Borsos Béla

# ÉLTETŐ VÍZ

Az ökológiai gondolat

Borsos Béla

# ÉLTETŐ VÍZ

## III. Vízgazdálkodás és rendszerelmélet

TYPOTEX

A könyv megjelenését a Magyar Tudományos Akadémia támogatta.




© Borsos Béla, Typotex, Budapest, 2024
Engedély nélkül semmilyen formában nem másolható!

ISBN 978 963 493 285 7
ISSN 1785-5217

Kedves Olvasó!
Köszönjük, hogy kínálatunkból választott olvasnivalót!
Újabb kiadványainkról és akcióinkról a *www.typotex.hu*
és a *facebook.com/typotexkiado* oldalakon értesülhet.

Typotex Kiadó
Alapította Votisky Zsuzsa, 1989
A kiadó az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók
és Könyvterjesztők Egyesülésének tagja.
Felelős kiadó: Németh Kinga
Felelős szerkesztő: Kovács Zoltán
Tördelés: Jutai Péter
Borítóterv: Szalay Éva
Készült a Multiszolg Bt. nyomdájában
Felelős vezető: Kajtor Bálint

# TARTALOM


Bevezető a harmadik részhez 11

1. Rendszerelméleti alapok 15
   1.1. A természetes rendszerek jellemzői 17
   1.2. Az energia nem újul meg 19
   1.3. A műszaki rendszerek jellemzői 21
   1.4. Az elsőfajú hiba 23

2. A legritkább ásvány 27
   2.1. A földi vízkészlet megoszlása, dinamikája 27
      2.1.1. A víz jellemző tulajdonságai 27
      2.1.2. A vizek felosztása tartózkodási helyük szerint 29
   2.2. A víz körforgása 32
      2.2.1. Biogeokémiai ciklusok 32
      2.2.2. A víz hőkapacitása 35
      2.2.3. Vízkörzés 36
      2.2.4. A nagy vízkör 37
      2.2.5. A kis vízkör és a növényzet 38
      2.2.6. Vízmérleg 41
   2.3. Felszín alatti vizek 43
      2.3.1. A föld kincse 43
      2.3.2. Források 58
   2.4. Felszíni vizek 59
      2.4.1. Folyók és vízfolyások 59
      2.4.2. Források még egyszer 60
      2.4.3. Torkolatok 61
      2.4.4. Vízválasztó, vízgyűjtő 64
      2.4.5. A folyó élete 75

3. Ember és víz 83
3.1. Emberi hatások 83
3.1.1. Már az eső sem a régi 83
3.1.2. Aszály 87
3.1.3. Globális változások, olvadó jég 95
3.2. Az emberi vízfelhasználás megoszlása, arányai és alakulása 100
3.2.1. Szemléleti kérdések 100
3.2.2. Aránytalan jelen 105
3.2.3. Tikkadt jövő 107
3.3. A víz „minősége” 111
3.3.1. A víz elhasználása és a minőség fogalma 111
3.3.2. Az égő folyó 113
3.3.3. A zöldalga 115
3.3.4. A kék kutya 119
3.4. Szennyvíz-odüsszeia 124
3.4.1. Kezdetben vala az árnyékszék 124
3.4.2. „Ki a Temze vizét issza...” 126
3.4.3. A szennyvíz tisztításának fokozatai 128

4. A jó sáfár 135
4.1. (Ki)szivattyú 136
4.2. Szomjas városok 142

5. Hérakleitosz szépséges folyóvize 147
5.1. Ember és folyó 147
5.2. Folyószabályozások 149
5.2.1. A folyószabályozások kiváltó okai és kezdetei 149
5.2.2. Gyorsított eljárás 159
5.3. Gátépítések 166
5.3.1. A bilincsbe vert folyó 169
5.3.2. Völgyzáró gátak és társaik 171
5.3.3. A nagy a szép: megalomániás gátépítési láz 177
5.3.4. A folyófojtogatás eredményei 180
5.3.5. Az állatorvosi beteg ló: a bős–nagymarosi vízlépcsőrendszer 193
5.4. Vízátvezetések 203
5.5. Tavak 206
5.6. Öntözés és szikesedés 206

6. Akkor hát hogyan? Alternatív vízgazdálkodási megoldások 211
6.1. Fenntartható vízgazdálkodás az elsőfajú hiba fényében 212
6.2. Rehabilitáció 214

6.2.1. Jelen állapot 214
6.2.2. Helyet a folyónak 217
6.2.3. Árvíztűrési index 220
6.3. A fenntartható vízgazdálkodás példái hagyományos rendszerekben 223
6.3.1. Karézek 223
6.3.2. A Hunza-völgy olvadékvize 224
6.3.3. Qanatok 227
6.3.4. Chinampa 228
6.3.5. Muang faai 231
6.3.6. Az őrségi tóka 232
6.3.7. Fokgazdálkodás 232
6.4. Modern kori fenntartható vízgazdálkodási megoldások 236
6.4.1. A Vásárhelyi-terv továbbfejlesztése (VTT) 236
6.4.2. Integrált tájgazdálkodás (ILD) 238
6.4.3. Vízaratás 250
6.4.4. Kétkörös rendszerek 257
6.4.5. A szennyvízkezelés integrált megközelítése 262
6.4.6. Mesterséges ökoszisztémák 268
6.5. Újabb próbálkozások 272

7. Mi a jövő útja? 275
7.1. Kilátások 275
7.2. Az egybites magyarázatok 277

Köszönetnyilvánítás 279

Irodalomjegyzék 281

Tárgymutató 311

Színes ábrák 315

*Az űrből nézve a Föld kék színűnek látszik. Ékszerként lebeg a tintafekete ürességben. Ezt az ékszerhez hasonlatos, kék színű csillogást a Föld felszínét borító, hatalmas víztömegről visszaverődő napfény kelti. A Föld a Naprendszer egyetlen bolygója, amelyen ilyen nagy mennyiségben található folyékony halmazállapotú víz.*

Byatt, Fothergill és Holmes: *A kék bolygó*

*A víz a természet hajtóereje.*

Leonardo da Vinci

*Mi tehát a víz?*
*Szinte minden és mindennek az ellentettje. Élet és halál. Szakrális jelentésű. Élvezeti cikk. Természeti kincs és szépség. Áru és közjó. Véges, megújuló és sérülékeny erőforrás. Kockázati tényező. A fejlődés záloga. A fejlődés korlátozója. Stratégiai jelentőségű, konfliktusos közeg.*

Somlyódy László

# BEVEZETŐ A HARMADIK RÉSZHEZ

Szabadítsátok ki Janit!
2016 telén kalandfilmbe illő módon kellett kiszabadítani egy férfit a Tiszán zajló jég fogságából. A férfi a tiszacsegei kompon ragadt, amikor a komp láncát a zajló jég cérnaként pattintotta el, és a folyó magával ragadta az alkotmányt. A kis Kárpát-medencei abszurdról igazi akciófilmes bemutató képsor (közkeletű nevén trailer) készült „Szabadítsátok ki Janit!" címmel, ami aztán egy darabig vírusként terjedt az interneten. A férfit ugyanis egy katonai helikopter emelte ki a folyó közepén, a jégtáblák között megakadt kompról.

A szerencsés kimenetelű esetnek, úgy vélem, jóval messzebbre ható tanulságai vannak azon túl, hogy néhány napig sok ezer ember egy szerencsétlen, egyszerű emberen mulatott, aki legalább megpróbált tenni valamit egy „váratlan" katasztrófahelyzetben.

Rengeteg hasonló példát lehet még felhozni. Ibafa egy apró falucska Somogy és Baranya megye határán, a politikai önkény hol az egyik, hol a másik megyéhez sorolta. Az 1990-es években néhány évig itt éltem. Az egyik nyáron egyetlen felhőszakadás szabályos árvizet okozott az Almás-patak vízgyűjtőjében, és a falu aljában több ház is víz alá került. Hogyan lehetséges ez? A falu a Zselic dombvidékén épült, észak–déli tájolású, dél felé ereszkedő domboldalon, ahogy kell – ezek a falvak történelmileg mindig ilyen tájolással épültek, mert lakóik tudták, hogy a domb tetején túl napos és szeles, száraz, a domb alján pedig nedves, lápos a környezet, megtelepedésre tehát a délre néző dombhát a legmegfelelőbb. Komolyabb felszíni vízfolyás egyedül a völgyben folydogáló Almás-patak, amelyet békeidőben akár át is lehet ugrani.

A II. világháború után a svábok egy részét kitelepítették, szabolcsi állattenyésztőket hoztak a helyükre, és a szocialista államhatalom megszervezte a mezőgazdasági termelőszövetkezeteket. A helyi téesz egyik juhtelepe a közeli Kisibafa-pusztán épült fel, ahová az Almás-patak völgyét keresztülszelve építettek utat. A tervgazdálkodás során az új lakóknak, akik a téesz állattenyésztési üzemágában dolgoztak, házakat építettek az út falu felé eső oldalán, és focipályát a másikon. A beinduló intenzív erdőgazdálkodás a feljebb fekvő dombolda-

lak erdeinek, a füves területeken pedig a juhok intenzív legelése okozta erózió a legelők vízfelfogó képességét jelentősen csökkentette. A kilencvenes évekre az időjárás mintázata az éghajlatváltozás hatásai miatt felbomlott, és gyakoribbak lettek a hirtelen, heves esőzések.

Ezekkel a változásokkal egy teljesen új csapdahelyzet jött létre a valaha okosan települt faluban. Már kétórás intenzív csapadékhullás elég lett ahhoz, hogy a dombokról lezúduló, hordalékkal és löszös üledékkel elegy zavaros lé tömegét az immár egyébként sem kaszált és így hamarabb eltömődő patakmeder ne tudja befogadni, ezért az a völgyben szabadon hömpölygött az új házak felé. Amelyek viszont éppen a Kisibafára vezető út hídja mögött állnak. A híd, bár elég nagy áteresszel tervezték, nem ekkora terhelésre volt méretezve, és teljes keresztmetszetében megtelve az út töltésével együtt gátként viselkedett, útját állta a vízárnak, amely jobb híján egyméteres magasságig elöntötte a téesz-lakásokat, már akkori áron is több millió forint kárt okozva. A focipálya megszáradt, és nem lett semmi baja, csak le kellett egy kicsit takarítani.

Tatán, a Május 1. úton 2015-ben beszakadt az aszfalt. Szorgalmas útépítők felbontották, kiöntötték, tömörítették, és újra leaszfaltozták. Pár hónappal később megint beszakadt. Az alaposabb felmérés során kiderült, hogy ezen a 150 méteres szakaszon a város fő közlekedési ütőerét adó kétszer kétsávos, szép út egy korábbi karsztforrás felett halad. Amikor a városfejlesztés ideért, és elkészült az út meg a körötte levő lakótelep, Tatabányán dúlt az Eocén-program, és a szénbányákat úgynevezett depressziós módszerrel művelték: a mélyben folyamatosan jelen lévő és a Gerecséből, Vértesből eredő karsztvizek szintjét hatalmas szivatytyúkkal süllyesztették a művelési szint alá, hogy a bányászok dolgozni tudjanak (Filep 2009: 100). Igen ám, de jött a rendszerváltás, és a közeli Tatabánya is a vesztesek közé tartozott, bányáit bezárták, a karsztvíz pedig visszavette, ami az övé, a vízadó réteget. Szép lassan feltöltötte a felszín alatti karsztvíztárolókat, amelyek egészen a tatai Fényes-forrásokig nyúlnak. Mindenki örült, hogy ismét megindultak a szénprogram alatt kiszáradt Fényes-források, tanösvényt építettek rájuk, a nyolcméteres nyomással feltörő vizet üvegoszlopba foglalták, és még a holló is visszajött fészkelni. Ám kiderült, hogy a visszatérő karsztvíz nem mindenütt ennyire szívesen látott vendég. 2015-ig tartott, mire elérte a Május 1. út alatti eredeti járatokat, és alámosta a ráaszfaltozott utat. Megjegyzendő, hogy a folyamatot a geológusok előre látták (Ballabás 2004).

A triász korú mészkőben 132 mBf szinten 20 °C-os hőmérsékleten (tehát „majdnem" termálvízként) fakadó forrás eredeti vízhozamát 1919-ben 540 liter/percnek mérték. A bányaművelés miatt 1962-ben apadt el (Ballabás személyes közlés, 2018). A helyét visszafoglaló talajvíztől ismét meg akarunk szabadulni. A becslések szerint vízhozama is majdnem az eredeti, 500 liter körül van percenként. A véglegesnek gondolt megoldás ezúttal 110 millió forintba kerül, és abból áll, hogy a föld alatti vízfolyásokat 3 méter mélyen egy szivárgótest beépí-

tésével összegyűjtve eltérítsék útjukból, és a legközelebbi vízfolyásba, a Kismosó-patak átereszébe vezessék (Ábrahám 2018). Aggódni azonban nem kell. Azóta a Komáromban épülő dél-koreai akkumulátorgyár vízigényének kielégítése érdekében a Fényesen elhelyezkedő Fényes I karsztkút hozamát napi 10 000 $m^3$ kapacitású távvezeték építésével kívánják a szomszédvárba elvezetni (KEM KH 2020). Így nem valószínű, hogy a 2012. évihez képest húsz év alatt még 15-szörösére fog nőni a forrásokkal visszatérő vizek összes hozama, ahogyan azt a számítógépes interpolációkkal 2015-ben jövendölték (Rátvai 2015).

Külföldi példa is említhető. Laoszban 2018. július 23-án átszakadt egy még be sem üzemelt völgyzáró gát (Davis 2018). A sajtóközleményekből egy sem foglalkozott azzal, hogy mi okozhatta a katasztrófát, mind a halottak, eltűntek és otthonukat vesztettek számain csámcsogtak. Az ok ismeretlen – állapították meg. Holott nem az első ilyen esemény volt ez, már Laoszban is volt előzménye: 2017-ben egy sokkal szerencsésebb kimenetelű – mert kisebb léptékű – gátszakadásról állapították meg, hogy nem volt megfelelően megtervezve, és azért szakadt át (Gerin 2017). Szerencsére itt nem voltak halálos áldozatok.

Mi a közös ezekben az eseményekben? Az, hogy mindegyik a technikai civilizáció kudarcainak egy-egy epizódját jelenti a magát nagyon okosnak képzelő társadalom és a természet egyik őseleme, a víz kapcsolatában. Az említett példákban az erőszak, a természet leigázásának kívánalma fordul visszájára. Még ma is, a 19. század mérnöki, a 20. század gépészeti és a 21. század számítástechnikai vívmányainak birtokában. Hol rontottuk el, ha ma is – amint eleink korában, sőt nagyobb eséllyel – szakadhat át egy gát, önthet ki egy folyó, vagy tűnhetnek el a felszín alatti vizek, hogy aztán újra visszajöjjenek ott, ahol senki sem várja őket? Összességében azt mondhatjuk, hogy a gondolkodásunkban mindent felülíró „társadalmi igény"-t kiszolgáló merev és alkalmazkodni nem tudó technikai rendszerek és megoldások azok, amelyek újra és újra kiváltják a természeti folyamatok heves reakcióit. Valahogy csak nem sikerül hitelt érdemlő módon bebizonyítani, még egy aprócska falu esetében sem, hogy leigáztuk a természetet. És amíg a kiinduló paradigma, a természet ellenségként való felfogása, a megoldások katonai jellege („harc a természet ellen") nem változik meg, nem is fog. A természetet ugyanis egyáltalán nem lehet leigázni, legfeljebb addig piszkálgatni, amíg új stabil állapotba nem rendeződik (lásd éghajlatváltozás). Aki piszkálja, vagyis az emberiség, csupán egy apró alrendszere a természetnek, ezért elvileg sem képes alapjaiban átrendezni vagy módosítani azt.

Egy hasonlattal szeretném megvilágítani a példák közös gyökerét, ami a kudarcok eredendő oka lehet: a japán harcművészetek ismeretének teljes hiányát. A következő idézet elég jól kifejezi, mire szándékozom felhívni a figyelmet: „Az aikidó gyakorlati technikái a kifinomult mozgáson, az ellenfél erejének érzékelésén és elvezetésén, valamint annak szétszórásán vagy az ellenfélre való visszafordításán alapulnak. Az Alapító (Uesiba Morihei) megfogalmazása szerint az aikidó

egy olyan Út, amellyel le tudjuk győzni a konfliktusokat magunkban, és amellyel békét teremthetünk a világegyetemben. Ennek megfelelően az aikidó gyakorlása során *nem létezik ellenfél vagy ellenség, hanem partner van, akit vezetnünk és irányítanunk kell* (kiemelés tőlem). A gyakorlónak tehát nem a pusztításra, hanem minden esetben az építő jellegű konfliktuskezelésre kell törekednie" (Wikipédia). És ennek így kellene lennie a vizekkel is.

A kínai bölcs, Csuang Ce egy történetében Konfuciusz ijedten látja, hogy a hatalmas vízesés alján egy öregember hányódik a habokban. Mire azonban mentésére sietne, az illető már ott áll a parton. „Semmi különös – mondja a bölcs –, már zsenge ifjúságomban elkezdtem ezt gyakorolni és felnőve is folytattam. Most már mindig sikerül. Lemerülök a vízzel és felbukkanok a vízzel. Követem a vizet, és elfeledem önmagam. Azért maradok életben, mert nem küzdök a víz felsőbbrendű ereje ellen. Ennyi az egész." (idézi Hoff 1994: 81).

A kötet, amit az olvasó a kezében tart, egy könyvsorozat harmadik darabja. Elég régen, *Azok a bizonyos könnyű léptek* címmel jelent meg az első kötet, amely szándéka szerint elméleti alapvetés (Borsos 2002). Ez egy általam kidolgozott és több egyetemen (Állatorvostudományi Egyetem, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Pécsi Egyetem) oktatott tanmenethez írott tankönyv, akárcsak a második kötet, amely *Termő televény* címmel szintén a rendszerelmélet keretei között vizsgálja ember és termőföld viszonyát (Borsos 2018). A mostani könyv, mint a címe is sugallja, a társadalomban élő ember, valamint a felszíni és felszín alatti vizek kapcsolatát veszi górcső alá kétféle megközelítésben, egyrészt a technika szemellenzőjén keresztül, másrészt a természeti rend sorvezetőjének szem előtt tartásával. Hangsúlyozom, hogy a könyvben csupán a hidroszféra egyik részének, a felszíni és felszín alatti vizeknek a kérdéskörét taglalom, az óceánokat egyáltalán nem, és csak érintőlegesen foglalkozom a légköri víz ügyeivel.

Úgy gondolom, hogy a laikus olvasó is el tud igazodni a kötet lapjain, és igyekszem világosan megfogalmazni azokat a problémákat, amelyekkel a vízügyi ágazatnak vagy éppen az átlagembernek is szembesülnie kell. Az itt leírtak a középiskolás természettudományos tananyagra alapoznak, ezért elsődlegesen ajánlom azon egyetemek hallgatóinak, akik szakmai ismereteik megszerzését követően vizeink problematikájával foglalkoznak majd. Talán sikerül látókörüket kicsit szélesítenem, az általuk megtanult dolgokat más megvilágításból is szemléltetnem, és szakmájuk gyakorlása során a készen kapott szabályok helyett szabadabb gondolkodásra ösztönöznöm őket.

# 1. RENDSZERELMÉLETI ALAPOK

A felületes szemlélő számára egy lustán hömpölygő nagy folyó, egy csobogó patak vagy a kőzetrétegek közé ékelődő vízrétegek nem tűnnek élőlénynek. Egészen a múlt század végéig a természettudománynak is az volt az álláspontja, hogy bár vannak élő elemeik, alapvetően fiziko-kémiai változások alakítják élettelen környezetünket, és az élővilág ahhoz csak alkalmazkodik. A röviden csupán Gaia-elméletnek nevezett elgondolás megjelenése óta azonban a helyzet gyökeresen megváltozott. Ez az elmélet a kibernetikus szabályozás sajátosságaival ruházta fel a bolygó élő és élettelen rendszereit, és kölcsönhatásaikat egyetlen, összefüggő vezérlésként értelmezte, amelynek célja, hogy a Föld fiziko-kémiai paramétereit az élet fenntartásához nélkülözhetetlen komfortzónában tartsa (Lovelock–Margulis 1973). Az elméletet már áttekintettem a sorozat első kötetében (Borsos 2002), most azt vizsgálom meg, hogy a humánökológia területén a rendszerelmélet és a kibernetikus szabályozás sajátosságai hogyan és milyen mértékben alkalmazhatók a földi hidroszféra egy alrendszerének, a szárazföldi felszíni és felszín alatti vízrendszereknek a leírására, sajátosságaik értelmezésére, és hogy mindebben az ember milyen szerepet játszik.

Felszíni vizeink a legkisebb patakocskáktól a legnagyobb folyamokig összetett természeti rendszernek tekinthetők, amelyekben élő és élettelen alkotóelemek egyaránt megtalálhatók. A történelem során a különféle emberi társadalmak ismételten megpróbálták a vízfolyásokat alakítgatni, természetes életükbe beavatkozni, hogy az általuk hordozott és az emberi élethez létfontosságú erőforrásokat kihasználhassák ivásra, tisztálkodásra, öntözésre, majd később egyéb, például ipari célokra is (Haidvogl 2018). Az ipari technológia két-háromszáz éve fejlődött olyan szintre, hogy számos műszaki megoldás révén immáron nemcsak a nagy folyóvölgyek évezredes társadalmai, hanem a világon mindenhol lényegi, érdemi változásokat indukáljanak ezekben a természetes rendszerekben, és egy idő után a beavatkozások nem kímélték a felszín alatti rendszereket sem (Vörösmarty et al. 2015). Ennek eredményeként sajátos kölcsönhatás jött létre az ember, az általa alkalmazott technológia és az azt elszenvedő természet között. Az egyik legfontosabb földi erőforrásunk, az élet fenntartására alkalmas ivóvíz

különféle megjelenési formáit, de különösen a nagy folyókat műszaki infrastruktúra alkalmazásával jelentős mértékben módosították, ami megtörte ezeknek az egységes rendszereknek a természetes funkcionális ciklusait, és megszakította természetes működési rendjüket (Borsos 2013). Akárcsak a többi természeti rendszer esetében, a nagy folyóknál, sőt a felszín alatti vizeknél is a rendszerelmélet a legalkalmasabb tudományos megközelítés arra, hogy leírja a természetes viselkedésformákat, és értelmezze a folyó életében zajló változások dinamikája és a ráerőltetett merev műszaki szerkezetek közötti ellentmondásokat.

Az általános rendszerelmélet tudományterületének megalapítása Ludwig von Bertalanffy osztrák biológus nevéhez fűződik (Bertalanffy 1968), de azóta sokan és sokféleképpen fejlesztették tovább (például Meadows et al. 1972, 1992, 2004; Varela et al. 1974; Capra 1987). A mechanikus, redukcionista tudománynyal ellentétben itt a világ megismerésének egy másik megközelítése dominál, amely elsősorban a rendszerekkel, azok kapcsolataival és folyamataival foglalkozik, ezt tekinti elsődlegesnek, és csak azután veszi sorra az ehhez szükséges alkotóelemeket – nem pedig fordítva.

A humánökológia néven terjedő új tudományterület megkísérli a természeti és az ember alkotta rendszereket összeegyeztetni, előrejelzéseket adni az ember és környezet jövőben várható kölcsönhatásairól, és mindezek során komolyan igénybe veszi az általános rendszerelmélet megállapításait, törvényszerűségeit. Az alkalmazott rendszerelmélet egyik általános érvényű megállapítása, hogy az ember társadalmi cselekvése, beleértve esetünkben különösen a műszaki rendszerek létrehozását, pozitív visszacsatolási ciklusokkal kórosan fertőzött, alapvetően bizonytalan tudásra alapozott és a csökkenő hozadék törvényével folyamatosan konfliktusba kerülő folyamat. A legtöbben úgy gondolják, hogy ezek a hibák és kudarcok lényegében arra vezethetők vissza, hogy míg a természeti folyamatok kaotikus és nemlineáris jellegűek, az emberi, műszaki rendszerek logikusan felépített, lineáris berendezkedésű létesítmények (H. Odum 1994, E. Odum 1997, Marten 2001).

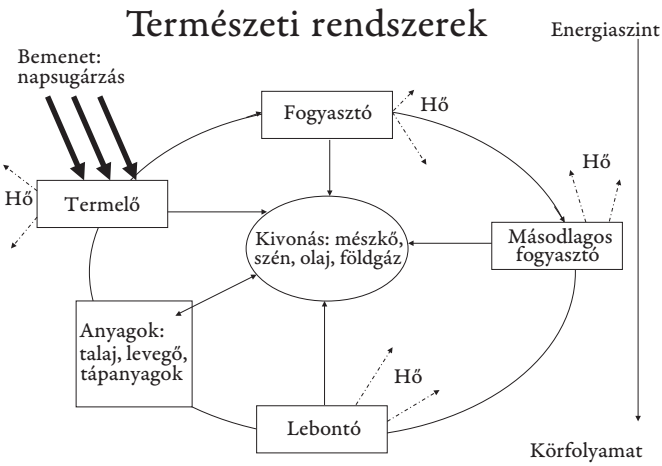
Márpedig a humánökológia szerint az emberi társadalom kölcsönhatásait nem vizsgálhatjuk másképp, mint a környezetünkkel együtt egy egységes rendszerben. Ebben az elméleti keretben a szervezetet vagy a társadalom biológiai, társadalmi és fizikai vonatkozásait mind környezetük kontextusában kell értelmeznünk. A tágabb értelemben vett humánökológia szerint ez nemcsak a természeti világ lehet, hanem és/vagy a társadalmi és kulturális miliő is, amiben az adott szervezet létezik. Ebben a megközelítésben az egyén, a társadalom és a környezet kölcsönhatások és változások aktív folyamatai által van egymással összekötve.

Ebben a könyvben az általános rendszerelmélet eszközeit és az úgynevezett elsőfajú hiba jelenségét a felszíni és felszín alatti vizekre alkalmazzuk. Ehhez először át kell tekintenünk a dinamikus rendszeregyensúly főbb jellemzőit, elveit és folyamatait, valamint a rendszerek és alrendszereik egymáshoz való viszonyát,

különösen ami az energia felhasználását jelenti. Meg kell vizsgálni azt is, hogy mik azok az elvi ellentmondások, amelyek a természetes és műszaki rendszerek közötti konfliktusok forrásai. Az elmélet után azt elemezzük, hogy a történelem során milyen volt a viszony az ember és a természet között a folyók életét illetően a vízgyűjtők erdőirtásaitól a modern rehabilitációs erőfeszítésekig. Olyan példákat is mutatok, amelyek fenntartható vízgazdálkodásra adhatnak reményt abban az értelemben, hogy velük talán elkerülhető vagy csökkenthető az elsőfajú hiba folytonosan visszatérő kényszere.

## 1.1. A TERMÉSZETES RENDSZEREK JELLEMZŐI

A természeti rendszerek ciklikus mintázatát az 1. ábra mutatja be. Az élő rendszerek alkalmasak arra, hogy körfolyamatok sorozatán keresztül befogják, átalakítsák és tárolják a napfény elektromágneses energiájának egy részét. Az ilyen rendszerek kölcsönhatásait és kapcsolatait egyenes vonalú láncok helyett egyre inkább összetett és bonyolult hálózatok formájában írják le (Mollison 1990, Capra 1997). A különféle földtörténeti korokból visszamaradt lerakódásokat ma kőszén, mészkő, kőolaj vagy éppen földgáz néven ismerjük. Tekinthetjük ezeket az anyagokat hulladéknak is, hiszen a Föld történetének egy korábbi fejezetéből maradtak vissza (Lovelock 1991), nem szabad ugyanakkor megfeledkeznünk arról, hogy csak az anyagok körforgása zárul ciklusokban, az energia mindössze áthalad a rendszeren, és ennek során csökkenti annak entrópiáját. Ezt az teszi lehetővé, hogy a napfény hosszú távon képes folyamatosan és bőségesen új energiával ellátni a rendszert.




1. ábra. *A természeti rendszerek folyamatainak modellezése*

Minden rendszer dinamikus egyensúlyban áll a környezetével vagy más néven azzal a szuperrendszerrel, amelynek részét képezi. A rendszer részei, ezek kapcsolatai és egymáshoz való viszonyuk együttesen a rendszer szerkezetét adja. Ezzel a szervezett rendszerek eltávolodnak a homogén, egyenletes és ezért energiaminimumban lévő állapottól, és a dinamikus folyamatok révén szervezett, inhomogén („rendezetlen") állapotra tesznek szert. E szervezett állapot fenntartása folyamatos energiabefektetést igényel, amit a rendszer szerkezete szabályoz, és az adott rendszer élettartama során meglepően állandónak mutatkozik (Borsos 2002). A rendszer egyik különleges tulajdonsága, hogy igyekszik megőrizni azokat a kapcsolatokat és viszonyokat, amelyek mint rendszert megkülönböztethetővé teszik. Ha nem lennének külső behatások, egy ilyen elrendeződés az állandó egyensúly állapotában lenne. Ezért a rendszerek természetüknél fogva konzervatív, a jelen állapot megőrzésére törekvő szerveződéseknek foghatók fel. A környezet azonban folyamatosan változik, és amelyik rendszer fenn akar maradni, kénytelen idővel saját részeiben, kapcsolataiban és viszonylataiban végrehajtott változtatások révén alkalmazkodni ezekhez a változásokhoz. Ily módon a külső behatásokat kivédheti, és a folyamatban maga a rendszer is egyfajta fejlődésen megy keresztül, amelynek révén alkalmazkodóképessége megnő. Ez viszont visszahat a környezetére, és ebből eredően a dinamikus egyensúlyi állapotra is (Gyulai 2009). Az idő előrehaladtával ezek a változások egy új rendszerállapot kialakulásához és más, új tulajdonságok megjelenéséhez vezetnek. A folyamatot evolúciónak nevezzük, és lényege, hogy benne a pozitív és negatív visszacsatolások egyfajta egyensúlyba kerülnek, ezért egyik sem tud kizárólagosan érvényesülni.

A nem élő rendszerek hajlamosak entrópiájuk növelésére – a folyók ezt azáltal érik el, hogy a tektonikai mozgások által változatossá tett földrajzi terepet elegyengetik, feltöltik –, míg az élő rendszerek szerveződésük fokát folyamatosan növelik, szabad energiát halmoznak fel, aminek következtében entrópiájuk csökken. Miután élő és élettelen részeik egyaránt vannak, a folyók és a hozzájuk tartozó vízgyűjtők is fejlődnek, miközben igyekeznek dinamikus egyensúlyi állapotukat a felettük álló rendszerekbe, a hidroszférába és a bioszférába illeszkedve helyileg megtartani. A rendszerek egymásba foglalt hierarchiában kapcsolódnak össze, mindegyik rendszer a felette álló szuperrendszer teljes mértékben integrált, funkcionális alkatrésze, tehát nem piramisszerűen, hanem egymásba „fészkelt" módon épülnek fel (Koestler 1967: 84, Sheldrake 1987: 77). Nem árt itt ismét emlékeztetni arra, hogy akármilyen találékony is az ember, az emberi társadalom végső soron nem más, mint a Föld bioszférájának egyik alrendszere. Sajnos azonban a korábbi rendszerműködés során felhalmozott lerakódások (mészkő, olaj, gáz, szén stb.), a meg nem újítható erőforrások (fémek, ércek, kőzetek) kiaknázásával, valamint a megújuló források (halállományok, erdők, agrár-ökoszisztémák, vízkészletek stb.) a megújulás sebességénél nagyobb mér-

tékű használatából nyert energia- és erőforrások látszólag bőségben rendelkezésre álló mennyiségeinek felhasználásával az emberi társadalom működése egy elszabadult pozitív visszacsatolású, önmagát erősítő ördögi körré vált, ami a modern civilizált társadalmat egyre gyorsuló fejlődési spirálba kényszeríti, és ezzel a rendszert logikai csapdák foglyává teszi (Borsos 2013).

A környezethez való alkalmazkodás, a biológia alapvető fogalma csak egyedi vagy faji szinten értelmezhető, egy komplex ökológiai rendszer a maga biogeokémiai ciklusaival nem alkalmazkodik, hanem kölcsönhatásban van a természeti környezet élő és élettelen elemeivel, kölcsönösen alakítván egymást. A természetes élő rendszerek építőelemei és alrendszerei között kialakuló kölcsönhatások összessége arra törekszik, hogy a rendszert az adott rendszerre jellemző peremfeltételek között tartsa, tehát lehetőség szerint állandósítsa a környezeti hatásokat. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy az élő elemekre vonatkozó szelekciót tágabb értelemben éppen hogy nem az alkalmazkodási kényszer és a verseny, hanem az együttműködés, az egészhez való hozzájárulás mértéke szabja meg, és azok a fajok, populációk maradnak meg, amelyek képesek az optimális „üzemállapot" fenntartásához hozzájárulni. Az ilyen rendszereknek nagy a pufferkapacitása, tehát képesek a természeti tényezőkben bekövetkező fluktuációkat negatív visszacsatolással kompenzálni. Legalábbis addig, amíg az alrendszerek épek és együttműködésük hiánytalan, hiszen ez a rugalmasság záloga (Molnár 2002b: 182). Jó okunk van feltételezni, hogy amennyiben valamely alrendszer az egyensúly és a kibernetikus szabályozás ellen dolgozik, akkor azt az adaptálódó, interaktív rendszer rövid úton kiküszöböli.

## 1.2. AZ ENERGIA NEM ÚJUL MEG

Az emberi társadalmakban a külső energiabevitel az, ami felborítja a természeti környezettel kialakított ökológiai egyensúlyt. A civilizált emberiség időhorizontja mindössze néhány tízezer év, ezen idő alatt a Föld bolygó összes rendszerének egyetlen valódi külső energiaforrása – a nukleáris, geotermális és bizonyos értelemben az árapály-energia kivételével – mindenkor a bolygó felszínét érő napsugárzás energiája volt, és belátható időn belül ez így is marad. A szél, a hullámok, a vízi energia és az összes biomassza, valamint az abból eredő energiaforrás mind csak a napsugárzás átalakításából származó másodlagos energiahordozó. Azok az anyagok viszont, amelyek ezeket az energiaféleségeket hordozzák, mind körforgásban találhatók. A mindennapi szóhasználat ezeket az energiafajtákat, valamint a recens, tehát jelen időben megkötött biomasszát és a Föld kérgének a hőjével „újrafűtött" geotermális energiát is a megújuló energiaforrások közé sorolja.

A fenti okok miatt azonban az, hogy mit nevezhetünk megújulónak, viszonylagos fogalom. A kifejezés eleve helytelen, hiszen az energiamegmaradás tör-

vénye értelmében energia nem újulhat meg, mert felhasználása során disszipálódik, és visszavonhatatlanul munkává, hővé stb. alakul. Csupán az energiát közvetítő anyagi rendszerek újulhatnak meg abban az értelemben, hogy részei a bolygó biogeokémiai, hidrológiai ciklusainak. A megújuló források sérülékenysége, ideértve a legtöbb energiaforrást is, használatuk intenzitásától függ. A túl intenzív kiaknázás azt az ökológiai rendszert, amelynek részét képezik, egyik stabil állapotból a másikba zökkentheti át, az új elrendeződés azonban már más peremfeltételekkel rendelkezik: megváltozik a megújíthatóság mértéke és lehetősége, ezért visszafordíthatatlan változások játszódnak le. Ha túl erőteljes az igénybevétel, eltűnhetnek azok a „szolgáltatások" (természeti kincsek) is, amelyeket az ökológiai rendszer nyújt. Ha egy kereskedelmileg hasznosítható halfajtát olyan mértékig túlhalásznak, ahonnan populációbiológiai okokból nem tud már magához térni, a változás akkor is visszafordíthatatlan lesz, ha hirtelen minden halászat leáll.

Ezek a helyrehozhatatlan károk nem előzhetők meg a kereslet és kínálat visszacsatolásokra alapozott egyensúlyi állapotával, amely csak a közgazdaságtan absztrakt logikáját követi és nem a biológiai tényeket. Miután túl keveset tudunk a természetes rendszerekben uralkodó kapcsolatok finom hálózatairól, a túlhasználat és túlzsákmányolás elkerülésének egyetlen gyakorlatias módja, ha a használat intenzitását csak apránként fokozzuk, és odafigyelünk minden apró jelre. A társadalmi és természeti rendszerek érintett részeit folyamatosan figyelemmel kell kísérni, nem lépnek-e fel nem kívánt következmények. Már az is intő jel lehet, ha a használat intenzitásának növekedésével a kapott haszon (a csökkenő hozadék törvénye) nem növekszik egyenlő mértékben. Kétség esetén nem árt az óvatosság elvét követni (Marten 2001). Az emberi és természeti rendszerek közötti eltérések fő oka az előbbiek által használt lineáris logika és a mérhetetlen mennyiségű külső, rendszeridegen energia. Ezek a megújuló energiaforrások kimerítését eredményezik, és folyamatos növekedési kényszert hoznak létre a bolygó véges erőforrásainak kárára.

A vízhasználat sem kivétel ez alól az elszabadult felhasználási ütem alól. A vízkészleteket is lehet túlhasználni. A nagy folyók által képviselt „megújuló" energia például csak akkor használható fel hosszú távon fenntartható módon, ha ez az újratöltődésüknél lassabb ütemben történik meg. Ha a folyó egész hosszában gátakat építenek, és a víz egy részét mindenütt elvonják, az utolsóban már sokkal kevesebb lesz a víz a vártnál, különösen, ha az egyéb felhasználási formák – öntözés, ivóvíz-felhasználás – kimerítik a folyó véges mennyiségű vízkészletét. Ha a felhasználás módja maga akadályozza a megújulást, például feltöltődés miatt, az adott erőforrás már nem tekinthető megújulónak. Vagy ha az éghajlatváltozás következtében a folyó felső vízgyűjtőjének utánpótlását adó nagy gleccserek elolvadnak, megszakad az örök körforgás, a megújulás és pótlódás ciklusa. Ma már sorra jönnek a szomorú hírek az ilyen veszélyeknek kitett nagy

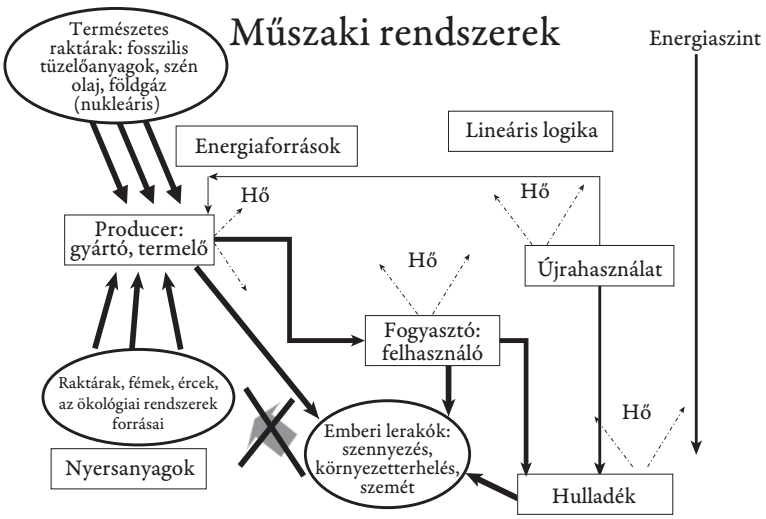
folyókról, beleértve a Himalája, a Karakorum és a Hindukus hegységek folyóit, az Indust, a Gangeszt és a Brahmaputrát (Gartner 2007, UNEP 2007). A becslések szerint a nagy ázsiai gleccserek az évszázad végére tömegük akár 65%-át is elveszthetik, milliók vízellátását sodorva ezzel veszélybe (Kraaijenbrink et al. 2017). A folyószabályozások, a mocsarak és lápvidékek lecsapolása, illetve a társadalmi igények kielégítésére a felszín alatti vízadó rétegekből kitermelt vízmennyiség miatt sokkal több víz kerül az óceánokba, mint amennyinek a pótlása csapadékkal lehetséges, ezért a kontinensek kiszáradnak: a pótlódás üteme megint csak nincs összhangban a kimerülés sebességével (Horváth 1993, Kravcik et al. 2008).

Ugyanez a gondolatmenet igaz a felszín alatti vizek utánpótlására is, sőt itt a helyzet még aggasztóbb, mert a legtöbb ilyen készlet csak évszázadok, évezredek, esetenként évtízezredek alatt tud pótlódni. A modellek néhány évvel ezelőtt még azt mutatták, hogy a bolygó állapotát jelző környezeti tényezők közül a biodiverzitás csökkenése és az éghajlatváltozás az a kettő, amelyek túl vannak az átbillenési ponton, tehát ezek a rendszerek mindenképpen irreverzibilis változásokon mennek keresztül, míg új, stabil állapotba nem kerülnek. Az akkori számítások szerint a vízkivétel és vízhasználat esetében még távol vagyunk a planetáris határtól (Röckstrom et al. 2009). Az azóta eltelt időben azonban a mérési idősorokból kiderült, hogy már majdnem ott vagyunk, és ráadásul ezért – az éghajlatváltozástól függetlenül is – felerészben az emberi tevékenység felel (Szöllősi-Nagy 2019).

## 1.3. A MŰSZAKI RENDSZEREK JELLEMZŐI

Antropogén rendszerekben az anyagok körforgásának logikája megtörik, és helyét lineáris anyagáramlás tölti be. Elvétel van, de nincs visszapótlás, megújulás sem energetikai, sem anyagi értelemben. Ezzel egyidejűleg az emberi rendszerek minden lépésben új lerakódásokat hoznak létre, amelyek kivonódnak a cirkuláris folyamatokból, szennyeződés, hulladék, melléktermék stb. formájában. Ezek alacsony energiaszintű, szerkezeti rendezettségüket vesztett, magas entrópiaszinttel rendelkező anyagok, amelyeknek nem sok esélyük van a folyamat kezdőpontjához való visszatéréshez. A lebontók pedig teljesen hiányoznak a rendszerből. A rendszer egésze mint olyan visszafordíthatatlan (Borsos 2009). Az anyag- és információáramlás lineáris tervezettségű, és az ilyen műszaki megoldásokban amúgy is jelen lévő, a későbbiekben elsőfajú hibának is nevezett, kibernetikus nyelven pozitív visszacsatolásként ismert mechanizmusok hatásait a közgazdaságtanban dívó növekedési elméletek okozta növekedési kényszer még csak tovább fokozza. Az eredmény, hogy az amúgy is visszavonhatatlanul elveszett, nagy mennyiségű disszipálódott energián kívül az anyagi bevitel is szét-

esik, és további feldolgozásra alkalmatlanná válik. Ez egyike azoknak az okoknak, amiért az ilyen műszaki rendszereket az ökológusok a bolygó életfenntartó rendszereinek viszonyában parazitaként határozzák meg (Odum 1997, 314). Azt is mondhatjuk, hogy ez a lényegi hiba okozza a folytonos növekedés kényszerét: hiszen a rendszerek anyagi összetevőit is új erőforrások felhasználásával kell újra és újra előállítani. Világos, hogy ezt az ellentmondást nem lehet a növekedési paradigma keretein belül feloldani (2. ábra). A vízfelhasználás módozatai sem kivételek ez alól a megfutó növekedési görbe alól.




2. ábra. *A műszaki rendszerek lineáris logikája*

Ráadásul ma már minden műszaki rendszert a jelen időben képződő, megújuló forrásoknál sokkal koncentráltabb, nagyobb energiatartalmú energiaforrás táplál. Ezek a szenet – alkalomadtán a maghasadás energiáját – sokkal töményebb formában, magasabb fűtőértékkel tartalmazzák. A szén mint anyagi hordozó sokkal kisebb koncentrációban található meg a recens biomasszában, és teljesen hiányzik a többi megújulóból (nap, szél, földhő vagy víz), az energiafluxus ezért itt kisebb. Már csak ezért is reménytelen vállalkozás a fosszilis tüzelőanyagokat teljes egészében megújulókkal kiváltani. Olyan hatalmas mennyiségű tárolt energiát használunk el modern társadalmunk energiaigényének kielégítésére, hogy azt valóban megújuló forrásokból helyettesíteni gyakorlatilag lehetetlen. Hogy mást ne mondjunk, egyedül a Kínában a Jangce folyón épült Három Szurdok-gát 22 500 MW-os erőművének a meghajtására két 50 megawattos kisegítő erőműre van szükség, nem beszélve az építkezés, a lakosság áttelepítése, az erdőirtások és a nagyszámú egyéb járulékos tevékenység energiaszükségletéről, amit rendszerint nem számolnak bele

az energiamérlegbe, de amelyek energiaigényét természetesen fosszilis forrásokból elégítik ki (CTGPC 2007). A látszólag kimeríthetetlen mennyiségben rendelkezésre álló energia mentesíti az emberi társadalmat attól a kényszertől is, hogy a felhasznált anyagokat körforgássá szervezze. Az emberi, műszaki rendszerek ennélfogva elkerülik azt a negatív visszacsatolást, ami a természetes rendszerekben a pozitív visszacsatolású hurkokat kordában tartja (Gyulai 2009).

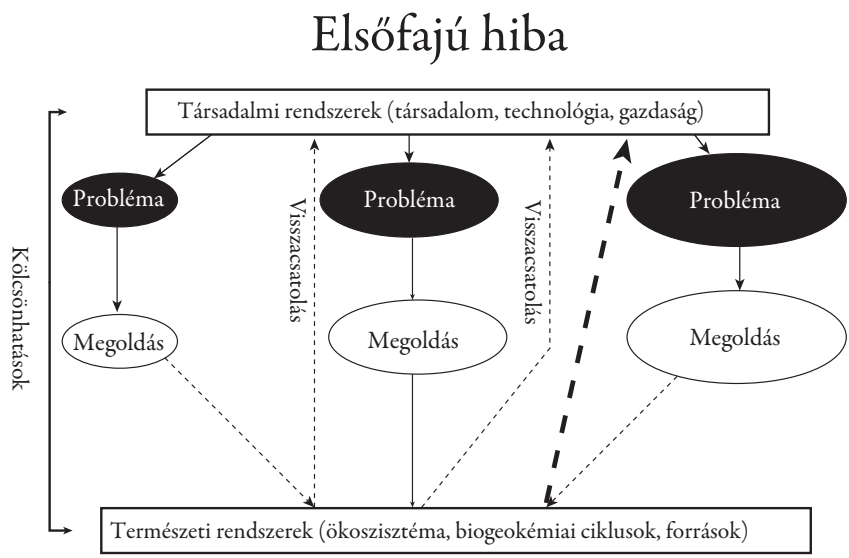
## 1.4. AZ ELSŐFAJÚ HIBA

A társadalmi, technikai rendszerek és az emberi társadalmak folyamatos kölcsönhatásban állnak szuperrendszerükkel, a bolygó természeti rendszereivel: az ökoszisztémákkal, a biogeokémiai ciklusokkal és a természeti erőforrásokkal. A társadalmi-műszaki és a természeti rendszerek közötti kölcsönhatás során a társadalom egyre kiterjedtebb igényei és a népesség növekedése rendszerint gondot okoznak, amelyet valamilyen lineáris logikájú technikai módszerrel orvosolnak. A „megoldás" kihatással van a természeti rendszerre, amely viszont visszahat a társadalmi rendszerre, így a korábbinál is összetettebb és átfogóbb problémát vált ki. Az új, „fejlettebb" megoldás azonban még pusztítóbb hatást gyakorol a természeti környezetre, és ez ismét csak visszaüt a társadalomra. Egy folyamatosan növekvő mértékű, pozitív visszacsatolású folyamat alakul ki egyre bonyolultabb következményekkel (Borsos 2009). A folyamat mind többször kerül összetűzésbe a természeti rendszerek működésével, aminek az ára a természeti és társadalmi rendszerek épségének ökológiai és környezeti válság néven is emlegetett összeomlása. Ezenkívül a természeti rendszerek által eredetileg ingyen nyújtott számos „szolgáltatás" (helyesebb lenne előnynek nevezni) elvész, és mesterségesen kell pótolni, sok pénzért és – ezek után nem meglepő módon – elkerülhetetlenül további gondok kreálásának a lehetőségével.

A rendszerelmélet egyik alapvető kategóriája a kétféle rendszer együttműködésének vázolt hiányára alkalmazott fogalom, az úgynevezett elsőfajú hiba. Nem titok, hogy minden emberi társadalom a gazdasági és pénzügyi rendszerével, a saját felépítményével hatást gyakorol a körülötte lévő természeti rendszerre. Ma már a bolygót beborító hatalmas, ember alkotta változások láttán nehéz elképzelni, de a természeti rendszernek az emberi társadalom csupán egyik – nem is a legnagyobb – alrendszere. Mint ilyen, hosszú távon nem képes a felette elhelyezkedő szuperrendszer logikája ellenében hatni. Elsőfajú hibának röviden olyan műszaki, társadalmi beavatkozásokat vagy jelenségeket nevezünk, amelyek a kétféle rendszer dinamikája és működési mechanizmusainak ütközése következtében előálló különbségeket inherensen magukban hordozzák, ezért kimutatható, hogy:

- elméletben sem képzelhető el olyan megoldás, amely zökkenőmentes együttműködésüket lehetővé tenné, és ezért
- a műszaki beavatkozás megvalósítása után nagy biztonsággal megjósolható (de nem meghatározható), hogy újabb problémák fognak keletkezni a természeti rendszer és az ember alkotta műszaki rendszer konfliktusának következtében.

Az elsőfajú hiba mögött rejlő filozófiai ok az, hogy a probléma megoldására kitalált emberi, műszaki beavatkozások szinte kivétel nélkül mindig, és nem csak az ipari forradalom óta, egyszerűsítő, redukcionista elképzelések alapján születnek, nem pedig egységes egészben gondolkodva. A különféle rendszerek összetett kapcsolataiból egyetlen összetevőt emelnek ki, azt módosítják, távolítják el, vagy egyetlen új összetevőt raknak hozzá azzal a makacs hittel, hogy „megoldják" a gondot. Ám minden természetes rendszer, különösen az ökoszisztémák, összetett módon viselkednek és a beavatkozásra rendszerszinten reagálnak. Az egész rendszer újraszerveződik, és új peremfeltételek alakulnak ki. Miután a műszaki megoldások teljesen merevek és statikusak, nem alkalmazhatók az újonnan kialakult körülmények között, ezért alkalmatlanná válnak a rendeltetésszerű használatra (Borsos 2002). Az elsőfajú hiba kiküszöbölésének előfeltétele az emberi társadalmi rendszerek és az ökoszisztémák együttes fejlődése (koevolúció) és egymáshoz való kölcsönös alkalmazkodása (koadaptáció) (Marten 2001). Az elsőfajú hiba önmagát felerősítő mechanizmusát a 3. ábra illusztrálja.




3. ábra. *Az elsőfajú hiba önerősítő mechanizmusa*

A természeti környezet társadalmi igényű átalakítása tehát a fentiek miatt soha nem sikerülhet úgy, ahogy szeretnénk. A közhittel ellentétben ez a megállapítás nemcsak az élő rendszerekbe történt beavatkozásokra igaz, hanem az olyan, jórészt élettelennek tudott, ám rendkívül bonyolult természeti rendszerekre is, mint amilyen a földfelszín vízrajza, a felszíni vizek lefutása, mozgása, változásai és természetes dinamikája. A folyók olyan dinamikus természeti rendszerek, amelyek az élet nagyon sok jellemzőjével rendelkeznek, ezért joggal nevezhetjük őket élő rendszereknek az élő, fejlődő rendszerek számos jellemzőjével együtt (Láng 2002). A lineáris logika mellett a másik alapvető különbség az adaptáció képességének feltűnő hiánya a műszaki rendszereknél, amelyek nem képesek reagálni a változó körülményekre, a szó szoros értelmében örökre kívánnak bebetonozni egy-egy üzemállapotot. Más szóval hiányzik belőlük a fejlődés lehetősége.

A tipikus elsőfajú hiba esetén a társadalom döntéshozói nem ismerik fel a probléma jellegét, ezért bíznak abban, hogy a – továbbra is lineáris logika mentén fejlődő – tudományos, ipari és műszaki haladás olyan megoldást fog kínálni, amely orvosolja a bajt. Ezzel egy ördögi kör jön létre, amely ráadásul pozitív visszacsatolással működik, tehát az újabb műszaki megoldásra adott természeti válasz még nagyobb gondokat okoz, mint az elődje okozott, ezért az embernek még nagyobb átalakításokat kell eszközölnie, még nagyobb erőfeszítéseket tennie (több anyagot, energiát – és pénzt – megmozgatnia), ha ideig-óráig működő új megoldást akar megvalósítani. Az elsőfajú hiba visszacsatoló körei már elég régen kialakultak, gyakorlatilag amióta szervezett emberi társadalmak léteznek. Hogy nem okoztak eddig nagyobb bajt, az a két rendszer egymáshoz viszonyított méretének eddig jelentős különbségével magyarázható. Az emberi társadalmak korábban elenyészően parányiak voltak a bolygó biogeokémiai ciklusaihoz és ökoszisztémáihoz viszonyítva, ezért az elsőfajú hiba érzékelésekor alapvetően kétféle választ adtak a felmerült problémákra: vagy kihaltak, elvándoroltak, áldozatául estek egy másik, az adott pillanatban jobban adaptálódott társadalomnak, vagy előrukkoltak egy technikai újdonsággal, amely lehetővé tette fennmaradásukat. A dolog azonban komolyabbá vált a fosszilis tüzelőanyagok és a nukleáris energia felfedezésével, amelyek bőségesen rendelkezésre állván még több energia felhasználása árán menekülő útvonalat nyújtottak a rosszul végiggondolt műszaki újítások okozta következmények elől.

De az emberi beavatkozások áttekintése előtt lássuk, hogyan is működnek a természetben önmagukban, külső behatás nélkül a vizek rendszerei.

# 2. A LEGRITKÁBB ÁSVÁNY

A legtöbb élőlény víztartalma igen nagy. Minden életfolyamathoz szükség van vízre, ezért ez az egyik legfontosabb erőforrás. Ugyanakkor a szárazföld kiterjedt területein a víz igencsak hiánycikk. Még az olyan, sivatagosnak nem mondható területeken is, mint például Franciaország, meglepően kevés a víz. Párizsban például egy átlagos évben mindössze 577 órán át esik az eső, ami a 365 nap 7%-ának felel meg. Sőt, egy nyári zivataros napon is igen hamar véget ér az eső, és a nap többi részében nem érkezik csapadék. Mégis a folyók (néhány jegyzett kivételtől eltekintve) egész évben folynak (Chorley 1969). Eddig legalábbis így volt, az éghajlatváltozás azonban jó eséllyel átrendezi majd ezt a mintát. Hogyan lehet ez? A válasz a szárazföldre hulló csapadékból származó víz megoszlásában és dinamizmusában rejlik.

## 2.1. A FÖLDI VÍZKÉSZLET MEGOSZLÁSA, DINAMIKÁJA

### 2.1.1. A víz jellemző tulajdonságai

Noha a természetben a hidrogén- és oxigénatomokból összetevődő vegyület az egyik legáltalánosabban elterjedt anyag, a címben felvetett állítás, miszerint a víz a legritkább ásvány, igaz, azzal a megszorítással, hogy az élőlények – köztük az ember – biológiai igényeinek megfelelő víz ritka. A biológiai értelemben vett víz egyáltalán nem csak $H_2O$. A jó minőségű víz nem tiszta, legalábbis kémiailag nem. Nem a desztillált vizet nevezzük tiszta víznek, hanem azt a folyadékot, amely vízben oldott ásványi anyagok, sók ionjait az élőlények életfolyamatai számára megfelelő összetételben tartalmazza (Somlyódy 2018: 20). A köznyelv ezt az oldatot nevezi tiszta víznek. Ha nincs benne semmi, akkor az a baj, ha viszont egyes sók (például a nátrium- és kloridionok) túlzott mennyiségben vannak jelen, akkor az. Akkor sem tudunk vele mit kezdeni, ha kőzetek, ásványok kristályrácsaiba épül be. Még becsléseink sincsenek arról, mennyi lehet a litoszférában ilyen módon kötött víz.

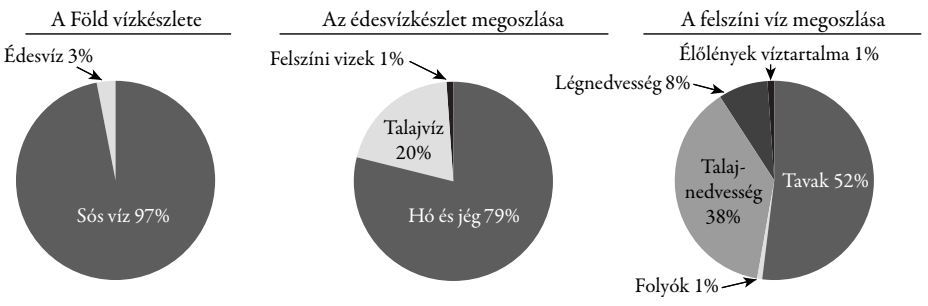
A jelenlegi hidroszféra eredetileg a korai (primordiális) légkörbe a bolygó belső anyagaiból származó gázleadással jött létre. Ennek mai, úgynevezett juvenilis utánpótlása már csak a vulkánosság révén lehetséges, ami nem valami sok, éves szinten mindössze 0,1 $km^3$ vízgőz (King 1962). Ha azonban a vízkörforgalmat lemeztektonikai kontextusba helyezzük, a juvenilis kategória értelmét veszti, hiszen a vulkáni tevékenység lemeztektonikai jelenségekhez köthető, és az így felszínre kerülő víz az óceánokból vagy az atmoszférából egyaránt származhat, ezért az újabb keletű osztályozások már nem számolnak vele (Deming 2002). Más elméletek szerint a víz jelentős része még csak nem is földi eredetű, hanem a bolygóba a korai időszakban becsapódott aszteroidák és meteorok jegéből származik. Az ilyen körülmények között képződő cirkonkristályok korának meghatározása alapján már 4,4 milliárd évvel ezelőtt is jelen volt a víz a korai Föld anyagai között (Taylor 2012). A legutóbbi kutatások azt is kimutatták, hogy a földi víz 1-2%-a a fiatal Nap ködéből származhat, amit kisbolygók sodortak magukkal és hoztak el hozzánk (Wu et al. 2018).

Valóban szerencsés helyzet, hogy a Földön a körülmények olyanok, amilyenek, és így a kék bolygó nevet kaphatta, ami a felületén folyadékfázisban fellelhető vízre utal. A víz ugyanis csak bizonyos feltételek mellett hajlandó folyadékként viselkedni, 0 °C hőmérsékleten és 0,61 kPa nyomás mellett például található egy úgynevezett hármaspont, amely a szilárd (jég), folyékony (víz) és légnemű (gőz) halmazállapot találkozására utal: Ennél kisebb nyomás és nagyobb hőmérséklet egyidejű jelenlétében a jég közvetlenül gőzzé alakul, kihagyja a vizes fázist, vagyis szublimál. Szerencsére a légnyomás ennél mindenütt nagyobb. Annak pedig számunkra csak elméleti jelentősége van, hogy 374 °C felett a víz már nem lehet folyékony, akármekkora is a nyomás, gőzállapotban marad. A reaktorépítő mérnököknek annál jobban kell számolni ezzel. Fontos viszont tudni, hogy forráspontja a nyomás csökkenésével csökken, az inkák utódai tehát 5500 méter magasban az Andok hegyláncai között már 82 °C -on forralhatják a vizet.

A földi vízháztartásban lévő víz kitűnő oldószer, és a legváltozatosabb anyagokat képes oldani, illetve elnyelni. Ennek köszönhető, hogy rendszerint sóoldatok formájában van jelen. Ráadásul a légkörben szén-dioxid felvételével híg savvá (szénsavvá) alakul, aminek nagy szerepe lehet például a felszínformáló hatásban, a felszín alatti víztartók kialakulásában stb. A szénsav oldja a karbonátos kőzeteket, például a mészkövet. A kioldott karbonátok anionjai ($Ca^{2+,}Mg^{2+}$) képezik a víz keménységét (Borsy 1993).

Tiszta vízre van tehát szükségünk nekünk is, továbbá a szárazföldi élet mindazon többi formájának, amelyekkel megosztjuk az életterünket, beleértve háziállatainkat és kedvtelésből tartott állatainkat is. Az ember ősidők óta a felszíni vizekre és a természetes úton keletkezett forrásokra volt utalva vízigényének kielégítésére, és csak a későbbiek során tanulta meg a felszín alatti vizek kiaknázásának módjait – jól-rosszul.

## 2.1.2. A vizek felosztása tartózkodási helyük szerint




4. ábra. *A Föld vízkészlete*
*(Forrás: https://vizmerce.blog.hu/2018/10/09/kincs.a.melybol)*

A Földön elérhető állapotban összesen mintegy 1,4 milliárd km$^3$ víz található. A bolygó vízkészletének megoszlása számunkra eléggé előnytelen: az összes víz 97,25%-a hullámzik hatalmas víztömegek formájában, amelyeket együttesen világóceánnak hívunk, és a bolygó felületének 70,8%-át borítják. Most azonban arról a durván 3%-ról lesz szó, amely édesvíz, vagyis – elméletileg – a szárazföldi élőlények számára felhasználható. Más beosztás szerint az óceánok és tengerek vizén túl még három jelentős víztároló közeg található a bolygón: a szárazföldeken, a légkörben, továbbá az élőlényekben magukban. A tengerek és óceánok kulcsfontosságú szerepet töltenek be a bolygó hőháztartásának egyensúlyban tartásában és a keletkező hőmennyiségek eloszlatásában. Kiegyenlítő hatásuk nélkül olyan szélsőséges hőmérséklet-változásoknak lennénk kitéve az év során, ami lehetetlenné tenné az élet jelenlegi formájában való fennmaradását. Ha a jelenlegihez képest csak kicsit is megnő a hőmérsékleti szélsőségek mértéke, annak már drámai következményei lennének mondjuk az élelmiszerbiztonságra nézve.

A második víztároló, a szárazföld esetében azonban nincs szerencsénk, mert még a 2,75% háromnegyedéhez (~75%-a) sem férhetünk közvetlenül hozzá: jég, gleccserek és állandó hó formájában gyakorlatilag kivonja magát az életfontosságú körforgásból. Ráadásul adatok hiányában nem tudunk mit mondani arról a tekintélyes vízmennyiségről sem, amely az Oroszország és Kanada területének 40%-át kitevő tundravidékek permafrost (azaz örökké fagyott) talajában található. Maradt tehát a 3% körülbelül 25%-a, ami így a teljes földi vízkészlet mindössze 0,75%-a. Ez az a mennyiség, amelynek kinyerésére egyáltalán reményünk van.

De az édesvízkészlet 13,5%-a, tehát a jég és gleccser után fennmaradó 25% több mint fele 800 méternél mélyebben fekvő olyan rétegvíz, amely műszaki

nehézségek miatt gazdaságosan egyelőre nem hozható felszínre (mélyfúrásokra, bányászati módszerek alkalmazására lenne szükség). Ha a földi vízkészletet egy 5 literes demizson tartalmának képzeljük, akkor ebből mindössze 0,5%, 1 evőkanálnyi az, ami rendelkezésünkre áll (Parfit 1993). A gyakorlatban ez mindössze nagyjából az édesvíz 11,5%-át jelenti, mégpedig az alábbi megoszlásban:

| | |
|---|---|
| Talajvíz és 800 méternél nem mélyebb rétegvíz | 11,0% |
| Tavakban található vízmennyiség | 0,3% |
| Talajban kötött víz | 0,06% |
| Légköri víz* | 0,0035% |
| Folyók | 0,003% |

* A levegőben adott pillanatban tartózkodó víz mennyisége. A kimutatásban nem szerepel a sarkvidéki területek említett, állandóan fagyott (permafrost) vízmennyisége (forrás: Mollison 1988).

Vagy más szerzőtől hasonló megoszlásban (forrás: Kravcik et al. 2008):

| Tároló | Vízmennyiség (millió $km^3$) | A teljes víztömeg százalékában |
|---|---|---|
| Óceánok és tárolók | 1370 | 97,25 |
| Jéghegyek, gleccserek | 29 | 2,05 |
| Felszín alatti víz | 9,5 | 0,68 |
| Tavak | 0,125 | 0,01 |
| Talajnedvesség | 0,065 | 0,005 |
| Légkör | 0,013 | 0,001 |
| Folyók | 0,017 | 0,001 |
| Bioszféra | 0,0006 | 0,0004 |
| Összes víztárolóban | 1408,7053 | 100 |

A folyókban és tavakban található és könnyen megfigyelhető, mert a szemünk előtt lévő édesvíz többszöröse a felszín alatti és a jég formájában található víz mennyisége. A légkörben egy adott időpillanatban megtalálható víz összes térfogata is egy nagyságrenddel nagyobb, mint az összes folyó vize. Ha a légköri víz egyik pillanatról a másikra kicsapódna, és a felszínre hullana, a Föld egész felszínét 25 mm vastagon tudná beborítani. Míg a világóceán a bolygó általános hőháztartásában, a légköri víz a helyi hőegyensúly kialakulásában játszik létfontosságú szerepet. A talajnedvesség pedig mennyiségében és jelentőségében

is sokkal fontosabbnak tekinthető, mint a folyók vize. Ezt a forrást még nem fedeztük fel igazán, elhanyagoljuk, felelőtlenül bánunk vele és pocsékoljuk.

A Földön élő összes élőlényben (tehát az egész növénytakarót is beleértve) található, úgynevezett biológiailag kötött víz teljes mennyisége még a folyókban található víznél is egy nagyságrenddel kisebb. Ám szerepe és fontossága nehezen becsülhető túl. Minden élőlény életfolyamatai vizes közegben zajlanak, és testünk nagy része vízből áll, továbbá különösen a növények víztartalma, amely az állatokénál jóval magasabb, felelős a helyi vízmérleg és vízháztartás egyensúlyának és ezen keresztül a helyi éghajlatnak a kialakulásáért és fenntartásáért. Bár a növények víztartalma nagymértékben eltérő lehet, a Földön minden magasabb rendű életforma a növények jelenlététől és jólététől függ.

Bár az adatok szerzőnként némileg különböznek, de az alapvető arányok nem (lásd Riviére 1989, Borsy 1993, Simon 1994, Kerényi 1995, Kravcik 2008, Taylor 2012). Az ENSZ Élelmezési és Mezőgazdasági Szervezetének (FAO) adatai szerint még kevesebb a rendelkezésre álló felszíni édesvíz (a 2,5% mindössze 1%-a) (Harrison és Pearce 2000).

A víz állandó mozgásban van a hidroszférában, aminek következtében az ember által létrehozott szennyezések egy része kiszűrődik, illetve kevésbé ártalmas helyre kerül át (például az óceánokba). Ezért nem mindegy, hogy milyen gyorsan cserélődik ki egy-egy vízforrás (szakmai szóval vízbázis) vize. Sajnos a folyók, a talaj, a felszín alatti első vízadó rétegből származó talajvíz és a légköri, valamint a biológiailag kötött víz kivételével a víz cserélődésének üteme kizárja, hogy gyakorlati szempontból számítsunk rá, és azt higgyük, majd a természet elintézi, amit mi összepiszkítottunk. A viszonyokat az alábbi táblázat szemlélteti.

*A természetben előforduló vízkészletek megújulási (kicserélődési) üteme (Forrás: Southwick 1976)*

| Vízkészlet helye | Megoszlási arány (összes víz %-ában) | Megújulás üteme (kicserélődési ciklusidő, átlag) |
|---|---|---|
| Óceán | 93,8 | 37 000 év |
| Gleccserek és állandó hó | 1,986 | 16 000 év |
| Felszín alatti (5 km mélységig, ténylegesen cserélődő) | 4,1<br>0,274 | 4 600 év<br>300 év |
| Tavak | 0,0051 | 13 év |
| Légkör | 0,000959 | 9 nap |
| Folyók | 0,000008 | 13 nap |
| Biológiailag kötött | 0,00000005 | 3,4 nap |

Ezért tehát a jó minőségű tiszta víz igazi kincs. Bár értéke az aranyét nem éri el, a kőolajét igen: a világ számos országában az emberek már ma is komoly pénzeket fizetnek azért, hogy tisztának tudott vizet igyanak. A tiszta víz gazdasági értékkel bír, pedig hosszú időn át oly természetes adottságnak vették, mint a levegőt, amit belélegzünk. Ami azt illeti, ötletekben nincs hiány. Kanada önállóságra szert tett, őslakosok lakta körzete, Nunavut remek gondolattal rukkolt elő: a terület jéghegyeit megolvasztják, palackozzák és eladják a japánoknak mint sarkvidéki, tiszta ivóvizet (Spitzer 2001).

## 2.2. A VÍZ KÖRFORGÁSA

### 2.2.1. Biogeokémiai ciklusok

A felszíni vizek mozgása olyan, mintha alfától ómegáig, a hegyekből a tenger felé haladnának, lenne elejük és végük. Valójában azonban a képnek csak egy szeletét látjuk, hiszen minden vízmolekula, akárcsak az élethez nélkülözhetetlen többi anyag, folyamatos körforgásban, ciklikus és periodikus szabályszerűségnek engedelmeskedve halad egyik pontból a másikba.

A felületes szemlélő számára a folyók olyanok, mintha állandó földrajzi, vízföldtani képződmények lennének, pedig a Kárpát-medence területén például néhány millió évvel ezelőtt még egyáltalán nem voltak folyók, hanem csak egy nagy tó, a Pannon-tó, mely 9-10 millió évvel ezelőtt, a miocén végén, a pliocén kezdetén alakult ki. A miocén kezdetén pedig még nem is tó volt – édesvízzé a belé ömlő folyók változtatták –, hanem tenger. Ha meggondoljuk, hogy 5 millió évvel ezelőtt az ember már elkezdett lefelé mászni a fáról, akkor ez nem is történt olyan régen. Fennállása alatt 3-4 km vastag üledék halmozódott fel a medence területén, amelynek nagy része szerves eredetű, vagyis korábbi élőlényekből származik, ezt bányásszuk most kőolaj, földgáz, miegyéb formájában. De még a Balaton-parti „löszfalak" is valójában a valaha itt élt mocsári növények megszilárdult maradványai (és nem szél által hozott lerakódások, ami a valódi lösz ismertető jegye) (Babinszki 2016). Ahol pedig a lemeztektonikai mozgások következtében egy-egy szárazulat magasabbra helyeződik, biztosak lehetünk benne, hogy előbb-utóbb új folyók alakulnak ki rajta. A felszíni vizek tehát kellően hosszú időtávlatban szemlélve ismétlődő, ciklikus és dinamikus mozgást mutatnak.

Míg az energia a földi rendszeren átáramlik, az anyagok körforgásban vesznek részt. Az egyes elemek körforgásában mind biológiai, mind geokémiai folyamatok közrejátszanak, ezért ezeket biogeokémiai ciklusoknak nevezzük.

A ciklusok között megkülönböztetünk gáz- és üledékes ciklusokat. Az előbbiek esetében a körforgást végző elem a légkörbe jutva és ott tárolódva hosszabb időre kikerül a körforgásból, az utóbbiaknál viszont a fő tárolók a földkéreg kőzetei. Egy-egy elem több tárolóban is előfordulhat (például a szén a légkörben is előfordul $CO_2$-ként, ugyanakkor a karbonátos kőzeteknek is alkotóanyaga), és az egyes tárolók relatív jelentősége is más és más lehet az egyes ökoszisztémákban (például a tundrában a legtöbb szén a talajban raktározódik, a trópusi esőerdőkben a növények biomasszájában). Az egyes elemek körforgása egymással is összefügg, és e biogeokémiai ciklusokat újabban az ember is nagymértékben befolyásolja (például a szénciklust a fosszilis energiahordozók égetésével, a nitrogénciklust a műtrágyázással zavarja meg), ami jelentős környezeti problémákat okoz. A körfolyamatok sebessége a sivatagokban és a tundrákon a legkisebb, a trópusi esőerdőkben a legnagyobb.

A víz körforgása, bár kémiai szempontból nem elemről van szó, az egyik legjelentősebb folyamat, hiszen a legnagyobb anyagmennyiség mozgásával jár. A víz körforgását nagyrészt fizikai folyamatok hajtják, de nem elhanyagolható az élőlények szerepe sem. A vízciklus egyik legfőbb ismérve, hogy az óceánok felületéről több víz párolog el, mint amennyi ugyanannyi idő alatt csapadékként belehull. A légkörbe kerülő többletvíz a szárazföldek fölé vándorol felhők, légnedvesség formájában, és ott hull le csapadékként. A szárazföldeken fordított helyzet alakul ki: az időegység alatt lehulló összcsapadék mennyisége meghaladja az időegység alatt elpárolgó mennyiséget. A lehulló többletvíz a vízfolyások útján jut vissza a tengerekbe (Horváth–Pestiné 2011).

A ciklus fő elemeit a biológiai folyamatok jelentős mértékben módosítják. A növények párologtatása (transpirációja) nagyon jelentős lehet: egy adott levélfelület párologtatási sebessége gyakran eléri a hasonló nagyságú, szabad vízfelület párolgási sebességének a felét. Az Amazonas medencéjének esőerdeje óriási vízraktárat és óriási párologtatási kapacitást jelent, amelynek jelentős éghajlatmódosító hatása van. Műholdfelvételek elemzésével kimutatták, hogy az evapotranspiráció (a párolgás és aktív párologtatás együttes folyamata a növényzettel borított területeken) akár két hónappal is előrébb hozhatja az esős évszak megjelenését, míg a száraz évszakban végzett biomassza- (elsősorban erdő-) égetésekből a levegőbe kerülő aeroszolok akadályozzák ezt a kedvező hatást (Wright et al. 2017). Sajnos ez a csodálatos rendszer az átbillenési pont felé halad, és könnyen lehet, hogy nemsokára szavanna lesz belőle (Lovejoy és Nobre 2019).

Egy becslés szerint (Pokorný–Rejšková 2008) egy 100 000 $km^2$-es területen évente átlagosan 50 millió tonna biomassza keletkezik, ami legalább 50 milliárd tonna víz elpárolgásával jár együtt. Mivel a víz párolgáshője 2400-2500 kJ/kg (hőmérséklettől függően), ez azt jelenti, hogy egy nagyjából Magyarországnyi területről évente 126 EJ energiát von el a párolgás. (Összehasonlításképpen:

a teljes magyar energiafelhasználás 1 EJ/év nagyságrendű.)[1] A hőelvonás nyilvánvalóan csak akkor tud megtörténni, ha elpárologtatható víz van jelen, és minél természetközelibb állapotban van a táj, a területegységre eső mobilizálható víztartalom rendszerint annál nagyobb. A szántóföldek és főként a beépített és burkolt felületek vizet nem tartanak magukban, így a napsugárzás szállította hő az ilyen területeken nem halmazállapot-változtatásra, hanem hőmérséklet-emelésre fordítódik. A legköltséghatékonyabb légkondicionálás módja tehát az, hogy minél nagyobb területeket hagyunk meg eredeti, természetközeli állapotukban.

Az esőerdők hatalmas párologtatóképessége alapjaiban meghatározza azt a klímát, ami az Amazonas-medencében uralkodik. Ebből természetesen az is következik, hogy ennek az erdőségnek a kivágása az éghajlat megváltozását vonja maga után. Tudományos vizsgálatokkal és műholdas felvételekkel igazolták, hogy az Amazonas medencéje maga hozza létre a kis vízkörzést, és hogy az erdőirtások az egyértelmű okai, amiért az utóbbi években hónapokkal később köszönt be az esős évszak: a kevesebb növény kevesebb párolgást generál. Ezzel a NASA szakemberei szerint eltolódik az egyensúly, és a következményeket Brazíliában szárazság, a tőle több ezer kilométerre fekvő Texasban azonban a számítások szerint heves esőzések formájában érezhetjük majd (Wright et al. 2017). Erre mintha rá is erősített volna a 2017 augusztusában a Harvey hurrikán nyomában Houstonba érkezett özönvíz (Kiderül 2017). Az összefüggés globális méretekben is igaz. A modern ember megtelepedése szinte minden esetben a természeti környezet vízraktározó képességének jelentős mérvű csökkenésével jár: az őserdőket legjobb esetben ültetett telepítvényekkel, rosszabb esetben szántóföldekkel váltjuk fel (az európai úgynevezett őserdők területe a jégkorszak utáni 80%-ról mára 0,2-0,3%-ra csökkent, lásd Gálhidy és Jordán 2010), de egyre nagyobb területeket borítanak épületek, aszfalt és beton is (az európai kontinens területének hozzávetőlegesen 10%-át), amelyek a napsugárzásra azonnali hőmérséklet-emelkedéssel válaszolnak, nyaranta megkeserítve az ott lakók életét. A globális éghajlatváltozásban a felszínek antropogén átalakítása és vízzel való telítettségének csökkentése is jelentős szerepet játszik.

A bőséges és tiszta víz forrása a csapadék. Sajnos ez a kijelentés egyre kevésbé igaz, egyrészt a globális klímaváltozás, másrészt a már az esőket is érintő emberi szennyeződések következtében (savas eső). A radioaktív robbanások és robbantások óta az esővíz a legkülönfélébb sugárzó anyagokat is tartalmazhatja (Hayakawa 1995: 186). Mindenesetre a szárazföldi édesvíz körforgása létfontosságú a vízkészletek megújulásában és még számos olyan folyamatban, amely az élethez szintén nélkülözhetetlen (felhőképződés, üvegházhatás, albedo, de más anyagok, például a kén visszaforgatása is, valamint talajképződés, erózió, mállás stb.). Gyakorlati szempontból akkor lehetünk nyugodtak és elégedettek, ha élő-

[1] Exajoule, $10^{18}$ J.

helyünkön évi 7-800 mm csapadék esik, lehetőleg nem túlságosan szélsőséges viszonyok között (tehát nem két nap alatt). Amennyiben ennél kevesebb, szárazság és szikesedés, ha több, árvíz, belvíz, földcsuszamlás, erózió és egyéb káros hatások veszélye fenyeget. Miután pedig kevés hely van a világon, ahol optimális mennyiségű eső esik, az ember emberemlékezet óta manipulálta a rendelkezésére álló víz mennyiségét. Mielőtt azonban ennek taglalásába merülnénk, nézzük, milyen a víz körforgása természetes körülmények között.

### 2.2.2. A víz hőkapacitása

Amikor a víz egyik halmazállapotából a másikba megy át, bizonyos mennyiségű hő szabadul fel, illetve használódik el. Amikor szilárd vagy folyékony fázisból légnemű fázisba kerül, igen nagyfokú mobilitásra tesz szert, és ezért nagy mennyiségű víz képes vízszintes és függőleges irányban is gyorsan nagy távolságokat megtenni. Egyúttal a víz rendelkezik az összes ismert anyag közül az egyik legnagyobb mért hőkapacitással (vagyis azzal a képességgel, hogy hőenergiát nyeljen el). Hőelnyelő és hőkibocsátó, hőátadó, -visszaverő és -elosztó képességei miatt a víz bármely halmazállapotában képes a bolygót szükség szerint hűteni vagy melegíteni. Olyan átlaghőmérsékleten tartja, ami lehetővé teszi a földi életet, ezáltal szerves részét képezi a bolygó kibernetikus szabályozásának.

A víz, főleg légnemű halmazállapotában, mérsékli a nappal és az éjszaka hőingadozásait, az évszakok és a különböző régiók eltéréseit, miközben egyúttal tompítja az időjárás szélsőségeit is. A vízgőz a légkör legnagyobb mennyiségben jelen lévő üvegházhatású gáza. A koncentrációja eléggé tág határok között mozog, de rendszerint 1-4% között található (a szén-dioxid ezzel szemben mindössze 0,0383%-ban van jelen). Minél több a víz a levegőben, annál erősebb a módosító hatás, amit a hőmérsékletre gyakorol, és annál kisebb kilengések tapasztalhatók az időjárásban. Minél kisebb a légkör páratartalma, a módosító hatás annál kisebb lesz, az időjárás kilengései viszont annál nagyobbak. Ahol a talajban és a levegőben nincs nedvesség és pára, rendszerint szélsőségesek a hőmérsékleti viszonyok. A vízgőz tehát ugyancsak jelentős mértékben befolyásolja a Föld éghajlatát, mégis viszonylag keveset kutatják és keveset beszélnek róla, mert sokkal egyszerűbb mindenért a szén-dioxidot okolni, mint a víz körforgásának általunk okozott anomáliáit. Egyes kutatások szerint az Amazonas erdeinek kiirtása olyan hatással van a kontinens szárazodására, ami már a globális éghajlatot is befolyásolja (Bunyard 1999).

A beeső napsugárzás a tengerekből, tavakból, folyókból, vizes élőhelyekről és magából a talajból meg a növényekből is vizet párologtat el, amely a légkörbe kerül. Minden egyes vízmolekula légneművé válása hőt von el a környezetétől, ezért hűti a Föld felszínét, mint az izzadság a testünket. A pára a légkörben lehűlve felhők, köd, csapadék vagy jégkristályok formájában kondenzálódik. Ennek során hőt ad le, és ha eléggé nagy koncentrációban képződik, csapadék

hull vissza a felszínre. A folyamat ismétlődése révén a felesleges hőenergia eltávozik a felszínről. Általánosságban igaz, hogy a földfelszín mintegy felét adott pillanatban mindig felhők árnyékolják le. A felhők korlátozzák a felszínt és a légkör alsó rétegeit elérő napsugárzás mennyiségét. A negatív visszacsatolás szép példájaként a kisebb mennyiségű napenergia kevesebb vizet párologtat el, és ezért kevesebb felhő fog képződni, így a folyamat többé-kevésbé egyensúlyban marad.

A felhők ráadásul szelektíven is szabályozzák a Földre érkező napsugárzás energetikai egyensúlyát. A rövid hullámhosszú sugarak egy részét visszaverik, így azok nem érik el felszínt, és az nem melegszik fel annyira, mint egyébként. Ugyanakkor a felszínről hosszú hullámhosszú hősugárzás formájában kibocsátott sugárzást is megfogják, ezért az nem távozik az űrbe, így melegítő hatásuk is van. Hogy hűtenek-e vagy melegítenek, elsősorban fajtájuktól és magasságuktól függ. Az alacsonyan elhelyezkedő gomolyfelhők (cumulus) inkább hűtik, míg a nagy magasságban képződő pehelyfelhők (cirrus) inkább melegítik a földfelszínt.

Ha a napsugárzás vízben bővelkedő felszínre esik, nagy része párologtatásra használódik el, és csak a maradék lesz érezhető hő, amely a felszínt melegíti, visszasugárzódik vagy fotoszintézisre veszik igénybe a növények. Ha száraz a terület, a sugarak azonnal érzékelhető melegedést okoznak. Ezért a vízfelszínek, a bőséges talajnedvesség, illetve a növényzet mind aktívan hatnak a szárazföldi vízkörzésre. A növényzettel borított felületek a talaj és a légkör között szabályozó szerepet töltenek be. Az ilyen terület nem melegszik túl, ezért nem is hajlamos a kiszáradásra, mert a párolgást aktívan, a növények levelein található légcserenyílásokon keresztül történő párologtatás révén szabályozni képes. Ezért a dús növényzettel borított földterületek egyfajta légkondicionáló képességgel és jelentős mértékű hűtő hatással rendelkeznek. A növényzet mennyisége, fajtája és nem utolsósorban minősége nagymértékben befolyásolja a vízgyűjtők területén a felszíni lefolyást is. Az erdőirtás, a mezőgazdasági tevékenység és a városok terjeszkedése csökkentik a föld felületén megmaradó víz mennyiségét (Kravcik et al. 2008). A városokban a csupasz, növényzet nélküli felületek sokkal hamarabb és sokkal jobban felmelegszenek, mint a növényzettel borítottak.

### 2.2.3. Vízkörzés

A hőenergia és a gravitáció hajtja a földi vízkörzést is, amely nagy és kis vízkörre osztható. A víz körforgása egyike a biogeokémiai ciklusoknak. A légkörben tartózkodás ideje alatt szén-dioxidot, ammóniát, egyéb gázokat és anyagokat vesz fel. Ám amikor a talajba szivárog, a felszín alatti kőzetrétegekben vándorol vagy a felszínen fut, akkor is számtalan ásványi anyag oldódik bele, és ezen folyamat során egyrészt táplálja az ökológiai rendszereket, másrészt lemossa a talajt. 3,5 milliárd tonnára becsülik azt az ásványianyag-mennyiséget, amely a vizekkel

évente az óceánba kerül. Ez az egyik oka annak, hogy egy fenntartható rendszerben a szárazföldről a felszíni lefolyást lehetőség szerint lassítani kell, és csak azt szabad a tengerekbe engedni, ami felesleg a szárazföldön és a kedvező mértékig telített légkörben.

### 2.2.4. A nagy vízkör

Nagy vízkörnek az óceánok és a szárazföld közötti anyagáramlást nevezzük. Évente megközelítőleg 550 ezer km³ víz párolog el és kerül a légkörbe. Ennek 86%-a származik a tengerekből és 14%-a szárazulatokról. Az elpárolgott víznek csupán 74%-a kerül vissza csapadék formájában a tengerbe, 26%-a szárazföldön hullik le. Ebből következik, hogy a párolgás és csapadék útján a tengerek vizet szállítanak a kontinensekre és szigetekre, amely sokszor nagy utat tesz meg a légköri termodinamikai áramlatok szárnyán, mielőtt csapadék formájában kicsapódna valamelyik szárazföld felett. Ebből levonva az elpárolgó 14%-ot, 12%-ot kapunk. Ez az a mennyiség, amely a felszíni és felszín alatti vizek útján lefolyással kerül vissza a tengerekbe, és amelyre egész életünk alapozódik (lásd az 1. színes ábrát).

A folyamat a következőképpen megy végbe. A tengerek felületére érkező napfény melegítő hatása következtében a víz nemcsak felmelegszik, de párolog is: a tengervízből a levegőbe vízmolekulák kerülnek, hátrahagyva a bennük oldott sóionokat, és a levegő vízpárával telítődik. A tenger feletti páradús levegő felfelé száll, és ott az uralkodó szelek szárnyán megindul valamilyen irányban (lásd az időjárás kialakulásáról szóló részt az első kötet 123. oldalán). Nagy része a magasban kicsapódva visszahullik az óceánba, de a szárazföldet érő hányada alkotja azt az értékes, megújítható vízkészletet, ami a szárazföldi élet alapja. A tenger felől érkező széllel utazó pára a szárazföldön elsősorban a hegyek kényszerítő ereje folytán még magasabbra kerül, ahol a már részletezett mechanizmus révén lehűl és kicsapódik: hó vagy eső, esetleg ködből kondenzáció útján a felszínre kerül.

Alaphelyzetben a lehullott csapadék a gravitáció törvényeit követi. A hidrogeológiai ciklusnak nevezett körforgás következő részében a felszínt alkotó anyagok tulajdonságaitól, a hőmérséklettől, szélviszonyoktól stb. függően a víz egy része a felszínen elfolyik, és vízfolyások formájában a lejjebb fekvő területek felé egyre inkább összeszedődik, másik része viszont beszivárog a talajba, és ott a felszín alatt folyik tovább, vagy egyre lejjebb hatol. Az előbbiekből lesznek a felszíni, az utóbbiakból a felszín alatti vizek. A víz előbb-utóbb mindkét esetben visszakerül az óceánba, és a körforgás kezdődik elölről (Mollison 1990).

Némely kivételtől eltekintve, melyeket lefolyástalan területnek nevezünk, a tavakba ömlők és az átmenetileg a talajban, gleccserekben tárolódók kivételével végső soron minden folyó a tengerben végzi. Vagyis a felszíni vízfolyásokban található víz ugyanúgy visszakerül oda, ahonnan vétetett, mint a szerves és szervetlen anyagok egy élő ökológiai rendszerben. Kellően hosszú időtávlat-

ban szemlélve a folyórendszer minden élettelen anyaga, az alluviális lerakódások, kőzetek is körforgásban vannak az erózió és a tektonikus mozgások ellentétes hatásai következtében. A folyók tulajdonképpen átrendezik az egyéb folyamatok, geológiai erők vagy a hosszú életperiódusok által alakított anyagokat (Haggett 2001: 56–63). Más szóval a folyóvölgyekben és vízgyűjtő területeiken az élettelen rendszerekre jellemző, entrópiát növelő és az élő rendszerek jellemzőiként megismert, a szervezettség révén az entrópiát csökkentő folyamatok egymás mellett vannak jelen (Borsos 2013).

### 2.2.5. A kis vízkör és a növényzet

A kis vízkör egy zárt körforgás, ahol a szárazföldről elpárolgott víz ugyanazon a területen, rendszerint egy folyó vízgyűjtőjén csapódik ki. Hasonló kis vízkörök léteznek az óceánokban és tengerekben is. A pára a vízgyűjtő alacsonyabban fekvő területein a növényzet aktív és passzív párologtatása (evapotranspiráció) segítségével kerül a levegőbe. A páradús levegő a napfény hatására felmelegszik és felemelkedik. Ezt követően a magasabb, hegyi területek felé sodródik, ahol a domborzat változása még magasabbra készteti, itt lehűl, és csapadék formájában visszahull a felszínre. Így a folyók forrásává válik, vagy ugyanarra a folyóvölgyi síkságra hull vissza, és felszíni lefolyással kerül a vízfolyásokba. A növények leveleiről az eső átlagosan 25%-a párolog el fizikai folyamatok útján, míg 50%-át a növény aktív anyagcsere-folyamatai párologtatják el. Ily módon a helyi vízkörzés területén található erdős vegetáció gyakorlatilag megduplázza a természetes csapadékmennyiséget, ami egyébként a természetföldrajzi tényezők hatásaként esne (Mollison 1990: 150). Ilyen helyi vízkörök találhatók az Amazonas vidékén és a Kárpát-medencében is. A trópusokon a helyi vízkörzés ráadásul hozzájárul a légkör hűtéséhez is, hiszen a párolgás hőt von el, a felhőképződés a beeső napsugarak mennyiségét csökkenti, míg az erdő fái olyan vegyületeket is kibocsátanak, amelyek hűtő hatásúak (Kreier 2022). A kis vízkörök egymással is kölcsönhatásban állnak, tekintve hogy térben és időben nagy kiterjedésű és eltérő morfológiájú, felszínű területeken jelennek meg, ahol a páratartalom és a felszíni vizek jelenléte is különbözik. Ezekben a víz – bár részben vízszintes irányban is mozog – elsődlegesen függőleges irányú mozgásának köszönheti a cirkulációt. A felhőtakaró kialakulásában is az eltérő felszíni hőmérsékletű szomszédos területekről történő párolgás játszik szerepet. A szárazföld felett tehát kisebb vízkörzési hurkok alakulnak ki, amelyek utánpótlást az óceán felől, a nagy vízkör révén kapnak (lásd a 2. színes ábrát).

A kis vízkör elnevezés megtévesztő, éppen hogy nagyon is sok víz mozog így. A csapadék átlagos mennyisége szárazföldön 720 mm, amiből 310 mm érkezik a tenger felől. Ez más szóval azt jelenti, hogy a nagyobbik rész, 410 mm a szárazföldi párolgásból eredő csapadék. A leeső csapadéknak csak a kisebbik része folyik el és szivárog be a talajba, nagyjából a fele-kétharmada ismét bekerül a helyi víz-

körbe. Ezt nem árt tudni, amikor az árvizeket „levezetni" akarjuk a tenger felé. Ezzel ugyanis a szárazföld kiszáradását okozzuk. Ha stabil csapadékmennyiséget szeretnénk elérni, meg kell őrizni a szárazföldi párologtatás jelentőségét. Ez – némi egyszerűsítéssel – a lehulló csapadék és a lefolyás/beszivárgás mennyiségének különbsége. Ha egy területről nagy az elfolyás, pozitív visszacsatolási hurok indul be, kevesebb párolgásból kevesebb csapadék keletkezik, és a szárazföldi helyi vízkör lassan megszűnik. Ez történt többé-kevésbé a Kárpát-medencében is. A fedett felszín (betonozott térség, aszfaltozott út stb.) például egyáltalán nem teszi lehetővé a víz beszivárgását, a növényzet megváltoztatása pedig erőteljesen befolyásolhatja azt (Szabó 1993). Ezzel szemben a lefolyás csökkentésével növeljük a párolgást, ami hűti a területet és biztosítja a csapadék-utánpótlást.

A zárt anyagforgalmú kis vízkör az egészséges vízháztartású vidékek sajátja. Ha a táj vízzel és vízgőzzel telített, a víz kis mennyiségekben és viszonylag kis távolságokra jut csak el, tekintve, hogy a vízpára enyhíti a nappal és éjszaka, illetve az eltérő vízháztartású területek közötti eltéréseket. Az elpárolgó és visszahulló gyakori és rendszeres eső a talajvíz szintjét is magasabban tartja, ezzel segíti a növénytakaró és vele saját fennmaradását. A növénytakaró eltávolításakor csökken a párologtatás, és a napenergia jelentős része a felszínen hővé alakul. Megváltozik a hőháztartás, nagyobbak lesznek az eltérések éjjel és nappal, illetve az egyes helyszínek között, légáramlatok keletkeznek, és a vízpárát a szél messzebbre sodorja, ami által elvész az adott környezet számára. A szelíd és gyakori esők helyét a tenger felől érkező ritkább, de erőteljesebb csapadék váltja fel. A zárt ciklus felnyílik, és beindul az erózió is. Könnyű belátni, hogy a társadalom számára is előnyös kis vízkörök életképességének fenntartásához a növénytakaró megőrzése létfontosságú (Kravcik et al. 2008).

Természetes körülmények között egy folyó – árterével, folyóvölgyével, vadvilágával együtt – együttműködő, egymást támogató, élő rendszert alkot, amely a külső behatásoktól lehetőleg minél jobban igyekszik távoltartani magát. Éppúgy viselkedik, mint bármely egyéb rendszer, amely megpróbálja dinamikus egyensúlyi állapotát fenntartani. Ebből következően a folyóvölgyben kialakuló ökológiai rendszer a folyó vízháztartásának az egyenetlen csapadékeloszlás és lefolyási viszonyok miatt kialakuló szélsőségeit enyhítő módon vesz részt a teljes egész működésében. Vagyis egy folyó egészségi állapota megítélhető abból, hogy az alacsony és magas vízállások közötti ingadozásokat az együttműködő folyóvölgyi rendszer milyen hatékonyan tudja kiegyenlíteni és elsimítani. Az egészséges folyó élő rendszer, és a vízháztartás természetes szabályozását a fenék morfológiájában, a lebegtetett és görgetett hordalék mennyiségében, minőségében, valamint a sűrű part menti növényzet összetételében, működésében bekövetkező változások útján látja el. Az ártéren különleges, sokoldalú táj alakul ki, és itt a legnagyobb a folyó vízszállító képessége is. Az egyensúly dinamikus volta miatt hosszabb távon ezek az alkotóelemek azonban maguk is változásoknak

vannak kitéve, a bemélyedések és magaslatok, a természetes padok és erek időről időre átrendeződnek. A hidrológiai mérleg egyensúlyát az ártér növényzete is szabályozza, amely többféle módon is képes a víz visszatartására az ártéren, így pótolva a hiányzó természetes csapadékot (Molnár és Pásztor é. n.).

A növényzet jelentősen módosítja a lehullott csapadék további sorsát. A fával borított területek viselkedése részletes tárgyalást érdemel, de a fátlan vegetáció is lehet komoly hatással a víz körforgására. Vannak olyan szárazföldi ökológiai rendszerek, amelyekben a nedvesség 90%-át maguk a növények párologtatják el, és csak a fennmaradó rész távozik fizikai párolgás útján. Ilyen helyeken a növények maguk idézik elő az esőt: a pára kicsapódását okozó légköri viszonyok helyben jönnek létre, és a csapadék nagy része visszahullik oda, ahonnan jött. Ilyen helyi vízkör alakult ki történetileg a floridai Everglades folyó mocsaras árterében, ahol az elpárologtatott víz ugyanarra a vízgyűjtő területre hullott vissza. A hatvanas években végzett lecsapolásokat követően megszűntek a nagy párolgású helyek, ugyanakkor a következményes szárazság elkerülésére öntözni kezdtek, ami a helyi ökológiai egyensúly felbomlásához vezetett (Postlethwait és Hopson 1995).

Érdemes megnézni, mi történik a csapadék és a földfelszín kölcsönhatásában akkor, ha növényzet nincs jelen. A lejtőkre hulló csapadékvíz a beszivárgó és elpárolgó rész kivételével a felszínen indul meg és természetesen a mélyebben fekvő területek felé törekszik. Lefolyása közben viszonylag egyenletesen pusztítja a földfelszínt. A lecsorgó víz összeszedődik, és előbb barázdákat, majd nagy, mély eróziós vájatokat, öregbarázdákat alakít ki. Mai körülmények között ezt lehet megfigyelni akkor, ha dombvidéken felszántott földre tavasszal, a vetés kizöldülése előtt nagyobb mennyiségű, heves csapadék esik, amely öregbarázdákat vés a puha, laza talajba és lehordja azt a mélyebben fekvő részekre, ahol ennek eredményeként mély sár képződik. Az esőnek ez a pusztító hatása az úgynevezett csepperózió révén megy végbe. A hosszabb ideig tartó pusztulási folyamat eredménye a rosszföld (badland), amely a talajt nem tartja meg, és ahol a barázdák már mély völgyekké terebélyesedtek. Az ilyen föld mezőgazdasági művelésre alkalmatlan. Ahol viszont a felszínt alkotó kőzetek keménysége eltér az alattuk levő puhább kőzetanyagtól, a csepperózió csodálatos felszíni formákat, kőpiramisokat, ingóköveket, kőgombákat hoz létre, mint például Anatóliában vagy az Egyesült Államokban (Simon 1999).

