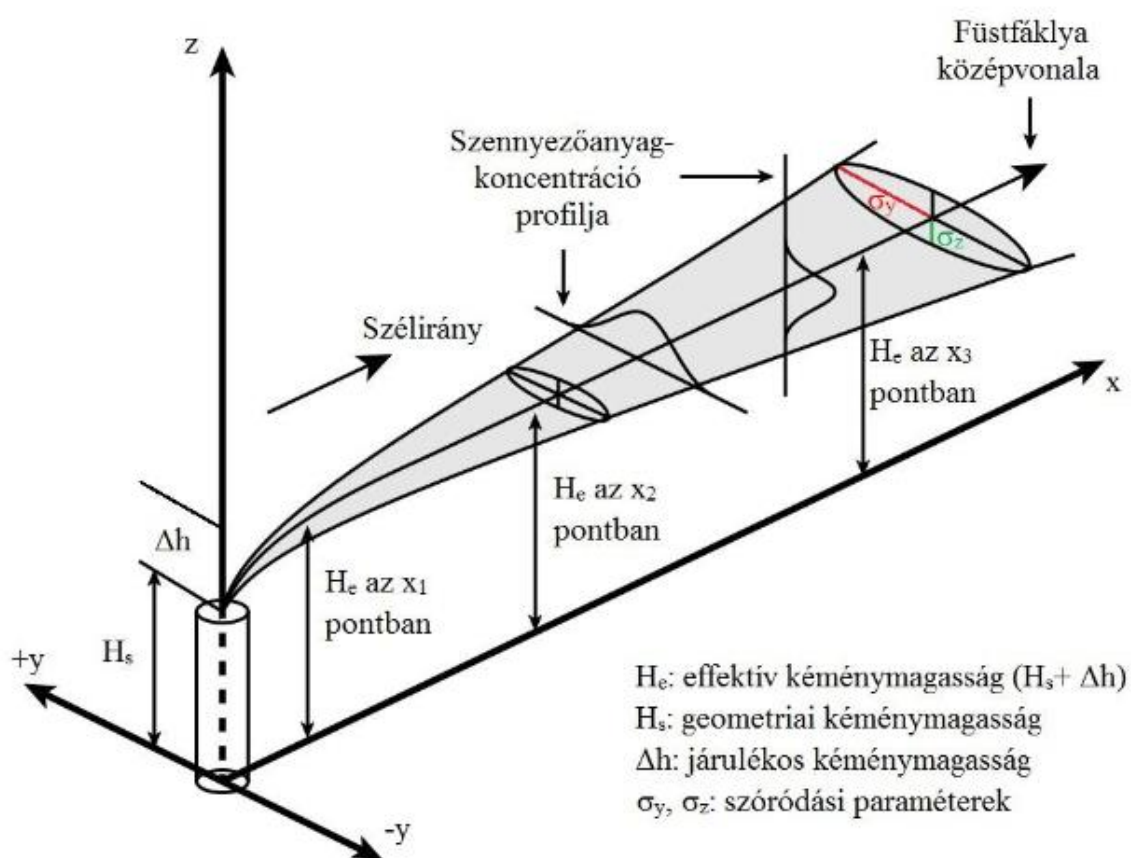
$\Delta h$  a járulékos kéménymagasság

$Q$  a kibocsátott füstgáz hozama

$x, y, z$  koordináták

$t$  idő koordináta

$\sigma_y, \sigma_z$  szóródási paraméterek



3-17. ábra – A füstgáz szétterülése.

A fenti eset elméleti, nem veszi figyelembe a légkör állapotát. A valóságban a füstgáz terjedését nagy mértékben befolyásolja a légkör aktuális állapota is. Az adiabatikus állandó szerint a légkör hőmérséklete fölfelé haladva 100 m-enként 1°C-t csökken. Ebben az esetben a függőlegesen elmozduló légtömeg a környezetével azonos hőmérsékletű és megegyező sűrűségű („termikus egyensúlyi állapot”). Ennél nagyobb csökkenés labilis állapotot eredményez, a füstgáz gyors szétterjedését segíti elő (a fenti képletbe ilyenkor nagyobb  $\sigma$  értéket helyettesítünk). A -1°C / 100m értéknél kisebb csökkenés, vagy akár a fölfelé haladva növekvő hőmérséklet stabil állapotot jelent, a füstgáz szétoszlását hátráltatja.

Azt a légréteget, melyben a földfelszíntől távolodva egyre magasabb hőmérsékletet mérünk, inverziós rétegnek nevezzük. Amennyiben ennek határa a csóva alatt van, úgy a csóva felfelé terjedését segíti elő, tehát a felszín közelébe



jutó szennyezést csökkenti. Ha az inverziós réteg a csóva fölött található, akkor a csóva lefelé „nyomódik”, a szennyezés az élővilág közelében terjed.

MIndezek az állapotok térben és időben is akár rövid idő alatt is változhatnak. Alap esetben a felszín közeli hőmérsékletnek napszakos ingadozása van: nappal a besugárzás hatására a felszín fölmelegszik, ezért a felszín közelében az átlag 0.65 °C / 100 m értéknél meredekebben csökken hőmérséklet. Éjjel ezzel szemben kisugárzás történik: a földfelszín a föltte lévő légrétegeknél jobban lehűlhet.

A füstgáz tisztítására elterjedt módszerek négy kategóriába sorolhatók. Az abszorpciós módszerek alkalmazása során a füstgázokat valamilyen folyadékban vezetik át, a káros összetevőket a folyadékban nyeletik el. Itt lejátszódhatnak fizikai és/vagy kémiai reakciók is. Példa a meszes / mésztejes füstgáz-kéntelenítés. Az adszorpciós módszerek szilárd anyag (pl. aktív szén vagy műgyanta) felületén kötik meg a szennyezőket. A lejátszódo folyamat ez esetben is lehet fizikai és / vagy kémiai is. A szelektív katalitikus reakciók kifejezetten kémiai reakciók valamely azt elősegítő (katalizáló) anyag jelenlétében. Legismertebb példája a gépjárművek katalizátora, ahol a motor égésteréből távozó szénhidrogéneket, szénmonoxidokat, nitrogénoxidokat kötik meg illetve választják le a füstgázból. A porleválasztásos módszerek az apró részecskék szűrését / ülepitését jelentik fizikai módon. Történhet szárazon (porkamrák /-csapdák, szűrők) vagy nedvesen (nedves mosók) illetve elektromos áram segítségével (elektrosztatikus szűrők).