A szervezett civilizációk kialakulása óta az ember mindig is több kárt okozott az általa lakott természeti rendszereknek, mint hasznot. Kár alatt itt a dinamikus egyensúlyi állapot felborítása felé mutató behatásokat értem. A természetes vízkörzés egyensúlyára mért egyik első csapás a növénytakaró kiirtása volt. A növényzet vízcsapdaszerepe könnyen megérthető, ha elvégezzük az alábbi igen egyszerű kísérletet: egy domboldalon lejtőirányban alakítsunk ki a talajon több, egymástól elhatárolt, azonos területű bemutató sávot. Az egyes sávokat más és

más növényzettel telepítsük be. Könnyen belátható, hogy ha a csupasz talajra öntünk a talajcsík felső részén egy vödör vizet, az pillanatok alatt az elhatárolt sáv alján fog összegyűlni, gyakorlatilag teljes mennyisége időveszteség nélkül lefolyássá változik. Ha ugyanezt a vödör vizet egy tarlóra öntjük, csak annyival csökken a lefolyás sebessége, amíg a víz a növénymaradványokat kerülgeti. Ennél sokkal kevesebb víz fog leérni egy dús füvű legelőnek az aljára, és alig valami, ha egy fákkal, cserjékkel sűrűn benőtt és aljnövényzettel borított felszínen kíséreljük meg leönteni (személyes megfigyelés, Rodale Institute 1994). Ráadásul, ha a víz felülről érkezik – ahogyan a természetes csapadék általában –, előbb még a fás növényzet lombozatának teljes felületét át kell nedvesítenie, mire lejut a talajra. Utána pedig az egészséges erdőben bőven jelen lévő avar és humuszban gazdag talaj csak még tovább növeli a vízvisszatartó képességet. Ezt a jelenséget nevezzük szivacshatásnak.

Amikor egy vízgyűjtő felső, hegyvidéki szakaszain az erdőirtások, feltáró utak építése, ültetett erdők telepítése megszünteti vagy csökkenti a szivacshatást, a lefolyási viszonyok drasztikusan megváltoznak, és ebből eredően a hegyekből lefolyó patakok, zúgók, folyók vízjárása is. A csapadék lehullása és a hóolvadás, valamint az árvizek jelentkezése között sokkal kevesebb idő telik el, sokkal közvetlenebbé válik az ok-okozati kapcsolat ahelyett, hogy a korábbi, elhúzódó hatásmechanizmusokat figyelhetnénk meg. Az erdőtakaró elvesztése ráadásul megnöveli a kőzetek mállásának és az eróziónak az intenzitását és ebből eredően az alvizen megjelenő hordalék mennyiségét is.

### 2.2.6. Vízmérleg

A vízmérleg a hidrológiában a víznek egy rendszeren belüli körforgását jellemző tulajdonság, rendszerint egy-egy vízgyűjtőre vagy annak egy-egy részére értjük. Különféle egyenletekkel jellemezhető, ezek lényege, hogy figyelembe kell venni az adott rendszerbe belépő víz mennyiségét (csapadék) és az azt különféle formákban elhagyó víz mennyiségét (párolgás, beszivárgás, lefolyás). A kiegyenlített éghajlat egyik szükséges, de nem elégséges feltétele a stabil vízkörzés jelenléte. Ezért nagyon fontos tudnunk, van-e, és ha igen, pozitív vagy negatív irányú az eltérés a rendszerbe belépő és azt elhagyó víz mennyiségében. Pozitív vízmérleg esetén a telítődés, negatív esetén a kiszáradás irányába haladunk. A legtöbb klímamodell nem vagy nem kellő mélységében veszi ezt a szempontot figyelembe.

A szárazulatok 66%-a olyan terület, ahol a lehulló csapadék mennyisége meghaladja a párolgással elveszített mennyiséget, ezért pozitív vízmérleggel rendelkezik. A fennmaradó 34% esetében nagyobb a párolgás, mint a csapadék, ezek a száraz területek. Nem haszontalan megemlíteni, hogy az Atlanti-óceán is sivatag, amennyiben arid (száraz) területnek tekintendő: teljes vízmérlege negatív, és a hiányzó vizet a nagy óceáni szállítószalag az Indiai-óceán felől hozza vissza bele, amelynek a Csendes-óceánnal együtt pozitív vízmérlege van (Czelnai, 1999).

A köztudatban az áll, hogy a nagyobb egységek esetében – kontinensek, nagy folyók – a rendszerbe belépő és azt elhagyó víz mennyiségének különbsége hosszabb időtávlatban elhanyagolható vagy nem is létezik. Az a meggyőződés, hogy a tenger felől a szelek szárnyán érkező eső ugyanannyi, mint ami a folyókkal távozik, még abból az időből származik, amikor először fedezték fel a nagy földi vízkörzést. Ezzel egy régi rejtély oldódott meg: hogyan lehetséges az, hogy a folyók az óceánba szállítják a vizet, annak szintje mégsem emelkedik, és a szárazföldeken mégsem fogy el a víz. Ma már azonban tudjuk, hogy az óceánok vízszintje igenis emelkedik, és a szárazföldeken a felszín alatti vizek és a gleccserekben tárolt víz mennyisége csökken. E tény figyelmen kívül hagyása miatt lepődünk meg, amikor azt vesszük észre, hogy kontinenseink kiszáradnak, sivatagosodnak, és a népességrobbanástól az éghajlatváltozásig minden egyebet okolunk érte ahelyett, hogy a vízmérleg egyenlőtlenségeinek okait igyekeznénk feltárni.

Hidrológiai, meteorológiai és klimatológiai vízmérlegeket eleddig jórészt inkább csak egyes országokra, illetve nagy vízgyűjtőkre mértek. Márpedig minél nagyobb a lépték, annál könnyebben sikkadnak el az olyan aránytalanságok, mint amiről szó volt. Ha a tényleges viszonyokról akarunk pontos képet kapni, alacsonyabb szintekre kell lehatolnunk, regionális, helyi vízmérlegeket kell felállítanunk, ahol a vizsgált terület méretétől és jellegétől függően meg lehet határozni a csapadék és lefolyás helyes arányát. A vízmérleget akár egyéni, telektulajdonosi szinten is meg lehet állapítani, ha mondjuk azt szeretnénk megtudni, mennyi vizet kell begyűjteni ahhoz, hogy a kertünk ne legyen vízhiányos. Egy vízgyűjtő vízmérlege a következő egyenlettel írható le:

$$R = E + Q + \_V\,(1)\ [+1\% / -1\%]$$

A [+1% / −1%] értékek a vízgyűjtő vízmérlegének kismértékű éves változásai a Q és _V értékében. R az éves összes csapadék mennyisége, E az éves párolgás, Q a felszíni, felszín alatti lefolyás (éves szinten), _V a rendszerben rendelkezésre álló víz mennyiségében történt éves változás, +1% az adott naptári évben a területről enyhén megnövekedett lefolyás; −1% a viszonylag csekély mennyiségű beszivárgáscsökkenés a megnövekedett lefolyás miatt az adott naptári évben. Az 1%-os érték átlagosnak tekinthető, a 20. század során megnövekedett éves lefolyási és csökkent beszivárgási értékeket jelzi. Érintetlen területeken nullához közelít. Városokban a teljes körű esővíz elvezetése miatt nagyobb is lehet egynél. Függetlenül a tényleges százalékos értéktől, ha azt beszorozzuk a 20. század száz évével, tekintélyes mennyiségű vízveszteséget mutathatunk ki, különösen a talajnedvesség és a talajvíz terén (Szűcs 2018, Tamás et al. 2018). A hiányzó víz a jég olvadásából származó mennyiséggel együtt hozzájárul a tenger szintjének növekedéséhez, ami a hőmérséklet emelkedéséből származó hőtágulás miatt már önmagában is aggasztó.

Bár egyre többet tudunk a nagy földi vízkörzésről, még messze vagyunk attól, hogy teljes dinamikáját értsük. Ezért nagyon fontos lenne, hogy a felgyülemlő adatokat szintetikus módszerekkel megpróbáljuk rendszerszinten is értékelni. A technikai civilizáció számos hátrányos vonása mellett egyik legnagyobb előnye az, hogy olyan megfigyelési és vizsgálati módszerek kialakítását is lehetővé teszi, amit egyébként műszaki segédlet nélkül nem tudnánk megcsinálni. Az egész bolygóra kiterjedő megfigyelésekre azóta van mód, mióta a NASA kialakította az EOS (Earth Observing System) rendszert. Ennek egyik tagja a kifejezetten a föld vízháztartásának vizsgálatára „kiképzett" Aqua műhold, amelyet 2002 májusában bocsátottak útjára mintegy 700 km-es földfelszín feletti magasságban. Keringése során az óceánok párolgási viszonyait, a levegő vízgőz- (pára-) tartalmát, a felhőképződést, a csapadékviszonyokat, a talajnedvességet, a szárazföldi és tengeri jeget, valamint a szárazföldek és jégtakarók hőborítottságát figyeli (Parkinson 2003). Olyan egyéb, a földi rendszerek működését általánosan befolyásoló adatokkal kiegészítve, mint a sugárzó energia fluxusa, az aeroszolok mennyisége, a növénytakaró, illetve az óceánokban a fitoplankton és oldott szerves anyag kiterjedtsége, valamint a három szféra (föld, víz, levegő) hőmérséklete, értékes segítséget nyújt az időjárás előrejelzésével foglalkozóknak, valamint azoknak, akik a Föld működését szeretnék megismerni és ezen keresztül a megfelelő hozzáállás kialakítását elősegíteni (ENS, 25 April, 2002). A műhold várhatóan egészen a 2020-as évek végéig fog adatokat szolgáltatni (Aqua 2018).

## 2.3. FELSZÍN ALATTI VIZEK

A felszín alatti vizek minden típusa nagymértékben függ a mélyben elhelyezkedő talaj, kőzet és alapkőzet minőségétől, vastagságától, vízzáró vagy vízáteresztő voltától, kémiai, fizikai tulajdonságaitól, valamint térbeli alakulásától. Miután a világon minden mindennel összefügg, a felszín alatti vizek mechanizmusait sem lehet megérteni tehát egy kis geológia nélkül. A geológiai részletek, a kőzettípusok és azok genetikája (képződésének izgalmas története) mellőzésével itt csak azon fogalmakat tárgyalom, amelyek elengedhetetlenül szükségesek a vízkörzés megértéséhez.

### 2.3.1. A föld kincse

Szó volt róla, hogy a vízkörzés során a csapadékként a föld felszínére hulló víz egy jelentős hányada beszivárog a talajba, onnan a kőzetek rései közé. A földi édesvízkészletek legnehezebben becsülhető, de társadalmi szempontból talán legértékesebb része az a víz, amely a felszín alatt különböző formában és különböző mélységekben található. Eredete legtöbbször a felszínre hulló csapadékra

vezethető vissza, ám kisebb mértékben a kéreg felől, az ott lejátszódó geológiai folyamatok következtében, a kőzetek vízleadása révén is pótlódik. Szerencsére a földburokban a víz ezekben a felszín alatti készletekben minden kontinensen rendelkezésre áll. Márpedig a felszín alatti vizek igen jelentős szerepet játszanak a szárazföldi élet kialakulásában és viszont, az ökoszisztémák folyamatai befolyásolják, hogy mi lesz a lehulló csapadék sorsa.

A helyzet megértését nem könnyíti meg, hogy a felszín alatti vizeket fizikai tulajdonságaik, elhelyezkedésük és rendelkezésre állásuk alapján többféle rendszerben is osztályozzák, ráadásul teljesen más a magyar, a német vagy az angolszász terminológia. Az alábbiakban a magyar beosztást követem, annál is inkább, mert ez egyértelmű különbséget tesz az egyes vízfajták között.

Magyarországon a földfelszín alatt alapvetően négyféle vizet különítünk el:

1. talajnedvesség,
2. talajvíz,
3. rétegvíz,
4. résvíz (hasadékvíz).

### 2.3.1.1. *Talajnedvesség*

A felszínhez legközelebb eső felszín alatti vízfajta a talajnedvesség. Ez nem más, mint a talaj víztartalma, amelynek több alrétegét különböztethetjük meg, mindegyik más és más jelentőséggel bír az élet szempontjából.

A *kristályviz*et tanultuk az iskolában: ez az ásványok kristályrácsaiba beépült és onnan csak nagyon nehezen, erős hevítéssel kirobbantható vízmolekulákat jelenti. A látszattal ellentétben még a legpuhább, porhanyós talajnak is vannak ásványi alkatrészei, és bennük kristályvíz. Gyakorlati szerepe az agyagásványoknál van, amelyek megduzzadnak, ha víz épül be a kristályrácsukba. Ennek kiválásához 270-500 °C-ra van szükség. Ilyen hőmérséklet azonban csak a felszín közvetlen közelében és csak kivételes körülmények (például erdőtűz) között tapasztalható. Ezért nyugodtan mondhatjuk azt, hogy témánk, az élet szempontjából a kristályrácsban kötött víz parkolópályán van, kivonódott a forgalomból.

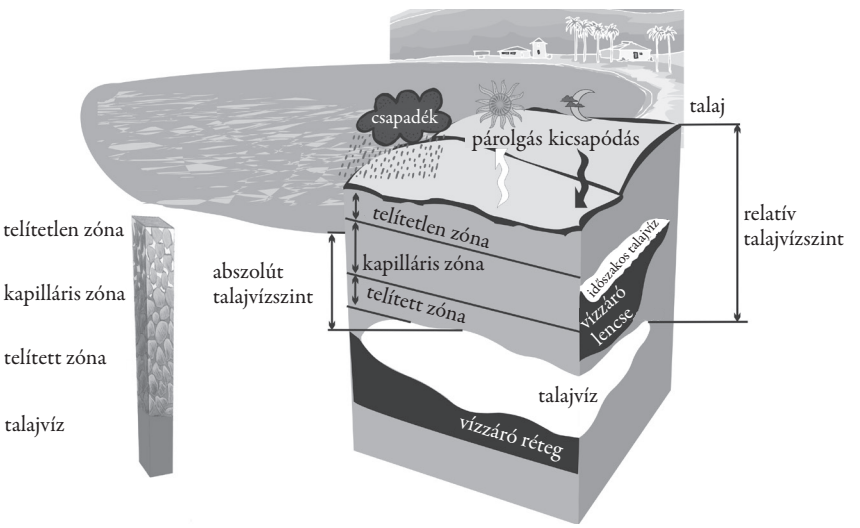
A talajszemcsék szemérmes úrileányok módján csillogó vízleplet borítanak magukra, és ahhoz keményen ragaszkodnak, ahogyan illik. Igaz, e lepel csak nagyon jó mikroszkóppal látható, mert a mindössze 100 molekulányi vastagságot nem haladja meg. Ebből eredően igen nehéz leszívni a talajszemcsékről, a növények nem is bírnak megküzdeni vele. Bár a maguk nemében csodálatos alkotások, a gyökérszőrök 15 méteres vízoszlopnak megfelelő nyomásnál (15 atmoszféra) nagyobb erő kifejtésére nem képesek, a talajszemcsék burkának megbontásához pedig ennél átlagosan 20-25%-kal nagyobb erőre lenne szükség. Ezt a ragaszkodó vízfajtát *erősen kötött vízburok*nak vagy más néven *adszorbeált* víznek nevezzük. A csak ilyen vizet tartalmazó talaj még teljesen csontszáraznak tűnik.

A harmadik fajta víz már lazábban csüng a szemcséken, hiszen saját magát is alig tartja össze az 1000 molekulányi vastagság miatt. Ennek a *lazán tapadó*, úgy-

nevezett *adhéziós víz*nek a viselkedése nagyon sokban befolyásolja a talaj tulajdonságait. Egy része a szemcséhez tapad, de arról leválasztható, más része viszont az egyes szemcsék között, különösen azok szögleteiben gyűlik, és folyamatosan azon gondolkozik, hogy csöppenjen-e *(függő víz, pórusszögletvíz)*. Az eredmény a nehézségi erő, a felszíni feszültség és a kapilláris mozgatóerő eredője lesz. A vízcsepp maradhat (*intersticiális*, vagyis a szemcsék közötti térben függő *víz*), elindulhat hegynek lefelé (szivárgó víz) vagy hegynek fölfelé (kapilláris víz). És végül beszippanthatja egy gyökérszőr is.

A *kapilláris víz* a hajszálcsövesség jól ismert, de kevésbé értett jelenségét kihasználva a később tárgyalandó talajvíz szintje fölötti talajrétegben felfelé áramlik. A kapillaritás során a folyadék felületi feszültsége hat a gravitáció ellenében. A talaj összefüggő, zegzugos, hajszálvékony hézagaiban felemelkedő víznek igen nagy szerepe van a növények vízellátásában, ez a talajnedvesség legkönnyebben hozzáférhető része. A talajok kapillárisvíz-emelése jellemző érték, amely elsősorban a talaj mechanikai összetételétől és a kicserélhető kationok mennyiségétől függ. Jó betekintést nyújt a talaj vízgazdálkodásába. A nagyobb szemcseméret nem kedvez a kapillaritásnak, a kavicstalajokban például az emelés mértéke mindössze néhány centiméter, de agyagban, iszapban több méter is lehet.

A *szivárgó víz* esetében a kétféle erő eredője lefelé mutat, tehát ez a vízmennyiség a csapadéknak az a része, amely a talajnedvesség felől a talajvíz szintje felé halad, hogy ahhoz csatlakozzék. Miután azonban menet közben számos lehetősége van eltérülni a felszíni lefolyástól a kapilláris zóna telítéséig, nem mindig éri el a talajvizet. A szivárgó víz néha gondol egyet, és a fizika törvényeinek némileg ellentmondóan a felszínnel párhuzamosan mozog a talajvíztükör és a felszín közötti telítetlen zónában. Ez a *köztes folyás* (interflow) (Borsy 1993).




5. ábra. *A talajnedvesség részei és elhelyezkedésük (Grafika: Bánvölgyi Tamás)*

A talajnedvesség zónájában a talajvízszint felett kialakult, kapilláris vízzel telített talajréteg a kapilláris zóna. A talaj háromfázisú polidiszperz rendszer, amelyben a szilárd fázis elemei (a talajszemcsék) között kialakuló, változó méretű és alakú, úgynevezett *pórustér* kis méretű részében lehetőség van a kapillaritás kialakulására. A kapilláris zónában a talajvízhez közel zárt, gyakorlatilag teljesen telített a pórustér, míg a nyílt zónában csak részben. A kapilláris zóna fölött található a *háromfázisú* vagy más néven *telítetlen zóna*, amely ott alakul ki, ahol a függőlegesen beszivárgó csapadékvíz a felszín alatti üledék vagy kőzet hézagait nem képes tartósan kitölteni, ezért a hézagokban a kőzetvázat pórusszögletvíz és tapadó (adhéziós) víz burkolja, a szabadon maradt hézagokat pedig levegő tölti ki. A térben tehát a szilárd, folyékony és gázfázis egyszerre található – ezért háromfázisú –, aminek a növények számára van kiemelt jelentősége. Számukra a támaszt adó szilárd anyagnak, az életfolyamatokhoz szükséges, vízben oldott ásványi sóknak és magának a víznek, valamint a gyökérszőrök légzését biztosító levegőnek egyaránt létfontosságú szerepe van. Természetes körülmények között a szakaszos csapadéktevékenység következtében leszivárgó víz időnként telítheti a háromfázisú zónát, ezért amikor sík területeken az átlagosnál nagyobb a csapadék, és ugyanakkor a lefolyás erősen korlátozott, a csapadékvíz nem képes maradéktalanul beszivárogni a talajba, és *belvíz* keletkezik (Láng 2002).

A talajvízre a növényeknek is igen nagy szükségük van. A talajnedvességnek csak a kapilláris része vehető fel problémamentesen, ami viszont a talajvíztükörtől és a talaj szemcseméretétől függ, ezért ha a talajvíz szintje nagyon alacsony, a növények kiszáradnak. A talajban erősen kötött burokban található víz ugyanis számukra *holt víz*, nem használható fel, ezért a gyökérszőrök által még elszívható mértéknél jobban kötődő vízmolekulák a *hervadáspont*on túl találhatók, hiába vannak jelen, a növények hervadni kezdenek. A talajnedvesség egyes összetevői talajtípustól függően eltérő mértékben oszlanak meg. A növényzet nemcsak a túl kevés, de a túl sok vizet sem képes hasznosítani, ezért létezik egy úgynevezett *szántóföldi* vagy *természetes vízkapacitás*, ami azt a telítettségi tartományt jelenti, ahol a gyökerek a legjobban működnek. A talajok nedvességtartalma általában a téli hóolvadást követően, kora tavasszal van ebben a tartományban.

### 2.3.1.2. *Talajvíz*

A talajvíz és a talajnedvesség számos ponton kapcsolódik egymáshoz, és az utóbbi erőteljesen befolyásolja az előbbi viszonyait. Az ugyanis az egyetlen különbség közöttük, hogy míg a talajnedvességben található vízre számos tényező hat, a talajvíz a nehézkedési erő uralma alatt áll: ez a felszínről beszivárgó vagy más vízbázisról érkező víznek az a része, amely a mélyben elhelyezkedő első *vízzáró réteg* felett gyűlik össze oly módon, hogy állandó jelleggel telíti a vízzáró réteg feletti *vízáteresztő réteg*et. A talajt és az altalajt alkotó kőzetek ugyanis alapvetően kétféleképpen viszonyulhatnak a vízhez: áteresztik vagy nem eresztik át. A vizet

áteresztő talajréteg klasszikus esete a homok, kavics, lösz stb., míg a vizet megtartó, át nem eresztő talajféleség klasszikus esete az agyag, illetve a különféle nem aprózódott kőzetek, sziklák. Ritkább esetben ezek vannak a felszínen, sokkal gyakoribb azonban, hogy a felszínen vízáteresztő, aprózódott kőzet vagy talaj van, és csak a mélyebb rétegekben található vizet át nem eresztő anyag. Az első vízzáró réteg a felszíntől számított néhány centimétertől akár több tíz méter mélyen, kivételes esetben több száz méteren is lehet, és úgy viselkedik, mint az edény alja, tehát benne-rajta gyűlni kezd a pórusokon beszivárgó víz. Folyóvölgyekben, felszíni vizek közelében különösen akkor, ha azok medrét üledékes anyag képezi, a talajvíz a felszíni vízzel is összeköttetésben van. Lényege mindenesetre az, hogy a felgyülemlő víz telíti a talaj pórusait, tehát a szilárd fázisban összefüggő folyékony fázis képződik, amely kiszorítja a gáznemű fázist, a levegőt.

Tévedés volna tehát azt hinni, hogy a talajvíz, mint valami felszín alatti folyó, csak vízből áll, és ide-oda folyik. Kútásáskor lehet erről a legjobban megbizonyosodni, amikor a kútású „megüti" a *nyugalmi vízszint*et, a *talajvíz tükré*t. Ez a némileg pontatlan kifejezés egy olyan talajszintet jelöl, amely alatt a pórusokat csak víz tölti ki, ellentétben a felette található kapilláris zónával, ahol legalább időszakosan levegő is van. A kútású ilyenkor pihenőt tart, bevágja az ásót a fenékbe, a nagy nap örömére bedönt egy üveg sört, majd nyugodtan tovább ás, mert tudja, hogy még hosszú ideig tud ásni benne úgy, hogy a lábainál mindössze apró tócsák gyűlnek azokból a nagyobbacska erekből, amelyek a telített zónában található pórusokból tevődnek össze, és elég nagyok ahhoz, hogy a víz kifolyjon belőlük. Ehhez időre van szükség, és ezt az időt használja ki a kútású, hogy megigya a sörét, és tovább lapátoljon. A kisebb pórusokból esetleg ki sem folyik a víz addig, amíg a kút meg nem telt.

A másnapi munkakezdésre persze összegyűlik a víz, ezért rendszerint egy nagy zagyszivattyút enged le a kútású a félkész kútba, és úgy pumpálja felszínre. A kútban a több nap után beálló nyugalmi vízszint az, ami a talajvíz aktuális tükrét jelenti, ez ugyanis a közlekedőedények elve alapján megegyezik a víztartó réteg telítettségi zónájának a határával. A kútban már tényleg tükör, széplányok és csúnya békák megnézhetik magukat benne. A jó kútású pontosan tudja, hogy ez a szint éves átlagban az adott vidéken mennyit ingadozik, és ezért mennyit kell „rátartania", hogy sose fogyjon ki a kútból a víz: 2-3 méterrel megy a tavaszi nagyvíz szintje alá, és kitéglázza vagy betonelemekkel meggyűrűzi ezt a 2-3 métert – ma már gyakoribb, hogy a kút teljes mélységét –, hogy a fel-le mozgó víz ne mossa ki a kút üregébe a talajt, ne iszaposodjon el a kút.

A talajvíz nyugalmi szintjét kétféle viszonyítási ponthoz képest mérhetjük, a felszínhez *(relatív talajvízszint)*, illetve a tenger szintjéhez képest *(abszolút talajvízszint)*. Alapesetben az első vízzáró réteg felett gyűlik, felette telítetlen zóna van, ezért nyomása a légköri nyomással azonos. Talajvízkutakban végzett mérésekkel igazolható, hogy ennek megfelelően is viselkedik, vagyis köve-

ti a vízzáró réteg vagy a felszín alakulását. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a domborzatnak megfelelően a magasabb részeken kicsit mélyebben fekszik, a mélyebb részeken viszont közelebb van a talajhoz, és a vízzáró réteg lejtésének megfelelően is áramlik. Ha a domborzat olyan, mint mondjuk a Dunántúl löszdombjain, a talajvíz szintje majdnem vízszintes lehet, és a dombok alatt sokkal mélyebben lesz, mint a feltöltött völgyekben. A dombtetőn akár 40-50 méter mély kutat is kell ásni, míg a völgytalpon leüti az ember az ásót, és már buzog a víz. A magyar Alföldön a felszínhez képest sokkal egyenletesebb a tükör, átlagosan 2-5 méter között fekszik a vízszint.

Eddig viszonylag egyszerű volt a helyzet. Ám a valóság soha nem olyan ideális, mint szeretnénk. Lent a mélyben sok minden történhet a vízzel, amitől a fenti kép bonyolódik. Például ha a felszínen vízzáró anyag van, ami nem engedi át a vizet, ám amikor kiszárad, megrepedezik, ezért a következő eső mégis átmegy rajta. Így jön létre az *általajvíz*, amely a vízzáró réteg repedéseiben található, és az említett körülmények ismétlődése esetén újratöltődhet anélkül, hogy a valódi talajvízzel, amely a permeábilis rétegben van, közlekedne. Ha viszont a felszínközeli permeábilis rétegben van vízzáró lencse, annak felületén (ha homorú) megmaradhat a leszivárgó víz, ami *időszakos (lebegő) talajviz*et eredményez. Így jöhetnek létre időszakos források is, amelyek csak akkor adnak vizet, ha a lencse tárolója megtelt. A talajvíz bizonyos feltételek mellett nyomás alá is kerülhet, és megfúrva magától a felszínre bukkan (Borsy 1993).

Természetes körülmények között is, de az ember kontárkodása óta még sokkal fontosabb a talajvíz változásainak, veszteségének és pótlódásának mechanizmusa, a *talajvízháztartás*, avagy *-forgalom*. A talajvíz szintje eredeti állapotában sem stabil, hiszen közvetlen kapcsolatban van a felszínnel, de ingadozásai a felszíni vizekhez képest kisebbek, lassúbbak, és a felszíni viszonyok változását (például a csapadék mennyiségét) csak nagy tehetetlenséggel, lassan követik, amely késleltetésnek a mértékét a beszivárgási viszonyok szabják meg. A talajvíz pótlásának legfontosabb forrása a *csapadék*. Ez még akkor is igaz, ha száraz vidékeken a csapadék nem közvetlenül, szivárgó víz révén tölti fel a talajvíztáblát, hanem más, csapadékosabb területekről való átfolyással. A beszivárgás mennyiségét nem annyira a csapadék abszolút mennyisége, hanem tartóssága befolyásolja. Az a tény, hogy Magyarországon és az északi mérsékelt féltekén másutt is a talajvíz utánpótlása döntő mértékben a téli hóolvadás végén következik be, annak köszönhető, hogy a téli félévben a párolgási, elfolyási veszteség kisebb, a növények vízfelvétele csökken/leáll, a lehulló csapadék szilárd halmazállapota (hó, jég, dara, zúzmara stb.) miatt elfolyása kisebb, és ezért jut ideje átnedvesíteni, telíteni a talajnedvesség zónáját, ahonnan aztán a felesleg már közvetlen szivárgással jut le a talajvíz tárolórétegébe. Különösen megemelkedik akkor, ha a hóolvadás után még eső is esik, mondjuk márciusban.

A talajvíznek elsősorban ott vannak jó esélyei az utánpótlásra, ahol a tájfelszín alakulása, morfológiája a felszíni lefolyás szempontjából kedvezőtlen, nagy kiterjedésű sík területek vannak (síkság, alföld, felföld), amelyeket vízáteresztő anyag fed, és nem túlságosan nagy a növények evapotranspirációs aktivitása, ami leszívhatná a víz szintjét. Ha valahol magasabb a talajvíz abszolút szintje (például dombok alatt), akkor onnan a völgyek alacsonyabb szintje felé áramlik, tehát a hegylábnál fog megemelkedni.

Nagyon fontos tudni, hogy a folyók alatt sokszor a felszínről láthatatlanul *még egy folyó* van: az állandó jellegű felszíni vízfolyások megfelelő körülmények között a talajvizet tápláló forrást jelentenek. A folyók medréből lefelé és oldalirányban is elszivárog a víz, ha a folyó már permeábilis rétegen halad, például a maga rakta kavicságyban. Persze a hatás fordított is lehet, kisvíznél, ha a mederben a vízszint a talajvíz szintje alá csökken, fordított áramlás indul meg, és a folyó egyszerűen leszívja a talajvízkészletet. Van még egy érdekes, de kevéssé ismert és ezért nem mindig figyelembe vett jelenség, a levegő párájának kicsapódása, a *kondenzáció*. Pedig nyári hónapokban, amikor a nappali felmelegedés miatti párolgással a levegőbe kerülő víz az éjjeli lehűlés miatt visszacsapódik, komolyan hozzájárulhat a talajvíz szintjének növeléséhez (feltéve, hogy a talajnedvesség telített).

Ennyi minden növeli a talajvizet. De mi fogyasztja?

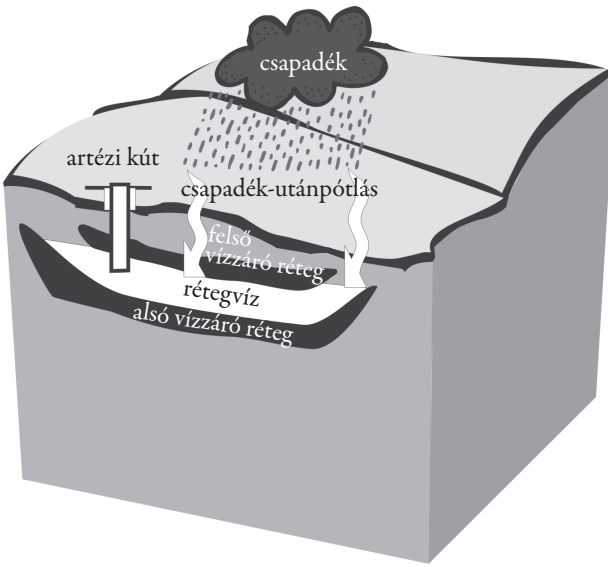
Először is az elmondottak fordítva is elsülhetnek. Nemcsak hozzáfolyás lehet oldalirányban, de elfolyás is: a dombok alatt kevesebb lesz a víz, ha egyszer a hegylábak felé elfolyik. Másrészt a folyók le is szívhatják a talajvizet, nem csak pótolják azt. A legfontosabb tényező azonban, amely természetes körülmények között a csapadékkal való utánpótlást ellensúlyozza, a párolgás. Megfigyelhetjük tehát, hogy ugyanaz a mechanizmus érvényesül a felszín alatti vizek esetében, mint a felszínen: a párolgás és kicsapódás hozza egyensúlyba az édesvízi ciklus mérlegét. Látszólag furcsa, hogy méterekkel a felszín alatt még érvényesül a nap párologtató hatása, mégis tény. És ha jobban meggondoljuk, nem is olyan furcsa, hiszen a párolgás hőmérséklet- és nem fényfüggő jelenség. Ráadásul megint beleszaladtunk a jó öreg kibernetikus szabályozásba, és ezúttal még élőlényeknek sem kellett közbeavatkozniuk: a talajvízháztartás legfontosabb önszabályozó tényezője a talajvízszint emelkedése és a párolgás közötti összefüggés, amely negatív visszacsatolással egy optimális szint beállítására törekszik. Mint a kukta esetében, itt is egy rendkívül egyszerű reakcióról van szó: ha megemelkedik a talajvíz szintje, megnő a párolgási veszteség is, és ez fékezőleg hat a további emelkedésre. Süllyedéskor viszont csökken a párolgás, ami lassítja a további süllyedést, ezért egy fluktuáló, dinamikus egyensúly kialakulását eredményezi. Nem felesleges megfigyelni, hogyan működik ez a szabályozás hosszabb időtávlatban. Ha éveken keresztül nem esik az eső, a nyugalmi szint mélyebben áll be. Ilyenkor lehetőség van több víz befogadására, tehát egy közepesen nedves év is

komoly szintemelkedést okozhat. Ha viszont évek óta sok eső esik, és a talajvíz magasan áll, ugyanolyan mértékű csapadék (a „közepes év") a vízszint csökkenését eredményezheti, hiszen a korábbi évekhez képest ez szárazságnak minősül, és összességében a párolgás lesz nagyobb.

A párolgáshoz szükséges hőmérsékleti viszonyok a talajvíz mélységétől erőteljesen függenek. Általános szabály, hogy a talaj és az alatta fekvő kőzetek szigetelő hatása miatt a felszíni hőmérséklet-ingadozás a mélység felé haladva csökken, és helyét egy másfajta folyamat, a mélységgel növekvő hőmérséklet-emelkedés veszi át. A napi hőingás mindössze 1 méter mélyen érezhető, itt csak ritkán van talajvíz. Az éves hőingás sem hatol le mélyebbre néhány méternél, legfeljebb 20 méterig. Köztudott, és a vízvezetékek, alapok építésénél fel is használják, hogy a mi éghajlatunk alatt a talaj hőmérséklete 70 cm-nél mélyebben télen sem megy fagypont alá. Ez a határ persze az éghajlattól függően máshol változhat, alapvetően azonban igaz, hogy a föld nagy hőtehetetlensége miatt a mélyben az éves átlaghőmérséklet mindenütt a +10-12 °C érték körül mozog, nyáron sem emelkedik nagyon efölé, és télen sem megy túlságosan lejjebb. Ez az úgynevezett neutrális zóna, ahol 10-20 méter mélyen már az évi 0,01 °C ingadozást sem haladják meg a változások, akár a kőzet, akár a benne rejlő víz hőmérsékletét nézzük.

### 2.3.1.3. *Rétegvíz*

A rétegvíz a talajvíz alatt, két vízzáró réteg között elhelyezkedő, ezért rendszerint mélyebben található édesvíz, melyet a vizet át nem eresztő rétegek alulról is, felülről is lehatárolnak, ezért rendszerint nyomás alatt van. Mégpedig azért, mert a benne található víz valahol a rétegvízkészlet szélén jórészt beszivárgással pótlódik. Ezeknek a területeknek értelemszerűen magasabban kell elhelyezkedniük, így az ott beszivárgó víz a rétegek közé jutva egyszerű hidrosztatikai nyomás alá kerül. A nyomást növelheti még gáztartalma (például szénsav) és a felső, gyakran tömörödő kőzettest súlya is. Ezért a rétegvizek esetében egyrészt a kútásó már nem a legjobb szerszám, mert az első vízzáró réteghez érve ugyancsak meg kell izzadnia, mire azt áttöri, másrészt a nyomás alatt lévő víz akkor, ha a víztartó rétegbe jutunk, a nyíláson a felszínre tör, és elmosná a kútásót is. Igazi rétegvizet tehát ásni nem, csak fúrni lehet, ehhez megfelelő eszközökkel, kútfúró berendezéssel, drága pénzen. Az egyiptomiakat és a kínaiakat ez nem zavarta, ők már az ókorban létesítettek rétegvizet megcsapoló kutakat, és ehhez nem a modern kútfúró gépeket alkalmazták. Európában azonban csak a középkorban, 1126-ban a franciaországi Artois tartományban a papoknak csináltak ilyet. Az volt a jellemzője, hogy a lyukban a víz nemcsak megemelkedett az elért víztartó szinthez képest, hanem legtöbbször még a felszínre is kitört. Ezért az ilyen, úgynevezett *pozitív nyomás*sal rendelkező kutakat azóta *artézi kút*nak, a belőlük feltörő vizet *artézi víz*nek nevezik. Szemben a *szubartézi víz*zel, amely ugyan szintén rétegvíz, de a nyomás nem elég ahhoz, hogy magától a felszínre hozza.




6. ábra. *A rétegvíz (Borsy 1993 nyomán Bánvölgyi Tamás grafikája)*

A vízzárók közé zárt víztartók függőleges irányban sokszor ismétlődnek, és az egyes víztartókban lévő víz nyomása, hőmérséklete, vegyi jellemzői, gáztartalma igen különböző lehet. Rétegvízkészletek általában ott jönnek létre, ahol a földtani viszonyok következtében nagy, üledékes medencékben a *víztartó és vízáteresztő kőzetrétegek* egymás felett, nagyjából párhuzamosan helyezkednek el. A medencék széle felé azonban ezek a rétegek egyre közelebb kerülnek a felszínhez, mintha egy tortát két végén felhajtanánk. A torta piskótája a víztartó, krémje az áteresztő réteg. A felhajtott részek áteresztő rétegeire hulló, valamint a vizet át nem eresztő rétegről lefolyó csapadék a porózus anyagban a gravitációnak megfelelően szivárgással a medence középső része felé vándorol, és így visszafelé, a középpont felől töltődik fel. Persze nem mindig ilyen egyszerű a helyzet, van, amikor a víztartó réteg nem éri el a felszínt, ilyenkor a hidrosztatikai nyomás kialakulására és a rétegvíz pótlódására más magyarázatot kell keresni. A legkézenfekvőbb az, hogy a felső vízzáró réteg mégsem olyan vízzáró, mint amilyennek látszik, és a vízpótlás a talajvíz felől valósul meg. Ennek két módja lehetséges, maga az anyag olyan nagy pórusokat tartalmaz, hogy a víz átnyomódik rajta, vagy a vízzáró réteg anyaga nem folytonos, abban repedések vagy porózusabb részek találhatók.

Már ez a két megoldás is azt jelzi, hogy a pótlás nehézkes, tehát valószínűleg lassabb is, mint az éves csapadékkal közvetlen kapcsolatban álló talajvíz esetében. Ám ha ráadásul ez a két lehetőség sem áll fenn, akkor *fosszilis vízről* beszélünk, vagyis jelenkori utánpótlásra nincs lehetőség. Egy geológiai esemény következtében kialakult víztároló kőzetréteg egyszer és mindenkorra zárta magába a vizet,

vagy legalábbis addig, míg a körülmények meg nem változnak. A fosszilis vizeknek tehát nincs megújulása, és nem árt tudni, hogy például az Alföld mélyebb rétegeiben is ilyen, úgynevezett alsó pannóniai fosszilis rétegvíz húzódik. A rétegvizek jelentősége abban áll, hogy a felszínnel való hézagosabb kapcsolatuk és nagy kiterjedésük miatt a szennyeződésekre kevésbé érzékenyek, viszont ha egyszer elszennyeződtek, éppen ugyanezen tényezők, a lassú utánpótlás és a nagy mennyiség miatt nem tisztíthatók, és maguktól nem is tisztulnak.

A világon számos helyen vannak nagy rétegvíztárolók, amelyek kiaknázása szinte mindenütt megkezdődött már, és sok helyen máris visszafordíthatatlan következményekkel jár. Az artézi medencék klasszikus típusa a Párizsi-medence, amely a közepén 26-30 méterrel van a tenger felszíne felett, a peremeken ellenben 200 és 250 méter közötti magasságban emelkednek ki a vízáteresztő rétegek a felszínen. Ez azt jelenti, hogy ami itt 250 méteres magasságban beleszivárog, az teljes telítettség esetén a medence közepén 25 atmoszféra nyomással tör a felszínre. Hasonló szerkezetű Ausztráliában a Nagy Artézi-medence, amely a kontinens jelentős részére, több mint egyötödére terjed ki. A kontinens közepét agyag borítja, ez alatt húzódik több rétegben az a homokkőösszlet, amelyben a rétegvíz található. Ez Ausztrália valódi kincse, nem a rézbányák, az arany vagy az alumínium. Itt még nagyobbak a számok, a peremeken akár 2000 méterre is felemelkedő kőzet középen 2000 méter mélyre húzódik le. Nem csoda, ha középen minden kút pozitív, a széleken pedig szubartézi víz helyezkedik el (Balázs 1978). A rétegvíztárolók sokszor csak egy oldalról kapnak utánpótlást. Ilyen Észak-Amerikában a Préri-tábla, amely a Sziklás-hegység felől, és a Parti-síkság, amely az Appalache-hegység felől kapja az utánpótlást. Afrikában a Szahara északi része alatt is van víz, amely az Atlaszból töltődik. A magyar Alföldön a medencét fiatal, laza üledékek töltik ki, hiszen nem olyan régen rakódtak le a folyók és a Pannon-tenger üledékei (Bora és Nemerkényi 1999). A tavi, folyami és tengeri eredetű kőzetek vegyesen váltakoznak, aminek következtében váltakoznak a vízzáró és vízáteresztő rétegek is, bonyolult struktúrát hozva létre. Ezért az itt elhelyezkedő vízadó rétegek fajlagos vízhozama nagyon változó, ám mindenképpen – akárcsak Ausztráliában – itt is az egyik legdrágább kincsünkről van szó.

A rétegvizek egyik legfontosabb tulajdonsága a hőmérsékletük. Általános tendencia, hogy lefelé haladva a rétegvizek hőmérséklete nő, és valamennyire az oldott sótartalom is növekszik, különösen, ha idősebb rétegek vannak alant. A talajvízzel ellentétben ugyanis a mélyebben fekvő víztestek a Föld belsejében tárolt és onnan hőáram, hőátadás útján a litoszféra kőzeteibe és a pórusvízbe jutó hőenergia révén a mélység növekedésével rendszerint egyre melegebbé válnak. A *geotermikus gradiens* vagy hőfoklépcső azt írja le, hogy a mélységgel együtt milyen mértékben növekszik a víz (kőzet) hőmérséklete. Ezt kétféleképpen lehet jelölni: Európában azt adjuk meg, hogy hány métert kell lefelé haladnunk a kőzettestben, mire 1 Celsius-fok hőemelkedést tapasztalunk, míg mások

ennek reciprokára kíváncsiak, és azt nézik, hogy 100 méterenként mennyivel nő a hőmérséklet. Akár így, akár úgy számolunk, mindenképpen akkor kezdünk hévízről beszélni, ha a víz hőmérséklete magasabb, mint azt a hőtehetetlenség miatt beálló átlaghőmérséklet alapján várnánk. Megint csak az Alföld tűnik ki a kiváló tulajdonságaival, itt ugyanis nagyon sok helyen található az átlagos geotermikus gradiensnél (ami 33 méter, vagyis ennyivel lejjebb lesz egy fokkal melegebb a víz) nagyobb mértékű emelkedés, ami a fenti logika értelmében kisebb számértéket jelöl (18 m/°C, vagyis 18 méterenként 1 Celsius-fok). A meleg vizek rendszerint sok ásványi anyagot is tartalmaznak, amelyekről az a tapasztalat, hogy ha ivásra nem is mindig, de fürdésre igen alkalmasak, és számos betegség tüneteit enyhítik (másokét viszont súlyosbítják).

Hasonló jókat mondhatunk a rétegvizek kémiájáról is. A gyakorlatban legfontosabb a víz keménysége (oldott hidrokarbonát-tartalma, amelyhez Ca- vagy Mg-ionok társulnak), szénsavtartalma és vegyhatása, pH értéke. Ha kristályos, vulkáni kőzetekben található, rendszerint lágy a víz, ott nincs kioldani való mész vagy gipsz. A másik szempont a sótartalom, ami ihatóságát és a növények által történt felhasználhatóságát erősen befolyásolja. Édesvíznek azt nevezzük, amelynek sótartalma 1 ezrelék (1‰) körül van. A sótartalom emelkedése után egy darabig még brakkvíz (átmeneti, félig sós víz), majd igazi sós víz. De nemcsak az összes iontartalom a lényeg, hanem az is, hogy mitől származik. Ha például sok benne a nátrium, szappanos, sziksós vizet kapunk.

### 2.3.1.4. *A karsztvíz*

> *A karsztvíz a Bükk megújuló, egyszer bőven ömlő, máskor szerényen csordogáló ajándéka. Olyan kincs, amit nagyon meg kell becsülni... Odafent a bükki karszton százezrek – és esetleg a magunk – ivóvíztartályán járunk. Ez a víztartály fedetlen. Talpunk alatt néhány centiméternyi talaj, alatta lyukacsos kőzet, repedések, majd az áramló karsztvíz, a forrás, a csővezeték, ezeknek végén pedig az ivóvíz fogyasztója. Meddig ad költséges szűrés, klórozás nélkül kristálytiszta ivóvizet a Bükk?*
>
> Sándor András[2]

A karbonátos kőzetekben lévő víz neve a *karsztvíz*. A karsztvíz tehát kőzetminőséghez kötött fogalom. Alapvetően kétféle kőzetről van szó, a jobban oldódó mészkőről és a kevésbé oldódó dolomitról. Lehet még kősóban és gipszben is, de

[2] Sándor 1983.

ezek ritkán terjednek ki nagy területre, és emberi szempontból kevésbé használhatók. A karsztvíz ökológiai és vízháztartási szempontból nagyon fontos. Részben karsztvízen alapszik Budapest budai részének vízellátása is. A karsztosodás a geológusok kedvenc témája, és rengeteg barlangász is foglalkozik vele.

Köztudott, hogy a mészkő (kalcium-karbonát) szénsav hatására oldódik. A csapadékban ugyanis mindig van valamennyi vízben oldott szén-dioxid, ami nem más, mint a szénsav álneve. Amikor a csapadék mészkőtartalmú tájon hullik le, alapvetően kétféle módon kerülhet kapcsolatba vele: a mészkő vagy a felszínen van, vagy nem. Ha eléri a felszínt, *nyílt karszt*nak nevezzük, ez rendszerint mészkőhegységekben látható. Ha vízzáró rétegek fedik, *fedett karszt*ról beszélünk. Az utóbbi rendszerint medencékben, alacsonyabb fekvésben jelenik meg, és miután gyakori, hogy a karsztos zóna üregeit itt a víz teljesen kitölti, az alul elhelyezkedő *fekükőzet* és a karszt feletti *fedőkőzet* szorításában akár nyomás alá is kerülhet. A karsztosodás folyamata rendkívül érdekes és szép jelenség. A lehulló csapadék a mészkövet fedő talajon átszivárogva szén-dioxiddal töltődik, mert a talaj az ott élő élőlények (mikroorganizmusok, egysejtű állatok, növények, férgek, ászkák és más alacsonyrendűek, összefoglaló nevükön *edafon*) anyagcsere-tevékenysége, a légzés következtében igen gazdag szén-dioxidban. Nyílt karszton, amilyen az Aggteleki-karszt vagy a Bükk hegység, a csapadék a felszín alakulásának megfelelően felszíni elfolyást alakít ki (beszivárogni nem tud, mert a mészkő alapjában nem vízáteresztő kőzet). Ott, ahol helyi mélypont alakul ki, a meggyűlő vízben található szénsav oldani kezdi a felszínt, és hosszú idő alatt repedéseket, járatokat hoz létre. A csapadékvíz és a szén-dioxid ugyanis az alábbi képlet szerint egyesül:

$$H_2O + CO_2 = H_2CO_3$$

Az így létrejött szénsav pedig nekiáll a mészkőnek:

$$CaCO_3 + H_2CO_3 = Ca(HCO_3)_2$$

A *kalcium-hidrogén-karbonát* ellentétben a sima kalcium-karbonáttal (ami a mészkő) nem szilárd, hanem folyékony anyag, a mészkő tehát egyszerűen elfolyósodik, elmállik. A folyékony anyagot a lefelé szivárgó vizek egyre jobban kimossák a kőzetből. A repedések egyre nagyobbak lesznek, hasadékok és járatok keletkeznek, és a víz egyre nagyobb mennyiségben jut le a kőzetréteg mélyébe. A repedések elnyelik a csapadékvizet, ezért a hegységi felszín szegény felszíni vízfolyásokban (a Bükk-fennsíkon nincsenek patakok). Ha a víz nem közvetlenül csapadékból származik, hanem más, nem mészkővel fedett részről érkezik mint felszíni vízfolyás, a mészkőhöz érve egy *víznyelő* alakul ki, amely elnyeli a patakot. Ha történetesen hordalék is kerül a patakkal a mélybe, az odalent komoly eróziós munkát végez, és a karszthegység belsejében hatalmas, csavaros, teker-

vényes járatok, alkalmanként kifejezetten nagy belterű *barlangok* alakulnak ki. Ezek vonzzák a barlangászokat.

Ha a nyílt karsztra közvetlenül esik az eső, a repedésekkel átszőtt, járatos kőzet megroggyan, beomlik, és *szakadéktöbrök, dolinák* jönnek létre. A töbör úgy is keletkezhet, hogy egy már kialakult felszín alatti üreg, barlang omlik be. A karsztok a kiegyensúlyozott dinamika jegyében nemcsak rombolnak, de építenek is: a mélybe került víz sokszor egy már kioldott üreg, barlang mennyezetén jelenik meg, és ha van ideje kivárni, nem csöppen le, hanem ott helyben párolog el, egy aprócska mésznyomot hagyva vissza. Ez ugyanaz a mész, mint amit mi vízkő néven ismerünk, és a kemény vízzel ellátott háztartásokban főleg savval és vízkőoldóval igyekszünk megszabadulni tőle. Itt viszont van ideje még egy vízcseppnek érkezni, amely szintén hagy vissza egy leheletnyi réteget, és ha kellő ideig (néhány millió évig) állunk lesben, megfigyelhetjük a *függő cseppkő, a sztalaktit* kialakulását. Ha viszont a vízcsepp türelmetlen, lecsöppen, és a barlang talaján hagyja ott a nyomot. Ilyenkor megfelelő obszervációs periódus után a padlóról egy *álló cseppkő* vagy *cseppkőoszlop, a sztalagmit* kiemelkedését fogjuk látni (Simon 1999).

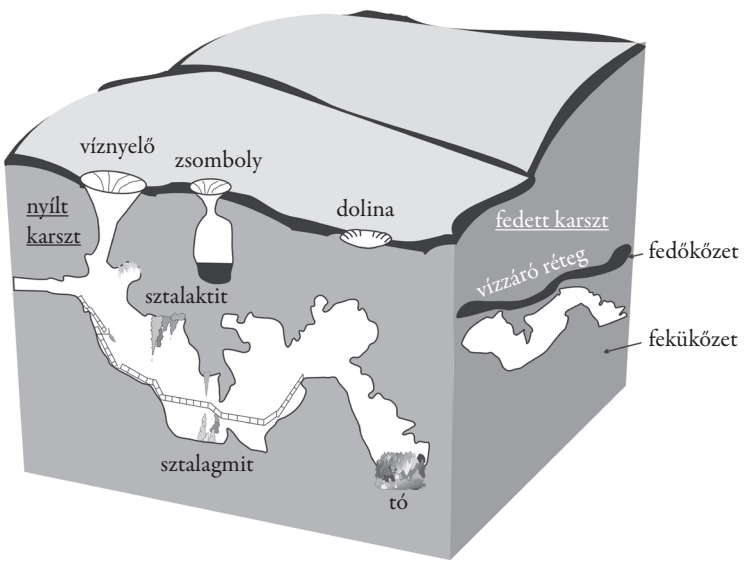
Ez az a környezet, amelyben karsztvizünk lakik. A Bükk szerelmese, Sándor András így ír a hegység vízrajzáról:

> „A függönyszerűen lezúduló nyári zápor, a nagy pelyhekben érkező hó, a bükki töbrök mélyén nyári éjszakákon is jéggé dermedő harmat, a mészkő repedéseiben lassan mozgó víz, a barlangok mélyén csillogó karsztvíz tavak, az állandó és időszakos források, a patakok, a természetes és mesterséges tavak mind-mind a Bükk változatos vízrajzának összetevői" (Sándor 1983).

Víztanilag a karsztvíz kétféle módon jelenhet meg. A felszínről a mélybe szivárgó víz az útja első szakaszán, ahol oldó hatása a legnagyobb, viszont folyamatosan lefelé mozog, csak menet közben van jelen, ezért azt *leszállóöv*nek nevezik. Itt a víz mennyisége szélsőségesen ingadozó, és szoros korrelációt mutat a felszíni állapotokkal. Ha viszont források támaszkodnak rá, akkor ezeknek a forrásoknak a viselkedése is tükrözi a leszállóöv dinamikáját. Nagyobb, összefüggő vízmennyiség itt alig alakulhat ki, hiszen a gravitáció hat rá. Ahol mégis, átmenetileg, a lefelé mozgó víz tartósabban megmarad a járatokban, ott *függő karsztvízöv*ről beszélünk. Ám a lefelé jutásnak is vége van egyszer: ahol a karsztos kőzet a vízzáró alapkőzettel (például gránittal) érintkezik, a karsztban a víz felhalmozódik. Újfent megtanulhatjuk, hogy a víz megáll kupacban, bármit mondanak is professzoraik a műegyetemistáknak, mert az ilyen *támaszkodóöv*ben a víz felszíne óraüvegszerűen feldomborodik (Jakucs 1971). Benne az alacsonyabb peremi részek felé vízszintes áramlások alakulnak ki (föld alatti „folyók"), amelyek erőteljes oldó hatást fejtenek ki. Az alsóbb részeken a mozgás lassul, majd megszűnik, ennek megfelelően itt nagy tömegű, kevéssé ingadozó víztest található.

Ha a karsztvíz a környező területekhez képest magasabban fekszik (például egy hegy belsejében), *sekélykarszt*ról, ha a víztömeg az erózióbázis[3] alatt helyezkedik el, *mélykarszt*ról beszélünk. A sekélykarsztnál a víz mennyisége rövid időeltolódással követi a felszíni változásokat, míg a mélykarsztban ezek csak nagy késéssel jelentkeznek. A karsztban a víz immár valóban folyik. Igazi folyók, patakok és vízfolyások képződnek a hegyek gyomrában, amelyek vízhozama rendkívül jelentős lehet. A csapadék, a hóolvadás sokkal rövidebb idő alatt megemeli a karsztvíz szintjét, mint a talajvízét. A rövidebb tartózkodási idő és a szűrőréteg hiánya azonban azt is jelenti, hogy ha a bekerülő víz szennyezett, nem lesz ideje megtisztulni, ezért a karsztvíz más felszín alatti víztestekhez képest a szennyeződésekre sokkal érzékenyebb. Keménysége, szén-dioxid-tartalma erősen függ attól, hogy milyen viszonyok között képződött, lehet igen nagy, de jóval kisebb is.

Morfológiai adottságai folytán a Bükk nagyon alkalmas rá, hogy a karsztvízrendszerek jellemzőit tanulmányozzuk rajta. „A mészkőterület peremein sorakozó karsztforrások felszínre bukkanó vize a repedéseken át a mélybe szivárgó csapadékvízből származik. A hegység mésztömege egy hatalmas szivacshoz hasonlítható, melyet egyes részein az ember számára is járható üregek, barlangok járnak át. Ez a résrendszer hóolvadás után, illetve csapadékos idő alkalmával vízzel töltődik meg. [...] a hegység természetes vízkészletét adó [...] víz a csapadéktól erősen függ, hosszan tartó (többéves) víztározásra földtani, vízföldtani adottságai nincsenek meg" (Verebélyi 2002).




7. ábra. *A karsztvíz (Grafika: Bánvölgyi Tamás)*

[3] Az erózióbázis az a terepszint, amelyre az erodált anyag lejut. Nagy általánosságban ez a tenger szintje, de helyileg ettől eltérő erózióbázisok is kialakulhatnak.

### 2.3.1.5. *Statikus és dinamikus vízkészlet*

Stabil vízkészlet alatt a felszín alatti vizek azon részét, hányadát értjük, amely belátható időn belül nem újul meg. Ezzel szemben megfelelő körülmények között a dinamikus vízkészlet évről évre megújul. Minél nagyobb és régibb az adott víztest, e hányad a stabil készlethez képest annál kisebb, akár elenyésző is lehet. Amíg az ember, mint más állatok, a forrásokból ivott, nem volt különösebb baj. A források ugyanis a felszín alatti vizek felszínre bukkanásának módjai, és mint ilyenek, részei a vízháztartásnak. A felszín alatti vízkészlet dinamikus, változó mennyiségű részéhez tartoznak. A dinamikus vízkészlet röviden a föld teljes vízkészletének megújuló része, a statikus pedig a nem megújuló. Persze, hogy mi a megújuló és mi nem, felfogás kérdése. Mihez képest újul meg és mikor? A statikus és dinamikus megkülönböztetés funkcionális fogalom, ezért egyúttal viszonylagos is: a cserélődés, elhasználás ütemétől függ. Ebben az értelemben a talajvíz teljes egészében dinamikus víz, hiszen megújulása rövid időn belül biztosítható. Csakhogy a korábban említett szabályozási mechanizmus révén, ha folyamatosan alacsonyabb szintre szívják le, ott fog beállni a dinamikus egyensúly, és amennyivel ez kevesebb vizet jelent, az már nem dinamikus, hiszen amíg a viszonyok meg nem változnak, nem pótolható.

A rétegvizek esetében is tehető kétféle megkülönböztetés. Ha csak azt nézzük, hogy a vízkészlet mely része vesz részt az édesvízi körforgalomban, vagyis mekkora az a mennyiség, amelynek beszivárgására a széli peremek felől lehetőség van, jó közelítéssel megkapjuk a megújuló részt. Csakhogy itt már nem olyan közvetlen a kapcsolat a megújulással. Egyrészt természeti körülmények között a mélyebb rétegvizek nem fogynak, hiszen ezért is nevezhetjük őket víztárolóknak. Csak a magasabban települt rétegekből és csak rétegvízforrásokkal (lásd később) jut mód a megcsapolásukra. Másrészt egy-egy nagy medence középponti és széli része között nagyon nagy a távolság, illetve, ha repedéseken keresztül pótlódik, ezek áteresztőképessége erősen korlátozott, ezért a rétegvíz pótlódási üteme nagyságrendileg eltér a talajvízétől. Bár kb. 1000 méter mélységig az artézi vizek nyugalmi vízszintje is a talajvíz szintjével megegyező irányú játékot mutat, ez nem közvetlenül a beszivárgás eredménye. A szivárgás ugyanis nagyon lassú, nagyságrendileg ezer év alatt mindössze néhány kilométer a medence belseje felé. Ezért a szintingadozások (vagyis inkább nyomásváltozások) csak akkor fogják követni a talajvízben bekövetkezett változásokat, ha telítve vannak a vízadó rétegek. Ekkor érvényesül a folyadékok összenyomhatatlanságának elve, és a beszivárgás kiváltotta nyomásemelkedés hullám formájában néhány nap alatt végighalad a rétegek mentén, és megemeli a rétegnyomást, ezáltal a rátelepített kutakban a nyugalmi vízszintet vagy a pozitív nyomást.

Láttuk, hogy a rétegvíz egy jelentős része fosszilis eredetű, tehát nem most keletkezett és nem is pótlódik a mondott módokon. Ez azt jelenti, hogy teljes egészében statikusnak tekintendő. Csakhogy statikusnak kell tekintenünk

a beszivárgó víznek azt a részét is, amelynek mennyisége nem éri el a kitermelés ütemét. Ha ugyanis a korábban nem bolygatott tárolókat elkezdjük megfúrni, és a kutakból ráadásul magától tör fel a víz, könnyen belátható, hogy el fog jönni egyszer az a pont, amikor többet emelünk ki, mint amennyi beszivárog. Ettől kezdve a mi szempontunkból statikussá válik az egész, úgy, ahogy van. Azaz nem megújíthatóvá.

A statikus és dinamikus készlet közötti különbséget tehát nem úgy kell érteni, hogy valahol a mélyben van egy abszolút vízszint, amitől lefelé statikus, míg attól fölfelé dinamikus. Hanem egy dinamikus egyensúly megbontásakor megváltozik a statikus és dinamikus rész közötti választóvonal is, tehát egy mindig változó, elvi lehatárolásról van szó. A karsztvizek, amelyek itt is különleges helyet foglalnak el, szintén könnyen túlcsapolhatók, ezekben az esetekben így megint az utánpótlás függvényében lehet eldönteni, meddig megújuló a kitermelt mennyiség, csak azzal a különbséggel, hogy még a talajvízhez képest is sokkal közvetlenebb és gyorsabb a kapcsolat a felszínnel. Ezeknek a viszonyoknak az ismerete alapvető fontosságú a felszín alatti vízkivételi tevékenységek megtervezése során, mert a mondottak alapján magunk alatt vágjuk a fát, ha belenyúlunk a statikus készletekbe. Miután pedig pontosan sosem határozható meg egy-egy vízbázis megújuló része, akkor járunk el helyesen, ha az óvatosság elvét alkalmazzuk, és inkább kevesebbet, mint többet termelünk ki a pótolhatatlan vízkincsből.

### 2.3.2. Források

Természetes körülmények között a felszín alatti vizek egy része a domborzat alakulásának függvényében magától megjelenik a felszínen, és felszíni vízzé válik. Ez történhet egyszerre nagyobb területre kiterjedően (mocsarak, vizenyős területek) és helyhez kötötten. Ez utóbbiak a *források*. Történetileg a tiszta, bővizű forrás az életet jelentette az embernek, amíg más módszereket nem talált szomja csillapítására. A korábban említett tipizálásnak megfelelően a források eredetüket tekintve alapvetően háromfélék lehetnek: ha egy lejtős vízzáró réteg eléri a felszínt, a felette települt vízáteresztő rétegben halmozódó talajvíz *talajvízforrás*ban törhet a felszínre. Ha a domborzat olyan, hogy egy vízzáró réteg alatti víztartó réteg eléri a felszínt, az onnan megjelenő víz *rétegvízforrás* lesz. A karsztvíz pedig bővizű, de ingadozó hozamú *karsztvízforrás*ban éri el a felszínt.

A forrás lehet *állandó* és *időszakos*. Az időszakos lehet periodikusan ismétlődő *(intermittens)* és szabálytalan időközökben megújuló *(epizodikus)*. Az intermittens források karsztos területen gyakoriak. Működésük olyan, mint a konyha lefolyó szifonja, csak akkor jelenik meg bennük víz, ha belül, a hegy belsejében a tárolóban a vízszint a szifon legmagasabb pontja fölé jut, és addig folynak, amíg azt el nem éri.

## 2.4. FELSZÍNI VIZEK

### 2.4.1. Folyók és vízfolyások

A világtengerekből elpárolgó víz egy része a szárazföldön csapódik le. Ily módon a tenger vízháztartása negatív, nagyobb a párolgási vesztesége, mint csapadékbevétele. Ezt a hiányt a szárazföldről a tengerekbe visszafolyó víz pótolja, és hozza ezzel a vízháztartást egyensúlyba. Bár évente 40 000 $km^3$ vízről van szó, ennek a mennyiségnek mégis csak elenyészően csekély része, 1250 $km^3$ az, amely egy adott pillanatban a világ felszíni vízfolyásaiban megtalálható. A felszíni vizek közül vízfolyásnak nevezzük az olyan vizet, amely lejtős térszínen a gravitáció hatásának engedelmeskedve jut el a tengerekbe – vagy nem jut odáig, hanem elpárolog. Akár így, akár úgy, lényeges jellemzője, hogy meghatározott pályán (mederben) mozog, ezért lineáris a mozgása. Ahhoz, hogy egy folyó folyjék, vízfelvételének legalább ideiglenesen nagyobbnak kell lennie, mint a párolgási és elszivárgási veszteség.

Ezért kétféle vízfolyás különböztethető meg: *állandó* és *időszakos*. Az előbbieket mindannyian ismerjük, idetartoznak a folyók, patakok, erek és folyamok még akkor is, ha vízszállításuk, azaz *hozamuk* (az egységnyi idő alatt keresztmetszetükön átáramló víz mennyisége) időben tág határok között változik. Ha ezek a határok olyan tágak, hogy rendszeresen előfordul a teljes kiszáradás, időszakos vízfolyással állunk szemben. Ez nem vonatkozik az extrém esetekben, szélsőséges időjárási viszonyok között kiszáradó patakokra és folyókra, csak azokra, amelyek ismétlődő jelleggel teszik ezt. Idetartoznak a periodikus esőkkel jellemzett éghajlati övekben a kisebb vízfolyások, például az észak-afrikai vádik (minden Rejtő-olvasónak ismerősen hangzik), vagy az ausztrál *creek*ek, amelyek évente csak egyszer kapnak nagyobb mennyiségű vizet, míg a másik véglet a monszunvidéken, a mediterrán tájakon található, ahol általában élő, de az esős évszak előtti hónapokban rendszeresen kiszáradó folyókkal találkozunk.

Nem általánosan ismert, hogy a folyók és vízfolyások egy jelentős része soha nem éri el a tengert. A kontinensek belsejében, különösen Észak-Afrikában (Szahara), az Arab-félszigeten, Belső- és Közép-Ázsiában, valamint Ausztrália középső medencéjében a felszíni vizek vagy elpárolognak, még mielőtt bármit is elérnének, vagy nagy, lefolyástalan tavakba torkollanak, amelyek nem állnak összeköttetésben a világóceánnal. Ebben az értelemben tehát vízkörzésük részben független a nagy földi vízkörzéstől, és ahhoz csak az atmoszférán keresztül kapcsolódik – ha kapcsolódik egyáltalán. Az ilyen, úgynevezett *végtavak* közül a legnagyobb a tévesen tengernek nevezett Kaszpi-tenger, a szintén közép-ázsiai Aral-tó, Afrikában a Csád-tó és Ausztráliában az Eyre-tó. Az olyan lefolyástalan, sivatagos medencékben, mint a közép-ázsiai Tarim-medence vagy a Takla-Makán, a sivatagba induló folyók elvesznek útközben: a Pamír és a Karako-

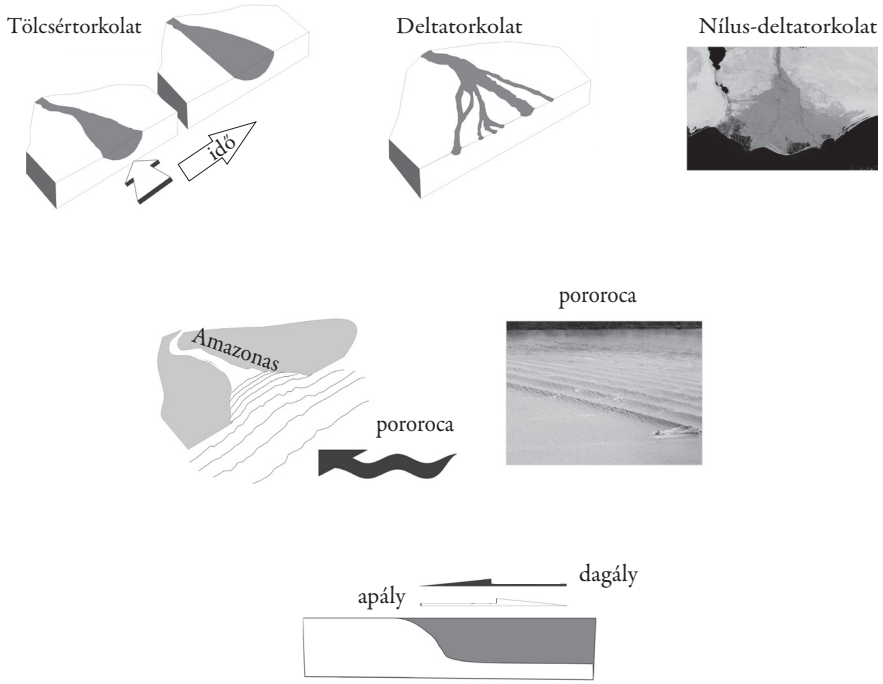
rum hegység megolvadt gleccserei által táplált folyók vize egyszerűen elpárolog a nappali nagy inszoláció és a medence saját csapadékának hiánya következtében. Máskor viszont a folyó olyan nagy vízfelesleggel rendelkezik, hogy sikerül áttörnie a száraz, sivatagos területen és elérnie a tengert. A legjellegzetesebb ilyen folyó a Nílus, amely Belső-Afrika nedves, trópusi területein annyira feltöltekezik, hogy nemcsak gond nélkül eléri a sivatagon keresztül a Földközi-tengert, de még egy virágzó öntözéses kultúrát is táplált ötezer éven keresztül. Hasonló hőstettet hajtott végre Észak-Amerikában a Colorado folyó is.

Sajnos, ma már ezeknek a példáknak egyike sem áll meg változtatás nélkül. A természetes dinamika figyelmen kívül hagyásának igen jó példája a felszíni vizek lefutásába, mozgásaiba történő emberi beavatkozások sorozata, ami pompás lehetőséget nyújt az elsőfajú hibák megfigyelésére. A folyók (és patakok, folyamok) ugyanis kaotikus viselkedésű rendszerek, egyrészt fraktálszerű geometriával rendelkeznek, másrészt előre kiszámíthatatlan, a komplex viselkedésű rendszerek sorsának elágazódásait mintázó (lásd I. kötet, 93. oldal) mozgásokat végeznek. Az például, hogy egy folyó meanderező szakaszai az évszázadok vagy évezredek során milyen irányba mozdulnak el, és a folyó maga ebből következően merre vándorol, nem modellezhető. Ha nem vagyunk tekintettel ezekre a mozgásokra a vízügyi beavatkozások megtervezésekor, a folyó maga fog figyelmeztetni rá, a beavatkozásokra rendszerszinten válaszol, és az eredmény újabb probléma kialakulása lesz. Ahhoz, hogy ezeket a problémákat megértsük, előbb meg kell ismernünk a felszíni vizek természetes életét, az emberi beavatkozások nélkül mutatott dinamikájukat. Ezt követően elemezhetjük a különféle technikai beavatkozások és a természeti rendszer kölcsönhatásait.

### 2.4.2. Források még egyszer

A felszíni vizeket persze nem csak a csapadék hozza létre. A köztudatban is úgy él, hogy egy folyónak vagy pataknak forrása van. A forrás a felszín alatti vizek felszínre lépésének pontszerű helye, és a geográfusok igyekeztek mindig egy ilyen forrást kinyomozni, amihez a folyó eredetét kötni lehet. Ennek az erőfeszítésnek az eredménye a források korábban tárgyalt beosztása. Az azonban csak az embernek fontos, hogy osztályozni és nyilvántartani tudjon, a folyó nem nagyon törődik vele, van-e neki forrása vagy nincs. Számos egyéb módja is van annak, hogy kialakuljon egy felszíni vízfolyás. Eredhet felszíni gleccserjég olvadékvizéből (Rhône, Rajna), gyakran tavakból vagy nagy kiterjedésű mocsaras, lápos területről is. A tóból eredő leghíresebb folyó a Szent Lőrinc-folyó, amely a Nagy Tavak vizét vezeti a tengerhez, közben létrehozva a Niagara-vízesést, illetve az Angara, amely a Bajkál-tóból ered. Ráadásul a felszíni és felszínközeli talaj és kőzetek fiziko-kémiai sajátosságai következtében egy már kialakult vízfolyás is bármikor eltűnhet, amire a legjobb példa karsztos területen a víznyelőben föld alá kerülő folyó vagy patak.

## 2.4.3. Torkolatok




8. ábra. *Torkolatok (Grafika: Bánvölgyi Tamás)*

### 2.4.3.1. *Tölcsértorkolat*

Azok a vízfolyások, amelyek elérik valamelyik állóvizet, legyen az tenger vagy egy végtó, torkolattal szájadzanak bele. A torkolat morfológiáját, valamint ebből következő vízdinamikai és fiziko-kémiai sajátosságait alapvetően a torkolatvidéken a tenger és a folyó vize között kialakult egyensúly határozza meg. Az árapályhatás (tengerjárás) a Nap és a Hold tömegvonzásával, valamint a Nap és a Hold Föld körüli pályáinak centrifugális erőivel magyarázható. A Holdhoz közelebb eső oldalon a tömegvonzás, a távolabbi térfélen pedig a centrifugális erő duzzasztja ki medréből az óceánt (amely ily módon megint csak kupacban áll meg, naponta kétszer is). Ám ahol a tenger sekély, például a beltengereknél, ott ez a hatás arányaiban sokkal kisebb.

Amennyiben a torkolat egy olyan tengerbe vezet, amely a világóceánnal közvetlen összeköttetésben áll, és annak árapálymozgásait jó közelítéssel követi, az így keletkező mozgási energia a folyó vizét naponta kétszer hátrafelé szorítja, és

dagály idején a tengervíz szélsőséges esetben több tíz kilométeres hosszon benyomul a folyómederbe. Ez az értelemszerűen sós víz elkeveredik a folyó édesvizével, és jellegzetes ökoszisztémáknak otthont adó átmeneti, úgynevezett *brakkviz*et (félig sós víz) hoz létre. A keveredési zóna dinamikusan változik, hiszen apálykor az egész hullám visszafelé vonul, és ilyenkor a folyóvíz árad ki a nyílt tengerre. A dagálynak hihetetlen ereje van. Az Amazonas torkolatában például szabályszerű, felfelé hatoló vízfal alakul ki, amely ellen hajózni úgyszólván lehetetlen. A *torlóár*nak, avagy brazil portugálul *pororocá*nak nevezett jelenség sokszor 20-40 km/óra sebességgel is haladhat.

A tölcsértorkolatok tehát elsősorban az óceánhoz közeli helyeken beömlő folyókon alakulnak ki. Ilyenek az Atlanti-óceánba torkolló folyók, a legnevesebbek az Amazonason kívül az Elba, a Temze, Amerikában pedig a Szent Lőrinc-folyó. A dagály veszélyes is lehet, ha rosszkor jön, és más jelenségek is felerősítik, például a tenger felől fújó, erős szél. Ilyenkor *vihardagály*nak nevezik, mely néha komoly pusztítást végez. Hollandia köztudottan lapos és a tengernek kitett ország, ilyen vihardagályok már többször súlyos károkat okoztak arrafelé, de a Temzén is felvonult a történelem során többször az ár. Ellene építették a hatalmas, sárga csákókra emlékeztető torkolati gátat. A hajóknak az ilyen mély tölcsértorkolatokba épített kikötők esetében nagyon jól kell ismerniük az apály-dagály viszonyait, mélységét, magasságát és idejét, hogy lavírozni tudjanak a sokszor mélyen bent a szárazföldön található kikötők elérésekor (London kikötője 60, Hamburg meg majd' 100 km-re fekszik a tulajdonképpeni torkolattól). Az árapályértékek néha igen magasak lehetnek, Európában a legnagyobb folyótorkolati különbség Bristolnál van, a Severn folyó itt dagálykor 15 méterrel áll magasabban, mint apálykor. A világon a legtekintélyesebb ilyen vízszintmozgás az új-skóciai (Kanada) Fundy-öbölben figyelhető meg, ahol 21 méter az apály és a dagály közötti különbség.

Kiszámították, hogy a Földön végigvonuló dagály energiája 40 000 GWh, ami azt jelenti, hogy 130 ilyen hullám (amiből van napi kettő) energiája megegyezik a Föld összes energiatermelő erőművének egész évben előállított energiájával (Rosenkranz 1977). Kézenfekvő tehát az elgondolás, hogy ezt a mérhetetlen energiát valahogy befogjuk, és erre célszerűen a folyótorkolatok kínálkoznak. Periodikusan ismétlődő jelenségről lévén szó, a hasznosítás tervezhető is lenne, ha nem járna olyan technikai nehézségekkel, amelyeket eddig csak korlátozottan sikerült megoldani. Az egyetlen működő árapályerőmű hosszú időn keresztül a hatvanas években a franciaországi St. Malo-öbölben épült 240 MW-os (ez egy közepes gázturbinás erőműnek felel meg) szerkezet volt. Ma már több ilyen létesítmény is van szerte a világban, a Dél-Koreában 2003 és 2010 között épült Sihwa-tavi erőmű 254 MW teljesítményével a világ legnagyobb árapályerőműve. Több olyan projekt is elindult, amelyeknél az építkezés a nehézsé-

gek miatt elhúzódik. Ilyen a MeyGen Skóciában (2006 óta épül, és nem gáton, hanem víz alatti turbinákkal érne el 384 MW teljesítményt) vagy a Swansea-öbölben, Nagy Britanniában (Fábián 2015).

A tölcsértorkolatokban a folyók hatékonyan gargalizálnak, vagyis a szállított hordalékot az árapály energiája egyszerűen kimossa a medrükből. Az idők során ez a mosó, sikáló hatás nemcsak a fentről érkezett hordalékot távolítja el, hanem magát a medret is, ezért a tölcsértorkolatok pusztulnak: hátrálnak, egyre nagyobbak és egyre szélesebbek lesznek. Az egyensúly a szedimentáció és erózió harcában ez utóbbi javára billen. Emberi szempontból előnyösnek látszik, hogy bele lehet borítani minden szemetet, hiszen a tenger ereje kimossa onnan, és elkeveri az óceánok vizével. A hulladék felhígul, és ezzel a probléma megszűnik létezni, legalábbis sokáig így gondolták.

### 2.4.3.2. *Deltatorkolat*

A másik lehetőség, hogy a folyó olyan tengerbe ömlik, amelyik hosszabb szakaszon kontinentális peremmel rendelkezik, vagy maga is beltenger, és csak közvetett kapcsolata van az óceán felé. Ilyenkor a folyó hordalékszállító hatása legyőzi a beltengereken sokszor mindössze néhány centiméteres árapály hatását, a folyó a tengerbe érve lelassul, vizét és vele hordalékát szétteríti. Emiatt a görög D betűhöz, a deltához (D) hasonló képződmény alakul ki, ezért ezt a fajta beszájadzást *deltatorkolat*nak nevezik. Deltatorkolata van például a Földközi-tengerbe és az Adriába ömlő folyóknak, a Rhône-nak, a Pónak, a Nílusnak, de a mi folyamunk, a Duna is hatalmas deltatorkolattal éri el a Fekete-tengert. A deltatorkolat, akárcsak a tölcsér, természetes körülmények között nem stabil, csak itt ellenkező irányba billen a mérleg nyelve: a folyó győz, és a tengertől egyre nagyobb területet hódít el. Iskolapélda az olaszországi Pó-síkság, amely így jött létre, és ma is alaposan kitüremkedik az Adria medencéjébe. A deltatorkolatban a folyó alsószakasz-jellegű (lásd később), és a kis árapálymozgás miatt nincs rá lehetőség, hogy a folyamatosan a tengerbe továbbított hordalékot a tenger elvigye onnan. Ezért egy idő után feltöltődik a torkolat, és homokos, üledékes padok alakulnak ki, amelyek között hajfonatszerűen elágazik a folyó. Ezek a padok és velük a folyó ágai folyamatosan változtatják helyüket, mindig az adott terepviszonyoknak megfelelően. A folyó által lerakott és szétterített hordalékból hordalékkúpok, zátonyok és szigetek épülnek, amelyek között a folyó több ágra szakad, így alakul ki a jellegzetesen a tenger felé domborodó, háromszög alakú delta (Simon 1999). Természetes körülmények között ezek a deltatorkolatok állandó vizes területek, és a vízhez kötött élővilág legnagyszerűbb élőhelyei. A Duna-delta faunája messze földön híres. Igaz, az ilyen körülmények kedveznek a malária és más, szintén nedves területekhez kötött kórokozók terjedésének is, ezért az ember komoly erőfeszítést tett a lecsapolásukra.

## 2.4.4. Vízválasztó, vízgyűjtő

### 2.4.4.1. *A vízválasztó, vízgyűjtő és vízhálózat fogalma*

A felszíni vizek utánpótlása egyrészt a *felszíni lefolyás*, másrészt a *felszín alatti lefolyás* révén valósul meg. Mindazon területek összességét, amelyek ebben a kétféle táplálásban részt vesznek, az adott vízfolyás *vízgyűjtő terület*ének nevezzük. A kisebb vízfolyások a térszint változásainak megfelelően találkoznak, egymásba ömlenek, összeszedődnek, végül valamilyen befogadóba (tenger vagy tó) érkeznek. Az egymással ily módon összeköttetésben álló folyóvizek rendszere a szomszédos hasonló rendszertől általában jól elhatárolható vízgyűjtőt alkot. A vízgyűjtőterületet a szomszédos vízgyűjtőktől elhatároló vonal a *vízválasztó*. Ez általában egy hegyvidék gerince, de bizonyos esetekben más megoldás is kialakulhat. Például a 9. ábrán látható, hogy a hegy túlsó oldala még tartozhat az innenső vízgyűjtőterülethez, tehát nem minden esetben a gerinc a vízválasztó.




9. ábra. *Vízgyűjtő*

Még bonyolultabb a kép a karsztos vízrendszereknél, ahol az elnyelt víz esetleg egy másik vízgyűjtőterületen lép ismét felszínre. A Jules Verne-könyvek rajongói emlékezhetnek rá, hogy a vizek nyomkövetését annak idején megfestésükkel érték el, és azt kellett figyelni, hol lép ismét felszínre a színes víz. Ráadásul nemcsak a hegyek gerince mentén lehet vízválasztó, hanem a völgyekben, sőt *ad absurdum* a síkságokon is. A Dunántúlon például a Külső-Somogyban bizonyos geológiai események miatt a völgyek közepe megemelkedett, ezért a vizek a térség egyik feléből a Balaton, a másik feléből a Kapos vízrendszerét táplálják. A síksági vízválasztók rendszerint nagy, lapos és mocsaras vidékek, amelyek egyik feléről egyik irányba, a másikról a másikba folyik a víz.

Az egész szárazföldön végighúzódó vonalat *kontinentális vízválasztó*nak nevezzük. Európában és Amerikában aránylag jól kettéválasztja a kontinenst, de Ázsiában, Afrikában és Ausztráliában hatalmas *lefolyástalan területek* vannak, ahonnan semmilyen körülmények között nem éri el a víz a tengert. Ezek a kontinens belső, medenceszerű, száraz területei: a Szahara, Belső-Ázsia, az Arab-félsziget és Ausztrália belseje. Egyedül Ázsiában 10 millió km$^2$ esik ki a globális

vízkörzésből. A kontinensek területének mintegy egyötödéről nincs a világtenger felé lefolyás.

A felszíni vizek vízgyűjtőkkel tagolt rendszerét *vízhálózat*nak nevezzük. Ennek tagolódását sokan igyekeztek felmérni, és a vízfolyásokat rendbe szedték: különböző *rendű* folyókról beszélnek aszerint, hogy hányadik elágazásnál tartunk. A folyók ágainak összeszedődése és az egyre nagyobb folyamok kialakulása fraktálszerű geometriát mutat, és hasonlít nagyon sok egyéb természeti rendszer mintázatához. A vesénk, a tüdőnk, az érrendszerünk, egy falevél hajszálérrendszere, a hópelyhek geometriája mind ilyen logikával „működik". Ez a faágszerű elágazásrendszer a táj és a kőzetek tulajdonságainak függvényében más és más konkrét alakot ölthet, lehet például sugaras, lugasszerű, hálózatos vagy négyszögletes, ám a nagyságrendek logikája mindenütt ugyanaz marad. A folyók a forrásuktól a torkolatukig 1 és 7 közötti számú rendet vonultatnak fel, tehát a legnagyobb, legöregebb folyónak sincs több elágazása hétnél, az egyes ágak hossza pedig általánosságban kétszerese lesz a rendszám emelkedésével. Ilyen mintázat óhatatlanul a növekedésre, az élet fejlődésére emlékeztet, és ami a változékonyságot illeti, ez nem is áll nagyon távol a valóságtól. A folyók egyes szakaszainak vizsgálatakor kiderül, mennyire más tulajdonságok jellemzők a kisebb és nagyobb rendszámú vízfolyásokra (Mollison 1990).

### 2.4.4.2 *A felszíni vizek táplálása*

Az élővilág és a felszíni vízkörzés szempontjából igen nagy jelentősége van annak, hogy a felszíni vízfolyások hogyan kapják utánpótlásukat. Viselkedésüket, vízhozamukat és a vízhozam ingadozását, a vízjárást ugyanis ezek a tényezők szabják meg. A felszíni lefolyásnak két formája van, a *közvetlen* és a *késleltetett lefolyás*.

*Közvetlen lefolyás*

Döntően a lehulló esőből származik, vagyis időben szoros korrelációt mutat a csapadék keletkezésével. Amikor az eső esik, a folyók megduzzadnak, a talajra hullott víz egy része közvetlenül megindul a vízfolyások irányába. A felszínen diffúzan, elterülten haladó vizet a helyhez kötött forrásokkal és vízfolyásokkal ellentétben *areális víz*nek nevezzük. Útjának hosszát és a menet közbeni veszteséget, amely döntően párolgás és beszivárgás révén jön létre, több tényező befolyásolja:

A vízgyűjtő terület *alakja*, amelytől függ, hogy az areális víznek mekkora utat kell megtennie.

A *lejtő meredeksége* értelemszerűen az ott eltöltött időt határozza meg.

A *felszín anyaga*, a talaj porozitása, vízhez való viszonya. Az agyag például vízzáró, ám kevésbé ismert, hogy a lösz és az agyagos lösz, amely rendkívül poros és száraz tud lenni, eső hatására megduzzad, és miután a felszínhez közeli 10 cm átnedvesedett, több vizet nem vagy csak nagyon lassan vesz be. A nagy mező-

gazdasági, erdőgazdasági gépek súlya tömöríti a talajt és csökkenti a beszivárgást, a friss szántás viszont csökkenti a lefolyási tényezőt. Városokban pedig azért okoz gondot a hirtelen nagy eső, mert a leaszfaltozott, betonozott felületek beszivárgása nulla.

A *növényzet* minősége és mennyisége széles határok között változtatja a lefolyási értékeket. Mint láttuk, az erdők esetében igen sok függ a növényzettől. A különböző természetes vegetációtípusok vagy művelési ágak szerint a különbség igen nagy lehet.

A leglényegesebb azonban az éppen érvényes *meteorológiai helyzet*. Adott mennyiségű csapadék nagyobb részben folyik le egy hosszabb, csapadékos időszak végén, mint szárazság után. Már a múlt század húszas évei óta tudjuk, hogy a legnagyobb lefolyást nem a hirtelen lezúduló, nagy intenzitású esők adják. Ezek nem tartanak elegendő ideig ahhoz, hogy a vízgyűjtő teljes területe bekapcsolódjon a vízszállításba, mert mire az eleje leér, az eső már meg is szűnik, tehát a felső folyásnál nincs több utánpótlás. A hosszú ideig tartó, áztató esők sem eredményeznek nagyon nagy lefolyást, mert magas beszivárgási tényezőjük és a kis intenzitás miatt a vízszállítási veszteség is nagyobb. A kettő között lévők fontosak, amelyek elegendő ideig esnek, hogy elérjék az adott vízgyűjtőre érvényes *összegyülekezési idő*t (az az idő, amely alatt a vízgyűjtő legtávolabbi pontjától a befogadóig terjedő vízszállítás megvalósul), és elég intenzívek ahhoz, hogy a legnagyobb mennyiségű lefolyást produkálják.

A fenti tényezők együttesen határozzák meg egy vízgyűjtőre jellemző *átlagos fajlagos lefolyás*t, vagyis az egységnyi területről egységnyi idő alatt a folyókba kerülő víz mennyiségét. A lefolyás nagysága döntő jelentőségű a folyók viselkedésében és az emberi felhasználásban is.

*Késleltetett lefolyás*

A késleltetett lefolyásnak szintén rendkívül nagy a szerepe, különösen a mi vidékünkön. A késleltetést az okozza, hogy a csapadék nem folyékony halmazállapotban érkezik a vízgyűjtőre: *hó* vagy *jég* formájában van jelen. A *hó évszakos periodicitás*sal, az északi féltekén tél végén vagy nyár elején olvad el, és ezzel a folyók vízhozamának időszakos megemelkedését okozza (tavaszi árvíz), mert viszonylag rövid idő alatt szabadul fel egy egész évszak csapadékmennyisége. A *jég* ezzel szemben legtöbbször a hegyek jégsapkája vagy gleccserjég formájában a vízgyűjtő felső területein *folyamatosan jelen van*, és ezért egyenletesebb utánpótlást biztosít, gyakorlatilag az év nagy részében, amikor olvad. Az olvadás nyár közepére éri el maximumát, tehát az ilyen folyók vízhozama egyenletesen emelkedik, majd egyenletesen csökken. A gyakorlatban a különféle változatok keveredhetnek, és a helyi adottságok döntik el, hogy például egy síkvidéki vízgyűjtőn nem nagyobb-e a hóolvadás okozta vízhozam-emelkedés, mint az esők által okozott, tekintve, hogy a sík vidéken az eső csak lassan jut el a folyóhoz.

A folyók menti néhány kilométeres sávban a folyók vize és a környező *talajvíz* dinamikus kölcsönhatásban áll egymással, és attól függően, hogy melyiknek a szintje magasabb, egyik a másikat táplálja. Az eső vagy hóolvadások utáni kisvizes időszakban a folyók vize döntően innen származik, ezért nem száradnak ki akkor sem, amikor hónapokig nem kapnak közvetlen felszíni utánpótlást. A talajvíz okozta lefolyás késleltetése jelentős mértékű, akár évekre is kiterjedhet. Kontinentális éghajlaton a száraz években a korábbi időszakban felhalmozódott talajvíz gátolja meg a folyók szintjének katasztrofális mértékű leapadását. A folyók alatti kavicsréteg élővilága pedig nemcsak vizet, de létfontosságú tápanyagokat, elsősorban jelentős mennyiségű foszfort és nitrogént is biztosít a folyó élővilágának a nehéz időkben (Stanford és Ward 1988). Egyes mérések szerint a felszíni és felszín alatti lefolyás között, a talajnedvesség zónájában igen jelentős az úgynevezett *köztes lefolyás*, ami horizontális irányú talajnedvesség-áramlást jelent (Borsy 1993).

*Vízhozam, vízállás és vízjárás*

A vízfolyások vízszintje és vízszállítása időben tehát folyamatosan változik. Ha kiszámítjuk, hány köbméter víz folyik át egy másodperc alatt a meder keresztmetszetén, a folyó *vízhozam*át kapjuk. Ehhez ismernünk kell a folyóvíz áramlási sebességét, ami elsődlegesen a felszín lejtésétől függ, míg ez viszont a folyó *szakaszjelleg*ét határozza meg. A vízhozam a vízgyűjtőterület nagyságától és a vízgyűjtőterületről lefolyó víz mennyiségétől függ. A vízhozam folytonos változásával együtt változik a mederben a vízszint magassága, vagyis a *vízállás*. Ennek alapján megkülönböztetünk *kisviz*et, *középviz*et *és magasviz*et (nagyvizet), valamint *árviz*et. A vízhozam ingadozásának átlagos, szabályos, évszakos sorrendjét *vízjárás*nak nevezzük. Annak megfelelően, hogy ezek a változások milyen dinamikát követnek, megkülönböztetünk *egyszerű* vízjárású folyót, ahol évente egy nagyvíz és egy kisvíz van, *eredeti komplex* rendszert, ahol legalább két lefolyási csúcs (tavaszi és téli nagyvíz), illetve *váltakozóan komplex* rendszert, amelyben a folyó mentén haladva a vízjárás típusa változik. A vízjárás az évszakok szerint ismétlődő csapadékos időszakoktól (esőtől), a hó- és gleccserolvadás időszakaitól függ. Ennek alapján megkülönböztethetünk *egyenletes, ingadozó és időszakos vízjárású* folyókat.

Egyenletes vízjárása van például az Amazonasnak, mert vízgyűjtőterülete a trópusokon, a mindennapos esők övében található, ahol a táplálás egyenletes. Az Amazonas egyúttal a világ legnagyobb vízhozamú folyója, mert a medrében magasvízkor hömpölygő vízmennyiség másodpercenként 280 000 $m^3$. Elképzelhetjük, milyen ereje lehet a pororoca torlóárnak, ha ezt a vízmennyiséget is képes 40 km-es sebességű hátrálásra késztetni. A Duna ezzel szemben periodikus vízjárású folyó, amint azt minden évben tapasztalhatjuk: a medrében mért vízszint a vízgyűjtőjében lehullott csapadék évszakos változásától és a tavaszi hóolvadástól függ. Az időszakos vízfolyásokról, a vádikról és creekekről már volt szó. Magya-

rul *aszó*nak nevezik az ilyet. A növényzet alapjaiban változtathatja meg egy folyó vízjárását. Az erdők által okozott, a csapadék lefolyásának késleltetését, időbeli elhúzódását okozó jelenséget *szivacshatás*nak nevezzük.

### 2.4.4.3. *A mederformálás mechanizmusa*

A helyzet látszólag egyszerű: a víz a magasabb helyről a terepalakulatok kihasználásával az alacsonyabb hely irányába folyik, a fizika nyelvén szólva tehát helyzeti energiája átalakul mozgási energiává. A helyzeti energia elvesztésének mérőszáma a folyó *esése*, amely azt fejezi ki, hogy egy kilométer hosszon hány métert (később centimétert) veszít el a víz a tengerszint feletti magasságából. Alaposabb vizsgálat azonban azt mutatja, hogy itt is, ott is vannak még trükkök az egyszerűnek látszó képletben. Egyrészt a mozgás súrlódással jár, és a súrlódás hőt fejleszt. A vízrészecskék egymáshoz súrlódása a belső, míg a meder falához dörzsölődése, feszülése a külső súrlódás. A súrlódás azonban nemcsak hőt fejleszt, és ezzel egy kis részét elveszi a mozgásra szánható energiának, hanem le is lassítja a részecskéket. Mégpedig minél közelebb vannak az álló felülethez, annál jobban. Ez a jelenség a víz kavargó, örvénylő mozgásának, a turbulenciának az alapja. Anélkül, hogy a részletekbe belemennék, megemlítem, hogy vannak függőleges tengelyű és vízszintes tengelyű örvények, és ez utóbbiak a folyó mozgása miatt spirál alakban haladnak, és ez a mozgás a meder formálásában döntő szerepet játszik.

A víz tehát energiájának jelentős részét mozgásra fordítja. Ám a terepen egyenetlenségek vannak, ezért a súrlódási tényező folyamatosan változik, ahol pedig akadályba ütközik, ott torlódik a víz. Az akadály – mederfenék – anyaga alapvetően meghatározza, hogy milyen módon tudja azt a víz formálni. Ahol szálban álló szikla a mederfenék anyaga, ott csak nagyon lassan és egyenetlenül képes változtatni rajta, inkább maga az áramlás iránya változik meg. A legtöbb folyó azonban útjának nagy részét a maga építette homokos talajon teszi meg, ahol az anyagrészecskék közötti kohézió gyenge, ezért egyes szemcséket magával tud ragadni. Hogy mikor emel fel egy szemcsét, azt annak alakja, a beágyazódás foka, a szemcse mérete, súlya és a víz sebessége határozza meg. Minden szemcsére vonatkozóan van egy kritikus sebesség, amelynél felemeli, és egy másik kritikus sebesség, amelynél lerakja azt a víz.

A meder alakjának alakítását alapvetően tehát a saját anyagából kiragadott vagy a felszíni lefolyással oda belekerült szilárd részecskék határozzák meg. A vízben található szilárd részek együttes neve a *hordalék*. Ennek alakja, mennyisége és mérete meghatározza az adott folyó fizikai tulajdonságait, például színét: a Sárga-folyó a benne lebegő löszszemcséktől sárga, míg az Amazonas egyik mellékfolyója, a Rio Negro a lápvidéken áthaladva fekete iszapot vesz fel, attól lesz fekete.

A hordalékok több fajtáját különíthetjük el. A *felszínen úszó* hordalék a víz fajsúlyánál könnyebb anyagokból, fából és növényi maradványokból, valamint

újabban az emberi tevékenység következtében műanyag palackokból és használt egészségügyi gumikból áll össze, ám a meder alakjának alakításában alárendelt szerepet játszik. Sokkal fontosabb a lebegő vagy *lebegtetett hordalék*, amelynek kicsiny szemcséi lehetővé teszik, hogy a vízben szuszpendálva haladjon tovább. A nagyobb fajsúlyú, nagyobb méretű hordalék már lesüllyed a fenékre, de a víznek még elég ereje van ahhoz, hogy magával vonszolja, belekapaszkodjon, felfordítsa. Ez a *görgetett hordalék*. Megfelelő körülmények között a görgetett hordalékot is fel tudja kapni a víz, hosszabb-rövidebb ideig lebegteti, aztán megint pattan a fenéken, ez az *ugráltatott hordalék*. Végül, de nem utolsósorban vannak olyan szilárd anyagok is, amelyek a vízbe kerülve valódi oldatba mennek át, ezek az oldott anyagok.

A víz munkavégző képessége a benne lévő hordalék tulajdonságaitól nagymértékben függ. Miután a szemcsék felvétele munkavégzéssel jár, ezért közben a víz energiájának egy részét elveszti. Miután elveszti, nem tudja mozgásban tartani a hordalékot – amihez szintén energia kell –, ezért elérve a kritikus lerakási sebességet, lerakja. Miután lerakta, megint felgyorsul, így újabb hordalék felvételére lesz képes. A hordalékszállítás a folyó mozgása mentén *ritmikusan változik*, amihez hozzájárulnak a terepalakulatok is. A hordalék méretétől és helyzetétől függően van hatással a meder alakjára. A legáltalánosabb hatás az úgynevezett korrózió, avagy koptatás, amikor a szemcsék fizikailag csiszolják a mederfeneket, illetve a görgetegtördelés, amikor az áramló víz a magával sodort nagy kövekkel, kavicsokkal bombázza, mint egy kalapáccsal tördeli az útjába kerülő nagyobb tömböket, medertárgyakat. A folyó esése, az altalaj geológiai minősége és a hordalékviszonyok együttesen határozzák meg a geomorfológiai szakaszokat.

#### 2.4.4.4. *A folyó szakaszai*

A tisztán élettelen erőknek kitett földfelszín uralkodó tendenciája az erózió, defláció, a pusztulás: élettelen lévén, az entrópia törvényének engedelmeskedik. A valóságban az élet alaposan beleavatkozik ezekbe a folyamatokba, hiszen majdnem a szilárd kéreg kialakulásától kezdve jelen van a bolygó felszínén. A folyók azonban, amelyek óriási mennyiségű anyag megmozgatása révén a földfelszín legszebb, leglátványosabb képződményeit hozzák létre évmilliók során, szintén nem csak egyértelműen rombolnak. Munkájuk során építenek is, és a negatív és pozitív formák váltakozó eséllyel kerülnek ki a „kezük" alól.

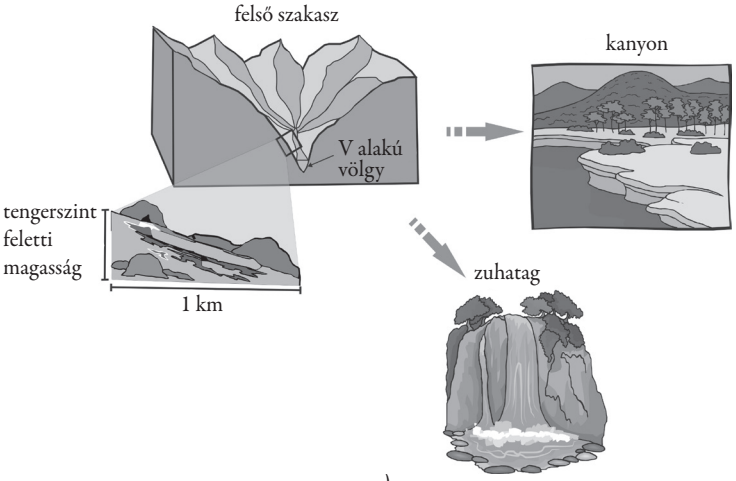
Minél nagyobb a folyó *vízhozama és sebessége*, annál nagyobb az energiája és a *munkavégző képessége*. Rombolni a víz ereje önmagában is képes, de pusztító munkájának jelentős részét a vízbe került szilárd anyag, a hordalék koptató hatásával, annak szállításával, építő munkáját pedig annak lerakásával végzi. A hegyekben magasak a csúcsok, szűkek és mélyek a völgyek. A víz útja egyértelmű, mindig az alacsonyabban fekvő területek felé halad. A hegyoldalakon zúdul le, a völgyekben zuhog, iszonyú erővel tör utat magának. Ha a hegyi pata-

kok kicsit lelassulnak, a szállított víz mennyisége pedig megnő, folyó lesz belőlük. Innentől kezdve a tengerig a folyó *háromszor* változtatja meg alapvetően a viselkedését attól függően, mennyire meredek a völgy, amelyben folyik, és ezért mekkora a sebessége. Ezeket a viselkedési jellemzőket Cholnoky Jenő nyomán *szakaszjelleg*nek nevezzük. Ennek megfelelően egy folyó lehet *felső-, középső- és alsószakasz-jellegű*. Vannak folyóvizek, amelyekre a három közül csak egy vagy két szakasz jellemző, de a nagyobb vízfolyásokon mindhárom előfordul, esetleg többször váltakozva is (Simon 1999). A szakaszokra való osztás nem ad megoldást minden kérdésre, mégis a mai napig használják, mert egyszerű és szemléletes (Mezősi 2011), ám vannak más beosztások is, amelyek inkább a hordalékszállító képességre és a medermorfológiára helyezik a hangsúlyt (Schumm 1977).

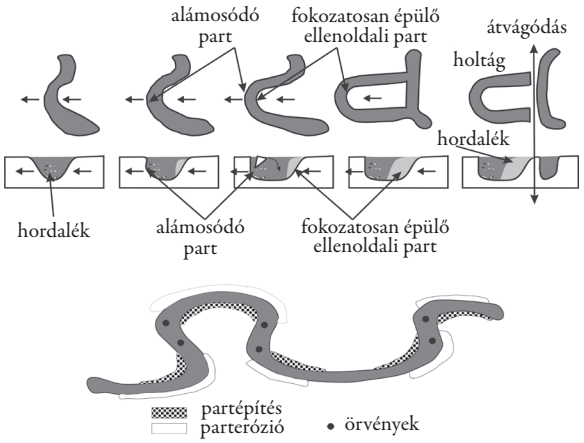
*Felső szakasz*

A hegyek között a folyó *esése* nagy, vagyis egy kilométer hosszon a földfelszín tengerszint feletti magassága több méterrel, akár több száz méterrel is csökkenhet, ezért mindig a legrövidebb utat keresi meg magának, mert a gravitáció ereje érvényesül. Miután a rövid, meredek úton a víz mozgása felgyorsul, hamar keresztülhalad a hegyi szakaszon. A hegyek között az állandó vízmozgás csupaszra kopasztja a folyó ágyát, ahol ezért talaj, hordalék nem marad meg, csak a sziklaaljzat. Ezt a sziklát tördeli, aprózza a víz heves ostroma. Évezredek alatt a folyó egyre mélyebben vágja bele magát a szűk mederbe, amelyből V alakban mélyülő völgyek alakulnak ki. Ez az úgynevezett vonal menti lepusztulás *(lineáris erózió)*. A hegyvidéken a folyó rendszerint nem hajózható, viszont a bevágott folyóvölgy ősidők óta a közlekedés természetes útvonala. Ha a folyó kemény, ellenálló kőzeten halad keresztül, és ott vési a medret, a völgyfalak a függőlegest közelítik. Így születtek a világ lenyűgöző szépségű *szurdokai*. Amerikában a Colorado folyó több száz méter mély medret vájt magának, ennek egyik szakasza a Grand Canyon. Ez úgy alakult ki, hogy a folyó kemény, ellenálló, párhuzamosan rétegzett homokkövekbe, mészkőbe és palába vágta bele magát. A néhol már majdnem 2000 méter mély sziklafalak olyanok, mint egy gigantikus öröknaptár: az alja felé 600 millió éves kőzetek bukkannak elő.

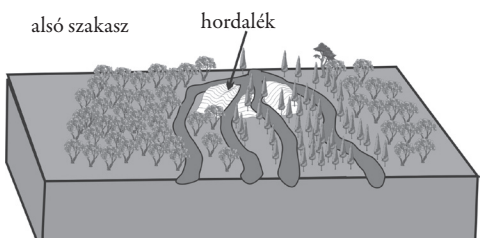
A másik érdekes képződmény egy felsőszakasz-jellegű folyón a *sellő, vízesés* vagy *zuhatag*, amely úgy alakul ki, hogy a meder egy részén keményebb, másik részén puhább a kőzet anyaga, amelyen fut a folyó. Ilyenkor a puhább kőzetet a víz hamarább elhordja, a keményebb marad, és lépcsős egyenetlenségek jönnek létre a folyómederben. Az egyre magasabbról lezúduló vízfüggöny mintegy alámossa a lazább, lágyabb kőzetet, ezért a keményebb kőzet is leomlik, és a vízesés „hátrál" (Reclus 1890–1892).




*a)*




*b)*




*c)*

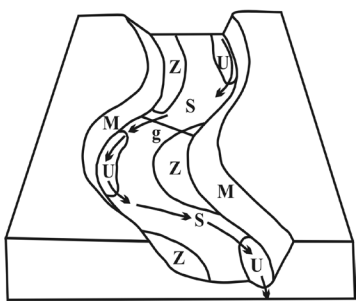
10. ábra. *A folyó szakaszai: a) felső szakasz, b) középső szakasz, c) alsó szakasz*

*Középső szakasz*

A hegyek meredek völgyeiből a folyó a dombvidék lágyabb hangulatú tájára ér. Esése itt jelentősen csökken, következésképpen folyása lelassul. Azt a hordalékot, amit a hegyek közül ragadott magával, itt kezdi lerakni. A lelassult folyó munkaképessége is csökken. Sokszor már a hegység lábánál hordaléka lerakására kényszerül. Ha a hegységből való kilépés és az eséscsökkenés hirtelen következik be, azon nyomban megszabadul a hordalék nagy részétől, és a hegylábnál legyezőszerű hordalékkúpot épít a felszínen. Ha ezek összeolvadnak, kiterjedt hordaléksíkság képződhet, ilyen például a Jászság. A lecsökkent sebességű vízfolyás már nem képes nagy munkát végezni, nem tud belevágni a felszínbe. Éppen annyi hordalékot képes elszállítani, mint amekkora energiával rendelkezik: egyes szemcséket lerak, másokat magával ragad. Bont és épít. Ő maga alakítja folyásának irányát, nagy kanyarokat vágva ki a dombok között.

Ezt a kanyargó vízfolyást nevezzük *meanderezés*nek. A meanderező folyó kanyarogva szélesíti a medrét. A kanyarok külső oldalán a víztömeg a tehetetlensége miatt nekifeszül a kanyar falának, erősebbé válik a vízáramlás, ezért a part homorúan görbül, alámosódik, és az alámosott part folyamatosan pusztul. A szemközti oldalon azonban ebből következően kevesebb víz marad, kisebb lesz a sebessége is, és a lassabb vízmozgás miatt fokozatosan épül a part, a folyó lerakja a magával hozott hordalékot (amit egy korábbi külső kanyarból mosott ki), ezért a kanyar egyszerűen elindul: belső felét a folyó feltölti, zátonyokat képez, a külsőt elhordja. A kanyar az alámosott part irányába egyre beljebb és beljebb vándorol a tájban, miközben íve egyre homorúbb lesz, hajtűkanyar alakul ki, amelynek két fele megfelelő idő elteltével annyira közel kerül egymáshoz, hogy átvágódik, és az alámosott kanyar egyszerűen lefűződik a folyóról: *holtág*, ebből pedig később *morotvató* alakul ki. A szállított hordalék a középszakaszon is kétféle lehet: *görgetett* vagy *lebegtetett*. Az előbbit a víznek nincs elég ereje a mederfenékről elemelni, de azért maga előtt görgeti. Az utóbbi azonban apróbb szemcséjű kőzettörmelék, kvarc, homok és agyagszemcsék, amelyek lebegve utaznak a folyó vizében.

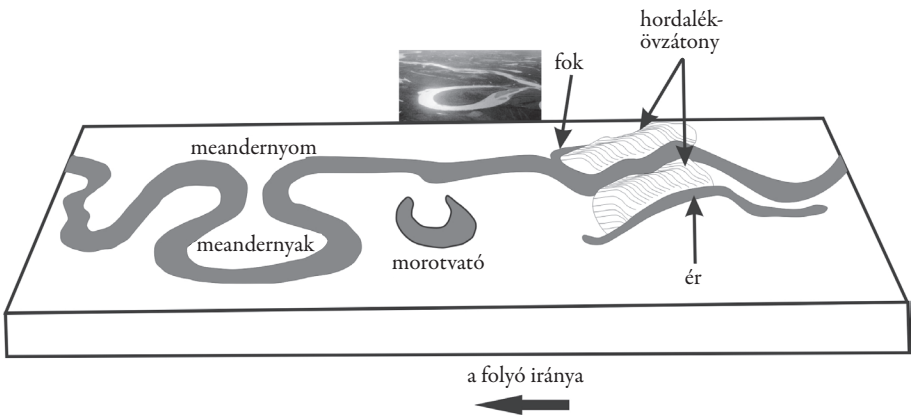
Z = parti zátony
U = üstök
g = gázlók
M = meredek part
S = sodorvonal




11. ábra. *Meanderezés, a folyó legfontosabb horizontális mozgása*

A középszakasz-jellegű folyó bonyolult, összefüggő, élő rendszer. Természetes körülmények között medrét és futását változtatja, mégpedig saját tevékenysége által. Pályáját levágott meanderek, holtágak sora kíséri. Az ártéri síkság nem teljesen egyenletes: jellegzetes képződménye az övzátony. Ez a folyó partja mentén épülő természetes gát az időszakos magas vízállás következménye. A medréből kilépő víz sebessége ugyanis csökken, s emiatt hordalékának nagyobb részét közvetlenül a part mentén rakja le. A leülepedett iszapot a növényzet megköti, így a partok fokozatosan a mögöttük lévő ártér fölé magasodnak.

A folyó tehát a maga alkotta gátak között kanyarog, amelyek ugyan nem képesek megakadályozni, hogy medréből kilépve a gátak mögötti árteret elöntse, azt azonban igen, hogy onnan apadáskor az ár és a lehulló csapadék visszautat találjon a folyóba, ezért annak jelentős része ottreked. Az ártéren rekedő víz állandó tavakat, mocsarakat képez.




12. ábra. *Az ártér formái*

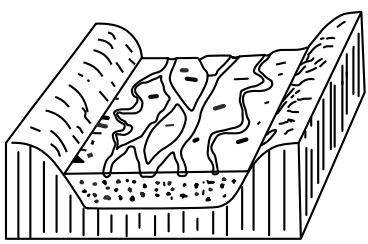
Ez azonban csak látszólag káros folyamat. A folyók menti árterek, ártéri erdők, holtágak és egyéb, mai szóval nedves területek a mérsékelt égöv legtermékenyebb, legváltozatosabb élőhelyei. Létrehozásukban és fenntartásukban a folyók víz- és áramlásviszonyai döntő jelentőségűek, és maguk is fontosak a folyók élővilágának és vízminőségének fenntartásában. Az érintetlen folyó megoldja a víz visszajuttatásának problémáját is. A folyóba kerülő szerves anyagokat az ott élő mikroorganizmusok elbontják és felhasználják, így a víz tiszta marad. Ez a folyamat a *biológiai öntisztulás*, amelynek különösen az ártereken van nagy szerepe, ahol a növényzet is aktívan részt vesz a lebomlott szerves anyag eltávolításában (Molnár 1991a, Borsy 1993, Simon 1999, Hamar 2000, Molnár 2002a).

*Alsó szakasz*

Az alföldre kiérve a folyó alsószakasz-jellegűvé válik. A kis lejtésű területeken munkaképessége már kisebb, mint amennyi hordaléka elszállításához szükséges. Esése itt kilométerenként már csak néhány centiméterre csökken, és a talaj, altalaj szerkezete is megváltozik. Sokszor azon a talajon fut, amit ő maga töltött fel évmilliók alatt. A lerakott hordalékból zátonyokat és szigeteket épít a medrében. Ugyanakkor nagy tömegű vizet szállít, amelynek kell a hely. Ezért ágakra oszlik, hogy a nagyobb keresztmetszet pótolhassa a csökkenő sebességet.

Előbb a görgetett, majd a lebegtetett hordalékot kezdi lerakni, és helyette újat nem vagy csak alig vesz fel. Ezért ágya lassan emelkedni kezd, saját magát tölti fel. Minél több hordalékot rakott le, annál nehezebben talál utat magának, emiatt jobban eloszlik. A vándorló és növekedő zátonyok szétágazásra, a régi meder elhagyására kényszerítik a folyót. Ez különösen nagyvizek idején jelentős, amikor a fokozott csapadékképződés, a hóolvadás miatt a vízgyűjtő területről szállított víz mennyisége megnő. Kialakul az ártér, az időszakosan vízzel borított területek összefüggő rendszere. A Duna Budapestnél lerakott hordalékával építette fel többek között a Margit-szigetet. Folyamatos lerakódás esetén hosszabb idő alatt óriási feltöltött síkságok alakulhatnak ki, ilyen az egész Alföld, de az Amazonas medencéje is.

Egy bizonyos szakaszjelleg nem minden pillanatban jellemző egy adott vízfolyásra, és a terepviszonyoktól függően a folyó térben és időben többször is megváltoztathatja szakaszjellegét. A folyóteraszok a folyó életében többször bekövetkező, tartós szakaszjelleg-változás miatt alakulhatnak ki. Képződésükben a felső- és középszakasz-jelleg cserélődése a döntő. Az ilyen tartós szakaszjelleg-változást okozhatja az éghajlat csapadékosabbá vagy szárazabbá válása, vagy a felszín lejtésviszonyainak módosulása. Felsőszakasz-jellegnél a völgy mélyítése, míg középszakasznál annak tágítása a jellemző folyamat. A bevágó és szélesítő tevékenység váltakozása hosszú távon lépcsős formát eredményez általában a folyó mindkét oldalán. Ezek a lapos lépcsők a *folyóteraszok* (Simon 1999). A Kárpát-medencében a feltöltődés alakulásától függően a folyók a földtörténeti korok során többször is változtatták szakaszjellegüket (Bulla és Mendöl 1999).



13. ábra. *A folyó az alsó szakaszán hajfonatszerűen elágazik*

## 2.4.5. A folyó élete

Bár első látásra furcsának tűnik, de a folyók olyan dinamikus természeti rendszerek, amelyek az élet nagyon sok jellemzőjével rendelkeznek. Ezért joggal nevezhetők élő rendszereknek az élő, fejlődő rendszerekről az első kötetben elmondottak minden jellemzőjével együtt. Ez a tény már régóta ismert, de a vízépítéssel hivatalból foglalkozók szemléletébe csak a közelmúltban kezdett némileg teret hódítani (Láng 2002).

### 2.4.5.1. *A folyó mint természetes ökológiai rendszer*

Az első kötetben tárgyaltam a rendszerelmélettel segített ökológia megállapításait az élő rendszerek sajátosságairól, melynek során megemlítettem, hogy a verseny csak részleges és elsődlegesen az egyedekre korlátozódó stratégiája az evolúciónak, populációs és különösen ökoszisztéma szinten az együttélés a meghatározó tényező (I. kötet 166. és 173. oldal). Ehhez most hozzáteszem, hogy a környezethez való alkalmazkodás is csak egyedi és faji szinten értelmezhető, egy komplex ökológiai rendszer nem alkalmazkodik, hanem kölcsönhatásban van a természeti környezet élő és élettelen elemeivel, kölcsönösen alakítván egymást.

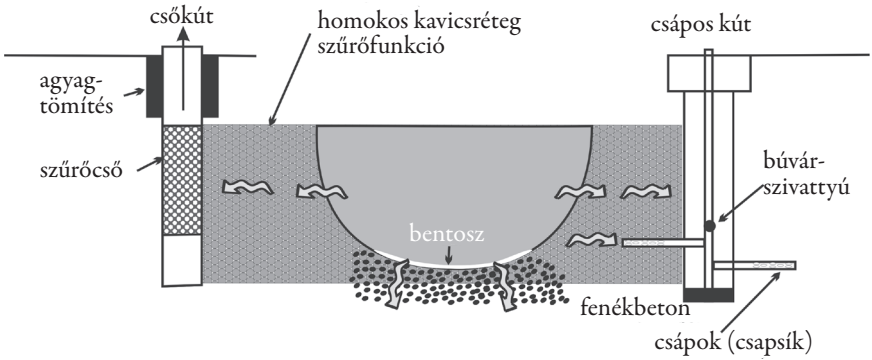
A természetes élő rendszerek építőelemei és alrendszerei között kialakuló kölcsönhatások összessége arra törekszik, hogy a rendszert az adott rendszerre jellemző peremfeltételek között tartsa, tehát lehetőség szerint állandósítsa a környezeti hatásokat. Ez egyúttal azt is jelenti, hogy az élő elemekre vonatkozó szelekciót nem az alkalmazkodási kényszer és a verseny, hanem az együttműködés, az egészhez való hozzájárulás mértéke szabja meg, és azok a fajok, populációk maradnak meg, amelyek képesek az optimális „üzemállapot" fenntartásához hozzájárulni. Az ilyen rendszereknek nagy a pufferkapacitása, tehát képesek a természeti tényezőkben bekövetkező fluktuációkat negatív visszacsatolással kompenzálni. Legalábbis addig, amíg az alrendszerek épek, és együttműködésük hiánytalan, hiszen ez a rugalmasság záloga.

Szintén az első kötetben beszéltem arról is, hogy a fejlődő, élő rendszerek szükségképpen egymásba fészkelt hierarchiával és kibernetikus szabályozással rendelkeznek. Ilyen *egymásba ágyazódó alrendszerek*et egy folyón mint rendszeren is el lehet különíteni. Középszakasz-jellegű folyón egy ilyen rendszer elemei a folyó kisvízi medre, a mellékágak, erek, lecsapoló medrek, fokok, holtágak és időszakosan víz alá kerülő laposok, amelyek az elemek összességénél többet jelentenek, és csak együttesen értelmezhetők. Amikor azt állítom, hogy a folyó élő rendszer, nem csupán egy jól hangzó kifejezést értek rajta. Egy középszakasz-jellegű folyó természetes árterével együtt igyekszik kihasználni azokat a viszonylag szűk fizikai kereteket, amelyek az ártéri mederváltozásokat és a vízjárás változásait meghatározzák, ám mindezt csak úgy tudja megtenni, ha természetes dinamizmusát, életműködéseit nem korlátozzák (Molnár 2002a, 2009).

Mik ezek a mechanizmusok? A rendszer működésének alapja *a kisvízi meder és az ártér közötti állandó, kétirányú kapcsolat*. Az ártér nem valamilyen eseti passzív befogadó, amely kénytelen eltűrni, hogy magas vízállás esetén elöntse a víz, hanem folyamatos kontaktusban áll a folyóval, sőt a felszín alatti vizekkel, a talajvíz legfelső rétegével is, és az itt kialakult élővilág elemei, akárcsak a folyóban élő szervezetek, „nem pusztán alkalmazkodtak valamiféle kívülről rájuk kényszerített, külső természeti viszonyokhoz, hanem a rendszer többi alkotórészével együtt tevőlegesen járulnak hozzá azok kialakulásához. Egészséges rendszerműködés esetén az élő rendszerek olyan dinamikus egyensúlyt alakítanak ki, amely lehetővé teszi, hogy hosszú távon azonosak maradjanak önmagukkal, illetve amelyben a változások mértéke és üteme nem haladja meg a rendszer alkalmazkodó képességének mértékét" (Molnár 2002a, 2009). Magyarán, ahol a peremfeltételeken belül a rendszer egésze tud rugalmasan alkalmazkodni.

Miben nyilvánul meg ez a kétirányú kapcsolat? A szakaszjelleg leírásánál volt szó a meanderezés jelenségéről, amely a sodorvonal aszimmetriájának köszönhetően egyfajta vízszintes irányú bolygást tesz lehetővé a folyó számára a folyóvölgy adta fizikai korlátokon belül. Tekintve, hogy a legtöbb folyó feltöltött síkságon folyik, természetes körülmények között ez igen tág teret enged mozgásuknak. A geológusok ezt a tényt mindig is tudták, de történeti források arra engednek következtetni, hogy a folyóvölgy változásai még a történeti időkben is igen nagy távolságokra engedték elkóborolni akár a legnagyobb vizeket is. Az állandó változások közepette a kanyarokból, lefűződő holtágakból, kiemelkedő övzátonyokból, a mögöttük kialakuló laposokból és ártéri öblözetekből álló, szigetekkel és folyóhátakkal tarkított ártér nemcsak igen változatos, differenciált felszíni forma (annak ellenére, hogy a felületes szemlélő számára lapos síkságnak tűnik), de egyúttal azt is mondhatjuk, hogy *egy ilyen ártér víztározó képessége a lehető legnagyobb*. Hogy ennek mi a jelentősége? A csapadékadatok alapján nyilvánvaló, hogy a mérsékelt övi, folyóvölgyi síkságok (például a Kárpát-medence alföldjei) *negatív vízmérleggel* rendelkeznek, természetes körülmények között is vízhiányos területek. A százéves csapadékmérési adatok szerint a Kárpát-medence saját csapadéka csak az évek mintegy 17%-ában elegendő a mezőgazdasági műveléshez, a többi év rendszerint száraz vagy túl nedves.

A vízhiány ellenére a folyószabályozások előtt mégsem volt jellemző a szárazság sehol. Ennek az az oka, hogy a folyók szállították le vízgyűjtőjükről az ott feleslegben lehullott csapadékot, és azt a síkságon szétterítették. Ebben játszott komoly szerepet az említett dinamika. Összességében azt mondhatjuk, hogy csökkenő vagy kis vízjárás mellett a folyó inkább mélyíti és szinten tartja a medrét, míg nagy vízjárás esetén (árvizek) tölti a medrét, építi partjait, fejleszti kanyarulatait, azaz differenciálja a rendelkezésre álló teret. Változik és mégis ugyanaz.




14. ábra. *A folyó kapcsolata a felszín alatti vizekkel és a rájuk épített, parti szűrésű kutakkal*

A folyók legtöbbször *összeköttetésben állnak* az alattuk húzódó *talajvízrétegekkel*. Olyan helyen, ahol kavics- vagy homokágyon futnak, vizük egy része az alattuk fekvő talajvízrétegbe szűrődik át, és annak utánpótlását adja. Ez a szűrés tisztítást is jelent, mert a finom homokszemcsék és a kavics közein a szennyeződések nagy része fennakad. Ezenkívül a folyó medrét egy vékony, élő bevonat, a fenékbevonat *(bentosz)* képezi, amely felfogja és magába építi a víz szennyezőanyagait, így azok nem jutnak be a kavicsrétegbe. A bentosz a felszíni vizekben a víz és a szilárd fázis (a mederfenék) határán élő élőlények összessége. Apró élőlényekből, rákokból és férgekből, másrészt nagyobb méretű puhatestűekből, rovarlárvákból, egyebekből tevődik össze, amelyek együttesen hatalmas biológiai potenciált képviselnek, és szerepet játszanak a víz fenekére süllyedő szerves anyagok, törmelékek elbontásában, ezáltal lehetővé téve a mederfenék eltömődésének elkerülését. Az eltömődés, a *kolmatáció* elkerülése azért fontos, mert így fennmaradhat a folyó alatti talajvízkészlettel a kapcsolat, tovább működik a szűrő (Láng 2002). Ha a folyó partján a kavicsba kutat fúrunk, akkor a résekből a víz a kútba fog szivárogni. Ezek a parti szűrésű kutak. A gyakorlatban nemcsak egy, de több csövet is mélyítenek a kavicsrétegbe, ezeket sugárirányban vízszintesen is tovább tolják, falukat pedig perforálják, hogy minél több víz jusson az üregükbe, ahonnan nagy teljesítményű szivattyúkkal a felszínre hozzák. Az ilyen berendezéseket nevezik csápos kútnak. Budapest vízellátásának jelentős részét ezek adják: Pesten a Megyeri csárdánál, a Szentendrei-szigeten és a Csepel-szigeten a Fővárosi Vízművek számos ilyen létesítménnyel rendelkezik.

A kutatások szerint nemcsak a mederfenék, de még az alatta elterülő rétegek is tele vannak élettel. Amerikai kutatók vizsgálatai szerint egy átlagosan 50 méter széles folyó árterében fúrt 10 méter mély talajvízkutakkal magasabb rendű életet lehetett kimutatni még a folyótól 2 km-re is. A talált élőlények között egy álkérész faj volt a legáltalánosabb, de ezenkívül férgek, rákok, baktériumok, algák

és más rovarlárvák is élnek ebben a zónában (Stanford és Ward 1988). Ezek a felszín alatti ökoszisztémák igen jelentősek a folyó egészségének megőrzésében. Segítenek a szárazság okozta stressz kivédésében, az árvizek utáni ökológiai egyensúly helyreállításában, de az itt található mikrobák tevékenysége következtében a folyót érő szennyezések lebontásában is, például szénhidrogének (kőolaj) eltüntetésében (Grimm et al. 1989, Booth 1989).

A talajvíztestek egymással is összeköttetésben vannak, hatalmas és összefüggő föld alatti vízrendszert hoznak létre. A közlekedőedények elve alapján az egyik helyen történő változás előbb-utóbb megjelenik a másik helyen is. A Szigetköz alatt húzódó, 5 és 300 m közötti vastagságú kavicsréteg vize például közvetlenül érintkezik a Csallóköz, a Hanság, sőt a Fertő víztömegével és az egész Kisalföld talajvízkészletével is. A Duna a Szigetköz és a Csallóköz táján alsószakaszjellegű folyó, ahol a folyóvíz talajvízbe szivárgása igen nagy. A történelmi időkben a Kis- és Nagyalföld felületének 25-30%-a számított állandóan vagy időszakosan vízjárta területnek.

A vízháztartás egyensúlya azonban az ártér szerkezetén és hidrogeológiai viszonyain túl a vízgyűjtőt borító növényzet jellegétől és mértékétől is függ. Az árteret a növényzet a víz dinamikájának megfelelően lepi be. A lassan feltöltődő tavakat előbb a sulyom, majd a nád borítja el, a vízjárta réteken gyékény, sás és fűfélék teremnek. Az ármentes magaslatokon nőnek az erdők. Csak kevés fafaj van, amely jól tűri a vízzel borítottságot (tehát ha gyökereit víz lepi el). A Duna–Tisza ártéri erdei fűz- és nyár-, valamint kőris- és tölgyligetekből álltak, a magasabb helyeken az erdős sztyepp tölgyerdei nőttek (Bulla és Mendöl 1999).

Az eléggé közismert, hogy a folyók felső vízgyűjtőiben a csapadékfölösleggel rendelkező vidékeken növő erdő szivacshatása mennyire fontos az egyenletes vízjárás kialakításában, az alsóbb folyás növényzetének szerepe viszont már kevésbé tudott. Az erdők számára az aszály és az árvíz egyaránt végzetes, mert kiszáradnak vagy berohadnak. A magas pontokon nőtt erdők területére nemcsak víz, de az általa szállított és lerakott hordalék sem jutott el, ezért környékükön az alacsonyabb fekvésű részek feltöltődtek. Mikor elérték az erdők szintjét, a víz oda is befolyt, így az erdők elpusztultak. A feltöltődés viszont folytatódott, egyes alakulatok idővel ismét szárazra kerültek, és elvileg ismét beerdősülhettek.

Az ártéri szukcesszió vizsgálatával megfigyelhető, hogyan teljesül az a feltétel, amely szerint a biológiai közösség aktív szerepet játszik a folyó életében (Opperman et al. 2017). Láttuk, hogy a vízhiányt a folyó magas vízállása pótolja a síkságon, amikor medréből kilépve nagy területeket önt el. Ennek elvileg hatalmas párolgási veszteséget kellene okoznia, különösen, ha nyári árvízről van szó. Ehelyett azonban az tapasztalható, hogy az állandó vízborítottságú területekről indulva olyan növényzet lepi el az árteret, amelynek minden eleme vízcsapdaként működik. A kiszáradó medreket védi a tavikáka, harmatkása, szittyók, gyékény és nád. Aztán megjelennek a nedvességkedvelő fűfélék, cserjék és puha-

fák. A folyamat végeredményeként a nagy mennyiségű víz visszatartására képes talajon puhafa- és keményfaligetekből, valamint a közöttük meghúzódó füves és mocsaras rétekből álló növényborítás alakul ki, melyben valamennyi lépcső egyszerre megtalálható a nyílt vízfelülettől a zárt klimax erdőig (Molnár 2002a, 2009).

### 2.4.5.2. *Az örök körforgás – kicsiben*

Láttuk, hogy a víz a földgolyó egészére kiható körforgásban áll. Vannak azonban kisebb, helyi ciklusok is, amelyek egy-egy jól körülhatárolható tájegységre jellemzők. Ilyen kis vízköre van a Kárpát-medencének is. Egy elmélet szerint a Kárpátok éghajlata és vízviszonyai hajdan szoros kapcsolatban álltak egymással és a növényzettel. Mind a vízgyűjtők, mind az alföldek nagyobb részét erdő borította. A fák élénk vízháztartásukkal jelentősen hozzájárultak ahhoz, hogy a vidéken belső ciklus alakulhatott ki.

Hogy milyen lehetett a táj az ember 8000 éve történt megjelenése előtt, nem igazán tudjuk. Az biztos, hogy az egymást követő régészeti korokban megtelepedő emberi közösségek, a változó klíma és a növényzet dinamikusan fejlődő és egymással is kölcsönhatásban álló rendszert alkottak. A vidék növényzete a tájhasználat módjától és erősségétől függően mindig is változott, néha – az emberi tájhasználat szüneteiben – tágabb teret engedve a természet számára (Jakab és Csengeri 2020).

A hegyek közötti szakasz szivacshatása miatt a folyók vízellátása sokkal egyenletesebb lett, nem áradtak olyan hirtelen, mint ma egy-egy esőzés alkalmával. A fák a talajt is megkötötték, ezért nem mosta le azt a csapadék, nem került hordalék formájában a folyókba.

Lent az alföldeken ezzel szemben a fák hatalmas párologtató felületként működtek, és mind a talajvizet, mind az árterek felszíni vizeit megkötötték, és páraként ismét a levegőbe juttatták. Itt ismét érvényesült a felhőképződés, lecsapódás, és a víz egy része még az alföldön, más része a Kárpátok felé sodródva a hegyekben jutott vissza ismét a földre. Így tehát mind a folyók, mind a talajba szivárgott víz zárt körben jutott vissza (legalábbis részben) ugyanoda, ahonnan jött (Kravcik et al. 2008).

### 2.4.5.3. *A folyóvölgy vízháztartása*

Elméletben egy adott vízgyűjtő *vízháztartás*át fizikailag lényegében három tényező határozza meg: a lehulló *csapadék* mennyisége, a *lefolyás* és a *párolgás*. Az elsőből kell kivonni a második kettőt, és akkor kiderül, pozitív vagy negatív lesz-e a vízmérleg. Az elvileg egyszerű képlet azonban semmit sem mond a vízgyűjtőn belül történő mozgásokról, nem érzékelteti a csapadék megoszlásának térbeli és időbeli egyenetlenségeit, amelyek pedig létfontosságúak egy élő rendszer számára. A szárazföldi élőlények sem túl sok, sem túl kevés vízellátottság esetén nem képesek létezni, ezért a vízgyűjtő vízviszonyainak a csapadékmegosz-

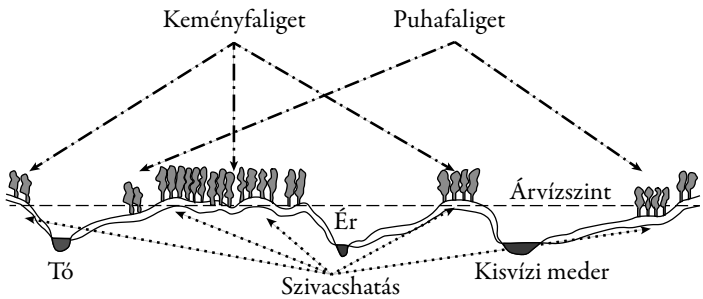
lás egyenetlenségeit kiküszöbölő kiegyenlítése olyan dinamikus folyamat, amelyet a folyó mint élő rendszer végez egyik alrendszere igényeinek kielégítésére.

A feladat a csapadékosabb területekről (hegyvidék) érkező vizek lehető legegyenletesebb szétterítése a csapadékhiányos (síkság) területeken, másrészt az itt keletkező felesleg – ha van – összegyűjtése és elvezetése. A feladatot összetett, de érzékeny vízrendszer végzi, amelynek élettelen elemei a folyóvölgy geomorfológiai jegyei, élő elemei pedig elsődlegesen a növényi társulások tagjai. A folyóvölgy legszembetűnőbb képződménye maga a folyó, pontosabban annak *főága*. Középszakaszjellegnél ez még egyértelmű – a meanderező ágról van szó –, az alsó szakasznál azonban nem biztos, hogy minden esetben egyértelműen meg tudjuk mondani, emberi beavatkozás nélkül hol folyik a folyó főága, annyi részre szakad szét, hogy nincs kitüntetett ág. Ám középszakaszon is előfordulnak *mellékágak*, amelyek rendszerint a síkságra kilépéskor, a hordalékkúpon szakadnak le a főágról, és nem is biztos, hogy oda térnek vissza, átágazhatnak egy másik folyóra is. Ezzel szemben az *erek* nagyjából párhuzamosan vezetnek a főággal, és ugyanolyan szerepet töltenek be, mint modern vízügyi beruházásoknál a szivárogtató csatornák vagy belvízcsatornák (lásd ott): a vízfelesleget szedik össze.

A *fokok* olyan nyílások, átjárók, amelyek a folyópart természetes alakulatának alacsonyabb részein képződnek azáltal, hogy „a víz (azokon keresztül) már akkor megindul az ártér belseje felé, amikor a magasabb partok mentén még [...] stagnál" (Szigyártó 1991). Általában közvetlenül kapcsolódtak az egyes tavakhoz és laposokhoz, és a folyók árvize vagy közvetlenül, vagy az ereken, nagyobb fokokon keresztül jutott ki az ártérre és az ott elhelyezkedő, a rendszer lényeges elemeit adó, időszakosan vízzel borított laposokra, illetve az állandó vizű tavakba. Az irodalom megoszlik a tekintetben, hogy ez a feltöltés hogyan játszódott le, mindig a felsőbb részek felől (Szigyártó 1991), vagy a folyóvölgy mélyebb pontján nyílt – kimosott – átvágásokon keresztül, ahonnan mint egy visszafelé folyó mosdókagylóba, alulról folyt be a víz, a mellette megnőtt vízszintű, de a magaspartok – övzátonyok – által kordában tartott folyók hidrosztatikai nyomását kihasználva (Molnár 1992). Megkülönböztethetünk még olyan állandó vizű képződményeket is, amelyek az élő folyóágakról a meanderezés és kanyarátvágás következtében lefűződött folyómederből alakultak ki, és holtágnak vagy morotvatónak nevezzük őket. Természetes körülmények között a holtágak is részt vesznek a víz tárolásában, bár egy idő után a beinduló szukcessziós folyamatok következtében rendszerint feltöltődnek. Mire azonban ez megtörténik, másutt más holtágak alakulnak ki, ezért az egész mozgás dinamikus egyensúlyban van.

Az egész rendszer tehát úgy működik, hogy ha a főágban sok víz érkezik, az a folyóhátakon és a fokokon át kiáramlik, és a tárolóelemek révén hosszabb ideig ott is marad, a laposokon pedig el is terül, tehát nagy területeket jár meg. Apadáskor a helyzet megfordul, és amit az említett elemek és a növényzet a magas vízállás idején nem használt fel, az most gravitációs úton visszafolyik az erek és

a fokok nyílt alsó felén keresztül a főágba, amely mintegy „megszívja" a területet, és lecsapolja róla a felesleget. Hozzá kell tennünk, hogy a rendszer csak érintetlenül működik teljes egészében így, vagyis akkor, amikor a felső vízgyűjtőn a hegyekben a még ép fás növényzet szivacshatása elaprózza az árt, tehát lassabban levonuló és kevésbé magas vízállású árvizek érkeznek. Ilyenkor az ártér növényzetének több ideje van vízzel feltöltődni. Az erdők érintetlensége létfontosságú a síkságon is, mert a víztározást ezek avarja, szivacsos talaja és a fák evapotranszspirációs kapacitása teszi lehetővé, sőt maguk a növények is vízzel telítődnek (Molnár 2002a, 2009). Nem árt különbséget tennünk áradás és árvíz között (bár az angol szakirodalomban ezt csak körülírással lehet megvalósítani). Ugyanakkor tény, hogy egy alföldi jellegű folyószakaszon az ártereket természetes állapotban is a víz időszakos kiáramlása jellemzi, amely jellegénél fogva időleges és előre nem mindig látható (Moss és Monstadt 2008). Az áradás tehát a folyóvizek természetes működésének egyik formája, míg az árvíz ember alkotta fogalom, és arra utal, ha a medréből kilépő folyó nem arra megy, amerre mi szeretnénk, ezért gondokat okoz az emberi társadalom számára (Koncsos 2011). Azon kellene tehát elgondolkodni, hogyan tudnánk ezt a természetes mechanizmust a magunk hasznára alkalmazni ahelyett, hogy mindenáron „védekezni" akarnánk ellene.




15. ábra. *A folyóvölgy vízháztartása*

# 3. EMBER ÉS VÍZ

## 3.1. EMBERI HATÁSOK

### 3.1.1. Már az eső sem a régi

A szárazföldi vízkör utánpótlását a csapadék biztosítja. Vagyis biztosította eddig. Egyre több a jele azonban annak, hogy itt is sikerült beleavatkozni a mechanizmusba: már az eső sem a régi. Gyűlnek a bizonyítékok, hogy a vízháztartás komoly zavaraira számíthatunk, mégpedig összetett okok következtében. A megfigyelések szerint az északi félteke mérsékelt égövi területein több lesz a hó és eső, a szubtrópusokon és a trópusi területeken szárazabb lesz az időjárás, míg a déli féltekén éppen ellenkezőleg, nedvesebb éghajlat várható a trópusokon és a szubtrópusi övezetekben (Zhang et al. 2007). Természetesen a helyi változások ezt alkalmasint felülírhatják, hiszen világátlag helyett szélességi övenként végezték a megfigyeléseket. A kiváltó okok között a fenti tanulmány szerzői az üvegházhatású gázokat és a szulfátos aeroszolokat említik.

Az éghajlatváltozás következményeivel foglalkozó bizottság, vagyis az IPCC 2001-es második jelentésében szintén a vízháztartás felborulását helyezte előtérbe, mint legvalószínűbb eseményt. Másrészt az emberi tevékenységek egy sor olyan következménnyel járnak, amelyek közvetlenül is érintik a párolgás-kicsapódás által hajtott kört (IPCC 2001). A hatodik értékelési ciklus 2018-ban nyilvánosságra hozott eredményei alapján a testület javaslata a döntéshozók felé, hogy 1,5 °C-ban maximálják az éghajlatváltozás hatását, mert ehhez az alkalmazkodás könnyebb. Bár a komplex folyamatot egyetlen paraméterre redukálni eléggé felelőtlen gondolkodásra vall, még ebben a forgatókönyvben is komoly következményekkel kell számolni bizonyos régiók esetében. A Szahara alatti Afrikát és a mediterrán vidékeket, Észak-Amerikát és Ausztráliát például továbbra is komoly aszály és szárazság, egyes nagy folyók vízjárását pedig szél-

sőséges változások fenyegetik (Hoegh-Guldberg et al. 2018). Ugyanakkor nem elhanyagolható megállapítás az sem, hogy a földtörténet korábbi időszakaiban kialakult melegebb éghajlati epizódok egyike sem járt a légköri szén-dioxid-szint maihoz hasonló emelkedésével (Fischer et al. 2018).

Ebből azonban nem az következik, hogy akkor nem emberi eredetű a most megfigyelt melegedés, hanem éppen ellenkezőleg, valószínűleg az emberi tevékenységek sokrétű, összetett hatása az, ami kiváltja a földtörténeti értelemben hihetetlenül gyors változásokat. Egyúttal figyelmeztető jel, hogy nem jó egyedül üdvözítő megoldásokat kínálni, mint ahogy a szén-dioxid-kibocsátás redukálásával teszik. A vízháztartás változásainak vizsgálata valószínűleg legalább annyira fontos lenne. Annál is inkább, mert az éghajlat és a felszíni vizek viselkedése kölcsönösen visszahatnak egymásra. A patakok és folyók is ökológiai rendszerek, szén-dioxid-egyensúllyal rendelkeznek, ami általában negatív, tehát több szén-dioxidot nyelnek el a vízben élő organizmusok fotoszintézise révén, mint amennyit kibocsátanak. Csakhogy meleg teleken – amelyek az éghajlatváltozás okán egyre gyakrabban fordulnak elő – ez az arány megfordul, és a patakok nettó szén-dioxid-kibocsátók lesznek. Ez remek példa nemcsak a dolog komplexitására, hanem a pozitív visszacsatolásra is (Ulseth et al. 2018). A kölcsönös hatásokra egy lehetséges másik mechanizmust az alábbiakban ismertetek.

Az INDOEX (Indian Ocean Experiment) elnevezésű program során vették először észre, hogy a levegőben szálló apró, szilárd és folyékony szennyező részecskék komoly hatást gyakorolhatnak a párolgási viszonyokra. A mikrométeres vagy annál kisebb mérettartományba tartozó anyag szulfátok, nitrátok, szerves anyagok, korom és ásványi por (például homokszemek) keveréke, amely a fosszilis tüzelőanyagok elégetése (közlekedési eszközök, ipari létesítmények és erőművek révén), erdőtüzek és egyéb biomassza égése (faág-, tehéntrágya- és szalmaüzemű, rossz hatásfokú háztartási tűzhelyek) során kerül a levegőbe. Korábban az aeroszolokat mint a globális éghajlatváltozásban esetleg negatív visszacsatolást okozó szereplőket vették csak figyelembe, hiszen közvetlen hatásuk az, hogy hűtik a bolygó felszínét, nem engedve át a napsugárzás egy részét.

Ám az INDOEX-kísérletben azt találták, hogy miután ezáltal az óceánok felszínét is kevesebb napsugárzás éri, csökken a párolgás mértéke és ezzel együtt a levegőbe kerülő vízpára mennyisége, ami a szárazföldi csapadék alapját adja. Ráadásul az aeroszolrészecskék fizikai tulajdonságaiknál fogva a felhők belsejében megakadályozzák, hogy a kondenzációs magokra kicsapódott vízpára nagyobb cseppekbe egyesüljön, amelyek már elég súlyosak ahhoz, hogy visszahulljanak a földre. Ezzel a hatással tehát egy másik ponton is gyengítik a vízkörzés rendszerét. Ez a megfigyelés annak fényében, hogy a szárazföldi vízfelhasználás az ENSZ Népesedési Alapjának jelentése szerint az utóbbi 70 évben hatszorosára növekedett, elég aggasztónak tűnik (Lazaroff 2001c).

Egy évvel később a megkezdett vizsgálatok folytatásánál azt találták, hogy a 10 millió km$^2$-es kiterjedésű sötét folt, amely beborít földet és eget (ez több mint százszorosa Magyarország területének!) várhatóan felborítja a monszun téli mintázatát is. A hatás abból ered, hogy míg a felszínen valóban hűtő hatása van a levegőben utazó szennyezésnek, addig a légkör alsó rétegeit melegíti, és így megzavarja a kialakult évezredes folyamatokat, amelyeken egész Ázsia vízgazdálkodása, mezőgazdasága, erdeinek egészsége és számos egyéb létfenntartó folyamat alapozódik. A kutatók figyelmeztettek, hogy a megfigyelések szerint nemcsak az indiai szubkontinensre és Hátsó-Indiára, de Kínára is kiterjednek a hatások (Töpfer 2002). Azóta bebizonyosodott, hogy így is van, és elsődlegesen valóban a légkörbe került aeroszolok okozzák a helyi melegedést (Zhisheng et al. 2015).

A változások egy olyan kontinens méretű ország esetében, mint az Egyesült Államok, tendenciájukban akár ellenkező előjelűek is lehetnek. Nem arról van ugyanis szó, hogy több vagy kevesebb eső esik-e, hanem a felszíni és felszín alatti vizek utánpótlását eddig bizonyos rendszer szerint szállító időjárási mintázatok bomlanak fel.

Az eddigi események alapján úgy tűnik, az USA-nak mindenre fel kell készülnie: északnyugaton özönvízszerű esőzésekkel és hurrikánok kártételeivel kell számolni, míg nyugaton a már eddig is arid klíma válik még elviselhetetlenebbé. Ha viszont egyszer megérkezik az eső, mint három év szárazság után Kaliforniába, árvizet, földcsuszamlást, áramkimaradást és üvöltő szeleket hoz magával (AmeriScan December 13, 2014). A Közép-Nyugatot és a déli államokat tekintve, míg 2012-ben a Nagy Síkságot az 1930-as évek hírhedt porteknőjénél (Dust Bowl) is nagyobb mértékű szárazság sújtotta, egy évre rá ugyanezeken a területeken villámárvizeket okozó, hatalmas esőzések okoztak károkat (Guynup 2013). Ezekre a kihívásokra állítólag megtalálták a megoldást, amit zöld infrastruktúrának neveztek el, és nem áll másból, mint az esővíz tárolására alkalmas kertekből és vízáteresztő útburkolatokból. Nem túl életszerű feltételezés, hogy milliós városoknak ez komoly alternatívát jelentene.

Európa egyes részeit 2002 augusztusában öntötte el a víz. Nemcsak a monszun mintázata borult fel tehát, hanem a mérsékelt övezet csapadékjárása is. A kontinensre mintegy tíz nap alatt akkora mennyiségű víz zúdult, hogy a mérések megkezdése óta a legnagyobb árszintet produkálta több nagy folyón, így az Elbán is. Németország keleti részén és Csehországban voltak a legsúlyosabbak a károk, ez utóbbi országban többen estek áldozatul a víz erejének. A legtöbb emberéletet a Fekete-tengeren kialakult több mint 2 méter magas szökőár követelte, amely egy part menti kempingre zúdult, és maga alá temette az ott alvókat. Mint az ilyenkor lenni szokott, a politikusok megnyilatkozásaiban nem volt hiány, katasztrófa sújtotta területnek nyilvánítottak Prága óvárosától kezdve az Elba menti területekig nagyon sok helyet (ENS August 14, 2002). A biztosító-

társaságok is serényen értékelték a károkat, és szakértőket kérdeztek meg, akik azt nyilatkozták, hogy a jelenség az éghajlatváltozás számlájára is írható, annak ellenére, hogy maguk azok az időjárási körülmények, amelyek előidézték, nem tekinthetők annyira szélsőségesnek (Maggs 2002). De hogy miért kellett Európának ennyit szenvednie a technika korában, és hogy a kialakult helyzetnek mik a mélyebb okai, arról nem nagyon szóltak a híradások.

2021 nyarán a katasztrófa megismétlődött. Az elsősorban Észak-Rajna-Vesztfáliában és Rajna-Pfalzban pusztító áradások következtében – melyek később átterjedtek Bajorországra és Szászországra is – 188 ember halt meg. Ezúttal már megjelentek a tudományos magyarázatok is, nem mellékesen Angela Merkel, korábbi kancellár hivatkozott rájuk. A lényeg, hogy a légkör folyamatos felmelegedése és a kiugróan magas nyári hőmérsékletek kifejezetten elősegítik a hirtelen lezúduló csapadék kialakulását. A felszálló meleg levegő több nedvességet képes felvenni, magával vinni, majd özönvízszerű hatást kiváltva egyszerre lezúdítani. Ugyancsak ember alkotta ok, hogy miért lesz a hirtelen lezúduló csapadékból rögtön árvíz. A települések beépítettségének folyamatos növekedése miatt ugyanis egyre kevesebb a szabad talajfelület, ahol a víz el tudna szivárogni. Az idilli kisvárosi utcák macskakövei, az impozáns terek díszburkolatai, valamint a növekvő bevásárlóközpontok, ipari parkok, új utak által elfoglalt, s egyben elszigetelt talajfelszínről a túlterhelt csatornákba, a folyóvá duzzadó patakokba áramlik a víz, és egyre gyorsuló sebességgel rombol mindent maga előtt (Weyer 2021) (lásd a 3. színes ábrát).

A nagyvárosokban is sok helyen egyre gyakoribbak a trópusi jellegű zivatarok. Ilyenkor óránként 20 mm-t meghaladó csapadék esik. Ennek oka nem annyira a globális felmelegedés, hanem az épületekből és a közlekedésből származó hő. Napközben meleg, nedves levegő emelkedik fel a városból, amely a magasban lehűlve zivatarfelhők kialakulását eredményezi, melyek a kora esti órákban zivatarokat és felhőszakadásokat okoznak úgy, mint a trópusokon. A jelenséget a hőszigeteffektus okozza, vagyis az, hogy a városból származó hő helyi felmelegedéshez vezet. Tokió városára például 2000 júliusában egy felhőszakadásban egy óra alatt 82,5 mm csapadék zúdult. A japán meteorológusok kiszámították, hogy 1979 és 1995 között 20%-kal nőtt a nyári csapadék, míg az elővárosokban nem változott a mennyisége. Mivel a forró levegőt a szél a fővárosból az ország belseje felé fújja, a szél irányában a fővárossal érintkező más területekhez képest abnormálisan magas hőmérsékleteket mértek. A japán környezetvédelmi hivatal világosabb színű burkolóanyagokkal, több fa ültetésével és tavacskák létesítésével kívánt a jelenség ellen küzdeni (Wolfner 2000).

Ezek a jelenségek nagy valószínűséggel már annak az elsőfajú hibának a megjelenési formái, amelyet az ember a vízháztartásba való beavatkozással előidézett, és amelyre most az egyéb okokból kialakuló időjárás-változások csak ráerősítenek. Látni fogjuk, hogy a folyók vízgyűjtőterületén a növényzet, a talaj és a lefo-

lyási viszonyok ember okozta változásaival a vízkör visszatérő ága is mind dinamikájában, mind mennyiségi tekintetben megváltozott: hiányzik az elsősorban a növényzetnek köszönhető szivacshatás, és a tárolók (mocsarak, meanderező folyó) eltűnése miatt meggyorsul a felszíni vizek lefutása, ami katasztrofális hatással lehet az alvízi helyzetben lévő – a folyón lefelé elhelyezkedő – emberi létesítményekre.

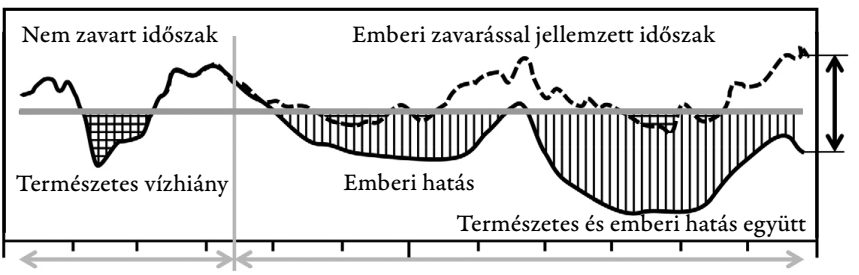
Gyakran felmerülő ellenérv az ilyen adatokkal kapcsolatban, hogy az időjárási katasztrófák elszaporodásának ténye valójában csak látszat, hiszen azelőtt is voltak katasztrófák, csak akkor még nem tudtunk róluk: a modern hírközlés szenzációéhsége okozza, hogy tele van a rádió és a tévé ilyen hírekkel. A helyes válasz ezekre a cinikus, kétkedő megjegyzésekre az, hogy akkor mire vagyunk büszkék. Hát nem azért mozgattunk meg szó szerint minden követ, hogy utódainknak békésebb, boldogabb és biztonságosabb életet nyújtsunk? A II. világháború óta eltelt időben elvégzett temérdek beavatkozás, gátépítés, csatornák, tározók, vízvezetékek, kutak, árvízvédelmi munkák, útépítések és így tovább mire voltak akkor jók, ha ennek ellenére sem tudjuk megakadályozni a víz vagy éppen a víz hiánya okozta katasztrófákat? Hamis az érvelés már csak azért is, mert a napi sajtó hírein túlmenően a statisztikai adatok már igencsak régóta bizonyítják a rendellenességek előfordulási arányának és gyakoriságának növekedését (Retallack és Bunyard 1999). Ma már tudjuk, a globális éghajlatváltozás (és vele a vízkör zavarai) nem a jövő zenéje, hanem itt és most történik (NOAA 2018). Botorság tehát olyan megfontolások mögé bújni, amelyekről az óvatosság elve azt mondatja velünk, hogy nem érnek semmit. Sokkal inkább azt kellene alaposabban megvizsgálni, milyen konkrét oka van például annak, hogy Európa területén az utóbbi száz évben megváltozott az árvizek jellege, gyakorisága és levonulása (Hall et al. 2014). Mindenesetre vannak, akik már felismerték, hogy ezek a katasztrófák nem „természeti" katasztrófák, és létrejöttükért nem a természetet kellene hibáztatni (Forrester 2023).

### 3.1.2. Aszály

Eddig a szokatlan időjárás csapadékosabb oldalát vettük szemügyre. Ám a mintázat szó éppen azt jelenti, hogy akárcsak az időjárásváltozás esetében, itt sem egyirányú és lineáris folyamatról van szó, hanem a megszokott rendtől mindkét irányban történő eltérésről. Tehát míg egyik oldalon nem tudjuk hova tenni a sok vizet, a másik oldalon a katasztrofális csapadékhiány okoz komoly gondokat még a legfejlettebb országokban is. Időben is hihetetlen mértékűek lehetnek a változások, Magyarországon például 2022-ben rekordmértékű szárazság tombolt, rá egy évre, 2023-ban rekordmértékű csapadék érkezett heves zivatarokkal, viharokkal és sok kárt okozva.

Aszály és szárazság azonban sokféle van. Meteorológiai szárazságról akkor beszélünk, ha a csapadék kevés, mezőgazdasági szárazságról, ha a talajnedves-

ség nem elég, hidrológiai aszály akkor keletkezik, ha a felszíni lefolyás és/vagy a talajvíz hiányzik, míg társadalmi-gazdasági aszály az, amikor az emberi igényeket a rendelkezésre álló erőforrások nem képesek kielégíteni (AghaKouchak 2016). Ebben az értelemben különbséget kell tenni a szárazság (aszály) és a vízhiány között. A szárazság említett formáit mind okozhatják természeti körülmények, de amikor vízhiányról beszélünk, az emberi vízfelhasználás anomáliáiról van szó (Van Loon és Van Lanen 2013). A 16. ábrán az látható, hogy milyen elvi lehetőségek vannak egy vízrendszer anomáliáinak kialakulására. A folyamatos fekete vonal a természetes és emberi okok kiváltotta változások együttes következményét mutatja. Ha ebből kivonjuk az ember által elvett mennyiségeket, megkapjuk a szaggatott vonallal jelölt természetes fluktuációt. A szürke vonal azt a küszöböt jelzi, amely alatt a vízrendszert már negatívan érintik a hatások. A rácsozott negatív terület a természetes aszály hatását mutatja, míg a függőleges csíkozású részek az ember által okozott vízhiány példái. A függőleges szürke vonal előtti terület az emberi behatások hiányát vagy elhanyagolható mértékű jelenlétét jelzi, a szürke vonal utáni rész pedig az emberi beavatkozásokkal súlyosbított természetes helyzetet. Látható, hogy a vízrendszer megzavarása a klimatikus variációk kedvezőtlen hatásaként azért természetes állapotban is előfordul.




16. ábra. *A természetes szárazság és a mesterséges vízhiány összefüggései (Van Loon és Van Lanen 2013 után)*

Ugyanakkor kár lenne tagadnunk, hogy az emberi beavatkozások milyen súlyos mértékben rontják tovább a természetes vízrendszerek egyensúlyproblémáit. Hatezer évvel ezelőtt a ma haldokló Csád-tó területén például még dús vegetációval körülvett, pompás ökológiai rendszerrel rendelkező édesvizű tó volt található a mainál ezerszer nagyobb kiterjedésben. Az ősi Csád-tó Afrika legnagyobb tava volt, a mai Kaszpi-tengernél is nagyobb. Azt nem tudjuk, hogy az ősi tó zsugorodásához az elmúlt néhány ezer évben az emberi társadalom kialakulása és a földművelés fejlődése milyen mértékben járultak hozzá, de 1823-as felfedezése óta a kiszáradása egészen biztosan emberi okokra, főként az éghajlatváltozás miatt csökkenő csapadékmennyiségre és az öntözéssel elvett vizek hiányára vezethető vissza.

Egy másik példa az észak-iráni Urmia-tó eltűnése, amelynek 80%-a 2009 és 2015 között ment végbe: az elmúlt 15 évben húsz nagy gátat építettek a tóba torkolló folyókon, hogy a vizüket öntözésre, gazdálkodásra térítsék el. Miután sós tóról van szó, a sótartalma szárazra kerülve sóviharok formájában tette tönkre a környező földeket, és elvándorlásra kényszerítette a lakosságot (Agha-Kouchak 2016). De hasonló a helyzet Kínában is, ahol az ország legnagyobb édesvizű tavát, a Poyang-tavat fenyegeti a kiszáradás réme. Az okok itt is kettősek: egyrészt 2012-ben rekordsúlyosságú aszály sújtotta a térséget, másrészt viszont a Három Szurdok-gát 2006-os üzembe helyezésével a Jangce folyó vize már nem jut be a tóba, aminek a vízszintje csak e miatt az egy beavatkozás miatt 3,5 méterrel csökkent. A kínaiak nem különösebben érzékenyek a környezeti károkra, de ez azért nekik is sok volt, és most – kutyaharapást szőrével – ezúttal a tó védelmére akarnak egy gátat építeni, hogy az majd megvédje a Három Szurdok-gát hatásaitól (ENS 5 January 2012). Ám a gát – nem túl meglepően – további vitákat kavart, hiszen a tó egyedülálló élővilágát veszélyezteti, köztük egy édesvízi delfinfajt *(Neophocaena asiaeorientalis)*, amelynek már csak 1000 egyede létezik (Chen 2018).

Az Amazonas medencéjéről tudjuk, hogy itt (volt) található az egyik legfontosabb helyi vízkörzési rendszer a földön. A beinduló bolygószintű változások ezt az önmagában stabil rendszert is kikezdték, és nem csak a nagymértékű erdőirtás miatt. Az éghajlatváltozás okozta szárazodás elérte a mindennapos esők övét is, és 2010-ben olyan aszály sújtotta a vidéket, ami a Rio Negro, az Amazonas egyik fő folyójának 109 éve megkezdett vízállásmérése óta a legalacsonyabb vízszintet eredményezte a folyóban (Xu et al. 2011). Az Amazonas medencéje éppoly érzékeny az aszályra, mint bármely más vízrendszer. A 2010-es aszály miatt a növényzet műholdas képe is megváltozott, eltűnt a zöld szín az erdő borította térség jelentős részéről. A fotoszintézis szintje az októberben megérkező esőkkel sem állt helyre, ez azt jelenti tehát, hogy egy-egy ilyen esemény fontossága messze túlmutat azon, hogy mennyi ideig nem esik az eső (Nemani et al. 2011).

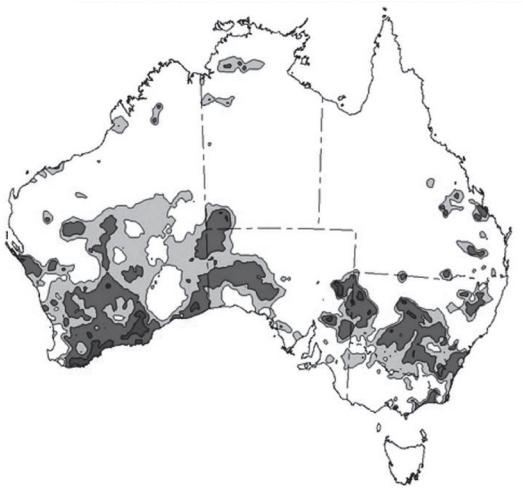
Márpedig ezek a folyamatok a jövőben várhatóan csak rosszabbodni fognak. A 21. század során a világméretű éghajlatváltozás következtében számos régióban, Dél-Európában, Nyugat-Afrikában, Észak- és Közép-Amerika egyes részein a csapadékhiány további növekedése várható. Ezzel párhuzamosan a népesség növekedése, a magasabb életszínvonal iránti igény és a természeti korlátokat figyelembe nem vevő gazdasági folyamatok nyomása miatt a vízbázisok fenntarthatatlan használata és az ebből eredő vízhiány is valószínűsíthető (Seneviratne et al. 2012). A hirtelen leeső csapadékkal ellentétben a szárazság sokkal hosszabban tartó és csak nehezen orvosolható károkat okoz. A felszín alatti vizekről szóló részben foglalkozom a rendelkezésünkre álló víz megújulási lehetőségeivel. A csapadékhiány hosszú távon sérti azokat a mechanizmusokat, amelyek a víz tárolását biztosítják, és ezek helyreállítása nem megy egyik napról a másikra.

Az emberi beavatkozások hibái még annál is sokkal nehezebben orvosolhatók, mint a természeti katasztrófák pusztítása. Egy spanyolországi elemzés szerint a Guadiana-folyó felső vízgyűjtőjében végzett hosszú távú (1980–2000) vizsgálat adatai arra utalnak, hogy a felszín alatti vizek kivétele átlagosan négyszer akkora kárt okozott a vízrendszerben, mint az aszály (Van Loon és Van Lanen 2013). Ezért nem csoda, ha a szakemberek az aszályérzékenység elleni küzdelem helyett szeretnék a vízbázisok kimerítésének elkerülésére helyezni inkább a hangsúlyt, vagyis nem annyira a természetes változékonyság, inkább az antropogén hatások miatt aggódnak (Palmer et al. 2008, Schiermeyer 2008). A World Resources Institute legfrissebb jelentése azonban még mindig messze van attól, hogy feltegye a kérdést: miért is nem lehet egy gyökeresen eltérő, a rendelkezésre álló készletekhez szabott vízpolitikát kialakítani (Kuzma et al. 2023).

Nagy-Britanniában a 13 millió lakossal rendelkező déli és keleti megyékben igen nagy a társadalmi vízigény, amelyet főként felszín alatti vizekből elégítenek ki. A 2004–2006-os időszakban két egymást követő száraz tél elég volt ahhoz, hogy ezek a vízkészletek ne pótlódjanak. Az eredmény a talajvíz soha nem látott mélységbe süllyedése és egyes folyók teljes kiszáradása lett. De még ahol maradt is víz, a kis vízhozam a környezeti szennyeződések hatását nem tudta semlegesíteni. A kisvízben a halak is károsodnak, mert az ilyen víz hamarabb felmelegszik, kevesebb oxigént tud oldatban tartani, és a halak egyszerűen megfulladnak. Az ország egyik büszkesége, a növénygyűjteményként üzemelő Kew Gardens kénytelen volt drasztikus intézkedésekkel csökkenteni a növények öntözésére szolgáló víz mennyiségét (BBC 2014).

Az Amerikai Egyesült Államok nyugati területének nagy részén, beleértve Kaliforniát, Nevadát, Új-Mexikót és a délnyugati államokat, a déli síkság vidékét is, a kétezres évek első 15 évéből 14-ben volt szárazság. Mindenütt vízkorlátozásokat vezettek be, és az 1934-ben épült Hoover-gát mögötti Lake Mead, Észak-Amerika legnagyobb mesterséges víztározója soha nem látott alacsony szinten áll (egyébként 1983 óta nem sikerült a tervezett szintre feltölteni). A Sierra Nevada hótakarója, amely többek között Los Angeles vízellátásának is az alapját képezi, a száraz 2015-ös évben egynegyede volt csupán annak, amit a vízügyi hatóságok „normálisnak" tekintenek (Cook et al. 2015). Ám hogy ez mennyire nem szokványos az egyébként is eléggé sivatagos, száraz éghajlatú területeken, azt egy dendrokronológiai tanulmány mutatta meg a legjobban (Cook et al. 2007). Ebből kiderül, hogy a fák gyűrűinek növekedésére alapozott, 2005 évre visszamenő éghajlati becslések alapján az elmúlt ezer évben nem volt ezeken a területeken ennyire aszályos időszak. Márpedig az ilyen eredmények rendkívül rossz hírt jelentenek a Nagy Síkságon és a délnyugati államokban élők jelenlegi mezőgazdasági és vízgazdálkodási gyakorlatára nézve, amely semmilyen módon nem tartható már fenn sokáig, függetlenül attól, hogy éppen melyik divatos éghajlatváltozási forgatókönyv fog a jövőben ténylegesen megvalósulni (Cook et al. 2015).

A hasonló éghajlati zavarokkal sújtott Indonéziában szintén az aszály az egyik oka a 2001 után az utóbbi években, 2015-ben és 2017-ben is pusztító hatalmas erdőégésnek (Clarke 2017). A szakemberek attól tartanak, hogy az ilyen, az 1990-es évektől szinte elszaporodó katasztrófák lassan megszokottá lesznek. Ausztrália köztudottan a világ legszárazabb kontinense. Egy klimatológusok által végzett előrejelzés (Lucas et al. 2007) továbbgondolásával az ausztrál kormány által megrendelt tanulmány már 2008-ban megjósolta, hogy a „tűzszezonok korábban fognak kezdődni, valamivel később fejeződnek be, és általánosságban intenzívebbek lesznek. Ez a hatás idővel erősödni fog, és közvetlenül 2020-ra lesz érzékelhető" (Garnaut 2008: 118) Márpedig 2020 januárjában a jóslásoktól szokatlan módon pontosan az történt, amit megjósoltak: az ausztrál kontinens modernkori történetének legnagyobb kiterjedésű tűz okozta katasztrófáját élte át (Agrárszektor 2020). Az ausztrál mezőgazdaság 40%-át megtermelő Murray-folyó völgyében a gazdák már egy korábbi évben is 8,1 milliárd ausztrál dollárt vesztettek a kieső termés, valamint a száraz és meleg időjárás miatt fellángoló bozóttüzek formájában (Karoly et al. 2003).



17. ábra. *Aszály Ausztráliában. A szürke szín intenzitása a csapadékhiány mértékét jelzi (Forrás: Ausztráliai Meteorológiai Hivatal, 2018)*

A kontinenst a kétezres évek elején sújtó különösen kemény aszályt követően nyilvánvalóvá vált, hogy valamit tenni kell. Különösen a nagyvárosok kényszerültek rá, hogy újragondolják központosított vízellátó hálózataikat. Beszálltak a politikusok is, és „aszálymentesíteni" kívánták a választóikat (Head 2010). Hatalmas infrastrukturális beruházásokban gondolkodtak, esőtől független sótalanító berendezéseket, tározókat, még nagyobb teljesítményű vízvezeték-há-

lózatokat akartak építeni. Szerencsére sokan voltak, akik észrevették, hogy ez megint elsőfajú hiba lenne, vagyis „helytelen alkalmazkodás" *(maladaptation)* (Barnett és O'Neill 2010), hiszen ismét csapdahelyzet jönne létre, egy merev, mechanikus rendszer, amely a jövőbeni változó igényekre nem tudna rugalmasan reagálni (Brown et al. 2011). Az aszálymentesítő megközelítés a meglévő rendszerek hibáit sem ismerte el. Az ugyanis, hogy az aszály oka a klímaváltozás és hogy ez már mindig így lesz, egyáltalán nem tudományos tény. Még a hőmérséklet és csapadék egymáshoz való viszonya sem egészen világos. Mint máshol is a világon, egyszerre több változás is érvényesül. Dél-Ausztráliában egyértelműen csökken a csapadék átlagos mennyisége, de máshol ez már nem annyira egyöntetű (17. ábra). A kérdés ennél sokkal bonyolultabb, változó eseményekre kell számítani, nem „állhatunk át" egyszerűen egy új orbitális pályára, és semmiképpen nem szabad a szakmai kérdésből politikait csinálni, sokkal inkább rugalmasan változtatható alkalmazási terveket kell kidolgozni (McDonnell 2018). Ennek egyik példája Adelaide városa, amely a teljes vízellátást a feje tetejére állítva az esővizet használja fel olyan helyeken, ahol nincs ivóvíz minőségű vízre szükség (Bettini et al. 2013).

Számos egyéb országban is bebizonyosodott, hogy a szakmai kérdések átpolitizálása nagyon súlyos következményekkel jár. A világ közvéleménye nagyon meglepődött, amikor 2015-ben megindult a tömeges migráció Szíriából Európa felé. A közvélemény azonban nem volt tudatában annak, hogy a 2011-es arab tavasz eseményeit megelőzően 2006 és 2010 között az országban a szokottnál is súlyosabb aszály pusztított, amelyre a politikai vezetés a lehető legrosszabb választ adta: megpróbálta letagadni (de Châtel 2010). Márpedig a következmények drámaiak voltak. Jó okunk van feltételezni, hogy a szíriai polgárháborút (és nem mellesleg az irakit is) kirobbantó okok között a vízhiány is vezető szerepet játszott (Burden 2019). Arról lehet vitatkozni, hogy az országban folytatott helytelen mezőgazdálkodási és vízgazdálkodási gyakorlat járult-e hozzá nagyobb mértékben a súlyos aszályok kialakulásához, vagy a világméretű éghajlatváltozás, de mindkettő elsőfajú hiba, és mindkettő emberi eredetű (Kelley 2015). Mások a kis jégkorszak alatt az Oszmán Birodalom hanyatlásának kezdetét okozó éghajlati anomáliákat hozzák kapcsolatba a jelenlegi éghajlatváltozással, és azt okolják a válság kialakulásáért (Duffy 2021).

Az igazság azonban az, hogy az ország lakossága a mai napig ijesztő ütemben nő, az elmúlt hatvan év alatt 3,3 millióról 21,4 millióra emelkedett, ami várhatóan meg sem áll 37 millióig. Az erőszakos tervgazdálkodás máshol és máskor sem váltotta be a hozzá fűzött reményeket, így nem csodálkozhatunk, hogy a vízgazdálkodás területén is csődöt mondott. Bár az ország vezetése is előszeretettel okolja a külső körülményeket a klímaváltozástól a népességrobbanásig, a valóságban az állami öntözőrendszer betoncsatornáiban a mai napig elvész a mezőgazdasági területek öntözésére szolgáló víz 10-60%-a. Az egyre nagyobb

mértékű felszín alatti vízkivételek miatt a talajvíz szintje sok helyen csökkent, és a művelhetetlenné váló földekről megindult az emberek elvándorlása. Van olyan folyó is, amely nyaranta egyszerűen eltűnik (Khabur-folyó), a török határon lévő hatalmas karsztforrás, a Ras-al-Ain pedig teljesen elapadt. A kormányzat nem vett tudomást az egyre fenyegetőbb helyzetről, és még 2011-ben is 400 000 hektár földet sajátított ki, hogy azon államilag öntözött gabonát állítson elő. A lehetetlen körülmények jelentős mértékben hozzájárultak a háborús helyzet okozta bizonytalansághoz. A törökországi menekülttáborokban élő milliók számára úgy látszik, 2015-re váltak annyira tarthatatlanná az állapotok, hogy nagy tömegek induljanak meg a boldogulás reményében észak felé. Amikor tehát migrációs válságról beszélünk, soha nem szabad kihagyni a környezeti tényezőket, köztük a helytelen vízgazdálkodás okozta nyomort sem (de Châtel 2014).

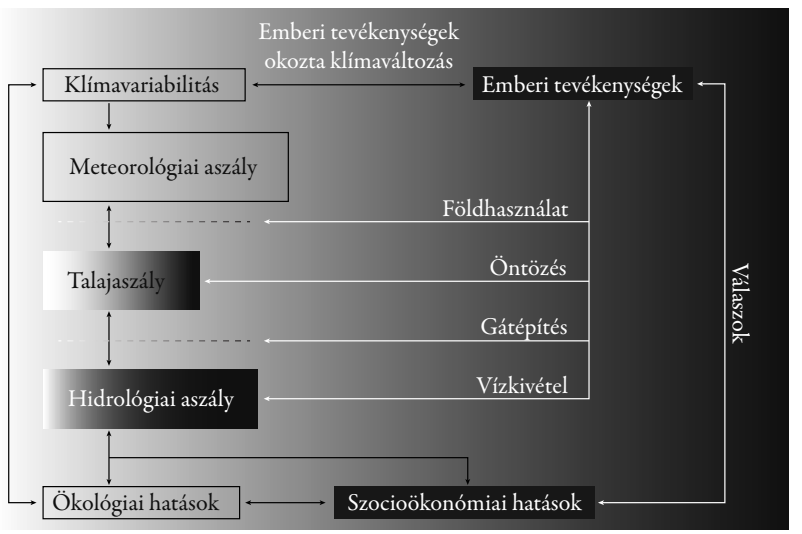
Aszály azonban itthon, a Tiszához közeli megyékben és a Homokhátságon is volt, 2022-ben még télen is. 121 éve nem látott szárazság sújtotta egész Magyarországot. Májustól augusztus végéig alig esett számottevő csapadék, és ennek hatását csak súlyosbították a 40 °C fok feletti, rekordokat döntő hőhullámok. Egy ilyen időszak után a Kiskunság félsivatagában már szinte semmi nem él meg. A Tisza mentén gazdálkodó állattartók kénytelenek voltak megfelezni állataik számát, nehogy a következő évben éhen haljanak (Báthory 2023). A Tiszántúl amúgy is alacsony erdősültségű területein jelentős kár érte az erdőket. A fák pusztulása visszafordíthatatlan. De az aszály legalattomosabb hatása rejtetten keletkezik: az előző évben nagymértékben lecsökkent talajvíz szintje a rá következő csapadékos évben sem állt helyre (Jakab 2023), hiába volt az ország más területein, például a Dráva mentén rekordot döntögetően komoly árvízveszély (Jeki 2023). Nyugat-Dunántúl erdős területein az aszályt átvészelő növényzet számára a 2023-as év rengeteg csapadéka sem okozott gondot, sőt az erdők még ennél többet is elbírtak volna (Borovics Attila személyes közlése, 2023).

A politikusok az egész világon még mindig vízjogról és annak elosztásáról beszélnek, ezzel kívánva megakadályozni a totális gazdasági összeomlást (ENS January 3, 2003, Xinjian et al. 2021, Robinson 2023). A piacgazdaság megszállottjainak ez az igyekezete nyilvánvalóan téves alapfeltevésből indul ki: a piac és az ökoszisztémák ugyanúgy rendszerelméleti ellentmondásban vannak egymással, mint a technikai rendszerek és a természetes rendszerek. Hiába működik ugyanis a piaci elosztás rendszerében elvileg a negatív visszacsatolás (túl sok víz kitermelése – vízhiány – a ritka kincs víz árának emelkedése – a drágaság miatt csökkenő kereslet – kevesebb vízfelhasználás – a vízbázisok megújulása), a gyakorlatban ez két alapvető ok miatt még sincs így. Egyrészt a piaci elosztás visszacsatoló rendszere már nagyon régen nem működik zavarmentesen, hiszen az állami beavatkozások és a monopóliumok, a szerzett érdekek kialakulása egyaránt torzítja, nem engedi érvényesülni (Adam Smith az eredeti rendszerét sok egyformán kicsi szereplő esetére dolgozta ki). A közgazdászokat pedig nem

lehet meggyőzni arról, hogy az ökológiai rendszerek nem piacosíthatók, mert a túlzott kiaknázás esetén könnyen új stabil állapotba kerülnek, de ez az új állapot már nem azonos azzal, mint amit ki akarunk aknázni. Később látni fogjuk, hogy ez a vízre is igaz. Ha egyszer „lehalásztuk" a rendelkezésre álló vízkészletet, megújuló forrásból meg nem újulóvá válik. Akármennyit várunk is, nem fog újratöltődni, mert összeroppant. Aszály esetében a szárazabb éghajlat kevesebb esőt eredményez, a kevesebb eső kevesebb párolgást és így tovább, a megbomlott egyensúly nem állítható vissza, hanem pozitív visszacsatolással addig romlik, amíg valamilyen új peremfeltételek mellett egy új rendszerállapot nem alakul ki (Marten 2001).

Ezt a tényt a világ legtöbb részén nem veszik figyelembe, mert a politikai döntéseket az aktuális erő- és érdekviszonyok, és nem a hosszú távú előrelátás szabja meg. A modern mezőgazdaság nem lenne képes megmaradni rendszeridegen víz bevitele nélkül: a világon mindenhol az adott ökoszisztéma lehetőségeit messze meghaladó mennyiségű vizet használnak fel a technika segítségével. Az öntözéses gazdálkodással működő farmok nagygazdák, vállalatok vagy tőkés társaságok kezén vannak, és rendkívüli politikai nyomást képesek gyakorolni a döntéshozókra.

Ugyanakkor a mai napig vannak, akik az aszályt „természetadta", megváltoztathatatlan adottságnak tartják, amelynek kialakulására nincs befolyásunk, és amelyet megszüntetni nem lehet (Tamás et al. 2018). Míg azonban az aszály egy viszonylag rövid ideig tartó esemény, a vízhiány a kereslet és kínálat (helyette helyesebb a kizsákmányolás mértéke és az elvehető források rendelkezésre álló készlete kifejezést használni) egyensúlyának hosszú távú megbomlása miatt következik be. A viszonyokat – az elsőfajú hiba többszöri ismétlésével – a 18. ábra szemlélteti:




18. ábra. *Az emberi beavatkozások és a vízhiány (Forrás: Van Loon et al. 2016)*

A világos szín a természeti folyamatokat, a sötét az emberi beavatkozások intenzitását mutatja. Az éghajlat változékonysága és kiszámíthatatlansága okozza a meteorológiai aszályt. Ez utóbbi kihatással van a talajnedvesség változására és a talaj kiszáradására, ezek viszont a hidrológiai aszállyal állnak kölcsönhatásban, és ökológiai változásokat eredményeznek a rendszerben. Az emberi tevékenységek több helyen és egyre súlyosabban avatkoznak bele ezekbe a folyamatokba. A földművelés először ki van téve a természetes aszály szeszélyének. Az elsődleges válasz erre az öntözéses gazdálkodás, ami szikesedéshez és emiatt a talaj pusztulásához vezet. A talaj szárazodását gátépítésekkel próbálja az ember megakadályozni, hogy onnan öntözzön. Ez azonban csak a probléma súlyosságát fokozza. És akkor még nem beszéltünk a felszín alatti és felszíni vizek el- és felhasználásáról, amelyek megújulási ütemének figyelmen kívül hagyása csak fokozza a hidrológiai szárazságot. Az egyéb emberi tevékenységek összhatásaként kialakuló éghajlatváltozás pedig minden szinten visszahat a rendszerre, és minden szinten csak súlyosabbá teszi a reakciókat, magyarán a pozitív visszacsatolás irányába hat (Van Loon et al. 2016).

### 3.1.3. Globális változások, olvadó jég

A globális változásokat az árvizek és aszályok gyakorisága mellett számos egyéb jel is mutatja. Már 2002-ben megfigyelték, hogy nemcsak a Déli-sarkvidék szárazföldi jégtakarója, de az Északi-sark úszó tengeri jégtáblái is soha nem látott ütemben olvadnak (Glick 2004). Első látásra ennek nincs semmi köze az édesvízkörzéshez, de az első látás csalóka. A csökkenő jégtakaró a szabad, sötét vízfelület arányának megnövekedése miatt pozitív visszacsatolással további melegedést indít be, a grönlandi gleccserek jege hamarabb és nagyobb mennyiségben olvad el, ami viszont az észak-atlanti mélyvízi áramlatok mozgását is megváltoztathatja, illetve a tengeri jég és a szárazföldi jég együttes eltűnése a bolygó albedójának csökkentésével a felmelegedés felerősítése irányába hat (Lazaroff 2002a). Az óceán dinamikájának változása lehet az ok az Észak-Amerikában, Európában és Délkelet-Ázsiában a kétezres évek elején tapasztalt szárazság mögött is (Lazaroff February 4, 2003). Közben a Déli-sark jégtakarója még erősebb ütemben csökken, mint eddig gondolták. Az elmúlt négy évtized műholdas felvételeinek átfogó elemzésével kimutatták, hogy egyedül az Antarktiszról leszakadó és a tengerben elolvadó jég 14 mm tengerszint-emelkedésért felelős ezen időszak során. Ez részben a cirkumpoláris mélyáram meleg vizének köszönhető, amely felolvasztja a kontinensperemi jégtakarót, destabilizálja a gleccsereket, és ennek révén emeli a tenger szintjét. A jégolvadás az elemzett negyven év alatt hatszorosára gyorsult fel (Rignot et al. 2019).

A NOAA kutatói kiderítették, hogy az 1998-tól 2002-ig tartó ínséges évek, amelyek Amerikában például az azt megelőző legcsapadékosabb évtizedet hirtelen, minden átmenet nélkül váltották fel, egyenes következményei a Csendes-

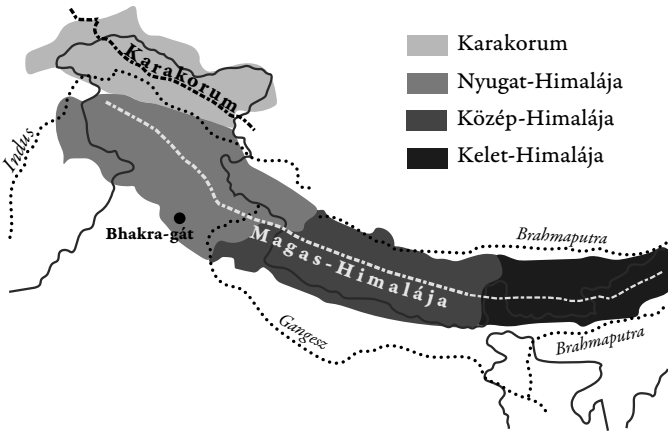
és az Indiai-óceánon kialakult felszíni vízhőmérsékletnek. A kutatók szerint a Csendes-óceán medencéjének keleti felében szokatlanul alacsony, míg a nyugati felében szokatlanul magas volt a víz hőmérséklete. A vízhőmérséklet változása pedig láncreakcióként a trópusi esőket egészen nyugatra és az Egyenlítő felé tolta, aminek következtében a középső szélességi fokok mentén szárazság alakult ki. Az még nyitott kérdés, milyen összefüggésben áll mindez az üvegházhatású gázokkal, de az biztos, hogy az óceánokban uralkodó körülmények példa nélkül állnak az utóbbi 150 évben (Kerr 2003). A globális változásoknak a vízkörzéssel összefüggésben álló másik következménye az eddig fagyott területekről, Szibéria hatalmas térségeiből a melegedés miatt megnövekedett édesvízszállítás a Jeges-tengerbe (az Északi-sarki-óceánba). A jelenség megállíthatja a mély óceáni vizek keveredését, ami eleddig Európa egy részének enyhe időjárást biztosított (Peterson 2002). Alaszka egyes területein a felolvadó örökké fagyott talaj (permafrost) a felszín 4,6 méteres süllyedését okozta (Glick 2004).

Számos területen, ahol a hegységek gleccsereinek olvadékvizére alapozódott a vízellátás, azért van baj, mert ezek erősen olvadnak. A Lima (Peru fővárosa) ivóvíz-ellátását adó Quelcaya jégsapka olvadásának üteme évi 3 méterről 30-ra növekedett, amitől 10 millió ember ivóvize került veszélybe. Az Afrika jelképének számító Kilimandzsáró hófödte csúcsa sem marad hófödte sokáig: a korábbi számítások szerint 2020-ra majd eltűnik róla az összes hó (Godoy 2002). Az előrejelzés csak azért nem jött be, mert 2018-ban meglepetésszerűen 50 centis hótakaró alakult ki a hegyen, ami átmenetileg lelassította a folyamatot (Hardy 2018). Mindez azonban nem változtat azon, hogy 1912 óta a hó és jég több mint 80%-a tűnt el róla (Glick 2004).

Az egyik legtöbbet vizsgált terület a Himalája gleccserrel borított vidéke, ami nem is csoda: ha mindent összevetünk, több mint 1 milliárd ember vízellátása függ ezeknek a gleccsereknek az egyensúlyától. Az 1960-as évek óta a növekvő nyári hőmérsékletekkel és a csökkenő mennyiségű téli csapadékhullással összhangban a vidék gleccserei folyamatosan húzódnak vissza, zsugorodnak, és teljes tömegük is csökken. Érdekes módon egy kivétel van ez alól a jelenség alól, a Karakorum hegység gleccserei, amelyek vélhetően a kontinens belsejében uralkodó kisebb nyári felmelegedés és nagyobb mennyiségű hó miatt kevésbé érzékenyek az éghajlat változására, és a hetvenes évek óta stabilnak látszanak (Jain 2018).

A 2018-as évben a Himalája gleccsereiről egy nemzetközi munkacsoport készített átfogó felmérést (Azam et al. 2018). Ebben megállapították, hogy a gleccserek – a Karakorum régió kivételével – valóban zsugorodnak, de azért nem olyan mértékben, ahogyan azt egy korábbi vizsgálat feltételezte (Bolch et al. 2012). A helyzet az ugyanis, hogy a legtöbb gleccser nagyon nehezen megközelíthető helyen van, ezért a kutatók vagy csak a könnyebben elérhető, kisebb jégárakon végzik a terepmunkát a vizsgálataikhoz, vagy műholdas képekre hagyatkoznak.

Ezúttal kizárták azokat a becsléseket, amelyeket csak a kisebb, ezért az olvadásnak jobban kitett gleccsereken végzett mérésekre alapoztak (Azam et al. 2018).




19. ábra. *A Himalája régiói és a három nagy folyó, az Indus, a Gangesz és a Brahmaputra vízgyűjtője (Forrás: Kulkarni et al. 2018)*

A gleccserképződés mechanizmusát a ráhulló hó/csapadék és a belőle kiolvadó, illetve adott körülmények között olvadás nélkül elpárolgó (szublimáló) víz viszonya határozza meg. A kutatók úgy találták, hogy a gleccser felszínén felhalmozódó, sötét színű törmelék szerepe fokozatosan nő a gleccser olvadásában, hiszen ha kevesebb a csapadék és ugyanakkor több jég olvad el, a gleccser munkája nyomán lecsiszolt kőzettörmelék a felszínen marad, és bár előbb hőszigetelő rétegként csökkenti, később, amikor átmelegedett az alatta levő jég, sötét színe miatt csak fokozza az olvadást (Shashikantha és Kulkarni 2018). Az éghajlat változása miatt a nyári hőmérséklet növekedése és a téli csapadék mennyiségének változatlansága 2000 után a Himalája egyes régióiban az olvadás intenzitásának növekedésével járt (Mukherjee et al. 2018). A jég olvadásának egy másik következménye, hogy egyre több a gleccserfelszíni tó. Ezek a tavak a nap sugaraiból több energiát nyelnek el, mint a törmelékes felszín, következésképpen fokozzák a jégolvadást és előbb-utóbb a borjadzást, amikor pedig maguk is leomolnak, árvizeket okoznak (Jain 2018). A glecccsertavak elszaporodása azt jelzi, hogy a gleccser már szétesésének végső fázisában van és nem aktív (Mitchell 2011).

Európa gleccserei sem kivételek az általános trend alól. Svájcban a polgárok már annyira aggódnak, hogy nyaranta fehér lepellel vonják be szeretett Rhone gleccserük olvadásnak leginkább kitett részeit, hogy lassítsák a folyamatot (Schlanger 2018). A svájci üdülőhely, Grindelwald gleccserei már mélyen bent találhatók a Berner Oberland hegyei között, holott gyermekkoromban még a völgy kijáratánál épült vendéglőből kényelmesen lehetett nézegetni a hideget

lehelő óriás jégtömegeket (2014, személyes megfigyelés). Hogy a meglátás nem egyéni, azt tudományos közlemények is bizonyítják. Bár a távérzékeléssel végzett megfigyelések, amelyek az Alpok jéggel borított felületeinek 93%-ára terjedtek ki 2000 és 2014 között, a vártnál kisebb bajt jeleztek a peremhegységeknél, valójában a hegységrendszer közepét adó Svájci Alpokban folyamatos a gleccserek térvesztése (Sommer et al. 2020).

A gleccserek olvadása nagyon komoly kihatással lehet a világ számos területén a vízkörre és vele az általános vízkészletek fennmaradására, illetve fenntarthatóságára. Egy tanulmányban a világ 56 gleccserekkel borított területének a sorsát modellezték 2100-ig. A modell szerint az olvadó gleccserekből származó víz egy csúcsértékig folyamatosan növekszik, majd annak elérését követően folyamatosan és megállíthatatlanul csökken, egyre kevesebb vizet juttatva az általa táplált folyókba. A vizsgált gleccserek felénél ez az átfordulás már megtörtént. Hogy mikor vált át az olvadékvíz mennyisége növekvőről csökkenőre, a gleccser méretétől és jég-hó arányától függ. A legnagyobb csökkenés Közép-Ázsiában és az Andokban várható. A Himalája területén az Indus vízgyűjtője tűnik a legstabilabbnak a vastagabb és nagyobb gleccserek miatt, ezt követi a Gangesz, míg a Brahmaputra gleccserei már valószínűleg túl is vannak a fordulóponton, és a jövőben csak kevesebb olvadékvíz várható belőlük (Huss és Hock 2018).

A gleccserek a rendszerelméletből ismert törvényszerűségeket követve a fenti hatások eredményeként várhatóan vagy teljesen összeomlanak, vagy egy új rendszerállapotba állnak be. Tekintve, hogy ellátási területükön az emberi vízigény folyamatosan növekszik, ugyanakkor a gleccserjég tömege csökkent (a felszíni lefolyás egynyolcadára esett vissza), ez eléggé súlyos következményekkel járhat. Az általuk táplált folyók, ha a gleccserek teljesen eltűnnek, súlyos vízhiánnyal fognak küzdeni, beleértve olyan hatalmas folyamokat is, mint az Indus, a Jangce, a Brahmaputra vagy az Amu Darja (Mitchell 2011).

Ugyanakkor az ENSZ mezőgazdasági ügynöksége, a FAO 2002-ben megjelentetett egy anyagot a 2030-ra várható helyzetről, rendkívül derűlátó következtetéseket vonva le olyan adatokból, amelyek erre semmi okot nem szolgáltatnak. Nemcsak a fenti megállapítások, de a tanulmány saját adatai szerint is egyedül a fejlődő országokban 14%-kal nő az öntözésre felhasznált víz mennyisége, míg az öntözött területek 202 millió hektárról 242 millióra, tehát durván 20%-kal nőnek. Minden ötödik fejlődő ország vízhiánnyal küzd majd, és különösen a kisgazdákat érinti kellemetlenül, hogy a klímaváltozás miatt extrém időjárási jelenségek szaporodnak meg, és gyakoriak lesznek az aszályok, árvizek, ciklonok és viharok. A FAO szakértői ennek ellenére kijelentik, hogy „elegendő vízmennyiség áll majd rendelkezésre" (Bruinsma 2002).

Ehhez képest a Meteorológiai Világszervezet évente kiadott jelentései sokkal borúsabb képet festenek a várható vízhelyzetről, és sorolják az aggasztó globális jeleket. A 2001 és 2010 közötti évtized azon túl, hogy a legmelegebb átlaghő-

mérsékleteket produkálta, tele volt szélsőséges időjárási jelenségekkel, amelyek külön-külön talán nem lennének meglepők, de így együttesen abba az irányba mutatnak, amit sejtettünk: egy új rendszerállapot van kialakulóban, és ez nem megy vajúdások nélkül (WMO 2012). A mi szempontunkból ennek a csapadék mintázatának átalakulása miatt van nagy jelentősége.

Legújabb, a világ meteorológiai helyzetével foglalkozó jelentésében a szervezet összefoglalóan megállapítja, hogy az elmúlt négy év – 2015 és 2018 között – annak ellenére volt a valaha mért legmagasabb átlaghőmérsékletű időszak, hogy 2018 a Csendes-óceán térségében a La Niña-jelenséggel kezdődött. Ez egy olyan óceáni és légköri oszcillációs folyamat, amely során az egyenlítői Csendes-óceán vizének felszíni hőmérséklete a megszokottnál hidegebb, ezért rendszerint légköri hűtő hatással jár. A főbűnösnek kikiáltott szén-dioxid légköri szintje folyamatosan emelkedik, mert az óceánok és a bioszféra nem képes felvenni az emberiség által kibocsátott fosszilis eredetű többlet szén-dioxidot. Pedig az óceánok mindent megtesznek, ami tőlük telik. A befogott energia 90%-át ők nyelik el, a felső, néhány száz méteres vízrétegük különösen átmelegszik, és ez hőtágulásban mutatkozik meg. Az eredmény, hogy évente átlagosan néhány milliméterrel a jég olvadása nélkül is megemelkedik a világóceán szintje. A kilencvenes évek óta ez 9 cm-t jelent, ami nem tűnik soknak, pedig az. Az elnyelt szén-dioxid másik nem kívánt következménye az óceán vizének savasodása, ami a tengeri élővilágra van tragikus hatással. Folytatódott a Jeges-tenger jégborításának csökkenése és a gleccserek olvadása is. Ez utóbbiaknál a tíz legnagyobb tömegveszteséggel járó évből hét 2010 után következett be (WMO 2018). A legfrissebb megfigyelések szerint a legnagyobb mértékben Grönland gleccsereinek és jégtakarójának olvadása fog jelentős mértékben hozzájárulni a világtengerek szintemelkedéséhez (Bevis et al. 2018). Az Antarktiszon a Thwaites-gleccser alá betörő tengervíz – az alapkőzet itt alacsonyabban van a tengerszintnél – egyre gyorsabban olvasztja a gleccser jegét. 2017-ig egy 10 km hosszú és 4 km széles, 350 méter magas üreg keletkezett a jégpáncél alatt, amelyből 14 milliárd tonna jég szabadult ki és ömlött a tengerbe. Hogy mindennek milyen következménye lesz, még senki sem tudja. Az üreg mindenesetre rohamtempóban nő (Milillo et al. 2019).