### 3.3.3 A vizek szennyezése: kronológia

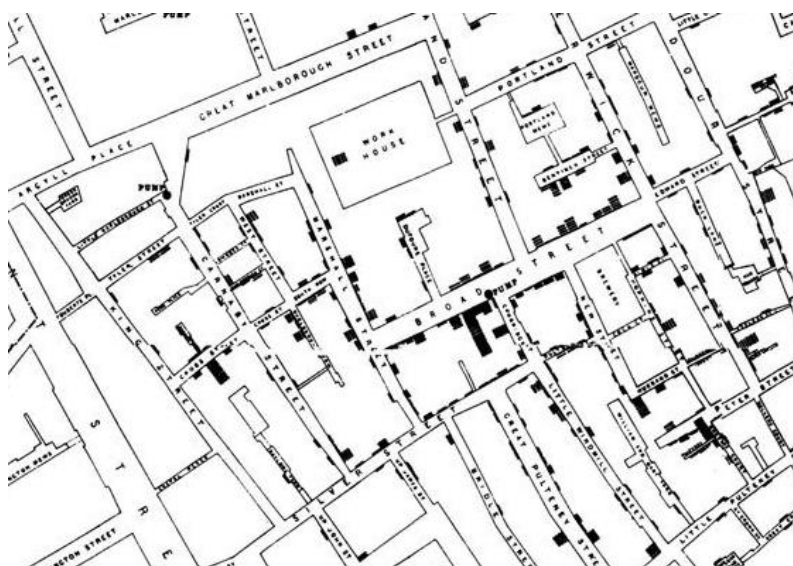
„Tiszta” vizet a természetben nem találunk, azt csak a legmodernebb technikával (például fordított ozmózissal) lehet előállítani. A „természetes” víz – a vízi élővilág élettere – különös kémiai összetételű oldat, és egyúttal bonyolult keverék is. Helytől és időtől függően mindig tartalmaz oldott és szilárd (partikulált), szerves és szervesetlen anyagokat. Ezek lehetnek természetes és mesterséges eredetűek. Szennyezésnek a természetes vizeket károsan befolyásoló, vízgyűjtőről bejutó anyagokat tekintjük, amelyek a „vízminőség” romlását idézik elő. A vízminőséget általában a használatoknak (ivás, öntözés, fürdés stb.) és az élővilág megőrzésének való megfelelés alapján osztályozzuk.

#### 3.3.3.1 Járványok: a vízszennyezés kezdete

Az öblítéses toalett a civilizáció egyik legjelentősebb innovációja. Feltalálója 1596-ban Sir John Harrington angol főnemes (bár kezdetleges formában már Minósz király krétai palotájában is használták i.e. 1700 körül), aki Erzsébet királynőnek is készített egy prototípust. Az udvar azonban nem mutatott érdeklődést és a találmány a feledés homályába veszett, egészen a XIX. század elejéig, amikor kényelmi okok miatt egyre népszerűbbé vált. Az angol WC azonban nagyban hozzájárult a járványok terjedéséhez. Az előregedett emésztőgödrök nem tudták tárolni a megnövekedett szennyvízmennyiséget és elősegítették az akkor még ismeretlen kórokozók bejutását az ivóvízbe. A kolera, tífusz, hepatitisz stb. következtében 1849-ben Angliában hetente több ezren haltak meg (összesen közel százezren). Hasonló volt a helyzet Koppenhágában és sok más európai városban is (Hamburg, Párizs, Stockholm stb.). Budán és Pesten (Budapesten) 1831-et követően több kolera járványt észleltek, a legsúlyosabb 2000 fő körüli áldozatot szedett (az akkori lakosság több mint 1 %-a). Az USA-ban a XIX. sz.-ban több katona hunyt el járványokban, mint a polgárháború alatt. Megoldásként Londonban az 1854. évi járványt követően nagy kapacitású, a Temzébe torkolló csatornákat építettek, és később más nagyvárosokban is csatornáztak. Ez és az öblítéses WC biztosította a szennyezések és a kórokozók eltávolítását a háztartásokból; ugyanakkor a – szállítóközegként szolgáló – vizet tudatosan elszennyezték. London esetében kiegészítő intézkedés volt a Temzéből kivett víz lassú homokszűrése, majd fertőtlenítése az ivóvízellátás céljából.

A londoni járvány kezelésének kulcsszereplője Dr. John Snow londoni orvos, az epidemiológia úttörője. Mr. Snow behatóan vizsgálta az 1849. évi járványt és eredményeit rövid közleményben tette közzé. A lakóházanénti megbetegedettek számát térképen tüntette föl. Azt tapasztalta, hogy a megbetegedések egy bizonyos víznyerőhely (Broad Street-i kút) körül magasabbak. Ez alapján állította fel jipotézisét, mely szerint a kolera a szennyezett kútvízzel terjedt. Véleményét a tudós testületek nem osztották; ők azt gondolták, hogy azt légköri szennyezés okozza. Az 1854. évi kolerajárvány kitörését követően – noha nem volt valódi tudományos bizonyíték – Dr. Snow javaslatára a hatóság elrendelte a fertőzési gócnak vélt, népszerű kút bezárását. Valójában a szennyezett víz és a kolera közötti kapcsolatot a „cholera vibrio” felfedezésével Koch csak harminc évvel később bizonyította Németországban (és kapott később

Nobel díjat). A történet kiváló példa a ma egyre nagyobb hangsúlyt nyerő **elővigyázatosság elvének** első sikeres alkalmazására. Ehhez hasonló sikeres példáról talán azóta sem beszélhetünk.



3-18. ábra – John Snow Londoni háziorvos térképe. Az innováció korabeli jelképe.

### 3.3.3.2 Az oxigénháztartás felborulása

A járvány kérdését tehát, úgy tűnik, megoldották, mégpedig részben az öblítéssel a toalett révén szem elől „eldugva”. Az árnyoldal a költséges csatornahálózat, a nagy vízfogyasztás, a fenntartási gondok és az a tény, hogy „amit nem látunk, azzal nem törődünk”. Sokkal nagyobb baj volt azonban, hogy a felszíni vizek jelentősen megnövekedett szervesanyag terhelésére nem gondoltak. A Temze, az Ohio, a Rajna és később számos hazai folyó is szennyvízcsatornává vált, amelyet a lebontó baktériumok tevékenysége következtében oxigénhiányos állapot, halpusztulás, elviselhetetlen bűz és az élővilág drámai torzulása jellemezte. Azaz, megoldottunk egy problémát, de előidézünk egy másikat. Az elv a szennyezők minél gyorsabb eltávolítása és hígítása volt.

A problémát műszaki szempontból a Streeter-Phelps modellel írhatjuk le. A szerves anyag bevezetés hatására a folyóban elszaporodnak az azt lebontó mikroorganizmusok, amelyek az életműködésükhöz oxigént használnak. A szervesanyag lebontása elsőrendű kinetika szerint történik.

$$BOI(x) = BOI_0 \exp\left(-k \frac{x}{v}\right)$$

ahol

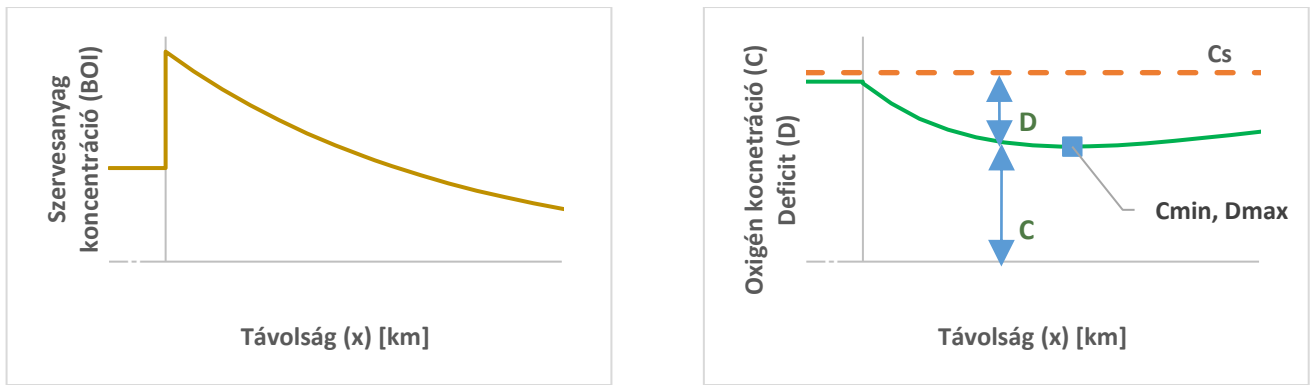
$BOI(x)$  a  $BOI$  koncentráció a bevezetéstől számítva  $x$  kilométerre

$BOI_0$  a kezdeti (bevezetés helyén mért)  $BOI$  koncentráció

$k$  lebomlási tényező

$v$  a folyó áramlási közepsebessége.

A szervesanyag tehát lebontásra kerül („öntisztulás”), eközben azonban a vízfolyás oxigéntartalma szélsőséges esetben akár 0-ra is csökkenhet. Szerencsére az utánpótlás (elsősorban a víz-levegő határretegen keresztül) folyamatos, így – ez is öntisztulás – az oxigén idővel visszapótlódik a vízfolyásba, asszimptotikusan tart a telítési koncentráció értékéhez, mely a vízhőmérséklet és a légnyomás függvénye. A jellemző állapotváltozók tehát egyrészt a biokémiai oxigénigény ( $BOI$ ), mely a sokféle szervesanyag összegvont indikátora, valamint az oxigén koncentráció ( $C$ ). Segédváltozó az oxigéndeficit ( $D$ ), amely a telítési oxigénkoncentráció ( $C_s$ ) és az aktuális oxigénkoncentráció ( $C$ ) különbsége. Egy bevezetéssel terhelt vízfolyás szervesanyag- valamint oxigén-hossz-szelvényét mutatja a 3-19. ábra.



3-19. ábra – A szervesanyag lebontása és az oxigén alakulás egy folyó hossza mentén BOI – biokémiai oxigénigény, D – Deficit, C – oldott oxigén koncentráció, Cs – telítési oldott oxigén koncentráció

Az oxigén problémák kezelését a megbízható szennyvíztisztítási technológiák kifejlesztése jelentette. A századfordulóra megszületett a biológiai és a kémiai tisztítás. Az ún. eleveniszapos eljárás lényege, hogy a műtárgyakban nagy mennyiségben szaporítunk el szerves szén bontó baktériumokat, miközben oxigént viszünk be a rendszerbe. A végtermék kettős: a légkörbe távozó széndioxid és a természetbarát iszap (amennyiben azt az ipari előtisztítás hiánya nem gátolja meg). Az iszap sorsa kulcskérdés: okos megoldás a mezőgazdasági elhelyezés, a biogáz előállítása; a hibás gyakorlatot pedig a hulladéklerakó jelenti (a folyóba történő visszavezetésről nem is beszélve). A kémiai eljárás lényege a kicsapatás és az ülepítés, ami a kezdeti időkből kezelhetetlenül sok iszapot eredményezett. Ezért túlnyomóan a biológiai eljárások terjedtek el. A szennyvíztisztítás (és a vízkezelés) nem olcsó. A szennyvíztisztítás tömeges elterjedése - a világháborúk által sújtott történelem során - még Angliában is legalább fél évszázadot igényelt. A fejlesztések többsége 1950 után történt kézzelfogható eredménnyel: például sikerült rehabilitálni a Temzét. A nyolcvanas évekre újból megjelentek a lazacok, amit korábban kevesen hittek volna.