Az éghajlatváltozás hatásainak döntő többsége tehát a vízkörfogáshoz kapcsolódóan jelenik meg. A változások nem egyformán érintenek minden régiót. Hőmérséklet szempontjából az északi félteke a jobban kiszolgáltatott, míg a csapadék változásai miatt az Egyenlítő körüli területek szenvednek a legjobban. Magyarországon eléggé következetesen eddig minden mérés azt mutatta, hogy kicsit kevesebb, de szélsőségesebb lesz a csapadék. Az év során 17 nappal kevesebb napon hullik csapadék, és intenzív hőhullámokra számíthatunk, különösen az Alföld déli részén (Lakatos 2018).

Mindezek alapján joggal várhatjuk el, hogy alapvetően új megközelítésben foglalkozzunk az emberi társadalom és a víz kapcsolatával. Ennek ellenére

a Magyarországon 2018-ban meghirdetett Nemzeti Víztudományi Kutatási Program továbbra is a megszokott módon a társadalmi vízigényt teszi az első helyre a prioritási sorban, és a fenntartható vízhasználat csak a vízminőség után, harmadikként következik. Legutolsó a sorban a vízhez kapcsolódó társadalmi konfliktusok kérdése (Engloner 2018), holott elsődlegesen a társadalmi feszültségek kezelésével a fenntartható vízhasználatot kellene megpróbálni kialakítani, a többi kérdés ennek folyományaként már sokkal könnyebben lenne kezelhető. Két nagyon jó okunk van rá, amiért át kell gondolnunk eddigi megoldásainkat. Az egyik az, hogy ezek nem voltak hosszú távon sikeresek, folytonosan újabb problémákat okoztak, a másik, hogy új helyzetnek nézünk elébe, amire természetszerűleg nem is lehetnek válaszaink, hiszen azt sem tudjuk még pontosan, mire készüljünk fel. Mindkét ok arra késztet, hogy bármit csináljunk is, azt rugalmasan, alkalmazkodóképesen tegyük, és mindig a rendelkezésre álló lehetőségek adta korlátokon belül, nem pedig azokat áthágva. Történetileg eddig bármilyen beavatkozást végeztünk is környezetünk vízrendszereibe, az előbb-utóbb visszaütött. De mik is voltak ezek a beavatkozások?

## 3.2. AZ EMBERI VÍZFELHASZNÁLÁS MEGOSZLÁSA, ARÁNYAI ÉS ALAKULÁSA

> *A víz nem olaj. Nincs mivel helyettesíteni. Ha továbbra is ingyen adománynak tekintjük, a Föld lakosságának nagy része rövidesen vízhiányban vagy élelmiszerhiányban – vagy éppen mindkettőben – fog szenvedni.*
>
> Mark Rosegrant
> International Food Policy Research Institute

### 3.2.1. Szemléleti kérdések

Az a tény, hogy haladás ide, haladás oda, ennyi baj van a vízzel, egyáltalán nem a véletlen műve. A vízépítő mérnököknek az egyik legelső dolog, amit megtanítanak az egyetemen, hogy a víz folyadék lévén nem folyik fölfelé, és nem áll meg kupacban. Ez a szemlélet a jellegzetesen mechanikus, technikai megközelítés tipikus példája, mert nyilvánvaló ugyan, hogy a folyadékok a gravitáció törvényének engedelmesednek, de van rengeteg egyéb hatás is, amely módosíthatja az erők eredőjét. A harmatos levélen ringó vízcsepp kupacban áll, és a felületi feszültség miatt alakja domború. Ugyanígy a kicsiny pórusokban, csövekben tartózkodó folyadé-

kok ismét csak felületi feszültségük, a molekulákat összetartó erők következtében felfelé haladva áramlanak, „emelkednek". És mielőtt ránk pirítanának, hogy ezek mikroszkópos méretű példák, amelyeket egy mérnök nem vehet figyelembe, kénytelen vagyok megjegyezni, hogy éppen ez a baj, mert a gigantikus vízügyi beruházásoknak is vannak mikroszkópos részei, másrészt említhetünk makroszkópos példát is: az óceánok anticiklonális áramköreinek közepén (I. kötet 127. oldal) a víz magasabban áll, mint az áramlatok szintje, illetve a folyók hagyományos viselkedése során a természetes árvizek az övzátonyok fokait áttörve „felfelé", a terepalakulatokkal látszólag ellentétesen öntötték el az ártereket.

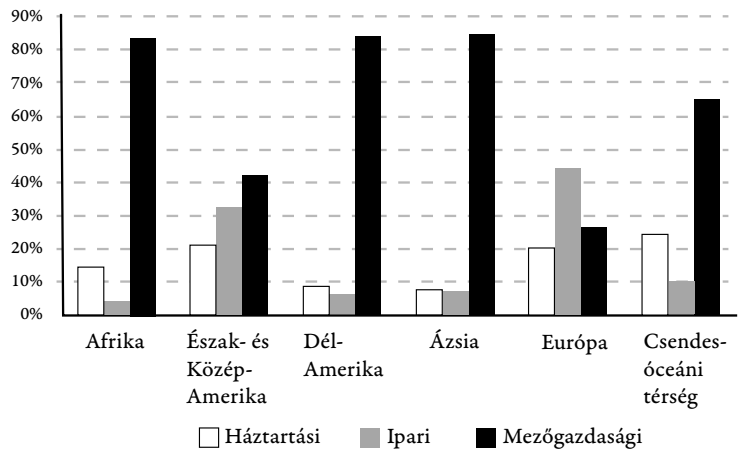
A technikai szemlélet egyik hibája éppen az, hogy igyekszik a természeti rendszereket is a newtoni mechanika egyszerű világára visszavezetni, és nem veszi figyelembe, hogy a valóság sokkal bonyolultabb, és nem mindig a lineáris logika mentén szerveződik. A víztudományok művelői ma már tudják, hogy míg az általuk vizsgált dolgok jórészt a newtoni mechanika alapján álló determinisztikus jelenségek, a folyók életét befolyásoló külső tényezők ezzel szemben (számukra) sztochasztikus, véletlenszerű elemeknek tekintendők, ezért a kétféle megközelítés kaotikus rendszert eredményez, ami szerintük azonos a zűrzavarral (Józsa 2018). Márpedig az előbb a rendszerelméletből következően logikailag is megállapítottam, hogy a vízkörzés elemei, köztük a folyók és a felszín alatti vizek kaotikus rendszerek, csak éppen a káoszelmélet semmiképpen nem tekinthető zűrzavarnak. Hanem egy új szemléletnek, amit nem ártana figyelembe venni tervezéskor. Azért, mert jelenlegi ismereteink szerint valamit nem tudunk biztonsággal megjósolni, még nem biztos, hogy az zűrzavar. Lehet, hogy csak nem értjük, miről van szó.

A szorosabban vett műszaki kérdéseken túl azonban más olyan szemléleti probléma is akad az emberi vízfelhasználás történeti alakulása során, amely rendszerelméletileg mindenképpen elsőfajú hibának tekinthető. Ezek közül a legalapvetőbb a társadalmi vízigény elsődlegessége a fenntartható forráshasználattal szemben. Mint az összes többi természeti erőforrás esetében, az ember a vízhasználatnál sem veszi figyelembe az adott helyen rendelkezésre álló készletek végességét, minőségét, megújulási ütemét és azokat a mellékhatásokat, amelyek a kiaknázásával járnak. Ezért pumpálják ki a felszín alatti vizeket mindaddig, amíg helyükre sós tengervíz nem áramlik, vagy ameddig a csapadékból, felszíni vizekből és beszivárgásból már nem tudnak pótlódni, így visszavonhatatlanul süllyedni kezdenek. Ezért térítik el a folyókat, építenek gátakat, osztják szét a „kvótákat", hogy a folyó dinamikájának felborítása után immár ne is lehessen a benne lévő vizet okosan felhasználni. És ezért szaporodnak végeláthatatlanul az „objektív" igények, akárcsak az energiatermelés és -fogyasztás területén.

Ráadásul még a racionális igények kielégítése is teljesen irracionális módon folyik. Sem a mennyiség, sem a minőség terén nincsenek észszerű megfontolások, és a készletek kiaknázása nem párosul józan, előrelátó visszaforgatással.

A vizet az emberiség nagyjából három nagy célra használja fel: a mezőgazdaságban öntözésre, az iparban a termelési, gyártási, csomagolási, szállítási stb. folyamatokhoz, illetve a településeken úgynevezett kommunális feladatok ellátására, ami a lakások, házak és intézmények vezetékes vízellátását jelenti.

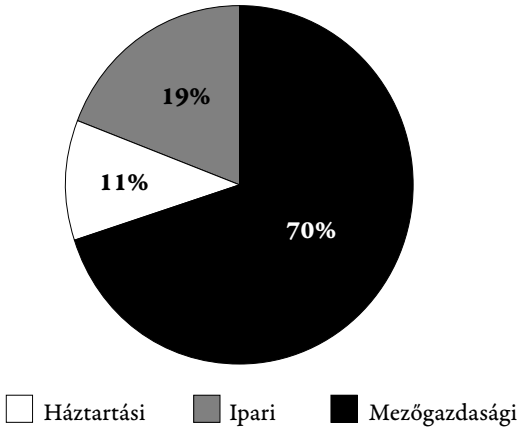
Ha megnézzük, hogy a világon a három szektor részesedése a teljes vízhasználatból hogyan oszlik meg, igen meglepő eredményeket tapasztalunk: Európát kivéve mindenhol messze a mezőgazdasági célú vízfelhasználás a legmagasabb. Ám ez alkalmasint megtévesztő lehet, hiszen Ázsiában idetartoznak az évezredek óta kiegyensúlyozottan működő árasztásos kultúrák is, amelyek környezeti hatásai nagyságrendekkel kisebbek, mint mondjuk Észak-Amerikában egy öntözött lucernaföldé. Ezért önmagában a felhasznált víz mennyisége nem mond sokat, inkább a használat módját és a használt víz minőségét kell megvizsgálni. Az sem mindegy, hogy iparilag fejlett országról beszélünk-e, mert ez utóbbiakban a kommunális és ipari felhasználás rendszerint meghaladja a mezőgazdaságit (20. ábra).



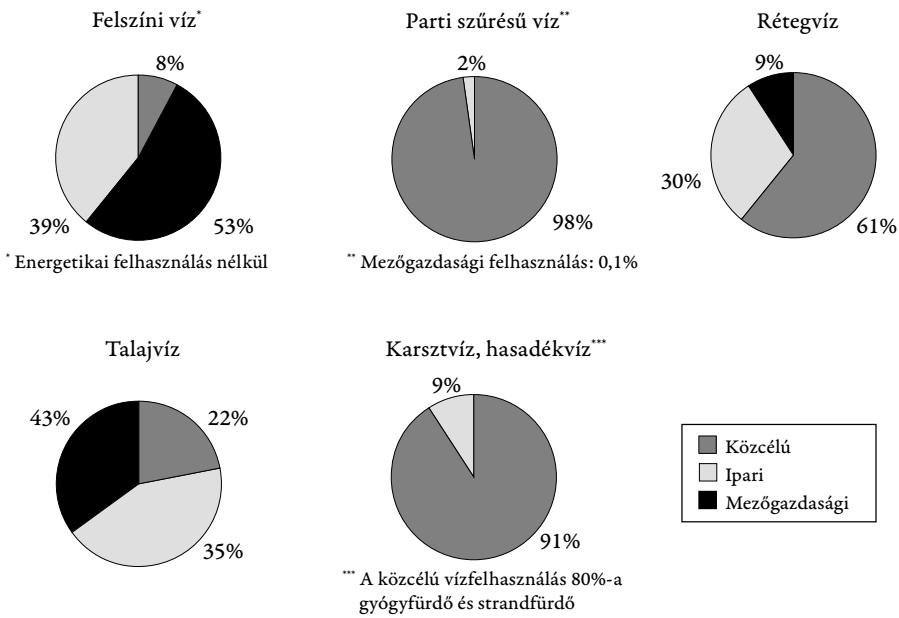

20. ábra. *A világ vízfelhasználása ágazatok szerint (Forrás: worldwater.org)*

Ezért, mint minden egyszerűsítés, a 21. ábra FAO-adata is nagyon nagy eltéréseket takar, és félreértelmezésre adhat okot. Kicsit más képet kapunk, ha a különböző víztípusok szerinti felhasználást nézzük. Bár a 22. ábra Magyarországnak csak egy területére vonatkozik, azért az látszik belőle, hogy a mezőgazdaság főként felszíni és kisebb mértékben felszín alatti vizekre, azon belül is talajvízre hagyatkozik. Ugyanakkor a síkvidéki folyók remek találmánya, a parti szűrésű víz nálunk szinte teljes egészében a kommunális hálózatra megy el. És – sajnos – igaz ez a rétegvizek esetében is. Ez az aránytalanság részben annak köszönhető, hogy az ábra a Közép-Duna-völgyi Környezetvédelmi és Vízügyi

Igazgatóság területén érvényes helyzetet képezi le 2008-ban, tehát benne vannak többek között a budapesti parti szűrésű vízbázisok, viszont nincs benne a paksi atomerőmű, valamint a régióban található egyéb nagy erőművek felszíni vízhasználata.

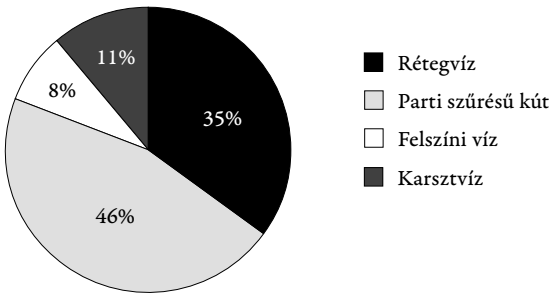



21. ábra. *A világ összesített vízfelhasználása (Forrás: FAO 2016)*



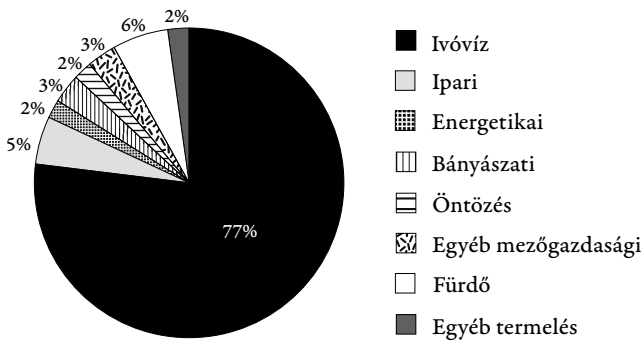

22. ábra. *Vízfelhasználás Magyarországon a különböző víztípusok szerint (Forrás: http://www.kdvkovizig.hu)*

A lényegen nem változtat az sem, ha az országos átlagot nézzük. Az ÁNTSZ nyilvántartása szerint az ivóvíz kinyerése legnagyobb részben parti szűrésű kutakból és felszín alatti mélykutakból történik. Ez azt jelenti, hogy Magyarországon az ivóvíz 92%-a különböző felszín alatti vizekből, 8%-a felszíni vízkivételi művekből származik (ÁNTSZ 2013).




23. ábra. *A szolgáltatott ivóvíz eredet szerinti megoszlása (Forrás: ÁNTSZ 2013)*

Ha pedig azt nézzük, hogy mi a célja a felszín alól kitermelt vizek használatának, azt látjuk, hogy szinte teljes egészében az ivóvízhálózatokra megy el (24. ábra).




24. ábra. *Felszín alatti vizek a felhasználás célja szerinti bontásban (Forrás: VGT 2016)*

Ha logikusan és következetesen gondolkodunk, akkor ezekből az adatokból – amelyek máshol talán más arányokban, de lényegileg mindenképpen azonos tendenciát mutatnak – azt a tanulságot kell levonnunk, hogy csak három helyen követtünk el hibát a széles körű vízfelhasználás rendszereinek kiépítésekor: az öntözés, a vezetékes vízellátás és a szennyvízcsatornázás területén. Hogy pon-

tosabban fogalmazzak: az éghajlati és talajtani adottságokat figyelembe nem vevő, erőltetett öntözési rendszerek, a központosított, egykörös és egyöntetűen csak ivóvízminőségű vízben gondolkodó vízellátás kiépítésekor és az egységes, ömlesztett, központosított csatornázás megvalósításával. Az eredmény: aránytalan jelen és tikkadt jövő. A rendszereink pocsékolók, semmilyen korlátozás sincs beléjük építve, és szükségtelenül nagy mennyiségeket mozgatnak meg.

### 3.2.2. Aránytalan jelen

Miután az ember a teljesen életidegen tereket is belakta, ahol a legkeményebb körülmények között kell létfenntartásának alapjait megteremtenie, és mivel ebbéli igyekezetében egyáltalán nem azonos lehetőségek állnak minden embertársunk rendelkezésére, a víz felhasználásának mintázata, ha lehet, még egyenlőtlenebb, mint előfordulása. Izlandon minden emberre évente 68 500 $m^3$ csapadék jut, Bahrein lakosainak viszont olajdolláraikat kell a tengervíz sótalanítására fordítaniuk: természetes ivóvizük szinte egyáltalán nincs. Egy korábbi adat szerint egy átlagos amerikai állampolgár hetvenszer annyi vizet használ fel éves átlagban, mint ghánai embertársa (Riviére 1989). Az évente elfogyasztott víz mennyisége pedig meredeken növekszik, nemcsak fejenként leosztva, de a demográfiai robbanás miatt abszolút értékben is.

Az aránytalanságra jellemző, hogy a világ legnagyobb egy főre eső vízfogyasztással jellemezhető országa, az Egyesült Államok a kitermelt édesvíz 30%-át(!) húsételek előállítására, további 15%-át(!) cukortermelésre fordítja. A mezőgazdasági vízfelhasználásban tehát ezek a számok is benne vannak, nem csak a közvetlen öntözéssel a kaliforniai stb. sivatagban elpárologtatott mennyiségek (Fischetti 2012). Persze nem kellene így lennie, ha a marhahúst nem intenzív, hígtrágyát termelő telepeken állítanák elő, vagy ha az ország lakosai nem ennének annyi húst és „fehér halált": erősen finomított cukrot. Egyes szerzők megkísérlik a mezőgazdasági termékek előállítása során felhasznált vizet egyetlen komplex mutatóba, a vízlábnyomba összefoglalni, amely során a termény előállítása, feldolgozása, szállítása, elfogyasztása stb. közben elfogyasztott víz mennyiségével igyekeznek kimutatni az élelmiszeripar édesvíz szempontjából vett siralmas hatékonyságát (Dourte és Fraisse 2012). Egy átfogó tanulmány kiszámolta a világ „vízlábnyomát" – bármit jelentsen is ez. A szerzők három adatot adtak össze a világ összes országára: az esővíz felhasználásának mennyiségét (úgynevezett zöldvízlábnyom), a felszíni és felszín alatti vizek kitermelt mennyiségeit (kék) és az elszennyezett, emiatt rendelkezésre már nem álló vizet (szürkevíz, feketevíz) (Hoekstra és Mekonnen 2012). Elég szomorú, de a szerzők kénytelenek voltak 1995 és 2005 közötti adatokkal dolgozni, frissebbek nem álltak rendelkezésükre.

Az aránytalanságok sora folytatódik a mezőgazdasági vízfelhasználás területén is. Itt két egészen valószínűtlen ország áll az élen, a volt szovjet tagköz-

társaság Türkmenisztán és Üzbegisztán (Harrison és Pearce, 2000). Ennek az érdekes jelenségnek azonban történeti háttere van, a türkmének és üzbégek a Szovjetunió őrült tervgazdálkodásának szorgalmas végrehajtói: sivatagi klímán termelnek gyapotot. Ahhoz pedig sok víz kell. A sorba beleillik még néhány sivatagi ország: Kirgizisztán, Kazahsztán, Tádzsikisztán és Irak. Közép-Ázsia országaiban összesen 100 000 $km^2$ – egy Magyarország nagyságú terület – áll intenzív öntözés alatt, persze a kötelezően ezzel járó szikesedés okozta bajokkal súlyosbítva. Akárcsak a fentiek esetében, Üzbegisztán összes rendelkezésre álló vízforrásának 90%-át a munkaképes lakosság 50%-át foglalkoztató gyapottermesztés emészti fel, amely a szegény országnak évente 1,6 milliárd amerikai dollár exportbevételt biztosít (Insarova 2002). A tendencia azóta sem változott, az ország 51 millió $m^3$-es éves felhasználásának 90%-a megy el a mezőgazdaságra (Aliyeva 2017). Csakhogy saját csapadéka az arid éghajlatú országnak alig van. Alvízi helyzetben lévén, ugyancsak feszült a viszonya a többi volt tagköztársasággal, különösen Kirgizisztánnal és Tádzsikisztánnal. A térség egész vízellátása ugyanis a Szír Darja és Amu Darja folyók vízgyűjtőjére alapozott, ahol a térség lakosságának 80%-a él, és amelyek vizét a fent nevezett országok két hatalmas gát megépítésével saját hidroelektromos elképzeléseik megvalósítására kívánnák felhasználni. Pedig fenntartható megoldások itt is voltak, legalábbis az ország egyes területein hagyományosan közösségi döntéshozatallal irányították a rendelkezésre álló víz felhasználását (Hirsch 2013). A magyarul talán vízügyi társulásnak nevezhető és eredetileg a mezőgazdasági vízfelhasználás irányítására szolgáló szervezeteket megpróbálják átszervezni, hogy egyéb vízhasználók is tagjai lehessenek, de ez nem megy konfliktusok nélkül, még a felvízi országok vízügyi beruházásai nélkül sem. A háztartásokat és kiskerteket következetesen kihagyták eddig a vízmegosztásból (Mukhamedova és Wegerich 2014). Ma a feszültségeket csakis megegyezéssel és tárgyalásos úton lehet rendezni, amire Üzbegisztán új elnökének rugalmasabb hozzáállása ad reményt (Russell 2018). Az előrejelzések szerint az éghajlatváltozás elsősorban a vízhiány miatt lesz nagy megpróbáltatás ezekben az országokban (Tuncok 2021).

Az öntözéses gazdálkodás nagyon messze áll a fenntarthatótól. Az öntözött területek világszerte 24%-a károsodik (szikesedik), és az öntözésre használt víz 55%-a soha nem jut el a növényekig, elvész útközben (Harrison és Pearce 2000). Az Amerikai Egyesült Államok nyugati államaiban, ahol igen intenzív a mezőgazdasági tevékenység és igen kevés a növények rendelkezésére álló csapadék vagy talajvíz (magyarán öntözni kell), az összes vízfelhasználás 76%-a megy el mezőgazdasági célra (National Geographic Magazine térképmelléklete, 1993. november). A rendelkezésre álló vízkészlet legnagyobb arányú kihasználása is egy agrárország nevéhez, Egyiptomhoz fűződik, ahol a gyakorlatilag egyetlen vízforrás, a Nílus vizének 94,5%-át használják fel valamilyen módon, mielőtt elérné a tengert (Harrison és Pearce 2000).

Nyilvánvaló, hogy ilyen feszült és sérülékeny rendszerek sokáig nem tarthatók fenn. A rendelkezésre álló készletek fogyása, a népesedés egyre növekvő nyomása és az egy főre eső felhasználási ütem emelkedése, a várható klímaváltozás, valamint a szennyezések miatt jó okunk van azt hinni, hogy ennek nem lesz jó vége. Vízhiánnyal kell számolni a világ nagyon sok olyan vidékén is, ahol eddig az ismeretlen volt. Ezért az emberi vízfelhasználás tervezését három alapelvnek kell vezérelnie: minél kevesebbet, azt is tisztán tartani és visszaforgatni. Csakhogy egyelőre messze nem ez az elv érvényesül.

### 3.2.3. Tikkadt jövő

Talán mondanom sem kell, hogy a mérnököknek a vízhiányra is van válasza. Állításuk szerint mindenféle vízből tudnak ivóvizet csinálni. Ez technikailag igaz, a gyakorlatban azonban a mennyiség és az ár is kérdéses, az energiaigényről nem is beszélve. Mint a legtöbb erőforrással, itt is az a baj, hogy amikor ritkává válik, akkor derül ki, mennyit is ér. A technikai módszerek rendelkezésre állnak már most is ahhoz, hogy akár a tengervízből iható ivóvizet csináljanak, és egyre több helyen ezt meg is teszik. Amire az ezredforduló előtt még hiába vártunk, mert megfizethetetlen volt, a 21. századba lépve a fordított ozmózissal és membránpumpákkal működő berendezésekben a tengervíz sótalanítása már csak kétszer annyiba került, mint az egyéb úton előállított ivóvíz (Somlyódy 2003). Sőt, később az ára és az energiaigénye még a harmadára, negyedére csökkent (Somlyódy 2008). Nem valószínű azonban, hogy ez a módszer hamarosan felváltaná a rendelkezésünkre álló egyéb forrásokat, hacsak nem akarunk megint elsőfajú hibát elkövetni: a víz nagy tömegű anyag, szállítása bajos, tenger meg nem mindenütt van. Technikai berendezésekkel pedig nem oldhatók meg a rendszerelméleti hibák.

A rendszerelméleti hiba itt az, ha a statikus vízkészletbe nyúlunk bele. Európában Írország kivételével szinte minden nyugat-európai ország több vizet használ fel, mint amennyi pótlódik. Még súlyosabb a helyzet a dél-európai országok tengerpartjai mentén és Kelet-Európában, így hazánkban is. Annak ellenére, hogy nyilvánvalóan nem vagyunk (még) sivatag, a vízfelhasználással azért kell csínján bánni, mert a felszíni lefolyásnak és beszivárgásnak az a mennyisége, amely még szárazság idején is megbízhatóan felhasználható forrásnak számít, jóval kevesebb, mint az átlagos mennyiség. Európa egészére nézve ez a mennyiség már a múlt század végén is 300 és 900 $km^3$/év között váltakozott, miközben az átlagos éves vízfelhasználás 480 $km^3$/év volt. Ebből az következik, hogy a kontinens egyes részein mesterséges beavatkozás (tárolás, átvezetés vagy mély rétegvizek felhasználása) nélkül vízhiány lépne fel (Stanners és Bourdeau 1995). Az édesvízkészlet kitermelésének korlátját a viszonylag gyors vízkörforgásban évről évre megújuló, dinamikus készlet határozza meg, nem pedig a lényegesen nagyobb statikus. Ha ezt túllépjük, a vízkészletek nem fenntartható változásokon men-

nek keresztül: a talajvízszint süllyed, a tavakban tárolt víz mennyisége csökken, és a tengerbe torkolló folyók nem mindig érik el a torkolatukat. A folyamat végeredménye az *eltűnő víz*. Hazai példaként a Dunántúli-középhegység karsztvízkészlete vagy a Duna–Tisza közi hátság említhető, ahol a bányászat hatása és a túlzott mértékű kitermelés súlyos vízszintcsökkenéshez vezetett. Az első esetben ez az egész Dunántúli-középhegységre kiterjedt (hatott a Budai-hegységre és a Bakony délkeleti részére is), és a regenerálódás húsz évvel a bányászat leállítása után sem fejeződött még be (Somlyódy 2018). Eltűnő vizek megfigyelhetők szinte az összes kontinensen, a leghíresebb/-hírhedtebb példák közé tartozik az Aral- és a Csád-tó, a Sárga- és a Colorado folyó (Postel 1992).

A fejlett országok polgárai tulajdonképpen csalás áldozataivá váltak, egy illúzió foglyai. Az amerikai Phoenix lakosainak természetes esetben ugyanannyi víz jutna, mint a kenyai Lodwar nevű város lakóinak, tekintve, hogy sivatagi helyszín mindkettő, vagyis évi 180 mm. Ám Amerikában a Colorado-folyó vizének megrablása miatt az ottani emberek eleddig alig érzékeltek valamit ebből a vízhiányból, míg Kenyában az ott lakóknak a phoenixiek napi és családonkénti 3000 literes vízfelhasználásának 5%-ával kell megelégedniük (Postel 1992).

Etiópiának viszonylag nagy a népessége, melynek a közelmúlt tragikus mezőgazdasági manipulációi és a folyamatosan dúló etnikai konfliktusok, polgárháborúk következtében igen nagy szüksége lenne egyenletes, megbízható vízellátásra. A természeti rendszerek azonban sajnos híján vannak a szociális igazságérzetnek, és Etiópiát az aszályos évek miatt a gabonatermés összeomlása és a gabonaárak emelkedése következtében rendszeresen éhínség sújtja. Ahelyett azonban, hogy inkább egy más agrárszerkezetre állítanák át, az önzetlen ipari hatalmak remek elsőfajú hiba formájában a Nagy Etiópiai Újjászületés Gátjának (GERD) nevezett, 5 milliárd dolláros beruházást tukmálták rá az ország vezetésére. A szudáni határtól mindössze 30 km-re lévő gát a Nílus egyiptomi ágára épül. Ezzel megtorpedózzák a két alvízi állam, Szudán és Egyiptom biztonságos vízellátását, márpedig a Nílus hozamának 57%-a származik az etiópiai vízgyűjtő területekről, és Egyiptom vízellátásának közel 90%-át a folyó adja. Ha valahol elvesznek belőle, máshol nem marad.

A gigantomán elképzeléseknek megfelelően a gát akkora, hogy a mögötte lévő tározó feltöltése a Nílus teljes egyéves hozamával egyenlő mennyiségű vizet igényel, ezért több évet vesz igénybe. Mondanunk sem kell, hogy a tervek maradéktalan megvalósítása az egyiptomi mezőgazdaságot is veszélybe sodorja (Keresztes 2020). A gát ennek ellenére elkészült, már a tesztelése folyik (MTI/HVG 2020). 2020-ban az esős évszak beköszöntével, júliusban megkezdték a feltöltését, amitől a szudáni Kartúmban vízhiány keletkezett. Ez azonban Etiópiát nem akadályozta meg abban, hogy a rákövetkező évben folytassa a feltöltést (HVG 2021). Ezzel teljes egészében keresztülhúzza a mindössze tíz évvel korábban elkészült, vízgyűjtő alapú Nílus-könyv terveit és megállapításait,

amely még nemzetközi együttműködésben, alvízi-felvízi érdekek összeegyeztetésében gondolkodott (Awulachew et al. 2012).

Egyre több jel mutat arra, hogy az utóbbi években végleg megcsappant az Eufrátesz vízhozama is Irakban. Pedig Irak az ókori Mezopotámia területén fekszik, ami folyók közötti országot jelent. Az elnevezést a görögök adták a térségnek, ahol az Eufrátesz és a Tigris folyamoknak köszönhetően birodalmak tündököltek. A bőséges víz táplálhatta Babilonban a görög történetírók szerint valóban létezett Szemiramisz függőkertjét – az ókori világ hét csodájának egyikét –, és több kutató szerint a bibliai édenkert egyik lehetséges földrajzi megfelelője is a két híres folyó találkozásánál lehetett (Keresztes 2023). Ma – testvérfolyójával, a Tigrissel és magával Irakkal együtt – a pusztulás felé halad. Az arab országban a felmelegedés a globális átlag duplája, és 2050-re elérheti az 5 °C-ot, a homokviharok száma pedig az évi 300-at. A gyakran 50 °C körüli hőmérséklet Irak – és a Közel-Kelet – egyre több részét teszi élhetetlenné. Az elpárolgással a felszíni vizek vesztesége közel 15%-os. Az iraki termőföldek felét veszélyezteti a teljes kiszáradás. Az okok megegyeznek: a felvízi helyzetben lévő Törökország, Szíria és Irán nem igazán nézi, mennyi víz jut déli szomszédjuknak. Elpusztult a csodálatos mocsári arabok világa is, mivel a kiszáradás miatt a mocsárvidéket, a két folyó deltaterületét nem tudják már vízzel táplálni (Keresztes 2009). Korábban Szaddám Huszein néhai diktátor csapoltatta le a lápokat, ahol gyakran az ellenségei bujkáltak, a 2003-as bukását követő rehabilitációs évek után most a klímaválság teszi tönkre (Keresztes 2023).

Ázsia szívében Nepál festői fővárosa, Katmandu az ékes példája annak, hogyan halmozódnak a különféle tényezők lassan már tarthatatlanná váló helyzetté. Nepál igazából nem vízhiányos ország, a szubtrópusi monszun éghajlat rendkívül változatos vegetációt tesz lehetővé, és meglehetősen sok csapadékkal jár. Ám ha egy városnak majdnem 1,5 millió lakosa van, és ezek száma évente 14%-kal nő, a vízvezetékét az angol hódítók 1885-ben alkották meg, és azóta semmi korszerűsítésen nem esett át, akkor nem lehet csodálkozni azon, hogy a közös népi kutakon (a házak jó részében nincs vízvezeték) csak minden második nap hajnalban, mintegy másfél órán keresztül lehet vizet venni, aztán elfogy. A városi vízvezetékbe táplált életadó víz (egyébként nagyrészt a várost átszelő Bagmati-folyó vize) 40%-a egyszerűen elszivárog az ősöreg csöveken a talajba, még mielőtt rendeltetési helyét elérné (Gajurel 2002a). A város igyekszik magán úgy segíteni, ahogy tud, nem hiányzanak a nagyra törő, gigantikus vízügyi beruházások tervei itt sem, egyelőre azonban megelégedtek azzal, hogy a város ivóvizének mintegy egynegyedét adó Shivapuri vízgyűjtőt nemzeti parkká nyilvánították (Gajurel 2002b). Az országot romboló korrupció és a forrásoldal kezelésének elmaradása miatt a helyzet majdnem két évtizede jottányit sem változott (Bhusahl 2019).

Ám nem csak a szegény és fejlődő országok néznek nehézségek elé. Természetesnek nevezhető, de mégis ember indukálta szennyezés a tengerpartok mentén található talajvízkészletek sóssá válása azáltal, hogy a túlzott mértékű kitermelés következtében a tenger felől sós víz hatol be a vízadó rétegbe. Itt a mennyiség és minőség közvetlen összefüggésben van egymással, némi iróniával azt mondhatnánk, hogy a ma már elfeledett marxizmus kisebbik hősének, Engelsnek a mondása érvényesül: a mennyiség egy idő után minőségbe csap át. Florida geológiai szerkezete olyan, hogy a vízadó rétegek közlekednek a tengerrel, az emberek pedig mind a tengerparton akarnak élni. Ezért a tengerpart menti területekre hihetetlen nagy nyomás nehezedik a vízigény kielégítése érdekében. Az ész nélkül kipumpált édesvíz helyére sós víz áramlik, és ezzel új iparág születik: az elektrodialízissel, fordított ozmózissal működő víztisztító telepek milliárdos üzlete. Florida lakosai inkább fizetnek több dollárt néhány liter vízért, mint hogy lemondjanak kedvenc tengerpartjukról. Ma már, amikor a 16 millió lakos 93%-a ezekből a felszín alatti vízbázisokról kapja ivóvizét, nemcsak a talajvíz, de a mélyebb rétegvizek is „brakkosodnak", sóval telítődnek.

A gazdagok kényelme érdekében kétféle technikai megoldást dolgoztak ki a probléma megoldására. Vagy (nem is kevés) elektromos energia felhasználásával elektrodialízist végeznek, vagy a fordított ozmózis jelenségének felhasználásával félig áteresztő membránokon szűrik ki a vízből az ott jelen lévő sóképző ionokat, nátriumot, klórt, kalciumot és egyéb nemkívánatos, oldott, szennyező anyagokat. Ám a technika itt is csak álmegoldást jelent, már most jelentkeznek olyan gondok, amelyek a források kimerülését jelzik. Hiába a sós víz tisztítása, ha olyan nagy az igény, ami a pótlódás ütemét is túllépi. Az ezredfordulón egyre nehezebbé vált a tiszta és biztonságos ivóvíz biztosítása a folyók, tavak, források és mocsarak sérelme nélkül (Sutherland 2001). Azóta kiépítették a vízbázistároló és -visszanyerő rendszert, amely a nyáron fölös mennyiségben leeső csapadékot begyűjti, és télen, amikor az állam népessége a legnagyobb számban van jelen, visszasajtolja a vízadó rétegekbe, hogy kiszorítsa a beáramló sós tengervizet (Ruane 2018). Kérdés, hogy ilyen megoldásokat meddig lehet alkalmazni büntetés nélkül.

Annak ismeretében, hogy a vízfelhasználás 70%-a mezőgazdasági célú, egyértelműen következik, hogy a vízhiány egyúttal táplálékhiányt is jelent azokon a területeken, ahol azt a mezőgazdasági termékek előállítására használják. A jövő attól függ, hogyan sikerül a megújuló, hozzáférhető és hasznosítható készleteket kiaknázni. Egyes számítások szerint az ilyen készletek kihasználtsága globálisan már ma is 50% körüli, tehát elméletben sem nagyon vannak tartalékaink (Somlyódy 2018). Az elemzők és szakértők többsége a természetföldrajzi és társadalmi okokat sorolja a vízhiány kialakulásának magyarázatára. Én inkább a műszaki és természeti rendszerek közötti ellentmondásokra helyezem a hangsúlyt, és ebből a szemszögből elemzem ember és víz viszonyának problémáit.

## 3.3. A VÍZ „MINŐSÉGE”

### 3.3.1. A víz elhasználása és a minőség fogalma

Igen nagy baj az, hogy a felhasznált víz a legritkább esetben kerül vissza eredeti állapotában a természetes befogadóba: az emberi víz*fel*használás egyúttal a víz *el*használásával is jár. Nemcsak azért, mert nagy része a további felhasználás számára elvész, elpárolog, hanem mert ami megmarad, az összetételében meg is változik, olyan anyagok kerülnek bele, melyeknek nem kellene. A szennyeződéseknek alapvetően kétféle fajtáját különböztethetjük meg:

Az egyik természetes eredetű, hagyományos szerves hulladék (emberi és állati ürülék, mezőgazdasági melléktermék), amelynek elsősorban a mennyisége és sűrűsége a gond.

A másik az ipari folyamatok és az ott előállított termékek használata során keletkező hulladék (előbb-utóbb maga a termék is), amely a legtöbb esetben a természetben ismeretlen (műanyagok, mesterséges szerves vegyületek) vagy csak ritkán és nem ilyen közegben előforduló anyag (például cián), vagyis itt a minőség és az előfordulás helye a gond.

Akármelyik szennyeződésfajtáról van szó, hatása sokféle lehet: károsíthatja a befogadó víztestben (folyó, tó, tenger vagy talajnedvesség, talajvíz, sőt sajnos mostanában a rétegvíz is) zajló folyamatokat, élőt és élettelent egyaránt, és visszatérő bumerángként a legváltozatosabb formákban problémát okozhat nekünk magunknak is. Vízfelhasználásunkat ugyanis, akárcsak a mezőgazdaságot vagy a többi technikai rendszert, folyamatosan és végletesen jellemzi az elsőfajú hiba jelenléte. Akár a felszíni, akár a felszín alatti vizekkel kapcsolatos manipulációkról, akár a felhasznált víz sorsáról van szó, a probléma mindig ugyanaz: a műszaki megoldások újabb gondokat okoznak, amelyeket még újabb műszaki megoldásokkal orvosolnak, amelyek azonban megint újabb, nem várt káros hatásokkal járnak és így tovább. Eközben a kialakuló problémás helyzetek bonyolultsága és a műszaki megoldások méreteinek növekedése miatt a gondok léptéke is megnő: a ház körüli problémákból előbb település méretű, aztán regionális, országos, végül világméretű, bolygószintű nehézségek adódnak. A megoldásukra javasolt rendszerek pedig szinte törvényszerűen nemcsak bonyolultabbak, de ebből következően egyre drágábbak is.

Szó volt róla, hogy a víz „minősége” ember alkotta és nagyon viszonylagos fogalom, jó minőségű alatt általában a saját élettani folyamataink számára a legkedvezőbb összetételű vizet értjük. Ám ami az egyik víz számára érték, a másik számára lehet hátrány is. Például a tápanyagokban dús víz káros lehet tavakba történő bevezetés esetén, ezzel szemben előnyös lehet öntözésre. Fordítva, a tiszta desztillált víz méreg lehet valamely tó vagy folyótorkolat élővilága számára, vagyis minden a referenciaállapothoz és a szükségletekhez viszonyított

arányok függvénye. A számszerűsítés azért is nehéz, mivel túl sokféle fizikai, kémiai és biológiai jellemzőt szükséges figyelembe venni. Valamely folyó, tó vagy egy ország vizeinek aktuális és kívánatos állapotának meghatározása, illetve előírása túlnyomóan két felfogáson, az antropo- és az ökocentrikus közelítésen alapulhat (Somlyódy 2018).

A vízfelhasználást sokszor természetes szennyezések is nehezítik. Magyarországon Békés vármegyében van néhány talajvízkút, amelyekben természetes eredetű arzén található (Sugár 2015). Kimutatták, hogy a tüdőrák előfordulásának valószínűsége 30 μg/l As-koncentrációtól kezdve határozott növekedést mutat (Bellovits 2014). Ennek ellenére még 2018-ban is számos olyan település volt található a Dél-Alföldön, ahol a vezetékes víz minősége ivásra alkalmatlan (KSH 2018). Az ezredfordulón Bangladesben a technika megint visszaütött, és a legjobb szándék is visszájára fordult. A korábbi Kelet-Pakisztán népe a Gangesz és Brahmaputra deltájában értelemszerűen sokáig a felszíni vizekre hagyatkozott. Ám a nagy népsűrűség és a rossz higiéniai viszonyok miatt a szent folyók kevésbé szent, betegségeket okozó baktériumokkal fertőződtek. A nemzetközi segélyszervezetek ezért az 1970-es években csőkutak millióit mélyítették az ország területén, hogy egészséges ivóvizet adjanak a bengáliaknak. Nem sokkal később a talajvízben mérgező arzénszennyeződést fedeztek fel. Ettől kezdve csak öntözésre használták a mérgezett vizet. Az öntözővíz arzéntartalma azonban felhalmozódik a szegény ember fő eledelének számító rizs szemeiben, és mérgező mennyiség juthat még így is a szervezetükbe (Meharg 2002).

Az ilyen példák kirívóak. A vizek szennyeződését elsődlegesen mégis az ember által belejuttatott szennyező anyagok okozzák. A hetvenes évekig a fejlett országokban is nyakló nélkül eresztették bele a vizekbe, juttatták ki a talajra a legváltozatosabb mérgeket, amiket a vegyipar ki tudott találni, vagy amelyek az ipari, termelési folyamatok következtében keletkeztek. Ezeket az úgynevezett pontszerű szennyező forrásokat, amelyek helyhez kötötten jöttek létre, a megfelelő szabályozással viszonylag könnyen meg lehetett fogni. Még mindig megmaradtak azonban a diffúz talajvízszennyezés lehetőségei, amelyek elsődlegesen mezőgazdasági, bányászati, építőipari és nagyvárosi tevékenységek következtében alakulnak ki, és sokszor csak évtizedekkel a cselekmény után éreztetik hatásukat.

Ízelítőül lássunk néhány olyan tipikus, folyamatosan jelentkező szennyezési forrást, pontszerűt és diffúzat egyaránt, amelyek a felszíni, de különösen a felszín alatti vízbázisok minőségét veszélyeztetik. Szinte lehetetlen ellenük küzdeni, hiszen sok esetben magát a tevékenységet kellene megszüntetni, amelynek termékeként keletkeznek.

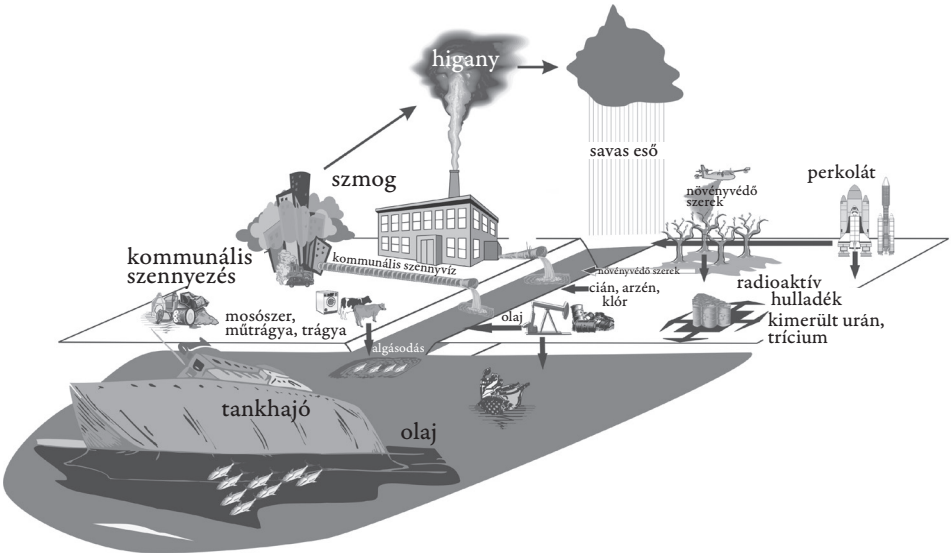
- Mezőgazdasági növényvédelmi és talajerőpótló tevékenységek: műtrágyázás (nitrogén-, foszforterhelés), hígtrágya alkalmazása (nitrogén, szerves vegyületek), növényvédőszerek (különösen a légi permetezés, amely nagy területeken sodródhat és bemosódik).

- Állattenyésztő telepekről kikerülő szennyeződések: alom, trágya, hígtrágya.
- Települési szennyeződések: szennyezett felületek, aszfalt, háztetők stb. esővel lemosása és elfolyása, a közterületeken alkalmazott vegyszerek, növényvédőszerek, utak sózása.
- Települési hulladékok, szikkasztórendszerek, szennyvíztisztítók, szennyvíziszap, műszaki védelemmel el nem látott hulladéklerakók csurgalékvize, tisztítatlan szennyvíz terítése.
- Ipari eredetű szennyezések: a bányászat, mind a mélyművelés, mind a külszíni fejtés jelentős mértékű talaj- és rétegvízszennyezéssel jár. Gyakorlatilag megoldhatatlan a föld alatti telepítésű és különböző rendeltetésű tartályok (az olajtárolástól a rakéta-üzemanyagig) és vezetékek (olaj, gáz, vegyipari vezetékek) szivárgásának, veszteségeinek elkerülése.

Londonban kiástak egy száznegyven éves gázvezetéket, ahol már csak az öntöttvas cső helyét, a lyukat sikerült megtalálni, körötte a tömörödött talaj vezette a gázt, a cső maga régen elkorrodált (Tony Fulton, személyes közlés 2003). Nagyon komoly problémát jelentenek a bányászati, ipari termelési tevékenység melléktermékeiből kialakított zagytárolók, amelyekben a zagy feldolgozása nem megoldott, ezért csak ott vannak, és időnként katasztrófákat okoznak, mint hazánkban Devecserben 2010-ben vagy 2019 elején Brazíliában. Az ipari kibocsátások a levegőbe szintén előbb-utóbb a talajon, majd a talajban, végül a vizekben kötnek ki (Grosvenor et al. 1993). Ritka esetben a természet teszi rendbe a dolgokat, egy amerikai kénbánya beomlásakor a savassá vált talajvizet olyan mikroorganizmusok vették kezelésbe, amelyek a ként és a jelen lévő nehézfémeket (rezet, vasat, nikkelt) a bioremediácónak nevezett folyamat révén veszélytelen vegyületekké alakítják át (ENS November 22, 2002). Néha a szennyezett felszíni vizeket úgy tisztítják meg, hogy mesterségesen talajvizet csinálnak belőlük, és a talajvízdúsításnak nevezett eljárással átszivattyúzzák egy talajrétegen (Láng 2002).

### 3.3.2. Az égő folyó

A tudósok szerte a világban évente átlagosan 4000 olyan új vegyületet szintetizálnak (Benetti et al. 2008), amelyek a természetben nem léteznek – ezért az élő rendszerek nem rendelkeznek ellenük semmilyen védekező mechanizmussal –, és az engedélyeztetések, ártalmatlansági vizsgálatok enyhén szólva sem megnyugtatók (Krimsky 2017). Egyedül az Egyesült Államokban 84 000 olyan vegyületről tudnak, amely elvileg kereskedelmi forgalomban lehet (GAO 2013). A világ legnagyobb adatbázisában 33 millió(!) szerves és szervetlen vegyület szerepel (Benetti et al. 2008). Persze nem mindegyik biológiailag aktív, ám a freonoknál láttuk (I. kötet), hogy nem kell feltétlenül közvetlen biológiai hatással rendelkezni ahhoz, hogy áttételesen súlyos környezeti, ökológiai következményekkel járjon egy vegyület elszabadulása. Az új anyagok meg a régi, jól beváltan mérgező szennyeződések előbb-utóbb megtalálják útjukat a vizekbe.




25. ábra. *A szennyezés forrásai (Grafika: Bánvölgyi Tamás)*

A felszíni vizek a felszín alattiaknál annyiban sokkal érzékenyebbek a szennyeződésekre, hogy azonnal és teljes mennyiségben befogadják azokat, míg a felszín alatti vizekig (a karsztvíz kivételével) csak a talajon keresztül, sokszor megszűrve, máskor átalakulva jut el a szennyezők egy része. Igaz, ha már eljutott, ott is marad jó ideig. Alapvetően kétféle szennyezés lehetséges, élő és élettelen, míg az utóbbi lehet szerves és szervetlen. Az előbbibe rendszerint a kórokozókat vagy az invazív, agresszív fajokat soroljuk. Európa folyóit és tavait a társadalom évszázadok óta sokféle célra használta és használja, ezek egyike sem mentes azoktól a mellékhatásoktól, amelyeket szennyezésnek szoktunk nevezni. Közvetlenül és közvetve, áttételesen, számos egyéb mechanizmussal kapcsolatok hálózatát alkotva egyaránt jelentkezik a felszíni vizek minőségének megváltozása. A folyók futásirányának és áramlási viszonyainak megváltoztatása következtében módosultak a víz kémiai és fizikai sajátosságai is, és nehezebben tudnak ellenállni az őket érő terheléseknek, akár szerves, akár szervetlen anyagról van szó. A szennyezés forrásai között talán elsőként kell megemlíteni a nagy mennyiségű szerves anyagot, amely ipari és kommunális szennyvíz formájában, tisztítatlanul vagy csak részben tisztítva ömlik a vizekbe.

Az el nem bomló, főként ipari eredetű nehézfémek (higany, ólom, cink és kadmium), valamint a nehezen bomló szerves vegyületek (növényvédő szerek, rágcsálóirtók és egyéb mérgek) mindenütt felhalmozódnak, elsősorban a tengerpartok mentén, ahová a folyók behordják őket. Nem elhanyagolható veszélyforrást jelentenek a tengerbe süllyesztett radioaktív hulladékok meg a tankhajókatasztrófák, amelyek sokszor időzített bombának minősülnek, mert belőlük

az olaj még évtizedek múlva is mérgező, fojtó lepelként emelkedik a felszínre. A Spanyolország partjainál 2002. november 19-én elsüllyedt Prestige tankhajó sűrű, nehéz olaja 3500 méter mélyen van bezárva a hajó orrába és tatjába, de folyamatosan szivárog, és várhatóan 20-40 év múlva a hajó maga is annyira elrozsdásodik, hogy kiszabadul belőle az olaj: igazi időzített bomba (Ariza 2003). A korábbi olajszennyeződésekből tudjuk, hogy azok hatása nagyon elhúzódó lehet. A hírhedtté vált alaszkai hajókatasztrófa, az Exxon Valdez tankhajóból kiömlő olaj nagyon perzisztensnek bizonyult, még 15 évvel később is mérgezte a környező élővilágot (ENS December 19, 2003). A British Petrol olajvállalat 2010-ben felrobbant Deepwater Horizon olajkútjának katasztrófája a Mexikói-öbölben a part menti országok fövenyét és sekélytengeri vizeit 1300 mérföld hosszúságban szennyezte el. Bár néhány évvel a katasztrófa után a tudósok megnyugvással látták, hogy a víz és a part gyorsabban tisztult, mint remélték, újabban azok a mikroorganizmusok kerültek előtérbe, amelyek a tengeri biodiverzitás alapját adják, és a táplálékláncalján állva könnyen végzetes következményekkel járó változásokat okozhatnak az öböl élővilágában (Millman 2018).

*A világ hülyéi* című könyv szerint az emberiség leküzdhetetlen vágyat érez az iránt, hogy a fölösleges hulladékot a következmények mérlegelése nélkül kihajítsa a természetbe (Phillips 2020). Ennek eredményeként 1969-ben egy meleg nyári délelőttön kigyulladt a Cuyahoga-folyó. Úgy tudjuk, hogy a víz nem ég, de a Cleveland városát átszelő folyó – az ország több felszíni vizéhez hasonlóan – mégis lángolt: a 200 éven keresztül belé öntött ipari melléktermékek és olajszármazékok megtették a hatásukat.

A globális hatások valóban bolygószintűek. Kínában a kétezres évek elején az energetikai célú szénégetés miatt a szénben található higany is a levegőbe került. A higany elemi formában gázként viselkedik, bekerül az atmoszféra ciklusaiba, és így többek között az uralkodó szelekkel elérkezik az óceán másik partjára. Ezzel Kína a világ teljes légköri higanyszennyezésének 10%-át Amerikába exportálja. A fűtési energiaigény ózont is termel Kínában, a közlekedés okozta városi szmog pedig további ózonmennyiségeket Kaliforniában. Az ózon az elemi higanyt elektromos töltéssel rendelkező ionos formába alakítja át. Így már hozzá tud tapadni a vízcseppekhez, és le is esik. Az Egyesült Államok területére, ahol a felszíni vizekbe, majd onnan a táplálékláncba került. Már a levegőben is háromszorosa lett a koncentrációja az ipari termelés előtti szintnek, de ez tovább növekedett az ózon indukálta oxidáció révén, majd feldúsult a táplálékláncon. Mire egyes halfajokig ért, koncentrációja elegendő lett mérgezési tünetek kiváltására emberen is, ha az eme halfajokat fogyasztja (Steding et al. 2002).

### 3.3.3. A zöldalga

A *Termő televény* kötetben már szó volt róla, hogy a mezőgazdaság hagyományosan a növénytermesztés és az állattenyésztés szimbiózisát jelentette (Borsos

2018). Az iparszerű növénytermesztésben és állattartásban azonban már teljesen elválik a két rendszer egymástól, és míg az egyik oldalon műtrágyák bevitelével mesterségesen kell gondoskodni a talajerő pótlásáról, a másikon viszont hatalmas problémát jelent az állatok tartásából származó trágya „kezelése" (különösen mióta feltalálták a vízöblítéses WC-vel analóg, hígtrágyás tartástechnológiát). Így tehát a korábban értékes erőforrás mint a nitrogén és foszfor elsődleges forrása kerül a vizekbe, igen nagy gondokat okozva. Los Angelesben annyi klórt tesznek bele a vízbe a szarvasmarhatartás következtében belekerülő szerves anyagok kiküszöbölésére, hogy maga a klór válik veszélyessé, nem is beszélve az arzénről, amely elősegíti a rák kifejlődését (Olson 2002).

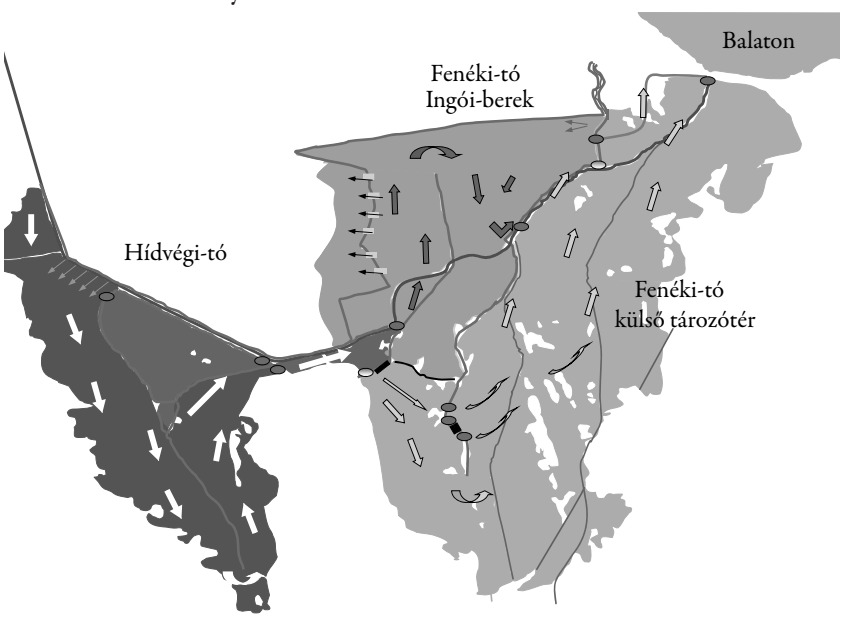
A termőföldekre kijuttatott műtrágya és hígtrágya lefolyásából eredő nitrogén- (nagy részben nitrát) és foszforszennyezés az eutrofizáció elindítója lehet. A háttérszennyezettség (0,1 mg/l) tíz-, sőt százszorosa sem ritka az aktív mezőgazdasággal rendelkező vidékeken. Ráadásul bebizonyosodott, hogy ez a bizonyos háttérszennyezettség is már emberi hatások következménye, természetes körülmények között a folyóvizek nitráttartalma egészen alacsony, nagyon kevés szervetlen, ásványi nitrogén hagyja el a területet, a legfontosabb forrás a szerves vegyületekben kötött nitrogén (Perakis és Hedin 2002).

A szilárd szemcsés formában kijuttatott műtrágya egyenetlenül oszlik el a táblákon. Ahol a növények jobban növekednek, oda aránytalanul több jutott, és már fel sem tudják venni: kimosódik a hatóanyag, és bekerül a talajba, onnan a talajvízbe. Kémiai átalakulás is lejátszódik, és leggyakrabban nitrát, abból nitrit keletkezik, amely az emberi egészségre, különösen a kisgyermekekére, igen veszélyes. Az ilyen víz nem olyan, mint a biológiailag szennyezett víz, hiába forraljuk, az ionokat nem tudjuk eltávolítani belőle (Kerényi 2003). Magyarországon a nyolcvanas években már több mint 800 községnek szállították a zacskós vizet, ma pedig szinte sehol nem iható a talajvíz. A döbbenetes az, hogy ennek orvoslására az égvilágon semmit nem tesznek. Az előrefelé menekülés jegyében a rétegvízkutakra épülő vezetékes vízellátás megteremtése a cél, ami a mondott okoknál fogva nem megoldás, csak a problémát odázza el. Szintén műtrágyákból, a szennyvizekben pedig a mosószerekből és egyéb szerves anyagokból ered a szerves foszfor, ami szintén az algásodás limitáló tényezője, tehát ha sok van belőle, nem áll meg a növekedés (Probáld 2000).

A felszíni vizekben a túlzott foszfor- és nitrogénterhelés az algák elszaporodásához vezet. Az édesvizekben az algaszám növekedésével az algasejtek árnyékoló hatásának köszönhetően egyre sötétebbé válik a víz, és a mederben gyökerező vízinövények nem jutnak elegendő fényhez. A kipusztuló növények a folyó gerinctelen és halfaunájára egyaránt hatással vannak, mert azok nem jutnak a továbbiakban táplálékhoz és búvóhelyhez. Ehhez hasonlóan a folyótorkolatoknál az algaburjánzás megnöveli a tengerpart vizének turbiditását, és hozzájárul a vízből kiszűrt táplálékon élő férgek és kagylók elszaporodásához. Ezek magas száma viszont a

korallszirtek élővilágára jelent veszélyt (Harrison és Pearce 2000). A nagy mennyiségű alga pusztulásakor anaerob lebomlásuknak a vízben oldott oxigén mennyiségének csökkenése a következménye. Oxigén nélkül a vízi élet nem marad meg, és az eredmény: az élővízből halott víz lesz (lásd a 4. színes ábrát).

A Balatonban már a negyvenes években megfigyelhető volt az ott honos egyik moszatféleség, a fecskemoszat *(Seratium hirundinella)* megfogyatkozása, mint azt a Balaton szerelmesei, Entz Géza és Sebestyén Olga (1942) kimutatták. Helyette egy jövevény szaporodott el, egy kékalgaféleség, az Afrikából Ausztrálián és Ázsián át Európába eljutott *Cylindrospermopsis raciborskii*. E lény szembetűnő tulajdonsága, hogy képes arra, amire csak nagyon kevés növény: megkötni a levegő nitrogénjét. Így a nitrogén mint a foszfor helyére lépő limitáló tényező megszűnt létezni, és ebben a konkrét esetben óriási méretű algaszaporodás (algavirágzás) indult el a Keszthelyi-öbölben (Gorzó 1985). A tavak különösen alkalmasak az eutrofizációra, hiszen ha van is lefolyásuk, az csak a víz felső rétegeire terjed ki, és a mélyben képződő üledék, amely csak ritkán jut a felszínre, természetes tápanyagcsapdát alkot. Ezért heroikus küzdelem kezdődött, hogy a tóba kerülő foszfor mennyiségét csökkentsék: egyrészt kiépült a tó körül a szennyvízelvezetés, megtiltották a műtárgyázást, és megkezdődött a Kis-Balaton rehabilitálása, vagyis ismét átvezették a Zala vizét a Hidvégi-tavon, ahol a foszfor és nitrogén kiülepedett, és az alga kedvére virágozhatott. Innen azonban átkerült a Kis-Balaton másik részére, az Ingói-berekbe, ahol a sűrű nádasban az algasejtek nem kaptak fényt és elpusztultak. Ezzel viszont a védett láp, Matula és Tutajos birodalma került veszélybe.




26. ábra. *A Kis-Balaton védelmi rendszere (Forrás: http://tinyurl.com/y9dmwpnp)*

A végén sok-sok műszaki beavatkozás meg rendeletek, szabályozások (például a hírhedt építési tilalom) eredményeként a kilencvenes évekre visszatért a hetvenes években teljesen kiveszett fecskemoszat és a Kis-Balaton ökológiai egyensúlya (Szabó 2017), valamint a 2010-es évek közepére a Balaton víztömege is (Somlyódy 2018). A két szervezet a Balaton esetében indikátornövénynek tekintendő, az egyik a kielégítő táplálékellátottságot, a másik az eutrofizált állapotot és foszfortelítettséget jelzi. A kékalga egyúttal az ökológiai rendszerek dinamizmusának is példája, hiszen elég nagy utat tett meg trópusi hazájától, mire a mi lapos magyar tengerünkben bajt okozott.

Mire a tavakon és a széles, nagy folyókon, amelyek ugyanúgy ki vannak téve az eutrofizáció veszélyének, túljutottunk, következnek a beltengerek. A Duna vizében 1960 óta tízszeresére nőtt az említett anyagok mennyisége, komoly változást okozva a Fekete-tenger lassan cserélődő vizében. Az algák önmagukban is lehetnek mérgezők, de az általuk okozott oxigénhiány a fauna legtöbb elemének kihalásához vezet, és helyükbe a kiképzést jól tűrő medúzák elszaporodása lép: az ökoszisztéma alkalmazkodik a megváltozott viszonyokhoz (Probáld 2000). A 20. század végén a helyi problémák az országos, regionális szintről a nemzetközi, több országot átfogó térségek szintjére értek, amelyek rendszerint a felszíni vizek vízgyűjtő területeivel vannak összefüggésben. Egyedül a Duna vízgyűjtője kilenc Magyarországnyi területet, 800 000 $km^2$-t ölel fel, bármely változtatás tehát nagyon komoly szervezést igényel. Mint kiderült, a tengerek is elkezdtek eutrofizálódni, ám itt nem annyira a foszfor, inkább a nitrogén játszotta a fő szerepet.

Amikor az elszaporodott algák hatalmas mennyiségei gyűlnek össze a vizekben, szabad szemmel, sőt repülőgépről is jól látható, hatalmas területekre kiterjedő, sötét foltok jönnek létre, ez az úgynevezett algavirágzás. A Balti-tengeren a folyamatos eutrofizáció következménye ezenkívül a tengerfenék faunájának eltűnése és a halállomány lecsökkenése is (Luik 2011) (lásd az 5. színes ábrát).

Ám a technika máris kész a következő műszaki megoldással: a szennyvíztisztítókban biológiai denitrifikációt hajtanak végre, biotechnológiai és kolloidkémiai módszerekkel oxigénhiányos és nitrátdús környezetben a szennyvíz nitrogéntartalmát gázzá alakítják, amely elszökik a légkörbe. A mezőgazdaságban pedig a nitrogénterhelés csökkentését az intenzív módszereken mit sem változtatva molekuláris tenyésztési genetikával, illetve génsebészettel kívánják megoldani (Zebarth et al. 2009).

Ismeretes az is, hogy a lépték növekedésével egyenes arányban nő az az idő, ameddig a szennyezett víz a befogadóban tartózkodik. Ez azt jelenti, hogy míg a háztartásokat szinte azonnal elhagyja a keletkezett szennyvíz, addig a városban már napokig kering az alagutakban és a szennyvíztisztítókban, a folyókban akár egy hónapot is eltölthet, a tavakban átlag tíz évet, ha pedig kikerül a nyílt óceánba, ott a tartózkodási ideje átlagosan 3000 év. Az USA középnyugati

és déli mezőgazdasági vidékeiről a nagy folyókba jutó műtrágyaszennyezés miatt a Mexikói-öbölben található egy hatalmas kiterjedésű „holt zóna”, ahol a műtrágyamaradványokon elszaporodott algák zabálták fel az összes oxigént, magukon kívül gyakorlatilag mindent kipusztítva a környéken (Phillips 2020: 50).

### 3.3.4. A kék kutya

A szennyezések néha bizarr eseményekhez vezetnek. Mumbai (korábban Bombay) utcáin egy nap kék bőrű, kék szőrű kóbor kutyák jelentek meg. Bár látszólag semmi bajuk, valójában a környék gyáraiból a város felszíni vizeibe vezetett festékek színezik el a bőrüket, és feltételezhetően mérgezik is őket (Inhabitat 2017).

A szocializmus ideje alatt Kelet-Európa különösen notórius volt a vízszennyezési kérdésekben. 1972-ben fél Pozsony vízellátását elzárták. Hónapokig nem folyt víz a csapokból, mert olajat fedeztek fel a dunai csápos kutak vizében. Mint kiderült, a szintén a Duna mellett települt legnagyobb szlovák olajfinomító, a Slovnaft eregette az olajat és olajtermékeket a talajba, amely onnan Közép-Európa egyik legnagyobb talajvízkészletét, a kisalföldi talajvizet szennyezte. Monitoringra volt szükség, és szivattyús kutakat kellett az intézmény köré telepíteni, hogy a beszivárgó olajnak legalább egy részét el tudják távolítani (Thompson 1991).

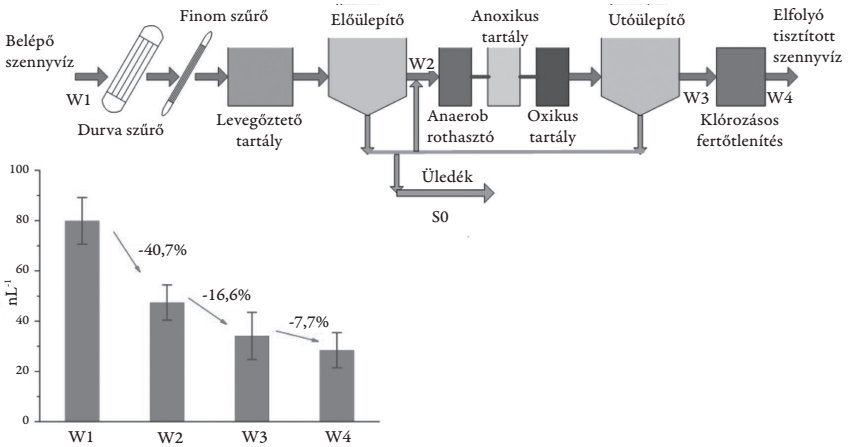
A tiszta, gyöngyöző ciánt eddig csak Agatha Christie krimijeiből ismertük, de 2000-ben kénytelenek voltunk vele megismerkedni közelebbről is. Egy nagybányai üzemből az aranybányászat melléktermékeként 100 000 $m^3$ tömény, cianidtartalmú zagy került a Lápos nevű patakba, amely a Szamoson keresztül a Tiszába és ezzel hazánkba hozta azt (Tóth 2002). Bár a magas vízállás miatt az esemény viszonylag kevés kárt okozott, nem biztos, hogy máskor is ilyen szerencsések leszünk.

Az utóbbi időben kapott nagyobb figyelmet egy új típusú szennyezési forma, az úgynevezett mikroszennyezők. Ezek közül is a mikroműanyagok. A kutatók rájöttek, hogy a műanyagok, amelyeket éppen semlegességük miatt sokáig ártalmatlannak tartottak, nem csak a nagy tengeri emlősöket veszélyeztetik, amikor azok belegabalyodnak a hálókba, vagy a madarakat, amelyek mohón bekapkodják őket. Habár kémiailag valóban stabilak, fizikai behatások hatására, akárcsak a természeti anyagok, szintén elaprózódnak, egészen addig, míg mikroszkopikus méretű részecskék nem lesznek belőlük. Ezek a részecskék a világ minden részére eljutnak, akárcsak a kémiailag stabil vegyi anyagok. A környezetbe kerülő, hatalmas mennyiségű műanyagból az élőlények szervezetébe káros vegyületek szivárognak. Ez már önmagában is súlyos probléma, de a mikroműanyagok a környezeti előfordulásuknál jóval koncentráltabb formában juttatják a szennyezőanyagokat az élőlények szervezetébe. Az elmúlt években már nemcsak az óceánokban és az ott élő halak, kagylók emésztőrendszerében találtak mikroműanyagot, hanem a folyókban, tavakban, sőt a szennyvíztisztító telepeken is. Még a Mariana-árok fenekén is megtalálták őket (Gibbens 2018).

Több tanulmány is a divatipart jelöli meg a mikroműanyag-szennyezés fő forrásaként: egyes szakértők szerint a szintetikus alapanyagú ruhák mosásából származó mikroműanyagok, vagyis az 5 mm-nél kisebb műanyagok teszik ki az óceánok mikroműanyag-szennyezésének 35%-át. A több mint 50 millió tonnányi megtermelt ruha kétharmada szintetikus anyagból, nejlonból, poliészterből vagy akrilszálból készül. Az eleve mikroméretűre gyártott, elsődleges mikroműanyagok környezetbe kerülését könnyebb megakadályozni, hiszen eltekinthetnek a használatuktól a gyártók. A ruhák esetében viszont másodlagos mikroműanyagokról beszélhetünk: a mosás során fizikai és kémiai hatások révén apró darabok töredeznek le a szintetikus szálról, amelyek így a szennyvízbe kerülnek. Ezek egy része a kisebb, akár 1-10 mikrométer alatti mérettartományba esik, ahol a mikroműanyagok még nagyobb egészségügyi kockázatot jelenthetnek, és még a megbízható kimutatásuk sem megoldott (Dobos 2020).

Aktívan megköthetik a különféle vegyszereket, és az élelmiszerláncban feldúsulva akár a tányérunkra is eljuthatnak. A közönséges szennyvíztisztítási megoldások nem szűrik ki őket éppen apró méretük, semleges kémiai és biológiai viselkedésük miatt. Elzárják a fényt és az oxigént a vízben élő élőlényektől, az egyedek pusztulását, a biodiverzitás megváltozását okozzák, és a vízbázisokba is bejuthatnak (Dobó 2018). Már a Tisza magyarországi szakaszán is jelentős a szennyeződés, amely főként a mellékfolyókból, Kárpátaljáról és a Maroson érkezik (Újhelyi 2019, MTI 2020). A feltörekvő Kína különösen érintett ebben az ügyben, a világ egyik legnagyobb műanyaggyártója, következésképpen édesvizeiben és tengereiben mindenütt megtalálhatók a mikroszennyezők, amelyek biológiai és ökotoxikológiai hatásaira még csak most kezdik kidolgozni a megfelelő kimutatási módszereket (Zhang et al. 2018). A szennyvíztisztítókból bocsátják ki az élővizekbe a mikroműanyagok jó részét. Mindezt annak ellenére, hogy nagy részük (64%) a tisztítási eljárás során kiülepszik, és a szennyvíziszapba kerül (ahol szintén csinálni kellene vele valamit). Az eredeti források a háztartási mosógépből, a polimeriparból, valamint a kozmetikai termékekből származnak. A megfigyelt szennyezők több mint fele kémiailag poliamid (Xiaoning et al. 2019).

Számos olyan további forrása lehet a vízszennyezésnek, amelynek kizárólagosan vagy majdnem kizárólagosan mi vagyunk az okozói. Az elsőfajú hiba logikájának megfelelően a könnyen kiirtható és kontrollálható kórokozók után olyan parazitákkal és vírusokkal szennyezett szennyvíz merül fel forrásként, amellyel már nem olyan könnyű elbánni. Ezek természetes létezők, csak mi dúsítjuk fel vagy bátorítjuk őket. Ám ezen túl rengeteg olyan anyag van, ami új a környezetben. Háztartási vegyszerek, kozmetikumok, gyógyszermaradványok és hormonhatású anyagok szerepelnek a listán, és akkor még nem beszéltünk az antibiotikumokról, amelyek a vizeken keresztül ugyanúgy bejuthatnak a szervezetünkbe, mint az állati termékek révén (Vargha 2018). Csak most kezdik kutatni, hogy




27. ábra. *A mikroműanyagok eltávolítása hagyományos szennyvíztisztítás során (Forrás: Xiaoning et al. 2019)*

még a legkiválóbb eredményekkel dicsekedő vizekben, például a Balatonban is vannak veszélyes gyógyszermaradványok. Ezek mikroszennyezések ugyan, ám miután biológiailag nagyon aktív anyagok, a kockázatot nem lehet eléggé hangsúlyozni. Sok szó esik a belső elválasztású mirigyek hormonjainak működését hasonló kémiai szerkezetük révén megzavaró, úgynevezett endokrin diszruptorok (EDC) szerepéről, amelyek nemcsak gyógyszerek, de növényvédőszerek, műanyagok is lehetnek. Ezek eltávolítása a mai napig sem teljesen megoldott, ezért a szennyvíztisztítók elvileg tiszta vizében is ott vannak. A Balatonban egy vizsgálat keretében 134 gyógyszerhatóanyagot kerestek – és 69-et meg is találtak (Sarkadi 2020).

A világ más tájain ennél sokkal, de sokkal lazábban veszik ezeket a dolgokat. Indiában például Haidarábad városában 150 gyógyszergyár önti válogatás nélkül az antibiotikumot tartalmazó szennyvizét a felszíni vizekbe, nagy hatékonysággal állítva ezzel elő olyan szuperbaktériumokat, amelyek aztán semmilyen gyógyszeres kezelésre nem reagálnak, mert már teljesen ellenállókká lettek a környezeti antibiotikum nyújtotta kiképzés miatt. A cégek természetesen zsigerből tagadják, hogy bármi is kijutna tőlük, de a szennyvizüket nem engedik független szakértőkkel megvizsgáltatni. Ha azt hinnénk, ez legyen az indiaiak gondja, nagyon tévedünk. Különféle vizsgálatok szerint az Indiát megjárt utazók 90%-a hordoz ilyen multirezisztens baktériumokat, amelyek halálossá válhatnak, ha az illető valami mással megfertőződik, vagy olyan embertársával kerül kapcsolatba, akinek gyenge az immunrendszere, vagy nyílt sebe van. És hogy a kör bezáruljon, a nagy gyógyszergyártó világcégek nem érdekeltek új antibiotikus hatással rendelkező molekulák kifejlesztésében, mert az sokba kerül, így aztán az ilyen betegeknek végképp nincs mit adni, ha megvan a baj (Illényi 2019).

Az ilyen veszélyek felmérésére végzett kutatások egyelőre vegyes képet mutatnak. A holland ivóvízben azt vizsgálták, hogy az ott minimális mennyiségben megtalálható különféle gyógyszermaradványok milyen eséllyel okozhatnak közegészségügyi gondokat, de a szerzők meglátása szerint ez a veszély kicsi (Houtman et al. 2014). Mások már nem ennyire derűlátók, szerintük nem árt vigyázni: csak bizonyos anyagokat tudunk mérni, a különféle vegyületek egymásra is hatással lehetnek, és a különleges hatású (például hormonjellegű) készítményekre alkalmazott, hagyományos biztonsági tényezők nem feltétlenül nyújtanak megnyugtató eredményt a kockázatokkal szemben. Ugyanakkor az „elfogadható napi bevitel" vagy a „nem kimutatható káros hatás" eléggé tudománytalan fogalmait általában nem kérdőjelezik meg (Derksen és ter Laak 2015).

Egy szerbiai vizsgálatban például a vizsgált növényvédő szerek 60%-át megtalálták a Duna vizében, a talajvízben és főleg a folyami üledékekben (Radovic et al. 2015). Hosszú távon a vízben jelen lévő mikrobiológiai szennyezők összetétele is változik, van olyan, amely kifejezetten a klórt szereti, szezonálisan ingadozik, és a távolsággal arányosan válik egyre változatosabbá (Potgietert et al. 2018). Egyelőre nem tudjuk azt sem, hogy a minimális antibiotikum jelenléte nem indukál-e fokozott rezisztenciát ezekben az élőlényekben. Ilyen és ehhez hasonló okokból döntöttek úgy az illetékesek, hogy Budapest ivóvízbázisait megvizsgálják az újonnan felismert kockázatok jellemzése érdekében (Vargha 2018). Az első eredmények nem túl biztatók.

Két nagy vízmű mintegy 2 millió embert lát el parti szűrésű ivóvízzel Budapesten és környékén. Ez azt jelenti, hogy a régióban az ivóvíz mennyiségének nagyjából a 90%-a a folyó közelébe telepített csápos kutakon keresztül a Dunából származik. A víz természetes szűrését pleisztocén kori (ez a földtörténeti kor 2,5 millió évvel ezelőtt kezdődött, és nagyjából 12 000 évvel ezelőtt ért véget) kavics és homokréteg végzi. Magyar kutatók azt vizsgálták, mennyire biztonságos ez a forrás. Hát... nem nagyon. A Duna fővárosi szakaszán 52 féle gyógyszerhatóanyag jelenlétét tudták kimutatni a folyó vizéből, amelyek közül 32 az ivóvízbe is bekerült. Találtak a Duna vizében különböző hormonokat is. Messze a legtöbb közülük a női fogamzásgátló tablettákban használatos ösztrogén. Jelenlétét a minták 42%-ában mutatták ki, átlagosan 0,32 ng/liter koncentrációban. Az antibiotikumokat még nem is vizsgálták (Erdősi 2020). Pedig az utóbbi évtizedek egyik legveszélyesebb, magunk terjesztette veszélyforrása az antibiotikumok elleni rezisztencia. A szennyvíztisztító telepek kiváló melegágyai a rezisztens kórokozók kialakulásának, még egy olyan forrásunk van tehát, ahonnan a kórházak és állati eredetű termékek után beszerezhetünk egy mindenféle gyógyszeres kezelésnek ellenálló fertőzést (Barancheshme és Munir 2019).

Ezekből az eredményekből két következtetés vonható le. A parti szűrésű kutak valóban viszonylag jól működő természetes szűrőközegek, hiszen húszféle anyagot sikeresen kiszűrnek, viszont ennél sokkal fontosabb következtetés, hogy

még így sem biztonságosak. A környezeti mikroszennyezők egyre nagyobb mennyiségének vagyunk kitéve, és fogalmunk sincs róla, mi minden következményekkel jár ez azokon túl, amiket kezdünk már sejteni (termékenység csökkenése, szaporodásbiológiai zavarok, daganatos és egyéb megbetegedések, általános szellemi képességek károsítása stb.). Felmerül a kérdés, hogy mi történik a kiszűrt anyagokkal. A vizsgálatok szerint nyáron nagyobb a szűrés hatékonysága, tehát valószínű, hogy legalábbis egyes gyógyszerek esetében nem fizikai szűrésről, hanem mikroorganizmusok okozta bontásról van szó, ami már megnyugtatóbban hangzik (Kondor et al. 2020).

Vannak ígéretes próbálkozások a magunk okozta probléma megoldására. Egy új rendszerű fotoreaktor 185 és 254 nm hullámhosszon sugárzó, kis nyomású higanylámpa segítségével bontja a vizet, ezzel folyamatosan ózont állít elő benne. Az ózon oxidálja a mikroszennyezőket, míg az oxidációs melléktermékeket granulált aktívszén-szűrő távolítja el. A kísérleti stádiumban lévő magyar találmány a vizsgált tíz gyógyszermolekulát 95-100% hatékonysággal tudta megsemmisíteni, míg a baktériumok hatástalanításában 99,9%-os hatásfokot ért el gyakorlatilag toxikus melléktermékek keletkezése nélkül (Záray 2020).

A palackos vizet forgalmazó cégek reklámjaikban azt igyekeznek bizonyítani, hogy a csapvíz ihatatlan, ezért jobb, ha az ő terméküket vesszük meg. Nagy-Britannia területén az egészségügyi hatóságok által hivatalosan engedélyezett ivóvízben nagy mennyiségű (500 mg/liter) oldott szilárd részecske van, ami a legváltozatosabb anyagokból tevődhet össze a nehézfémektől a homokig. A mérések szerint még a palackozott vizek is sok mindent tartalmaznak, amit nem kellene. A megoldás, állítják a reklámok, a fordított ozmózis és ionmentesítés kombinációjára épülő víztisztítási eljárás, ami aztán mindent kiszűr.[4] Csakhogy akkor mi marad?

A palackozott vizet egyébként a világ egyik legnagyobb üzleteként is fel lehet fogni. Lassan arra való hivatkozással, hogy a csapvíz egészségtelen, palackozott vizet árul a Coca-Colától kezdve a Pepsi Coláig minden nagy gyártó. Csakhogy az ezekre vonatkozó szabványok jottányit sem térnek el a csapvízre kötelező előírásoktól. Sőt! A Natural Resources Defence Council környezetvédelmi szervezet felmérése szerint az esetek 18%-ában mikrobiológiai tisztaságuk még a csapvízre kötelező értéket sem éri el, egyötödük pedig szintetikus szerves vegyületeket (toluol, xilol) tartalmazott. A gyártók ugyanis gyakorlatilag csapvizet árulnak palackozva – sokszoros áron. Egy kaliforniai étteremben átlagosan hét dollárba (1600 forint!) kerül egy-egy üveg L'eau de robinet (franciául: csapvíz), Agua de Culo (spanyolul: szamarak vize) és Amazone („az esőerdők természetes szűrőrendszerén megtisztult” mennyei nedű), amelyek forrása a megfigyelők jelentése szerint kivétel nélkül az étterem hátsó kijáratánál elhelyezett kerti csap... (Shermer 2003).

[4] „How pure is the water you drink?” A Pure $H_2O$ Company reklámfüzetének anyagából.

## 3.4. SZENNYVÍZ-ODÜSSZEIA

*– Sire – szólt a belügyminiszter Napóleonhoz –, tegnap láttam birodalmának legbátrabb emberét.*
*– Ki az az ember?* [...] *Mit csinált?* [...]
*– Megjárta Párizs szennycsatornáját.*
Victor Hugo: *A nyomorultak*
(idézi: Juhász 2008)

### 3.4.1. Kezdetben vala az árnyékszék

Az említett szennyezések közül sok olyat találunk, ami annak ellenére jut el az élővizekbe és a környezetbe, hogy a technológia megtesz minden tőle telhető erőfeszítést ennek megakadályozására: az elszennyezett vizet összegyűjtik, és több lépésben kezelésnek vetik alá. Meghatározása alapján a *szennyvíz* fogalma számottevően eltér a természetes vizektől. Gyakoriak benne a kórokozók, az ipari, háztartási és mezőgazdasági célokra „elhasznált" közeg. A különböző szerves és szervetlen szennyezők és növényi tápanyagok nagy koncentrációban, „besűrűsödve" vannak jelen. A társadalom által használt bármely anyag előbb vagy utóbb kimutatható benne (Somlyódy 2018: 21). A szennyvíztisztítás célja a minőségi paraméterek javítása, egy úgynevezett ökológiai vízminőség elérése. Hogy ez csak a legritkább esetben sikerül, annak megint rendszerelméleti okai vannak.

A szennyvíz kultúrtörténete az elsőfajú hibák sorozata. Legalább három-négy lépésben kellett magunkat ismét és ismét korrigálnunk. Az első ilyen hiba – higiéniai és vízgazdálkodási értelemben – a középkor zsúfolt városainak kialakulása volt. Érdekes módon a történelemben volt egy „szennyvízaranykor", mikor az ókorban kialakult, fejlettebb kultúrák legtöbbje gondoskodott róla, hogy az elhasznált víz visszakerüljön oda, ahonnan vétetett. A települési csatornázás első régészeti leletei az Indus-völgyi Mohendzso Daro és Harappa városokból, i. e. 3-4000 évvel ezelőttről származnak. Krétán i. e. 2000 körül szintén vezetékes vízellátással, szennyvíz- és csapadékvíz-elvezetéssel ellátott palotaegyütteseket építettek. Rómában a hirtelen megnőtt népesség miatt már gondot okozott a szennyvíz, különösen azért, mert ők találták fel a közműollót: vízvezetékeik az i. e. 6–7. században megépültek, de a szennyvízcsatornákra Julius Caesarig kellett várni. Ezek a vízvezetékek nem rendelkeztek elzáró csapokkal, a víz folyamatosan áramlott, így a szennyvízcsatorna tisztítására csak át kellett azt irányítani (Juhász 2008).

Jó okunk van arra gondolni, hogy a Római Birodalom bukása után és a szellemi hanyatlás korában egyáltalán nem volt semmilyen csatornázás és vezetékes vízel-

látás a kialakuló középkori városokban, nem csoda hát, ha az egyéb okok – higiéniai feltételek hiánya, zsúfoltság és háborúk – miatt a középkor a nagyszabású járványok koraként vonult be a történelembe. Pedig önmagában a csatorna hiánya még nem feltétlenül okoz gondot. A népesség sűrűségétől, a geológiai és talajvízviszonyoktól függően a kert végébe ásott árnyékszék tartalma csak akkor hígult fel, ha egy nagy eső beleömlött a gödörbe. A körötte lévő talaj rendszerint elszikkasztotta az ürülék nedvességtartalmát, a szárazanyag pedig a félig aerob viszonyok között lebomlott. Persze a városokban egymás hegyére-hátára zsúfolódott emberek esetében ez a megoldás nem működött. De jómagam még 1987-ben is úgy jártam Szíriában, hogy a beduin faluban az árnyékszék holléte iránti kérdésemre válaszul kezembe nyomtak egy kecses kis vizeskorsót, és kimutattak a falu mögötti pusztaságba. Itt kellett egy kisebb mélyedésbe húzódva a csupasz kövekre elvégezni a dolgot, a kis korsó vizét használva vécépapír helyett. Az egész falu oda járt. Ám ha valaki azt hinné, hogy ettől elaknásított tereppé vált a gödör, ahol úgy kellett kerülgetni a lepényeket, az téved: a sivatagi nap hevének kitett ürülékcsomó már néhány óra elteltével száraz, porló anyaggá vált.

Ám a szennyezések kezelését ősidők óta az előrelátás és az elővigyázatosság hiánya jellemzi – amikor megoldunk egy problémát, azonnal elő is idézünk egy másikat, ahogyan azt az elsőfajú hibákkal terhelt rendszereknél illik. A városok kialakulása után, különösen a nagyvárosokban – a vidéki, szórványos népességben elképzelhetetlen súlyosságú – járványok kezdték felütni a fejüket, amelyek a nagy népsűrűség miatt nagyon gyorsan terjedtek. Ezek közül több olyan volt, amelyek kórokozója az ivásra használt vízzel terjedt: a kolera, a tífusz és a hepatitis. A délibb égöveken pedig parazitás megbetegedések is szép számmal akadnak. Ezzel párhuzamosan egyre több helyen jelent meg a vezetékes víz, anélkül azonban, hogy a felhasznált víz elfolyásáról gondoskodtak volna: szabadon folyt ki az utcára, a nyitott kanálisokba, ami kiváló táptalajt biztosít a baktériumoknak és egyéb kórokozóknak (Somlyódy 2003). Ennek a jelenségnek a pongyola megfogalmazása a közműolló: vezetékes víz van, szennyvízcsatorna nincs.

Az emberi technológia egyik sajátos vonása, amikor önmagukban ártalmatlan anyagokból, amelyek természetes körülmények között nem okoznának gondot, valamilyen átalakítással kellemetlen végeredményt hozunk létre. A vízöblítéses illemhely esetében például a fekáliából maguk a víz felhasználására feltalált és kitalált emberi eszközök csinálnak szennyezést. A széklet önmagában még nem szennyezés, példa erre a szíriai sivatag, de a sok millió kínai földműves is, aki az illemhelyet a telek felső végébe építi, hogy a termék szép lassan leszivárogjon a földbe, és megtermékenyítse a termények alatt a talajt. Az sem valószínű, hogy a középkori várak bástyáinak eldugott szegletében található és szó szerint potytyantós árnyékszékek túl sok gondot okoztak volna.

Ezt az aránylag biztonságos megoldást borította fel az, hogy immár harmadszor is feltalálták az angolvécét, de nem találták fel hozzá a csatornát. Mondhatnánk,

hogy a kényelmi igények kielégítése fontosabb volt, mint az egészség megőrzése, de a kérdés nem ennyire egyszerű. A vízöblítéses módszer első ismert újkori feltalálója Sir John Harrington, aki 1589-ben már megszerkesztette, de az Erzsébet-kori Anglia még tökéletesen közömbös volt saját szennye-mocska iránt. Végül Joseph Bramah szabadalmaztatta a klozetet 1778-ban, de az csak a 19. század elején-közepén terjedt el, amikor a technikai megoldások és az anyagi eszközök rendelkezésre álltak a nagy méretű rendszerek megvalósítására (Markham 1994).

### 3.4.2. „Ki a Temze vizét issza…"

Ezzel megtörtént a következő visszafordíthatatlan lépés az elsőfajú hibák sorában: az alapvetően hasznos anyagokat felhasználhatatlan hulladékká alakították. Ezért az angolvécé használata károsnak bizonyult: hozzájárult a járványok terjedéséhez. Korábban a nagy esők, árvizek és a mosólé véletlenszerűen és nem szándékosan juttatta az árnyékszékek tartalmát a vízrendszerekbe, most ezt maguk az emberek szántszándékkal tették. Maga a szennyezés nem volt tudatos, hiszen akkor még nem tudhatták, hogy a vízzel felhígított ürülék a legkiválóbb táptalaja a már említett betegségek kórokozóinak, amelyekhez később társult és még ma is diadalmenetben fertőz a szalmonella és az *Escherichia coli* baktérium, valamint a *Giardia* nevezetű egysejtű amőba. Az elöregedett 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 sok más európai városban is (Somlyódy 2018). Az ember feltalálta a szennyvizet.

Angliában, amely legalább a kolerától mentes volt a középkorban, 1831-ben megjelent a betegség, és 1849-ben, majd azt követően 1854-ben Londonban okozott súlyos járványt. Bár Robert Koch, Pasteur és a többi bacilusvadász előtt még fogalmuk sem lehetett az embereknek arról, milyen összefüggés van a szennyvízzé hígított széklet és a betegség kitörése között, az éles szemű John Snow, egy sebész és altatóorvos a londoni Soho környékén, az 1849-ben bekövetkező megbetegedéseket és haláleseteket elemezve arra figyelt fel, hogy az áldozatok nem más emberekkel érintkezve kapják meg a kórt, ahogyan korábban gondolták, hanem attól függően betegszenek meg, hogy honnan kapják az ivóvizet: a várostól délre lakók nyolcszor gyakrabban estek ágynak, mint azok, akik az északi részen laktak, ahonnan a Temze érkezik. Akkoriban ugyanis a felszíni vizekből emelték ki a vezetékes vízellátáshoz szükséges vizet, a csatornák pedig közvetlenül a Temzébe ömlöttek. Snow bebizonyította, hogy akik a dél-londoni Broad Street közkútjáról (vagyis a Temzéből) kapják a vizet, mind megbetegszenek, de az a sörfőző és egy másik, 500 embert foglalkoztató cég, amelyeknek saját kútjuk volt, áldozat nélkül úszták meg a járványt. Természetesen a konzervativizmus és a változékonyság dichotómiájának törvénye értelmében rengeteget kellett

küzdenie, mire javaslatait megfogadták, és 1854-ben, a második járvány idején megtiltották a Broad Street-i kút használatát. További 30 évet kellett várni, mire Koch a tényleges kórokozó, a *Vibrio cholerae* baktérium felfedezésével kétséget kizáróan igazolta Snow hipotézisének helyességét (Johnson 2006). Az utólagos vizsgálat alapján bebizonyosodott, a Broad Street-i járvány oka a kút közelében levő, elhagyott emésztőgödör volt, ezért az esetet az Európai Környezetvédelmi Ügynökség az óvatosság vagy *elővigyázatosság* elve korai példájaként tartja számon (EEA 2002).

Újból igazítani kellett tehát a dolgokon. A cél az lett, hogy megszabaduljanak a szennyezett víztől. Ekkor kezdtek el csatornákat építeni a nagyvárosokban, amelyek a vízvezetékkel odajuttatott, nagy mennyiségű vízzel együtt a háztartásokból a hulladékokat (beleértve az ürüléket és vizeletet is) el tudják távolítani. Második lépésben tehát megvan a csatorna, de úgy vélték, a természet elintézi a többit. Fordított Paracelsusként hanyagul kiadják a jelszót: a szennyezést hígítani kell, ez a megoldás. Már ismerték a folyók hihetetlenül intenzív öntisztító képességét, és még a 20. század közepén is úgy gondolták, hogy annak például a Budapestről a Dunába kerülő városi és ipari szennyvíz együttesen is csak kicsi hányadát veszi igénybe, így beláthatatlan időkre biztosítható a szennyvizeknek a folyókba való zavartalan bevezetése, ott nem fognak gondot okozni (Maucha 1942). A remény természetesen öncsalás eredménye volt. A városok tovább nőttek, és kezdetben kedvezőnek látszott a megoldás, mert a csatornák nem csupán a szennyvizet gyűjtötték össze, de elvezették a záporok vizét is, kiküszöbölték a bűzt és a fertőzés veszélyét, megvédték a vízbázisokat, és a városok terjeszkedését követve rugalmasan bővíthetők voltak.

A modern csatornázás elvei az idő előrehaladtával fokozatosan változtak. Először csak nagyvárosokban volt gazdaságos a szennyvízgyűjtő rendszer kiépítése, majd kisebb települések is sorra kerültek annak megkérdőjelezése nélkül, hogy nem lenne-e ilyen esetekben hatékonyabb valamilyen egyedi megoldás kialakítása, ami szennyezési forrásonként vagy legalább csoportokban kezelné a szennyvizet a nagy, központosított csatornarendszerek helyett. A települési csatornarendszerek után regionális csatornákat is kialakítottak, aminek a gazdaságossága még konvencionális közgazdasági számításokkal is megkérdőjelezhető. Közben folyamatosan emelkedett a lakossági, mezőgazdasági és ipari víz felhasználása, ami azt jelentette, hogy a merev csatornarendszerek egyre kevésbé tudták kiszolgálni a fokozott igényeket.

Egy csatornarendszer alapvetően kétféle lehet: egyesített vagy különválasztott. Az első esetben az esővíz is ugyanazt a rendszert terheli, a másodikban külön hálózatot kap. Könnyű belátni, hogy az utóbbi drágább, ám így tehermentesíteni lehet a szennyvíztisztítókat, illetve úgynevezett záportárolókban tárolva a csapadékvizet az esővíz-elvezető hálózatot is. A legtöbb szennyvízelvezető rendszer gravitációs úton, a folyadék és szilárd fázis eltávolítására ideálisnak

talált 2-4% közötti lejtéssel működik. Különféle okok, például a terepviszonyok miatt nyomás alatti rendszereket is szoktak építeni. A mérnöki logika is tisztában van azonban azzal, hogy a közművek között a csatorna a legrugalmatlanabb megoldás, mert a legnehezebben lehet a változó igényekhez igazítani. A tehermentesítő megoldások csak ideig-óráig működnek, aztán valami újat kell kitalálni. A hetvenes években ilyen volt a felszínközeli csapadékvíz-elvezető rendszer, vagy ellenkezőleg, a nagy mélységben vezetett, sok problémát kiküszöbölő, de csak metróépítési módszerekkel készíthető, ezért rendkívül drága mélycsatornás rendszerek (Dulovics et al. 1978).