### 3.3.3.3 A vizek eutrofizálódása

A szennyvíztisztítás, mely kezdetben kizárólag az oxigénfogyasztást okozó anyagok csökkentésére összpontosított, nem oldotta meg a problémákat. Sőt, újabb bajt idézett elő: az állóvizek eutrofizálódását. Az eutrofizálódás kifejezés német eredetű műszó, amelyet az 1910-es években alkottak – a túlzott növényi tápanyag feldúsulásának jelenségét már akkor ismerték. Később megállapították, hogy a szabályozás szempontjából fontos ún. limitáló szerepet, a **Liebig-elv** szerint többnyire a foszfor játssza. Ennek ellenére a szennyvíztisztítással foglalkozók évtizedeken keresztül csak a szerves szén eltávolítására összpontosítottak, anélkül, hogy a foszfor (P) felkeltette volna a figyelmüket.

A Balaton esetében nemzetközi hírű limnológusok (tókutatók), Sebestyén és Entz már a negyvenes években figyelmeztettek a "kulturális" eutrofizálódás kedvezőtlen jeleire. A kiváló mérnök, Lesenyei tíz évvel később a foszforeltávolítás fontosságát hangsúlyozta. A területfejlesztési tervek a turizmus korlátozását javasolták. Mindeközben az idegenforgalom szabályozatlanul nőtt; fejlesztették az ivóvízellátást és a csatornázást, megnövelve a tó terhelését. Elkésve kezdődött a szennyvíztisztítási program, amiben foszforeltávolítás eleinte egyáltalán nem szerepelt. Megkezdődött, majd felgyorsult "a másik bőr lenyúzása": az intenzív mezőgazdaság, a műtrágyázás és a nagyüzemi állattartó-telepek rohamos fejlesztése, amelyeket hasonlóan nyitott anyagáramlás jellemez, mint amelyet az öblítéses toalett eredményez. Két riasztó halpusztulás és a tó egészére kiterjedő, sokkoló *Cylindrospermopsis raciborskii* fonalas kék-alga (cianobaktérium) invázió vezetett végül 1983-ban egy átfogó rehabilitációs terv kidolgozásához.

A Balaton tápanyagterhelése - a térség fejlődése eredményeként – a megelőző fél évszázad alatt mintegy nagyságrenddel nőtt. Válaszként, késleltetéssel hasonlóan változott az alga biomassza is, amely a hetvenes-, majd a nyolcvanas évek elejére a Keszthelyi-medencében, illetve a tó egészére elérte a legkedvezőtlenebb, hipertróf állapotot. Számos algafaj véglegesen eltűnni látszott. A domináns kék-alga faj  $N_2$ -kötő, a foszforhoz pedig az üledékből jut (belső terhelés: a megelőző évtizedek során a tó által 90-95 %-ban visszatartott P-t az üledék nem képes már közömbösíteni). A tó tehát a külső terheléstől szinte független, „önjáró” állapota került. A legrosszabb minőség a Keszthelyi medencében alakult ki: a tó térfogatának mindössze 4 %-át a vízgyűjtő fele „terheli”. A következtetés kézenfekvő volt: a gyors eredmény érdekében a szennyvízkérdést kellett megoldani (foszfor kicsapatás illetve – ahol lehet – a vízgyűjtőről történő kivezetés révén), a hosszú távú célok elérése pedig a nem-pontszerű terhelések

szabályozását igényli, többek között a Kis-Balatonhoz hasonló elő-tározók révén. Ezekre a beavatkozásokra (és számos egyéb: foszformentes detergensok használata, építési tilalom, stb.) alapul a Balaton 1983. évi vízminőség-szabályozási kormányhatározata, amely részletesen tartalmazza a beavatkozások ütemezését is. A terv három célállapotot ír elő: A – a további romlás megállítását 1990-re, B – a hetvenes évek vízminőségének visszaállítása 1995–2000-re, és C – a hatvanas évek trofitásának elérése 2005-2010-re. A terv, a gazdasági recesszió és a rendszerváltás miatt késéssel valósult meg. Az összes P terhelés (ÖP) mára mintegy a felére csökkent. A tó erről 1994-ig „mit sem tudott”, a minősége nem javult. 1995-től váratlan fordulat következett be és azóta kiváló a vízminőség. Ezt a fitoplankton szerkezete is igazolja: a hatvanas évek végén eltűnt fajok kezdenek visszatérni. Ebben az elsődleges szerepet feltehetően az üledék vártnál gyorsabb megújulása és a belső terhelés ezzel összefüggő csökkenése játszotta. Nyugtalanító azonban, hogy a „teljes körű” tudományos magyarázat egyelőre még hiányzik. A rehabilitációs program befejezéséhez további terheléscsökkentés szükséges. Ez, a mára meghatározóvá vált városi és mezőgazdasági *nem-pontszerű szennyezés* szabályozását igényli, ami sokkal nehezebb feladat, mint a pontszerű szennyezések mérséklése volt. Csökkentése nem lehetséges a bioszféra másik két elemének, a talajnak és a légkörnek a bevonása nélkül, hiszen a tápelemek vándorlását a hidrológiai körforgással együtt szükséges nyomon követni. A területhasználattal is integrált stratégiák kidolgozása elkerülhetetlenné vált.

A Balaton ma sikertörténet. Esete 60-70 évet fed le a tudományos felismeréstől a remélhető „teljes” rehabilitációig. A problémák azonban nem oldódtak meg mindenhol. Ma szinte az összes európai nagy folyó az eutrofizálódás jeleit mutatja. Ettől szenvednek a beltengerek, a Balti- és a Fekete tenger is. A beltengerek megóvása és a sikeres technológiai fejlesztések vezetnek az EU új települési szennyvíztisztítási irányelvéhez, amely az ún. érzékeny térségekben, nagy városokra előírja a C, P és N együttes eltávolítását.