Snow, bármilyen zseniális volt is a maga korában, egy alapjában elhibázott elv alapján oldotta meg a nagyvárosok vízgazdálkodásának kérdését. A vízöblítéses toalett, a csatornázás és az ivóvízhálózatba engedett víz klórral történő fertőtlenítésének hármas intézkedése révén akkoriban egészségesnek és biztonságosnak tudott megoldást nyújtott a vízellátásra és a közegészség megőrzésére. De sajnos a módszernek más következményei is lettek. A városokból kivezetett csatornák tartalmukat a felszíni vizekbe, elsősorban a folyókba ürítették. Ennek eredményeként ezúttal a folyók környékén lett elviselhetetlen a bűz, és időről időre hatalmas halpusztulások történtek. Ma már tudjuk, hogy ez nem is lehetett másként: a szennyvízbe kerülő szerves anyag bontását heterotróf baktériumok végzik, és ezek működésük közben elvonják a vízben oldott oxigént. A halak oxigén hiányában elpusztulnak, az oxigénhiányos vízben pedig nemcsak a halak tetemei bomlanak nagy-nagy büdösséget gerjesztve, de anaerob folyamatok is beindulnak, és a létrejövő szag a legritkább esetben emlékeztet valamelyik divatdiktátor által megálmodott parfümre. A 20. század második felében új, kiábrándult jelszó került a zászlóra: illúzió, hogy a hígítás megoldja a szennyezés kérdését.

### 3.4.3. A szennyvíz tisztításának fokozatai

Jött a felismerés: tisztítani kell. Ha jól számolom, a negyedik kör az elsőfajú hibák sorozatában. El is kezdték építeni a nagy szennyvíztisztító műveket, amelyek a mérnöki teljesítmény csúcspontjai voltak: miután először mesterségesen elszennyezték, hatalmas erőbefektetéssel, anyag- és energiaigényes technológiákkal szintén mesterségesen megtisztították a vizeket.

#### 3.4.3.1. *Fokozatok*

A fizikai ülepítés, kémiai kezelés és végül biológiai derítés után a víz valóban megtisztult, de visszamaradt mindaz, amit kiszűrtek belőle: szén-dioxid (a biológiai bontáshoz használt baktériumok anyagcsereterméke) és nagy mennyiségű szennyvíziszap, amely szerencsés esetben már elég száraz volt ahhoz, hogy tovább ne bomoljon. Viszont felmerült a kérdés, mit csináljanak vele. Hova tegyük, amit kivettünk belőle? A szennyvíziszap tartalmazza az összes anyagot, amit egy vízellátással és csatornázással rendelkező város háztartásai és ipara bele-

enged. Ezek egy része hasznosítható tápanyag lett volna, ha a másik része, amely toxikus, nem szennyezte volna el még az iszapot is. Ezért már korán megszületett a döntés, hogy a nagy ipari létesítmények szennyvizét külön kezeljék, ezzel megint csak súlyosan mérgező, koncentrált zagyot állítva elő. De ez ennek a történetnek egy másik ága. Főágunkon most a háztartási szennyvíziszap sorsát kísérjük figyelemmel. Ezzel elvileg négyféle dolgot lehet csinálni: a) kezelés után kivinni a földekre mint trágyát, b) hatalmas telepeken biogázt fejleszteni belőle (metán), és utána kivinni a mezőkre, c) deponálni valamilyen hulladéklerakóban, amitől szemét jellege az első két megoldástól eltérően nem szűnik meg, és d) érdekes logikai csavarral, immár ilyen sűrű állapotban visszaengedni a folyókba. Az első három esetben a folyók mentesültek a terheléstől, és a technikatörténet diadalaként az ötvenes években teljesen kihalt Temze folyóba az 1980-as évekre visszatért a lazac.

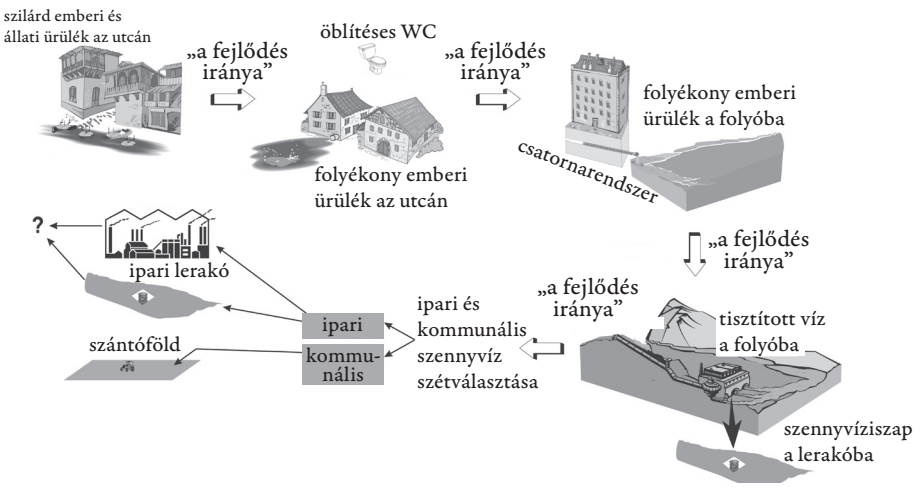
### 3.4.3.2. *Eleven iszap*

A biológiai tisztítás feladata a szennyvízben – mechanikai tisztítás után – megmaradó lebegő szerves részecskéknek, valamint az oldott és kolloidális szerves szennyeződéseknek biokémiai folyamatok segítségével történő lebontása. Ez ugyanaz, mint amit szerencsés esetben a természet is csinál, csak most már kénytelenek vagyunk mi előidézni nagy medencékben, amelyekben az úgynevezett eleveniszapos technológia található. Ennek során a levegőztetett medencében lebegő mikroorganizmus-aggregátumok (pelyhek) végzik a szerves anyag lebontását. Ezek amúgy is benne vannak már a szennyvízben, most mesterségesen hozunk létre számukra kedvező körülményeket, hogy elbontsák a szennyvízben lévő szerves anyagokat, illetve – egy továbbfejlesztett változatban – kivonják a növényi tápanyagnak számító nitrogén- és foszforterhelést. Az így keletkező sejteket (iszapot) a víztől rendszerint ülepítéssel választják el, majd a sejtkoncentráció növelése érdekében recirkuláltatják, és a fölösleget elveszik. A szennyvíztisztítókban mindig az adott anyagot az adott körülmények között legjobban bontó szervezet van előnyben, és az szaporodik el leginkább. A kialakuló mikrobaközösséget tehát a szennyvíz összetétele és az alkalmazott tisztítástechnológia együttesen határozza meg. A víz megtisztulása az úgynevezett biofilmen belül történik, ami a mikrobák élettere, és azért film a neve, mert megtapadása valamilyen szilárd felülethez, szubsztráthoz kötött. A már tárgyalt parti szűrés is így működik, ott a folyóágy homokszemcséi adják a szubsztrátot, míg a szennyvíztisztító eleveniszapos medencéjében – mint a neve is mondja – a biofilm a szennyvíz szilárd fázisához, szemcséihez tapad. A folyamat hőmérsékletfüggő, ezért télen lassabb (Tolnai 2018). Mindazonáltal úgy tűnt, az eleveniszapos technológiával megoldódott a szerves terhelés kérdése.

Csakhogy a biológiai tisztítás nem távolít el mindent a szennyvízből. Ezenkívül a vizeket nemcsak városi, hanem úgynevezett nem pontszerű, diffúz szennye-

zések is érik, elsősorban a mezőgazdasági tevékenység következtében a földekre kihordott műtrágyák bemosódása révén. Mindezek a felszíni vizekben rendelkezésre álló tápanyagok súlypontjának eltolódásához vezetnek. Tudvalevő, hogy a növények növekedését a rendelkezésre álló tápanyagok mennyisége korlátozza. A szenet nem nagyon tudjuk befolyásolni, lévén szén-dioxid formájában van jelen, de a nitrogén és a foszfor már nem annyira egyértelmű. Az élővizekben, különösen a lassú folyású vagy állóvizekben a növényi szaporodás limitáló tényezője rendszerint a foszforellátottság. Márpedig a szennyvizek nagy mennyiségű foszfort tartalmaznak, és korántsem mindegyik szennyvíztisztító rendelkezik még fejlett biológiai tisztító képességgel. Ha az ilyen szennyvíz egy tóba, például a Balatonba kerül, a következménye az eutrofizáció. A kilencvenes években a biológiai fokozattal megépült szennyvíztisztítók működésének eredményeként Európa-szerte csökkent az élővizek és felszín alatti vizek tápanyagterhelése, ám ez még mindig nem elegendő ahhoz, hogy kiküszöbölje az eutrofizációt. Nem meglepő módon a kontinens északi országaiban jobb a helyzet, mint délen és nyugaton (Thyssen 2001).

Ugyanakkor tudnunk kell, hogy a vízminőség még nem minden. Az élővizekbe kibocsátott szennyvízben maradó szennyező anyagok a vízből a folyó medrének üledékébe ülepszenek ki, és ott egyfajta időzített bombaként bármikor gondot okozhatnak. Senki nem méri, hogy a folyó életképességét, megújuló és öntisztuló kapacitását meghatározó bennszülött bentikus társulásokat milyen mértékben veszik igénybe a kiülepedő szennyeződések. Kísérletképpen orosz kutatók megpróbálták meghatározni a Volga folyón épített kujbisevi víztározó fenekén az üledékben megengedhető maximális terhelést, ami a szennyvíztisztítókból még kikerülhet (Stepanova 2001).

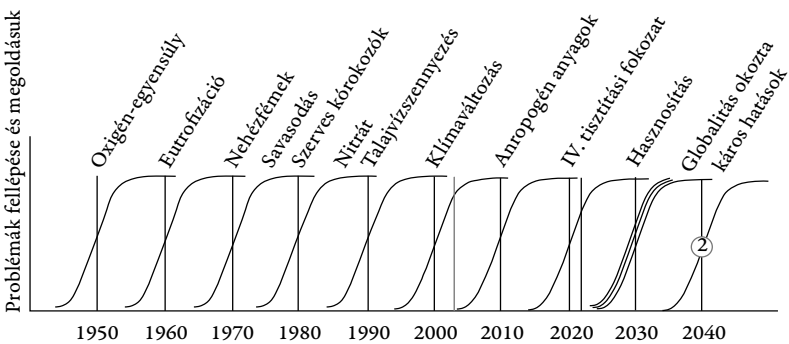



28. ábra. *A szennyvíz történetének lépései*

3.4.3.3. *IV. fokozat*

A következő megoldás a visszamaradó szennyvíziszap egy újabb kezelési módja lehet: elégetjük. De akkor mi a helyzet a légszennyező anyagokkal? Nem véletlen, hogy Magyarországon minden próbálkozás a szennyvíziszap égetésére eddig zátonyra futott: sem a Mátrai Erőmű, sem a cementgyárak, sem a Budapesti Hulladékégető nem vállalja. A stratégiai anyagok jelenleg a mezőgazdasági hasznosítás lehetőségeit tartják a leginkább perspektivikus megoldásnak, ezt követi a rekultiváció és csak a végén az energetikai hasznosítás (Stratégia 2014: 44). Ugyanakkor Németországban például a szennyvíziszap mezőgazdasági elhelyezését megtiltották, mert az sem veszélytelen (Juhász 2018).

És akkor szembesülünk azzal, ami már többször előkerült a vízminőséggel kapcsolatban is, hogy a szennyezések egyre kevésbé feltűnőek, és egyre kisebb koncentrációban jelentkeznek, de ez nem jelenti azt, hogy egyre kevésbé lennének veszélyesek. Ahogyan az emberi egészség kockázatfelfogása is az azonnali halálos betegségekkel kezdődik, és csak lassan jövünk rá, hogy alkalmasint a teljes populációkat generációkra eltorzító genetikai, radiológiai hatások sokkal veszélyesebbek lehetnek, úgy kell a víz minőségével kapcsolatos információkat is kezelni. A mikroszennyezők hosszú távon éppen azért veszélyesek, mert nem tűnnek annak. Nagyon érdekes az alábbi összefoglalás, amely a vízminőségben érintett, az elsőfajú hiba csapdájában vergődő ágazatok újabb és újabb ciklusait a rendszerelmélet logikájával követi: felmerül a probléma, megoldják, majd szinte azonnal egy újabb gonddal kell szembesülni, ami még nehezebben kezelhető, és ez így megy tovább az alábbi ábra kényelmes logikája szerint 10 éves ciklusokban.




29. ábra. *Az elsőfajú hibák ciklusai a szennyvíz kezelésében (Forrás: Juhász 2018)*

Az ötvenes években az oxigénegyensúly felbomlása eutrofizációhoz vezetett, majd az ipari szennyvizekből kikerülő nehézfémek okoztak problémát, aztán a savasodás, majd a szerves vegyületek, a mezőgazdaság iparosodásával a nitrát és a talajvíz elszennyeződése. A kilencvenes évek óta egyre komolyabb problémát okoz az éghajlatváltozás, majd rájöttünk, hogy vizeinkben az antropogén

anyagok bizony nem tűnnek el maguktól. A szennyvíz kezelése csak egy ezeknek a gondoknak az enyhítési lehetőségei közül, de konkrétan az antropogén anyagok kiszűrése nagyon nagy jelentőséggel bírna.

Erre vezették be a szennyvíztisztítás negyedik fokozatát, amely már a mikroszennyezőkkel veszi fel a versenyt. Először angol kutatók igazolták, hogy az emberi tápcsatornán, majd a szennyvíztisztítókon keresztül a Temze folyóba mint befogadóba érkező hormon- vagy hormonhatású készítmények hatására a halak ivari egyensúlya felborult, és hím keszegek alakultak át nőivarúvá (Tyler és Jobling 2008). Azóta egyre másra mutatják ki a nemkívánatos maradványanyagokat a legmodernebb technológiával megtisztított szennyvizekből is, ezért komoly erőfeszítéseket tesznek az úgynevezett negyedik fokozat megvalósítása érdekében. Csakhogy az eddig alkalmazott technológiák szintén sok problémát vetnek fel. A membrános eljárás rendkívül drága, az ózonos kezelés során újabb mikroszennyezőket hozunk létre... Működő megoldás a biológiai fokozat után telepített aktív szénpor adagolását követően egy adszorpciós, majd finom homokra és antracitra alapozott szűrési eljárás kettős lépcsője. Ám megint ott a kérdés, mit tegyünk a kiszűrt anyaggal. Ahol eddig alkalmazzák, ott elégetik: megint visszakerültünk a csapdába.

A mérnökökben is felmerül a kérdés, hogy ha mindig újabb és újabb veszélyekre kérnek tőlük műszaki megoldást, nem lehetne-e esetleg megvizsgálni a forrásoldali kérdést, vagyis hogy miként lehetne megakadályozni ezeknek az anyagoknak a bejutását a vízciklusba (Juhász 2018).

Csöpögő csap, eresztő lefolyó megjavítása, levegőztető csaptelep beszerzése, esővízgyűjtés, pisilés a zuhany alatt, mosogatógép használata. Hány és hány ilyen jótanácsot kapunk nap mint nap, mind arra buzdít, hogy ne pazaroljuk a vizet, és ezzel „megmentjük a Földet". Ám rendszerszintű gondolkodás nélkül mindezek kárba veszett erőfeszítések. Hogy mennyire, az a nagy csatornarendszereknél látható leginkább. Itt ugyanis visszaüthet a nagy víztakarékosság. A csatornarendszerek mindig meghatározott szennyvízterhelésre vannak méretezve, és sem a túl kevés, sem a túl sok víz nem tesz jót nekik: inherens rugalmatlanságuk nem tud megküzdeni ezekkel a kiingásokkal. Az eredmény nemcsak büdös, de káros is. Tonnányi zsírhegyek alakulhatnak ki pillanatok alatt, ha törlőkendőtől, kondomtól, pelenkától, vattapamacstól és betéttől úgy szabadulnak meg az emberek, hogy lehúzzák a vécén. Londonban egy 250 méter hosszú és 130 tonna súlyúra becsült monstrummal kellett megküzdenie a csatornázási vállalatnak (Weisberger 2017). Ez a dugó főként olajos, zsíros anyagokból állt össze, de sem a fenti anyagok, sem a zsír és olaj nem fog „lemenni", hanem a többi szilárd fázishoz (nevezetesen az ürülék) hasonlóan kiülepszik, amennyiben a csatornahálózatba a tervezettnél kevesebb víz jut be. Hogy a kép még élvezetesebb legyen, az ivóvízhálózatban is naponta cserélődnie kell az ott átfolyó víznek, hogy a fertőtlenítés működjön (Bedő 2020). Ez mind elsőfajú hiba.

Ráadásul a teljes rendszer újratervezése nélkül nem akadályozhatók meg az olyan rendszerszintű hibák sem, mint amikor egy nagy eső következtében a dél-pesti szennyvíztisztítóban összegyűjtött szennyvíz egy része a kapacitások meghaladása miatt továbbra is tisztítatlanul ömlött a Dunába (HVG 2019). A jelenség nem csak nálunk létezik, mindenhol, ahol a csapadékviszonyok változatosak, kiszámíthatatlanok – az éghajlatváltozás következtében ez egyre több helyen lesz így –, és a hagyományosan tervezett csatornarendszerek egykörösek, tehát nincs külön csapadékvíz-elvezetés. Az sem tesz jót a megközelítésnek, ha az illetékes szakemberek még ma is természeti katasztrófának definiálják a városi árvizet, ami pedig egyértelműen a hibás tervezés következménye (NAS 2019).

Kínában az urbanizáció, a torrens esők és a csatornarendszerek korlátai miatt egy-egy eső után egyre több a súlyos városi árvíz. Ennek kiküszöbölésére hirdette meg a kínai kormány 2014-ben a „szivacsváros" stratégiát. Lényege, hogy a városok vízfelvételi, -tárolási, -beszivárogtatási, -tisztítási és adott esetben -kibocsátási lehetőségeit szeretnék megnövelni. Az eszközök körébe tartozik a természetes ökoszisztémák megőrzése, a lerontottak helyreállítása, a fejlesztések hatásainak csökkentése. Ehhez persze nem kevés erőfeszítés szükséges a legváltozatosabb intézmények részéről, kezdve a várostervezőkkel, folytatva a közlekedési infrastruktúrával, tájhasználattal, rendezési tervekkel stb. Igen nagy kihívás még egy olyan központi irányítású országban is, mint Kína (Yong 2017).

Sajnos azt kell tehát mondanunk, hogy a hagyományos csatornázás és szennyvíztisztítás megint egy olyan elsőfajú hiba, amelynek az ördögi köréből nagyon nehezen tudunk szabadulni. Nincs jó megoldás. Csak ha nem teszünk bele semmit. Vagy nem hozzuk létre. Vagy elválasztjuk.

A víz és szennyvíz fogalma az emberi felhasználás területén elválaszthatatlan egymástól. Minél kevesebb vizet használunk, annál kevesebb szennyvíz keletkezik, és minél több ágon kezeljük, gyűjtjük – a szelektív szemétgyűjtés mintájára –, annál könnyebbé válik az újrahasznosítása, és annál kevesebb kárt okoz akár nekünk – járványok vagy még rejtettebb, hosszan tartó kémiai és biológiai expozíciók révén –, akár a természetnek, hasonló okokból. Ezért legalább színe szerint illik különválasztani az egyedileg kezelendő ipari, illetve a fekete (fekáliát is tartalmazó), szürke (fekáliát nem tartalmazó, konyhai, tisztálkodással és mosással kapcsolatos), valamint sárga (vizeletet tartalmazó) háztartási szennyvizet. És akkor még mindig centralizált, nagy rendszerekről beszélünk, amelyek építése vidéki körülmények között rendkívül költséges, és nem is mindig célravezető. A szennyvíztisztításban már régen léteznek alternatív megoldások, csak – főként társadalmi, pszichológiai és egyéb okokból – nem nagyon terjedtek el, mert olyan vélt vagy valós hátrányaik vannak, amelyeket az emberek vonakodnak elfogadni (Grant et al. 1996). A könyv végén a szennyvízkezelés integrált megközelítésének tárgyalásakor ezeket az egyébként remekül működő megoldásokat részletesebben is bemutatom.

# 4. A JÓ SÁFÁR

A talajvizet már nagyon régóta használja az ember, hiszen kutat az ókorban is ástak. Amióta ilyen sokan vagyunk, és sok vízre van szükségünk (vagy azt hisszük, hogy sok vízre van szükségünk), a mesterséges „vízkitermelés" egyre elterjedtebbé és aggályosabbá válik.

A technikai fejlődés következtében egyre mélyebbről is felszínre lehet hozni hasznosítható vízkészleteket. A talajvízkészletek mérlegének megállapításakor az egyik legjelentősebb tényezőként a társadalom vízkiemelését kell figyelembe venni. A közhiedelemmel ellentétben ez nemcsak az egyre növekvő vízigény fedezését szolgálja, hanem jelenthet „tervszerű" talajvízszint-csökkentést is különböző gazdasági, leggyakrabban bányászati, településfejlesztési vagy mezőgazdasági célok megvalósítása érdekében. Akár így, akár úgy, ma már egyértelműen túl vagyunk azokon az időkön, amikor a talajvíz szintjének csökkentése kedvező hatással járt (például bizonyos mocsarak lecsapolása), és általánosságban az az elv érvényesül, hogy az emberi beavatkozások miatt a legtöbb helyen vészesen fogy a talajvíz szintje, ami a terület ökológiai egyensúlyának megbomlását, az ökológiai viszonyok megváltozását és esetleg egy új, nemkívánatos egyensúly kialakulását okozhatja.

Másrészről az ember, ahol nem vesz el, ott túl sokat ad. Mind a síkvidéki víztározás, mind az öntözéses gazdálkodás hatására erősen megemelkedik a talajvíz szintje. Főként az árasztásos öntözés okoz olyan mérvű változást, hogy a megemelkedett talajvízszint csökkentésére külön vízelvezető csatornahálózatot kell létrehozni: tipikus elsőfajú hiba, előbb csinálunk valamit, majd a következményeit visszacsináljuk ott, ahol arról korábban a természet maga gondoskodott.

Megint láthatjuk, hogy a komplex rendszerekbe való öncélú és egyoldalú beavatkozás mindig meghozza az elkerülhetetlen „eredményt", a nem várt vagy nemkívánatos mellékhatásokat. Ezek a hatások csak a mi önző szempontunkból „mellékek", valójában a rendszer egyértelmű válaszairól van szó. Új, számunkra kedvezőtlen egyensúlyi állapotok alakulnak ki, vagy ellenkezőleg, ha elvész a stabilitási puffer, meglóduló és ellenőrizhetetlen változások játszódnak le.

## 4.1. (KI)SZIVATTYÚ

A felszín alatti vizek ember által történő „hasznosításának" leggyakoribb következménye az illető víztest (vízbázis) nagyságának csökkenése. A modern emberi társadalom és a technikai civilizáció elidegeníthetetlen jellemzőjének tűnik a fenntartására használt erőforrások meggondolatlan és visszafordíthatatlan kiaknázása. Véges készleteinket úgy pazaroljuk, mintha azok bármeddig elegendők lennének, és soha nem merülhetnének ki. Kézenfekvő fejlemény, hogy a felszín alatti vizekkel ugyanez történik. Mindig az igény az elsődleges, ehhez keresnek kielégítésre alkalmas forrást, és soha nem a rendelkezésre álló forrásokhoz szabják az igényt. Egy ökológiai elvekre alapozott tervezésnél elsődlegesnek kellene lennie az adott terület vízháztartását szem előtt tartó igénymeghatározásnak, amelynél nagyobb mennyiséget nem lenne szabad kiemelni.

Ezzel szemben a gyakorlatban az történik, hogy a három nagy vízfelhasználó ágazat, a mezőgazdaság, az ipar és a települések egyre növekvő igényekkel lépnek fel, a mérnökök meg egyre drágább módszerekkel és egyre nagyobb műszaki rendszerek alkalmazásával, egyre lelkesebben elégítik ki ezeket az igényeket. Sokszor még nagyon komoly mérnöki munkára sincs szükség, megteszi egy falusi kútásó is. Nem csoda, hogy mindig a leginkább kéznél levő források merülnek ki először. A felszín alatt ez értelemszerűen a talajvizet jelenti, mert a talajnedvességet még nem tanultuk meg kiszipkázni. Mára a Duna–Tisza köze kiterjedt területein süllyedt métereket a talajvíz szintje, a talajvízkutak kiapadtak. Ez majdnem senkit sem érdekel, mert az ásott kutakat a vezetékes vízellátás megteremtése óta legfeljebb, ha öntözésre használják. A talajvizek mintegy ötven éve megfigyelhető süllyedése a hidrogeológusok szerint csak részben antropogén folyamat, a többi ok természeti, főként meteorológiai (Mezősi 2011: 184) (lásd a 6–7. színes ábrát).

Csak azt felejtik el, hogy amit ma meteorológiai oknak mondunk, már az is a korábbi beavatkozások miatt megváltozott éghajlati és időjárási tényezők következménye. Ivásra a talajvíz a felső talajrétegből a talajvízbe mosódott nitrátszennyeződés miatt már régóta amúgy sem alkalmas. Most, hogy kiapadtak a kutak, beléjük lehet ereszteni a szennyvizet, beledobálni a szemetet, hulladéklerakónak és zagytárolónak használni egyszerre. A vízellátás kiépítésével ugyanis a csatornázás sehol sem tart lépést, mert nincs benne akkora üzlet. A *közműolló* következtében mindig nagyobb százalékban valósul meg a vízellátás, mint a csatornázottság. Olyan veszteségeink is támadtak ebből, mint a korábban ásott kutakból kitermelt nagyigmándi keserűvíz, amit a múlt század nyolcvanas éveiben beinduló intenzív műtrágya- és növényvédőszer-alkalmazás tett tönkre, mert a talajvízbe jutva elszennyezte azt (Mezősi 2011: 173). Ugyanakkor a világ nagy részén, elsősorban a fejlődőnek nevezett országokban még sokáig a felszíni víz (folyók, tavak vize) és a talajvíz lesz a vízellátás

alapja, ezért nagyon fontos lenne mind mennyiségének, mind minőségének megőrzése.

Amikor elfogy vagy elszennyeződik a talajvíz, az ember eggyel lejjebb megy, kitalálja a fúrt kutat, és megfúrja a vízzáró kőzeteket, hogy az alattuk található rétegvizekhez jusson. Említettem, hogy ezeknek elvileg is csupán egy része pótlódik, és ez a pótlódás is nagyságrendekkel nagyobb időt vesz igénybe, mint a talajvízé. Az Alföldön, az Alsó-Tisza vidéke alatt kiváló és értékes rétegvizek vannak. Ma már az ellátás nagy részét erre alapozzák. Nyomásviszonyaik is kedvezőek, 100 méterről már pozitív nyomású, felszökő víz nyerhető, amelynek – egyelőre – a minősége is kifogástalan. A felszíni vizek megbolygatása miatt vízhiányossá tett Alföldön egyre-másra fúrják a mélységi artézi kutakat. A talajvízre alapozott megoldások az ásott (aknás) kút, a csápos kút, amikor több perforált csővel növelik a vízhozamot, illetve a vert kút, ami egy egyszerű perforált cső leverését jelenti, amelynek az üregébe folyó vizet lehet kitermelni. A mélységi kutak ezzel szemben komolyabb infrastruktúrát igényelnek. Kell maga a kút, ami már mindenképpen fúrt kút, kell a kútfej, amely védi a szennyeződésektől a kutat és tartja a kitermelő eszközöket, illetve kellenek a kitermelő eszközök, vagyis szivattyúk (Rácz 2014). Kecskeméten például már egy 410 méter mélységben lévő vízadó réteget csapolnak meg (Bácsvíz 2023), amelynek a vize ráadásul a köztudottan veszélyes anyagnak kikiáltott azbesztcementből épült vezetékhálózatba kerül (Boldis 2012).

A rétegvizek kiemelésének az sem szab gátat, hogy elvileg vízjogi engedély kell minden újabb létesítményhez, hiszen a vízügyi hatóság az igényekre való hivatkozással magának adja meg az engedélyt, amikor újabb kutat létesít. Az Alföld rétegvíz-kitermelése csak Magyarországon már 1993-ban napi 4 millió $m^3$ víz volt, ami még a műszakiak számára is felvetette a készletek esetleges csökkenésének kérdését, hiszen ez a mennyiség éves szinten majdnem annyi, mint a Balaton vize (Borsy 1993). Sajnos, miután bonyolult, ingadozó rendszerről van szó, amely csak nagy késéssel és összetett mintázat alapján követi a felszíni csapadék változásait, nehéz elkülöníteni a fluktuációk mérését a valós készlet csökkenésétől. A mérések révén inkább tendenciákat kell megfigyelni, amelyek azonban már régóta lefelé mutatnak (Rónai 1985). Ez nem is csoda, tekintve a kitermelést, inkább csak bizonyítékként értékelhető azok számára, akik a józan paraszti eszüknek nem szeretnek hinni.

A kutatók előrejelzései szerint térségünkben a globális éghajlati változások az átlagos csapadékmennyiség csökkenésével járnak, illetve megnő a szélsőséges időjárási helyzetek gyakorisága. A felszíni és felszín alatti vizek járása ingadozóbb lesz, ami az olyan, amúgy is már szélsőséges vízjárású vízbázisok esetében, mint amilyenek a karsztvizek, katasztrofális hatással járhat (Verebélyi 2002). A karsztvizekkel eddig is sok baj volt, mert érzékenyen követik a változásokat, és nincs pufferkapacitásuk. Ez az a terület, ahol a gazdasági nehézségek nem kárt,

hanem előnyt hoztak a természeti rendszerek számára. A karsztvizeket adó víztesteket ugyanis hazánkban, de másutt is az utóbbi évtizedekben mesterséges kitermeléssel fogyasztották. Ennek oka az volt, hogy bizonyos fajta bányászatot csak úgy lehetett végezni, ha a felette fekvő vízréteget eltávolítják, hogy megakadályozzák a vízbetöréseket. A depressziós művelésnek nevezett bányászati módszer a Dunántúli-középhegység mészkőrétegeiben elhelyezkedő karsztvíz halálát jelentette, mert nemzetgazdasági érdekből hatalmas szivattyúkkal pumpálták a felszínre, ahol mesterséges felszíni vízfolyások keletkeztek belőle, például a nyírádi bauxitbányából felszínre hozott vízből kialakult Melegvíz nevű patak. Egyetemista koromban, a nyolcvanas évek fordulóján még téli vadvízi kajaktúrákat is szerveztünk ezen a patakon, mert januárban, februárban sem fagyott be, sőt kellemes, tízegynéhány fokos vize vidáman párállott a hidegben. A bauxitbányát 1990-ben kormányhatározat állította le, aminek következtében visszatért a víz a tapolcai tavasbarlangba, ismét melegedett a hévízi forrás, viszont megszűnt a téli kajakozás lehetősége. A már említett tatai vizek esetében hasonló folyamat játszódott le (Nyírő 2020).

Fontosságához képest nem keltett nagy feltűnést, amikor 2001-ben Kínában napvilágot látott egy vizsgálat eredménye, amely egészen új megvilágításba helyezi a kínai csodát. Amíg Mao élt, vaskézzel elérte, hogy az egygyermekes családmodell révén az ország népessége ne növekedjen túlságosan. A hetvenes, nyolcvanas években Kína valóban önellátó volt gabonából, és senki vagy majdnem senki sem éhezett. Ám a nagy vezér halála után a népesedési mutatók ismét megugrottak. Témánk szempontjából ez azért érdekes, mert Észak-Kínában, ahol a gabonatermesztés központja van, egy tonna gabona előállításához 1000 tonna vízre van szükség. A sok éhes száj betömésére pedig sok ezer tonna gabonára, elsődleges vízigényüket nem is említve. Ezért aztán nem csoda, ha fogyni kezdtek a vízkészletek is. Hatalmas területeken csappant meg a talajvízkészlet, és az éves utánpótlás már nem volt elég a felhasználási ütem fedezésére: a talajvíz elfogyott.

A kútfúrók, mint másutt is, nekiláttak a rétegvizek kiaknázásának, amelyek azonban a vártnál is hamarabb kezdtek kimerülni. 2000-ben az észak-kínai alföld rétegvizeinek szintje átlagosan majdnem 3 méterrel csökkent, de ez az érték egyes helyeken elérte a 6 métert is. A területen 1996-ban 3,6 millió kút üzemelt, ezek közül 1997-ben 100 ezret fel kellett hagyni, mert elfogyott belőlük a víz, ugyanakkor 222 ezret létesítettek a megszokott módon, mindig egyre mélyebbre fúrva. Egy világbanki jelentés megjegyzi, hogy Pekingben 1000 méter mélyre fúrt kutakról látják el a népességet. Nem nehéz megjósolni, mit jelent ez a jövőre nézve. A negatív vízmérleg már 2001-ben is 40 milliárd tonnát tett ki (Brown 2001), és a helyzet azóta sem sokat javult. A Pekingben és a körötte elhelyezkedő Hebei tartományban élő 120 millió ember napi vízfejadagja néhány éve már kisebb volt, mint a Szaúd-Arábiában élőké (Davies és

Westgate 2018) (akik egyébként 100%-ban felszín alatti vizekből kapják az ellátást, lásd ENS 2008 October 23). Nem is beszélve arról, hogy az ivóvízellátás ugyanazokkal a minőségi problémákkal küzd, mint oly sok helyen a világban: a hormonhatású anyagok, a fertőtlenítőszerek melléktermékei, valamint az arzén és a fluorid vannak jelen a talajvízben és a felszíni vizekben egyaránt (Wu 2020).

A felszín alatti vizek a legváratlanabb forrásokból szennyeződhetnek el. Franciaország az energiaellátását jelentős mértékben atomenergiára alapozza. A környezetvédők azonban nem ok nélkül tiltakoznak az atomenergia békés célú felhasználása ellen is: 2006-ban egy normandiai nukleárishulladék-tárolóból radioaktív trícium szivárgott a talajvízbe, elszennyezve azt (Geenpeace 2006).

Az ENSZ több mint egy évtizede próbálja tető alá hozni a Föld felszín alatti vízkészleteinek 96%-ára kiterjedő nemzetközi vízkészletvédelmi egyezményét (ENS 2008 October 23), de még mindig nem sikerült közös nevezőre jutni, ami nem csoda: mindenkinek más az érdeke (Eckstein és Sindico 2017).

A becslések szerint az Egyesült Államok édesvízkészletének 95%-a rejtőzik a föld alatt, vagyis a hozzáférhető víz 20-30-szor annyi a felszín alatti, mint a felszín feletti forrásokban. Az indián törzsről Ogalallának elnevezett mély vízadó réteg keresztülvonul majdnem az egész országon Dél-Dakotától a texasi partokig. Tulajdonképpen a Sziklás-hegységből lemosott kavics- és homokösszletből áll, és temérdek mennyiségű vizet tartalmaz. Bár az Ogalalla tulajdonképpen talajvíz, átlagos mélysége 60-70 méter, tehát nem tekinthető teljesen közönséges, könnyen pótlódó vízbázisnak. Az igazság az, hogy a teljes újratöltéséhez 6000 évre lenne szükség. Egész Észak-Amerikában a legnagyobb hozzáférhető felszín alatti édesvízkészlet, amit nagyobb mértékben az ötvenes évek óta aknáznak ki, mióta a dízelmotoros pumpákra telepített, középponti kutakból táplált, körkörös öntözőrendszerek elterjedtek, és új reményt adtak a középnyugati gazdáknak arra, hogy mégis csak meg lehet azon a vidéken élni a megszokott módon: mezőgazdaságból (Zwingle 1993). Csakhogy a megoldás tipikusan elsőfajú hibával terhelt volt ott is.

A történet annyira jellemző, hogy érdemes egy kicsit alaposabban körüljárni. Amerika meghódítása során a telepesek a középnyugati végtelen rónákon, amit errefelé prérinek neveznek, milliónyi bölényt és rájuk vadászó indiánokat találtak. A prérit a magas szálú prérifű borította, amelynek különleges tulajdonsága az volt, hogy még egy olyan nagy állat rágását és tiprását is kibírta, mint amilyen a bölény milliomodmagával. Ám jött a fehér ember, és mészárolni kezdte a bölényeket, majd az indiánokat. A felszabaduló prérin pedig megkezdte a gazdálkodást, ahogyan európai hazájában tanulta: ekével, ökörrel, lóval. Voltak, akik már akkor látták a veszélyt, és azt állították, hogy a területet inkább állattenyésztésre kellene felhasználni. Különösen a déli síkságok érzékeny, törékeny talaját nem kellett volna már kezdetben sem feltörni, amely alatt az Ogalalla húzódik. A mexikóiaknak sikerült is elkerülniük ezt a csapdát, mert a nagybirtokosok

gulyái legeltek rajta. Az USA-ban az oda nem illő mezőgazdasági termelési gyakorlat egyenes következménye lett, hogy a talaj nagyon hamar és nagyon súlyosan erodálódott, olyannyira, hogy az észak felől betörő szelek könnyedén repítették a levegőben: porrá vált. Innen ered a terület elnevezése: Dust Bowl (poredény). Az 1800-as évek végén, aztán még súlyosabban az 1930-as években a mezőgazdaság teljes összeomlásához vezetett a megállíthatatlan szélerózió, a defláció (Goldsmith és Hildyard 1984). Megállapították, hogy a katasztrófát a természeti feltételeket semmibe vevő művelés okozta, végül mégis ment minden tovább a maga útján (Worster 1977).

Az ötvenes években aztán egymás után építették a körforgó öntözőrendszereket, amelyek a mélyről felhozott és ezért nagy sótartalmú vízzel öntöztek, hihetetlen mennyiségeket használva fel belőle (lásd a 8. színes ábrát). Az Ogalallából kiemelt víznek jelenleg több mint 80%-a megy el öntözésre, ami az egész ország öntözővizének 30%-a. Ezen nincs mit csodálkozni. Nem éppen előrelátó szabályozással a gazdáknak úgynevezett vízjogokat osztottak földjeik nagysága és a termelt termény fajtája szerint. Ezek a jogok elveszíthetők voltak, ha a farmer nem élt velük, és nem pumpált ki annyi vizet, amennyit csak bírt. Ha viszont egyszer elvesztette, újabb jogot már nem szerezhetett. Nyilvánvaló tehát, hogy mindenki öntözött, az is, akinek semmi szüksége nem lett volna rá. „Használd, vagy elveszted!" – ez volt a jelszó. A pénzintézmények és az öntözőberendezések gyártói szintén nem fukarkodtak ötletekkel a tekintetben, hogyan lehet a szerencsétlen gazdálkodót behúzni a víznyomó csőbe, és nagy befektetésre ösztönözni, ami eladósodást jelent a hitelt felvevő és folyamatos bevételt a hitelt folyósító fél számára. A hetvenes években voltak olyan farmerek, akiknek a bankok csak akkor adtak kölcsönt, ha átálltak az öntözéses gazdálkodásra. Egy-egy ilyen spriccelő szerkezet akár 100 hektár folyamatos öntözését teszi lehetővé a nap 24 óráján keresztül, a három hónapos tenyészidény alatt folyamatosan percenként (!) 4000 liter vizet pumpálva ki a talajvízből. A mondottak értelmében a farmerek addig öntöztek, amíg csak tudtak, sokszor decemberre halasztva ezzel a betakarítást: korábban a sár miatt nem lehetett rámenni a földekre. A föld azonban nagyon hamar megbosszulja a „technikai csodát". Elég, ha egy évig nem termelnek rajta semmit, az érzékeny talaj azonnal szétesik, a védő növényzet nélkül homokdűnévé válik, amely magát az öntözőberendezést is betemeti. Ha viszont sokáig folytatják az öntözést, a szikesedés elkerülhetetlen (Zwingle 1993). Az öntözésről szóló résznél megemlítek néhány megoldást, amely mégis ad némi reményre okot. A legmegfelelőbb megoldás azonban a visszatérés lenne a legeltető állattartásra (Rhodes et al. 2023).

A kilencvenes években a viszonylag ritkán lakott Ausztráliában a Nagy Artézimedencét már 18 000 pozitív kút csapolta. Az itt felszínre hozott víz 90%-a szabadon elfolyt (Borsy 1993). Annak fényében, amit az éghajlati változások és a vízháztartás összefüggéséről szóló részben az ausztráliai kontinenst sújtó




30. ábra. *Az Ogalalla-vízbázis*

aszályról mondtam, nehéz mit kezdeni ezzel az információval. Ha az ember olyan okosnak tartja magát, hogy képes az előrelátásra, a két adat egymás mellé helyezéséből ugyan milyen következtetés vonható le? Vagy az amerikai vízügyi politika vakságából?

Európa sem áll sokkal jobban. Spanyolországban a víz kitermelését a mezőgazdasági és turizmus lobbi irányítja, aminek eredményeként La Mancha tartományban például kiszáradt az egyik legnagyobb mocsár, a Las Tablas de Daimiel, és megszűnt a Guadiana folyót tápláló, víz alatti forrás (Montaigne 2001/2).

Az autokrata rendszerek általában még kevésbé törődnek a következményekkel, mint a demokratikus, de kapitalista berendezkedésű országok. A Föld egyik legnagyobb mérnöki létesítménye az úgynevezett „Ember alkotta folyó" volt Líbiában. Ez a hatalmas, 3380 km hosszú, vezetékes vízellátó infrastruktúra a Núbiai-sivatag alatt, a homokkőben rejlő felszín alatti vizet szivattyúzta ki 1300 kúton keresztül naponta 6,5 millió $m^3$ sebességgel, hogy legyen mivel ellátni a parti városokat (Lóczy és Sütő 2011). A NATO az arab tavaszt követő polgárháború során, 2015-ben szándékosan rombolta le a létesítmény egy jelentős részét (Ahmed 2015). Megjegyzendő, hogy megépítésére is már azért került sor, mert a parti városok talajvize szennyvízzel szennyezett, és a korábbi szivattyúzás miatt a sós tengervíz beáramlása is lehetetlenné teszi a felhasználását (Laessing és Elumami 2019). A kérdés eléggé megoldhatatlan: ha zavartalanul működik, a felszín alatti forrást zsarolja le, ha lebombázzák, humanitárius katasztrófát okoz a vízhiány.

A felszín alatti vízkészletekről tudjuk, hogy pótlódásuk nemcsak a közvetlen csapadékviszonyoktól, de a felszíni vizek állapotától, sorsától is függ. Bangladés-

ben nagyon gyorsan süllyed a talajvíztükör. Ennek több oka is van. Az ország mezőgazdaságból él, méghozzá rizstermesztésből. Ez eredetileg – ahogy Ázsiában máshol is – felszíni vizekre alapozott, nagyjából fenntarthatónak tudott öntözési módszerekkel működött. Ám a folyók hozama a felvízi országok vízügyi beruházásai és az éghajlatváltozás következtében megfogyatkozott, így felszíni víz egyre kevesebb áll rendelkezésre, különösen a száraz évszakban, amikor öntözni kellene. Ugyanakkor a folyók vízszintjének tartósan alacsony értéke már önmagában káros – leszívó, csökkentő – hatással van a talajvíz szintjére is (Dey et al. 2013). Másrészt a népesség robbanásszerű megemelkedése és az ebből eredő élelmiszerhiány miatt a gazdák felszíni víz híján kénytelenek voltak áttérni a talajvíz felhasználására, és az katasztrofális következményekkel járt: 2004 és 2010 között a dakkai régióban több mint 10 méterrel, Barind tartományban még ennél is 3 méterrel többel csökkent a talajvíz szintje (Alam 2013). A jelenség nem korlátozódik csak Bangladesre, ezért egész Délkelet-Ázsiában a vízgazdálkodás újragondolására lenne szükség (Ganguly 2013).

## 4.2. SZOMJAS VÁROSOK

A felszín alatti vízkészletek meggondolatlan kiaknázása a beavatkozást végzők elbizakodottsága és a szakbarbárság, más szaktudományok eredményeinek figyelmen kívül hagyása miatt még más, nem várt meglepetéseket is tartogat. A geomorfológia a földfelszín alakulásával és formakincsének történetével foglalkozik. A geomorfológusok régóta tudatában vannak annak a jelenségnek, hogy a bányászat nyomot hagy a felszínen is: az úgynevezett alábányászott terület labilissá válik, és a művelés típusától, a kőzetek fajtájától és a bányászat mértékétől függően tömörödik, besüllyed, megroggyan és számos más jelenséget produkálhat (Borsy 1993). A víz, mivel összenyomhatatlan, hasonló szerepet játszik a felszín stabilitásának kialakításában, mint az egyéb ásványkincsek. Ma már világosan látható, hogy a talajvíz és rétegvíz nagymértékű kiszivattyúzása hiányt hagy maga mögött, amely sokszor végzetes is lehet: ha a fedőkőzet vagy maga a talaj összenyomódik, a víztartó réteg kapacitása visszafordíthatatlanul károsodik, mint ahogyan a kulacsunkba sem tudunk már ugyanannyi vizet tölteni, ha ráléptünk, és kivasaltuk.

Még ennél is érdekesebb, hogy az egész bolygót szó szerint megingatta a felszín alatti vízkivétel. Az égitestek – köztük a Föld – forgás közbeni dőlésszöge általában elég stabil szokott lenni, de ha a bolygó belsejében vagy felszínén nagy tömegek helyeződnek át egyik pontból a másikba, az kihatással van erre a szögre. A mérést a világegyetem legstabilabbnak tudott pontjaihoz, a kvazárokhoz – távoli galaxisok középpontjaihoz – viszonyítva végezték. A dőlésszög ingása szezonális, és leginkább a légköri tömegek mozgásával függ össze. A csil-

lagászok mérése szerint azonban az így mért évente néhány méteres eltéréshez a föld felszíne alól 1993 és 2010 között kiszivattyúzott 2 trillió ($10^{18}$) tonna víz is aktívan hozzájárult. Az Északi-sark csak ezen egy oknál fogva évente 4,36 cm-t mozdul odébb, ami azért aggasztó, mert ez a mozgás egyáltalán nem szezonális, hanem állandó (Seo et al. 2023, Castelvecchi 2023). És még nem beszéltünk a peremtengerek fenekén a kőzetek alatt elhelyezkedő édesvízkészletekről, amelyek kiaknázását már szintén fontolgatják (Evans 2023).

Kalifornia déli részén, a Mojave-sivatag alatt található vízkincset olyan szorgalmasan pumpálták ki, hogy az Egyesült Államok Geológiai Földmérő Szolgálatának műholdas mérései szerint 1992 és 1999 között az egész táj mintegy 10 cm-rel került közelebb a Föld középpontjához. Az érdekesség az, hogy késleltetett hatásról van szó, a felszín alatti vízkészleteket az ötvenes években kezdték kitermelni, és a kilencvenes évekre 35 méterrel süllyedt a tükör szintje. A jelenség mellékesen több méter átmérőjű és mélységű felszíni repedéseket is produkál, károsodnak az utak, épületek, kutak, nyomvonalas létesítmények és közművek. De a legriasztóbb a pozitív visszacsatolás: az összeroskadt felszínen csökkennek a beszivárgási lehetőségek, és még kevesebb az esély rá, hogy a tároló valaha feltöltődjön, és minél jobban összeroskad, annál kevesebb hely is marad odalent a pótlásra (Sneed 2003). Arizonában a meggondolatlanul kipumpált talajvíz miatt több száz kilométer hosszú repedés keletkezett a felszínen, mint amikor a mesében a föld megnyílik a lábunk alatt. A telepesmentalitás, amellyel mindig nyugatabbra mentek annak idején, már nem a legmegfelelőbb válasz az ilyen kihívásokra (Parfit 1993 A).

Az urbanizáció beton- és aszfalttengere az egybefüggő metropoliszok területén már jelentős mértékben megzavarhatja a talajvíz és ezen keresztül a mélyebb felszín alatti vízbázisok utánpótlását is. A csapadék az esővízgyűjtő-hálózat és csatornarendszer jóvoltából nemcsak felhasználatlanul, de a mesterséges felületeken, utakon és háztetőkön szennyezetté válva a közeli folyókba vagy egyéb befogadóba kerül, de semmiképpen sem a talajba (Lazaroff 2002b).

Mexikóváros, ahol 18 millió szomjas lakos pályázik a véges vízkészletre, évente több centit süllyed a kipumpált talajvíz miatt. 1900 óta a talajvíz szintje egy olyan vidéken, ahol a bőségesen előforduló tavak, csatornák és lagúnák miatt a rátelepült várost az Újvilág Velencéjének nevezték, 8 méterrel süllyedt. A város vízvezetékei ezt a terhelést nem viselik el, és eltörnek. A vízfelhasználás egyharmada ennélfogva nem a lakosok, hanem a törött csövekből elszivárgó víz számlájára írható (Montaigne 2001b). Teheránban, ahol korábban a qanatoknak nevezett régi módszerrel 1,5 millió lakost gond nélkül el tudtak látni, a kétezres évek elején az ivóvizet már jegyre adták (NGM 2001), és a helyzet azóta csak súlyosbodott, a vízhiány lassan az egész országra kiterjed (Ritter 2019). Indiában a népesség növekedése és a növényzet kipusztítása miatt csökkenő időszakos monszunvízfolyások arra kényszerítik az embereket, hogy nagy talajvízkutakat ássanak, amelyek egyúttal kényszertározónak is beillenek. Sajnos ettől nem lesz

bennük több víz, sőt egy részük el is párolog, aminek az eredményeként India egyes területein a talajvíztükör szintje már évtizedekkel ezelőtt is több métert csökkent (Agarwal és Narain 1985). Másutt viszont, ahol nem kellene, a talajvíz szintje nő. Nagyon sok olyan öntözött terület van a világon, ahol az állandó és felesleges vízutánpótlás miatt a talajvíz szintje a szükségesnél jobban megemelkedik, amely viszont belvízveszélyt okoz, és szikesedést indít meg. Különösen az árasztásos öntözéssel művelt területeken ismert, hogy a vizet nemcsak oda, de el is kell vezetni, ha nem akarjuk a területet tönkretenni (Borsy 1993).

Miután a felszíni és felszínközeli vizeket elszennyeztük, elterjedt a palackból vizet ivás divatja. Azontúl, hogy PET-palackok szeméthegyei kísérik az ezzel foglalkozó vállalatok útját, ezt a vizet valahonnan ki kell nyerni, mégpedig nagyban. És meg nem újíthatóan. Michigan államban a Nestlé percenként 450-1800 liter felszín alatti vizet termel ki (Lydersen 2004). Hazánkban hasonló taktikát vet be a vállalatóriás Kékkúton, ahol a Káli-medence vízkészlete kerül ezáltal veszélybe (Mészáros 2004). Nincs ugyanis akkora felszín alatti vízforrás, amit ki ne lehetne aknázni, és a statikus vízkészletről mondottak értelmében előbb-utóbb mindegyik meg nem újíthatóvá válik.

A világ egyik legnagyobb vízadó rétegét, a dél-amerikai Guarani vízkészletét is veszély fenyegeti. 2003-ban még a rajta osztozó négy ország – Brazília, Argentina, Uruguay és Paraguay – lelkesen írta alá a megvédéséről szóló egyezményt (Muggiati 2003). A vízbázis 37 billió ($10^{12}$) liter vize a felszín alatt 50 és 1500 méter közötti mélységben helyezkedik el, egy része hévíz, akár 50 °C-os is lehet.

A Guarani-projektnek nevezett vízvédelmi program alapelvei meghatározták az éves pótlódás ütemét (160 milliárd liter), és az abból károsodás nélkül kitermelhető mennyiséget (dinamikus vízkészlet), amely ennél jóval kevesebb, mintegy 40 milliárd liter. Mire az esővel a talajba jutó víz eléri a vízadó réteget, több évtized telik el, és igen alapos szűrésen esik át, aminek következtében a vízbázis vize kiváló minőségű (lásd a 9. színes ábrát). Ezért a program vezetői komolyan fontolgatták az ipari és mezőgazdasági (öntözési) célra való felhasználás betiltását. Nem volt azonban adat arra vonatkozóan, ki mennyit használ belőle, ugyanakkor a növényvédőszerek és műtrágyák használata következtében, akárcsak a szemétlerakóhelyek és benzinkutak jelenlétének köszönhetően, a víz minősége veszélybe került. A program fel akarta mérni a vízkészlet veszélyeztetett részeit, és ott megtiltani az ilyen jellegű tevékenységeket.

Sajnos azonban más az elv, és más a gyakorlat, amit a jelen szükségletei szabnak meg. São Paulo a maga 18 millió lakosával Brazília legnagyobb városa, és szomjas. Már akkor fontolóra vették ellátását a Guaraniból, csakhogy messze fekszik attól, így drága és rossz hatásfokú műtárgyakkal kellene eljuttatni ide a vizet. Buenos Aires, a jó levegő városa szintén pályázott a vízkészlet felhasználására (Muggiati 2003). A multinacionális vállalatóriások is be kívánnak szállni a jövőben az ivóvíz biztosításának egyre nagyobb haszonnal kecsegtető üzleti vállal-

kozásába. A Monsanto szóvivője szerint „a fenntartható fejlődés üzleti logikája azt diktálja, hogy a népesség növekedése és a gazdasági fejlődés együttesen egyre nagyobb nyomást gyakorol majd a természeti erőforrások piacára. [...] Ezek a piacok a legkézenfekvőbbek a számunkra, hiszen [...] itt vannak olyan területek, ahol előre jelezhető a fenntarthatóságot érő kihívás, amely alkalmat teremt számunkra üzleti érték teremtésére". Más szóval, a vízhiány és szennyezés a Monsanto számára csak újabb üzleti lehetőség, semmi más... (Shiva 1999).

Ezért nincs mit csodálkozni, hogy 14 évvel később már a szokásos forgatókönyv érvényesült, és a világ két legnagyobb üdítőgyártója, a Coca-Cola és a Nestlé veszekedtek a terület feletti ellenőrzés megszerzésének jogáért, ami egyúttal a vízkészlet kiaknázási jogát is jelentené. A szóban forgó terület egyébként a Guarani-indiánoké lenne (Nguyen 2017).

# 5. HÉRAKLEITOSZ SZÉPSÉGES FOLYÓVIZE

## 5.1. EMBER ÉS FOLYÓ

A holocén közepén, 6-7 ezer éve természeti folyamatok tették lehetővé a nagy folyóvölgyi civilizációk felemelkedését. A tengerszint emelkedése megállt, a delták stabilizálódtak, a folyóvölgyek a nagyléptékű bevágódásból Egyiptom, Mezopotámia és Kína területén meanderezésbe csaptak át (Pennington et al. 2016). A kialakult civilizációk egyes esetekben ellenállóak voltak (Egyiptom, Nílus), más esetekben akár ugyanazon a folyón már nem (Kerma királyság, núbiai Nílus), illetve már akkor komoly technológiai beavatkozásokat igényeltek (Sárga-folyó, Mezopotámia) (Macklin és Lewin 2015). Ezeknek az ókori építményeknek a nyomát ma már nagyon nehéz megtalálni, és akkor is felmerül a kérdés, mennyi volt ebből a természetes változás és mennyi az emberi lelemény eredménye. Mezopotámia esetében a kutatók megpróbálják a geomorfológiai, távérzékelési, történeti és régészeti adatokra támaszkodva elkülöníteni azt a hét jellemzőt, amelynek alapján el lehetne dönteni, hogy egy adott csatorna természetes képződmény-e, vagy emberi kéz alkotta. Ilyen jellemzők a topográfiai keresztmetszetek, töltés- vagy övzátonyszakadások, a mocsarak jelenléte, meanderezés, levágások és holtágak, csatornamintázatok (Jotheri 2018). A legfrissebb elméletek szerint elképzelhető, hogy az Akkád Birodalom végét egy i. e. 2200 körül természetes okokból bekövetkező aszályos időszak jelentette. Az aszály kiterjedt a Mediterráneum vidékére és az attól jó távol fekvő Indus völgyére is, ám nincs nyoma Észak-Amerikában vagy a világ többi részén. Ha most, amikor minden az ember okozta éghajlatváltozásról szól, még egy 100 évig tartó természetes aszály is bekövetkezne, az eléggé aggasztó kilátásokkal járna az érintett területekre (Marshall 2022).

Az emberi beavatkozások uralkodóvá válásának időszakára, vagyis a szervezett civilizációk kialakulásának és fejlődésének idejére bevezették az antropocén korszak fogalmát (Crutzen 2006: 13). Ez persze nemcsak a folyókra vonatkozik,

hanem a természeti folyamatokba történő összes egyéb beavatkozásra is. Az antropogeomorfológia ezeknek a földfelszín alaktani folyamataira gyakorolt hatásával foglalkozik. Egyik legjelentősebb témája a felszíni vízfolyások, leginkább a nagy folyók átalakítása (Lóczy és Sütő 2011). Az átalakításoknak mindig vannak szándékolt és nem szándékos következményei, a rendszerelmélet ismeretében ez nem is lehet másképpen. Bár van olyan szerző, aki összesen 36 különféle típusát különbözteti meg az ember és folyó kölcsönhatásának (Gregory 2005), a gyakorlatban leginkább a folyószabályozások, gátépítések, vízátvezetések, illetve hajózási, öntözési, árvízelvezetési stb. célú csatornák létesítésének következményeivel találkozunk (uott).

A modern technikai rendszerek rugalmatlansága másoknak is szembetűnt. Intézményi szinten már gondolkodnak róla (Vreudenhil 2010), de a természeti és műszaki rendszerek közötti ellentmondás nehezebben oldható fel. Ez még az olyan bürokratikus intézményekre is vonatkozik, mint a természetvédelem, amely erősen hajlamos rá, hogy mindig egy statikus állapotot akarjon konzerválni (Moss és Monstadt 2008: 7–8). A beavatkozások léptéke sem mindegy, minél nagyobb egy beavatkozás, rendszerint annál több nem várt hatás kerül elő (Vreudenhil 2010). A technikai civilizáció előretörésével az ember egymás után szüntette meg élő kapcsolatait a természeti rendszerekkel. Nem történt ez másképpen a vízgazdálkodás esetében sem. A modern korban az első jelentősebb beavatkozást, a folyók szabályozását a létfenntartóról a piacgazdálkodásra áttérő mezőgazdaság földéhsége, az erdőirtások miatt súlyosabbá váló árvizek, illetve a hajózhatóság feltételeinek megteremtése iránti vágy váltotta ki. A szabályozott folyókon csökkent a vízszállító képesség, emelkedett a hullámtéri vízszint, bevágódott a folyómeder, aszályok jelentek meg, illetve hirtelen árvizek, amelyeket viszont gátakkal kívántak megfogni. A síkvidéki, tározós gátak hátrányai miatt ma már az elsőfajú hiba negyedik körében vagyunk, amikor a folyók helyreállítása, a folyóvízi élet megóvása a cél (Borsos 2013).

Az emberi beavatkozások a folyók életébe főként a vízgyűjtő terület földhasználati változásaiban – beleértve az erdőirtásokat és a lebetonozott vagy beépített felületek növekedését – és a vízépítési tevékenységekben, valamint az éghajlatváltozásban öltenek testet. Az erdőtakaró eltávolítása és a földhasználat változásai az arra érzékeny területeken akár 4-6-szorosára is növelték a folyókba kerülő üledéket. A megváltozott vízháztartás és tápanyag-, nyomelemforgalom miatt a biodiverzitás került veszélybe. A folyók vízhozamának több mint 40%-át – és vele a hordalék 26%-át is – manapság nagy (≥ 0,5 $km^3$) víztározók fogják meg. A töltések miatt gyorsul a bevágódás, és csökken a folyó meanderező képessége. A kisebb árvizek veszélye ugyan elmúlik, ám az elmúlt években 52 komoly gátszakadás és töltésátszakadás okozott súlyos árvizeket – mesterségesen (Overeem et al. 2013).

A következőkben a két fő csapásirányt, a folyók szabályozását és a gátak építését tárgyalom bővebben.

## 5.2. FOLYÓSZABÁLYOZÁSOK

### 5.2.1. A folyószabályozások kiváltó okai és kezdetei

Hosszú ideig általános volt a szakmai konszenzus, hogy a mérsékelt övi európai és észak-amerikai folyóvölgyek tájképét alakító természetes vízfolyások morfológiáját és működését a meanderező, kavicságyon futó folyókkal és finomszemcsés üledékkel feltöltött árterekkel lehet jellemezni. Ezt a modellt az utóbbi időben módosítani kellett, hiszen bebizonyosodott, hogy a látszólag hasonló folyó- és ártérformák is jelentős mértékű változatosságot takarhatnak. Ez még inkább így van akkor, amikor évezredes emberi jelenlét következményeit kell valahogy egyeztetni a klasszikusnak ismert folyó menti táj képével (Brown et al. 2018).

A korai folyó menti civilizációk kutatása során öt olyan ártéri morfológiai jelleget különböztettek meg, amelyek a letelepedésre és civilizációk kialakulására alkalmasak lehettek:

1. Hordalékkúpok és törmeléklejtők. Rendszerint hegylábaknál kialakuló, legyezőszerű képződmények. A bennük kialakuló vízadó rétegeket felszín alatti csatornákban vezették el. Tipikus példája az iráni qanat.

2. Oldalazó (mozgó) folyók. A folyóvölgyben dinamikusan vándorló folyók, ahol a megtelepedés állandó veszélyeztetettség nélkül csak a magasabb térszinteken volt lehetséges (a Duna és a Tisza idetartozik).

3. Jól fejlett övzátonyokkal és ártérrel rendelkező folyók. Ezek kiöntése szezonális, jól megjósolható, ezek a folyók nem mozognak olyan sokat, állandó töltéseik és árterük van, amelyre jól lehet árasztásos kultúrákat alapozni. A Nílus ilyen immár több ezer éve.

4. Szerteágazó, kiöntésekkel, kanyarátvágással járó folyók, amelyek hatalmas hordalékkúpokat hoznak létre, és állandó mozgásban vannak. Az Indus-völgyi kultúrák telepedtek ilyenekre, illetve a Sárga-folyó alsó szakasza a példája a fonatos medrű vízrendszernek.

5. Nagy kiterjedésű, folyók által táplált vizes területek. Ezek folyamatos vízborítással rendelkező nagy medencék, amelyek mellett lehetett a kis lejtésekre alapozva mezőgazdasági termelést kialakítani. Kambodzsában a Tonlé Sap tó – amelyet a Mekong táplál – mellett alakult ki gazdálkodó kultúra (Macklin és Lewin 2015).

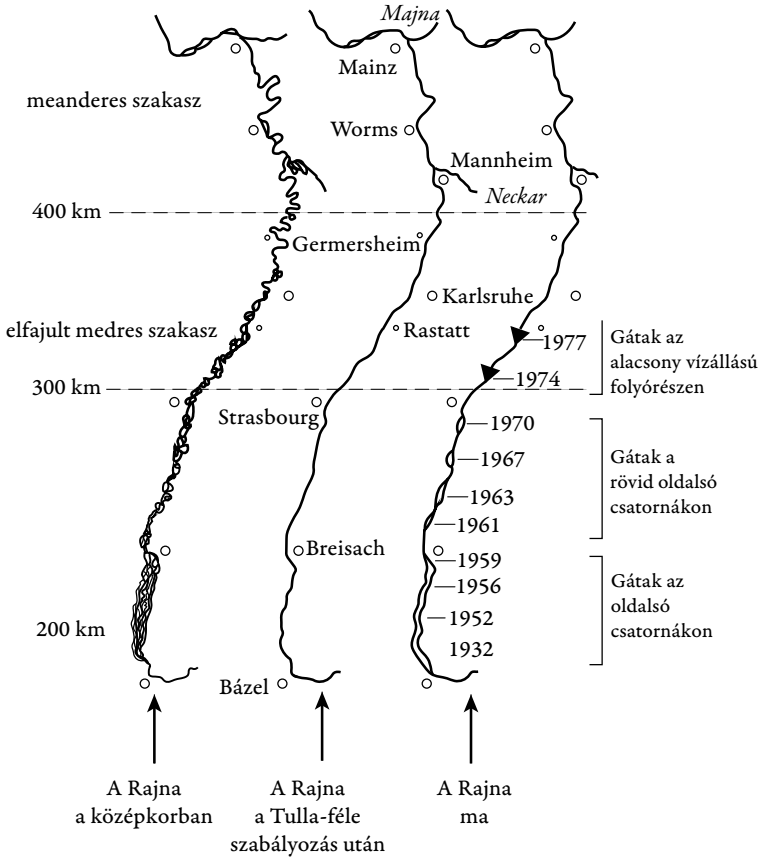
A LIDAR-technológiával végzett felmérések megmutatták, hogy az európai alsószakasz-jellegű folyók rendszerint rendkívül kicsi esésűek (Howard et al. 2008, Di Baldassarre et al. 2010). Ennek legfőbb oka a holocén során lerakódott homokos, iszapos és agyagos üledék (Brown et al. 2018). Minden folyó három dimenzióban terjed ki, és folyamatok komplex összeadódása alakítja a sorsát. Bár látszólag egydimenziós mint egyetlen irányban folyó tömeg, valójában árterével együtt kettő, az alatta fekvő és vele kapcsolatban álló víztartó réteggel, illetve esése révén a hegyektől a tengerig mind a három térbeli irányt

igénybe veszi. Ennek a háromdimenziós rendszernek a változásait hidrológiai, geomorfológiai és biológiai folyamatok dinamikus egymásra hatása hozza létre (Petts és Amoros 1996).

Nem is gondolnánk, hogy az ember előtti folyók életét milyen tényezők befolyásolták. A negyedidőszak előtt és alatt az európai folyók medre sokszor elzáródott, méghozzá egyértelműen élő tényezők következtében. A bűnösök az eurázsiai hód *(Castor fiber)* által épített gátak vagy a galériaerdőkből kidőlt fák okozta torlaszok voltak (Francis et al. 2008). Az erdők fáinak gyökerei és szaporítóanyagai hozzájárultak ugyanakkor a kialakuló meder stabilizálásához is (Tal et al. 2004). Az emberi beavatkozások már nagyon korán maradandó változásokat okoztak a folyók eme dinamikus életében. Nagy-Britannia területén például az újkőkorszakban nagyon hirtelen kezdődött a kultúrtájak kialakítása, és a felföldek legtöbbjét már a rómaiak megérkezése előtt letarolták (Petts 2001). A két ütemben végzett erdőirtások 2000-2500 évvel és 1000-1500 évvel ezelőtt voltak a legintenzívebbek. Ennek eredményeként a folyók medre sokkal dinamikusabb változásokat produkált, mert az eróziós hatásoktól már nem védte semmi – és nem csak a felső folyásnál (Brown et al. 2013).

Ezzel egyidejűleg – a késő római kor, korai középkor idején – a legtöbb természetes nedves területet Európa-szerte lecsapolták, hogy mezőgazdasági termelés alá vonják. A feudális rendszerben a folyók szabályozása különböző okokból igen esedékessé vált. Mást kívántak a halászati, mást a hajózási és megint mást az energetikai (vízimalmok) megfontolások: a legtöbb kisebb folyón mindenhol zsilipek, vízimalmok, hidak és töltésutak tűntek fel. Az áradásokat ellenőrzött módon, gátakkal szabályozva a művelt földterületeken terítették szét, akárcsak Kínában, és nagyon hasonlóan ahhoz, amit majd a magyar fokrendszer esetében látunk (Lewin 2013). Időközben a galériaerdőket kivágták, a hódot meg kiirtották, az eredeti folyószabályozó mérnökök helyét tehát más vette át (Brown et al. 2018).

A Rajna Európa negyedik legnagyobb folyója, és egyúttal a legrégebben szabályozott is. A deltában a hollandok vették el a tengertől a poldernek nevezett feltöltött területeket. A folyószabályozás után a hullámtér magassága a lerakott üledék miatt megemelkedett, míg a mentett oldalon fekvő területek süllyedni kezdtek. Ma már tengerszint alatt lévén, folyamatos szivattyúzással és a gátak egyre nagyobb mértékű magasításával tarthatók csak fenn. A folyó felső szakaszán viszont a zsilipekkel kombinált gátépítések okoztak meglehetősen sok kárt. A hajózási igényeknek mindent alárendelő vízügyi beruházások miatt a folyó élő elemei számára a hajózócsatornák nem nyújtanak védelmet, és a talajvíz szintje pedig mindenhol lecsökkent. A gátak alatt a lezúduló víz eróziót okoz, a folyóágy kimaródásának ellensúlyozására kénytelenek az üzemeltetők évente visszahordani a kimosott üledéket (Smits et al. 2001).




31. ábra. *A Rajna szabályozásának három üteme: eredeti, folyószabályozás, gátépítések (Forrás: Dister 1986)*

Az elmúlt kétszáz évben az emberi beavatkozások súlyosan károsították a Duna természetes rendszereit is. Mint máshol, itt is a folyókanyarok átvágása, kiegyenesítése, az árvízvédelmi töltések, később a természetes áramlást megszakító gátak építése, a földhasználati változások és az erdőirtások okozták a legtöbb bajt. A Duna eredeti árterének több mint 80%-a veszett el a 20. század során (Bachmann és Wurzer 2001). Olaszországban az Adige folyó egy 115 km-es szakaszán vizsgálták meg, hogy a folyószabályozások előtti mederhez képest a szabályozási munkák alatt és után milyen változások következtek be (Scorpio et al. 2018).

A beavatkozásokat sokféleképpen lehet felosztani. Egy optimista változat szerint az elmúlt kétszáz év során öt szakasza volt az ember-folyó kölcsönhatásnak: az ipari forradalom előtti vízhasználat, ami a 19. század közepéig tartott, az ipari forradalom szakasza, ami az I. világháborúval ért véget, a mezőgazdasági szakasz a múlt század nyolcvanas éveiben adta át a helyét az ökológiai javítás korának (!), majd a 2000. évtől elindult az Európai Unió vízkeretirányelve (WFD), amely majd mindent megold – legalábbis a szerzők szerint (Wolf et al. 2021).

Az európai folyóvölgyekben az ember és környezete együttélése az újkori folyószabályozások megkezdéséig csak kevésbé átfogó és főként csak kevésbé tudatos természetátalakítással, és legtöbbször mindezek következtében kevésbé tragikus következményekkel járt. Bár vannak szerzők, akik régészeti és történeti forrásokra hivatkozva már a korábbi népeknek is jelentős felszínformáló, folyóvölgy-szabályozó munkákat tulajdonítanak, mint például a Csörsz árkának nevezett, a történészek zöme által egyébként hadászati építménynek tartott képződményt, vagy az avarkori győrök rendszerét (Molnár 1991a, Hamar 2000), illetve mostanában a Kisalföld középkori árokrendszerét (Takács és Füleky 2003), az igen valószínű, hogy ezek a beavatkozások, ha valóban ilyen célúak és tudatosak voltak is, nem jártak olyan következményekkel, amelyek révén beindult volna az elsőfajú hibák spirálja. Ennek ellenére a szerzők egy része meg van róla győződve, hogy Magyarországon a középkor első felében teljes körű szabályozást megvalósító vízügyi rendszerek léteztek, amelyek keretében az ország nagy területein öntözéses gazdálkodás és tógazdálkodás folyt (Takács 2001).

Ugyanezt gondolják mások az alföldi sáncárkok rendszeréről: „E hosszanti sáncárkok észak-alföldi szakaszai esetében nagy valószínűséggel tehát egy olyan többfunkciós, többször használt (épített, felújított), szakaszosan kiépített *földműhálózatról* van szó, mely az Alföld felszíni vízfolyásainak irányításában, vízjárásuk szabályozásában is jelentős szerepet játszott." (Baráz 2014). Ami azt illeti, a hivatalos vízügyi történetírás még a fokgazdálkodás tudatos és tervszerű voltát is tagadja, nemhogy az annál korábbi képződmények vízgazdálkodási célzatát (Deák 2001). Az igazság, mint legtöbb esetben, valahol középütt lehet, és bizonyos, hogy a középkorban és azelőtt a folyóvizek rendszerébe sem mélyreható beavatkozások, sem általuk okozott, tragikus mértékű társadalmi károk nem voltak jellemzők. Az újkorban azonban a piacgazdaság kialakulásával, a tulajdonosi viszonyok változásával és egy sor egyéb, itt nem részletezhető szemléleti és társadalmi átalakulás miatt megváltozott a beavatkozások gyakorisága és jellege.

A beavatkozások közül a legmélyebbre ható és legkiterjedtebb a teljes vízgyűjtő terület vegetációjának és növényzettel borítottságának átalakítása volt. A folyamat már a középkorban megkezdődött, és Európa egyes területein más és más időben játszódott le, de a legtöbb helyen a 17. és 18. században ért el egy olyan kritikus értéket, amely már az elemzett peremfeltételek megváltozásához,

a pufferkapacitások kimerüléséhez és az egyes alrendszerek sérüléséhez vezetett. Ezáltal megváltozott a folyóvölgyi rendszer működése. Emellett a legnagyobb hatást a 17. és 18. században végzett folyószabályozások és lecsapolások váltották ki (Petts 2001). Különösen a 19. században alakult ki az a felfogás, hogy a mocsarak eredendően fertőző – ebből ered a fertő –, felázott, nedves és egészségtelen területek, és a felelős gazda egyetlen célja velük csak az lehet, hogy minél hamarabb művelt mezőgazdasági földterületté alakítsa át (Pournelle 2013).

Akkoriban még elég hézagosak voltak a kapcsolatok Kínával, pedig a Mennyei Birodalom példája intő jel lehetett volna. Ott már négyezer éve éltek emberek a nagy folyók, például a Sárga-folyó partján, és miután a hidrodinamikai törvények mindenhol egyformák, ők is ugyanazokat tapasztalták, mint sok száz évvel később az európaiak. Túlzás nélkül mondható, hogy évezredeken keresztül szenvedtek a gátak közé szorított folyó választól, a folyó alluviális hordalékkúpján épült Kaifeng városa a 4. század óta 84 árvizet élt meg, ebből hét teljesen elpusztította. A lakók minden alkalommal újjáépítették, jelenleg első városuk romjai 10 méterrel vannak átlagosan a föld felszíne alatt. A sorozatos gátépítések pozitív visszacsatolásokat váltottak ki, akár átszakadtak, akár nem. Ha átszakadtak, a hirtelen kiömlő víz a hullámtérben hagyta a hordalékát, ezért a feljebb lévő gátak később, egy újabb áradásnál nagyobb eséllyel szakadtak át, ha viszont sikerült megóvni őket a gátszakadástól, az üledéket megint csak a hullámtérben rakta le, ezzel emelve a hullámtér magasságát, mint arról még lesz szó. Az eredmény: a Sárga-folyó alsó szakaszán jelenleg 10 méterrel a természetes terepszint felett van a folyó középvizének szintje (Chen et al. 2012).

További gond, hogy az utóbbi időben (konkrétan 2000 és 2005 között) a folyó elvesztette hordalékának jelentős részét. Pedig itt nem is a nagy gátépítések okozták a gondot. A talajmegőrzési intézkedések, a csökkenő csapadék – és ezzel erózió hatás –, a felső és középső vízgyűjtőben épített hordalékcsapdák, kis gátak fogják meg a hordalékot, ami viszont hiányzik a deltából, akárcsak a vízkivételek és a csökkenő csapadékmennyiség miatt megcsappant mennyiségű folyóvíz. A Sárga-folyó a történelem során már többször is megváltoztatta folyásirányát és a torkolatát, most a hiányzó hordalék és víz megint beláthatatlan folyamatokat indíthat meg (Wang et al. 2012). Az sem jó tehát, ha túl sok a hordalék, de az sem, ha túl kevés. A Sárga-folyó vízgyűjtő területéhez tartozó Lösz-fennsíkon néhány száz éve folyik csak intenzív földművelés, de ez is elég volt ahhoz, hogy riasztó mértékben meginduljon az erózió. Hatalmas vízmosások, szurdokok alakultak ki a löszben, amelyeket földből, kőből épült és helyi kezelésben álló gátakkal próbálnak megállítani. A leginkább üledékgátnak nevezett, néhány méterestől több tíz méteresig terjedő építmények százezerszámra vannak már most is üzemben, leginkább a falvak tanácsainak a kezelésében (Chunhong et al. 2004). Kína egy másik területén, ahol dolomit az alapkőzet, sikeresen alkalmazzák ezt az anyagot is az erózió lassítására, a törmelék megfogására (Zeng et al. 2008).

Magyarországon az Alföldön a középkor végéig egy igen sikeres, a folyó dinamikáját messzemenően figyelembe vevő gazdálkodási rendszer működött, amelyet éppen ezért ártéri gazdálkodásnak is neveztek. Ám a török időkben a háborúk dúlta térség népe nem volt képes e módszer lényegét képező mesterséges fokok karbantartására, ezért az ártéri gazdálkodás szétesett. A török kiűzése után egyké helyen megpróbálták visszaállítani, de a Habsburg-befolyás alá került országban erre már nem volt lehetőség (Andrásfalvy 1975). A frissebb kutatások arra engednek következtetni, hogy a középkor melegebb időszakai után következő, kis jégkorszaknak nevezett, nagyjából a 13–17. század között lezajló éghajlati változások, az időjárás hidegebbé és csapadékosabbá válása is közrejátszott az eseményekben (Pinke 2015). Mindezeken túl az erdőgazdálkodás módszereinek változása – különösen a vízgyűjtő magasabban fekvő területein – szintén hozzájárult azokhoz a kedvezőtlen fejleményekhez – mocsarasodás, árhullámok emelkedése, hirtelenebbé válása –, amelyekre hivatkozva megkezdték a Tisza és mellékfolyóinak szabályozását.

Pedig a Kárpát-medencében a középkorban – valószínűleg előtte is, csak erről nincsenek adataink – és a kora újkorban hagyományosan magas szintű erdőgazdálkodás folyt. A korábbi erdőirtásokból okult annyit a népesség, hogy az erdőt korlátozott mennyiségű erőforrásnak tekintse, és lehetőleg megújuló módon művelje. Ennek módjai voltak a sarjaztatás vagy a csonkolásos művelés, amelyek során a fát nem kellett tőből kivágni. A 20. századra ezekből a gyakorlatokból szinte semmi nem maradt: jött a homogén erdők kora és a tarvágás (Szabó P. 2009). Ilyen és ehhez hasonló példákkal – a gyümölcsösök hihetetlen változatossága – lehet bizonyítani, hogy a régi korok társadalma igyekezett kihasználni a biodiverzitás előnyeit, és megélhetését a lehető legkisebb pusztítást okozó módon próbálta biztosítani, és az esetek többségében erkölcsi felelősséget is érezve gazdálkodott a reá bízott javakkal (Andrásfalvy 2009). Mintha csak a fenntartható fejlődés fogalmát előzték volna meg évszázadokkal.

Ám amint az erkölcsi megfontolásokat felváltotta a piac és a pénz uralma, hatalmas mértékű erdőirtások indultak be a folyók vízgyűjtő területein, a hegyekben. A közvetlen kiváltó okok súlya helyileg változott, de az iparosodás számos indokot kínált, amiért fát lehetett kivágni. Svédországban és Finnországban a svéd hajóhad hajóinak fenekét fakátránnyal vonták be, hogy ellenállóbbá tegyék a sós tengervízzel szemben, ehhez hatalmas mennyiségű fa „krakkolására" volt szükség, Csehországban az üvegművesség kedvéért tarolták le az erdőket, másutt egyszerűen a piaci viszonyok és a lakosság számának növekedése indokolta az erdőterületek korábbi szálalása helyett a tarvágást. A Kárpát-medence peremén levő vízgyűjtőkön többek között a faszén iránti kereslet okozta, hogy a 19. század elejéig 50 ezer km$^2$-rel csökkent az erdőterület (Szigyártó 1991). Az erdőirtás következtében kiesett a szivacshatás, és csupasszá vált a táj. Ezért meggyorsult a vizek lefolyása, ami pozitív visszacsatolással eróziót indí-

tott el. Az egyre jobban denudálódó vidékeken az erdők visszatelepülésére kevés remény volt, ezért a folyamat ördögi körré zárult, és egy másik alrendszeren, a folyóvölgyben szintén kibillentette a rendszer folyamatait dinamikus egyensúlyukból.

A növekvő erózió nemcsak több, de más összetételű hordalékhoz is vezetett, hiszen a hegyekben kialakult erdőtalajt mosta bele lebegtetett hordalék formájában a vízbe. Ezt a folyó a völgyben rakta le, amitől megemelkedett a mederágy, és feliszapolódott a meder. Ebbe a kisebb keresztmetszetű mederbe érkezett az eddigieknél gyorsabban – tehát nagyobb mennyiségben – a víz. Márpedig a folyadék még mindig összenyomhatatlan, tehát arra terjedt, amerre utat talált: fölfelé. Megemelkedett az árvízszint, és szélsőségesebb lett a vízjárás (Molnár 1991. március).

A folyamat hasonlóképpen játszódott le a világ más tájain is. Európában az Alpokban a 18. században végzett nagymértékű erdőirtások okozta fokozott talajpusztulás, üledékképződés és hordalékfelhalmozódás olyannyira megnövelte a folyóágyak telítődését, hogy a Rajna korábban hajfonatszerűen elágazó hegyvidéki folyóágait és mellékágaikat ki kellett egyenesíteni (Jungwirth et al. 2009).

A fentről érkező áldást tetézte az ártéren bekövetkező változások következménye. Erdőt az Alföldön is irtottak (Pinke et al. 2023). Elsődlegesen szántóföld létesítése céljából, mert az egyre értékesebbé vált a társadalmi változások miatt, míg előtte, a török hódoltság idején hadi célokra is. Az elpusztított ártéri ligeterdők olyan visszacsatolást indítottak be, amely a peremfeltételek romlása irányába hatott. A mélyebben fekvő erdők helye elmocsarasodott, az egykor magasabban fekvő keményfás társulások helyén csupasszá vált talajt pedig a szél a mélyebb részek, a víz szétterítését hajdan végző laposok felé fújta. Ezek feltöltődve nem tudták korábbi szerepüket eljátszani, hanem elmocsarasodtak. Erdők hiányában megváltozott a terület éghajlata is, a nedvességcsapda kiesése miatt szárazabbá és szélsőségesebbé vált, ami tovább fokozta a deflációt. Ez utóbbi rongálta a termést is, csökkent a gazdasági hasznosíthatóság foka.

Nem használt az sem, hogy sokszor mesterségesen mocsarasítottak el egyes területeket katonai céllal, a folyózugokba telepített végvárak jobb védelme érdekében. A másik tevékenység az egyre szaporodó vízimalmok okozta kártétel volt. Ezek a folyókat, vízfolyásokat keresztben gáttal elzárták, hogy az egész vizet a malomkerékre tudják engedni, majd a dolga végeztével azt nem engedték visszza a mederbe, hanem szélnek eresztették: értelemszerűen az ártér mélyebb részeire folyt, és tovább mocsarasította azt. A 19. század végén csak a Tisza vízgyűjtőjén több mint 7000 vízimalom működött (Hamar 2000). Hasonló volt a helyzet a Duna és mellékfolyói mentén is (Néma 2009). A mocsarasodást csak fokozta, hogy a fokok, amelyek korábban két irányban vezették a vizet, az elhanyagolás miatt eltömődtek, az ártéri gazdálkodás visszaállítására a megváltozott körülmények és a társadalmi ellenállás miatt viszont nem volt mód (Borsos Balázs 2000).

Mindezek alapján megnövekedett az árvizek gyakorisága is. Az, hogy mikor mit neveztek árvíznek, nagyban függött az adott kultúra természethez való viszonyától és gazdálkodási módjától. Árvíz feljegyzésére akkor került sor, ha az kárt okozott. Ellenkező esetben csak a szokásos évi nagyvízről volt szó. Az mindenesetre megállapítható, hogy míg az Árpád-kortól az 1700-as évekig átlagosan 30 évente volt komoly árvíz, a gátak megépítése előtti időszakra ez 4-6 évre csökkent (Szigyártó 1991)! Gondoljunk csak Wesselényi Miklós báróra, az árvízi hajósra és a 18–19. század nagy árvizeire. Ezeknél a gondot az okozta, hogy megnőtt a lakosság, és olyan helyekre is települtek emberek, ahová azelőtt nem, illetve megnőtt az intenzív művelésbe bevont, de mély fekvésű területek kiterjedése.

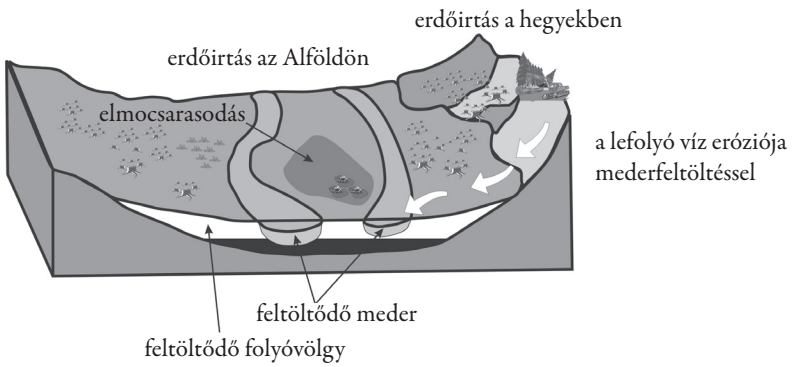
A Tisza völgyében már annyira tarthatatlanná vált a helyzet, hogy nemzeti üggyé vált egy átfogó folyószabályozás igénye, amelyet gróf Széchenyi Istvánnak kellett kézbe vennie (Gulyás 2000). Szentes városában például a népesség növekedésével lassan a magasabb térszintekről a mélyártérre is települtek az emberek, ami egyet jelentett a folyamatos árvízi kitettséggel (Filep 2009). A Duna mentén már annyi probléma adódott a vízimalmok okozta belvizek elvezetésének szükségességéből, a települések és birtokok határainak folytonos változásaiból, hogy úgy tűnt, csak egy átfogó vízrendezés tehet az ebből eredő perekre pontot (Néma 2009). A fordulópontot a 18. század vége és a 19. század eleje jelentette, amikor a fenti tényezők együttes hatására (amelyek a világ más részein alapvetően hasonló módon játszódtak le) olyan nagy méretű és összehangolt természetátalakító tevékenységekbe kezdtek szerte Európában és így hazánkban is, amelyek immár visszafordíthatatlanná tették az egész rendszer sorsát.

Hazánkban Mária Terézia mérnökei kísérelték meg először a folyók okozta problémákat a természet ellenében, az emberi erőben bízva megoldani. Javaslatuk a Duna mentén, a Sárköz területén a fokok eltömése és a folyó mentén kétoldalt mesterséges töltés építése volt (Dóka 2009). Az ott lakók, akik ismerték a folyó valóságos természetét, kétségbeesetten tiltakoztak a mozgásviszonyokat semmibe vevő, mérnöki agyú megoldás ellen, de hiába. A társadalmi, gazdasági viszonyok megváltozása azt követelte, hogy a kialakuló nagybirtokokon a földesurak érdekeit szolgáló, a nyugat-európai piacokon jól eladható gabonatermelés folyjon (Andrásfalvy 1975, 2009). A legújabb kutatások is azt a tényt igazolják, hogy a Tisza mentén szintén a földesurak az 1767-es úrbéri rendezés következtében megszaporodó birtokainak pénzgazdálkodásra való átállása, a népesség nagy részének „elkülönözése", vagyis az addig közösen használt forrásoktól való eltiltása volt az elsődleges oka a folyószabályozások hirtelen megugrásának. Bár az első ilyen szabályozási tevékenységet, a Mirhó-fok elzárását még demokratikus döntéshozatallal kezdték megvalósítani, a második lépcsőben a Vásárhelyi-féle tervek megvalósítása mindenféle egyeztetés nélkül történt – akárcsak most, a továbbfejlesztett változatban. És erre jó oka volt a gabo-

nalobbinak. Debrecen város állattenyésztői jól látták a fok elrekesztésének hátrányos következményeit, s kétségbeesetten igyekeztek megakadályozni az Európaszerte híres gulyáikat szomjazásra ítélő „búzabányák" kialakítását. A búzatermelésre való átállás a Nagykunság földesurainak lehetővé tette, hogy kihasználják a napóleoni háborúk gabonakonjunktúráját (Pinke 2015).

A Tisza szabályozása a 19. században kezdődött, és a 20. század első évtizedeiben fejeződött be. A beruházás támogatóinak, köztük a legnagyobb magyarnak, Széchenyi Istvánnak és a neves vízépítő mérnöknek, Vásárhelyi Pálnak az elképzelései sajnos nem voltak helytállók, mégpedig nem annyira „szakmai", mint inkább elméleti síkon. Jó szándékuk megbicsaklott azon, hogy nem voltak tisztában az általuk manipulált rendszer sajátosságaival, nemcsak társadalmi tekintetben – hiszen Széchenyi saját uralkodó rétegének érdekeit tartotta szem előtt –, de rendszerelméleti síkon sem.

Először fordult elő, hogy megfordult az ok és okozat viszonya ember és társadalom kapcsolatában. Eddig a gazdálkodás és a társadalmi hierarchia követte a természeti környezet adta lehetőségeken belül a technika nyújtotta lehetőségeket, most a technikát arra kezdték használni, hogy a gazdasági és társadalmi változások kiváltotta igényekhez szabja a természeti környezetet (Borsos Balázs 2000). Ha az ártéri természeti környezetet és az emberi kultúra egészét ökoszisztémaként fogjuk fel, azt kell látnunk, hogy az emberi kultúra mint alrendszer alkalmazkodása során elvesztette az együttműködés képességét, ezért a rendszer egy új, másfajta tulajdonságokkal rendelkező rendszernek adta át a helyét. Roy Rapaport kultúrantropológus ezt nevezi rossz alkalmazkodásnak, „maladaptációnak" (Rapaport 1977: 58). És így is van. A beinduló elsőfajú hiba miatt jó esély van rá, hogy újabb és újabb problémák merülnek fel, amelyeket csak rendszeridegen bevitellel (energiával) és csak ideiglenes jelleggel lehet „megoldani".




32. ábra. *A folyószabályozások igényét kiváltó okok (Grafika: Bánvölgyi Tamás)*

Hasonló a történet a Körösök vidékén. Az Árpád fejedelem vezetésével a mai Szarvas városánál a Körös folyón átkelő magyarok már egészen biztosan nem érintetlen tájra érkeztek. A félnomád pásztorkodó közösségek az ártér és az ármentes területek határzónáján telepedtek meg. Nyári szállásaikról állataikat az árterek peremén elhelyezkedő, nyárra sárguló füvű pusztákról az árterek ligeterdei között meghúzódó, még ilyenkor is üde rétekre hajtották. A vízfolyások és árterek akkor még egy önálló fejlődésre is képes rendszert alkottak. A folyóvizek munkája övzátonyokat és folyóhátakat épített, elmosta a partokat, kimélyítette a kanyarulatokat, hordalékkal töltve az ártér mélyedéseit, a medrek átrendeződtek és áthelyeződtek, a kanyarulatok pedig vándoroltak, lefűződtek (Fodor 2009).

E rendkívül dinamikusan változó környezethez a letelepült magyarság az Árpád-korban kiválóan alkalmazkodott, kialakítva az ártéri gazdálkodás, a fokgazdálkodás és a szilajpásztorkodás módszereit. A folyóvölgyekben a megélhetést az állattartás mellett az olyan haszonvételek jelentették, mint a halászat, a vadászat, a nádaratás vagy a vadgyümölcsök és a vadon élő állatok gyűjtése (például rák, teknős, kagyló). Az itt élő népesség tehát a természeti adottságokat kihasználva több lábon álló, meglehetősen önellátó gazdálkodást folytatott, és közben az évszázados tapasztalatok alapján nem felélték, hanem hasznosították a természeti erőforrásokat.

A 14. századtól a fejlődés központjává a mezővárosok váltak, ami visszavetette az ártéri gazdálkodást. Az igazi törést azonban a török hódoltság okozta, különösen azért, mert a háború során széthullott a térség településszerkezete. A török hódoltság előtti Békés még egy 1400 községet számláló megye, azt követően mindössze 25 települést jegyzett. A lakosság nagy része elmenekült, vagy bevette magát az árterek és mocsarak vadonjába. A fokrendszert elhanyagolták, és ezt követően már nem beszélhetünk tudatos ártéri gazdálkodásról sem, legfeljebb ártéri haszonvételekről. Ennek ellenére sokak számára vált megélhetési forrássá az ártér, kialakult a pákász, csíkász és rákász „foglalkozás", és ezek fennmaradtak a hódoltságot követően is, egészen a folyószabályozásokig (Jakab és Csengeri 2020). Hozzátehetjük, hogy az adószedők legnagyobb bánatára, mert nem lehetett rajtuk behajtani az adót.

A Körösök vidéke a török hódoltságot követően évtizedekig szinte lakatlan volt, amin német és felvidéki tót telepesek átköltöztetésével próbáltak enyhíteni. A 18. századi betelepítésekkel a lakosság létszáma jelentősen nőtt, de a szabályozatlan Körös vizei hatalmas területeket borítottak el, melyek az ár levonulása után sem voltak alkalmasak a szántóföldi művelésre. E vadvízország – mely a háborúk közepette a vidék lakosságának túlélését szolgálta – a 18. század végére már a fejlődés gátjává vált. Ekkor indultak a kezdetleges és helyi jelentőségű árvízvédelmi munkálatok és a mocsarak lecsapolása. A korai beavatkozások azonban kevés eredménnyel jártak, sőt a szabályozás létesítményei nagyrészt megsemmisültek (Zatykó et al. 2022).

A 19. század második felétől kezdődő szervezett szabályozások során a folyókat fokozatosan árvízvédelmi töltések és gátak közé fogták, kialakult a hullámterek és a mentett árterek rendszere. Az árvizek rendszeres elöntéseitől mentesített területeken belvízelvezető csatornák hálózata épült ki, és vezette el az összegyűlő vizeket. Ezzel teljesen átalakult a vidék arculata. Az egykori kiterjedt mocsarak – a talaj minőségétől függően – szántóföldeknek vagy szikes pusztáknak adták át a helyüket. Összességében egy évszázad alatt megszűnt az az évezredes, természetes kétlépcsős táj, amelyet a folyók-árterek és az ármentes térszínek kettőssége jellemzett (Jakab és Csengeri 2020).

A Bodrogköz, amit korábban öt folyó ajándékának neveztek, és a történeti tájhasználat változásai (Nagy 2008) ellenére egészen a 20. század második feléig megőrizte vadvízország jellegét (Molnár 2007), végül szintén nem kerülhette el sorsát. 1946 és 1964 között ennek a Tisza, Bodrog, Latorca, Karca és Tice által körbeölelt tájegységnek a „rendezése" is megtörtént. A kialakított árvízvédelmi létesítmények miatt a Tice kiszáradt, növényzet nőtte be, ugyanakkor komoly belvízelvezető rendszert kellett kiépíteni a békeidőben is mocsarasodó táj kiszárítására. A helyzetet tovább bonyolította, hogy a hidrológiailag egységes tájat a történelem és a politika kettéosztotta, tehát mindent megkettőzve kellett megvalósítani. Az eredmény az, hogy ma a Bodrogközben gyakoriak az árvizekből és belvizekből eredő elöntések, ugyanakkor az aszályok sem ritkák – ennek megoldására találták ki a Cigándi árapasztó tározót, ami a később tárgyalandó VTT (Vásárhelyi-terv továbbfejlesztése) része (Lénárt és mások 2008). Az eredmény egy mesterségesen alacsonyan tartott talajvíztükör, amihez a jelenkori tájhasználat kénytelen alkalmazkodni. A terület legnagyobb részén búzát termelnek, és csak a mélyebben fekvő réteken – ahol a belvíz elvinné a gabonát – maradtak meg a legelők és kaszálók (Dobos és Novák 2008).

### 5.2.2. Gyorsított eljárás

Miért ez a sok probléma? Nézzük meg alaposabban, mit is jelentett a folyószabályozás. Műszakilag két alapvető beavatkozást: a meanderező folyó *kanyarulatainak átvágását* és kétoldalt *mesterséges töltések* építését. A folyamat a világon mindenhol hasonlóan zajlott le, most a Tisza és a Körösök példáján mutatom be a következményeket. A kanyarok átvágásával kiegyenesítették a folyót. A kanyar előtti és utáni szakaszt egy keskeny csatornával összekötötték, és amikor a kanyar medrét kiiktatták, az ezen a csatornán lezúduló víz hamar medret formált a vékony emberi csinálmányból. A cél az volt, hogy a vizet ne szétterítsék, mint addig, hanem igyekezzenek megszabadulni tőle, nem lévén tudatában annak, hogy a természetes csapadék mennyisége nem lesz elég a szántóföldi termeléshez.

Ennek eredményeként a folyó felgyorsult, medre bevágódott, és a nagyobb esés miatt nemcsak az árhullámok, de a kis- és középvíz is hamarabb levonult. A korábban kilométerenkénti 3-4 cm immár 6 centi lett, és kiegyenlítődött, nem

volt már akkora különbség a felső és alsó szakaszok között (Lászlóffy 1982). A korábban 1419 km hosszúságú folyó a szabályozás után elvesztette medrének 32%-át, a munkák befejezésekor már csak 966 km volt. Összesen 114 átvágással 589 km hosszú kanyart sikerült kiiktatni (Lóczy és Sütő 2011). Jelenleg 2700 km védvonal „menti" az Alföld 17 300 km$^2$ nagyságú területét. Ezzel a korábbi élő ártér 90%-a került a gátak mögé. Régebben, mintegy 1000 éven át, amióta csak a magyarok elfoglalták ezt a hont, négyszintes gazdálkodás folyt a folyók mentén. Az első szint maga a folyó, a második a szabad és korlátozatlan ártér, a harmadik a természetes úton ármentes magaslat, míg a negyedik a folyók mentén kialakuló homokhát volt. Az időlegesen elárasztott területeken folyó nedves, és az állandóan ármentes területeken folyó száraz gazdálkodási módok kölcsönösen kiegészítették egymást, és egy komplex, kiegyensúlyozott rendszert alkottak. A folyószabályozás ezt tette tönkre készpénzzé tehető haszon reményében (Bellon 2004). A beavatkozás miatt csökkent a talajvízszint, és szikesedni kezdett a talaj. Az árasztások elmaradása miatt a művelt területeken a talaj ki is száradt.