A tápanyag-eltávolítás, a költségek- és a helyigény csökkentése számos új kihívást jelentett, amelyre a tudományos-műszaki fejlesztés sokrétű, kiváló választ adott. A korábban egyszerű, mérnöki „ököszabályok” alapján tervezett eleveniszapos szennyvíztisztító telepeken lejátszódó folyamatok biotechnológiai (mikrobiológiai, biokémiai és ökológiai) kutatások alapján ma már sokkal jobban feltártak. A C, N és P eltávolítás érdekében tudatosan hoznak létre az eltérő tulajdonságú baktériumok elszaporodását célzottan biztosító kémiai környezetet. Korszerű mérés technikára alapozva bevezetik a szennyvíz összetételének korábbinál lényegesen részletesebb jellemzését, a reaktorkísérleteket és az eleveniszapos folyamatok kinetikai modellezését. A biológiai eljárásokat egyre gyakrabban kombinálják kémiai módszerekkel a hagyományos P eltávolítás mellett, a kapacitás növelése, a biológiai tisztítási lépés tehermentesítése, a nitrifikáció hatékonyságának növelése és számos egyéb ok miatt. Anyagtudományi és kolloidkémiai kutatások alapján nagy hangsúlyt fektetnek a kis dózisokat lehetővé tevő, optimális vegyszer-kombináció kifejlesztésére.

Az öblítéses toalettől tehát eljutottunk a nagy folyókig, a beltengerekig és mindezeket keresztül az óceánig. Egyetlen öblítés ideje lakásunkban néhány másodperc. A folyókon a levonulás néhány nap vagy hét (és akár 1000 km távolság is lehet). A tavak jellemző léptéke több év vagy évtized, illetve több száz vagy ezer kilométer. A beltengereké ennél is nagyobb lehet, az óceán átlagos tartózkodási ideje pedig 3000 év. A terhelések és a vízminőségi hatások „az életminőség jegyében”, a „lineáris” anyagáramlás és a feszíni lefolyás révén fokozatosan áthelyeződnek: a rendszer alapvetően nyitott. Az óceán rehabilitációs ideje, ha egyáltalán van ilyen, többször 3000 év. A korábban „üdvöztetőnek” vélt hígítás tehát nem jelent megoldást.

A tartózkodási idő növekedésével a problémák több ok miatt egyre bonyolultabbakká válnak: (a) Erősödik a kölcsönhatás a bioszféra elemei között, és a vízfázisra felírt egyszerű anyagmérleg távolról sem helytálló; (b) Növekszik a „lomha” üledék szerepe, amelyet az akkumuláció jellemez és ezért a „vízgyűjtő történések” memóriájaként működik (gondoljunk a folyók deltáira). Hosszú ideig „emlékezik” és számottevő késleltetéssel adhatja le a megelőző évtizedek során túlzott mennyiségben felgyülemlt szennyezőanyagokat (sok, „nem-fenntarthatóan” használt víztér lassú, vagy sikertelen rehabilitációjának ez az oka); (c) Növekvő számú, ismeretlen kimenetelű reakció és biológiai átalakulás játszódhat le (amelyek a jellemző reakcióidő és a tartózkodási idő viszonyától függenek); (d) Szabályozási szempontból a problémák egyre nehezebben kezelhetőkké válnak.

#### 3.3.3.4 Mikroszennyezők

Az ötvenes évek elején Japán egy kis falujában, Minamatában, sok lakos idegrendszeri elváltozásokat tapasztalt. A szerencsétlenebbeknél a gyenge szimptomákat erős reszketés, paralízis és esetenként halál követte. Sok csecsemő

tragikusan eltorzultan és mentális sérüléssel jött világra. A vizsgálatok higanymérgezőt mutattak ki. A Chisso vegyi gyár éveken keresztül vezette a magas Hg tartalmú szennyezését (higany-szulfát formájában) a Minamata öbölbe. A higany-szulfát a vízben rosszul oldódik és a feltevés az volt, hogy az üledékben "örökre" eltemetődik. A vizsgálatok azonban kimutatták, hogy ez a vegyület még rosszabbul oldódó higany-szulfidra redukálódott, amelyet az üledékben található baktériumok erősen toxikus metil-merkuri kationná alakítottak át. Utóbbi a vízben oldódva ugyan csak µg/l koncentrációban volt jelen, de felűsült a táplálékláncban: a halat és kagylót fogyasztó emberek szervezetében veszélyesen sok mérgező anyag halmozódott fel. Több mint 3500-an betegedtek meg és közel ötvenen haltak meg.

A mikroszennyezők vízi környezetbeli előfordulásához kötődő problémák felismerése óta az antropogén tevékenységhez kötődő anyagáramokban környezeti kockázatot jelentő anyagcsoportok köre (toxikus fémek, perzisztens szerves szennyezők [persistent organic pollutant – POP], patogén kórokozók) jelentősen kibővült. A felismerést a szabályozás is követi az emberre és a környezetre történő veszélyesség alapján meghatározott küszöbértékek és kockázati tényezők megállapításával (pl. karcinogén, mutagén, teratogén hatás). A WHO ivóvíz-minőségi ajánlásának listáján jelenleg 144 kémiai anyag (csoport) szerepel (WHO, 2017). A POP-anyagok nemzetközi szabályozását megalkotó Stockholmi Egyezmény 2004-ben életbe lépő listájára került 12 vegyület, vegyületcsoport, köztük klórozott növényvédő szerek, ipari segédanyagok és ipari tevékenységek során keletkező mérgező szennyezők. A kezdeti 12-es listát azóta már három alkalommal módosították, újabb növényvédő szerekkel és ipari segédanyagként is használt élelmiszeradalékokkal egészítették ki.