Nőtt a Tisza által szállított hordalék mennyisége is: a folyó vize zavarosabbá vált. Jelentősen nőtt az évi vízszintingadozás. A Közép-Tiszán a folyó maximális vízállása 2-3,5 méterrel megemelkedett, a kisvízszint 2-2,5 méterrel alacsonyabb lett. A kisvízszint jelentékeny süllyedésével megszaporodtak a hajózás akadályai. A Közép-Tiszán a meder túlszélesedett, új zátonyok alakultak ki, mert a meder a kemény agyagrétegek miatt nem tudott mélyülni. A tervezők nem számoltak azzal, hogy más a folyó természete a Tokaj feletti szakaszon és más Szolnok, de főként Szeged alatt. Nem mellesleg a történeti ökológusok megállapították, hogy azt a térszintet, ahol most Szeged fekszik, a történeti időkben sokáig minden évben teljesen elborította a víz, csak a 10–11. században bekövetkező szárazabb időjárás miatti alacsonyabb vízszintek tették lehetővé a megtelepedést (Szalontai 2016). Az eredmény katasztrofális lett: e tényezők együttes hatására 1876 és 1895 között a Tisza és mellékfolyóinak völgyében minden korábbinál nagyobb árvizek söpörtek végig, s nem egy esetben az ár addig nem veszélyeztetett területeket is elért. A szegedi tragédia utáni vizsgálat megállapította, hogy a kivitelezésnél alapvető hibákat követtek el: a töltéseket felülről lefelé, a mederátvágásokat viszont lentről felfelé kellett volna elkészíteni, de nem így tettek. A Paleocapa (hosszanti töltésépítések) és Vásárhelyi (mederátvágások) elképzeléseinek egyesítéséből származó koncepciót végül a század végén Kvassay Jenő fejezte be (Frisnyák 1987).

Könnyű belátni, hogy egy rövidebb folyó kevesebb vizet tud magában tartani, és hiába folyik gyorsabban, nem tudja levezetni a továbbra is egyszerre, hirtelen érkező árt, ezért kilép a medréből. Ezt úgy igyekeztek megakadályozni, hogy végig a folyó mentén kétoldalt, a főágtól bizonyos távolságra mesterséges gátakat, úgynevezett *árvízvédelmi töltések*et építettek, két oldalról kísérve a folyót. Az árteret ezzel véglegesen és végzetes mértékben beszűkítették egy néhol mind-

össze néhány száz méter szélességű *hullámtér*ré. A cél az volt, hogy a víz egyáltalán ne lépjen ki a medréből (pontosabban a neki kialakított hullámtérből), vagyis kialakuljon egy úgynevezett *mentett oldal*, ami a töltésen kívül található, és folyóvizet közvetlenül nem kap. A folyadékok dinamikájából következően ez a megoldás csak akkor működik, ha végig, folyamatosan vezetjük mindenütt, ahol ármentesíteni szeretnénk, mert elég csak egy helyen kihagyni, ott a folyó ki fog áradni. A töltés anyaga olyan talaj, amelynek szilárdan ellent kell állnia a víz nyomásának (Hamar 2000).

Ám a víz ettől nem lett kevesebb. Józan ésszel nehéz elképzelni, miért is gondolták úgy, hogy ami eddig csak a folyóvölgy 23-30%-ának elborítása révén fért el, most el fog férni egy keskeny, ráadásul rövidebb sávban, még ha ott magasabbra is emelkedhet valamennyivel. Egy egészen új helyzet jött létre. A mentett oldalon hatalmas területek a folyó árvízi szintje alá kerültek, és csak a gát védte őket az elöntéstől. Ez sokkal nagyobb kockázatot jelentett az eddigieknél, hiszen nem lassan, fokozatosan, hanem koncentráltan jelentkezett. A gátak miatt ugyanakkor a felszíni vizek sem tudtak a folyó irányába távozni, ezért később az árteret már mesterségesen kellett belvíz-mentesíteni. A felső vízgyűjtőben bekövetkező változások (erózió megnövekedése, szivacshatás csökkenése) miatt egyre hevesebb és egyre magasabb árhullámok érkeztek, amelyek a hullámtérben tudták csak lerakni a hordalékukat.

Említettem, hogy a folyó által szállított hordalék mennyisége a hegyvidéki erdőirtások miatt megnőtt – hiszen az erdőirtás a folyószabályozások idején is tovább folyt –, és ezt a lelassult víz a síkságon rakta le, ahol medre fokozatosan sekélyebbé vált a környékhez képest. Végül a fokok eltömésével, a víz szétterülésének megakadályozásával maguk a gátak váltak veszélyforrássá, hiszen minél keskenyebb mederbe kényszerítették a vizet, az annál gyorsabban kényszerült folyni, és a kisebb elönthető keresztmetszet miatt áradáskor annál magasabbra emelkedett. A folyómeder az idő előrehaladtával alapállapotban is egyre magasabbra került, hiszen az eddig az ártéren lerakott hordalék most mind a mederben és a hullámtérben szorult, és felemelte a fenék szintjét (Nagy I. et al. 2001). Bár a Tisza esése például a szabályozás után 50%-kal, egyes helyeken kétszeresére növekedett, ezért az érkező ár gyorsabban levonult, viszont magasabbra emelkedett: a mértékadó vízszintek közül a maximális és a minimális (!) vízállás is 2-3,5 méterrel lett magasabb, mint a szabályozás előtt (Somogyi 1967).

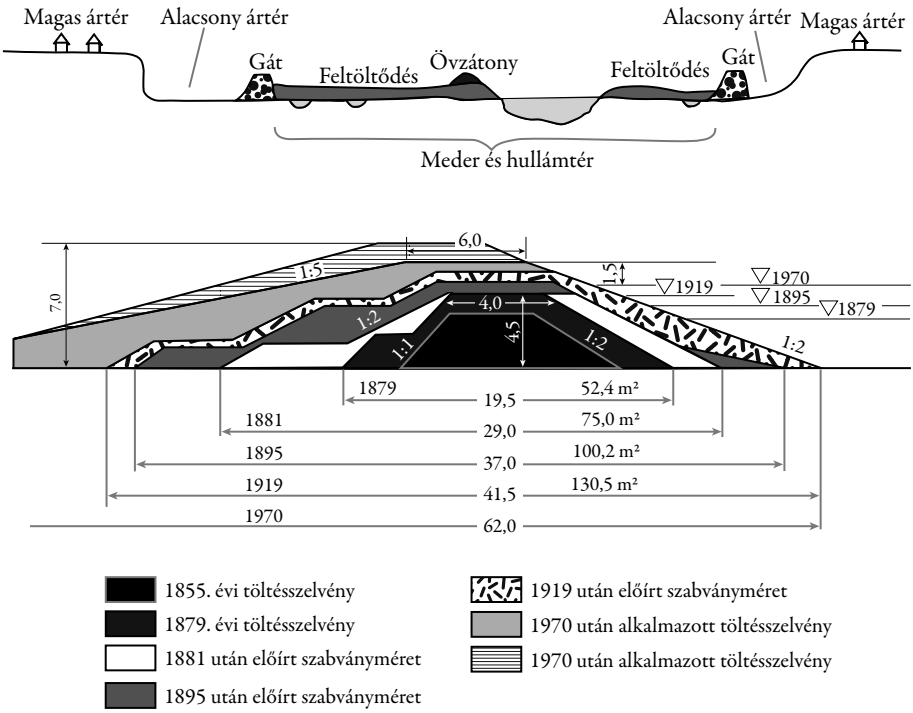
Ezért az ártéri keresztmetszet megtartása érdekében a megszokott mérnöki válasz a töltések időnkénti megemelése lett, a folyónak a környező vidékhez viszonyított szintje pedig folyamatosan emelkedett (Schweitzer 2002). 1860 és 2000 között hét egymást követő alkalommal kellett a Tisza töltéseit az árvizek elleni védekezésként megerősíteni, és magasságukat megnövelni. Ma már 4-6 méterrel magasodnak a középvízi meder – és a környező területek – fölé. A hét emelést két tényező indokolta: 1. A felső vízgyűjtők területén a hegyekben

a felszínborítás tovább csökkent, kevesebb vizet tudtak tárolni, így gyorsabb lett a gyülekezési és levonulási idő; és 2. a két töltés között húzódó, sokszor túl keskeny hullámtér feltöltődött, benőtte a növényzet, és vízszállító képessége csökkent (Nagy et al. 2018). A folyamat mindaddig folytatódott, amíg a földből készült építmények el nem érték fizikai tűrőképességük, állékonyságuk határait, és tovább már kockázatos lett volna megemelni őket (amint azt az egyre gyakoribbá váló töltésátszakadások is jelezték) (Bodnár 2009). Az idő előrehaladtával az egyes rétegek hagymakupolaszerűen épültek egymásra, és a 20. század végére elérték szerkezeti szilárdságuk határait. További magasítás azt jelentette volna, hogy a víz hidrosztatikai nyomásának a földből készült töltés már nem tud ellenállni. 2010-ben Nagykörűben műanyag fóliával igyekezett a vízügy megállítani a töltéstalpakon kialakuló szivárgást (személyes megfigyelés). A töltés ráadásul csak annyira ellenálló, mint az alluviális talaj, amire épül. Ez is meghatározza maximális magasságát (Borsos és Sendzimir 2018).

Nem véletlen, hogy több mint százötven évvel a Tisza egységes szabályozásának megkezdését követően nagyobb árvizek fordulnak elő, mint valaha, és az ezredfordulón egymást követő négy évben (1998–2001) minden alkalommal gondot okozott, sokmilliárdos veszteséget teremtve az államháztartás számára (Molnár 2002a). 1998–1999-ben a tetőzési szint az addig mért legnagyobb vízállást számos helyen meghaladta (Borsos Balázs 2000). Csak a jó szerencsének és az éghajlatváltozás okozta kiszámíthatatlanságnak köszönhető, hogy azóta egyelőre megúsztuk komolyabb bajok nélkül, bár riasztás szinte minden évben van (TEG 2020). A kis árvizeket még lehetett kontrollálni, de a szabályozások utáni nagy árvizek nagyságrendekkel több kárt okoznak. Közben a felső vízgyűjtőben a helyzet semmit sem javult, a hirtelen árvizek okai tehát éghajlatváltozás nélkül sem szűnnének meg, a felszínborítás, a gyülekezési viszonyok és a beszivárgás hiányosságai, a szivacshatás kiesése miatt továbbra is jelen vannak (Şerban et al. 2020). A valódi ok az, hogy az emberi beavatkozások kiiktatták a homeosztatikus szabályozási mechanizmust, amely a hatás-ellenhatás elve alapján korábban tompította a folyó mint élő rendszer oszcillációit (Odum 1997: 35). Az üledékföldtani felépítés és tektonikai preformáció miatt instabil medrek esetében, mint amilyen a Tisza magyarországi alsó szakasza, a folyómeder fejlődésében a medermélyítésen kívül általában a partok eróziója is jelentős folyamat, ami 2013-ban e folyónk esetében a kedvezőtlen időjárási viszonyok és a folyószabályozás utólagos hatásai miatt sorozatos partfalszakadáshoz vezetett (Kis és Lóczy 2018).

A korábbi matematikai modellek, amelyeket a mértékadó árszintek előrejelzésére alkalmaztak, igen korlátozott múltbéli tapasztalatokon alapulnak és ezért nem alkalmasak a várható – vagy éppen váratlan – folyamatok előrejelzésére (Koncsos et al. 2000, Szöllősi-Nagy 2019). Az egyik ilyen, már korábban felismert, és azóta bebizonyosodó, kiszámíthatatlan és váratlan tényező az egyre szeszélyesebb időjárási és éghajlati változások helyi hatásai, amelyek miatt a his-

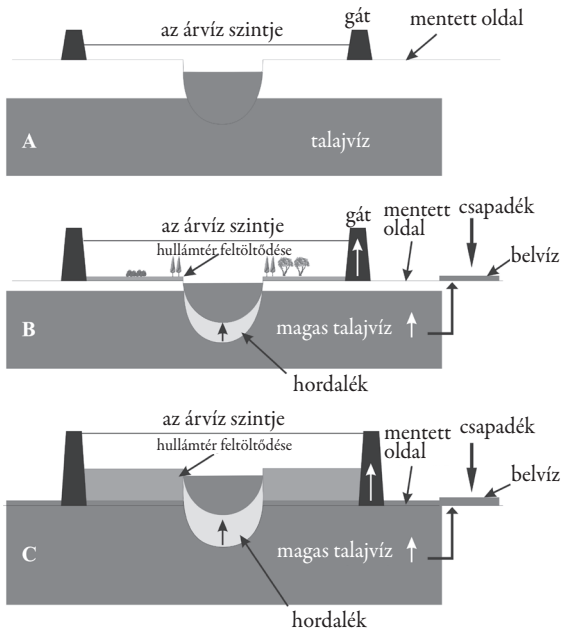
torikus adatok elavulttá váltak (Nováky 2000). És még nem beszéltünk arról a megkerülhetetlen tényről, hogy a Tisza két másik ország területén folyik előbb keresztül, amelyekkel a védekezés folyamatos egyeztetést igényel, hiszen az ő érdekeik egészen mások, ráadásul Ukrajna nem tagja az Európai Uniónak (Borsos és Sendzimir 2018). A Kárpát-medencében összesen 2858 alkalommal történt gátszakadás vagy a töltések átszakadása. Ezek fele a mai határainkon belül fordult elő (Konecsny 2018).




33. ábra. *A töltésmagasítások története (Forrás: Schweitzer 2009 után)*

A Körösök szabályozása is jó példa arra, hogy milyen hibákat követtek el, és hogyan próbálták kijavítani azokat a korabeli építők. A munkálatok már 1830-ban megkezdődtek, a cél a korabeli igények szerint a hajózhatóság megteremtése volt. A meder szélesítését irtással, földmunkával, medertisztítással és iszapolással igyekeztek elérni, számos csatornát és hosszú töltést is építettek. Betiltották a vízvisszatartással, helyi duzzasztással és felvízi elárasztással járó vízimalmok építését, a káros hatású malmokat lerombolták vagy átalakították. A vízgazdálkodási terv átmetszéseivel a Békés városa és a tiszai torkolat közötti 265 km folyóhossz 162 km-rel, 103 km-re rövidült. A szabályozási munkák meg-

kezdése előtt nem létezett a mai Hármas-, illetve Kettős-Körös. A Hármas-Körös korábbi elnevezése Nagy Körös volt, ami alatt a Csongrádtól Békésig, a Fehér- és Fekete-Körös találkozásáig terjedő folyószakaszt értették. A vízrendszer gyökeres megváltoztatásával született meg a ma ismert állapot a Fehér-Fekete-Körös torkolattól lefelé, az újonnan ásott medrű folyót pedig Kettős-Körösnek nevezzük mindaddig, míg felveszi a Sebes-Köröst, hogy azután mint Hármas-Körös szállítsa a vízrendszer minden vizét a Tiszába. A vízfolyások persze itt sem módosítottak a kanyarogva bevágódó vagy épp kanyarogva feltöltő folyamaton, így az eredeti elképzelések folyamatosan kiigazításra szorultak. A helyiek pedig kétségbeesetten ellenkeztek, így maradt meg végül a Szarvas-Békésszentandrási Holt-Körös, a Tiszántúl legnagyobb vízfelületű holtága – ma üdülőparadicsom (Jakab és Csengeri 2020).




34. ábra. *A technikai megoldás: a folyó szabályozása*

A kicsapó, hirtelen árvizek elvezetését a fokok eltömése lehetetlenné tette. A halállomány sem tud ily módon megújulni. Az ártéren maradó víz elposványosodott, és megállt a levegőt igénylő növényzeten, amely megrothadt alatta. A rothadás tovább csökkentette a víz oxigéntartalmát. Az oxigéntartalom csökkenése a vízi élőlények pusztulásához vezet, amelyek bomló fehérjéi tovább szennyezik a vizet. Az elvizenyősödés és az árvizek ellen a gátak további magasításával védekeztek. Ördögi kör kezdődött, amelynek a következménye az lett,

hogy az időszakos áradások kiiktatása miatt az Alföld vízjárta terület helyett félsivatagos, aszály sújtotta, öntözésigényes vidékké, egy kultúrsivataggá vált.

Az ármentesített területek lassan kiszáradtak, helyükön már lehetett gabonát termelni, viszont megszűnt a korábbi hordaléklerakás és ezzel a tápanyag-utánpótlás is. Ugyanakkor a gátrendszer miatt megemelt folyóvízből a hullámtér talaján keresztül a nagyobb hidrosztatikai nyomás miatt megnőtt a beszivárgás, emelkedett a talajvíz szintje, és a mentett oldal folyóközeli részein magas vízállásnál vagy a téli hóolvadás után elérte a felszínt: belvizek keletkeztek. Az eredeti állat- és növényvilág kipusztult, valamint megváltozott a helyi klíma is. A mikrocsapadék (dér, pára, harmat) a megnövekedett párolgás miatt elveszett, a talajok a szárazzá vált területeken átalakultak, a tőzeges láptalajokból széllel hordott, terméketlen réti agyag lett, a magas talajvízszintű és rossz vízelvezetésű területeken pedig beindult a szikesedés (Hortobágy). Az Alföld tehát egyszerre lett vízhiányos és vízigényes (Somogyi 1967).

A fenti okok miatt az árvizek gyors levezetését tehát ki kellett egészíteni a mocsarak, majd később a belvizek lecsapolásával, csatornarendszerrel, még később öntözőcsatorna-hálózattal. Amit addig egyetlen természetes folyamat végzett, most külön-külön költséges műszaki rendszerekkel kellett megoldani. Hamar (2000) a következő kiegészítő vízügyi műtárgyakat különbözteti meg:

1. Lecsapoló csatornák. Amikor a folyók áradó vize, a csapadék és a talajvíz együttes hatására megemelkedett a vízszint, időszakosan vizenyős területeket, lápokat, mocsarakat hozott létre. Ezek vizének lecsapolására építették őket. A lecsapolt vizet a folyómedrekbe vezették, azt remélve, hogy a szárazra került területet művelésbe foghatják. Ám az így nyert termőföldnek nagy ára volt. Túl későn derült ki például, hogy a Balatonba ömlő Zala folyón kialakult ilyen mocsaras terület, a Kis-Balaton a tóba kerülő víz természetes tisztítását és szűrését végezte el gyakorlatilag ingyen. A lecsapolás miatt kimaradt funkciót azóta sikerült részlegesen visszaállítani, de az ökológusok még most sem tudják pontosan modellezni, mi játszódik le a Kis-Balatonban (Szabó G. 2009).

2. Belvízcsatornák. Sík területeken a folyószabályozások egyik leglátványosabb hátránya a belvízveszély fokozódása. A belvíz a talajra hullott csapadékból akkor alakul ki, ha a talaj telítődik, nem tudja befogadni, a természetes lefolyás pedig akadályozott, például az emberi létesítmények, a töltések révén. A mezőgazdaságnak komoly gondokat okoz, hiszen tavasszal sokszor hetekig el vannak öntve a földek, és nem lehet rájuk menni a munkálatok elvégzése céljából. Ezért a vízügy egy levezető csatornarendszert alkotott, amely a pangó vizeket összegyűjti és a folyókba szállítja. Ha egymásra vetítjük a korábban ártérként funkcionáló területek és a belvízcsatorna-rendszer térképét, meg lehet állapítani, hogy a legtöbb csatornára ott van szükség, ahol azelőtt árvízjárta területek voltak. Az ötvenes években Magyarországon mindent víztelenítettek, akár kellett, akár nem, ennek esett áldozatul a Hanság is, amely rendkívüli gazdagságú

vizes élőhely volt. Ma konfliktusokkal terhelt, csekély termőképességű művelt terület (Konkolyné Gyúró 2003). A morfológiai jellemzők azonban nem változnak. Szolnok mellett például az M4-es elkerülő út felüljárójáról a mai napig jól kivehetők a korábbi levágott folyókanyarulatok, mert minden tavasszal feltölti őket a víz (személyes megfigyelés). Ezekre a hatásokra rakódnak rá magának a régiónak a mozgásai: az Alföld az utóbbi időkben süllyed. Ennek a természetes neotektonikus mozgásokon, valamint az üledékes rétegek tömörödésén kívül a legfontosabb oka a szénhidrogén-bányászat és a felszín alatti vízkészletek megcsapolása miatt a felszín beroskadása. Szabályozatlan állapotban egy folyó könnyedén kezeli az ilyen változásokat, a szabályozott vízfolyás azonban csak korlátozottan képes reagálni, és különösen árvizek esetében megnő a visszaduzzasztás veszélye (Timár és Rácz 2002).

3. Öntözőcsatornák. A gátak tehát egyrészt nem engedték lefolyni a természetes csapadékot, másrészt a folyó által hajdan elöntött területekre nem engedték be a folyóvizet, ezek tehát kiszáradtak. Ennek a problémának a megoldására az elsőfajú hiba logikájával újabb műszaki beavatkozást kellett kitalálni: az öntözőcsatornákat, amelyek a folyó vizét most visszajuttatják a vízhiányos területekre. Mondanunk sem kell, igen drága, soha meg nem térülő beruházásokról van szó, amelyeket a 20. században, a 19. századi folyószabályozások után általában állami pénzeken végeztek el, és sok helyen még ma is az állam állja annak költségeit, hogy a gazdák termelni tudjanak. Amerikában a Columbia, a Colorado vagy a Missouri folyók kizsigerelésével egészen torz piaci viszonyok álltak elő, míg Magyarországon a szocialista állam összeomlása után, a privatizáció során a csatornarendszerek igen nehéz helyzetbe kerültek, fenntartásuk és gondozásuk a mai napig nem megoldott. A folyó 2790 km-es hosszához képest 40 000 km hosszú, mesterséges mederről van szó, amely nem látja el saját magát.

Egész Európában és Észak-Amerikában hasonló helyzet alakult ki, a fent említett logikai lánc az összes folyó esetében hasonló eredményekhez vezetett, és a döntéshozók szemében elkerülhetetlenné tette a következő lépcső, a folyót immár nem hosszában kísérő gát, a töltés, hanem azt keresztben lezáró és a korábban ész nélkül levezetett vizet most visszafogó völgyzáró gát megépítését. Példaként említhetjük a Dunát (Tarpy 2002), a Pó folyót Olaszországban (Zwingle 2002) vagy a Rhône és Rajna folyókat Franciaországban, Németországban.

## 5.3. GÁTÉPÍTÉSEK

Gátakat persze korábban is épített az ember. Egyiptomban már hatezer évvel ezelőtt. Ezek látványos mérnöki létesítmények, de kezdetektől volt gond velük. Jemenben a 3700 éves, 3,2 km hosszú, 36,5 m magas és 152 m széles Márib-gát a története során számos alkalommal szakadt át (Hehmayer 1989). Modern korunkban a nagy gátak a 20. század harmincas éveitől a hetvenes évekig élték

fénykorukat (WCD 2000), de divatjuk még korántsem áldozott le. Az ember a kilencvenes évek közepéig szerte a világban összesen mintegy 60 000 víztározót épített, amelyek együttes hatása, hogy a víz körforgását lassítják, természetes tartózkodási idejét növelik (Kerényi 1995). Az ezredfordulóra több mint 45 000 (!) nagyobb méretű, 15 méternél magasabb, illetve 5-15 méter közötti magasságú, de 3 millió $m^3$-nél nagyobb térfogatú tározóval rendelkező gát létesült a világ folyóin, ezek fele Kínában található (Pottinger 2000).

A „Gátak Világbizottsága" (World Commission on Dams) az ezredfordulón kiadott egy jelentést, amelyben komoly kétségeit hangsúlyozta a gátak hasznosságával kapcsolatosan. A jelentés lényege, hogy szinte mindig alábecsülik a költségeket, és szinte mindig sokkal súlyosabb társadalmi és környezeti gondokat okoznak, mint azt akármilyen tanulmány előre tudná jelezni (WCD 2000). Tíz évvel később, a jelentés újraértékelésekor a kitelepített népesség számát 40-80 millió közöttire becsülték, és egy számítás szerint 472 millió olyan embernek a létfeltételei lehetetlenültek el vagy romlottak meg, akik addig a folyótól függtek (Moore et al. 2010). Más tanulmányok is megállapították, hogy a nagy gátakat rendszeresen alulárazzák, és azok nem váltják be a hozzájuk fűzött reményeket, ezért már csak közgazdasági okokból sem biztos, hogy meg kellene építeni őket (Ansar et al. 2014).

Ennek ellenére a harmadik világban a folyamat nem állt le, még további 3700 gátat terveznek megvalósítani főként Ázsiában és Dél-Amerikában (Gies 2023) – ezekhez Kína mint a kommunista elvek kapitalistája csatlakozik. Közben a fejlett országokban, például az Egyesült Államokban a gátak lebontása szép csendben már meg is megkezdődött (Graf 1996, idézi Lóczy és Sütő 2011). Jellemző, hogy 1973-ban például a Hudson folyón lebontott Fort Edward-gát mögött felhalmozódó üledékben található több tízezer kilogramm PCB[5] mobilizálódott és hatalmas területeket szennyezett el. Magyarán, a gátak még halálukban is tudnak kárt okozni (Anisfeld 2010: 137). Annak ellenére, hogy Japán kicsiny és keskeny ország, ahol komoly hidrológiai kapacitásra nem nagyon lehet számítani, a Meidzsi-reform és az ország modernizációjának megkezdése (1867) után az addig csak öntözésre használt kis gátakat ott is felváltották a betonmonstrumok. Pedig a tározók rendszerint kicsik, a földrengésveszély nagy, mégis számos olyan gát létezik, amelynek magassága meghaladja a 100 métert. A nehézségek kiküszöbölésére mindenféle technikával kísérleteznek (Matsumoto 2015). A világ folyóinak 12 millió folyamkilométeréből mindössze 23% olyan, amely megszakítás nélkül éri el a torkolatát – ezek is főként a sarkvidékeken, Amazóniában és a Kongó-medencéjében találhatók, a többibe már belekontárkodtunk (Grill et al. 2019).

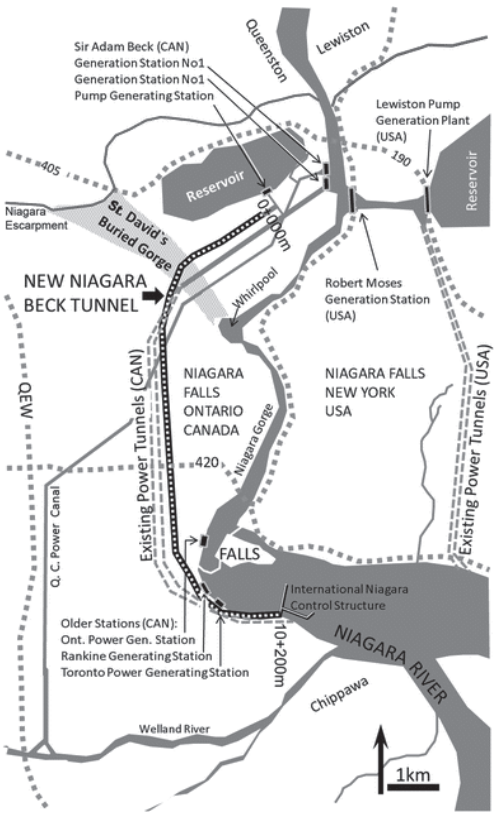
Senki sem vitatja, hogy a vízerőművek hatékonyan alakítják át a víz helyzeti energiáját elektromos energiává. Egy modern, villamos áramot termelő vízerőmű hatásfoka 90% körül van (USBR 2005). A kérdés csak az, hogy milyen áron.

[5] Poliklórozott bifenilek. Világszinten 2001-ben betiltott, környezetre és emberi egészségre egyaránt veszélyes vegyületek csoportja.

A folyó mozgási energiáját alapvetően háromféleképpen lehet kiaknázni:

- tározós,
- átfolyó rendszerű,
- szivattyús tározós vízerőművekkel.

Az első esetben a folyó völgyét a hegyek között egy az egyben elzárják (völgyzáró gát), vagy az ártéren mesterséges gátat és töltést építenek, amely körbefogja a folyó adott szakaszát (síkvidéki tározós erőmű). A második esetben nem az egész folyóvölgyet zárják el, hanem annak csak egy részét, vagy még azt sem, és a folyóban folyó víz energiáját használják ki. A harmadik esetben pedig a térszín egy magasabb részén – legtöbbször hegyen – létesül egy tározó, ahová olyankor juttatják fel a folyó vizét aktív szivattyúzással, amikor olcsó a villamos áram, csúcsidőszakon kívül, és akkor eresztik le, hogy elektromosságot termeljen, amikor drága, csúcsidőszakban (Lumbroso et al. 2014b). A víz energiájának sajátos felhasználási módja a Niagara-vízesést a partján fekvő városkával együtt elkerülő, 10 km hosszú és 4 emelet magas mesterséges alagút, amely a Niagara folyó vizét viszi az újonnan épült vízerőműhöz (ENS 2013).




35. ábra. *Az elkerülő alagút (Forrás: Ontario kormánya)*

### 5.3.1. A bilincsbe vert folyó

A nagy folyókon azok medrét teljes egészében elzáró, víztározóval egybeépített gátak készültek, amelyek egyik legfontosabb indoka először az ivóvíz és az öntözővíz nyerése volt. Vagyis amit a természet magától bőkezűen adott a korábbiakban, elhibázott döntések láncolatán át újabb és újabb mesterséges, műszaki megoldásokkal kellett pótolni. Ez a folyamat végérvényesen a folyók önálló életének megfojtásához, mozgásuk, élettevékenységeik megakadályozásához vezetett. Ráadásul a tárolt víz mennyisége a globális vízkörzés tekintetében igen jelentős, hiszen már a hetvenes években elérte az atmoszférikus víz mennyiségének 25%-át, azóta pedig csak még nagyobb lehet (Borsy 1993). Még szerencse, hogy egy ezzel ellentétes folyamat, a későbbiekben tárgyalandó, törvényszerűen bekövetkező feltöltődés ez ellen hat, hiszen a tározók kapacitása világszerte egyre kisebb lesz (Batuca és Jordaan 2000).

A vízfolyások medrének elrekesztésével épülő keresztgátakat *vízlépcső*nek is nevezik. Kisebb gátak csak olyan szintű duzzasztást okoznak, amely még a folyó saját medrében emeli a víz szintjét, ez a *mederduzzasztás*. Gyakoribb azonban, hogy a meder víztározó kapacitásánál nagyobb mennyiségű vizet akarnak visszafogni, ezért *tározó*t építenek, amely kifejezetten a víz tárolására szolgál. Kis vízfolyásoknál állandó magasságú, úgynevezett *bukógát*akat is szoktak építeni, amelyek csak bizonyos magasságig fogják vissza vizet, afölött átengedik. Nagyobb folyókon a gátat olyan magasra tervezik, hogy a víz felette ne tudjon átbukni, hanem a felduzzasztott víz átfolyását a műtárgyba épített *zsilipek*kel szabályozzák. Az elzárás előtt torlódó vizet *felvíz*nek, az alatta elfolyót *alvíz*nek nevezik. A két vízszint közötti különbség lehetőséget teremt a hidrosztatikus potenciál, tehát a víz helyzeti energiájából eredő munkavégző képességének kiaknázására. Így például nagy gátaknál, mondjuk a Sardar Sarovar-gátnál Indiában, több száz kilométeres, gravitációs úton táplált csatornát építenek rá (Goyal 2019), másutt lehetőség van az öntözőcsatornák táplálására, illetve vízkivétel esetén energiatakarékos szivattyúzásra (lásd a 10. színes ábrát).

Mindezeknél fontosabb azonban, hogy a víz nyomását *energiatermelés*re is fel lehet használni. Minél nagyobb esése van egy folyónak, annál kisebb beruházással lehet nagy vízszintkülönbségeket elérni a keresztgátakkal, aztán a gátba épített turbinákon átengedve elektromos áramot lehet termelni vele. Bár elvileg megújuló energiahordozóról (és nem energiáról!) van szó, a villamos energia termelésének ez a módja mégis számos problémát vet fel. A vízlépcsők ugyanis logikusan illeszkednek abba az elsőfajú hibasorozatba, amelyet a folyók életébe beavatkozó ember kiváltott. Mindenesetre az energiatermelés nagyon sok keresztgát felépítésénél játszott az indokok között elsődleges szerepet. Ezenkívül gyakori még, hogy *hajózási, árvízvédelmi és üdülési* célokat is megjelölnek a tervezők a beruházás indításakor a korábban már említett *öntözési, vízkivételi* célok mellett. Ezek az indokok igen sok esetben mondvacsináltak. Az árvízvé-

delem szempontjából például egy tározó sokszor még veszélyesebb helyzetet jelent, mint ha zabolátlanul áradna a folyó, és sok tragédia következett már be a völgyzáró gátak átszakadásából. Ezért a tározókat ritkán használják az árvízi többlet felfogására, mert ahhoz túl kicsi a kapacitásuk, az árvíz vizének hordaléktartalma pedig magas, így inkább átengedik. Ugyanakkor tény, hogy a világ számos vidékén nem lenne olcsó energia és öntözésre alapozott mezőgazdaság a vízlépcsők nélkül. Kérdés azonban, hogy hosszú távon megéri-e ez a fajta fejlődés azon az áron, hogy a folyók életébe végérvényesen és a magunk számára is káros irányban avatkozunk be.

Bár a WCD eléggé mereven azt állítja, 15 méter magasság és 3 millió $m^3$ térfogat az a határ, amikor egy gát már nagynak minősül, ez nem egészen igaz. Egy gát nagyságát nem annyira a fizikai méretek vagy a beépített elektromos kapacitás, hanem a fizikai, geomorfológiai, hidrológiai és ökológiai tényezők határozzák meg. Mekkora az elöntött terület, csúcsra járatják-e vagy nem, milyen magasból zúdul le üzem közben a víz stb. A csúcsüzemű erőművek környezeti kárai sokszor meghaladják egy konvencionális erőmű hatásait, ezért semmiképpen nem szabadna önkényesen meghatározott villamos kapacitás alapján eldönteni, kell-e például környezeti hatástanulmányt végezni egy-egy beruházás esetében (Gleick 1992).

Alapvető különbséget kell tennünk a folyók felső szakaszán épült *völgyzáró gátak*, illetve a középső vagy alsó szakaszon épült *síkvidéki erőművek* között. Mind közvetlen ökológiai hatásaik, mind járulékos jellemzőik lényegesen eltérnek egymástól. A felső szakaszon épült erőművek rendszerint kevesebb gondot okoznak, mint a középső vagy alsó szakaszon készült létesítmények (Ledec és Quintero 2003). A folyó sziklaágyában elgátolt meder mögött keskeny, mély, viszonylag hosszú tavak keletkeznek, amelyek elsődleges hatásai a folyóvölgy egy szakaszának elöntése, rendszerint erdők elpusztítása, a folyóvíz lelassítása és a migráló fajok (elsősorban lazac) életfeltételeinek rontása. Ennél nagyságrendekkel károsabbak és mindenféle szempontból fenntarthatatlanok a síkvidéki tározós vízerőművek és tározótavak, amelyek alluviális (folyóeredetű, vagyis a folyó korábbi élete során lerakott hordalékból álló) síkságokon vagy üledékes dombvidékeken létesülnek, és csak a torz technokrata szemléletnek, illetve a piaci mechanizmusok egyoldalú érvényesülésének köszönhetik, hogy még ma is rengeteget építenek belőlük, elsősorban persze a fejlődő világban. Az sem mindegy, mekkora egy beruházás. Más szabályok vonatkoznak rá, ha sok van belőle, vagy ha nagy. Így van a gátakkal is, hiába működik a kínai Min-folyón egy fából épült terelőgát i. e. 256 óta (Hamar 2000), ettől az ugyancsak Kínában, a Jangce folyón épült Három Szurdok-gát, a világ legnagyobb vízügyi beruházása még nem lesz kevésbé káros.

Európában és Amerikában már nincs sok építenivaló. A folyókat évtizedekkel ezelőtt „becsatornázták", ahol csak lehetett, mindenütt csatornákat, vízi

erőműveket, gátakat, tározókat és egyéb műtárgyakat építettek. Ezek folyamatos gondok forrásai, és a folyók természetes dinamikája ellen hatnak, hiszen semmit nem vettek figyelembe készítésükkor abból, ami a folyók életét szabályozza. Ám azóta olyan mértékben betelepültek a hajdani árterek és vízjárta területek, és olyan erős mezőgazdasági, energetikai, árvízvédelmi és egyéb érdekek jöttek létre, hogy lebontásukra csak néhány helyen és tökéletlen körülmények között lehetne gondolni. Így az Európai Bizottság csak arra szorítkozhat, hogy előírja, milyen feltételeknek kell megfelelnie a vízenergia kiaknázására tervezett műtárgyaknak és rendszereknek azokon a területeken, ahol az élőhely irányelve és a madarak irányelve hatálya alá tartozó védett értékek találhatók (European Commission 2018).

A vízépítő lobbi, amelynek mohósága semmit nem változott, most a harmadik világ országait vette célba. Délkelet-Ázsia olyan eldugott helyein is épülnek gátak, mint a jelenleg Malájföldhöz tartozó Sarawak tartomány, Borneó nyugati felén. A cél kizárólag a profitszerzés, hangzatos jelszavak mögé bújtatva. Csak a szereplők változtak, itt Kína mammutvállalata, a Sinohydro gátolta el a Rajang-folyót, ahol még tíz-tizenöt évvel ezelőtt is a penan dayak őslakók vadásztak csak. Most egy 160 méter magas, 2400 MW-os vízerőművet tartalmazó gát tornyosul itt, az erdő közepén. Az energiának eredetileg a sűrűn lakott Maláj-félszigetre kellett volna kerülnie, ám olyan drága lett volna átvezetni, hogy inkább a sziget peremére, Borneóba akarnak most nagyvállalatoknak ipari parkot csinálni, hogy kezdeni lehessen valamit a megtermelt rengeteg árammal. Persze a korrupció, a rossz minőségű kivitelezés csak tovább ront a dolgon. A kaliforniai egyetem tudósai elkészítettek egy tanulmányt, amiben alternatívaként sok kicsi gát építését sokkal kisebb társadalmi és ökológiai, környezeti költséggel látják megvalósíthatónak, mint a nagy megalomán betonkolosszusokat – konkrétan Sarawakban (Shirley és Kammen 2013). Talán nem véletlen, hogy Európában már csak olyan diktatúrák foglalkoznak ezzel a kérdéssel, mint Belarusz, ahol a gigantomán elképzelések megkésett példányaként 2021 nyarán kapcsolták a hálózatra a 2200 MW-os asztraveci erőművet, amelynek áramát az EU az emberjogi túlkapások miatt bevezetett embargó miatt nem hajlandó megvásárolni, belföldön pedig nincs hova tenni (Karácsonyi 2021).

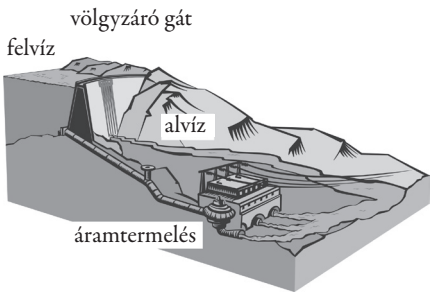
### 5.3.2. Völgyzáró gátak és társaik

Az Egyesült Államok vízépítő nagyhatalma az Army Corps of Engineers elnevezésű szövetségi hivatal, amely tulajdonképpen a vízügyi minisztérium és beruházó szerepét látja el egyszerre. Egy ilyen felállás bárhol a világon másutt is sajátos összefonódásokat eredményezne, és nagyon erőssé teszi a lobbit, amelynek egyetlen célja saját technokrata tevékenységének minél több területre való kiterjesztése. Egy civil szervezet, az American Rivers 1986 óta listát állít fel a mérnöklobbi által leginkább veszélyeztetett tíz amerikai folyóról. A listára tehát nem

a szennyezett vizű vagy katasztrofális állapotban lévő folyókat veszik fel, hanem azokat, amelyeket jelenleg fenyeget valamilyen újabb emberi eredetű beruházásveszély. Az USA leghosszabb folyójának, a Missourinak 35%-a duzzasztott, 32%-a csatornázott állapotban van, és csak a maradék egyharmad folyik úgyahogy békében.

Mindezen derekas erőfeszítések ellenére (illetve éppen azért) a Missouri mégsem folyik békében, 1999-ben például hatalmas árvizet produkált – tározók és csatornák ide vagy oda –, és elöntötte a milliós nagyvárost, St. Louist (ENS April 2, 2002). Érdekes módon a sok beavatkozás sem tudja megakadályozni az időszakos nagy áradásokat a folyó torkolata közelében, ahol egymáshoz közel ömlik a Missouri és az Illinois folyó a Missisippi felső folyásába a hangzatos „nagy folyók találkozása" címen. 1993-ban itt akkora árvíz alakult ki, amely 48 emberéletet követelt, és 34 milliárd dolláros közvetlen kárt okozott. A károk az onnan több ezer kilométerre található Mexikói-öbölben is jelentkeztek. Ha ugyanis a három folyó teljes árterületét hagyták volna elönteni, és nem akadályozzák meg minden eszközzel a kiöntéseket, a felső vízgyűjtőből nem szállítja le egészen a tengerig azt a sok tápanyagot, ami az öbölben súlyos eutrofizációt okozott (Sparks 2016).

Az éghajlatváltozás és a vele járó egyre gyakoribb szárazságok miatt ugyanakkor ezek az erőművek sokszor nem képesek ellátni azokat a feladataikat sem, amelyekre tervezték őket. A 2001 telén bekövetkezett kaliforniai áramhiány okai között például az is szerepelt, hogy az állam áramellátásának 22%-át adó vízerőművek nem tudtak működni, mert a vízhiány miatt tározóikban a víz nem érte el a turbinák működtetéséhez szükséges szintet (Lóczy 2001).




36. ábra. *Völgyzáró gát és tározó felsőszakasz-jellegű folyón*

A felsőszakasz-jellegű folyókon végzett mesterséges beavatkozások tanpéldája Kanada Brit-Kolumbia tartományában eredő és az Egyesült Államok négy nyugati államán keresztülhaladó Columbia folyó, amelynek hidromechanikai kapacitása (munkavégző képessége) egész Amerikában a legnagyobb. Ennek megfelelően be is építették, a főfolyón 14 nagy, a mellékfolyókon összesen 250 kisebb-nagyobb gát akadályozza, hogy a lazac, a Csendes-óceán egyik legjel-

lemzőbb halfaja, amely milliószámra vándorol íváskor a szárazföld folyói felé, elérje ívóhelyét (Montaigne 2001a). A lazacvándorlás és a mérsékelt övi erdők kapcsolatának újabb rejtélyes szálairól és ökológiai jelentőségéről csak mostanában kezdünk ismereteket gyűjteni. A ma emberét elsősorban az olcsó energia, az eladható termékek és a munkalehetőség érdekli. A Columbia gátjai ezeket teremtették meg egy olyan régióban, ahol azelőtt semmi ilyesmi nem volt. Igaz, más munkahelyek árán: a halászat átadta a helyét az öntözéses mezőgazdaságnak és az annak termékeit szállító folyami uszályok vontatásának, valamint a gátak fenntartására szerződtetett munkásoknak. Ezáltal a folyó, akárcsak a Missouri, gátak és tározók láncává lett. A tározótavak elsődleges hatása, hogy lassítják a hajdan sebes folyó áramlását, ez kihat a vízminőségre, annak oldott oxigéntartalmára és következésképpen ökológiai felépítésére. A sebes folyami életközösségek tavi cönózisoknak kénytelenek átadni a helyüket.

A World Fish Migration szervezet majdnem 250 halfaj több mint 1400 populációját vizsgálta meg. Az olyan vándorló halfajok, mint a lazac, a pisztráng és a mekongi harcsa nemcsak a halászoknak adnak munkát, de a folyók és a tavak életében, sőt az egész ökoszisztémában is létfontosságúak. Az árral úszva ugyanis egyrészt tápanyagokat is szállítanak az óceánból, másrészt ők maguk is táplálékul szolgálnak például a medvéknek, farkasoknak és ragadozó madaraknak. Emellett fontosak az élelmiszer-biztonság szempontjából, és világszerte emberek millióinak nyújtanak megélhetést.

A halállományok a túlhalászat, a klímaváltozás, és a víz szennyezettsége miatt is csökkennek. A duzzasztógátak építése megakadályozza ugyan a vándorlásukat, de ha azt lebontják, nagyon rövid idő alatt visszatérnek. Ám a világ számos, halban gazdag területéről – így az Amazonas, a Jangce vagy a Kongó halállományairól – nincsenek megfelelő adataink, így pontos információink sem arról, hogy ezekben a térségekben hogyan változott akár az elmúlt évtizedekben a halak populációja (Deinet et al. 2020). Szerencsére az evolúció megfelelő szelekciós nyomás kialakulásakor felgyorsulhat, és a halak viszonylag gyorsan tudnak alkalmazkodni a változásokhoz. Különböző élőhelyhez szokott, tavi és folyókban élő pikók keresztezése után a folyóba engedett halak a számukra új környezetben 2,5%-kal nagyobb arányban maradtak életben, mint őshonos társaik. Ez először kis különbségnek tűnhet, azonban több generáció leforgása alatt már sokat jelent. Bebizonyosodott, hogy egyes állatfajok gyorsabban alkalmazkodnak a környezeti változásokhoz – amelyhez az emberi tevékenység is bőségesen hozzátesz (Laurentino et al. 2020). Elképzelhető, hogy a dolog visszafelé is működhet, mármint a folyóvízhez szokott halak megélhetnek a tavakban, de egyelőre ez nem bizonyított.

Északon a legnagyobb vesztes a lazac, amely képtelen a sokszor százméteres magasságú betonfalakon felmászni a folyók felső folyásánál található kedvenc ívóhelyére. Bár senki nem tudja hogyan, de a lazac fantasztikus pontossággal

talál vissza néhány év elteltével szülőhelyére, ahol fiatalságát töltötte. Kérdés, mi hajtja a lazacot, és főleg, hogyan alakul ki a térkép a fejében – ha kialakul egyáltalán. A legvalószínűbb, hogy szagingerek vezetik, esetleg a genetikailag rokon testvérei által kibocsátott feromonok (Long 1991). A gátak mellett néha építenek úgynevezett *hallépcső*t, amely egy lépcsős betonvályú, ahol szegény lazac, ha muszáj, fel tudja magát küzdeni. Márpedig nagyon muszáj, mert zárt genetikai programja nem hagyja nyugodni, amíg az ívóhelyére nem ért. Ám ezzel még nincs vége a megpróbáltatásoknak. A felnőttek ugyan ívás után elpusztulnak, ám kikelő ivadékaik két év elteltével szintén a titkos parancsnak engedelmeskedve nekiindulnak óceánt látni. Ám a fiatal lazacokat senki nem tájékoztatja a hallépcsők hollétéről, ezért lefelé menet belekeverednek a turbinákra zúduló víztömegbe. A várakozással ellentétben nem a turbinalapátok szabdalják fel őket, mert azok túl nagyok ehhez, hanem a turbinakamrában uralkodó iszonyatos nyomás pukkantja el a hólyagjukat, és így minden gát a nekiúszó állatok átlagosan 15-20%-ának elpusztításáért felelős.

Az emberi találékonyság azonban nem ismer határokat. A gátak, mint mondtuk, zsilipeik révén megnyitják a lehetőséget a vízi szállítás előtt. Ezért a folyórendszer fenntartásáért felelős vízügyi hatóságok a fiatal lazacokat nagy szállító bárkákba, uszályokba pumpálják, lezsilipelik a 20-30 gáton, és az óceánhoz érve szabadon engedik. Állításuk szerint így a lazacok 98%-a túléli az utazást. Remek. Amit viszont nem említenek, hogy vissza csak kevesebb mint 2-3% érkezik a megfelelő időben, a többit elnyeli a hallétra, vagy meg sem próbálja az utazást. Következésképpen a többi lazacos és „fejlesztett" folyóhoz hasonlóan a Columbia vízgyűjtőjében is drasztikusan, egytizedére csökkent a lazacfajok egyedszáma, és többet a teljes kihalás fenyeget. Ezért mesterséges haltenyésztésbe kezdtek, ami csak elfedte a vad halalakok létszámcsökkenését, de rendszerint szintén nem tette lehetővé a kettős életet, amit ezek a halak ösztönösen folytatnak. A vízgyűjtőben csak egyetlen helyen virágzik a lazacpopuláció, a főfolyó egy 100 km-es szakaszán Hanford mellett, ahol a hidegháborús időben plutóniumot gyártottak egy atomreaktorban a sivatag közepén, ezért biztonsági okokból nem építettek gátat.

Amikor természetvédő szervezetek intenzív kampányba kezdtek, hogy legalább a legjobb lazacos helyeket kínáló Snake folyó néhány alsó gátját bontsák el, az ellenzők előhúzták a régi jó érvet: még nem tudunk eleget, meg kell vizsgálni, tudományos kutatásokat kell folytatni. Bezzeg amikor építették, nem volt olyan sok kutatásra szükség. John Kitzhaber, Oregon állam kormányzója, aki az elbontást támogatta, erre így válaszolt: „Ezt a kártyát mindig ki lehet játszani [...] De miféle tudományos vizsgálatra van szükség annak megállapításához, hogy egy lazacnak könnyebb a szabadon folyó folyóban vándorolnia, mint több tíz méteres betonfalakat leküzdenie?" (Montaigne 2001a). Az Army Corps of Engineers a régi, jól bevált megoldáshoz folyamodott: „észszerű alternatívaként"

több száz millió dollárt költenek arra, hogy mesterségesen ide-oda szállítgassák a lazacokat és „feljavítsák" a hallépcsőket. Pedig egy független szakértő szervezet becslése szerint nemhogy munkahelyek vesznének el a gátak szétszedése esetén, hanem turisztikai és halászati okokból még jótékony hatása is lenne a régió gazdaságára (ENS September 12/2, 2002).

Még a Columbiánál is kritikusabb a helyzet egy másik jól ismert folyón, a Coloradón. Ez annak idején a vadnyugat zabolázhatatlan szépségének szimbóluma volt, amely évmilliók alatt vájt 1000 méter mély kanyont az üledékes sziklákba, és zúgva robogott annak az alján. A múlt század végére a „növekvő igények és az elhúzódó szárazság a hét állam és Mexikó egy részének kritikus fontosságú vízforrását adó Colorado vízrendszerén épült tározók vizének elfogyásához vezetett" (Carrier 1991). 1912-ben a lelkes vízépítők még úgy aposztrofálták a folyót, hogy „itt van egy Nílus, amely szabályozásra vár". Nos, azóta olyan alaposan sikerült megszabályozni, hogy már alig létezik: szárazabb években a Colorado torkolatába alig érkezik víz: menet közben „elfogy". A múlt század közepén, a vízügyi beruházások nagy lázában, a folyó partján található államok és Mexikó ugyanis egyszerűen felosztották egymás között a Colorado vizét, és mindegyik kapott egy bizonyos mennyiséget, amelyre „vízjoga" van, vagyis ezt elveheti a folyóból. A gond csak az, hogy a Colorado nem ismeri a vízjogot, és nem az eredetileg megállapított mennyiséget szállítja, hanem 15-20%-kal kevesebbet. Elfelejtettek olyan tényezőkkel számolni, mint a tározók párolgása vagy az időjárás szeszélyei. Mostanában pedig az éghajlat változása. Hogy eddig nem tört ki még háború, többek között annak köszönhető, hogy néhány állam a neki juttatott víznél kevesebbet használ el, így nem tűnik fel annyira, hogy mások viszont többet. A legtöbbet Kalifornia. A folyó teljes eltüntetéséhez elegendő volt 56 év „szabályozás". A Colorado amúgy is Amerika egyik legsósabb folyója, nem csoda, ha a Kaliforniai-öbölbe szájadzásakor már messze meghaladja az ivóvízszabványban megengedett sóértéket.



37. ábra. *Az elfogyó Colorado*

A Coloradóba gyűlő vizet Colorado államban, ahol ered, rögtön az első adandó alkalommal felfogják, visszapumpálják egy másik hegyi tóba, majd egy 13 mérföld hosszú föld alatti alagútban egyszerűen átvezetik a kontinentális vízválasztó alatt a nagy prérire, hogy az egyébként sivatagos Boulder városát táplálja. A helyiek azt mondják: a víznek semmi köze a gravitációhoz, arra folyik, amerre pénzszagot érez (Carrier 1991). Az előre látható problémák miatt már régebben is javasoltak politikai intézkedéseket és újfajta megközelítéseket a vízfelhasználás és a rendelkezésre álló vízmennyiség összeegyeztetésére – hiába (Blackwelder et al. 1987). Ezért Kalifornia például kénytelen komoly intézkedések bevezetését, a vízpocsékolás megszüntetését és a vízfelhasználás csökkentését elérni, ha nem akarja elveszíteni a szerződés értelmében a vízhez való jogát (ENS December 11, 2002) Szerencsére 2019–2020 telén viszonylag nagy volt a lefolyás, ami annak is betudható, amit az általános részben mondtunk: hogy a globális változások miatt a hegyek jégsapkáiban és gleccsereiben felhalmozódott víz egy darabig a megszokottnál nagyobb hozamokat produkál. Amíg végleg el nem olvad. Várható ezért, hogy az érintett államoknak az ezt követő években még súlyosabb, éveken át tartó aszályokkal kell majd szembesülniük (Kuhn 2020).

A Glen Canyon elnevezésű gát a síkvidéki erőműveknél ismertetett következményekkel járt: a Phoenix város víz- és energiaigényétől függően üzemeltetett gát alatt a folyó partjának szép, homokos dűnéi teljesen eltűntek. A tározóban hordalékától megszabadult víz tisztán és éhesen harap bele az alvízi meder anyagába, ráadásul iszonyú erővel és naponta többszöri szintváltással. Ha Phoenixben kevésbé meleg az éjszaka, a lakosok nem kapcsolják be légkondicionáló berendezéseiket, nem kell annyi energia, így az alvízi parton alacsonyan áll a víz. De amint megjön a meleg, kell az áram, és a gátról leeresztik a vizet, hogy áramot termeljenek vele: a partszakaszt elönti a víz (Carrier 1991).

A problémák csak tovább súlyosbodnak, ha a felmelegedés és az időjárás változása felborítja a jelenlegi vízháztartást. A kérdés nem költői, és nem a jövőre vonatkozik. Bár az előrejelzések a csapadék mennyiségének csak mérsékelt csökkenésével számolnak, eloszlása kedvezőtlenné válik: télen lesz sok és nyáron kevés (Mote et al. 2008). Előbb-utóbb a Columbia folyó mentén élőknek választaniuk kell az ökoszisztémák életben tartása és a gazdasági hasznosítási formák (öntözés, hajózás, energia) között, mert mindkettőre nem lesz elegendő víz. A hóolvadás korábban következik be, ennek megfelelően a tavaszi árvíz is hamarabb levonul, hosszabb száraz időszakra lehet számítani. A Colorado völgyében az alacsony vízállások miatt akár 40%-os veszteséggel is lehet számolni, míg a kaliforniai Középső-völgyben a vízellátás akadozhat. A vízellátás további zavarát okozhatja, hogy a hegyekben hullott hó mennyisége, amely végső soron a folyók táplálását végzi, egyes területeken akár 50%-kal is csökkenhet (MyNorthWest 2018).

A harmadiknak vagy fejlődőnek nevezett világban hasonló nehézségekkel kell szembesülni azzal az eltéréssel, hogy ott még mindig dúl a nagy gátépítési láz.

A Himalája völgyeibe tervezett vízerőművek hatásai már csak azért is aggasztóak, mert a folyóvölgyek 90%-a lesz érintett, 54 000 hektár sűrű erdő kerül víz alá, és 114 000 további hektár károsul valamilyen módon (például vízháztartásának felbomlása miatt). A legtöbb gátat az élővilág fajokban gazdag területeire tervezik, amelyek túlélése ezáltal legalábbis kétségessé válik. A Himalája körüli országok nem a szigorú környezetvédelmi hatástanulmányokról híresek (Pandit és Grumbine 2012).

### 5.3.3. A nagy a szép: megalomániás gátépítési láz

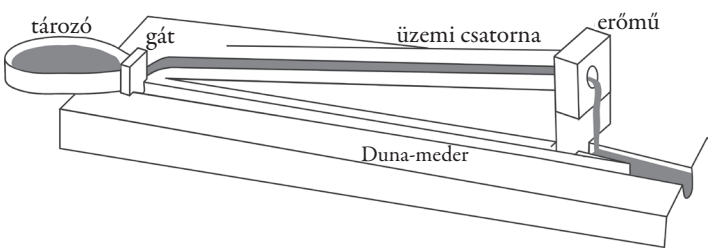
*A víz erejétől semmivé szakad a gát*
*S az ember újból embernek érzi magát*
Nyerges Attila
*(Ismerős Arcok)*

A 20. század legnagyobb méretű és kihatású vízépítészeti beavatkozásai azonban mégsem a magas völgyzáró gátak, hanem a síkvidéki, tározós vízi erőművek. Az egyik ok, amiért szükség volt rájuk, hogy Európában és Észak-Amerikában a jelenlegi településszerkezet és termelési módok a 19. század nagy folyószabályozásainak következményeként, a természeti adottságokat figyelmen kívül hagyva épültek ki. E torz állapotot csak állandó beavatkozással, hatalmas ráfordítás mellett lehet fenntartani. Jellegzetes elsőfajú hiba ismét: a szabályozott folyó és hatásterülete újabb beavatkozást követel. Tervezőik azt gondolják ugyanis, hogy a folyószabályozás következtében felboruló vízháztartást és a kialakuló vízhiányos állapotot majd a tározókból öntözéssel, a folyók mellé települt ipar energiaigényét a gátra épült erőmű villamosáram-termelésével, a megnövekedett árvízveszélyt a tározó nagy tárolási kapacitásával, míg a szintén a szabályozások miatt kialakult és a hajózást akadályozó fenékpadokat és zátonyokat is ezzel az újabb technikai csodával (mármint a gáttal) lehet kiküszöbölni, és a problémák ettől meg fognak szűnni. A világ többi részén, ahol eddig nem volt, a 20. század második felében olyan gátépítési láz indult meg, amely minden képzeletet felülmúl: az ökológiai, gazdaságossági értelemben be nem vált, ám építőiknek és bizonyos iparágaknak (mezőgazdaság, energiaipar, szállítás) sok pénzt hozó megoldásokat gondolkodás nélkül exportálták a harmadik világ országaiba a mindenütt fölös számban jelen lévő „szakértők".

Szinte biztos, hogy a vízlépcsők sem oldják meg véglegesen a folyók és az ember között megbomlott egyensúlyi viszony problémáját. A folyómedrek elzárása a folyóvízi rendszer életébe történő újabb drasztikus beavatkozás. Együtt jár mindazon tulajdonságok megváltozásával, amelyek az érintett folyószakasz jellegét adják. Az elzárás előtti szakaszon a víz sebessége lassul, a folyó szintje,

ezzel együtt mélysége növekszik. A tározóban többé-kevésbé a tavakra jellemző viszonyok alakulnak ki (lásd Tisza-tó), annak minden ökológiai következményével együtt. Ehhez hozzájárul, hogy a tározó üzemeltetése a társadalmi és nem a természeti igényekhez igazodik, ezért természetrajzi szempontból a tározók instabil rendszerek (Hamar 2000). A lassan mozgó víz lerakja hordalékát, aminek számos következménye van. Ahol például középső- vagy alsószakasz-jellegű folyón elkezdték a vízlépcsők építését, ott azokat folytatni kell, amíg az egész folyó mesterséges csatornává nem változik. Ugyanis maguk a vízlépcsők akadályozzák a folyó természetes életét a legjobban. A magukkal szállított hordalékot a gátak mögött lerakják, a gátak előtt pedig, nem lévén hordalékuk, újat vesznek fel a folyómederből, így veszélyesen kimélyítik azt. Ez a medererózió. A medereróziót csak úgy lehet mérsékelni, ha a lejjebb fekvő területen még egy gátat és tározót építünk. Ennek visszaduzzasztó hatása csillapítja a lezuhogó víz erejét és hordalékfelvevő képességét.

Igen ám, de elkövetkezik egy pont, ahol már nem lehet több gátat építeni, mert például a folyó elérte a tengert. Vagy más okból. A színes mellékletben a Velvet Bottom folyócskáról lézer alapú távérzékeléssel (LIDAR) készült felvételen a folyó vízgyűjtőjén elhelyezkedő gátak láthatók Nagy-Britannia Mendip Hills nevű régiójában. Jól kivehető, hogy a legalsó gát (1) alatt durván beindult a medererózió (Brown et al. 2018) (lásd a 11. színes ábrát). Ha pedig az utolsó gát után már a tenger következik, akkor a folyótorkolat anyagegyensúlya borul fel, akár tölcsér-, akár deltatorkolatról van szó.




38. ábra. *Síkvidéki erőmű üzemvízcsatornával*

Ahhoz, hogy a síkságon kanyargó, kis esésű folyó energetikailag hasznos legyen, mesterségesen kell növelni az esését. Ennek egyik műszaki módja, ha a víztömeget kiemeljük a medréből, és egy darabig még kisebb eséssel vezetjük, mint ahogy egyébként folyna. Miután alatta a felszín ezenközben lejjebb ereszkedik, néhány kilométer után kialakul a kívánt szintkülönbség. Az ilyen, medréből kiemelt folyó ágya az üzemvízcsatorna. Ha tárolni akarjuk a folyó vizét, a tározó oldalfalait szintén mesterségesen kell megépítenünk, hiszen nem áll rendelkezésre a folyó sziklaágya és a hegyoldal, mint a felső szakaszon. Ezek az oldalfalak

a tározó töltései. Ráadásul a kialakított tározó nagyon sekély lesz, aminek többek között az a következménye, hogy nagy felületet foglal el és nagy lesz benne a párolgási veszteség, a víz hőmérséklete megnő, és a napfény behatolása miatt megindul az intenzív alganövekedés. Ugyanakkor a tározó medrét, fenekét nem kőzet, hanem legtöbbször a folyó saját üledéke adja, ami átjárhatóságot biztosít nemcsak a talajvíz felé, hanem a közlekedőedények elve alapján a környező területekhez is, ahol ennek eredményeként a síkvidéki tározó mentén mindenütt buzgárok törnek fel, hiszen a mesterségesen kiépített töltés mögött raktározott víz szintje a terepszint fölé magasodik. Ezt egy további műszaki beavatkozással, szivárgó csatornák építésével igyekeznek megakadályozni, amelyek a töltés külső oldalán összegyűjtik a felesleges vizet és elvezetik a gát alatti folyómederbe. Ezért a síkvidéki erőművek fajlagos költségei igen nagyok.

A Körösökön az eredetileg Horthy Istvánról elnevezett békésszentandrási duzzasztó, bár elkészültekor, 1942-ben a legnagyobb hazai vasbeton építménynek számított, a 2013-ban utólag beépített 2 MW teljesítményű erőművel ma már kifejezetten kisléptékű beruházásnak számít. Ennek ellenére a sokszorosan manipulált tájban a megnövekedett árvízi szinteknek ez sem tudott ellenállni, 2016-ban teljes egészében víz alá került. Ökológiai hatásai így is nagyon károsak, visszaduzzasztás idején a felvízen (a duzzasztó felett) elhelyezkedő ártérben pangóvizes viszonyok alakulnak ki, az ártéri fajok mellett egyre nagyobb számban jelennek meg a mocsári növények és állatok. A kisvízi meder növény- és állatvilága mára inkább egy holtágéra emlékeztet, ami különösen a halfaunában szembetűnő. Az ártéri mocsarak és holtmedrek viszont nyárra kiszáradhatnak, ami felgyorsítja a feltöltődésüket (Jakab és Csengeri 2020).

Újból és újból ugyanazokkal a problémákkal kell szembesülnünk: a folyó ökológiai viszonyainak felborítása, az erdők pusztulása, a vízi és szárazföldi életformák sokszínűségének pusztulása, az üvegházhatású gázok felszabadulása, emberek ezreinek – adott esetben millióinak – áttelepítése, elszegényedése, megélhetésük lerombolása, vele a vízminőség, az élelmiszerrendszerek és a mezőgazdasági termelés veszélybe kerülése. Az éghajlatváltozás miatt a régi tervezési elvek már nem érvényesek, új játékszabályokhoz kellene alkalmazkodni. A korábbi nagy projektek költségeit szisztematikusan alá-, előnyeit, hasznait pedig felülbecsülték, nem törődve a társadalmi, környezetvédelmi következményekkel. Ugyanakkor vannak a vízenergia felhasználásának olyan módjai, amelyek a nap- és szélenergia mellett egyéb megújulóenergia-forrásokkal kiegészítve fenntartható gyakorlat felé mutatnak (Moran et al. 2018). Sajnos azonban, ami társadalmi szempontból fenntartható, rendszerelméletileg még nem biztos, hogy kiküszöböli a gondokat.

Az újonnan épülő megalomán erőműveknél ugyanezek a problémák fordulnak elő. Ma már tudjuk, az adatok bizonytalansága ellenére is, hogy a Kínában 2008-ban átadott Három Szurdok-gát nem 30, hanem 80 milliárd dollárba

került, 1,5 millió embert kellett kitelepíteni, összességében a járulékos mezőgazdasági és egyéb károkkal 500 millió embert érintett hátrányosan. Ráadásul nem váltotta be a hozzá fűzött reményeket, az éghajlatváltozás miatt kevesebbet termel, mint kellene. A földek elárasztása elrohasztja a növényzetet, és abból rengeteg metángáz, szén-dioxid szabadul fel. A világ más tájain, az Amazonas, a La Plata, a Mekong és a Gangesz-Brahmaputra vízgyűjtőin hasonló a helyzet (Keresztes 2018).

## 5.3.4. A folyófojtogatás eredményei

Az 1980-as évek elején a világszerte a technikai civilizáció kritikusaként ismert *The Ecologist* című folyóirat alapító szerkesztője, Edward Goldsmith egy kétkötetes művet tett le az asztalra *A nagy gátak társadalmi és környezeti hatásai* címmel (Goldsmith és Hildyard 1984). Ebben hatalmas munkával összegezték az akkor már javában működő és egy másik részben a csak tervasztalon létező nagy gátak – elsősorban síkvidéki tározós erőművek – bűnlajstromát. Megállapították, hogy a nagyberuházások szinte semmilyen ponton nem állják meg a helyüket, még hagyományos gazdasági és társadalomfejlesztési szemszögből sem, kizárólag egyes jól körülhatárolható érdekcsoportok elsődlegesen anyagi hasznát szolgálják. A tény csak azért nem még szembeszökőbb, mert a hatások jó része csak utólag és hosszú távon, illetve áttételes módon jelentkezik, ezért az érdekeltek különböző trükkökkel és részrehajló értékelésekkel fedik el.

### 5.3.4.1. *Területfoglalás*

A nagy gátak ugyanis sem társadalmi, sem környezeti-ökológiai szempontból nem felelnek meg szinte semmilyen követelménynek. Különösen a síkvidéki tározóknál már a feltöltés előtt gondok vannak, mert rendszerint olyan helyen építik, ahol már élnek emberek, és a sokszor országrésznyi vízfelület az életterüket veszi el. A kitelepített emberek rendszerint nem kapnak megfelelő földet és kárpótlást, további életlehetőségeik korlátozottak, és nagyvárosi nyomornegyedekben végzik. Sokan nem is akarnak odajutni, inkább öngyilkosok lesznek.

Ezek a földek nemcsak hogy nem lakatlan pusztaságok, hanem művelt területek, sőt sok esetben, még a síkvidéki területeken is: erdők. Egyedül az indiai Narmada-projekt teljes kiépítése 75 000 hektár, más becslések szerint akár 350 000 hektár erdőt tett tönkre, amelyből 17 000 hektár teakfa. Ez az Indiában őshonos, értékes keményfa nem bírja a vizet, más területeken éppen az erdőirtási dühnek esik áldozatul (Kalpavriksh et al. 1984). A brazíliai Tucurui-gát mögötti lapos, sekély víztározóban is folyik az erdőirtás (Lóczy 2001). Az elárasztott terület mérete néha elképesztő. Afrikában a Volta folyó megzabolázása 848 000 hektár elöntését igényelte (Goldsmith és Hildyard 1984), ami ha jobban meggondoljuk, 8480 km$^2$, Magyarország teljes területének 8%-a. Kínában a Három Szurdoknál a pusztítást, amihez képest Ceaușescu diktátor hírhedt romániai falurombolása

eltörpül, már több mint húsz éve megkezdték: egy 2300 éves településnek mentek neki a buldózerek (*The Ecologist* 2002d).

Azért a román diktátornak sem kell szégyenkeznie. A Ceauşescu-diktatúra utolsó éveiben kezdték építeni azt a 625 méter hosszú és 28 méter magas gátat, amely a Küsmöd-patak vízét duzzasztotta meg Erdőszentgyörgy közelében. A víztározó már a rendszerváltozás után, 1994-ben nyelte el teljesen Bözödújfalut, amelynek lakóit korábban a szomszédos településekre költöztették. A Bözödújfalu helyén létesített víztározót a vízből kiemelkedő templomtoronnyal a romániai falurombolás szimbólumaként tartották számon. A vízzel elárasztott templom 2014. június 29-én kora délután omlott le (*Origo* 2014). A sors iróniája, hogy maga a képződmény, a szocialista vakhit és buzgalom terméke sem sokkal időtállóbb: 2017-re a tározótó közepére épített műtárgy, a gát menti őrtoronyhoz, az irányító létesítményhez vezető üzemi híd is leszakadt. Kijavításához a tározó vízszintjét a vízügyi hatóságok kénytelenek voltak 8 méterrel lejjebb süllyeszteni, így a kísértetfalu újra a felszínre került (Kisgyörgy 2017, Miehle 2018) (lásd a 12–13. színes ábrát).

### 5.3.4.2. *A feltöltés után*

*Vízháztartás*

A síkvidéki tározók építése egy sor olyan következménnyel jár, amelyek a megoldás technikai jellegéből, a természetes folyamatok figyelmen kívül hagyásából következnek. Ezek közül legfontosabb a folyó hordalékháztartására és a felszín alatti vízkészletre gyakorolt hatás, a felszíni vízminőség változása és az öntisztulás károsodása. A nagy kiterjedésű, nagymértékű változások miatt az egész környező vidék vízháztartása felborul. A talajvíz szintje valóban stabilizálódik, de a közlekedőedények elve miatt a gát előtt csökken, a gát mögött nő. Alvízen kiszáradás, felvízen belvizek lesz a következmény.

A tározó területén a vízfolyás lelassul, a nagy felület miatt csak a felső réteg cserélődik. A sekély víz felmelegszik, a vízben oldott oxigén mennyisége kevesebb lesz. A vízi élőlények, főleg a baktériumok és lárvák, amelyek a vízbe került szerves anyaggal táplálkoznak, következésképpen az öntisztulásért felelősek, elpusztulnak. A sekély vízbe több napsütés érkezik, nagyobb lesz a fotoszintézis, növényi szerves anyag termelődik, főleg algák. Beindul az elposványosodás, az eutrofizáció. Ugyanaz, ami eddig az ártéren volt jellemző. A nagy kiterjedésű vízfelület miatt megváltoznak a filtrációs (átszűrési) viszonyok, és ez hatással van a talajvíz-utánpótlás mennyiségére. A sok szemét, szerves anyag, sőt a lassú folyás miatt a szervetlen szennyeződések is a tározó területén ülepednek le, a fenékbevonatot elzárják az oxigén elől, és megmérgezik, ezért az elpusztul. A leülepedett szennyeződés eltömi a folyóágy kavicsrétegének réseit, ezért csökken az átszűrődött víz mennyisége (Borsos 1992).

Az eutrofizáció csökkentésére és a víz minőségének megőrzésére számos próbálkozás született a levegőztetéstől a szűrésig, vagy a különféle üledékkezelési módszerekig. Egy brazíliai víztározóra megpróbáltak számítógépes elemzéssel modelleket kidolgozni, ami a valós ökoszisztéma viszonyait képezte le a tározótó üzemviteli beavatkozásainak figyelembevételével (Ccopa Rivera et al. 2007). Nem világos azonban, hogy ettől miért csökkenne vagy szűnne meg az eutrofizáció.

Meleg égövi területeken különösen nagy lesz a párolgási veszteség. Az Asszuáni-gát mögött húzódó Nasszer-tó évente 15 milliárd (!) $m^3$ vizet veszít, ami a Nílus teljes vízhozamának 15-20%-a (Vester 1980). Egyiptomi kormánytisztviselők már 1981-ben elismerték, hogy a gát által megfogott víz 40%-a el is megy ezen az úton. Úgy jártak szegény egyiptomiak az európai technikával, mint Mátyás király és az egyszeri leány: jött is, meg nem is, kaptak is valamit, meg nem is. De mi lehet az oka, hogy ilyen nagy a vízveszteség?

Természetesen nem csak a közvetlen párolgás a bűnös, bár az is. Miután a síkvidéki tározók nagyok és laposak, felmelegszenek, és különösen az amúgy kevés természetes csapadékot kapó, negatív vízmérleggel rendelkező vidékeken vizük elpárolog. Nincs mit csodálkozni azon, hogy a Nílusra épült Nasszer-tó vize párolog, hiszen a Nílus az egyik legnevesebb olyan folyó, amely arid vidéken keresztül éri el a tengert. A párolgást ugyanakkor – főként a trópusi, meleg éghajlaton – még egy tényező növeli: a betelepülő növényzet aktív párologtatása (evapotranspiráció). Ezen a téren a vízijácint *(Eichhornia crassipes)* verhetetlen. A mesterséges víztisztító ökoszisztémákban igénytelensége és szaporasága miatt annyira kedvelt növény a kedvező körülmények között a víztározókban, a belőlük induló öntözőcsatornákban és sokszor magán a főfolyón is oly mértékben elszaporodik, ami már az ökológiai hátborzongatás (thriller) kategóriáját is kimeríti. Gyakorlatilag kiirthatatlan, és jelentősen hozzájárul a vízvesztéshez. Végül a víz a tározó fenekének permeabilitása miatt is elszökik, legalábbis addig, míg egy ezzel ellentétes folyamat, a pórusok eltömődésével járó kolmatáció visszájára nem fordítja a tendenciát. Végül azokon a helyeken, ahol öntözni akarnak vele, és azt szigeteletlen öntözőcsatorna-hálózaton keresztül valósítják meg, maga a csatornafal ad lehetőséget az elszivárgásra (Goldsmith és Hildyard 1984).

A talajvíz szintje a gát után csökken, mert a gyorsan rohanó víznek nincs ideje átszűrődni. A medererózió elmossa a fenékbevonatot, ezért nincs ami védje a szűrőréteget a szennyeződéstől. A szennyeződések a talajvízbe is bemosódhatnak. Mind a gát felett, mind alatta veszélybe kerül az egész vidék ivóvízellátása. A vízviszonyok drámai megváltozása miatt kicserélődik a környező ártér értékes élővilága. Nem találják meg életfeltételeiket a dús növényzethez, hüllő-, hal- és kétéltűfaunához szokott vízimadarak, a medererózió és az oldalcsatorna miatt immár nemcsak az ártéren, de a folyó medrében is lehetetlenné válik a halak ívása. Kiszáradnak vagy elöntés fenyegeti az ártéri erdőket, és öntözni

kell a gát alatti mezőgazdasági kultúrákat, amelyek addig a talajvízből elégítették ki vízszükségletüket.

Mindazon folyamatok, amelyek egy gát előtt és után a folyóvíz minőségét és a vízháztartás dinamikáját befolyásolják, kihatnak a folyóvízre épített ivóvíznyerési lehetőségekre is. Közvetlen felszíni vízkivételi mű a folyók elszennyeződése miatt igen kevés üzemel már Európában. Van viszont egy másik lehetőség, a parti szűrésű kutak rendszere, amely több európai nagyvárosnak, így Budapestnek és Bécsnek biztosítja a vízellátást. Ezek a kutak azt a tényt használják ki, hogy az alluviális síkságon áthaladó folyóvíz egyszerű filtráció útján feltölti a folyómeder alatti vízáteresztő rétegben található talajvizet. Ezzel a szűrés feladatát ingyen és bérmentve elvégzi a város lakói számára. A folyóágyban és az az alatt kialakult élő, dinamikus rendszer a szerves szennyeződések nagy részét le is bontja, a kavicsréteg pedig a szervetlen, részecske jellegű szennyeződéseket szűri ki. Nem tud azonban mit kezdeni azokkal a vízben oldható, kis molekulájú vegyületekkel, amelyeket a vegyipar, olajipar és egyéb emberi tevékenységek szorgalmasan termelnek és juttatnak a folyóvizekbe. Ezeknek az anyagoknak a koncentrációja szintén megnő akkor, ha a folyót a gát mögött megállítják.

Szoros korreláció mutatkozott például a klórozottszénhidrogén-tartalom és a kis molekulájú organohalogének (mindegyik méreg) tekintetében a Duna szabad vize, a parti szűrésű kút vize és az abból előállított ivóvíz között. Vagyis az ivóvíz klórozása legfeljebb a klórterhelésünket növeli (szintén méreg), de a még alattomosabb emberi eredetű szennyezésektől nem képes megszabadítani minket. Hasonlóan nem működik a nitrátszennyezés esetében sem, még szerencse, hogy folyóvizekben ennek szintje rendszerint alacsonyabb, mint a talajvízben.

A bécsi parti szűrésű kutak vizét még ennél is komolyabb veszély fenyegette, amikor a nyolcvanas évek elején a hainburgi vízi erőmű megépítését tervezték. Itt a talajvízszint megemelkedése együtt járt volna a tározó fenekén a fenti méreganyagok kiülepedésével, valamint olyan szerves anyagoknak az anaerob és ezért mérgező bomlástermékekkel járó lebomlásával, amelyek gát nélküli, oxigéndúsabb környezetben alapvető alkotóelemeikre bomlanának, és nem okoznának problémát. A vízben oldott oxigén szintjének csökkenése a filtráció következtében kihat a talajvíz oxigéntartalmára, míg a láncreakció következő szemében az oxigénmentes talajvíz vasat és mangánt mobilizál a talajból. Ezek a folyamatok csak Hainburg esetében jóslatok, más dunai vízlépcsőknél (Ybbs-Persenburg, Ottenheim-Wilhering) mérési adatokkal bizonyított tények (Frischherz és Bolzer 1984). Szerencsére a hainburgi erőmű végül nem épült meg, de ehhez az kellett, hogy több száz ember, köztük a Nobel-díjas Konrad Lorenz is odaláncolja magát a tervezett tározó területén növő egyedi és felbecsülhetetlen értékű – mert egyedül megmaradt – ártéri erdő fáihoz.

A nagy Asszuáni-gát a Nílus vízháztartásának teljes felborulását okozta. Azok a másodlagos hatások, amelyekből néhányat már érintettem, megkérdőjelezik

az egész beruházás létjogosultságát. Először is, az az ötezer éves gyakorlat, amely a Nílus évente kétszeri áradására és az azzal hozott termékenyítő iszapra alapozódott, megszűnt. Nincs árvíz, de nincs hordalék sem. Helyette mesterségesen kell a talajerő pótlását megvalósítani úgy, ahogy azt minden rendes ipari mezőgazdaság teszi: vegyszerekkel, műtrágyákkal, amelyek felhalmozódnak a talajban, és veszélyeztetik a lakosság egészségét. A termékeny Nílus-völgy addig élvezte az öntözéses gazdálkodás legnagyobb luxusát: az áradások fölös vize kimosta a talajból a sófelhalmozódást is. Most a gát alatt szikesedés indult meg. Érdekes „mellékes" következmény, hogy míg a luxori királytemplomok évezredeken keresztül állták az idők rohamát, a gát megépítését követő sótartalom-emelkedés kikezdte a talapzatukat, és megrepedtek. Az alvízi medererózió szintén jelentkezik, akárcsak a már említett parti erózió. Egy esetleges gátszakadás az egész nemzetet eltörölheti a föld színéről, és végül, de nem utolsósorban, a Nasszer-tóra ugyanaz a sors vár, mint társaira: a feltöltődés (Lavergne 1984).

*Betegségek*

Ha nagy, szabad vízfelületet létesítünk ott, ahol eddig nem volt, megváltoznak azok az ökológiai körülmények, amelyek az adott helyszín parazitológiai viszonyait szabályozzák. A pangó vizekben elszaporodó vízinövények olyan élőhelyet teremtenek, amely kiválóan megfelel számos vízi úton terjedő vagy vízi környezetben jellemző betegség megjelenésének. Nemcsak emberi, hanem mezőgazdasági kártevőkről is szó van, amelyek a tározókból érkező, a folyamatos öntözés okozta vízháztartás-változás következtében remekül érzik magukat. Emberi vonalon olyan betegségek megszaporodásával kell számolni, mint a malária, amelynek közvetítője, az *Anopheles* szúnyog kiválóan érzi magát a tározók vizének felhasználásával létesült öntözött földeken, vagy a bilharziózis, amelyet az I. kötetben más okból említett (lapos) féreg, a *Schistosoma hematobium* okoz. Ez egy húgyhólyag- és májmegbetegedés, amelynek az elmúlt ötven évben észlelt felvirágzását egyértelműen a nagyléptékű vízügyi beavatkozásokkal hozták összefüggésbe. Az elszaporodott vízinövények remek lehetőséget adnak ugyanis a köztigazda csigáknak, hogy maguk is elszaporodva terjesszék a betegséget. A volt Szovjetunió területén a fonalféreg-fertőzés, Afrika nyugati felén, a Volta völgyében az *Onchocerus volvulus* nevű fonálféreg okozta folyóvakság (onchocercasis) a legsúlyosabb veszély: 70 000 ember vakult meg ennek következtében (Goldsmith és Hildyard 1984). Ezek után megkérdezhetnénk, ugyan miért kellett lecsapolni a mocsarakat, ha most csinálunk helyettük másikat.

*És mi van, ha nem működik?*

A technikai csodák gyártói mindig meg vannak győződve arról, hogy amit kitaláltak, az jó. Így van ez az atomerőművekkel, a repülőgépekkel, a mobiltelefonokkal és még sok mással. Ez a makacs meggyőződés megingathatatlan, még akkor

is, ha számokkal szembesítik. A nagy gátak esetében ezek a számok elég aggasztóak. A hetvenes években a gátak átlagos meghibásodási aránya évi 1% volt! (Henry 1978), ami nem nevezhető alacsonynak, különös tekintettel az okozott károkra és életveszélyre. Pennsylvaniában egy gát átszakadása 2000 emberéletet követelt. Franciaországban a szakértők óvtak egy gát megépítésétől Malpasset-ban, mégis megtették. 1959. december 2-án 421 ember élete lett az ára.

Indiában, ahol Kína és az USA után a legtöbb gát – köztük néhány igen nagy is – üzemel, folyamatosan gond a mögöttük elhelyezkedő tározóknak és maguknak a gátaknak a karbantartása. Az „eredmény" meg is látszik: majdnem minden évben történnek tragédiák, de legalábbis üzemi balesetek a kontinensnyi ország majdnem 6000 gátjának valamelyikén. A legnagyobb arányban árvíz okozta gátszakadás játszik szerepet, ezt követi a gát felett átbukó árhullám, a karbantartás hiánya, az infrastruktúra meghibásodása, de igen komoly szerepe van a földrengéseknek és tektonikai mozgásoknak is (Umare 2021).

A nagy gátakra a legkomolyabb veszélyt a földrengések jelenthetik. A hatalmas víztömeg ugyanis megváltoztathatja a szeizmikus viszonyokat, ami földrengés kipattanását idézheti elő. Ez történt négy évvel elkészülte után az akkor még Boulder-gátnak nevezett Hoover-gát mögötti Lake Meaden. A kapcsolat azóta sem egészen tisztázott, de hiszen éppen ezért beszéltem az óvatosság elvéről. A hatvanas években Olaszországban a 261 méter magas Vaimont-gát esetében a szeizmikus aktivitás és a gát feltöltése közötti kapcsolat egészen nyilvánvalóvá vált, mert amikor leeresztették a vizét, a rengések leálltak, ám amikor újratöltötték, hatalmas földcsuszamlást okoztak, ennek következtében a víz kicsapott a tóból, és több falut elmosva 2000 ember halálát okozta (Rothé 1970). Mit mondjunk akkor a Három Szurdok-gátról, amely Jicsang közelében majd két kilométer szélességben zárja el a Jangce völgyét? Már akkor figyelmeztettek rá, hogy a környék földrengésveszélyes, amikor még fel sem töltötték, és az üledékképződés ütemét ott is alábecsülték (Williams é. n., Leopold 1998). Ráadásul Kína nyugati részén nem ez az egyetlen gát, ami hasonló sorsra juthat. Egy geológus álnéven írott tanulmányában annak az aggodalmának adott kifejezést, hogy az utóbbi időszakban az ezeken a területeken épült gátak földrengések ellen egyáltalán nem védettek, és elég, ha egy átszakad, az ebből eredő szökőár parttalanul zúdul tovább a völgyben, és elmossa az alatta levőket is (Jackson 2012). Aggódni pedig van miért. A Három Szurdok-gát mögötti víztárolót 2003-ban még éppenhogy csak elkezdték feltölteni, amikor egy földcsuszamlás akkora szökőárat produkált, ami 14 ember életébe került. Ennek ellenére 2006-ban folytatták a feltöltést, hogy elérjék a második ütemben tervezett, 156 méteres vízmélységet. Két évvel később a tározó közelében egy újabb földcsuszamlás elsodort egy buszt, legalább 30 emberéletet követelve. És ezek még csak a strukturális instabilitásból eredő események, földrengések nélkül. Jó okunk van feltételezni, hogy a földcsuszamlások közvetlen összefüggésben vannak a tó feltöltésével. Ha viszont ilyen mennyiségű súly nehezedik egy vetőre,

az megváltoztatja a szeizmikus aktivitást, és akár földrengések kipattanásához is vezethet (Hvistendahl 2008).

Kérdés a kártalanítás is, ha már bekövetkezett a tragédia. Ha a bűnösre bízzák, soha nem fog megtörténni. Kolumbiában egy bennszülött törzs kapott jogot a cégek tevékenységének ellenőrzésére, Argentínában ugyanezt egy nyilvános ellenőrző szervezetre bízták. A szintén brazíliai Brumadinho zagytároló gátja 2019-ben szakadt át, 272 embert ölt meg (óhatatlanul a magyar vörösiszap-katasztrófa jut az ember eszébe), és elszennyezte a környező városok vízbázisait. A károsultaknak csoportos keresetben, az állam ügyészségével megtámogatva sikerült peren kívüli egyezséget és méltányos kártérítést, valamint a helyreállítás költségeinek fedezetét elérni a vétkes Vale ércbányászati vállalatnál. Ehhez nem kis mértékben hozzájárult, hogy az illetékes bíróság a kereset beadása után szinte azonnal zárolta a cég vagyonának egy jelentős részét (Nogueira 2021).

*Árvízvédelem*

A gátak egyszerre nem tudnak minden igényt kielégíteni. Maga a tény, hogy a vizet visszaduzzasztják, ha árvizet nem is okoz, de az árvíz veszélyét növeli, hiszen ha mégis van, sokkal nagyobb bajt tud okozni. Továbbá a gátak építésével még nem szűnik meg az árvizek oka, a felső vízgyűjtő lecsupaszítása sem. Mellesleg, ha a gát teljes feltöltéssel üzemel, nem is fér el benne többletvíz. Aztán, ha az árvíz jön, sok hordalékot és uszadékot hoz, amit a gátak üzemeltetői nem szeretnek, ezért inkább átengedik a fölös vizet alvízre.

Az Egyesült Államokban a Mississippi medencéjében a főfolyón és a mellékfolyókon egyaránt számos olyan sarkantyú van, amelyeket a múlt század harmincas éveitől kezdve kezdtek kiépíteni abból a célból, hogy a hajózás biztonságát növeljék. A sarkantyú egy medret leszűkítő, de el nem záró keresztgát, amely mögött a víz feltorlódik, ezért a meder közepén is nagyobb vízmélység alakul ki, így könnyebbé válik a hajózás. Csakhogy a vizsgálatok szerint – a sarkantyúval el nem látott, még szabadon folyó folyókon végzett összehasonlítás alapján – a gátak ugyanakkor az árvízveszélyt is növelik, mert akadályozzák a víz szabad lefutását (Criss és Schock 2001).

*Hordd el magad, hordalék!*

A gátak létesítése alapvetően és véglegesen megváltoztatja a folyók hordalékháztartását, ám ha ehhez még kotrás is járul, akkor a medererózió és a folyómeder mélyülése katasztrofális méreteket ölthet. A Colorado folyón épített Hoover gát alatt a meder 3 métert süllyedt, ennyit hordott el a folyó (Kerényi 1995). A folyómedret ismét csak mesterségesen kell „stabilizálni", ami önmagában ellentmondás, hiszen a folyó minden ízében dinamikus képződmény (WWF 2002). A Rajnán, amely teljesen be van csatornázva, az iffezheimi duzzasztómű alól a víz rendszeresen elhordja a kavicságyat, ezért évente 170 000 tonna kavi-

csot kell mesterségesen beletáplálni, etetni a folyót, hogy megakadályozzák a további medermélyülést. A kavics lelőhelye pedig ismert: az alatta lévő vízlépcsőtől kell visszavinni, ahová eggyel korábban a víz lehordta (Kondolf 1995, Habersack et al. 2008). Hasonló a helyzet Freudenaunál, csak még viccesebb. Annak érdekében, hogy az alatta elhelyezkedő, Ausztria büszkeségét jelentő Donau-Auen Nemzeti Park felbecsülhetetlen értékű ökológiai rendszerét ne károsítsa a kimosott folyómeder, évente 300 000 $m^3$ kavicsot kell a gát alá zúdítani. Csakhogy miután a hainburgi erőművet sikerült megakadályozni, ezért innen nem lehet visszahordani: a víz ereje átviszi Szlovákiába, ahol a bősi erőmű előtt a szlovákok kikotorják és felhasználják az építkezéseikhez. Az osztrákoknak meg évente kell ennyi új anyagnyerő helyről gondoskodniuk. Szép névvel is illetik: granulometrikus folyómeder-javítás (Kordina és Hanish 2004; Christian Baumgartner, személyes közlés, 2009). Igaz, hogy az ökológiai gondolkodás egyik alapeleme a recirkulálás, de ezt nem így gondoltuk.

A tározókban kiülepedő hordalék különféle problémákat okoz. Az Egyesült Államokban a korai időszakban épített víztározók 40%-a 50 évnél rövidebb ideig „él" a feltöltődés miatt. Az Asszuáni-gát mögötti Nasszer-tóba évi 13 millió $m^3$ iszap rakódik le. Ugyanaz, ami 5000 éven át termékenyítette az alatta fekvő, folyóvölgyi síkságot, ami gyakorlatilag Egyiptommal azonos (Coates 1981). A hordalék elhordására csakis újabb technikai beavatkozásokkal lehet gondolni, ezek közül a leggyakrabban alkalmazottak az iszapoló zsilipek, kerülőcsatornák, kotrás, sőt víz alatti szippantás is (Scheurelein 2002). Egyik sem problémamentes. Európában a gát mögött felhalmozódott üledék kiszippantására új módszereket fejlesztettek ki, és víz alatti kamerákkal felszerelt hajókat vettek igénybe (Pralong 1987). Mindezek ellenére egyedül Olaszországban 540 olyan gát van, amelyet a feliszapolódás veszélye fenyeget (Ruggeri 2002). Ahhoz, hogy külön erre a célra épített, elterelő alagutakkal eresszük át a hordalékot a gáton, csak a nagyon gazdag államoknak van pénze, mint például Svájcnak (Auel et al. 2011) vagy Japánnak (Kondolf et al. 2014). Ukrajnában, ahol nincs pénz, a Tisza mellékfolyójára, a Tereblia-völgybe épített gát mögötti tározót 5-7 évente kell takarítani, miközben a folyó vízhozama a tizedére csökkent, veszélybe sodorva az alvízi közösségeket – vadon élőt és emberit egyaránt (Kovalchuk 2001).

A gátak feltöltődése tehát nem távoli veszély, hanem friss tény. Főként a harmadik világban az erdőirtások következtében a már meglévő gátak feltöltődése sokkal gyorsabban játszódik le, mint azt eredetileg gondolták (Batuca és Jordaan 2000). Nepálban, ahol a hegyi lejtők eróziója a túlnépesedés miatti intenzív földhasználat következményeként felgyorsult, konkrétan a vízerőművek működését is akadályozza már a felgyülemlett hordalék (Chhukan és Sangraula 2016). Hasonló a helyzet a világon számos más helyen is (Norbu é. n., Araújo et al. 2023).

Bár az a tény, hogy egy gát mögött a hordalék kénytelen megállni, és feltölti a tározótavat, eléggé belátható józan parasztésszel is, mégsem vizsgálják kellőképpen, hogyan lehet üzemviteli megoldásokkal csökkenteni az ebből eredő feltöltődést, következésképpen a csökkenő vízhozamot és áramtermelő kapacitást (Kondolf et al. 2014). Az üledékképződésnek azonban nem csupán ilyen gazdasági hatásai vannak, sokkal több kárt okoz a természetben. A gát mögött ugyanis nemcsak a görgetett, de a lebegtetett hordalék jelentős része is megreked, és ez jelentős hiányt eredményez a gát alatt. A Három Szurdok-gát és társai a felvízen a Jangce középső folyását tápanyagforrásának, a lebegtetett hordaléknak 91%-ától fosztották meg, elzárva ezzel a foszfor- és nitrogén-utánpótlást is a vízi világtól, de beindítva a tározótavakban az eutrofizációt (Zhou et al. 2013).

A gátak mögötti tározókban folyó üledékképződést sokféle módszerrel igyekeznek mérsékelni. Alapvetően háromféle megközelítés lehetséges: 1. a felvízi hordalékképződést igyekeznek csökkenteni, 2. a hordalék lerakódását csökkentik a tározóban, 3. a tározó eredeti víztartó kapacitását próbálják meg visszaszerezni. A legnehezebb persze a talaj és a folyópart eróziójának megakadályozása, ezért gyakrabban alkalmaznak újabb mérnöki beavatkozásokat, például üledékcsapdaként funkcionáló kisebb gátakat vagy a főágba épített különféle műtárgyakat a felvízi létesítmények széttagolása útján. A tározóban rekedt üledéktől többféleképpen lehet megszabadulni: elkerülő csatornán, a gát aljába épített és kifejezetten erre a célra megnyitott surrantókon keresztül, vagy célzott üzemviteli megoldásokkal, amikor vízkormányzással igyekeznek a hordalékot átjuttatni a gáton. A tározó eredeti kapacitásának visszanyerése célszerűen kotrással is lehetséges. Ez nemcsak mechanikus módszereket jelent, hanem hidraulikus úton, gravitációs vagy nyomás alatti átmosással is elképzelhető, amennyiben a gát építésekor ilyen létesítményeket telepítettek. Végül marad a tározótó területének kibővítése, a gyülekezési medence áthelyezése, vagy az üledék újraelosztása (Kondolf et al. 2014). Egyik sem túlságosan megnyugtató és olcsó megoldás. Az első esetben továbbra is hiányzik a tápanyag és mederformáló üledék az alvízen, a másodikban a gát gazdaságossága kérdőjeleződik meg, míg a harmadik nem alkalmas a tározó fenntartható menedzselésére (lásd a 14. színes ábrát).

A gátakról készült elemzések általában azt hangsúlyozzák, hogy a környezeti hatások enyhítésére a legjobb megoldás a megfelelő hely megválasztása (NHA 2010). Már amennyiben további gátakat akarunk építeni. A „jó gát" ismérvei, hogy 1 MW áram termelésére minél kisebb területet, minél kevesebb rajta lévő biomasszával és minél kisebb hosszban kelljen elárasztani, a tározóban a víz minél kevesebb ideig tartózkodjon, és minél kisebb legyen az a hossz, amely a száraz évszak kisvízi medrének felénél kevesebb hozamot jelent az alvízen a duzzasztás miatt. Ezt jelentősen lehet csökkenteni, ha minél több gát nélküli mellékfolyó csatlakozik be a gáttól lefelé eső szakaszon. Jelentős veszély az is, ha a tározó felső vízrétege felmelegszik, míg a feneke hűvös marad, ezért nem keveredik, pang, és oldottoxigén-tartalmának csökkenése alkalmatlanná teszi a vízi

élet fenntartására. Akár így, akár úgy, minden gátnak van egy hasznos élettartama, ami azt jelenti, hogy bizonyos idő elteltével egészen biztosan feltöltődik (Ledec és Quintero, 2003).

*Delták*

A hordalékháztartás megváltoztatása nemcsak a folyón, hanem annak torkolatánál is drámai változásokat idéz elő. Valamikor ugyanis megépül a legutolsó gát, amely alól a víz már a tengerbe ömlik, csakhogy hordalék nélkül. Nincs tehát, amit lerakhatna a deltatorkolatban, hogy építsen, vagy odaadjon a tengernek, mint egy tölcsértorkolatban. Ezért a tenger elveszi azt, ami a magáé, de máshonnan: a már kiépült partból (Gies 2023). Elrettentő példa erre a Nílus, amelyen a deltagát és a nagy Asszuáni-gát megépítését követően a tenger mozgása egyszerűen elmossa a deltát, mert nincs üledék-utánpótlás, amely kiegyenlítené a parteróziót. Évente méterekkel rövidül Egyiptom. Sőt, van olyan település, amely az éghajlatváltozás miatt várható vízszintemelkedéssel kombinálva egy méterrel kerül a vízszint alá (Bunting 2000). Más források szerint Egyiptom már most évente 50 méter földet veszít el a folyó deltájából. Ugyanakkor a tengerszint emelkedése és a vízkivétel erőltetése az elsődleges vízadó rétegekben a sós víz előrenyomulását eredményezi, amely immár 35 km-re hatolt be a Nílus völgyébe (Bunyard 1999: 89). Ezzel az ország termékeny területeinek jelentős részét veszélyezteti, hiszen a gabona a sós vízben nem él meg (Glick 2004). Nincs ez másképpen a Rhône folyó mérnöki munkát dicsőítő, a 19. században példamutatónak minősített szabályozása után annak deltájában sem, ahol a legendás fehér vadlovaknak otthont adó Camargue mocsarainak partja 5 métert hátrál évente (Lóczy 2001). Amerikában a legnagyobb folyórendszer, a Mississippi deltájában, Louisiana állam parti mocsaraiban azóta, hogy megkezdődött a gátrendszerek kiépítése, majdnem 2000 négyzetmérföld pusztult el, mert a szállított hordalék mennyisége 67%-kal csökkent (ENS May 23, 2003). Mindezen túl a terület még geológiai értelemben is évente mintegy egy métert süllyed (Glick 2004).

A nagy folyók deltatorkolatai legtöbbször igen termékeny talajokkal rendelkeznek. Az áradásokkal érkező megtermékenyítő tápanyag alkalmassá tette őket mezőgazdasági termelésre, édesvízforrásként és egyúttal az élővilág hatalmas sokszínűségének a kialakulására. Ezért az emberi letelepedés központjai lettek, gyorsan urbanizálódtak és iparosodtak. Ám a partvidékek lakosságát védtelen voltuk miatt az éghajlatváltozással kapcsolatos következmények, a tengerszint emelkedése, az édesvízkészletek sóssá válása és az időjárási szélsőségek még jobban fenyegetik (Renaud et al. 2013). Elég ha csak Bangladesre vagy a New Orleans-on végigsöprő Katrina hurrikánra gondolunk (Day és Boesch 2007). A sérülékenységet fokozza a delták üledékes talajából kitermelt olaj-, gáz- és vízkészletek helyén maradt üres tér okozta tömörödés és süllyedés. A delták süllyedésének oka továbbá az üledékképződés elmaradása, a vízháztartás, vízjárás felbomlása és a folyómeder áthelyezése, átalakítása, kotrása stb. is lehet (Syvitski és Saito 2007).

Egy reprezentatív felmérésben 33 folyó deltájának 85%-ában tapasztaltak árvizet az elmúlt tíz év során, ezzel összesen 260 000 km$^2$ (!) került ideiglenesen víz alá. Ez a szám csak nőni fog, ha továbbra sem jut át a hordalék a gátakon, és nem képződik belőle üledék a deltában (Syvitski et al. 2009). Az eredmény a megnövekedett árvízveszély, különösen az Ázsia hatalmas deltavidékeire épült nagyvárosokban. A Gyöngy-folyó deltája Dél-Kína legsűrűbben lakott területe, többek között Hongkong is itt található. Hagyományos árvízvédelmi intézkedésekkel a veszély már nem sokáig hárítható el, pedig egyedül Ázsiában 362 millió embert érint (Chan et al. 2012). A kitettséget a tengerszint emelkedése átlagosan 50%-kal fogja megnövelni a 21. század során. Ezért a deltáknak még a tengerszint emelkedésére is reagálni kell valahogy. Ez alapvetően természeti folyamatokkal történt eddig (a lerakódási súlypontok áthelyeződése, új ágak képződése, gyakoribb átmosások üledéklerakódással stb.), ám a sűrűn lakott területeken ez már nem járható út. A jelenlegi álláspont szerint 2-5 méterig gátépítéssel, annál magasabb tengerszint-emelkedésnél már csak a visszavonulással lehet védekezni a víz behatolása ellen. Ennél ígéretesebb stratégia lehetne, ha a gátépítéssel párhuzamosan a terepszintet is meg lehetne emelni. Ehhez pedig elengedhetetlen a most hiányzó hordalék (Ibanez et al. 2014).

Az Indus deltája is hasonló gondokkal küzd. Átalakulása szinte teljes egészében emberi hatásra vezethető vissza. Igen dinamikus életet él, a monszun áradásokat, a ciklonok árhullámokat, a földrengések cunamikat váltottak ki. Ám az árvizek okozta mederátvágások miatt 2010 óta a folyó vízhozama 43%-kal csökkent, és ez a többi műtárggyal, árvízvédelmi töltésekkel, gátakkal, öntözőcsatornákkal, hordalékcsapdákkal és vízgyűjtők közötti eltérítésekkel együtt oda vezetett, hogy ma már a hatalmas folyó sokszor száraz mederrel látható, és a korábbi, évente több mint 270 megatonna üledék hiánya, a deltaágak elzárása és egyéb okok miatt 1944 óta évente átlagban 12,5 km$^2$-rel csökken a delta kiterjedése (Syvitski et al. 2014).

Annak, hogy a folyótorkolatok sérülékennyé váltak, különbözők lehetnek az okai, mert bár általában ugyanazok a beavatkozások és változások veszélyeztetik őket, ezek szerepe az egyes konkrét esetekben más és más. A száraz vízgyűjtő területeken a fő ok a nagy öntözési beruházások okozta víz- és az ebből eredő üledékhiány, mint az Indus és a Nílus esetében (Overeem és Syvitski 2009). Másutt a deltavidéken próbálták meg a lehetetlent: egy dinamikus, komplex rendszert gátakkal, töltésekkel, kotrással és egyebekkel stabilizálni. A Pó deltája 3,7 métert süllyedt a 20. században, 81%-ban a földgázkitermelés következtében. Ezt onnan lehet tudni, hogy a bányászat leállítását követően a süllyedés lelassult. Ezért mindig egyenként kell megvizsgálni, az adott folyó esetében mi az elsődleges oka a tapasztalt problémáknak, és hogy elsődlegesen geomorfológiai, ökológiai vagy gazdasági hatásokkal kell-e számolni (Overeem és Syvitski 2009).

Alapvetően négy olyan stádiuma van a delták fejlődésének, amit jól el lehet egymástól különíteni: a holocén kori deltafejlődés, az emberi beavatkozással

módosított holocén, majd mostanában az antropocén, végül az „összeomlás": a Gangesz és az Indus deltája már most összeomlással fenyeget, a Mekongot mostanában kezdik tönkretenni, eddig az akvakultúrára alapozott diverz mezőgazdaság mintapéldája volt, míg a Rajna és a Meuse, valamint a Duna deltája példa arra, hogy megfelelő gazdálkodással ideig-óráig karban lehet tartani a káros folyamatokat. Hosszú távon azonban fogalmunk sincs, mi fog következni (Renaud et al. 2013). A Mekongon 133 gátat terveznek építeni csak az alsó folyáson, ami többek között az üledék 97%-ának elvesztésével jár majd. Mindez már nemcsak a termékenységre hat ki, hanem magát a delta létét fenyegeti (Rubin et al. 2014). Holott a Mekong deltája Vietnám élelmiszerraktára, és éppen mostanában bizonyította be az ott gazdálkodó népesség, hogy a csak rizstermelésre irányuló kormányzati politika mellett ugyanazokkal az infrastrukturális beruházásokkal, amelyekkel az árasztást végezték, sokoldalú egyéb termelést (például akvakultúrát, garnélák tenyésztését stb.) is könnyedén meg tudja oldani (Hoanh et al. 2014). Kár lenne ezt az ígéretes fejleményt felvízi gátakkal ellehetetleníteni. A Volga folyón a sorban épült gátak miatt a delta téli-nyári vízháztartása teljesen felborult, ami a halivadékok fejlődési igényei miatt a halbőség megszűnésével és egyéb súlyos ökológiai károkkal is fenyeget (Gorbunov 2001). Bangladesnek az a sors jutott, hogy 59 nemzetközi folyó deltája legyen. Vagyis olyan folyóké, amelyek nem saját állami területén, hanem más országokban erednek. Az ottani gátépítések megfosztják az édesvíz-utánpótlástól a delta lakóit: a hordalék mellett a vizet is elvezetik (Ahmed 2013).

Érdekes módon Kínában nem tapasztalhatók a Jangce deltájánál ezek a jelenségek. Annak ellenére, hogy a Három Szurdok-gát már működik, a kínaiak állítása szerint annyira távol van a deltától, és az alatta levő szakaszokon annyira sok hordalék képződik, hogy a delta lerakódását és tápanyagpótlását egyelőre nem fenyegeti veszély (Dai et al. 2014). Ez igaz is lehet, de éppen hogy nem megnyugtató okokból: a löszfennsíkon folytatott intenzív mezőgazdasági gyakorlat a Jangce vízgyűjtőjén általánosságban tízszeresére növelte a folyóba jutó finom hordalék mennyiségét (Overeem és Syvitski 2009). A kutatók a gátnak a deltára gyakorolt hatását is sürgős újraértékelésnek vetnék alá (Dai et al. 2014). Egy átfogó felmérés szerint vannak olyan delták, mint a Mekongé, amelyek társadalmi-ökológiai állapota akár még javulhat is, míg mások közel állnak az összeomláshoz (Renaud et al. 2013). Meglepő megoldást javasolnak román kutatók, akik szinte véletlenül fedezték fel, hogy a Duna felső szakaszain és mellékfolyóin épített gátak miatt lecsökkent hordalék eróziós hatását ellensúlyozza az, hogy a deltában kotort csatornák a deltavidékre irányítják a megmaradt hordalékot, nem mossa tehát el azt a tenger, ugyanakkor a víznek a tengerbe ömlését is felgyorsítják (Giosan et al. 2013).

*Üvegház?*

Sokáig úgy tudtuk, hogy sok egyéb káros hatásuk mellett a vízi erőművek és víztározók legalább a világméretű éghajlatváltozáshoz nem járulnak hozzá, hiszen nem égetnek el semmit, és – bár ez meglehetősen kétes érv – támogatóik szerint „megújuló" energiaforrásnak tekinthetők (abba a kérdésbe, hogy a feliszapolódó gátakba belefulladt turbinák mit kezdenek ezzel a megújuló forrással, most nem mennék bele). Viszont lássuk azt a megdöbbentő és eléggé új keletű felismerést, hogy különösen a trópusi esőerdők vidékén épült és nagy kiterjedésű, nyílt vízfelülettel rendelkező tározós vízerőművek igenis számottevő szén-dioxid- és metánkibocsátással rendelkeznek (WCD 2000). Különlegessége a jelenségnek továbbá, hogy rendkívül nagy ingadozásoknak van kitéve, hosszú távú szintje nem becsülhető, csak igen nagy bizonytalansággal (kaotikus rendszerről van itt is szó). Könnyen lehet, hogy a felmelegedést okozó emisszió akár 28%-a is ebből a forrásból származik, de lehet, hogy csak 1% (Kelly et al 1997). Az újabb becslések 4% körüli értéket valószínűsítenek (Mäkinen és Khan 2010).

Persze lehet mondani, hogy még nem tudunk eleget, nagy a bizonytalanság stb., de ha bebizonyosodik, hogy az első számnak akár csak a fele igaz, gyökeresen át kell értékelni a Kiotói Egyezménytől az energiapolitikáig nagyon sok mindent. A brazíliai Tucurui tározó esetében, amely egy kisebbfajta tenger (területe 2600 $km^2$), kiderült, hogy ha a gátba beágyazott 4240 MW-os vízerőmű helyett annak rendje és módja szerint takaros kis hőerőművet építenek, ennek szén-dioxid-egyenértékben mért kibocsátása nagyjából azonos lenne, mint a Turucui tározó többéves átlaga. Ennyi erővel tehát akár egy kombinált gázfűtésű erőművet is üzembe lehetett volna állítani (Lóczy 2001). Pedig a kiterjedt erdőség elárasztásának ilyen jellegű következményeitől már akkor óvtak a szakértők, amikor az üvegházhatás vizsgálata még gyerekcipőben járt. Az erdők bomlása nem csupán szén-dioxid, de nagy mennyiségű mérgező – és büdös – kén-hidrogén ($H_2S$) felszabadulásával is járt. Egy másik dél-amerikai gátnál a munkásoknak az üzemelés első két évében a turbinákon átáramló víz magas kén-hidrogéntartalma miatt gázmaszkot kellett viselniük (Monosowski 1984). A szakemberek már korábban felemelték szavukat az ellen, hogy a nagy gátaknak rutinszerűen jó pontokat adjanak szén-dioxid-kibocsátás tekintetében, mert komoly érvek szólnak üvegházhatásuk mellett (ENS October 29, 2002).

Kijelenthető tehát, hogy bár megújulónak és karbonsemlegesnek mondják, a vízerőművek és gátak egyik feltételt sem teljesítik, hiába hangsúlyozzák túl szorgalmazói folyamatosan és szándékosan a tiszta, zöldenergia-forrás képét (Giles, 2006). Különösen a korai években, amíg feltöltésük be nem fejeződik, és a növényzet, biomassza ki nem pusztul belőlük, tekinthetők a nagy tározótavak az üvegházhatású gázok jelentős forrásának (Rudd et al. 1993). Lima et al. (2008) becslése szerint a trópusi tározótavakból felszabaduló metán a globális metánkibocsátás eddigi értékeit akár 30%-kal is megnövelheti. Az üveg-

házhatású gázok forrása részben a folyóval szállított, részben a tóban keletkező biomassza és a víztömeg egymásra rétegződése. Vagy az üledékből szabadulnak fel buborékok formájában, és kerülnek a felszínre, majd onnan a légkörbe, vagy a nyomásviszonyok hirtelen változása szabadítja fel őket a turbinák működésekor (Giles 2006, Fearnside 2004). A kibocsátások még más energiaforrásokhoz viszonyítva is jelentősek, nincs tehát mit dicsekedni. A legnagyobb kibocsátással az Amazonas trópusi vidékeinek tározói rendelkeznek (Barros et al. 2011). Ezért erőfeszítések történtek, hogy a Kiotói Egyezmény során létrehozott tiszta fejlesztési mechanizmus (Clean Development Mechanism) keretében csak olyan gátakat lehessen finanszírozni a jövőben, amelyek megfelelnek az „energiasűrűség" kritériumának. Ez jelen esetben azt jelenti, hogy a beépített kapacitást elosztjuk a hozzá tartozó tározó felületével. Minél kisebb a szám, annál rosszabb a hatásfok. Miután azonban a legtöbb számítást az energiaiparban érdekeltek végezték eddig, a tényleges kibocsátás és a küszöbérték is vita tárgya, és az ajánlás nem kötelező (Mäkinen és Khan 2010). Ha ehhez még hozzávesszük a párolgást is, kijön a vízlábnyom fogalma, aminek van egy elméleti és a megvalósítás, üzemeltetés stb. következtében kialakuló tényleges értéke. Azt jelzi, hány köbméter víz megmozgatásával lehet 1 MW/óra villamos energiát megtermelni (Mekonnen és Hoekstra 2012). Az sem mindegy, milyen az a víz, amit felhasználnak a termeléshez. Egy beosztás szerint zöldvíz az, ami felülről érkezik: a csapadék. Kékvíz, ami a felszíni és felszín alatti vizekben található, és végül szürkevíz, amit emberi igények kielégítésére már felhasználtak, ezért valamilyen mértékben és módon szennyeződött (Dourte és Fraisse 2012). Mondanunk sem kell, a vízerőműveknél csak az elpárolgó víz kerül a kék kategóriába, a többi mind szürkevíz. Egy elemzés szerint, amely a világszerte üzembe állított, elektromos áramot termelő vízerőművek 8%-át vizsgálta meg, ezek kékvíz-lábnyoma a világ teljes 2000. évi gabonatermelése kékvíz-lábnyomának 10%-át tette ki. Ami azt jelenti, hogy a vízerőművek több vizet használnak fel és párologtatnak el, mint a világ élelmiszer-termelésének jelentős része (Mekonnen és Hoekstra 2012).

### 5.3.5. Az állatorvosi beteg ló: a bős–nagymarosi vízlépcsőrendszer

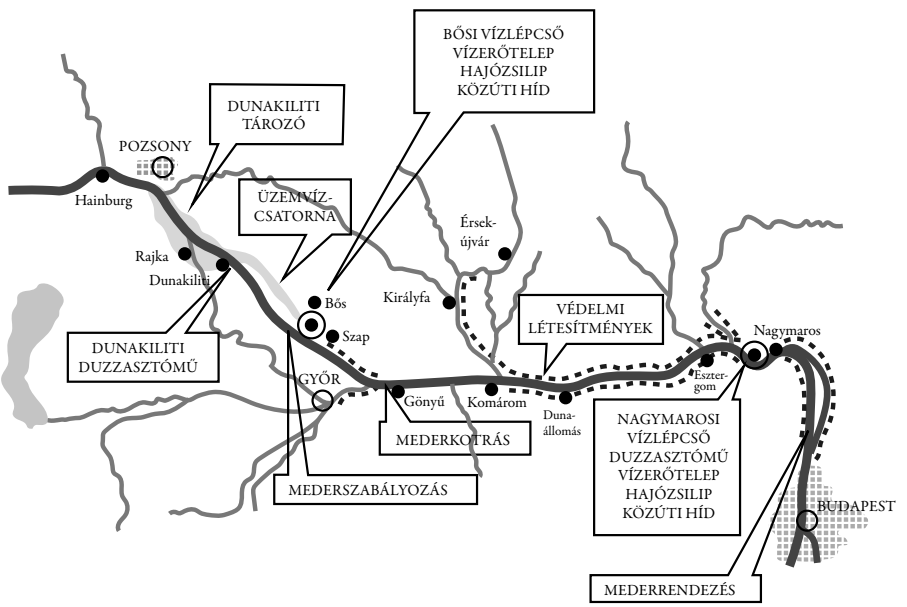
Magyarországon a komplexnek nevezett vízhasznosítás félig megvalósított példája a két tiszai vízlépcső Tiszalöknél és Kiskörénél (ez utóbbit máig sem sikerült a tervezett szintre feltölteni) és a politikai botránykővé fajult bős–nagymarosi rendszer. Tiszalök az üzembe helyezését követően rögtön feltöltődött. No, nem vízzel, hordalékkal. Az első két évben 7 méter iszap ülepedett ki benne (Rákóczi 1989). Hasonló gondok vannak a kiskörei gát mögött húzódó Tisza-tónál is, ott „csak" 1 méter évente, és csak a terület egy részén. Van helyette viszont láposodás, vizenyősödés és belvízprobléma az egyik oldalon, szikesedés és szárazság a másikon (Várallyay 1990). Műszakilag is volt mit rendbe tenni. 1974-es üzembe helyezése után két hónappal 11 méteres medererózió keletkezett, és a part-

burkolat is megroggyant. Végül söder, zúzottkő és kőterítés védte meg a további mélyüléstől. Két évvel később az úgynevezett kopóbeton szakadt fel, amit csak szivárgó réteg beépítésével tudtak stabilizálni (Kozák 2018).

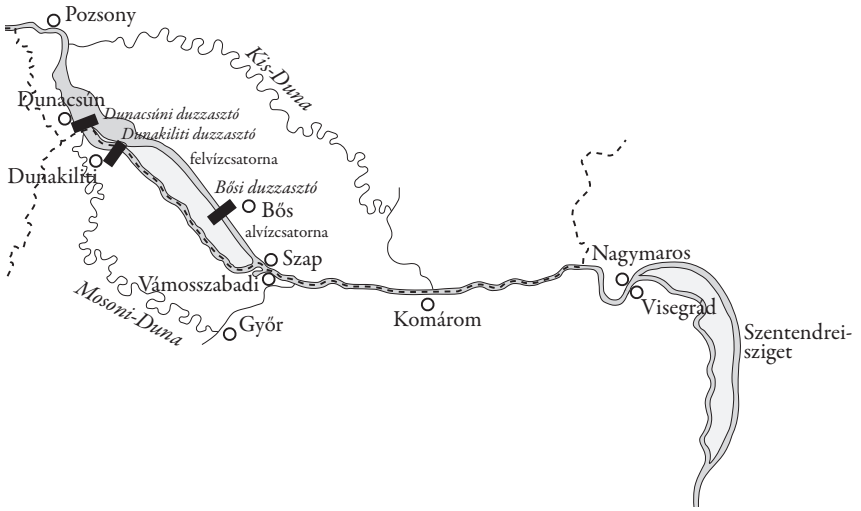
Nekünk, magyaroknak azonban a legérdekesebb mégis a nyolcvanas évek végén nagy port kavart és teljesen elpolitizálódott bős–nagymarosi vízlépcsőrendszer, a BNV. Ez a beavatkozás a nagy projektek minden baját felvonultatja. A komplex vízügyi beruházásnak nevezett terv eredeti formája a magyarországi Felső-Duna teljes szakaszát és még az alatta levő területeket is magában foglalta egy két keresztgátból, üzemvízcsatornából, tározótóból és járulékos beruházásokból álló rendszer formájában. A projekt felső része a Szigetközben futó Dunát verte bilincsbe. A Szigetköz – és a szlovák oldalon a Csallóköz – nem más, mint a Kisalföldre kilépő folyó által a mélyben fekvő agyagos, ezért vízzárónak tekinthető rétegekre települt kavicsos-homokos hordalékkúp, amit maga a Duna épített a térszint feltöltése révén. Ezért a jelenlegi felszín alatt egy olyan kavicsos összlet található, amelynek vastagsága Pozsonynál még 300 méter, de Gönyűnél már csak 30. Ennek a kúpnak a tetején fut – illetve futott – a kis esés miatt átmenetileg alsószakasz-jellegűvé vált Öreg-Duna, szélén pedig az ott már nagyobb esésű, és ezért meanderező, középszakasz jelleget öltő Mosoni-Duna, a másik oldalon meg a Csallóközt körülölelő Kis-Duna. A folyószabályozások ide is elértek, a Szigetközt és a Csallóközt még 1886 és 1896 között „megrendszabályozták" (Szabó 2003). Ezek a beavatkozások elsősorban a hajózás lehetővé tételét és a szigetközi földek ármentesítését kívánták elérni, de meghagytak egy viszonylag széles hullámteret mindkét oldalon, amely a régi állapotban kialakult holtágak és mellékágak rendszerének maradványait bukógátak rendszerével egészen a vízlépcső megépítéséig ellátta vízzel, így egészséges ökológiai környezetet és a maga nemében páratlan természetvédelmi, tájvédelmi értéket tartott fenn.

A projekt alsó része, amely a Nagymaros és Visegrád között megépítendő gát lett volna, egészen Győrig duzzasztotta volna vissza a Duna vizét. Erre a második gátra már nem annyira önmagában, inkább a korábban említett alvízi eróziós hatás kivédésére volt szükség. Bőst ugyanis energetikai és energiapolitikai okokból eredetileg csúcsrajáratásra tervezték, ami azt jelenti, hogy azokban az időszakokban, amikor az áramfogyasztás csekély (éjszaka, a nap bizonyos óráiban), a duzzasztást folytatják, magasabb szintre töltik a tározót, és amikor szükség van az áramra, többet tudnak termelni. Azon az áron, hogy az aktív időszakokban egyszerre lezúduló hatalmas víztömeg még jobban kivájja a medrét. Ennek elkerülésére kell egy „ellenduzzasztást" csinálni, hogy az üzemvízcsatorna alvízi szakaszáig felduzzasztott folyó vizébe, és ne a csupasz mederágyra jusson a csúcsrajáratáskor leeresztett víz. Nagymarosnál a folyó átmenetileg ismét felsőszakasz-jellegű, a Pilis és a Börzsöny között átvágva egy sziklaágyon fut, ezt használták volna ki az építők.

Az eredeti elképzelés szerint egy csehszlovák–magyar közös vállalkozás és a szocialista testvériség jegyében a Dunakiliti magasságában megépített elzárómű duzzasztotta volna fel a tározó vizét, és egy Csallóközben épült üzemvízcsatorna vitte volna el azt az eladdig szárazon álló Bős mellett létesített erőműhöz, majd egy mesterséges mederben Szapnál visszaengedték volna az Öreg-Dunába. Közben a testvériség megkopott, Csehszlovákiából Szlovákia lett, és a nemzeti önérzet a két országban ellenkező következtetésre jutott: Magyarországon a rendszerváltás mérföldköve és ökológiai érvekkel alátámasztott célkitűzése lett a vízlépcső meghiúsítása, Szlovákiában viszont a nemzeti öntudatra ébredés szimbólumává vált az önálló vízügyi beruházás. Az eredmény legjobb esetben is visszás és felemás, akárcsak a gátrendszer: a bősi erőművet a szlovák fél a magyar fél beleegyezése nélkül, sőt politikai tiltakozása ellenére oly módon valósította meg, hogy egy C-variánsnak nevezett megoldással saját területén rekesztette el a Dunát anélkül, hogy Kilitit igénybe vette volna. Anélkül, hogy a politikai részletekbe belemennénk, annyit meg kell jegyeznünk, hogy ebből a helyzetből a magyar fél alvízi helyzete révén nem jöhetett ki győztesen, akár az eredeti elképzelés valósul meg, akár a C-variáns. Ennek ellenére a magyar vízügyi iskola hívei a bős–nagymarosi vízerőműrendszer eredeti változatában sem láttak semmi kivetnivalót (Kató 1990, Zsuffa és Starosolszky 1994).




39. ábra. *A bős–nagymarosi vízlépcső eredeti koncepciója (Péteri 1977)*




40. ábra. *A megvalósult C-variáns (Forrás: https://lawhelpbd.com/case/gabcikovo-nagymaros-project-case-hungary-v-slovakia-1997/)*

A politikai huzavonától függetlenül a lényeg azonban a megjósolt és részben be is következett változások a folyó életében. A várható ökológiai hatásokkal már nem sokkal a létesítési szerződés aláírása, 1977 után foglalkoztak szakemberek, de az akkori körülmények között egzisztenciájuk veszélyeztetése nélkül csupán nagyon óvatos megfogalmazásokra hagyatkozhattak. Ennek ellenére volt, aki már akkor számba vette és le is merte írni a káros következmények jelentős részét (Daubner 1981).

Mik is a főbb hatások? Az előrejelzések szerint:

A tározóban és az új főágban (üzemvízcsatorna) csökken az áramlási sebesség a korábban már tárgyalt következményekkel (oxigénhiány, eutrofizáció, kolmatáció, szennyezett infiltráció). Fokozódik az ülepedés, amit jelentős szennyezettség is kísér. A fenéken anaerob folyamatok fognak dominálni, tovább rontva a vízminőséget és az élőlények életfeltételeit. A biológiai szűrőréteg károsodik. A tározó környékén emelkedik, alatta csökken a talajvíz szintje. A talajvízszint, amely jelenleg a hordalék kavicsán kiülepedett finom fedőrétegben áll, a vízlépcső hatására a kavicsba süllyed, ahonnan kapilláris mozgással már nem csalogatható elő a növények számára. Ezért jelentős termésveszteség áll elő. Ahol a talajvíz emelkedik, nő a belvízveszély, és másodlagos szikesedés következik be.[6]

Az elárasztás következtében gazdag és típusos ártéri ligeterdők mennek tönkre, a számítások szerint a terület erdeinek 28%-a. Az üzemvízcsatorna

[6] A Gabcikovo–Nagymarosi Vízlépcsőrendszer problémái. Az Eurolánc szakértőinek tájékoztatója, 1991. szeptember.

mentén a mesterséges és szigetelt meder miatt lehúzódó talajvíz és az évente ismétlődő vízborítás elmaradása miatt további erdőpusztulás várható. Mindezek az élővilág átalakulását, a biocönózisok változását eredményezik. Megszűnik a Duna-ágak egyedülálló rendszere, megfordul a talajvíz áramlási iránya, és nem az Öreg-Duna felől folyik majd kifelé, hanem fordítva, „leszívja" a Szigetközt. Mezőgazdasági területek elvesztésével és átalakításával is számolni kell. A halfauna, amelynek ívóhelyei a korábbi vizsgálatok eredményei szerint a holtágak és mellékágak rendszerében voltak, drámai csökkenésnek van kitéve. A dunakörtvélyesi tározóban a megnövekedett nyomás miatt az infiltrációs zónában a szennyezések átszivárgásával, ezért a talajvíz minőségének romlásával kell számolni (Daubner 1981).

A legkomolyabb gondok azonban, különösen Nagymaros megépülése esetén, az ivóvízellátást érintik. Budapesten már most is 1 millió $m^3$ a parti szűrésű kutak hozama, amelyek vízminősége egyike a várost ellátó források legkiválóbbikának. A medererózió és a hidrodinamikai változások miatt ezek veszélybe kerülnének. A dunakiliti tározóban viszont a kiülepedő iszap növeli meg a talajvízbe jutó szennyezések mennyiségét. Linz ivóvízellátását az ottensheim–wilmeringi gát már egyszer veszélybe sodorta. Csak költséges eljárásokkal lehetett megmenteni a talajvízkészletet. Az üzemvízcsatorna aszfalttal bevont falán megtelepedő baktériumok alapanyagukból rákkeltő vegyületeket termelnek. Külön kérdés a földrengések esete, amelynek vizsgálata nem történt meg, és különösen Nagymaros esetében, amely földrengésveszélyes törésvonal mentén fekszik, kockázatot jelent. A Szobtól Nyergesújfaluig terjedő folyószakaszon szemben, a szlovák oldalon azonban a másik fél, mintha mi sem történt volna, továbbépítette a nagymarosi tározó okozta talajvíznyomás elleni föld alatti résfalat, megerősítette a gátat, szivárgó csatornát készített. Az építkezések egészen 2002-ig folytak, majd modellezték a talajvízbázis elleni védelmi intézkedések hatásosságát (Burger 2012).

Az 1992-ben végül megépült C-variáns felemásan igazolta vissza a korábbi jóslatokat, hiszen Nagymaros és a csúcsrajáratás elmaradása miatt az ezekkel kapcsolatos veszélyek – egyelőre – elmúltak. Ám a veszélyek jó része nem légből kapott volt. Ausztriában a vízerőművek rengeteg kárt okoznak a halak életterében, élővilágában, különösen ha csúcsra járatják őket (Schmutz et al. 2015). Jórészt beigazolódtak azok az események is, amelyeket a szakemberek a Szigetközre megjósoltak. Szlovákia 1992. október 25-én kezdte meg a víz elterelését, aminek következtében a Dunába jutó vízmennyiség eredeti értékének 5-10%-ára apadt, és azóta is méltatlan alkudozás folyik arról, mennyi lenne az elég: milyen mértékű vízmennyiségre lenne szükség az eredetihez közeli állapot megőrzéséhez.

A vita persze akadémikus: az eredetihez közeli állapot megőrzéséhez az eredetihez közeli mennyiségű vízre lenne szükség. Így viszont a vízlépcső válna oka-

fogyottá. Nem csoda hát, ha a problémák eredője a szigetközi talajvízháztartás felborulása. A Duna vízszintje a Szigetköz felső felében 4-5 métert süllyedt, és a Szigetköz 70%-a napokon belül teljesen kiszáradt. Mintegy 400 tonna hal pusztult el, a mederben nemsokára fűzfák sarjadtak (Bárdos Deák 2004). Bejött a „papírforma": a Felső-Szigetközben a duzzasztott vízterek körül a talajvíz szintje megemelkedett, középen csökkent, és csak az alsó részen, Szap körül maradt a régi állapot. Középen a legdominánsabb jelenség a vízpótlás elmaradása. Említettük, hogy az Öreg-Duna a hordalékkúp tetején fut, kicsit magasabban a környező területnél, tehát a beszivárgás oldalirányban a Mosoni-Duna irányába pótolja a talajvizet.

Amióta nincs Öreg-Duna, nincs talajvíz sem: a folyó szintje átlagosan 3 méterrel csökkent. Ugyanakkor az üzemvízcsatorna visszaeresztése Szap fölött visszaduzzasztó hatású, a folyó vize lelassul, a meder kolmatálódik. A középső részen kiszáradtak az ártéri élőhelyek, helyüket gyomvegetáció foglalta el. A Dunaparti sávban pusztulnak a fák (árborítás elmaradása), és csökkent a halállomány.[7] A talajvíz a kilencvenes évek első felében az aszályos időszak miatt valóban besüllyedt a kavicsos alsóbb rétegekbe, még mélyebbre, ahonnan a növények már nem voltak képesek felszívni.

A nyilvánvaló károk mérséklésére 1995-ben egy úgynevezett fenékküszöböt építettek az Öreg-Duna medrébe, ami egy kicsit javított a helyzeten (Lóczy 2001). Azóta azonban a vízszint gyakorlatilag állandó, és a korábbi 4-5 méteres vízszintingadozások dinamikája elmarad. A lesüllyedt talajvízszint állandósult, az erdők jelentős részét le kellett termelni, és a mezőgazdasági területek is vízhiánnyal küzdenek. Az ártér kiszáradt, selejtes sarjerdők borítják, akárcsak a medret, és mindenhol dózerutak szabdalják felismerhetetlenségig elcsúfítva a valaha karakteres tájat (Bárdos Deák 2004).

A gondot az okozta a Szigetközben, hogy a Dunakilitibe tervezett víztározó a C-variáns keretében szlovák területen épült ki, ahová szomszédaink jogtalanul elvezették, gyakorlatilag ellopták az Öreg-Duna főmedre vízhozamának jelentős részét. Ennek következtében és a régebb óta tartó medersüllyedés miatt a Duna vízszintje a szigetközi mellékágak vízszintje alá került. A főfolyó tehát nem tudta táplálni a mellékágakat. Mesterségesen meg kellett emelni az Öreg-Duna vízszintjét. Erre három év ádáz vita után kerülhetett sor. A Dunát 1992-ben terelték el, s a fenékküszöböt csak 1995-ben engedték megépíteni. (A fenékküszöb egy odahordott kövekből emelt ideiglenes keresztgát, melynek a tetején átfolyik a víz, de felduzzasztja, fölemeli az érintett Duna-szakasz szintjét.) Ezzel a megoldással a Szigetköznek a felső része éltető vízhez jutott.

2010 és 2015 között aztán uniós pénzekből, mindenféle felhajtás nélkül megvalósult az Alsó-Szigetköz vízpótlása is a szükséges műszaki beavatkozásokkal. A két uniós projekt közül az egyik a vízpótlórendszer további javítását, finomí-

[7] Hajósy Adrienn: *Károk a Szigetközben*. Kézirat, 1998. január 9.

tását, az árvíz levezetését szolgálja. A másik a Mosoni-Duna torkolati műtárgyának megépítése, ez már Győrnek is vizet hoz, alapvetően fellendíti a „folyók városának" vízi életét. A Mosoni-Duna műtárgyának része lesz egy hajózsilip, s két olyan kapu, melyek duzzasztani és árvizet levezetni tudnak. A főfolyó medrének szabályozhatósága még nem megoldott. A háttérben folynak tárgyalások, vannak már tervek is, de ezek mögött még nincs társadalmi konszenzus. Amíg ez a zöldek által támadott elképzelés testet ölthet, valószínűleg még sok víz lefolyik a 27 évvel ezelőtt meglopott Dunán (Vas 2019). Persze vannak, akiknek más a véleményük, állítva, hogy a megjósolt ökológiai katasztrófa nem következett be, és a vízlépcső nélkül a Szigetköz vízellátása nem lett volna biztosított – elfelejtvén, hogy már a vízlépcső előtt is egy korábbi elsőfajú hiba, a folyószabályozás következményeivel kellett szembesülni, és azokra lett volna „megoldás" a még újabb technokrata beavatkozás (Szabó 2017).

Járulékos kártékony hatásai is vannak – a világ más tájaihoz hasonlóan – egy felvízi gátnak egy nagy folyón. A paksi atomerőmű hűtése teljes egészében az úgynevezett hidegvíz-csatornán keresztül a Dunából az erőmű hűtővízrendszerére vezetett vízzel történik. Márpedig az éghajlatváltozás csak az egyik szempont, ami miatt kritikus időszakokban csökkenhet a Duna vízszintje, a másik, ha felvízi szomszédaink saját nemzetgazdasági és biztonsági érdekeikre hivatkozva lezárják az életet és hűtést adó víz útját. A mérnöki megoldás az, hogy ha a folyó vízszintje a hidegvíz-csatorna beömlési küszöbe alá esik, vészhelyzeti szivattyúkat telepítenek, és úgy fogják belepumpálni a vizet a főmeder fenekéről – amíg van. 2019 októberében már volt egy ilyen szó szerint meleg helyzet, amikor a szárazság miatt élesben kellett kipróbálni a szivattyúkat. Az atomenergia hivatal 2011-ben már megállapította, hogy az alacsony vízállásra kidolgozott intézkedési terv kívánnivalót hagy maga után (HVG 2018).

És még nem beszéltünk róla, hogy mindez hogyan fog működni abban a két kritikus esztendőben, amikor a tervek szerint Paks I és Paks II párhuzamosan üzemel, tehát megnövekszik a hűtővíz iránti igény. A szakértők még véletlenül sem mennek bele olyan kérdésekbe, hogy honnan lesz víz a paksi erőmű hűtésére, ha a Dunában akár szárazság, akár a szlovákok barátságos akciója következtében nincs. Inkább a hőcsóváról értekeznek folyton, amelynek kétségtelenül van kellemetlen hatása, és törvényi szabályozás írja elő a Duna vízhőmérsékletének maximumát, csakhogy ennek sokkal kisebb a jelentősége, még ha átmenetileg okozhat is zavart (Józsa 2018). Ám ha a reaktor megszalad, annak durva következményei vannak, ha meg leállítják, annak is. A dolog annyira szembeszökő, hogy az újságírókat is nyugtalanítja (Szabó 2020/2). Ami azt illeti, volt már példa rá, hogy a túl kevés víz miatt intézkedni kellett, pedig a második építkezés még meg sem indult, és a szlovákok még le sem zárták Bőst. A túl kevés víz miatt maga a Duna melegedett fel olyan mértékben, ami veszélyeztette az erőmű biztonságos hűtését (hvg.hu/MTI 2018). Ugyanebben az évben Mártha Imre, az MVM volt vezér-

igazgatója hívta fel az illetékes miniszter figyelmét a várható problémákra, ahol a hűtővíz kérdése elsődleges fontossággal szerepelt (Mártha 2018).

Hogy az aggodalmak mennyire nem voltak alaptalanok, és hogy mennyire hiányzik a mérnöki szemléletből az élő rendszerekkel való szembesülés, a dinamikus, élő folyamatok figyelembevétele, az nagyszerűen megmutatkozott a meg sem épült alsó elem, a Nagymarosnál tervezett gát esetében. Mint ismeretes, a magyar parlament döntése értelmében 1989-ben Magyarország felmondta a szlovák–magyar nemzetközi szerződést, és a magyar fél nem építette meg a második gátat. Addigra azonban a Dunát a Dömösi-sziklapadnál már elterelték, és a körgáttal elkerített szakaszon szárazra került a folyó ágya. A döntés után hosszú ideig nem tudtak mit kezdeni ezzel az építménnyel, végül 1995-ben fejeződtek be a rehabilitációs munkák. Ha már ott volt a munkagödör, hogy ne maradjon kihasználatlanul a rengeteg munka, egy közműalagutat vágtak bele, ami elsősorban a Dunamenti Regionális Vízműveknek jött kapóra, mert így összeköthették a bal part és jobb part vízi közműveit, és a visegrádi oldalról is elszállíthatták a szennyvizet a váci szennyvíztisztítóba. A sajátos műtárgyat azonban a mérnökök megfejelték egy még különlegesebb elképzeléssel: ha már ott volt a száraz folyóágy, építettek rá kétoldalt, az alagútból elágazással egy-egy futballpálya nagyságú drénmezőt, ahol perforált csövekkel a parti szűrésű kutakat kívánták imitálni. Az alagutat és a drénmezőt egyaránt kavicsréteggel fedték be, azt remélvén, hogy az ugyanúgy fog szűrni, mint a természetes üledék formájában a két parton található kavicsréteg.

Nem így történt. A víz minősége 30 éven keresztül nem felelt meg az előírásoknak, amelyeket egy parti szűrésű kút könnyedén teljesít. Ennek oka egyértelmű: a mesterséges kavicsréteg híján volt annak az élő és élettelen elemekből álló szűrőrétegnek, amit a biológusok bentosznak neveznek, és amelynek az ismételt kialakulásához ezek szerint legalább 30 évre van szükség, tekintve, hogy mostanában kezdett csak a szivattyúkból kikerülő víz minősége normalizálódni (Horváth Csaba és Réthy Márta, személyes közlés, 2022. május).

Akárcsak annak idején a Sárköz népe Mária Terézia mérnökeinek elképzelését, a helyiek itt sem üdvözölték örömmel a terveket: életformájukat, az őket körülölelő tájat látták veszélyben, és nem ok nélkül. A bősi vízlépcsőt övező táj ugyanis ma már alig hasonlít valamikori önmagára, az egykor jellemző ökoszisztémák eltűntek vagy jelentősen átalakultak – vizes élőhelyek száradtak ki, a folyóvizek többsége állóvízzé vált, az ártéri erdők helyén több száz hektáros üzemvíztározó tó terül el, a termőföldek felett az „Új-Duna" dombsávja fut. A művi beavatkozások következtében szakadások jöttek létre a tájban, a valamikor összefüggő, egymással kapcsolatot tartó élőhelyek egymástól elkülönültek, ami mélyreható következményekkel járt (Murányi 2019).

Átfogó, elfogulatlan és tudományos igényű elemzés azóta sem készült a félig sikerült gigantikus beruházás következményeiről, jobb híján azt idézzük fel,

hogyan élik meg azokat a helyben élők, elsősorban annak a néhány csallóközi falunak a lakói, akiket az üzemvízcsatorna elvágott a szárazföldtől, és akiknek a határát elnyelte a körtvélyesi tározó.

Megfigyelésük szerint az építkezés során aktívan kivágott, illetve azóta is pusztuló ártéri galériaerdők helyi időjárás-módosító hatása megszűnt. Míg azelőtt az uralkodó irányból érkező északnyugati szeleket megfogta az erdő, ma a tájon akadálytalanul süvölt végig. A tározótó maga is kihatással van az időjárásra, párolgása miatt az érkező esőfelhőket eltéríti, és míg a Szigetközben esik az eső, a Csallóköz beszorult falvaiban nem. Az építkezéssel számos olyan beavatkozás is járt, ami könnyen elkerülhető lett volna okosabb, az ökológiai szempontokat figyelembe vevő tervezéssel. Ilyen volt például az ott léniának nevezett fasorok kivágása, amelyek erózióvédő hatása most hiányzik. A vízpótlás sem éri el a kívánt hatást: míg a főágban korábban 2300 $m^3$ víz folyt át másodpercenként, most a Csallóközbe 20-30 $m^3$ jut. Ez a vízáramláshoz nem elég, pang, megáll a mellékágak mélyebb részein. A posványosodás elkerülésére és a halállomány szaporodásának elősegítése érdekében mesterséges árasztással próbálkoztak, ám a lobbiérdekek itt is közbeszóltak: a beüzemelés óta árvízmentesnek ígért területre az őslakosok mellé betelepült üdülők tulajdonosai nem nézték jó szemmel, hogy ingatlanaikat elöntené a víz, pedig csak 90 $m^3$ akartak átengedni. A végül létrejött felemás megoldás – akárcsak a vízlépcső esetében – a lehető legrosszabbra sikeredett. Arra elég volt, hogy a halivadék kikeljen, de arra nem, hogy életben is maradjon. Több lett a kár, mint a haszon.

A feltöltődés itt sem a jövő, hanem a jelen. Az egykor termékenységet hozó hordalékból, mely a határban szétterült a földeken, ma láthatatlan, hatalmas tömegű, veszélyt sejtető, a kezelhetőség mértékét meghaladó anyagtömeg lett (Murányi 2019). Bár nem tudományos igényű, de sokat mond az alábbi idézet: „Az az iszap már itt van. 93-ban, mikor föltöltötték a tározót, a barátommal csónakkal beevickéltünk, és a 10 méteres horgonykötelem nem érte el a feneket. 2014-ben jártam ismét arra, és leértem az evezőmmel." (Somorja, K. D.) „Bécs és Pozsony a szennyét itt rakja le." A tározóban és a felvízcsatornában leülepedett iszap hatalmas mennyisége veszélyérzetet kelt a környéken élőkben, és nem csupán a laikusok, hanem a hivatalos intézmények képviselői sem kapnak megfelelő tájékoztatást. Ellentétben azzal, amit Ausztriában gondolnak róla, nem is olyan egyszerű az iszapos üledéktől megszabadulni. A felvízcsatorna szigetelt, itt tartalma nem érintkezik a talajvízzel, viszont kitermelését nehezíti a szigetelőréteg megsértésének a veszélye. A tározótóban a szigetelés megsértésétől nem kell tartani, hiszen alulról nem szigetelt, ennek hiányában viszont az üledék kapcsolatban van a talajvízréteggel, és elszennyezi azt.

A talajvíz papírforma szerint viselkedik: a tározótó mentén feltör, alatta visszahúzódik. Különösen ez utóbbiból van sok gond. Egy 15 hektáros gyümölcsöst azért kellett kivágni, mert nem kapott vizet. A tó területén víz alá kerültek

a fák, azért pusztultak el. Az ártéri erdők sem bírják az alvízen. Egy kiegyensúlyozott, diverz gazdálkodási mód is veszendőbe ment. A galériaerdők elsődleges haszna a legeltetés volt, és csak másodlagosan vágtak ott fát. Ez nem a távoli múlt, hanem a 20. század hatvanas, hetvenes évei, bőven a szocialista szövetkezetek idején. Ma már profitorientált erdőgazdálkodás folyik, és a természetközeli diverzitás oda. A vadállomány is átszerkesztődött, az apróvadak eltűntek, helyettük megjelent a vaddisznó és a hód. A hód, bár védett állat, természetes ellenség nélkül sok kárt tud csinálni. A korábban gondozott mellékágakon már ladikkal sem lehet elmenni, bedőlt fák, ágak akadályozzák a közlekedést (Murányi 2019).

És természetesen a korábban felszínközelben lévő talajvíz méterekkel való süllyedése a falvak ivóvízellátását is veszélybe sodorta. Volt olyan hely, ahol 50-60 cm-en már felbukkant a talajvíz, most van olyan, ahol 19 métert kell ásni, mire ugyanez megtörténik. A hozama is csekély, hiszen az üzemvízcsatorna bélelt fala nem engedi át, a tó kolmatációja miatt ott is csökken a beszivárgás. Ahol pedig van víz, ott a minősége kifogásolható. A korábban áramló, megújuló és oxigénben dús víz folyamatait a pangó vagy alig mozgó és oxigénelvonó víz folyamatai váltották fel. A következmények jelentkezése évtizedekre is elnyúlhat, és az ok-okozati összefüggések nem nyilvánvalók. Például az elmúlt években, mikor a növényvédőszer-maradványok ivóvizekben való megjelenése miatt a vízlépcső szomszédságában lévő több településen az ivóvizet fogyasztásra alkalmatlannak minősítették, senkinek nem jutott eszébe, hogy ezt korábban már valaki megjósolta a vízlépcső üzembe helyezésének esetére (Boroviczeniy 1989: 11). Bezzeg a helyiek több veszélyforrást is megjelölnek, így a nagyüzemi mezőgazdasági termelést, a bezárt vegyi üzemek föld alatti hagyatékait, a Slovnaftot, a dán sertéstelepek hígtrágyáját és nem utolsósorban a vízlépcső felhalmozódott iszapját (Murányi 2019).

A bősi változások két axióma komolyan vételéből adódnak. Az egyik tétel szerint a természet manipulálható és szabadon felhasználható nyersanyagforrás, a másik a mesterséges, technológiai megoldásokba vetett bizalom, és a remény, hogy a felmerülő problémák újabb technológiai megoldásokkal orvosolhatók. A problémákra adott technológiai válaszok többnyire költséges és ideiglenes megoldások, és csak részproblémákat kezelnek. Az egész rendszer voltaképpeni észszerűtlen volta nem nyilvánvaló, még gazdasági oldalról sem, mivel a tájnak nem egy, hanem sok gazdája és kezelője van (persze legkevésbé a helyben élők azok) (Murányi 2019).

Jó hír, hogy ha későn is és csak egyes elmékben, de megfogalmazódott a kétely, hogy a beruházás talán mégsem volt annyira jó ötlet, és hogy az akkori döntés során a szakma nem hallgatott a társadalomra, a politika meg cinikusan játszotta ki egymás ellen a szereplőket – nálunk ilyen, Szlovákiában olyan eredménnyel (Szöllősi Nagy 2019).

## 5.4. VÍZÁTVEZETÉSEK

A felszíni vizekkel való egyre valószerűtlenebb és nyakatekertebb manipulációknak igen fontos politikai és ideológiai okai vannak. A szerencsére azóta sem megvalósult szovjet folyóeltérítési terveknél látszik ez a legjobban.

Az elsőfajú hiba természetesen itt is kényszerítő erővel érvényesült. Az ötlet eleve azért vetődött fel, mert Közép-Ázsiában a tervgazdálkodás éveiben olyan mértékű mesterséges, a vidék ökológiai adottságait teljesen figyelmen kívül hagyó ipari-mezőgazdasági tevékenységet, elsősorban gyapottermesztést folytattak, amelyhez teljes mértékben elhasználták a Szir-Darja és Amu-Darja folyók vizét. A Kelet-európai-síkságon pedig a gabonatermelés következtében vált vízhiányossá a termőföld. Ennek eredményeként az Aral-tó és a Kaszpi-tenger vize egyaránt katasztrofális mértékben csökkent, aminek a pótlására találták ki az eltérítést. Lényege, hogy az ország vízfelesleggel rendelkező európai és nyugat-szibériai részeiből a mesterségesen aszályossá tett közép-ázsiai köztársaságok, elsősorban az Azovi-tenger, a Kaszpi-tenger és az Aral-tó vidékére „térítsék el" a jelenleg a Jeges-tengerbe ömlő európai Onyega folyó és Onyega-tó, a Pecsora folyó és más folyók, illetve a szibériai Ob és Irtisz vizét.

Az összetett és részleteiben egészen soha ki nem dolgozott elképzelés a Föld legnagyobb ilyen jellegű beruházása lett volna, nem is annyira a megmozgatott víztömeg, inkább a távolság és a kontinentális vízgyűjtők semmibevétele miatt: a Jeges-tenger vízgyűjtőjéből a belső-ázsiai lefolyástalan vidékekre térítették volna el a vizeket. A szibériai főcsatorna az Urállal párhuzamosan, 2200 km hosszan deportálta volna a folyókat Ázsiába. Ha megvalósul, egy ilyen nagymértékű beavatkozás a kontinens vízháztartásába akár az egész északi félteke éghajlati és vízrajzi viszonyait megváltoztathatta volna, míg az ázsiai részeken csak hatalmas veszteségekkel lett volna eljuttatható rendeltetési helyére, tovább növelve a szikesedést (Micklin 1984). Szerencsére a Szovjetunió összeomlása *ad acta* tette ezeket az elképzeléseket, de a veszély, mint egy gorgó vagy hidra, mindig felüti egy újabb fejét. Bár némileg szerényebb formában, de a kétezres évek elején megint felmelegítették, éppoly irracionális technikai-műszaki megoldásokra alapozva, mint annak idején. Akkor a szovjet időkben elgyapotosított Üzbegisztán vízgondjainak enyhítésére akarták az Ob vizének 6%-át átvezetni Közép-Ázsiába. Nyikolaj Griscsenko, a szovjet vízügy egykori hatalmassága, aki annak idején a tervet kitalálta, üdvözölte az elképzelést. Szerencsére azonban az anyagiak megint közbeszóltak, hiszen az építkezés csillagászati összegekbe került volna, ráadásul az oroszok saját közvéleményüktől félve nem valószínű, hogy beleegyeznének a megvalósításba (Insarova 2002).

A legfrissebb felmérések szerint eddig a világ folyóinak több mint felét vetették alá valamilyen vízügyi beavatkozásnak, aminek eredménye a vízjárás szabályozása és a szabadon folyó felszíni vízfolyás felszabdalása. Az ettől leginkább mentes terü-

letek Ausztrália, Új-Zéland, Új-Guinea és az északi tajgaövben található folyók vízgyűjtői, míg a legsűrűbben becsatornázott kontinens kétségtelenül Európa. Az édesvízi körforgás mintegy 15%-át érintő gátak és tározók olyan mértékű változásokat jelentenek a tájban, hogy az ember által szándékosan okozott természetátalakítás legjelentősebb példái közé kell sorolnunk (Nilsson et al. 2005).

A Világbank korábban már idézett Dams and Development című jelentése, amelyet a World Commission on Dams (WCD) nevű bizottság hozott nyilvánosságra 2000. november 16-án (WCD 2000, www.dams.org), gyakorlatilag mindenben igazolja Hildyard és Goldsmith 17 évvel korábbi megállapításait. A bizottság, amelynek tagjai között egy nagy gépészeti vállalat vezérigazgatója éppúgy helyet foglalt, mint a gátépítést ellenző társadalmi szervezetek képviselője, sommásan kijelentette, hogy elhibázott kísérletről van szó. Még saját mérőszámaikkal nézve is kudarc, hiszen nem termelnek annyi áramot és vizet, nem védenek annyira az árvizektől, mint támogatóik állítják, viszont notóriusan túlköltekeznek, és nem tartják be a határidőket. Ezek ürügyén 80 millió embert fosztottak meg az otthonától, a gátépítés előnyeit a városi gazdagok és nem a vidéki szegények élvezik, ökológiai hatásaik pedig katasztrofálisak (Pottinger 2001). Ennyitől úgy gondolnánk, hogy a gátépítésnek befellegzett.

Úgy tűnik azonban, hogy a megalomániás vízügyi tervek kora mégsem áldozott le. A vízgazdálkodási szakemberek egyrészt a megszokás és egyoldalú képzettségük, másrészt a gazdasági, populációdinamikai és ökológiai érdekek harapófogójában nem tudnak jobbat kitalálni, mint hatalmas „átrendezéseket", igyekeznek a vízhiányos területeket olyan vidékekről feltölteni, ahol még van víz. Amerikában „vízibivalynak" nevezik a hagyományos, nagyberuházásban gondolkodó és a vizet mindig mindenütt végtelen mennyiségben rendelkezésre állónak vélő vízépítő mérnöki iskola híveit, akik az ökológiát csak mint nagyravágyó terveik gátló tényezőjét tartják számon (Babbitt 1991).

Észak-Spanyolországban is van egy tervezett vízügyi beruházás, amely 1050 köbhektométer vizet szándékozik 863 gát, tározó és egyéb létesítmény segítségével a katalán Ebro-folyóból a szomjas mediterrán tengerpartra juttatni. Spanyolország Európa legnagyobb vízfogyasztója, aminek több – reparálható – oka is van: a víz 80%-a a mezőgazdaságban fogy el, ezzel öntözik a narancsokat, melyekből az „egészséges" rostos ivólevek készülnek. Egyetlen liter 100%-os narancslére 220 liter öntözővíz jut. 45 millió turistát is el kell látni évente, és végül a víz 40-60%-a pocsékba megy, nem éri el célját a rossz hatásfokú rendszereken (Norris 2002). Lenne még mit tenni tehát a nagyberuházások előtt, de a mérnökök, közgazdászok és egyéb szakmák képviselői meg az ökológusok, biológusok és környezetvédők elbeszélnek egymás mellett, nem is értik, amit a másik mond. A projektet akkor elvetették, de tíz évvel később megint feleleventették (Fabregat 2012). Azóta megint nem hallani róla.

Néhol azonban minden tiltakozás ellenére megvalósultak az aggasztó tervek. Ilyen, méreteiben sokkal nagyobb, de szellemében azonos az indiai Narmada-projekt csatornája Radzsasztánba, illetve a kínai Három Szurdok-gát.

A Narmada-folyó vizét a 2017-ben megnyitott Sardar Sarovar gáttól egy szintben vezetett csatorna viszi el a szomszéd államba. A világ jelenleg legnagyobb, öntözésre használt csatornája 458 km hosszú, és a Gudzsarat-Radzsasztáni határig tart. Vízfolyásokon, utakon, vasutakon halad keresztül, mire eléri célját. A főcsatornát betonnal szigetelték, hogy a folyóvíz sebessége nagyobb legyen, a szivárgás kisebb, és a víz ne pangjon benne. A párolgási veszteségeket igyekeznek fák ültetésével kompenzálni (Sardar Sarovar 2020).

Nagyravágyó terv Magyarországon is van: a Duna vizének átvezetése az aszályos Duna–Tisza közére (Starosolszky 1994). Ez azért jutott az illetékesek eszébe, mert elsivatagosodik a Homokhátság, százezrek költöznek el a Duna–Tisza közéből. Nagy szükség lenne vízre, amiből egyre kevesebb van. A leghangosabban támogatott megoldás mindjárt háromszáz éves: csatorna kösse össze a Dunát a Tiszával (Zádori 2011). Míg régebben a hajózás és az öntözés lehetősége volt a fontosabb az álmodozóknak, most a vízi közlekedés és a szántóföldi mezőgazdaság leértékelődése miatt az „ökológiai nyereség", az elsivatagosodás visszafordítása lett a vezéreszme. Csakhogy az ökológiai szakma erősen kritikus a tervekkel szemben, mondván, a csatorna éppenséggel vizet vesz el a talajtól, ami gyorsíthatja a szikesedést. Csatári Bálint földrajztudós szerint a megújuláshoz „a vízpótlás és a vízvisszatartás csak egy szükséges kezdő lépés lehet. Sikeres is csak akkor, ha nem csak vizet pótol és tart vissza, hanem egy tudatos tájrehabilitációt indít el" (Zádori 2011). A témát ennek ellenére időről időre felelevenítik, nem nagyon véve tudomást az olyan tényekről, mint az éghajlatváltozás (Fejér 2018).

Mindenre létezik műszaki megoldás, amely újabb műszaki megoldás magvát hordozza magában. A tározókkal tarkított folyóba ömlő szennyvizeket tisztítani kell a kiesett öntisztulás pótlására, a töltések mentén érkező patakokat át kell emelni, hogy rendeltetési helyükre, a folyóba jussanak, a kiszáradt területek vízpótlásáról is lehet valamilyen formában gondoskodni, az elszennyezett ivóvízbázisokat pedig lehet tisztítani. Az ivóvízszükségletet lehet mélyebbről, a rétegvizekből kielégíteni. Mindezt meddig? A folyókba egyre több szennyvíz kerül, a talajvizek tisztítása heroikus feladat, a rétegvizek megújulása több ezer évet vesz igénybe. Ha a stabil vízkészletből veszünk el, soha többet nem pótlódik. Az egyszer elpusztított életformákat ismét visszahozni nem lehet. A folyók megfojtásának folyamata visszafordíthatatlan, káros és hosszú távon létfeltételeinket fenyegető beavatkozás. Megállítani addig kell, amíg nem késő.

Az öröklött nehézségeket ma már elég nehéz visszafordítani, hiszen mindegyik az elsőfajú hiba hálójában vergődik, ezért nincs igazán megoldás a teljes átalakítás és szemléletváltás nélkül. Egy ilyen szemléletváltás azonban több leküzdhetetlennek látszó akadályba ütközik. Először is társadalmi ellenállás van minden

olyan megoldással szemben, ami nem hoz gazdasági hasznot. Ez része azoknak a tudati gátaknak, amelyek egyéni és közösségi szinten kialakultak: az emberek az árvizet nem tudják elkülöníteni az áradástól, elvárják, hogy „megvédjék őket", a mérnökök pedig ki akarják elégíteni „a társadalom szükségleteit". Sok esetben a tudomány sem áll még olyan szinten, hogy mindenre megnyugtató választ adó megoldással álljon elő. Ezért, miután egyelőre ilyen szemléletváltásra remény nincsen, még ma is a folyóelterelések tervei, átvezetések, jobbra-balra variálgatások vannak napirenden a radikálisan megváltoztatásra szoruló vízügypolitika reformja helyett.

## 5.5. TAVAK

Ha azt akarnám, hogy a könyvnek ez a fejezete teljes legyen, hasonlóan részletes képet kellene adnom a felszíni állóvizek, a tavak fejlődéséről, dinamikájáról és állapotáról is. Összefoglalóan annyit jegyeznék meg, hogy az alapvető elvek, az emberi civilizáció és a természeti környezet kapcsolatának törvényszerűségei erre a vízformára is érvényesek. Példaként álljon itt egy előrejelzés, mely kedvenc tavunkra, a Balatonra vonatkozik. A szerző azt vizsgálta, milyen következményekkel járhat a már most is kényes vízegyensúllyal rendelkező tó vízháztartására a globális éghajlatváltozás. Azt találták, hogy már egy Celsius-fokos átlaghőmérséklet-emelkedést is a párolgási veszteség markáns megnövekedése kíséri, amelyhez a várhatóan csökkenő csapadékbevétel miatt mind a tóra hulló, mind a felszíni lefolyással érkező víz mennyisége is csökken, mindezek következtében kevesebb vizet lehet majd belőle leereszteni, ezért még hosszabb időbe telik majd vizének kicserélődése ennek minden ökológiai és vízminőségi következményével együtt (Antal 2003). Egy másik példában arról értesülhetünk, hogy a világ legnagyobb felszíni állóvízrendszere, az észak-amerikai Nagy-tavak lassan, de egyre biztosabban csökkenő vízkészlettel rendelkezik (Mitchell 2002). Bár eléggé nagymértékű fluktuációk voltak eddig is, ezúttal a jelenséget súlyosbítja a melegedő átlaghőmérséklet, a megszokott jégtakaró csökkenése és a növekvő párolgási veszteség is.

## 5.6. ÖNTÖZÉS ÉS SZIKESEDÉS

A szikesedés a félszáraz és száraz éghajlatú területeken a talajokban lejátszódó sókiválás. Ez tulajdonképpen természetes folyamat, amelynek lényege, hogy a csapadékösszeget meghaladó mértékű párolgás eredményeként a talaj felszíni rétegeiben a talajnedvességben oldott sók betöményednek, majd miután a víz

elpárolog, szilárd formában kiválnak. Csak nagyon kevés, kifejezetten sótűrő növény képes megélni az ilyen talajon. Persze fontosak az oldott só mennyisége, minősége és az adott környezet hidrogeológiai viszonyai is. A szilárd formában kiváló nátriumsók neve a magyarban *szik*. A sótartalom növekedése alapvetően két irányból következhet be: a felszínre érkező felszíni vizekből vagy a talajvízből.

A szikesedés akkor válik komoly gondok forrásává, amikor emberi beavatkozás hatására olyan területek szikesednek el, amelyeket mezőgazdasági termelésbe vontak, és éppen a szárazság elleni védekezésként öntözéssel művelnek. Ilyenkor az öntözéshez használt víz összetételétől függően olyan káros folyamatok következhetnek be, amelyek egész országrészeken teszik lehetetlenné a további művelést. Az úgynevezett tranzitfolyók nedvesebb éghajlatú terület felől érkeznek csapadékhiányos területre, ahol vizüket gyakran öntözésre használják. Ha nagy sótartalmú vizet szállító folyót térítenek el öntözés céljaira, nyilván a veszély is sokkal nagyobb lesz. Nem köztudott, hogy ma az egyik legszebb természeti értékünknek tartott rövid füvű, szikes pusztánk, a Hortobágy szintén emberi beavatkozásnak köszönheti létét, hiszen a történelmi időkben itt mocsaras, lápos területek voltak, amelyeket évente kétszer rendszeresen megjárt a víz, és a 19. században végrehajtott folyószabályozásoknak köszönhető, hogy mai képük kialakult. Szerencsés eset, hogy a legeltetéssel ki lehetett alakítani rajta egy nem csupán hasznos, de szép és esztétikus kultúrtájat, viszont soha nem szabad elfeledkeznünk róla, hogy ez a „természeti érték" ízig-vérig emberi csinálmány (Láng 2002).

A talajvíz oldott ionjainak mennyisége és minősége akkor válik érdekessé, ha a talajvíztükör emelkedésével a kapilláris zóna eléri a feltalajt. A rendszeres öntözés és az állandó vizű csatornahálózat, amely szerte a világban oly sok helyen biztosítja az öntözővizet a mezőgazdasági kultúrák számára, akár több méterrel is megemelheti a talajvíz természetes szintjét. Ekkor a talajvíz állandóan a párolgási zóna közelében van, a benne oldott sók a párolgás következtében betöményednek, majd kicsapódnak, és ember okozta, úgynevezett másodlagos szikesedést hoznak létre, akárcsak a felülről való, nagy sótartalmú vízzel való öntözés. Miután e célra majdnem mindig talajvizet (sőt újabban rétegvizet) vagy folyóvizet használnak fel, a nagy sótartalom adott. Egyetlen megoldás van, ha a víz közvetlenül a csapadék összegyűjtéséből származik, ilyen a mediterrán vidékeken elterjedt ciszternák vize (Kerényi 1995). Ha a szikesedés bekövetkezett, nagyon nehéz bármit is kezdeni vele. A növények nem szeretik a sót: gyökérszőreiken keresztül majdnem teljesen tiszta vizet vesznek csak fel, a sót otthagyják. Ilyenkor a gazdag országok azt a megoldást alkalmazzák, hogy még több vízzel mintegy kimossák a gyökerek között betöményedett vizet, ami viszont azzal a veszéllyel jár, hogy tovább emelkedik a talajvíz szintje (Grosvenor et al. 1993). Elméletileg léteznek műszaki megoldások, amelyek természetesen elsőfajú hibával terheltek, ám a gyakorlatban a talajmeliorációnak nevezett

durva beavatkozások (alagcsövezés stb.) olyan mértéktelenül drágák, hogy módjával lehet csak alkalmazni őket.

Az emberi történelem során sokszor a szikesedés okozta a letelepedett kultúrák súlyos megrázkódtatásait, akár vesztét is. Nem árt viszont megjegyezni, hogy Mezopotámiában a sumer birodalom kialakulását megelőzően is folyt öntözéses földművelés a birodalmi módszerek kiváltotta ökológiai következmények nélkül, mint ahogyan a közelmúltig hasonlóan sikeres öntözéses gazdálkodást folytatott Dél-Irakban egy kis nép, az el-shabana. A módszer lényege, amellyel a szikesedés veszélyét elkerülték, nagyon egyszerű: az aratást követően parlagon hagyták a tarlót, amelyet felvert egy-két vadon élő növény, köztük pillangósok is. Az öntözés elmaradása a talajvíztükör süllyedéséhez vezetett, amely így kikerült a párolgási zónából, ugyanakkor a gyomnövények mélyre hatoló gyökerükkel képesek voltak evapotranspiráció útján tovább csökkenteni a vízszintet, miközben maguk vidáman megéltek, és ráadásul nitrogénmegkötő képességükkel mintegy trágyázták a talajt. Azonban a természeti viszonyok olyanok arrafelé, hogy még ezen a módon is egy idő után kimerítették a talaj megújuló képességét, és kénytelenek voltak akár egy évszázadra is elhagyni az adott földet. Ez a hagyományos, nem birodalmi kultúráknál valóban így is történt (Gibson 1974). A problémát az jelenti, ha a népesedési nyomásnak, a társadalmi elitnek és a kialakuló városi népességnek az igényeit kell kiszolgálni, és nem a helybéliek dönthetik el, mikor pihentetnek egy területet és mikor nem. Úgy tűnik, a szervezett civilizációk kialakulásával olyan ördögi körbe léptünk, amely immár fogva tart minket, és amelynek a szikesedés az egyik legfőbb problémája. Lehet, hogy a mezopotámiai kultúrák is ennek estek áldozatul (Adams 1974).

Mezopotámiát sem lehet azonban egyetlen egységként kezelni. Az északi, meredekebb részeken a szikesedésnek jóval kisebb szerepe volt a gazdálkodásban, mint a déli, mocsarasabb területeken. A természetföldrajzi viszonyok ráadásul sokat változtak az idők és a különféle birodalmak során, amelyek egymást váltották a két folyó közén. A régészek egészen a 20. század végéig azon a véleményen voltak, hogy a mezopotámiai civilizációk a mocsarak kiszárításán, államilag igazgatott öntözőrendszereken és szántásos mezőgazdaságon alapultak. Pedig idővel az öntözéses gazdálkodás irányítási rendszere is sokat változott. Az i. e. 5000 és 4000 között létezett korai Ubaid-kultúrától az i. e. 539-ig fennálló Új-Babilónia korszakáig sokszor módosult az állam szerepe és irányításának szigora (Rost 2017).

A sumer birodalom városait például nem lehet kizárólagosan a mai sivatagosodó, öntözött viszonyokból megérteni. Sokkal inkább a kiterjedt deltavidékbe ágyazott, szigetszerű települések voltak, vízi útjaik nem annyira öntözésre, inkább szállításra szolgáltak, és bonyolult szerkezetben a kor viszonyainak megfelelően üzemeltek (Pournelle 2013). Úgy is fogalmazhatunk, hogy Mezopotámiában a korai kultúrák mesterséges ökológiai fülkéket alakítottak ki, melyek

kisebb léptékben ugyan, de túlélték az évezredeket, és a mai napig megtalálhatók egyes helyeken (Wilkinson et al. 2015). A gondot inkább az okozta, hogy a történelmi időkben a Perzsa-öbölben a víz szintje csökkenni kezdett, és a városlakóknak nem sok választásuk maradt: lejjebb költöztek, ahol még maradt mocsár, vagy áttértek az intenzív öntözésre, ami már valóban szikesedéssel fenyegetett a visszahúzódó vizek okozta szárazabb viszonyok miatt. A harmadik lehetőség az elvándorlás volt (Pournelle 2013) (lásd a 15. színes ábrát).

A történelem azonban önmagát ismétli. A mai Irak területére eső deltavidéken is a mohó szemlélet uralkodott, ezért mintegy 20 000 $km^2$-nyi nedves területet csapoltak le néhány évnyi mezőgazdasági haszon reményében, holott ugyanitt korábban évszázadokon keresztül félmillió ember tudott megélni fenntartható módon (Garstecki és Amr 2011). Csakhogy az öntözésnek természeti és társadalmi korlátai egyaránt vannak. A 20. század második felének torz pénzügyi-gazdasági mutatói miatt minden öntözési beruházás többszörösébe kerül, mint annak idején, és hiába hajtja még a megszokás a technokrata lobbikat, a Világbank és társai egyre kevésbé hajlandók hiteleket adni. A természeti okok között a szikesedés szerepel elsődlegesen, amelyre végleges megoldást még ma sem tud senki. Egyes becslések szerint a világ összes öntözött területének több mint 10%-a már ma is szikesedik, és a helyzet az idő előrehaladtával egyre romlik.

Az öntözésre is vannak alternatív megoldások, hogy csak a perzsák által kikísérletezett vízáteresztő agyagkorsókat említsük. Ezeket vízzel megtöltve ássák be a növények mellé, és az agyagfalon keresztül mindig annyi víz szivárog át, amennyi a szántóföldi vagy természetes kapacitásnak megfelel. Bár a módszer meglehetősen munkaigényes, gyakorlatilag kiküszöböli az összes problémát, ami az öntözéssel jár, az elszivárgás okozta veszteséget, a talajvízszint emelkedését, a szállítási veszteséget és így tovább (Pazwash 1983).

Számos egyéb módszer is létezik, amelyeket hagyományosan alkalmaztak, illetve újonnan fejlesztettek ki. Az amerikai középnyugaton régebben elég sokan foglalkoztak úgynevezett szárazműveléssel, ami az öntözéses gazdálkodás ellenpárja, bár egyáltalán nem száraz, csak a rendelkezésre álló csapadékot kívánja a termények, a vetési és betakarítási idők megválasztásával és agrotechnikai módszerekkel okosabban és fenntarthatóbban kiaknázni. Ehhez persze az kell, hogy a gazdálkodók ne legyenek olyan gazdasági prés alatt, ami lehetetlenné teszi a választást.

Az öntözési technikák is változnak. Sokszor elegendő egy olyan egyszerű változtatás, mint amilyet a hagyományos gravitációs öntözésnél vetettek be Texasban. A gravitációs öntözés a legelterjedtebb öntözési mód, lényege, hogy párhuzamosan futó barázdákban szivárogtatott vízzel igyekeznek átitatni a termőföldet. Menet közben rengeteg elvész a talajba szívódva és a párolgás következtében. Ezért kitalálták, hogy a folyamatos szivárogtatás helyett időszakos

„hullámokban", lökésszerűen adagolják a vizet, ami által a második adagban kapott víz az első adag tömítő hatása miatt gyorsabban „végiggurul" a barázdán, és ezért messzebbre eljut, nem kell többletvizet felhasználni a perkolációs veszteség pótlására (Postel 1992). Izrael a világon úttörő szerepet játszik a vízgazdálkodás új szemléletének elterjesztésében, mert rá van kényszerítve. A csepegtető öntözésnek nevezett módszert számítógépes vezérléssel és elektronikus érzékelőkkel kombinálva elérték, hogy az öntözésre használt víz 95%-a közvetlenül a gyökérzónába jut (Gabbay 1994: 22). A módszernek nem kis hátránya a csillagászati költség, ami a rendszer telepítésével jár. Amerikában kifejlesztettek egy olyan módszert, amely kevesebb energia és víz felhasználásával, a nagy nyomású sprinklereknél jóval gazdaságosabban juttatja el a növényekhez az életet adó vizet. Az LEPA (low energy precision application) kis nyomáson nagy cseppeket állít elő, amelyek így kevésbé vannak kitéve a párolgásnak, ezért nagy részük eljut a növényekig. Ha 5 centi mélyre sikerült beszívódniuk, onnan már nem csalogatja elő őket a napsugár (Zwingle 1993).

Magyarországon az 1960-as években volt nagy keletje az öntözésnek. Részben ennek köszönhető a tiszalöki, majd a kiskörei tározó megépítése is. Öntözéses gazdálkodásra és célzott beavatkozásokra ugyanis elsősorban a természetes csapadékkal valóban mostohán ellátott Tisza-völgyben van elsődlegesen szükség. Ahelyett azonban, hogy kiengednék a tavaszi nagy vizeket, hogy természetes módon töltsék fel a víztárolókat, a már szabályozott folyót gátolnák el a mérnökök még egy helyen, Csongrádnál. Az éghajlatváltozás ebben a szemléletmódban úgy jelenik meg, hogy például megtartó öntözéssel szeretnék a Mezőség szél kavarta porát megkötni, a mesterséges csatornákból a víz elszivárgását betonozott mederrel megelőzni, és az öntözés mennyiségét növelni a várható csapadékhiány kivédésére. Ám hogy honnan lesz víz az öntözésre, ha valóban elér minket az éghajlatváltozás, amikor a folyók hozama sem lesz elég, és a talajvíz után a rétegvizek megcsapolása is visszafordíthatatlanná válik, az nem jelenik meg ebben a gondolkodásban (Ligetvári 2016).

# 6. AKKOR HÁT HOGYAN? ALTERNATÍV VÍZGAZDÁLKODÁSI MEGOLDÁSOK

Mintha tanulnánk valamit a múlt hibáiból. De azért nem sokat. Ha ma akarunk alternatívát felállítani, akkor először el kell gondolkodnunk azon, hogy milyen rendszert is szeretnénk. Az alternatív vízfelhasználás megközelítésének három aranyszabálya van:

Minél kevesebbet használjunk!
Minél kevésbé szennyezzük el!
Minél többet forgassunk vissza!

A modern világban a hagyományos rendszerek már nem alkalmazhatók, vagy legalábbis nem változtatás nélkül. Ugyanakkor nem árt leszűrni a tanulságot, hogy igenis léteztek vagy léteznek olyan megoldások, amelyek nem állnak ellentmondásban a természeti rendszerekkel.

Addig azonban nem várt meglepetésekkel kell szembesülnünk. Azt hinnénk, a kevesebb víz felhasználása mindenkinek jó. Ám a műszaki rendszereink itt is hátulról támadnak. Meg kell tanulnunk, hogy a háztartáshoz szükséges víz mennyiségének csökkentése és a vízellátás, valamint a szennyvízkezelés egymástól függő, integrált megközelítése egymásnak kiegészítői, külön-külön egyik sem működik. Ha például kivesszük a rendszerből a székletet, és alternatív megoldásokkal komposztáljuk, vagy átállunk olyan ruházati cikkek viselésére, amiket hosszan tartó viselésre kísérleteztek ki, tehát nem kell mosni (Világi 2019), akkor rugalmatlansága miatt az egész műszaki rendszer felborul: a csatornarendszer nem arra van tervezve, hogy szárazon álljon, mert akkor eldugul, a bűzelzáró nem zár, zsírdugók alakulnak ki stb. Kisebb léptékben a mosogatógép is elromlik, beragad, ha hosszabb ideig – akár csak néhány napig – nem használják.

## 6.1. FENNTARTHATÓ VÍZGAZDÁLKODÁS AZ ELSŐFAJÚ HIBA FÉNYÉBEN

A korábbi fejezetekben láttuk, milyen kényszerítő erők okozzák az elsőfajú hiba kialakulását. Felmerülhet a kérdés, hogyan lehet ezeket a társadalmi rendszerek intelligens tervezésével megoldani ahelyett, hogy a természeti folyamatokat akarnánk mindenáron megerőszakolni. Fenntartható tervezéssel elviekben el lehet kerülni a műszaki rendszerek gondjait, amennyiben betartunk bizonyos tervezési alapelveket és szabályokat: a tervezők és kivitelezők egyaránt tartózkodnak az ökológiai rendszerek túlterhelésétől, a túlméretezett szerkezetektől és műtárgyaktól, az erőforrások pocsékolásától, valamint ciklikus tervezéssel, folyamatos visszajelzésekkel és megújítható erőforrások alkalmazásával igyekeznek elkerülni az elsőfajú hibát. Így egy megfelelő méretű és kellő időléptékű, rugalmas és alkalmazkodó rendszer hozható létre, amely társadalmi és kibernetikus szabályozás alatt áll.

A biorégiók legkönnyebben meghatározható határaira, a vízgyűjtőkre alapozott és bioregionalizmusnak nevezett irányzat (Sale 1991) az ilyen tervezési koncepciók egyike. Feje tetejére állítja a dolgot, és ahelyett hogy a társadalmi és emberi igényeket (és haszontalan, költséges dőreségeket) változtathatatlan adottságnak venné, ökológiailag egészséges emberi rendszereket alakít ki, ahol a helyben elérhető források adják a fejlesztések alapelveit, és ehhez szabják az emberi jelenlét mértékét. Az ENSZ is felismerte, hogy a vízellátás gondjait természetközeli megoldásokkal lehet csak enyhíteni. Közben adottnak vélik, hogy „a világ vízigénye a következő évtizedekben jelentős mértékben fog nőni". Megoldásaik lényegében a növényzet, a talajok és/vagy a nedves területek (ahová elegánsan besorolják a folyókat és tavakat is), akár városi környezetben is történő kezeléséről szólnak. Ettől átfogó változásokra kevés a remény. A rendszerszintű hibák kiküszöböléséről, infrastruktúráról vagy a vízfelhasználás csökkentéséről, differenciálásáról például egy szó sem esik (WWAP 2018).

Pedig vannak olyan tervezési rendszerek, amelyek tudják kezelni ezt a kérdést is. A permakultúrának nevezett megoldást eredetileg mezőgazdasági ökoszisztémák kialakítására alkalmazták, de már akkor is fontos szerepet játszott benne a kibernetikus szabályozást jelentő negatív visszacsatolási hurkok beiktatása úgy, ahogyan azt a természet is teszi az ökoszisztémák esetében. Az egészséges fejlődést a pozitív és negatív visszacsatolások gondosan kialakított egyensúlya teremti meg. A tervezés négy dimenzióban történik, tehát az időt is figyelembe veszik, és nagy hangsúlyt fektetnek az adott terület vízháztartásának egyensúlyban tartására az antropogén beavatkozások során (Mollison 1990). Így elméletileg valóban lehet ember alkotta fenntartható rendszereket teremteni, amelyek összhangban állnak a természeti rendszerek negatív visszacsatolásainak hurkaival (41. ábra).

A folyók ökológiájával foglalkozó szakemberek az alábbiak szerint különböz-

tetik meg a holisztikus, teljes értékű folyógazdálkodáshoz szükséges koncepció alkotóelemeit: a folyó menti rendszereket egy több dimenzióra kiterjedő és nagymértékben dinamikus tájnak kell tekinteni, ahol igen összetett kapcsolatok és heterogén élőhelyegyüttesek találhatók, és ahol a zavarások döntő szerepet játszanak a rendkívüli biológiai sokféleséggel rendelkező rendszer mozaikos állapotának eltolódásában (Jungwirth et al. 2009). Ráadásul mindenképpen szükség van arra is, hogy lehetőséget teremtsünk a folyó számára a szabad mozgáshoz. Az ilyen oldalirányú elmozdulások kívánatos térmértéke eltérő lehet alaktani, víztani, vízföldtani és ökológiai szempontból, de semmiképpen nem írható felül és nem erőszakolható meg antropogén területi igényekkel, ha hosszú távú fenntarthatóságot és alkalmazkodóképességet szeretnénk a természeti-emberi vegyes rendszer számára biztosítani (Hauer et al. 2009, Borsos és Sendzimir 2013).




41. ábra. *A fenntartható vízgazdálkodás feltételei*

Persze ahhoz, hogy a felsorolt tervezési elveket következetesen alkalmazni lehessen, egészen más emberi hozzáállásra van szükség. Ahelyett, hogy azt hinnénk, amit meg lehet csinálni, azt meg is kell, a társadalom minden tagjának be kell látnia, hogy műszaki és gazdasági önkorlátozás, a termelés és fogyasztás önkéntes visszafogása nélkül nem érhető el eredmény (Endreffy 1989). Vagyis teljesen szembe kell menni az uralkodó közgazdasági dogmákkal. A népesség folyamatos növekedésének is valahogyan gátat kell szabni, ami persze kényes kérdés. De semmiképpen nem ökodiktatúra, hanem ökológiai szükségszerűség és józan belátás kell elérje ezt a célt. Az ökológiai tervezésnek a mélyen gyökerező technológiai fundamentalizmus okozta nehézségeit David Orr tárgyalja

részletesen (2002). A szerecsenmosdatás (greenwash) nemhogy nem elég, de kifejezetten káros, mert eltereli a figyelmet a lényegről. Márpedig gyökeres szemléletváltás nélkül egészen biztosan a vesztünkbe rohanunk.

Egy másik gond alapvetően a manipulálni szándékozott rendszer jellemzőitől függ. Közkeletű tévedés szerint a vízerőművek megújuló energiaforrást hasznosítanak. Lehet, hogy a felszíni vízfolyások vize megújul – kivéve, ha valahol a körforgás megszakad, mint korábban tárgyaltam –, de a víz potenciális energiájának kiaknázására létrehozott hatalmas műtárgyak biztosan nem. A gátak visszafordíthatatlan változásokat okoznak a folyók ökológiai rendszereiben, különösen, ha lebontásuk nincs megnyugtató módon megoldva. Vízerőművekben a bizonyos magasságban elhelyezkedő víz helyzeti energiáját használjuk ki. Ám a víz energiasűrűsége elég alacsony, ezért hatalmas tömegeket és térfogatokat kell megmozgatni a legtöbb esetben súlyosan káros hatásokat kiváltva a rendszer egészére nézve. E hatalmas mennyiségek mozgatása rendszerint mélyreható változásokat okoz a folyó eredeti állapotában, nem is beszélve az ilyen változások létrehozásához szükséges fosszilis energia fogyasztásáról (Ferencz 1989).

Ilyen és ehhez hasonló megfontolások, valamint a tarthatatlanná vált és a konvencionális módszerekkel meg nem oldható helyzet vezetett oda a 20. század végén és századunk első két évtizedében, hogy elkezdtünk gondolkodni, hogyan lehetne legalább részlegesen visszacsinálni a szárazföldi vízrendszer ellen elkövetett merényleteket. Ezek egyik megkésett, gyenge és kétséges eredménnyel kecsegtető módját nevezzük folyórehabilitációnak, illetve -helyreállításnak.

## 6.2. REHABILITÁCIÓ

### 6.2.1. Jelen állapot

A Duna mentén évszázadokon át ártéri gazdálkodást folytató nép a Sárköz vidékén annak idején aggodalmának adott hangot a folyó szabályozása miatt (Andrásfalvy 1975). Kétszáz évvel később ismét rá kellett jöjjünk: az ártér arra való, hogy az árvíz kockázatát csökkentse, nem pedig, hogy „mentesítsék" attól (Blackwell és Maltby 2006). Az ártérnek összeköttetésben kell állnia a folyóval, ha nem akarunk magunknak egyre nagyobb bajt (Buijse et al. 2002). Hogy mi a baj az eddig alkalmazott technokrata szemlélettel? A műszaki megoldások alapvetően három elsőfajú hiba köré gyűjthetők össze, amelyek mind újabb beavatkozások igényét váltották ki: a mederátvágások, a töltésezések és a gátépítések (Swart 2006b).

Ehhez járul hozzá, hogy az árvizek veszélyessége, előfordulásuk gyakorisága és pusztító hatásuk egyéb tényezők miatt is növekszik, amilyen például az éghajlat-

változás miatt egyenetlenebbé vált csapadékképződés, a földhasználati változások és a társadalmi-gazdasági folyamatok, amelyek egyre több ártér sűrű beépítését eredményezik az elöntést rosszul vagy egyáltalán nem tűrő infrastruktúrával (Swart et al. 2006). Holott az ártérnek egyéb hidrológiai (talajvízpótlás, üledékképzés), biokémiai (tápanyagháztartás, talajerózió-gátlás, szervesanyag-felhalmozás) és ökológiai (élőhelyek fenntartása, biomassza előállítása, forgalma) feladatai, folyamatai, értékei és jellemzői is vannak. Ezek érvényesülését a mesterséges vízkormányzás lehetetlenné teszi (Maltby és Blackwell 2006).

A folyó két része – a meder és az ártér – normál körülmények között kiegyenlített kapcsolatban áll egymással, ahol a geomorfológiai (üledékképződés és erózió), illetve hidrológiai (sebesség, hozam, elöntés) folyamatok dinamikus egyensúlyt hoznak létre és tartanak fenn. Ennek aktív, cselekvő részese a természetes ökoszisztéma vadvilága is, ahol a kérődző állatok, szarvasok, őzek legelése modern mezőgazdasági körülmények között nem annyira búzabányákkal, inkább legeltető állattartással váltható ki (Swart et al. 2006). Nem mellékesen a helyreállított ártér javítja a vízminőséget, a tápanyagforgalmat és az ártéren a talaj vízháztartását (Hoffman és Blackwell 2006). A rehabilitáció elengedhetetlen feltétele tehát a hasznosítási formák újragondolása is. Hiányos és ellentmondásos a tudásunk az erdők, nedves területek és mocsarak szerepét illetően. Bár ezek szerepet játszanak a víz visszatartásában, ugyanakkor a fahulladékok, uszadékfák torlódása például a hullámtérben vagy az ártér nem kívánt területein gondokat okozhat, míg a mocsaras területeken a kellemetlen rovarpolulációktól kellene lehetőleg természetes úton megszabadulnunk (Blackwell és Malby 2006b).

Ha az éghajlatváltozás következményeit is figyelembe véve a jövőben a folyók áradásainak előnytelennek tekintett hatásaival szemben természetes és fenntartható módon kívánjuk társadalmunkat megvédeni, alapos és mélyreható váltásra van szükség a gondolkodásunkban. Felmerült az árterek eddig szentségtörésnek gondolt újbóli összeköttetése a folyóval. Olyan módon, ami nem zárja ki, csak átalakítja az emberi tájhasználatot. A koncepcióban az a felismerés kap helyet, hogy ha az eddig kiépített földműveket stratégiailag átgondoltan távolítjuk el és/vagy helyezzük át, az eredmény csökkenő árvízveszély és kedvező gazdasági hatás lehet (Opperman et al. 2009). Ha tudatosítani akarjuk a társadalom széles rétegeiben, hogy a mérnöki megoldások a hamis biztonság illúziójába ringatják őket, és az árvíz veszélyeit hatékonyabban, hosszabb távon és fenntartható módon lehet kezelni a természetes adottságok kihasználásával, akkor nagyon mély beidegződéseket kell megváltoztatnunk.

Ehhez nem árt részletesen tudni, hogyan működik a természetes árvízvédelem. Sokszor elfelejtjük, hogy az ártérre természetes körülmények között is kétféle módon kerülhet víz: nemcsak a folyó kiöntése, hanem a folyóvölgy vízgyűjtőjének lefolyása okán is. E két forrás eredője határozza meg, mennyi víz tározható

a nagyártéren, hiszen ha az amúgy is fel van töltve a környező magasabb területekről, akkor kevesebb folyóvíz fog elférni rajta, kisebb lesz a késleltető, az árvízcsúcsot levágó hatás. Ugyanez a helyzet a talajvízpótlással is, ha amúgy is magasan áll a talajvíz, nem fog tudni beszivárogni a folyóvíz, és megjelennek a belvizek. Ezért önmagában nem elegendő az elárasztott terület növelése, azt is meg kell vizsgálni, hogy mekkora a fajlagos vízfelvevő képessége rövid és hosszabb távon (Okruszko és Querner 2006).

Az emberi társadalom természettől való elidegenedésének egyik legékesszólóbb példája, hogy a folyók társadalmi-gazdasági perspektíváit szinte kizárólag pénzügyi vagy gazdasági kifejezésekkel illetik. Költség-haszon elemzésről, ökológiai szolgáltatásokról beszélnek, mintha a folyók a mi kedvünkért tennék azt, amit tesznek, vagy nekünk nyújtanának szolgáltatásokat, amikor általunk kedvezőnek ítélt folyamatról vagy állapotról beszélünk. Ha rehabilitációról van szó, akkor is az a kérdés, hogy milyen társadalmi-gazdasági értékei vannak az ártérnek, és ezek hogyan változnak a hasznosítás esetleges átalakításával. Még ahol nem a költség és a haszon a vezérelv, ott is az esztétika, tájkép, biodiverzitás és egyéb fogalmak vezérlik az értékelést, mintha ezek a mi kedvünkért léteznének, és nem önmagában lennének egy változatos ökológiai rendszer részei. A közgazdászok mindennek megpróbálnak valamilyen kvantitatív értéket adni. A folyó természetes dinamikáját nem azért kell helyreállítani, hogy szép látképekben gyönyörködhessünk, hanem mert az a folyó önálló létformája. Persze vannak valóban figyelembe veendő tényezők, amikor egy rehabilitációs vagy restaurációs elképzelés megvalósításán gondolkodunk, például mekkora hely áll észszerű mértékű változtatásokkal rendelkezésre, milyen a nagyságrend, helyi, regionális, nemzeti vagy nemzetközi, ez milyen földrajzi sajátosságokat ölel fel, milyen pénzből valósítható meg stb. (Penning et al. 2006).

A folyó helyreállításakor az első lépés mindig az érintettek azonosítása. Kinek milyen érdeke fűződik a jelen állapot fenntartásához, illetve mekkora esély van rá, hogy meg lehet győzni valami másról? Demokratikus országokban ez nehéz dió, mert olyan megoldást javaslunk, amiben nincs üzlet. Ha ugyanis van, akkor már régen nem jó. Ezért nem árt felmérni, kit érint a projekt, és ki tudja azt befolyásolni. Ha ez megvan, akkor ki kell alakítani egy stratégiát, mégpedig lehetőleg minél több szakma képviselőivel, és az érintettek bevonásával, hogy minél több nézőpont legyen képviselve. Ha kevés a pénz és bizonytalansági tényezők vannak jelen, nem árt egy integrált döntéstámogatási rendszert és fontossági sorrendet is felállítani. Vagyis jobb egy természetes folyamatot támogatni, mint mesterségesen területet „rendezni", inkább élőhelyeket vegyünk figyelembe és ne egyes fajokat, lehetőleg nagyobb területen, hogy legyen is valami hatása (Penning et al. 2006b). A hagyományos ágazati megközelítés elég sok kötöttséggel rendelkezik ilyen kérdésekben a jogi szabályozás buktatóitól kezdve a gazdaságosság nevében megkövetelt hajózási mélységen át az árterek pénzéhes beépítéséig.

Az utolsó ötven évben a helytelen nemzeti és nemzetközi, uniós szakpolitikák még fel is gyorsították ezeket a folyamatokat. Az egyik ilyen alapvető tévedés a közös agrárpolitika, a KAP, amely a földalapú támogatások felvételének reményében minden talpalatnyi föld megművelésére ösztönöz. A hiba kijavítása érdekében hozták létre az ökológiai rendszereken alapuló megközelítést (ecosystem approach, EA), amely beépült a biológiai sokféleségről szóló, 1992-es riói egyezménybe, és alapját adja uniós szinten a vízkeretirányelv által előírt, integrált vízgyűjtőre vonatkozó gazdálkodási tervek kialakításának – már ahol figyelembe veszik (Platteeuw et al. 2006, Simonffy 2011a).

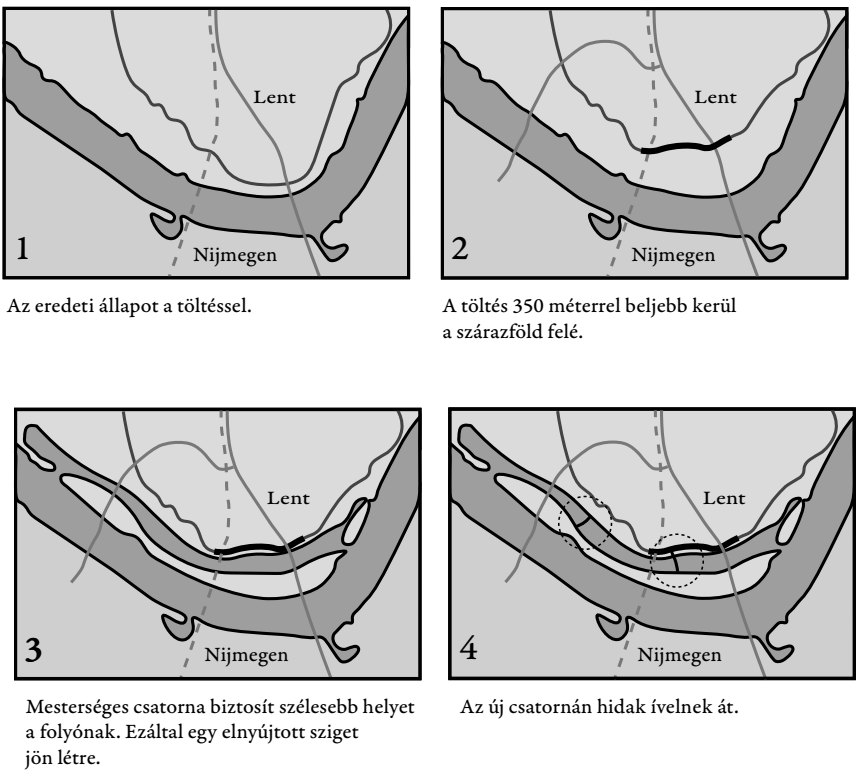
### 6.2.2. Helyet a folyónak

Hollandia kétségtelenül az egyik legnagyobb veszélynek kitett uniós tagállam, és kénytelen komolyan venni, hogy nemcsak a folyók, de a vihardagályok veszélyeztette polderek is egyre nagyobb kockázatot jelentenek számára. Vannak területek, például a Nieuwe Merwede folyó régi ártere, Noordwaard, ahol egyik oldalról az áradó folyó, a másik oldalról viharok idején a folyókba hatoló tengervíz jelenti a kockázatot. És bár a gátak, töltések az egész ország képét meghatározzák, ahol eddig a mérnöki tudomány nagyszerű eredményeit látták, ma már látják a hibákat is. „Évezredeken keresztül harcoltunk a természet ellen, de győzni soha nem fogunk tudni. Inkább meg kell tanulnunk, hogyan működik egy folyó, és kénytelenek vagyunk visszaadni neki valamennyit abból, amit elvettünk." Ezt nem valami elvakult környezetvédő mondja, hanem egy vízügyi szakértő (Baurick 2020).