A mikroszennyezők terén most egyértelműen a monitoringé a főszerep. Az analitika fejlődése tette lehetővé, hogy a vízi környezetbe bekerülő anyagokat egyre kisebb koncentrációban detektálni lehessen. Ez fokozza érdeklődésünket, tekintve, hogy ha az anyag jelenléte már kimutatható, akkor az ökológiai, humán toxikológiai hatás is megállapítható, és ez a szabályozási igényt is maga után vonhatja. A szabályozás alatt álló anyagoknál pedig a pontosabb koncentrációmeghatározás (alacsonyabb LOQ – limit of quantification) és detektálási küszöb (LOD – limit of detection) egyre szigorodó határértékek alkalmazását teszi lehetővé. Ez egyfelől kívánatos, hiszen azoknál az anyagoknál, melyek veszélyessége ismert, a cél a teljes kivonás és a környezeti koncentráció minimalizálása ellenőrizhető módon. Másfelől azonban felvetődik a kérdés: vajon képesek-e a meglévő monitoringrendszereink a mikroszennyezők egyre szélesedő körének detektálására? A válasz jelenleg többnyire nemleges, a legtöbb európai országnak komoly kihívást jelent a vizsgálatok a elvégzése.

A mikroszennyezők két csoportra bonthatók. A szerves mikroszennyezők tulajdonképpen az ún. nehézfémek. Ezek közé általában az 5000 µg/l (más források szerint 4000 µg/l) sűrűséget meghaladó fémeket sorolják, valójában azonban a toxicitás szerinti lehatárolás a helytállóbb – helyesebb tehát toxikus szerves anyagokat mondani – és ezek közé tartozik a félfém arzén, vagy akár az alumínium is. Veszélyességüket nagymértékben befolyásolja az oldhatóságuk. Természetes körülmények között általában oldhatatlan csapadék formájában található meg a természetben. A fémek mobilitását a pH- és a redoxpotenciál változása befolyásolja. A mikroszennyezők másik nagy csoportja a szerves mikroszennyezők, ezeket csoportosíthatjuk felhasználási területük (ipari oldószerek és gyártási segédanyagok, mezőgazdasági kemikáliák, gyógyszerek, detergensek) szerint.

### 3.3.3.5 A jövő vízgazdálkodása

A jelen vízfogyasztását nagymértékben az öblítéses toaletten alapuló vízi infrastruktúra szinte automatikusan határozza meg, párosulva azzal, hogy a közműves vízellátás csak egyféle, ivóvíz minőségű vizet szolgáltat. A fejlett Európában fejenként és naponta – pazarló módon – mintegy 240-250 liter vizet használunk. Ebből körülbelül 2-5 l/fő/nap az ún. fiziológiai vízhasználat, 50 l a WC öblítés, 110 l/fő/nap "megy el" a konyhában és a fürdőszobában, és ezekhez adódik - helytől függően - átlagosan 80 l/fő/nap veszteség (például elszivárgás a vízellátó hálózatból). A mai háztartások jellemzője, hogy a legjobb minőségű ivóvizet használja függetlenül attól, hogy ivásról, főzésről vagy WC öblítésről van szó.

A vízhasználat különösebb nehézség nélkül több mint 50 %-kal csökkenthető lenne a hálózatok karbantartásának javítása, a víztakarékos berendezések elterjedése és a hatékony árpolitika révén. (Az utóbbi elkerülhetetlen: az EU 2000-ben érvénybe lépett egységes vízpolitikája, az ún. Víz Keretirányelv tíz éven belül kötelezően előírja a költségek teljes megtérítését a szolgáltatást igénybe vevők által). Az ivóvíz felhasználása akár 50 l/fő/napra is mérsékelhető, amennyiben azt csupán konyhai és fürdőszobai használatra korlátozzuk. Ebben az esetben a fiziológiai szennyezést a

többtől elválasztjuk: ezt nevezzük "fekete" szennyvíznek, a fennmaradót pedig "szürkének". Amennyiben továbbra is öblítést alkalmazunk, erre a célra tisztított, ún. "szürke" szennyvizet vagy esővizet alkalmazunk, ami az épületeken belül kettős hálózatot igényel.

A háztartásokban a vízen túl a vízminőségi bajokat okozó szénnel, foszforral és nitrogénnel is gazdálkodhatunk. Ezek részben fiziológiai eredetűek, részben pedig a konyhában és a fürdőszobában keletkeznek, és az "integrált" gazdálkodás érdekében célszerű hozzájuk számítani a lebontható konyhai (bio-) hulladékot is. Amint az angol WC adta kötöttségtől elszakadunk, a vízfogyasztás csökkentésével együtt az anyagokat tudatosan különböző irányokba terelhetjük, figyelembe véve a könnyű tisztíthatóságot, a víz visszaforgatását, az újrahasznosítást, az anyagkörforgások zárását és mindezek eredményeként a fenntarthatóságot. Itt csupán két (egymást nem kizáró) alapelethez említünk: (1) a jelenlegi rendszer alkalmazása a bio-hulladék bevonásával; és (2) a fiziológiai hulladék szétválasztása és együttes kezelése a bio-hulladékkal. Szabadságfokunk ily módon nagymértékben nő és számos megoldási változat kínálkozik. Az első esetben a jelenlegi harmadát kitevő, de annál mintegy ötször sűrűbb, technológiai szempontból kedvező összetételű szennyvizet kapunk, amit anaerob úton (vagy anaerob előtisztítással) kezelünk, a keletkezett biogázt pedig energiatermelésre hasznosítjuk. A második (decentralizált) esetben híg, szürke szennyvíz és néhány kg/fő/nap fekete szennyvíz (vagy hulladék) keletkezik. Az előbbi egyszerűen tisztítható aerob módszerrel, megtakarítva a fajlagosan legköltségesebb nitrogén-, továbbá gyakran a foszfor eltávolítást is. A tisztított víz alkalmas öntözésre vagy további kezelés után másodlagos vízként a háztartásokban. A fekete szennyvíz szintén kezelhető anaerob úton (akár az (1) típusú telepre történő szállítás révén, tudva, hogy valamely térségben minden bizonnyal eltérő jellegű rendszerek alakulnak majd ki a városokban, elővárosokban és a környező kisebb településeken), vagy komposztálható és a mezőgazdaságban hasznosítható. Állításunk tehát az, hogy jelenlegi tudásunk birtokában elvileg a meglévőnél jobb, kevesebb energiafelhasználással és széndioxid kibocsátással járó, olcsóbb, zárt ciklusokra épülő, a vizeket megóvó és fenntartható megoldásokat tudunk kidolgozni. Természetesen ezek függenek a települések jellegétől, az éghajlattól, a meglévő infrastruktúrától, a környezeti jogi szabályozástól, a környezeti ipar rugalmasságától és számos egyéb tényezőtől.

Mennyi idő szükséges a felvázolt elképzelések megvalósításához? Reálisan mintegy 20-40 évről beszélhetünk; új települések vagy peremvárosok esetében kevesebből. Az okok maguktól értetődnek: például a jelenlegi komfortszintet biztosító berendezések fejlesztéséhez, a potenciális felhasználók meggyőzéséhez és a piaci lehetőségek felismeréséhez szükséges idő említhető. Jó jel azonban, hogy kísérleti házak már több országban működnek.

A nehézségeket fokozza a jelenlegi infrastruktúra rugalmatlansága, amely a múlt tradícióit akkor is őrzi, amikor azok már elavultakká váltak. Érdekes azonban szem előtt tartanunk, hogy lakásunkat 15-20 évenként felújítjuk vagy átépítjük, a szennyvíztelepek és a csatornahálózatok élettartama pedig 30, illetve 50 év körül van. Lehetőségek tehát igenis vannak, ha elég bátrak vagyunk és követjük Széchényi bölcs mondását: "A réginek az újjal célszerű egybeházasítása gyakran a dolog bölcsészete. Máskor a réginek gyökerestől megsemmisítése és az újnak gyökeres felállítása szükséges". Az "egybeházasítás" osztályába tartozik például a vizelet decentralizált gyűjtése, tárolása és szabályozott szállítása a szennyvíztelepre a meglévő csatornán belüli, kis átmérőjű vezetéken, majd a koncentrátum tisztítása a reggeli alulterhelt órákban. Hasonló, kettős csatornarendszer jelenthet megoldást a harmadára csökkent (szürke) szennyvíz elvezetésére is, a záporvíz elvezetést is figyelembe véve (érdekes, hogy Koppenhágában a 19. század közepén eleve ilyen rendszert kezdtek el építeni, amit azután a kolerajárvány okozta félelem miatt felcseréltek a biztonságos, klasszikus megoldásra).

#### *3.3.3.6 Az EU vízpolitikája: Víz Keretirányelv*

Az Európai Unió számos, a vízi környezet védelmét szolgáló irányelvet dolgozott ki és léptetett hatályba 1975 óta (fürdővizek minősége, felszín alatti vizek védelme, higany, kadmium és más veszélyes anyagok kibocsátása, mezőgazdasági eredetű nitrát szennyezések szabályozása, települési szennyvizek összegyűjtése és tisztítási követelményei - „városi szennyvíz irányelv”-, integrált szennyezés megelőzés és szabályozás, az ivóvíz minőségi követelményei stb.). 2000 decemberében jóváhagyták az Unió egységes víz „politikáját” megfogalmazó ún. Víz Keretirányelvet (VKI), amely az egyedi irányelveket integrálva a vizek „jó állapotának” biztosítása érdekében a vízminőségvédelem és a fenntartható vízhasználatok alapelveit, illetve a gyakorlati megvalósítás feladatait foglalja jogi keretekbe. A magyar vízgazdálkodás szempontjából is évtizedekre meghatározó, stratégiai jelentőségű dokumentumról van szó. A célok tartalmazzák az ökoszisztémák és az ivóvízkészletek védelmét, a vízhasználatok

fenntartható biztosítását, a vizeket érő szennyezések megakadályozását illetve csökkentését, valamint az árvizek és a szárazságok környezeti hatásainak mérséklését. Lényeges és új szempont a költségmegtérülés elvének kötelező előírása: a szolgáltatást a felhasználóknak kell megfizetni. Az alapelvek között szerepel az elővigyázatosság, a megelőzés, a károk elhárítása a szennyezés helyén, a szennyező fizet elv alkalmazása, az integráció, a szubszidiaritás és a nemzetközi együttműködés fontossága. Újdonságnak számít a hazaitól eltérő jogszabályi keret, az alapelvek gyakorlati alkalmazására és a szabványosításra vonatkozó törekvés, az állapot és az emberi tevékenységek közötti kapcsolatok feltárásán alapuló, de a gazdasági realitásokat is szem előtt tartó hosszú távú intézkedési program, a határozott ütemezés és a rendszeres beszámolási kötelezettség.

Víz Keretirányelv (VKI) életbe lépését követően az EU jogszabályi szinten kiemelte a vízi környezetben legjelentősebb kockázattal bíró elemeket és vegyületcsoportokat (elsősorban elsősorban veszélyes anyagok), és az ezekre vonatkozó környezetminőségi határértékeket (environmental quality standard, EQS) irányelvben szabályozta (2008/105/EK). Az irányelvben rögzített 33 anyag (csoport) ot tartalmazó listát 2013-ban (2013/39/EK) további 12 komponenssel bővítették (köztük a Cipermetrin, mely ma is használatos növényvédő szer és a PFOS35-vegyületek), néhány anyag esetében pedig szigorították a határértékeket (pl. egyes PAH-vegyületek, az ólom és a nikkelt). Az irányelvben megadott anyagokra a tagállamoknak monitorozást kell folytatniuk. Felismerve, hogy az anyagok egy része természetéből adódóan (adszorpciós hajlam) a vízfázisból csak nehezen mutatható ki, a monitoringot az ún. teljes mátrixra, azaz a vízfázisra, az üledékre és a biótában végzett vizsgálatokra is kiterjesztették (anyagokként meghatározva a reprezentatívnak tekinthető fázist).

### 3.4 Lehetséges válaszok a környezetszennyezésre

A környezet szennyezéséhez az idők során négy fajta viszonyulás, négy fajta reakció alakult ki. Ezek sorrendje egyúttal kronológia is – leképeződik benne az emberiség környezetszennyezéshez való viszonyulásának fejlődése.

Az első lehetséges viszonyulás a tagadás, figyelmen kívül hagyás. A tipikus komment: „ez van, úgysem tudunk mit tenni”. Ennek elégtelen voltával hamar szembesült a társadalom, és megjelentek a reaktív válaszok. Az ismert angol mondás szerint „the best solution for pollution is dilution” – azaz a szennyezésre adható legjobb megoldás a hígítás. Ez a reakció tehát gyakorlatilag a transzmisszióba nyúl bele: a szennyezés szétterítése alacsonyabb imisszióhoz vezet, noha az anyagmérlegen nem változtat. A harmadik lehetséges viszonyulás a konstruktív megoldás, ide tartoznak a (csövégi) tisztító, szennyezőanyag-eltávolító technológiák, mint pl. a füstgáztisztítás (konkrét példaként a füstgáz kéntelenítését említhetjük, mint a savas esők újabb kori keletkezésének megakadályozóját), vagy akár egy-egy szennyvíztisztító telep építését. A negyedik és egyben legfejlettebb viszonyulás az, amikor a teljes folyamatot átvizsgálják, és megpróbálják a szennyezőanyagok keletkezését megakadályozni vagy legalább csökkenteni. Szennyvíztisztítás esetén például jelenthetnek a víztakarékos megoldások; csapadékvíz esetén a víz visszatartás, gyári technológiák esetén a folyamat optimalizálása. Ennek a fajta viszonyulásnak az angol neve: IPPC – integrated pollution prevention and control – integrált szennyezés-megelőzés és kontroll. A negyedik típusú hozzáállásra a legmagasabb szintű példa az Európai Unió Körforgásos gazdaság (circular economy) irányelve, mely a hulladékok lehetőleg teljes megszüntetését, a primer nyersanyaghasználat minimálisra csökkentését tűzi ki célul.

### 3.5 Felkészítő kérdések

Rajzolja föl a víz geokémiai körforgalmát!

Rajzolja föl a szén geokémiai körforgalmát és jelölje meg a nagyobb antropogén módosításokat!

Rajzolja föl a nitrogén geokémiai körforgalmát és jelölje meg a nagyobb antropogén módosításokat!

Rajzolja föl a foszfor geokémiai körforgalmát és jelölje meg a nagyobb antropogén módosításokat!

Mit nevezünk környezetszennyezésnek?

Adja meg a légszennyezés definícióját!

Hogyan csoportosíthatjuk a légszennyező anyagokat? Adjon példát mindegyik csoportra!

Mi az elővigyázatosság elve?

### 3.6 Irodalom

Barótfi I. (2000): Környezettechnika. Mezőgazda Kiadó, Budapest

Cordell D., Drangert J-O., & White S. (2009): The story of phosphorus: Global food security and food for thought. In: *Global Environmental Change* **19** (2), pp 292-305. [doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009)

Edixhoven, J. D., Gupta, J., & Savenije, H. H. G. (2014): Recent revisions of phosphate rock reserves and resources: a critique, *Earth Syst. Dynam.*, **5**, pp. 491–507, [doi.org/10.5194/esd-5-491-2014](https://doi.org/10.5194/esd-5-491-2014)

Erisman, J., Sutton, M., Galloway, J. et al. (2008): How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geosci* **1**, pp. 636–639. [doi.org/10.1038/ngeo325](https://doi.org/10.1038/ngeo325)

Ge D. (szerk.) (2001): Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000. European Environment Agency

Kerényi A. (2003): Környezettan. Természet és társadalom – globális nézőpontból. Mezőgazda Kiadó, Budapest

Közös Jövők (1988): A Környezet és Fejlődés Világbizottság jelentése. Mezőgazd. Kiadó, Budapest

Láng I. (szerk.) (2002): Környezet- és természetvédelmi lexikon. Akadémiai Kiadó, Budapest

Matassa S., Batstone D. J., Hülsen T., Schnoor J. & Verstraete W. (2015): Can Direct Conversion of Used Nitrogen to New Feed and Protein Help Feed the World? In: *Environ. Sci. Technol.* **49** (9) pp. 5247–5254. [doi.org/10.1021/es505432w](https://doi.org/10.1021/es505432w)

Moser M. – Pálmai Gy. (1992): A környezetvédelem alapjai. Tankönyvkiadó, Budapest

Smil, V. (2002): Nitrogen and Food Production: Proteins for Human Diets. In: *AMBIO: A Journal of the Human Environment* **31**(2), pp. 126-131. [doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.126](https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.126)

Somlyódy L. (szerk.) (2002): A hazai vízgazdálkodás stratégiai kérdései. Magyarország az ezredfordulón, *Magyar Tudományos Akadémia*, Budapest

Somlyódy L. (2003): „Az értől az óceánig” – a Mindentudás Egyeteme előadássorozatban elhangzott előadás kézirat.

Somlyódy L. (2011): A világ vízdilemmája. In: *Magyar Tudomány* **172**(12) pp. 1411-1424

Somlyódy L. (2018): Felszíni vizek minősége - modellezés és szabályozás. Typotex, Budapest

United Nations Environment Programme (2007): Reactive Nitrogen in the Environment. Too Much or Too Little of a Good Thing. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8212/Reactive\\_Nitrogen.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8212/Reactive_Nitrogen.pdf) Letöltés időpontja: 2021. 11. 23.

[www.euvki.hu](http://www.euvki.hu)

[www.ourworldindata.org/excess-fertilizer](http://www.ourworldindata.org/excess-fertilizer)

[www.vizeink.hu](http://www.vizeink.hu)