1995-ben a gátak kis híján átszakadtak a kettős terhelés alatt, és 200 000 embert kellett kimenekíteni a mélyföldekről (lásd a 16. színes ábrát). Ez végre felébresztette a közvéleményt is, és részvételi alapon, nagyfokú támogatottsággal lehetett nekiállni egy olyan program kidolgozásának, amely a „Helyet a folyónak" címet kapta, és 2,2 milliárd eurót irányoztak elő rá. A tervek 2006-ban készültek el, lényegük egy alkalmazkodó, az árvízi kockázatokat kezelő stratégia kidolgozása volt, ami a folyókon a gátak áthelyezését, a sarkantyúk visszaépítését, az ártér kotrását és ehhez hasonló manővereket foglalt magában a rugalmasság jegyében, a Rajna és a Meuse (vagy Maas) folyó mentén. Az elképzelést szépen beillesztették az unió vízkeretirányelvének megvalósítási stratégiáját alkotó, integrált vízgyűjtőre vonatkozó gazdálkodási tervekbe, ezáltal összehangolt megközelítést tettek lehetővé (Zevenbergen et al. 2016).

Az eredmény eléggé tetszetős, legalábbis az ország egyes helyein. A vízügyesek elégedettek, jól költötték el a nem kevés pénzt. Az említett Noordwaardban például látványos a változás. Az év egy részében vízzel borított területekre visszatért a vadvilág, és egy kicsit okosabb helyekre visszaépítve megmaradhattak az árasztás miatt lebontásra ítélt farmgazdaságok is. Az árvízveszély is jelentősen csökkent (Baurick 2020).

Az ország régi fővárosa, Nijmegen viszont a Waal-folyó egy szűkülete miatt már nem volt ennyire könnyen megvédhető. A szűk, szorosan épített utcákkal nem tudtak mit kezdeni, ezért a folyó túlpartján települt Lent városkára esett a választás. Itt alakítottak ki egy új elképzelést az alábbiakban látható módon (Climate Adapt 2020).




42. ábra. *Az új sziget kialakítása Lent városában (előtte, utána) (Forrás: Rădulescu et al. 2021)*

A meglévő gátat 350 méterrel helyezték beljebb az ártérre, és egy segédcsatornát ástak, hogy a nagyvíznek több helye legyen. Ettől egy hosszúkás sziget jött létre. A csatornára hidakat építettek, hogy a nagyközönség is igénybe tudja venni. Meg a tehenek. Így a gazdák jóindulata is megvásárolható lett (lásd a 17. színes ábrát).

Már az építkezés során nagy volt az érdeklődés, az elkészült művet a világ minden tájáról érkező látogatók bámulják. A helyiek büszkék rá, mindenki Lentben akar építkezni. Nijmegen is biztonságosan élhette életét, miközben az új szigetet parkjaival és sétatereivel elöntötte a víz, és még 30 km-rel feljebb Duisburg városa is érezhette az árapasztó hatást. 2018-ban a Rajna árhulláma duzzasztotta

vissza a Waal-folyót. A közeli német városok víz alá kerültek, Nijmegen száraz maradt (Baurick 2020).

Joggal büszkék rá a hollandok, hogy sikerült átprogramozni a fejeket, ezért máshol is szívesen segítenek. A Katrina hurrikán után tanácsadóik jártak Amerikában, ahol megpróbálták megmondani, hogyan kell intézményi átszervezéssel, változtatásokkal megnyitni a lehetőséget a konkrét építkezések előtt is az érintettek bevonása, a kísérletezés, tanulás és rendszerszintű megközelítés révén. Ázsiában a Mekong deltájában és Bangladesben terveztek hasonló segítséget (Zevenbergen et al. 2013). A Mekong deltájában végül a német kormány nemzetközi együttműködési társasága indított egy intézményi átszervezésre kihegyezett programot (GIZ 2020), míg Bangladesben egy hosszú távú program keretében a holland kormány világbanki támogatással igyekszik az éghajlatváltozáshoz való alkalmazást, az árvízvédelmet, vízfelhasználást, integrált tájgazdálkodást, ökoszisztéma-védelmet és a mindezekhez szükséges intézményi struktúrát megteremteni (BDP 2020). Hogy aztán ezek hogyan fognak összeférni a korábban említett gátépítési tervekkel, majd a jövő mondja meg.

Vannak olyan helyreállítási programok, amelyek nem valósultak meg, fel kellett hagyni velük. A sikertelenség oka a szakirodalmi hivatkozások szerint legtöbbször az intézményi keretek elégtelensége, mint ahogyan az a Rhône folyón történt. A helyiek figyelmen kívül hagyása miatt nem volt meg az a támogatás, ami pedig ilyen helyeken mindig szükséges, és Hollandiában sikerült is megszerezni (Guerrin 2014). Egy angliai példából szintén az tűnik ki, hogy az Oxford környéki rehabilitációs programok sikere nagymértékben függ az érintettekkel kialakított kapcsolatok mélységétől (Cuppen és Pardoe 2013). Vannak, akik szerint ahhoz, hogy alkalmazkodni tudjunk az éghajlatváltozás okozta kihíváshoz, és a helyreállítási vagy rehabilitációs programok sikeresek legyenek, a csak alulról felfelé szerveződés sem működik, mindkettő kell: központi irányítás a helyi érdekek bevonásával (Huntjens et al. 2010). Az sem mindegy, mit tudunk az adott folyó korábbi medermorfológiájáról és dinamikájáról, mert ellenkező esetben komoly kockázatokkal szembesülhetnek a tervezők (Scorpio et al. 2018).

Általánosságban is igaz, hogy amit egyszer elrontottunk, sokkal nehezebb visszacsinálni, mint ha meghagytuk volna az eredeti állapotot. A folyók esetében legtöbbször nincs könnyű dolgunk, hiszen egy eleve súlyosan felforgatott rendszerbe kell belenyúlni, és ezt legtöbbször csak néhány kiválasztott helyen tudjuk megcsinálni, ami adott esetben kevés a folyó méretéhez és egykori széles árteréhez képest. Azért próbálkoznak, de a teljes siker várat magára. A Mura szlovéniai szakaszán például mesterséges kotrással hozták létre újra a meanderező kanyarokat, és a meredek partfalba vissza is költöztek a fecskék. A folyó osztrák felén azonban, ahol vízerőművek okoznak alvízi szakaszukon medermélyülést, csak fondorlatos módon tudtak egy mellékág meghosszabbításával és visszatorlasztásával elegendő vizet juttatni a kulturális örökség részét képező vízimalmokhoz.

A teljes mellékágrendszer visszaállítására azonban egyik szakaszon sincs meg a lehetőség az azóta lezajlott változások, a teljesen átalakult dinamika és a bonyolult tulajdonosi struktúra miatt (Samu 2022).

Hazánkban az eddig megvalósított folyórehabilitációs programok a Dunán, a Tiszán, a Körösökön vagy a Dráván nem igazán különböztek a megszokott betonalapú megközelítésektől. A régi paradigma alapján készültek, és bár van, ahol hoztak időleges javulást, a kiutat a zsákutcából nem errefelé kell keresni. A helyreállítás (restauráció) meghatározása szerint a beavatkozások előtti teljes szerkezeti és működési állapot visszaállítását jelenti, míg a rehabilitáció inkább az ökológiai állapotok adott körülmények között leginkább megközelítő visszaállítása (Lóczy et al. 2016). A Szigetközben a Duna elterelése miatt kialakult katasztrofális állapotok mérséklése érdekében az elterelt főágba épített fenékküszöböt 2011-ben egy komplex agrárökológiai fejlesztés követte, és a termőföldek öntözésének biztosítása érdekében összesen 39 duzzasztóművet építettek a mellékágakban (Kun 2016).

Egy másik rehabilitációs projektet Gemencen valósítottak meg. Itt a Duna régebbi medrét, a Rezéti-Holt-Dunát kötötték össze ismét a főággal. Ám továbbra is gondot okoz, hogy itt halad keresztül a Bátaszéket Bajával összekötő vasútvonal, ami akadályozza a víz szabad mozgását. Mohács mellett szintén kotrással egy szigetet alakítottak ki. A Körösökön a nagyvizek visszatartására építettek tározókat, hogy megkíméljék a Tiszát a fokozottabb elöntéstől. Magán a Tiszán a Vásárhelyi-terv továbbfejlesztése keretében épültek tározók, erről még lesz szó. Most csak annyit, hogy a vésztározók kialakítása csupán újabb technokrata beavatkozásokat jelent, a gazdáknak fizetett kompenzáció ilyen formában értelmetlen, sem a rugalmasság nincs sehol, sem az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodás (Lóczy et al. 2016).

### 6.2.3. Árvíztűrési index

Van a folyókhoz való viszonyulásnak egy másik megközelítése is a rehabilitációs programokon kívül. A városok fejlődése miatt előtérbe került a kockázatok tűrése. Az emberiség jelentős százaléka él olyan városokban, ahol a fenti megoldások már nem lehetségesek, ezért kénytelen másképpen gondolkodni. A sérülékenység mértékének felmérését követően ellenállással, alkalmazkodással tűri a veszélyt és következményeket. Az árvíztűrési indexnek nevezett mutató azt mutatja, mennyit tanul a társadalom a múltból, és azt milyen mértékben képes alkalmazni a jövőre, kockázatcsökkentésre. Három elemből tevődik össze: 1. Milyen mértékben képes egy rendszer reagálni az árhullámok változásaira? 2. Milyen mértékben képes önszerveződésre? 3. Milyen mértékben képes tanulni és alkalmazkodni? Ezek már kissé közelebb állnak a valósághoz. Ám a természeti rendszerekről egy szó sem esik. A hierarchikus rendszerek (telek, tömb, negyed és város) alapján alakítják ki az árvíztűrési indexet.

A kockázattűrési stratégia csak a társadalmi vonatkozásokra összpontosít. Öt szempontot vizsgál, amelyet angol megfelelőik alapján az 5R-stratégiának neveznek:

1. mentesítés (relief), ez tulajdonképpen a régi jó árvízvédelemmel azonos;
2. ellenállás (resistance), vagyis a gazdasági tevékenységek átszervezése, tervezés, az infrastruktúra átalakítása révén történő alkalmazkodás;
3. válasz (response), már új megközelítést ad, elismeri, hogy az árral együtt kell élni;
4. helyreállítás (recovery), csak az árvízkárok helyreállításának a támogatása;
5. elgondolkodás (reflect) azon, hogy tanuljunk az eseményekből politikai, szakpolitikai, hatósági, szakértői és általános társadalmi szinten (emberek, vállalatok, ingatlanfejlesztők, biztosítók). A szemléletváltás tehát korlátozott, csak a településtervezésre terjed ki. A mentési tervek és előkészületek csak élesben tesztelhetők, és bizonyos mértékű károk elviselésére mindig fel kell készülni. Ennek vannak fizikai és társadalmi vonatkozásai is (Batica et al. 2013).

Egy másik megközelítés a városok árvízi ellenállását alkalmazkodás révén kívánja növelni. Célja a szárazság, aszály és hőstressz, valamint az áradások és árvizek egyszerre történő kezelése alkalmazkodással. Ilyen az adaptáció mindennapossá tétele például az ausztrál városokban, ahol a szárazság és a villámárvizek kettős fenyegetését kell valahogy megoldani. Alkalmazkodás alatt azonban mindig technokrata beavatkozásokat értenek, például kiemelt alapokra építkezést Hamburg városában. Érdekesebb próbálkozás az előre eltervezett várostervezési elképzelések kihagyása: a helyiekre hagynák, hogyan alakul (lassú urbanizálódás). New Yorkban az extrém esőzések csatornarendszert próbáló veszélyei ellen a kemény és puha megoldásokat ötvöznék: beton (ellenállás), zöld felületek (lefolyás késleltetése), záportározás (tárolás) és elvezetés. A mainstreaming kifejezés alatt azt értik, hogy az árvíz tűrésének kényszerét bevezetnék a közgondolkodásba. Ám ez a fajta érvelés még mindig abból indul ki, hogy árvíz az van. Többszintű kezelést képzel el: célja a védekezés, a károk elhárítása és felkészülés a jövőbeni eseményekre. Ehhez a meglévő árvízvédelmi előírások átalakítása, megújítása és regionális (tehát nem csak egy-egy településre kiterjedő) védekezés, függőleges menekítés, azaz nem evakuálás, hanem az épületek magasabb szintjeinek és óvóhelyeknek az igénybevétele szükséges (Rijke et al. 2016).

Az alkalmazkodást legtöbben még mindig csak szakpolitikai és adminisztratív eszközökkel tartják elképzelhetőnek, és annak ellenére, hogy látják az előrejelzések elkerülhetetlen bizonytalanságát, továbbra is a százéves árvíz valószínűségével és hasonlókkal operálnak (Veerbeek et al. 2016). Ennél reményt keltőbb az árterek többfunkciós kihasználásának stratégiája, amelyre éppen – többek között – Magyarországról és Hollandiából hoz példát a nemzetközi szakiro-

dalom (Schindler et al. 2016). India Assam államában az ellenőrzött árasztás fogalmának bevezetésével kívánják a fenyegető árvizek káros hatásait csökkenteni (Bharadwaj 2021). Nem meglepő módon ez akkor sikerül a leginkább, ha a megfelelő szakértelemmel, tapasztalattal és helyi ismeretekkel rendelkező érintettek széles körét vonják be a tervezés és megvalósítás – és majdani fenntartás – minden szakaszába.

A kudarc mindaddig kódolva van, amíg nem értjük meg a kapcsolatok mögött álló hátteret. Az ökoszisztémát például nem valamiféle nekünk kedves értékek miatt kell figyelembe vennünk, hanem a természetes erők és folyamatok miatt, amit nem tudunk befolyásolni, akárhogy szeretnénk is. A lényeg nem is annyira az értékek és paradigmák változása, és semmiképpen sem előbb van vízkormányzás és minden más csak utána, hanem fordítva. Az mindenesetre jó hír, hogy a döntéshozatalban már nem csak a technokrata lobbik és politikai klikkek vesznek részt. A fenntartható, adaptív vízgazdálkodás nem oldható meg kizárólag az értékalapú megközelítéssel, mert így nem jutunk el a hosszú távú fenntarthatósághoz, az interakciókon, kapcsolatokon és folyamatokon keresztül történő alkalmazkodáshoz, ami a reziliencia előfeltétele. Az alábbiakban látható, mi az eltérés a hagyományosnak nevezett technokrata és a modern ökológiai, ha úgy tetszik, rendszerszempontú megközelítés között (Ast et al. 2013):

| Konvencionális vízgazdálkodás | Újszerű vízgazdálkodás |
|---|---|
| A víz „ellenség” | A víz „a barátunk” |
| Küzdelem a vízzel | Együttélés a vízzel |
| Ágazati vízgazdálkodás | Integrált vízrendszer-gazdálkodás |
| Hatékony és hatásos | Fenntartható: hosszú távú felelősség |
| Kínálat szabályozása | Kereslet szabályozása |
| A vízrendszerek követik a társadalmi folyamatokat | A társadalmi folyamatok alkalmazkodnak a víz adta lehetőségekhez |
| A víz követi a területfejlesztési igényeket | A területfejlesztés a víz adta lehetőségeket követi |
| Technokrata megközelítés: építés, karbantartás | Ökoszisztéma alapú: ellenálló képesség és önszabályozás támogatása |
| Nemzeti szintű | Nemzetközi és regionális |
| Kormányzati irányítás – Parancsuralmi vízgazdálkodás | Részvételi irányítás Interaktív vízgazdálkodás |

## 6.3. A FENNTARTHATÓ VÍZGAZDÁLKODÁS PÉLDÁI HAGYOMÁNYOS RENDSZEREKBEN

Számos megoldás létezett szerte a világban, amely az adott körülmények között megfelelő (a schumacheri értelemben vett „appropriate") technikának minősült. Ahogyan a mezőgazdaságban és az orvoslásban, a vízrendezésben is elképzelhetők olyan nem invazív kapcsolatok, ahol az ember a természeti környezet mérsékelt átalakításával hosszú távon kielégítő eredményt képes elérni. Legalábbis ökológiai értelemben. Hogy aztán ez miként viszonyul a társadalmi, gazdasági és demográfiai képhez, az más kérdés. Vannak létező vagy történelmi képződmények, amelyek évszázadok során bizonyították fenntarthatóságukat. Vesztüket nem a környezeti-természeti, hanem a megváltozott társadalmi feltételekkel való összeférhetetlenség okozta. Mások friss tudásunk eredményének gyümölcsei, de egyelőre még vagy nem terjedtek el nagyobb mértékben, vagy gyakorlati megvalósításra várnak. A víz energiájának és egyéb célú felhasználásának módjai csak akkor elégítik ki a fenti kritériumokat, ha teljesülnek a kis lépték, a rugalmasság, az alkalmazkodó képesség feltételei. A következőkben ezekből a hagyományos rendszerekből mutatok néhányat.

### 6.3.1. Karézek

Az ember azt hinné, a sivatagban csak azóta lehet élni, amióta mesterségesen szállítják oda a vizet, vagy fúrják meg a mély rétegvizeket. De nem így van. Éppen a sivatagos vagy elsivatagosodott vidékeken tanulták meg az emberek, hogy a víz kincs, és olyan módon kell felhasználni, ami lehetővé teszi a hosszú távú túlélést. Kitűnő példa erre a Közép-Ázsiában, a Tarim-medencében, a Takla-Makán sivatag szélén épült mesterséges oázisok sora. A vidéket legalább ezer éve egy muszlimmá lett török népesség, az ujgurok lakják, akik hosszú ideig sikeresen védték kietlen hazájukat a betolakodók ellen. A betolakodók – mongolok, kínaiak – számára azért volt oly vonzó a terület, mert ott vezetett keresztül a híres selyemút, ahol a karavánokat ellenőrzés alatt lehetett tartani. A karavánok egy ősrégi leleménynek, a karézeknek köszönhetően nem haltak szomjan a több száz kilométeres sivatagi út során. A sivatag és a két medencét, a Tarim-medencét és a tőle északra fekvő Dzsungáriai-medencét elválasztó Tien-san hegység között félúton, tehát a sivatagban a karavánút mentén bizonyos távolságokban öntözőrendszerrel ellátott, virágzó oázisok tarkítják a sivár dűnéket. A Tarim északi oldalán található Turfán mélyedésben hat hónapig tart a nyár, átlaghőmérséklete 33 °C, néha 40-50 fokot is mérnek, a stílszerűen lángoló hegynek nevezett közeli hegy sziklái akár 75 °C-ra is felmelegedhetnek. Az ilyen forró kőre helyezett lepény magától megsül. Gyakran dörög az ég, mégsem esik soha az eső, olyan nagy a felfelé áramló meleg levegő ereje.

És mégis, a vidék a közepén elhelyezkedő oázis, Turfán körül 3000 hektáron termelt, közismerten nem éppen szárazságtűrő, mag nélküli szőlőjéről és egy 400 km-rel odább, a Hámi nevű oázisban termelt, lédús dinnyéről nevezetes. Hogyan lehetséges ez? A két oázis, de különösen Turfán vízellátása teljes egészében mesterséges, ember alkotta rendszeren alapszik (lásd a 18. színes ábrát). Az európai átírás keresztségében többféle nevet is kapott vízgazdálkodási rendszert tetszés szerint lehet karézoknak, karézeknek, kárézeknek vagy koréznak nevezni, lényege ugyanaz marad: két évezrede életet visz az idegen környezetbe (Polonyi 1986). Stein Aurél így ír erről: „A forró éghajlatnak, a forrásoknak és a kárézekből biztosított öntözővíznek köszönhető, hogy a medence oázisaiban évente kétszer aratnak. Az öntözésre kedvező viszonyok roppant termékennyé teszik a talajt. Bőségben terem a gabona, gyümölcs és szépen virul a gyapot." (Stein 1934). Láthatjuk, hogy mégis csak lehet sivatagban gyapotot termelni, és az öntözés önmagában nem feltétlenül jelent szikesedést vagy más környezeti katasztrófát, ami fenntarthatatlanná teszi a módszert. Mi a titka, hogy sikerrel alkalmazták a föld ezen eldugott zugában több mint 2000 éven át?

Két tényező adhat magyarázatot. Az öntözőrendszer szinte teljes egészében *föld alatt* vezet, tehát nincs lehetőség párolgásra és az ebből eredő besűrűsödésre. A másik, hogy a víz viszont nem a felszín alól származik: a Tien-san gleccsereinek olvadékvizét vezetik el a néha mindössze 10, máskor viszont 1300 km hosszú föld alatti csatornák. A gleccserek a hegyre lehulló, sóban szegény csapadékvízből táplálkoznak, ezért vizük nem hajlamos a szikesedésre. A rendszer kiválóan működik még ma is, nekem 1988-ban volt alkalmam megfigyelni Turfánban. Igaz, a vizet fáradságos munkával kell kiemelni és a földekre eljuttatni, méghozzá hajnalban vagy alkonyatkor, mert a nap többi szakában azonnal elpárolog, és a növények hőgutát kapnak tőle.

### 6.3.2. A Hunza-völgy olvadékvize

Ázsiai méretekben nem is olyan messze, a Takla-Makánt délről határoló Karakorum hegység – a Himalája kisebb testvére és folytatása – hágóját megmászva kerülünk át egy érdekes hegyi országba, amit még a brit gyarmatosítók is csak későn kezdtek észrevenni. Biddulph őrnagy részletes leírást készített ugyan róla az 1870-es években, de őt csak a gyarmatbirodalmi és katonapolitikai érdeklődés vezette, ezért szó nélkül siklott át egy nagyon érdekes vízgazdálkodási és az erre épülő agrárrendszer felett (Biddulph 1986). Az országot – amely ma Pakisztán része – Kohisztánnak nevezik, és a hágó, amely Belső-Ázsiától elválasztja, a Hunza-folyó völgyében folytatódik. Az itt élő emberek nem a sivatagban, hanem közvetlenül a gleccserek lábánál, magasan fekvő völgyekben laknak, és ott teremtik meg maguknak azt az öntözéses kultúrát, amely lehetővé teszi túlélésüket a kopár, sziklás hegyek között.

A maga nemében ez a teljesítmény egyedülálló. Az éghajlat igen kíméletlen, a hosszú, állandó faggyal járó tél és a csapadéktalan, száraz nyár között egyensúlyoznak egy nagyon törékeny és jórészt maguk teremtette ökológiai rendszerben. Ám ez a mesterséges ökoszisztéma figyelembe veszi a helyi lehetőségeket és a természeti erők működésének mechanizmusait. A víz beszerzése alapvetően kétféle forrásból lehetséges: fenn a hegyekben és a hegycsúcsok között elterülő magas medencékben az állandó hóborítás nyáron vagy megolvad (hómezőre települt forrás), vagy egyes helyeken a firnesedésnek nevezett folyamat révén jéggé alakul, amely a nyári hónapokban a gravitáció adta lehetőségek mentén megindul a völgyek felé, és kialakulnak a gleccserek. A gleccserek mozgása a völgyek felé elnyúló jégnyelvek kialakulását eredményezi, amelyek maguk előtt tolják a fentről lehordott és elaprózódott kőzeteket és törmeléket, a morénát, aljukból viszont a gleccserek olvadékvize gleccserforrás, vízfolyás formájában bukkan elő, és indul neki a meredek völgyben a folyóvölgy (a Hunza, a Gilgit völgye) felé (gleccserpatakok).

Az emberek megtanulták ezeket a gleccserpatakokat saját hasznukra kiaknázni. A falvak vagy a gleccserpatakok, vagy a hómezők vízfolyásai alatt települtek, teljesen kopasz, terméketlen tájakon. Köröttük mégis virágzó oázisok láthatók, ahol a gyümölcsöktől a gabonán át az állati takarmányig minden megtermelhető. Évszázados tapasztalat és nagyon kényes egyensúly teszi lehetővé, hogy állandó kemény munkával olyan mesterséges vízrendszert építsenek ki, amelynek kedvező esetben egész évre elegendő a tartaléka a falvak vízellátásához. A hómezőre települt csatornák veszélye, hogy nyár végére az összes hó elolvad, ekkor a csatorna kiszárad. Ezért Kohisztánban a legtöbb falu, amely csak tehette, a völgyben hömpölygő folyó felett, az annak mellékágát adó gleccserpatakokra települt, amelyek ugyan egész évben megbízhatóan folynak, van viszont egy másik veszélyük: a gleccser jégnyelve a helyi időjárás változásainak megfelelően mozog, és szárazabb, melegebb években hátrahúzódik, míg hideg, nedves években előrenyomul. Bár még senki nem vizsgálta, az utóbbi évtizedekben az általános felmelegedés következtében valószínűleg a visszahúzódás okozza vagy fogja okozni a problémát, mindenesetre történetileg inkább a gleccser nyelvének előretörése volt a baj, mert ilyenkor előfordult, hogy a csatornarendszer vízkivételi műtárgyát egyszerűen bedarálta a jég, és sok ember több hónapos munkája veszett kárba.

Az építményrendszer azonban hihetetlenül rugalmas, és alkalmas arra, hogy egész falvak vízellátását biztosítsa olyan helyen, ahol azt teljesen elképzelhetetlennek tartaná egy mai mérnök. A falvak termőterületei rendszerint kétféle helyen találhatók, vagy a folyó által régebben vágott teraszokon, vagy hordalékkúpokon. Idevezetik messziről, fentről a gleccserek olvadékvizét, nem a föld alatt, mint a karézek esetében, hiszen igen sziklás, kemény talajról van szó, hanem a felszínen. A csatornák 30-100 cm szélesek és néhány métertől több kilo-

méterig változatos hosszúságúak: hosszukat elsősorban a forrás és az ellátandó terület távolsága és a köztük lévő terület domborzati viszonyai határozzák meg. Legtöbbjüket évszázadokkal ezelőtt építették, azóta csak karbantartási munkálatokat kell végezni rajtuk, méghozzá fából készült ásókkal és szemmértékkel, ami egy vízépítő mérnök szemében a hihetetlennel azonos nehézségi fokozat. Márpedig a falu vénjei nem tévedhettek, mert ha a csatorna lejtése túl nagy volt, lemosta saját ágyát, ha meg túl csekély, lerakta a termékenyítő gleccserhordalékot, és eltömődött. Vonalvezetése olyan kellett legyen, hogy éppen az öntözendő terület felső részén érjen egy szintbe azzal. Ezért elképesztő trükköket vetettek be. Ahol meredek sziklafal határolta a völgyet, kövekből támfalat építettek, és annak tetején vezették el a vizet, ahol át kellett vezetni valamilyen okból egy alacsonyabb területen, fapóznákból és deszkákból tákolt magaslati (fej feletti) vályúkban tették ezt meg. A szemmértékkel készített műtárgyak az emberi lelemény csúcsteljesítményének és a helyi viszonyok mesteri ismeretének tekinthetők. Nem csoda, ha Ázsia-szerte csodájára jártak a Hunza-, Gilgit-, Chitral- és a Kalash-völgy, valamint a többi kohisztáni terület vízellátásának.

Amikor azonban megérkezett az európai tudomány, nem értette, hogy miért kell messze földről, szintben vezetni a vizet, amikor az öntözött területek alatt 100-200 méterre ott a nagy folyó, amire kiváló mesterséges vízkivételi művet lehet építeni betonból és a megszokott időtálló anyagokból. Meg is tették, több ízben és több helyen. Ma csak az emlékét őrzik Kohisztán lakosai, mert az első nagyobb ár elmosta a műveket betonostól. A kormányzat szakemberei nem vették figyelembe, hogy a főfolyók vízjárása annyira bizonytalan, dinamikájuk pedig annyira erős, hogy arra építeni nem lehet (Staley 1982; saját megfigyelés 1989).

Az elmúlt 30-40 évben azonban jelentős változások álltak be a vidék életében, jók is, rosszak is. Egy Franciaországban száműzetésben élő imám, Aga Khan felkarolta az elhanyagolt vidéket, és nemcsak oktatási, kulturális téren, de gazdaságilag is támogatja a már-már veszendőbe menő gyümölcsösök fenntartását. Ezért a helyiek újult erővel fogtak neki a hagyományos sárgabarack- és almafaligetek művelésének, ráadásul úgy, hogy a hulladékgazdálkodási intézkedéseknek köszönhetően itt nincsenek szétdobált műanyag kannák, szélfútta nejlonzacskók. Vannak viszont fuvarozásra váró alma-, barack-, cseresznye-, szilva- és diófélék, amelyekkel Pakisztán egyéb térségeit is ellátják. A rossz hír viszont az, hogy a hosszú csatornarendszereket fáradságos munkával kell továbbra is karbantartani, itt a sok száz éves technológián nem nagyon van mit újítani (Pintér és Szabó 2020). Az itt élő emberek azonban jó hosszú ideig élvezhetik munkájuk gyümölcsét. A híradások szerint ugyanis a Hunza-völgy is a Föld azon hegyi régióinak sorába tartozik, ahol akár száz év felett is egészségesek és tevékenyek maradnak a lakosok. A vizsgálatok szerint ezt jórészt annak köszönhetik, hogy szűretlenül és főként kezeletlenül isszák a szilikátokban gazdag gleccser-

vizet, amelynek kisebb a felületi feszültsége, és a fagyáspontja is alacsonyabb, mint más vizeknek (Discovering Pakistan 2023). Szerencsére – egyelőre – ezen a vidéken még nem érezni a gleccsereken olyan nagyon az éghajlatváltozás hatását, mint a térség más magashegyei között (Jain 2018).

### 6.3.3. Qanatok

Ami a Takla-Makán sivatagban életet adó különlegesség, Közép-Ázsiában, a perzsák földjén évezredek óta általános gyakorlat. A mai Irán területén emberek milliói éltek hosszú időn keresztül egy olyan feudális rendszer keretein belül, amelynek ökológiai alapját szintén egy föld alatti, mesterséges vízrendszer adta, melynek a működése egészen a modernizációig zavartalan volt (Saatsaz és Rezaei 2023). Itt fejlesztették ki először ezt a rendszert, amit aztán a világ számos más táján némi módosítással és nagy sikerrel alkalmaztak, beleértve a karézeket is (Agarwal 1980). Iránban nagyszámú föld alatti vezeték húzódik, és rendkívül nagy területet lát el. Nemrég még az ország vízellátásának 75%-át a qanatok adták, és ebbe nemcsak a mezőgazdasági célú öntözés, hanem a háztartási vízellátás is beletartozott (lásd a 19. színes ábrát). Maga Teherán is be volt – sőt van – „kanátozva", de az ötvenes években, amikor bevezették a vezetékes vizet, amely a 70 km-re fekvő Amir Kabir tározóból származik, teljesen figyelmen kívül hagyták a 36 föld alatti vízvezetéket, amely egy része több mint 250 éves, és korábban a szomszédos termőföldek és kertek öntözésén túl a 1,5 milliós város háztartási vízigényét is kényelmesen kielégítette (Pazwash 1983).

Akárcsak a Hunza-völgyben, itt is kézzel készítették az építményeket, amelyekből csak Irán területén 22 000 található, összesen mintegy 272 000 km hosszúságban (lásd a 20–21. színes ábrát). Ez hihetetlen mennyiségű földmunkát jelent. A karézekkel és a Hunza-völgyi csatornákkal ellentétben a qanatok táplálását nem forrás, hanem a talajvíz biztosítja. A hegyvidékeken lehulló csapadék az első vízadó rétegbe szivárog, és a hegységtől a síkságig ezt a vízáteresztő réteget csapolják meg a qanatok. A vezetékek kialakításakor (ezek hossza a vidék domborzatától és az ellátandó terület távolságától függően 1 és 70 km között változhat) a majdani nyomvonal mentén számos függőleges aknát mélyítenek, amelyekben a munkások a mélybe ereszkednek, és azokat egy majdnem vízszintes, a terep természetes lejtését kiaknázó, 50-80 cm széles, 90-150 cm magas, föld alatti alagúttal kötik össze. A vízgyűjtő területen beszivárgó csapadék egy része így nem jut el a vízzáró rétegig, hanem az alagutak falán átszivárogva azok alján összegyűlik, majd a gravitáció vonzásának engedelmeskedve megindul a síkság felé, ahol a mezőgazdasági területek és a lakott települések vannak (Garbrecht 1983, Saatsaz és Rezaei 2023).

A síkságra érve a qanatok olyan vizet át nem eresztő talajban futnak, amelyek különösebb szigetelés nélkül is minimális elszivárgást tesznek csak lehetővé, ahol pedig áteresztőbb a talaj, ott agyaggal kitapasztják. Nincs talajvízszint-emelke-

dés és belvízveszély, a szállítás során a víz nem párolog, ezért, akárcsak az ujgurok földjén, nincs szikesedés sem. Nem mellékes szempont, hogy a föld alatt nem szolgálnak tenyésztő táptalajul a különféle, vízi úton terjedő betegségek légióinak, amelyek a modern, nagyléptékű beruházások szinte természetes velejárói (Goldsmith és Hildyard 1984).

Talán még fontosabb, hogy ez a megoldás a bemeneti oldalon a természetes viszonyokhoz kötött: amennyi csapadék esik, annyi a felhasználható vízmennyiség. Így a vízadó réteg kimerülése nem fordulhat elő, valamint a víz minősége is állandó és kiváló (nincs, ami elszennyezze). Mindennek eredményeként a hidrológiai és ökológiai egyensúly nem borul fel, és az önszabályozó rendszer mindig a természetes, környezet adta határokon belül működik (Garbrecht 1983, Pazwash 1983). Tettek már javaslatokat a modernizálására geotextil és geomembrán felhasználásával (Taghavi-Jeloudar et al. 2013). A qanatok rendszerét korunkban ismét felfedezték, és a 2023. évi rekordhőség enyhítésére a spanyolországi Sevilla városában alkalmazták. A rendszer ugyanis nem csupán életadó vizet tud szállítani, de a tisztító aknákon keresztül a mélyből feláramló hideg levegő viszonylag nagy felületek hűtésére is alkalmas (Millman 2023).

### 6.3.4. Chinampa

Hogy mennyire nem a természeti viszonyok abszolút értékei a döntők egy fenntartható vízgazdálkodási rendszer kialakításában, azt mutatja egy Mexikóban, egészen más környezetben kialakult vízfelhasználási gyakorlat. A chinampa-rendszer néven ismert módszer elsődleges célja élelmiszer-termelésre alkalmas, kis földterületek kialakítása volt, de a tavak mellé települt városok védelmében stratégiai jelentősége is lett. A mintegy 20 millió évvel ezelőtt keletkezett Mexikói-völgybe érkező folyók által táplált, sekély vizű tavak egy részének hosszú távon is fenntartható hasznosításáról van szó. A chinampákat az egyik ilyen tó vagy nedves terület, a Xochimilco felszínén a náhua indiánok történeti források szerint 1156-tól kezdve művelték, és utódaik művelik ma is – már amennyire a gomba módra terjeszkedő, közeli Mexikóvárostól ez lehetséges (Outerbridge 1987).

A völgy azon tavait, amelyeket nem tettek sóssá a völgy északi részén kialakult földtani képződmények, az indiánok saját céljaikra hasznosították. A mocsaras, vizes területen a szó szoros értelmében földet teremtettek maguknak és házaiknak. A chinampa megépítésének első lépésében kenuból hosszú póznákkal szondázva a tó fenekét, egy lapos medrű, sekély részt kerestek, amelyet leszúrt nádpálcákkal négyzet alakban kijelöltek. Ezután a tó mocsaras részein olyan sűrűségben növő vízililiomokból és egy tulénak nevezett, egyenes szárú mocsári növényből álló rétegből, hogy egy embert elbírt, annyit hordtak a kijelölt területre, amennyi egyszerűen feltöltötte azt. A víz mélysége ezért meghatározó tényező. Csak ott kezdtek építkezésbe, ahol egy és három méter közötti vízmélységet találtak. Ebben a vastagságban töltötték fel a chinampa alapját

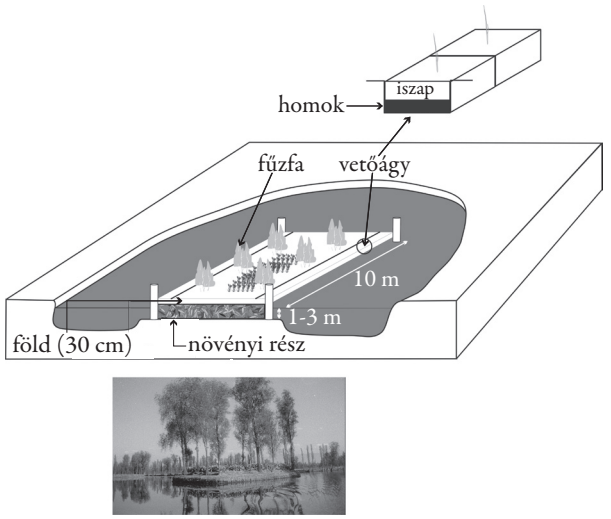
a kivágott vízinövényekkel egészen addig, míg azok a vízből éppen kiemelkedő szilárd alapzatot nem alkottak.

Ezen a szerves növényi takarón aztán a tavak fenekéről felkotort iszapot, illetve az idővel túlságosan magasra nőtt chinampák tetejéről lekapart termőföldet halmoztak fel, míg a szerkezet el nem érte a mintegy 30 cm magasságot. Az indiánok az így kialakított parcella mentén négy-öt méterenként fűzfagallyakat szúrtak le, amelyek meggyökeresedtek, és hamar árnyékba borították a termőréteget. A fűzfák egyrészt megóvták a chinampa szélét az eróziótól, másrészt öt-hat év alatt annyira megnőttek, hogy szilárdan lehorgonyozták azt a tófenékre. Hasonló módon készítették el az azték kor előtti indiánok házaik alapját is, és több ezer fából, nádból és a tule növényből készült házat építettek a mesterséges talapzaton.

A chinampa a növényi alapzat, a parcellák keskeny volta (ritkán több 10 méternél) és a termőrétegnek a felszíni vízhez való közelsége miatt ideális táptalaj a növények számára. Gyökerük legkésőbb fél méteren belül aktív vízfelvételi zónát talál. Ily módon az intenzíven karbantartott parcellákon gyakorlatilag egész évben lehet termelni a talaj kimerülése nélkül. Ehhez persze féltő gondoskodás kell, amivel a földműves fenntartja ezt a termő állapotot. A zöldtrágyához nem kell messzire menni, a tóban növő vízinövényeket folyamatosan gyűjtik, megszárítják vagy feldarabolják, és beledolgozzák a talajba. A tófenék iszapja is trágyaként, talajjavítóként funkcionál. Vetés előtt egy rétegben elterítik a felszínen, hogy a magok friss, nedves talajba kerüljenek, és hamar kicsírázzanak. Persze egy idő után a chinampa annyira megvastagodik, hogy a növények túl magasra kerülnének, ezért leszednek belőle egy réteget, és új chinampa építéséhez használják fel. Trágya még az állati és emberi ürülék is, korábban a hegyekben karavánok gyűjtötték a denevérguanót, ma már inkább csirketrágyát használnak (Outerbridge 1987).

A chinampa-rendszer nemcsak a vízfelhasználás, hanem a mezőgazdasági hatékonyság tekintetében is példamutató. Igaz, kevéssé emeli a nemzeti összterméket, és rendkívül elmaradott módszereket alkalmaz, mert hatalmas beruházások helyett élőmunkára támaszkodik, viszont az egységnyi területről betakarítható termés tekintetében vetekszik a legintenzívebb csúcstechnológiával (Deneven 1970). Ezt elsősorban kétszakaszos termeléssel, vagyis palántázással éri el. A chinampák szélén vetőágyakat alakítanak ki, amelyek 1-1,5 méter széles, 10 méter hosszú csíkok. A chinampa talajába keskeny árkot vájnak, aminek az aljára növényeket, trágyát vagy homokot szórnak, hogy a föléje kerülő tápkockák ne ragadjanak bele a termőföldbe. Ezután egy kenura való sarat gyűjt a chinampa gazdája. Nem mindegy, hogy milyen fajta, nagy tapasztalat kell ahhoz, hogy megtalálják a tófenéken a palántázásra alkalmas iszapot. A megtisztított, híg iszappal megtöltik a sekély árkot, és néhány napig száradni hagyják, míg zselatinszerű nem lesz. Ezután egy zsinór segítségével a termelni kívánt növény faj-

tájától függő nagyságban négyzeteket jelölnek be a felszínen, majd az iszapágyat egy nagy késsel felkockázzák. A közepén fúrt lyukba helyezik el a magot, és kevés trágyát, talajt szórnak rá. A vetőágyak számos előnnyel rendelkeznek, könnyen és gyorsan ellenőrizhetők, a kenuban mellettük evezve a talaj érintése nélkül lehet művelni őket, és a nagy chinampába csak az erős palántákat rakják át, nincs kelési veszteség. Ha eljön az ideje, a palánták átültetése igazán kényelmesen megoldható, csak a tápkockát kell egyetlen mozdulattal kiemelni, és az előkészített helyére beültetni.




43. ábra. *A chinampa szerkezete*

Ennek az önmagában működő, helyi viszonyokhoz adaptált rendszernek az európaiak érkezése vetett véget. Amikor korábban (1450) a náhua indiánokat és szomszédaikat, a Chalco-tó mentén letelepedett és hasonló művelést folytató kelmeka (chelmeca) indiánokat uralmuk alá hajtották a tóvidék közepén 13. században megtelepedő aztékok, eszük ágában sem volt a jól működő rendszert tönkretenni, sőt közművek építése és az alkalmas területek növelése révén nagymértékben elterjesztették. Így vált lehetővé az Azték Birodalom számára a mintegy 0,5-2 millió lakos élelmezése, valamint fővárosuk és a termékeny medence védelme az özönvízszerű esőzésektől (Moriarty 1968). A rendszert azonban, akárcsak társait szerte a világban, folyamatosan karban kellett tartani az áradások megelőzése és a csatornák friss vízzel való ellátása érdekében. A chinampák közötti keskeny csatornákon elképesztően nagy forgalom zajlott, egyes becslések szerint az azték korban akár 200 000 vízi jármű (főleg csónak, kenu) is közlekedhetett a tóvidéken (Outerbridge 1987). Ezért és a víz pangásának megelőzésére is folyamatos áramlást kellett biztosítani a csatornák vizének, ami nem kis munka lehetett. Megérte azonban az árát, mert az itt termelt kukorica,

paradicsom, bab, paprika és egyéb zöldségfélék változatos és egészséges étrendet biztosított az őslakosoknak. A spanyoloknak azonban fogalmuk sem volt a jól átgondolt és sok munkával fenntartott vízszintviszonyokról, nem is érdekelte őket, pedig ugyanazok a tavak, amelyek fenntartották a chinamparendszert, védték a titokzatos Tenochtitlánt, az azték várost is az elöntéstől. Annak ellenére, hogy a tavak nagy részét lecsapolták, a torrens, hirtelen záporok vizét felfogó védműveket lerombolták, és a virágzó kultúrát ezernyi nyomorúságnak tették ki, a becslések szerint a maradék Xochimilco chinampa-rendszer még 1950-ben is képes volt az iszonyatos mértékben növekvő, sokmilliós Mexikóváros frisszöldség-szükségletének nagy részét ellátni (West és Armillas 1950)!

### 6.3.5. Muang faai

Thaiföld északi részében is található egy olyan vízgazdálkodási rendszer, amely számos tanulsággal szolgálhat a hosszú távú fenntarthatóságban érdekelteknek, hiszen kiválóan működött legkevesebb hétszáz éven keresztül. A *muang faai* néven ismert megoldás egységes egésznek tekinti a hegyvidéket és a völgyeket, az erdőket, a vizet, a földeket és a gazdálkodást. Lényege a hegyvidéki területek sebes sodrású vízfolyásainak, folyóinak felhasználása egy bonyolult, de dinamikusan irányítható gát- és csatornarendszer segítségével. A folyókat nem áthatolhatatlan gáttal, hanem fából készült, bambusz vagy facsemeték felhasználásával kialakított gátak sorozatával tartóztatják fel, amely mögött ugyan kialakul egy víztározó, és magasabb lesz a vízszint, amit a gát tetejére hordott rőzsekötegekkel folyamatosan szabályozni lehet, ám a mederfenéken a faágak közein az iszap, talaj vagy homok nem halmozódik fel, hanem átsodródik, így a tározó alján nem ülepszik ki hordalék. A tározóból a vizet egy bonyolult csatornarendszer segítségével juttatják el a rizsföldekre, majd az esetleges felesleget vissza a folyóba. Ebből következik, hogy a gátnak a legmagasabban fekvő föld felett kell lennie, a visszafolyásnak pedig a legalsó tábla alatt (Borsos 2005).

A víz elosztását erős etikai elvekhez kötődő közösségi megállapodások szabályozzák, amelyek legfontosabbja, hogy mindenkinek jusson víz, és senki nem halhat éhen. A rendszer elég rugalmas ahhoz, hogy mind az egyén, mind a közösség igényeit kielégítse. Bár vannak egyenlőtlenségek a muang faai közösségekbe szerveződött falusiak között, ezek nem olyan kirívóak, hogy a vízellátás megszervezésénél gondot okozzanak. A tagoknak nemcsak jogai, de kötelezettségei is vannak, amelyek közül a legfontosabb a gát- és csatornarendszer karbantartása és üzemeltetése. A falusiak minden évben közösen döntik el, milyen magasra tervezzék a gát tetejét, és mennyit engedjenek át az alatta levő másik gátra (Tongdeelert és Lohman 1991).

A helybéliek által szervezett erőforrás-gazdálkodási módszer akkor kezdett el szétesni, amikor kialakultak a nemzetállamok, és ezzel együtt megérkezett a modern államigazgatás, amely egyáltalán nem az ökológiai elveket tartja szem

előtt. Mint mindenhol, ahol a közigazgatás dönt természetföldrajzi kérdésekben, az adminisztrációs szervezeti egységek sehol sem a természetes vízgyűjtők határait követik, ami komoly gondokat okoz a helyi szinttől kezdve (Dupar és Badenoch 2002) a nemzetközi szintig (Badenoch 2001). A kormányok a társadalmi-gazdasági ágazatok szerint szervezik tevékenységeiket – erdészeti, vízügyi, földművelési, önkormányzati stb. minisztériumok alakulnak –, és gyakran még ugyanazon a hivatalon belül is elkülönül a természet/környezetvédelmi ág a fejlesztési feladatoktól (Badenoch 2006).

Ismét bebizonyosodott, hogy a régiek jobban tudták: a hagyományos vízkormányzás során nem alkalmaztak semmilyen merev, helyhez kötött műtárgyat, meg nem újuló anyagokat, például acélt vagy betont. Igaz, hogy sok élőmunkával, de a rendszer működött. Amikor modern betonépítményekkel akarták lemásolni a muang faai gátakat, azok hamar feltöltődtek üledékkel, és külön munkagépekkel kellett kitakarítani őket. Ezért az ilyen „fejlettebb" kivitelű létesítmények fenntartásához szükséges munkaerő és főként tőkeigény olyan magas, hogy sokszor éppen ezek okán hagynak fel az üzemeltetésükkel (Tongdeelert és Lohman 1991).

### 6.3.6. Az őrségi tóka

Ügyes megoldásokat kicsiben is lehet alkalmazni megfelelő találékonyság megléte esetén. Az Őrségben ismeretes az úgynevezett tóka, amely nem más, mint a dombok tetején ásott, néhány méter átmérőjű gödör. Ez egy állatok itatására és háztartási vízigény kielégítésére szolgáló, természetes kavicsszűrővel ellátott vízgazdálkodási létesítmény, ahogyan a ma mérnöke mondaná. Segítségével a szeres települések dombjainak tetején, a lakott térségben is meg tudták fogni a vizet, és a kavicságy, amely a talaj alatt nem sokkal található, mintegy szűrőként funkcionált a környező térségből a mélyedésbe szivárgó víz megtisztításához. Nem kellett sem kolloidmembrán, sem ioncserélő műgyanta. Igaz, nem is permeteztek rákkeltő növényvédőszerekkel (Őrségi Nemzeti Park, személyes közlés 2003).

### 6.3.7. Fokgazdálkodás

Magyarországon a folyamszabályozások megkezdése előtti időkben elterjedt, a Duna változó vízszintjéhez igazodó régi vízhaszonvétel és a folyam árterein folyó gazdálkodás bemutatására tett kísérletet a néprajzos végzettségű Andrásfalvy Bertalan (Andrásfalvy 1973). Az ő tanulmányának alapján foglalom össze a folyóvölgyek hasznosíthatóságát az iparosodás előtti módszerekkel, továbbá azt az egyre erősebben képviselt nézetet, amely annak lehetőségét keresi, mi valósítható meg ezekből a megváltozott társadalmi-gazdasági és természeti környezet keretein belül. Mennyiben hozható vissza – ha egyáltalán – az ártéri, avagy fokgazdálkodás, és modern ökológiai ismereteink alapján tudunk-e valamilyen más, de elveiben hozzá hasonló megoldást alkalmazni a sokmilliárdos gátépítések helyett?

Andrásfalvy eredeti kutatásának középpontjában a Duna egy meghatározott szakasza áll, de megállapításai az Alföldre is érvényesek. A néprajzos figyelme a Dunaföldvártól délre húzódó Sárközre irányult, ahol történetileg a Duna nagyvizes és közepes vízállású időszakokban egy 30 km széles árterületen meanderezett, kisvíznél viszont lerakta hordalékát, és alsószakasz-jellegű folyóként viselkedett. A folyószabályozások előtti időszakban ezért itt egy rendkívül változatos felszín alakult ki, ahol a vízborítottságban megjelenő eltérő életfeltételek miatt már néhány centiméter szintkülönbség is más és más növénytársulások kialakulását jelentette. A növényzet ugyanis bioindikátorként viselkedik, „a talajvízszint változását, a víz közelségét és a vízzel borítottság gyakoriságát, valamint időtartamát a mérőműszer pontosságával jelzi" (Andrásfalvy 1973). A korábban ott élt emberek nem tudták kezelni a teodolitot, viszont kiválóan megtanulták a szintmérést szabad szemmel, és azt is, hogy egy-egy területet mikor mire használhatnak fel az ott található növények alapján.

Mik voltak ezek a használati formák, és milyen mértékben avatkozott be az ott élő ember a folyó természetes életébe a szabályozás előtt? A szakirodalomban igen méltatlan és a lényeget alig érintő vita folyt egy időben arról, hogy a folyó főága mentén kialakult övzátonyokat helyenként átvágó rések és árkok, amelyeket fokoknak neveztek, mesterséges vagy természetes képződményeknek tekinthetők-e (Szigyártó 1991, Molnár 1992, Deák 2001, Andrásfalvy 2002, Deák 2002b, 2002c, Faludi és Kalocsa 2002, Tamás és Kalocsa 2002). Valójában majdnem teljesen mindegy, hogy eredetileg a folyó ömlött-e át a fokokon, és az ember csak hozzásegített, hogy az árterület feltöltése egyenletesebb, az ár levonulása után pedig a pangó vizek levezetése gyorsabb legyen, vagy voltak olyan fokok, amelyek kifejezetten már ezzel a céllal készültek. A lényeg az, hogy a középkor egy jelentős időszakában, különösen addig, amíg a török dúlás és az állandó háborús veszély miatt karbantartásukat el nem hanyagolták, az ott élő emberek céltudatosan saját hasznukra vették igénybe a folyó természetes mozgását, alkalmazkodtak hozzá úgy, hogy az nem jelentette a folyó életébe való erőszakos és visszavonhatatlan beavatkozások sorozatát.

Akármilyen szintű tudatosságot tulajdonítunk is a fokok kialakításában, a már meglévő képződményeket az ott élő emberek tudatosan, egy bonyolult szociális és gazdasági rendszer keretein belül a maguk hasznára aknázták ki, amelynek voltak technikai, műszaki vetületei is. Az ártér mélyebb, ezért vizesebb laposait árkokkal, csatornákkal kötötték össze a magasabb területeken, úgynevezett göröndökön települt falvak házaihoz kitermelt föld helyére, az ásványoknak nevezett földbányákba benyomult vizet pedig összekötötték az ártér élővizeivel, és így a közlekedésnek egészen a házak ajtajáig érő, összefüggő víziút-rendszert teremtettek. Az utóbbi idők kutatásai azt látszanak igazolni, hogy magukat a fokokat tényleg a medrébe visszatérő folyó vágta, amint ennek nyomai megfigyelhetők voltak a 2000. évi árvíz levonulását követően (Fodor 2009). A geo-

morfológia a maga eszközeivel szintén azt az elképzelést támasztja alá, hogy a folyó mentén természetes módon kialakuló átvágásokat mélyítette tovább az ember, hogy a maga hasznára aknázza ki ezt a természetes jelenséget (Lóczy 2007).

A fokokon magas vízálláskor benyomuló vízre alapuló területhasználati rendszer számos előnnyel rendelkezett, ami első látásra nem nyilvánvaló. Ezek legfontosabbja az volt, hogy a mai szemlélettel ellentétben, éppen hogy igyekeztek az áradáskor feleslegben érkező vizet szétteríteni és megőrizni saját alföldi területükön ahelyett, hogy mindenáron gyorsan meg akartak volna szabadulni tőle. Ezzel megakadályozták a víz hirtelen kitörését, a rombolást, ami a mai árvizekre jellemző. A kellő mértékben karbantartott fokok az áradást le is vezették, és a víz, mely a szétterítés következtében hordalékát üledék formájában nagy területen az ártérben és nem a szűk mederben rakta le, terhétől szabadulva hamarabb vonulhatott vissza, vagyis csökkent a pangó vizek (a mocsár, miazma, szúnyogkeltető és egyéb jelenségek melegágya) jelenléte. A vidék, bár nagy területen, csak nagyon rövid időszakokban és nagyon sekély vízzel volt elárasztva. Ez a rövid ideig tartó áradás a lerakott üledék miatt rendszeresen termékenyítő hatással volt a vadon élő és ember ültette növényzetre, az erdőkre, gyümölcsösökre, legelőkre és kaszálókra (Borsos Balázs 2011). A középkorban mindehhez egy olyan szempont is hozzájárult, aminek jelentősége nem is volt mérhető a maihoz: a halászat. Akkoriban az Alföld gazdálkodásában a hal olyan fő termény volt, mint ma a búza vagy kukorica. A halak ívási ciklusát segítőleg egészítette ki a vizek visszavezetése, ezzel a laposokon kikelt szaporulat visszajuttatása a főmederbe, ahol ezáltal nagyobb létszámú felnőtt népesség kifejlődésére volt lehetőség.

Mindezen előnyök azáltal váltak elérhetővé, hogy nemcsak a főmederből kivezető fokokat, hanem a lapos részeket összekötő csatornákat (ezeket is fokoknak nevezték később, de ezek már nyilvánvalóan emberi kéz művei) is nagy gonddal tartották karban, hogy a víz áradáskor minél hamarabb és minél messzebbre jusson az ártéren, és kerülje el a településeket. A laposokban voltak a „halastavak". Ezek lehalászására ilyenkor számos módszert alkalmaztak, amelyek közül a legegyszerűbb és legeredményesebb a fokok apadáskor való elzárása volt. Az íváshoz nagyvíznél kiúszó felnőtt halak ugyanis az ártéren rekedtek, és ha a fokokat vesszőfonattal, ágakból épített gátakkal, úgynevezett rekeszekkel elzárták, a kis termetű, fiatal halak még átjutottak, de az öregek és nagyok nem. Ezért akkori méretekben mérve hallatlan halbőség volt ezeken az ártereken, ami a helyi lakosságot földesurával együtt is bőségesen ellátta (Zatykó 2009).

Ha valaki azt gondolná, hogy ez a módszer és a sokak által mocsarasnak, egészségtelennek tudott vagy hitt terület csak egy primitív halász-vadász népességet volt képes eltartani, az téved. Bár az évszázadok során változó mértékben és a mindenkori politikai-társadalmi viszonyoktól függően, de a dunai árterek igen sűrűn települtek, és a nagy népsűrűség ellenére akkori viszonyok között nagy jómódot biztosítottak még a vagyontalan emberek számára is. Az ártereken

ugyanis szinte minden megtermett a korabeli mezőgazdaság és erdőgazdaság tárházában, egyetlen dolgot kivéve. De a szántóföldi gabona akkoriban még nem játszott domináns szerepet az élelmiszerellátásban, és nem is szerepelt a legfontosabb termények között. Volt viszont helyette nád és gyékény, amelyek ipari nyersanyagként funkcionáltak, tetőfedéstől a tömítésig és tüzelőig mindenféle célra használták. Vagy a sulyom, a hullámzástól védett állóvizek faja. Tüskés termését sütve vagy főzve, csemegeként fogyasztották, de lisztjéből kenyeret is sütöttek. Erre utalnak népies elnevezései is: vízigesztenye, vízidió. A leírások szerint egy rossz subát húztak végig a tó fenekén, amibe beleakadtak a termések. Napjainkban finom csokoládékhoz szolgál alapanyagként. Csak fürdeni kellett óvatosan a sulymos vizekben, mert a 2-4 cm hosszú, kemény, többnyire négy hegyes, szarvszerű nyúlvánnyal ellátott termések a fenékre süllyedve fájdalmas sebesülést okozhatnak az óvatlan fürdőzőnek (Jakab és Csengeri 2020).

A Duna mentén a keményfa ligeterdők és a puhafából álló ártéri erdők egyaránt bőségesen nőttek. Ezeket számtalan formában használták fel a csónaképítéstől a rekeszek építéséig. Az ártéri erdők haszonvételéből nőtt ki a később nagy jelentőségre szert tett gyümölcstermelés. Az arra alkalmas alanyokat nemesített ágakkal oltották be, amelyekből aztán 100 évig is bőven termő gyümölcsfák, főként alma, körte, szilva, cseresznye és meggy alakultak ki. A gyümölcsöt nyersen, aszalva és főzve fogyasztották. A tiszamenti Nagykörű községben működő növénynemesítő még a 19. század végén is 402 alma- és 478 körtefajtát hirdetett, melyek jelentős része aszalványként utolérhetetlen minőséget produkált (Surányi Dezső, személyes közlés 2002). Ezek az ártéri gyümölcsösök egyedi ízű és kiváló minőségű házi pálinkának (szatmári szilva) adtak nyersanyagot. A Tisza és a Szamos mentén nemcsak az új divat hatására, hanem folytatólagosan a mai napig főznek olyan ágyas cseresznyepálinkát, amely alján a gyümölcs is ott van, egészen sajátos színt és illatot kölcsönözve a főzetnek (Nagykörű, személyes ízlelés alapján, 2002).

Az ártéri gazdálkodás legértékesebb hasznosítási formája az állattartás volt. Az állatok tartásához egyrészt természetes legelőket, másrészt az erdők kitermelése helyén keletkező irtásföldek rétjeit használták. A jószág – főként ló, szarvasmarha és sertés, méghozzá nem a vastag zsírszalonnájáról híres mangalica, hanem a sokkal szívósabb és vékonyabb, vaddisznóhoz hasonlatos siska vagy réti disznó – gyakorlatilag az egész árteret legelőnek használta, csak a bekerített területekre nem mehetett be. A szarvasmarha nem azért volt ridegmarha, mert az itteniek nem tudtak volna intenzív vagy jobban tejelő fajtákat kialakítani, hanem mert arra szelektálták: ki kellett bírnia az utat lábon Németországig, ahol Münchenben vagy valamelyik más nagyvásáron élve adták el.

A Tisza mentén is megfigyelhetők voltak az ártéri gazdálkodás hagyományai. Bár a Tisza-völgy egyes részein viszonylag kevés az olyan terület, amelyet a 18-19. századi térképek alapján átfogó, tudatos ártéri gazdálkodás területe-

ként jelölhetnénk be, ahol a fokok kialakítása, karbantartása és vonalvezetése célszerű vízkormányzási tevékenységet jelenthetett (Fodor 2002), más források alapján bizonyosra tehető a gondos és tudatos ártéri haszonvétel a Közép-Tisza vidékén (Molnár 1990), a Bodrogközben (Borsos Balázs 2000) és a Tiszai Alföldön (Bellon 2000). A Mohács előtti korok Tiszájának jellegzetességeit és köztük a fokok szerepét csak mostanában kezdték természettudományos módszerekkel is kutatni, sok esetben igazolva a korábbi társadalomtudományi kutatások eredményeit (Bagi 2000).

## 6.4. MODERN KORI FENNTARTHATÓ VÍZGAZDÁLKODÁSI MEGOLDÁSOK

### 6.4.1. A Vásárhelyi-terv továbbfejlesztése (VTT)

A 20. század végére szerte a világon, Magyarországon is világossá vált, hogy a folyószabályozások esetében olyan rendszerszintű folyamatokról van szó, amelyek az elsőfajú hiba körébe tartoznak és ördögi kört alkotnak (Droppa 2002, Molnár 2002a).

A felismerés már régen megfogalmazódott, a gyakorlatban azonban a kormány kezében a rendszerváltás után ismét engedelmes eszközzé vált magyar vízügy csak folytatja a betonkolosszusok építését és az ártéri erdők kivágását. Pedig egyedül a Tisza magyarországi szakasza mentén is lenne még mindig összesen egy körülbelül 1500 km$^2$ nagyságú terület, ahová áradások idején drasztikus intézkedések nélkül is biztonságosan ki lehetne vezetni a víztöbbletet (Szabó 2020).

Ezért többen kezdtek el gondolkodni azon a magyar ártéri gazdálkodással foglalkozó kutatók közül, hogyan lehetne szórványos múltbéli emlékeink felhasználásával és modern ökológiai ismereteinkre alapozva egy fejlett folyóvölgyi hasznosítási rendszert kidolgozni, amely szakít a technokrata vízmérnöki szemlélettel, és megpróbál „harc helyett békét teremteni a folyóval". Nyilvánvalóvá vált, hogy nem áll meg az érvelés, miszerint az árvizek mindig az ember ellenségei voltak. A 19. századig az ott élő emberek szívesen vették az időszakos elöntést, mert tudták, hogy együtt kell vele élni, ha mezőiket termékenynek akarják tudni. „Nem sürgette a kun ember a belvizek lecsapolását soha... A vízi életbe hatszáz év alatt belenőtt, s ma úgy érzi magát, mint a partra vetett hal." (Győrffy 1922). Nem arról van szó, hogy a múltat kellene nosztalgikus szilaj gulyáival visszaállítani, csupán az ősi tapasztalatokat felhasználva ismét megteremteni annak a vizek befolyása alatt álló, üledékes medencének a térségszervező erejét, amelynek szerepét hajdan is a Tisza töltötte be (Horváth 1993).

Ezek a törekvések az 1999–2002 közötti tiszai árvizek, a ciánmérgezés és más események következtében kezdtek politikai súlyt kapni, és valamilyen mértékben belekerültek a magyar vízügyi szolgálat által az árvizek nyomán kialakított, alternatív folyószabályozási tervbe, amely a Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése (VTT) címet kapta (lásd: www.vizugy.hu). Ennek lényege az ár mindenáron való levezetése helyett a megfelelő időben megnyitott szükségtározókba való beeresztése. Sajnos azonban a mai körülmények között ez nem jelent mást, mint újabb komoly műszaki beavatkozást, bár kétségtelenül már a helyesebb elv (levezetés helyett kieresztés) jegyében. Technokrata vonatkozásai miatt a terv a környezetvédők részéről erőteljes kritikában részesült annak ellenére, hogy első alkalommal fordult elő, hogy az ökológiai érveket legalább megpróbálták figyelembe venni.

A koncepció az árvízvédelmi töltések további emelése helyett a nagyvízi meder rendezésével és a hazai „térfélen" kialakított mintegy 30 tározásra alkalmas területen 1,5 milliárd $m^3$ víz időleges visszatartásával kívánja megoldani a sok víz kérdését. Ez persze nem megy az érintett területek művelési ágainak megváltoztatása és sok-sok kompromisszum nélkül. Olyan új területhasznosítási formákat kell keresni, amelyekre az esetenként előforduló árvízi elöntések nincsenek olyan katasztrofális hatással, mint az eddigiek. A műholdas felvételek tanúsága szerint a korábban időlegesen vízborította területek – a nagyobb ártér – 75%-a ma szántó (Ángyán 2002). 2003-ban a kormány határozatot hozott a VTT első ütemének 2007-ig történő kiépítéséről, és ehhez forrásokat is rendelt.[8] Persze a több száz éves műszaki megrögzöttséget nem lehet egyik napról a másikra feloldani, ezért az új Vásárhelyi-terv is még terhelt azokkal a műszaki megoldásokkal amelyek a múltban rossznak bizonyultak, így például néhány nagy műtárgyat tervez sok kisebb helyett, illetve újabb mederátvágások és hullámtérbővítés címén erdőirtás és egyéb vízi védművek, sarkantyúk szerepelnek a tervek között (Balogh 2002, Paulovics 2002). A szükségtározók működtetésére különféle üzemmeneteket javasoltak a szakemberek, többek között azt, hogy a Tokaj feletti és a Kisköre alatti tározókat külön rendszerként üzemeltessék (Szigyártó 2018). Hogy mennyire nem elegendő ez a fajta megközelítés, az nagyon hamar bebizonyosodott a gyakorlatban, amikor VTT létesítményeinek kellett volna kiállniuk a próbát.

A VTT-tározók a kétezres évek első két évtizedében nagyjából-egészében elkészültek. Először a cigándi tározót adták át, ami azonban csak akkor használható, ha a folyó már kilépett medréből, és elérte a nagyvízi árszintet. Második lépésben a tiszaroffi tározó készült el, és 2010-ben rögtön ki is lehetett próbálni. Tiszaroff község mellett, Szolnok felett június 14-én kellett megnyitni a frissen elkészült tározót, elöntve vele a lábon álló vetést, hogy megmentsék

[8] A Friedrich Ebert Alapítvány környezetvédelmi fóruma a Vásárhelyi-tervről, Hotel Benczúr, 2003. május 19.

a várost, amelyet a Zagyva egy időben érkező árhulláma is veszélyeztetett (lásd a 22. színes ábrát). Ha a Roffnál kiömlő, másodpercenként 300 $m^3$ hozam nem csökkentette volna a Tisza szintjét, a Zagyva öntötte volna el Szolnok városát.

Némi iróniát lehet felfedezni a remek műszaki megoldás mögött, ha tekintetbe vesszük, hogy a vízügyi ágazat hatályos jogszabályok szerinti kötelessége a belvízmentesítés, ami árvíz esetén is fennáll. Ezért a felvízi megyékben a Felső-Tiszavölgyi Vízügyi Igazgatóság szivattyútelepei erőt, energiát, valamint fosszilis energiahordozókat nem kímélve összesen megközelítőleg 400 $m^3/s$ mennyiségű vizet pumpáltak a földekről a töltéseken átemelve az áradó Tiszába: többet, mint amennyit Szolnok felett sikerült kiereszteni. Talán nem állunk messze az igazságtól, ha megkockáztatjuk, ez – még – nem a fenntarthatóság felé vezető út (Borsos *in press*).

## 6.4.2. Integrált tájgazdálkodás (ILD)

### 6.4.2.1. *A lehetőségek*

2020. január 20-ára Tiszaug határában a Közép-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság által megbízott favágók nyárfák alkotta „idős, puhafás állományt" vágtak ki. Vagyis „csak" az alpár-bokrosi ártéri öblözethez tartozó 90 éves, őshonos fekete nyárak *(Populus nigra)* és nem az enyves égerek *(Alnus glutinosa)*, valamint magas kőrisek *(Fraxinus excelsior)* alkotta védett tiszai ligeterdő esett áldozatul annak a beavatkozásnak, amellyel a vízügyi szakemberek arról gondoskodtak, hogy a terület „szakszerűen megújuljon, illetve a növekvő árvizek levezetése miatt szükséges gyepfelület kialakítása megtörténjen".

Pedig az árvízi védekezés efféle tarvágások és sok száz milliárd forintba kerülő védművek építése nélkül is megoldható lenne. Évtizedek óta léteznek olyan kidolgozott modellek, amelyek a folyók természetes életciklusát figyelembe véve, a víznek teret engedve az ártéri vagy fokgazdálkodásnak nevezett hagyományos metódussal hoznák közös nevezőre a jelenleg egymással szemben álló vízügyi és természetvédelmi érdekeket. A módszer a Szövetség az élő Tiszáért Egyesület húsz évvel ezelőtt elkezdett, szórványosan máig működtetett modellkísérletei, az Ártéri gazdálkodás című Facebook-csoport, illetve a Duna–Dráva Nemzeti Parkhoz tartozó Gemenc ártéri erdősége segítségével is megismerhető.

### 6.4.2.2. *Szabályozott szabályozatlanság*

Amint részletesen tárgyaltam, az Andrásfalvy Bertalan által feltárt fokgazdálkodás a vízjárás természetes ciklusain alapult (Andrásfalvy 2007). Az ártereket a víz szabályozott szétterítését megvalósító – ma természetvédelminek mondott – tagolt rendszerrel művelték. A természetes és mesterséges oldalági csatornák ki-

és berekesztésével operáló fokgazdálkodás a halászat, a legeltetés és a gyümölcstermesztés hármasságát jelentette, aszerint váltogatva a művelési módokat, ahogy azt a vízjárás diktálta. Ökológusok és tájgazdálkodással foglalkozó agrár- és vízügyi mérnökök szerint a fenti tradíciók megújításával növelhető lenne a vízzel borított területek nagysága, ezzel a szélsőségeknek leginkább kitett tiszai Alföld vagy a Duna–Tisza közének vízháztartását is egyensúlyba lehetne hozni. Hasonlóan vélekednek egyes geográfusok is (Lóczy 2007). A VTT keretében épített jelenlegi vésztározókat szinte csak a gátszakadás előtti utolsó pillanatban nyitják meg, és a víz értékes mezőgazdasági területekre zúdul. Pedig a ciklikusan érkező ár hasznosulhatna is, ahogy az a szabályozások előtt a mély fekvésű, csapadékhiányos területeken történt: a gyepek, a gyümölcsösökkel tarkított természetes ligeterdők és a vizes élőhelyek szivacsként tárolták a nedvességet a száraz időszakokra.

### 6.4.2.3. *Ártéri modellek*

A számítógépes modellek szerint a Tisza mentén a „használaton kívüli" mélyárterek bevonásával szinte azonnal meg lehetne kezdeni az alternatív védekezés megvalósítását. A modern vízügyi szakértelemmel felvértezett emberi beavatkozás során a változó vizet fokról fokra vezetnék ki a főmederből, precízen szabályozva az elöntés mértékét. Kétségtelen, hogy a ma szinte folyamatosan szivattyúzott belvizes szántóföldek ezzel kikerülnének a (szántóföldi) művelésből. Magyarország 4,7 millió hektár szántóföldjéből 500 ezret érintene a funkcióváltás. Ezek a sekély, az év egy részében tocsogós, vadban gazdag területek ugyanakkor a magasabban fekvő, szomszédos területek vízellátását is szavatolnák, enyhítve az elsivatagosodással fenyegető, krónikus talajvíz- és csapadékhiányt (Koncsos 2011).

A lehetséges vízborításhoz, domborzathoz illeszkedő, egészséges ökológiai egyensúlyt teremtő fokgazdálkodás nem hagyományőrzés, hanem a megmaradás záloga. A már említett művelési ágak mellett (vagy helyett) a legmodernebb zöld technológia is bevethető ezeken a helyeken. Az áradó víz kivezetésével és elrekesztésével az időszakosan vízzel borított területek vegetációja közvetlen energiaforrássá is válhat. A biomassza fermentálásán alapuló biogázüzemek, biomassza-erőművek egész településeket is kiszolgálhatnak. De működtethetnek hűtőházakat is, amelyekbe az ártéri gyümölcsösök termése kerülhet.

2004-ben a Vásárhelyi-terv továbbfejlesztéséről szóló törvényben a vésztározókat eredetileg a Koncsos-féle tanulmányokban is emlegetett vízjárta, úgynevezett tájgazdálkodási területeken alakították volna ki a fokok összefüggő rendszereként. Végül nem ez valósult meg. De még most sem lenne késő legalább kipróbálni. A vidék alkotmányaként becikkelyezett, 2012–2020-as vidékfejlesztési stratégia keretei ugyanis lehetővé teszik az évszakonként változó vízjáráshoz alkalmazkodó, a birtokkategóriákra és földhasználatra is kiterjedő agrárgazdasági modell integrálását (Vajna 2020).

Létezik tehát a lehetőségeknek tudományos bizonyítékokkal alátámasztott rendszere, ami a felszíni vizekkel kapcsolatos bizonytalanságainkra legalább a folyók síkvidéki szakaszain átfogó és hosszú távon is ökológiailag, geomorfológiailag fenntartható megoldást kínál, még ha eddig nem is valósult meg. Pedig már elég régóta szó van róla, különösen Európában (Nijland és Cals 2001), hogy a szemléletben bekövetkező drasztikus változások nélkül nem megy (Blackwell és Maltby 2006), és hogy további gátak és védművek építése helyett inkább ellenőrzött módon ki kellene használni a vízszint emelkedését és a magaspartokra koncentrálni – akár mesterségesen megemelt terepszintekkel is – az emberi tevékenység árvízzel szemben sérülékeny szegmenseit (Haq 2013). Dél-Ázsiában is a vízkormányzás társadalmi részvétellel történő megújításában gondolkodnak (Jalil 2013). Ha ugyanis a helybéliek, a lakosok, gazdák és önkormányzatok nem válnak érdekeltté, a program az ártér visszaállítására nem sokat ér (Guerrin 2014). A megoldást tehát ebben az irányban kell keresni annak ellenére, hogy ökológiai szempontból még nagyon keveset tudunk (Buijse et al. 2002).

Nyugat-Európában már régóta foglalkoznak a kérdéssel, több-kevesebb sikerrel folyó projektek vannak a Rajna folyóágaival (Klijn és Duel 2001) vagy a Rajna deltaterületén (Cals és Drimmelen 2001). Ezeknek a frissebb eredményeiről már volt szó a holland „Helyet a folyónak" programmal kapcsolatosan. A Rajna középső folyásánál Németországban, a Kühkopf nevű természetvédelmi területen a nyári gátat 1983-ban egy gátszakadás után nem építették újjá, és azóta figyelik a természetes, illetve a mesterségesen befolyásolt szukcesszió lépéseit, hogy több adatot gyűjtsenek a folyórehabilitációs programok megvalósításához (Schneider 2001).

A Dráva ártere nagyarányú és kedvezőtlen tájképi változásokon ment keresztül az elmúlt évtizedekben, ezért 2013-ban helyreállítási program indult, ami már az ártér vízellátottságának javítását, a holtágak vízszintjének és a talajvízszintnek az emelését célozza a főmederből való közvetett vízátvezetéssel. A rendszer kihasználja az ártéren lévő elhagyott vízelvezető elemek (holtágak, régi medrek, vízelvezető csatornák, folyóháti kapuk, ártéri lapályok) hálózatát Ennek részeként a holtágak hidromorfológiai sajátosságait vizsgálták (Lóczy et al. 2019). Egy mintaterületen végzett vizsgálatokból azonban megállapítható, hogy – az elszivárgást és a növényzet evapotranspirációját figyelembe véve – a jelenleg megvalósuló vízpótlás valószínűleg kevésnek bizonyul a rehabilitációs célok eléréséhez (Lóczy et al. 2016). A modellkísérletek ugyanakkor biztatók abban a tekintetben, hogy a holtágakban megnövekedett vízszint segít a Drávaalföld alatt húzódó talajvíztestek feltöltésében (Salem et al. 2020).

Az integrált vízforrás-gazdálkodás eddigi próbálkozásait foglalja össze 13 országból vett példákon keresztül Lubell és Edelenbos (2013). A fokrendszer visszaállítását Magyarországon már korábban is szorgalmazták egyes közlemények (Karácsonyi 2001). Doktori disszertáció is készült, amely „a Vásárhelyi-terv

továbbfejlesztésében (VTT) megfogalmazott eseti vésztározással szemben évenkénti mélyártéri elárasztást javasol a magyarországi mentett oldali ártereken" (Molnár 2011). Ennek kidolgozására, az integrált tájhasználat elvi módszertanára tett kísérletet a Tisza vízgyűjtőjén egy projekt több, az ENSZ fejlesztési programja, az UNDP által finanszírozott kutatás egymásba kapcsolásával (Kotowski et al. 2006, Kajner et al. 2009, Borsos et al. 2010). A munka abból a felismerésből indult ki, hogy egy folyóvölgyben a működőképes táj a természeti erők hatásainak eredője, amelyet az ember nem képes tetszése szerint alakítani, a gazdaság ellenben teljes egészében ember alkotta rendszer, amelyet okos tervezéssel meg lehet változtatni. A logikus következtetés ebből az, hogy a tájat az adott terület funkcionális igényei szerint kell igazgatni és fejleszteni, nem a piac szeszélyeit követni. A cél ezért az, hogy annyi vizet engedjünk ki az eredeti ártérre, ami szükséges az árvíz elterítéséhez és a csapadékhiány pótlásához. Így kevesebb lesz a szántó, de olyan diverz tájhasználat alakul ki, ami fenntartható módon tudja a nem túlzó emberi igényeket kielégíteni.

Egy ilyen rendszer többféle irányú használatába beletartoznak olyan művelési módok is, mint a kertkultúra, gyümölcsös, állattartás, de szántóföldi művelés is, kiegészítve egyéb tevékenységekkel, amelyeket nem szoktak a modern mezőgazdaság fogalomkörébe sorolni annak ellenére, hogy földhasználattal kapcsolatosak. Ilyen a halászat, erdőgazdálkodás, iparnövények, kender vagy nád termesztése és kitermelése, vadászat, méhészet, alternatív szállítási módok (tutajozás), energiatermelő létesítmények (vízimalmok), de sok esetben a víz közvetlen felhasználása is ivásra, mosásra, főzésre, locsolásra vagy egyéb háztartási célokra stb. Szükségtelen hangsúlyozni, hogy egy ilyen összetett földhasználati rendszer mennyivel könnyebbé tenné az önellátást azon igények tekintetében, amelyek helyi forrásokból kielégíthetők (Borsos és Sendzimir 2013).

### 6.4.2.4. *A megoldás: tájgazdálkodás az ártéren*[9]

A nagyobb léptékű integrált tájfejlesztés és tájgazdálkodás első és legfontosabb feltétele a teljes folyóvölgy geomorfológiai felmérése (Downs 2001, Newson és Sear 2001) a víz természetes mozgásainak figyelembevételével gravitációs úton elárasztható területek – mélyárterek – meghatározása érdekében. Alapvető tervezési elv, hogy először a természet saját erőit kell segíteni abban, hogy az ember javára tegyék a dolgukat, és csak aztán szabad olyasmit csinálni, ami a természetes folyamatoknak ellene hat, ha ez nem megy. Az új, átfogó tájépítési stratégia alapja a természetföldrajzi, intézményi és jogi értelemben vett, horizontális és vertikális együttműködés kell legyen. Egész vízgyűjtőkre kell a tervezést megvalósítani függetlenül a politikai és egyéb emberi határoktól, amiket a természeti folyamatok nem tisztelnek. Ennek egyik előfeltétele olyan egységes

[9] A következő három alfejezet Balogh Péter geográfus koncepciója és Borsos 2010b alapján készült.

– esetünkben az egész Kárpát-medencére kiterjedő – térinformatikai rendszer létrehozása, amely egy ilyen tervezési folyamat alapját képezheti (Verrasztó et al. 2003). A folyók medencéinek felvízi és alvízi szakaszai részére egyenlő esélyeket és hatáskört kell biztosítani az ILD-tevékenységek megtervezésekor és megvalósításakor. Ez azt feltételezi, hogy a tervezés komplex és átfogó legyen, kiterjedjen a folyó minden szerepére, és az olyan helyzetekre is, amiket ma szükséghelyzetnek tekintünk. Nem különálló árvízvédelmre, öntözésre és belvízelvezetésre van szükség, hanem egyetlen holisztikus tájhasználati (ILD) rendszerre, amely egyszerre alkalmazható a különféle igények kielégítésére.

Az első feltételt úgy lehet elérni, ha számítógéppel segített modelleken szimulációs technikákkal futtatunk különféle forgatókönyveket. A mértékadó hidrometeorológiai forgatókönyvek értékelése során különös figyelmet kell fordítani a globális éghajlatváltozás Kárpát-medencében várható helyi hatásaira. A modellek, ha kellő alapossággal vannak megtervezve, választ adhatnak arra a kérdésre, hogy topográfiailag pontosan hol helyezkednek el azok a területek, amelyeken a víz kivezetését meg kell valósítani, sőt arra is, hogy milyen terepszinteken meddig kell az árvízvédelmi töltéseket bevágni, hogy ne árvíz, hanem áradás legyen az eredmény (Koncsos 2006, 2011).

Jelenleg csupán stratégiai módszertan javasolható a fenntartható tájgazdálkodást célzó törekvések számára. Ennek a hagyományos ártéri gazdálkodásból levont következtetésekre, valamint a modern tudományos gondolkodás által a földhasználat és vízgazdálkodás, adatgyűjtés, feldolgozás, távérzékelés, térinformatika, topográfiai felmérések és nagy pontosságú földmunkavégző képesség terén elért eredményekre kell épülnie. Sikerének egyik záloga, hogy az alkalmazott modellek holisztikus megközelítésűek legyenek, tehát a környezetnek nemcsak a természeti, hanem társadalmi vetületeire is kiterjedjenek (Verrasztó 2017). A javasolt stratégia az alábbi elemekből állhat:

1. A folyó vizének szabályozott kivezetése az ártér viszonylag nagy területeire.
2. A kivezetés kulcsa a természetes parti háton (a vízügyi szakirodalomban: övzátony) és a mesterséges árvízvédelmi töltésen átvezető fok, és az e mögött, az ártéren található másodlagos fokok rendszere, melyen keresztül a főmeder kommunikálni tud az árterével, és amelyen keresztül a szabályozhatóság is megvalósulhat.
3. Az árvízvédelmi fővonal átjárhatósága miatt mindenképpen szükséges emberi létesítmény a megfelelő zsilip, amellyel – a természeti adottságokon belül – szabályozható a vízkivezetés ideje, a kivezetett víz mennyisége és a víz visszavezetése.
4. A fokgazdálkodás fontos eleme – különös tekintettel az energiahatékonyságra és a fenntarthatóságra –, hogy a víz ki- és visszavezetése gravitációs úton történik, vagyis nem szükséges többlet/külső energiaforrás bevonása. A víz kivezetésekor ugyanis a mederben magasabb a vízszint, mint

az ártéren, ezért a víz mederbeli emelkedésének megfelelően magától kifolyik az árterekre, és visszavezetéskor fordítva.

5. A főmeder mentén magasodó, természetes parti hátat (övzátonyt) átréselő fok medre a főmedertől az ártér felé egyenletesen emelkedik/emelkedjen, így a víz nem a természetes parti háton átbukva felülről önti el az árteret, hanem alulról felfelé, zúdulás nélkül árasztja el a megfelelő területeket.
6. Az árasztás területi kiterjedését egyrészt a beengedett víz mennyiségével (a fő védvonalon kiépített zsilip zárásával), másrészt a víz vezetésére használt medrek/csatornák töltésezésével lehet szabályozni.
7. Meg kell határozni azokat a területeket, ahol a víz más és más célokra használható. Ahol a földet mezőgazdasági termelésre kívánjuk igénybe venni, ott a víznek állandó mozgásban kell lennie: a meanderöv széléig haladva, ha emelkedő fázisban van, és a főmeder irányában, ha elvezetése történik. Másrészt azokon a helyeken, ahol állandó állóvizet kívánunk létesíteni, a víz további felhasználásig tározható, akár halastó, akár öntözésre használt tározó formájában, akár üdülési célra. Ilyen helyeken törekedni kell arra, hogy a víztest ökológiai egyensúlya megmaradjon a következő elárasztásig vagy vízpótlásig.
8. Az erekre épített belső zsilipek és a másodlagos fokok vízkormányzási célokat szolgálnak, és segítségükkel vizet juttathatunk oda, ahol annak beszivárgására szükség van, illetve kiszáríthatjuk a szántóként művelni szándékozott tagokat. Az ilyen beavatkozások hatalmas területek vízháztartására lehetnek jótékony befolyással, ha megfelelően végzik őket. A vízfölösleget vissza lehet ereszteni a főágba, ha a mederben a víz szintje az ártér terepszintje alá esett.
9. A vízkormányzást a vízszállító hálózat stratégiai pontjaira telepített zsilipekkel és fenékküszöbökkel lehet elérni. A zsilip ugyan drágább megoldás, és üzemeltetni is kell, de épp ezért többféle célra használható: vele a vizet teljes mértékben le lehet vezetni, míg a fenékküszöb csak akkor működik, ha a küszöbszint magasságánál fogva eléri a mögöttes apasztási szintet. Mögötte állandó vízborítás jön létre, amennyiben fizikailag és biológiailag fenntartható a víztest, míg alatta a főmeder felé lejtő meder kivezeti a fölös vizet.
10. A víz ily módon a folyórendszer működését felborító hidromorfológiai beavatkozások nélkül is kellőképpen kezelhető. A folyórendszeren integrált funkciók lépnek életbe, amelyek biztosítják a vízi élőlények önnfentartó populációinak kialakulását, az árvízvédelmet és a vízgyűjtő területén a szennyezés csökkentését. Nem csupán egyszerű visszakapcsolásról van szó, hanem az ártér eredeti működésének megőrzését vagy visszaállítását lehetővé tévő, sokoldalú és sokféle célra használható módszerről is.

A megközelítés alkalmazásához komoly „paradigmaváltásra" van szükség a jelenlegi vízgazdálkodási és földhasználati elvek és gyakorlat szintjén egyaránt. A következő felismerések ma már általánosan elfogadottak:

- Az ár nem egy olyan kockázat, amelytől meg kell szabadulni, hanem egy olyan lehetőség, amelyet inkább ki kell használni.
- a Tisza-völgyben tájszinten nincs „vízfelesleg". Éppen ellenkezőleg, természeti adottságainál fogva arid, csapadékhiányos terület, ahol a hiányzó vízmennyiség pótlását eredetileg a folyó időszakos áradásai biztosították.
- Ha hosszú távon fenntartható és az emberek számára kiváló életminőséget nyújtó tájgazdálkodási stratégiát akarunk kidolgozni, akkor a *természettel* és nem annak *ellenében* kell tervezni, aminek előfeltétele a táj természetes működésének alapos és helyes megértése.
- A szakszerű tervezés kiindulópontja a táj domborzatában megtalálható természetes különbségek, eltérések figyelembevétele és a tervezés elemeinek a földfelszín egyenetlenségei által kiadott szintvonalak mentén történő elhelyezése; a földhasználati formákat és ebből eredően a vízellátás sajátosságait ugyanis a domborzati viszonyoknak megfelelően kell kialakítani és nem fordítva.
- A Vásárhelyi-terv továbbfejlesztése során kialakított árapasztó tározók koncepciója sok tekintetben megfelel az itt tárgyalt stratégia követelményeinek, és a kijelölt tározók helyét könnyen lehet a folyó vizének ellenőrzött kivezetésére átalakítani. Ezzel teljesülnének az árvízvédelmi, ökológiai és gazdasági szempontok. Az eddig ténylegesen megvalósult tározók azonban földrajzi elhelyezkedésük ellenére sem felelnek meg az ILD alapelveinek, mint ahogyan azt a nem régen megnyitott tiszaroffi tározó példája mutatja.

A helyi geomorfológiai viszonyoktól függően egy öblözet vagy tározóterület elárasztásának módja lehet természetes vagy emberi beavatkozásokkal irányított.

A) A természetes árasztás olyan rendszert jelöl, ahol a vizet csak a folyó és árterének dinamikus kölcsönhatásában kialakult, a tájat behálózó természetes mélyvonulatok és erek vezetik.

B) Korlátozott árasztás: a víz mozgását a stratégiailag fontos helyeken fenékküszöbbel irányítjuk, bizonyos emberi infrastruktúrák védelmére alacsony gátakat építünk.

C) Mesterséges vízkormányzás: ahol az árasztás korlátozott mértékű, ott a meglévő, de kiszélesítendő csatornarendszer mellett épített töltésekkel vezetjük a vizet (a jelenleg mélyre kotort belvízelvezető csatornákat ehhez ellenkező irányú fejlesztéssel kell alkalmas állapotba hozni), és az érintett oldalsó területek, laposok árasztása és apasztása oldalsó zsilipek segítségével történik.

A fenntartható és működőképes tájgazdálkodás során a vízkormányzás rendszere biztosítja a tájban található víztestek vízutánpótlását és szükség esetén

a felesleges víz elvezetését a belvizes táblákról. A természetes medrek, laposok és mélyvonulatok ember alkotta rendszerelemekkel – meglévő csatornák és úthálózat, valamint a vízkormányzási feladat elvégzése érdekében újonnan épített műtárgyak – kombinált egységes egészként jelennek meg.

A legfontosabb elem a fővédvonalban elhelyezett kivezető műtárgy, vagyis az a zsilip, amely a főág árvízvédelmi töltéseit átvágó fok elzárására szolgál. A meglévő belvízelvezető csatornarendszer felhasználható a célra, csak esésüket kell úgy átalakítani, hogy a lehető legmesszebb el tudják vezetni a vizet a folyó medrétől. A jelenleg belvíztározóként működő, mély fekvésű területeket pedig számos különböző célt szolgáló, állandó vizű tavakká lehet formálni. További lehetőség a jelenleg beszántott mélyvonulatok felhasználása. Ezek ugyanis alkalmasak a víz időleges visszatartására.

### 6.4.2.5. *Funkcionális tájgazdálkodás*

Az okszerű vízkormányzás miként jét a nagyon radikális tervezési elvekkel és gyakorlati megvalósítási módszerekkel rendelkező tájgazdálkodás módszertana szolgáltatja. Az ártér elárasztását akkor lehet megkezdeni, amikor megfelelő vízállás esetén a fő védvonali zsilip nyitása révén a természetes víznyomás segítségével elkezdjük felvezetni a vizet az immár fokként funkcionáló, a természeteshez közelebb álló (szélesebb, laposabb, kanyargósabb) belvízlevezető csatornákon. Amint a vízszint meghaladja a főzsilip küszöbszintjét, megkezdődhet a beeresztés. Az emelkedő ár hidrosztatikai nyomása a folyó vizét a frissen kialakított nyíláson keresztül a korábban belvízelvezetésre használt csatornákba tereli. A vízrendszer elsődleges (a csatornákban a folyásirányba eső) zsilipjei nyitva vannak, a másodlagos (a csatornákból kivezető oldalsó) zsilipek a hozzájuk tartozó terület árasztásának igénye szerint nyitva vagy zárva. Ahogy a víz eljutott a legtávolabbi területekig, és a rendszer a kívánt szintig megtelt, a főzsilipet és az elsődleges zsilipeket a rendszer túltöltésének elkerülése, illetve a részmedencékben a víz visszatartása érdekében le kell zárni. Röviden tehát a következő lépéseket kell elvégezni:

- a főzsilip és elsődleges zsilipek megnyitása,
- a víz felvezetése ameddig csak lehetséges,
- a főzsilip és elsődleges zsilipek lezárása,
- az oldalsó zsilipek szükség szerinti működtetése.

A víz gravitációs úton történő felvezetése, az alulról töltés – vagyis egy területet viszonylag mélyebben fekvő terület felől indulva, az emelkedő vízszint hidrodinamikai nyomása miatt alulról felfelé haladva töltünk fel – a Tisza középső folyása mentén mindig lehetséges, amint a főágban a víz eléri a középvízi medret, ami elég gyakran előfordul. A tervezési szint meghatározásához immár nem annyira a történeti vízszinteket, hanem az éghajlatváltozás okozta várható vízszinteket előrejelző mindenkori legjobb modelleket kell figyelembe venni, és

a főzsilip küszöbszintjét úgy kell beállítani, hogy az viszonylag alacsony vízállásnál is lehetővé tegye a vízkivétet. Számolni kell az elszivárgással is, ezért az ilyen veszteséget a kiengedett víz mennyiségébe bele kell számítani. Ezzel biztosítható a talajnedvesség és a talajvíz utánpótlása is. Bár a korábbi adatok elemzése támpontot nyújthat az árasztás időbeli lehetőségeinek behatárolásához, nem árt azt is észben tartani, hogy a historikus adatok az éghajlatváltozás függvényében már itt sem feltétlenül megbízhatók (máskor vannak/lesznek árvizek).

Apasztáskor azon területek zsilipjeit tartjuk nyitva, amelyeken nem akarunk állandó vízborítást. Tapasztalatok szerint a szárazföldi vegetáció néhány hetes vízborítást bír ki károsodás vagy átalakulás nélkül.

Gravitációs apasztás elvileg a főzsilip küszöbszintjéig lehetséges, de bizonyos magasság alá nem indokolt, illetve javasolt csökkenteni a vízszintet, mert a vízpótlás érdekében a táj mélyvonulataiban minél több vizet vissza kell tartanunk, ami amúgy is csökkenni fog az elszivárgás és a párolgás miatt. Ugyanakkor ez a szint már lehetővé teszi az oldalsó területek kellő mértékű víztelenítését. A várható magas vízállás időtartamához igazodva a zsilip megnyitásának időpontja és a főág apadásának időpontja között eltelt idő hossza ne haladja meg az elárasztott terület vízállás tűrésének határait. A gravitációs apasztáshoz emellett még az alábbi feltételek teljesülése is szükséges:

- az árasztott terület mikrodomborzatához igazodó mikrocsatornák kiépítése, melyek mint a hajszálerek gyűjtik össze és vezetik vissza a vizet a főcsatorna oldalán vágott zsilipekhez
- ezen zsilipek talpmagassága határozza meg a gravitációsan víztelenít hető terület szintjét
- az oldalzsilipek küszöbszintjeinek viszont a főzsilip küszöbszintje fölött kell lenniük.

A vizsgált táj vízháztartását egyrészt az éghajlati jellemzők, másrészt a Tiszával való kapcsolata határozza meg. Meg kell állapítani a csapadéktartományt, az átlagos csapadék mennyiségét, a mért vízszintcsökkenést, az éghajlati vízhiányt (a természetes csapadék mennyisége és az evapotranspiráció révén elszenvedett veszteség közötti különbséget), valamint a tervezési területen hiányzó vízmennyiséget. A vízmérleget az időleges vízfelesleg is befolyásolja, amelyet az új elképzelés szerint vagy felhasználunk az árasztás során a vízpótlásra, vagy gravitációsan visszavezetünk a főágba, ha olyankor jelentkezik, amikor bőséges a rendelkezésre álló víz mennyisége. A víztestek mennyiségi jellemzőit meghatározza még az elszivárgás, a tényleges párolgás és a közvetlen vízkivétel (leginkább: öntözés). A rendszer számára előnyös a természetszerű ártéri tavak létrejötte, amelyek természetes pufferkapacitásként nemhogy elviselik, de igénylik az időszakos vízszintingadozást és megfelelő élőhelyet biztosítanak a vízi élővilág számára (Borsos 2014). A fenti adatokban azonban nagy bizonytalanságot okoz, hogy az éghajlatváltozás következtében a Kárpát-medence csapadékviszonyai és min-

tázatai is radikálisan – és egyelőre csak nagy bizonytalansággal jelezhető módon – átalakulnak.

### 6.4.2.6. *Infrastruktúra- és földhasználatváltás*

A nyomvonalas létesítmények, gázvezetékek vagy villamos távvezetékek önmagukban nem képeznek szükségszerűen akadályt az ILD megvalósítása előtt. Miután a legtöbb helyen a vízborítás csak időszakos, a legtöbb közművezeték létesítményeit (a távvezetékek oszlopait, a föld alatti szénhidrogén-vezetékek kisegítő berendezéseit) viszonylag könnyen meg lehet védeni. Inkább a rugalmas jogszabályi háttér hiánya és nem a pénzhiány okoz gondot. A jelenlegi szabályozás ugyanis nem engedi meg például a vezetéket tartó távvezeték-oszlopok betonlábazatának elárasztását. Könnyű belátni azonban, hogy hiába az előírás, a vezeték hullámtérben álló oszlopait árvíz esetén így is, úgy is elönti a víz. Ennek ellenére nem történt semmilyen tragédia 2010 júniusában, amikor Nagykörű határában megesett ez a dolog (lásd a 23. színes ábrát). Hogy világosan lássunk, le kell szögezni, sok esetben egyedül a rövidlátó és merev jogi szabályozás áll egy eltérő megközelítés megvalósításának útjában.

Némiképp másféle gondot jelentenek a vasutak és utak, amelyek amúgy is töltéseken futnak, ezért legtöbbször ember alkotta árterelő műtárgyként viselkednek, bár nem mindig volt ez az építők szándéka. A probléma megoldásához alapos felmérésekre, vizsgálatokra és részrehajlástól mentes, rugalmas, többcélú tervek készítésére van szükség. A Tisza-völgy regionális infrastruktúrája amúgy is felújításra szorul. Ez egy jól becsülhető egyszeri indulási költség, és nem jár váratlan árvízvédekezési vagy kármentesítési kiadásokkal, ha jól van megtervezve. Amennyiben az infrastruktúra-beruházásokat az új tájfejlesztési célkitűzések figyelembevételével valósítják meg, a műtárgyakat és vagyontárgyakat érő károk minimálisra szoríthatók, a magas karbantartás és helyreállítási költségek pedig teljesen elkerülhetők. Hogy ez megtörténhessen, az utakat, közműveket, egyéb vezetékes és nyomvonalas létesítményeket az elárasztásra szánt területek figyelembevételével kell kialakítani, és szerkezeti elemeiket (például a burkolt utak rézsűit és töltéseit) kiegészítő funkcióként vízkormányzási célokra is fel lehet használni.

A hagyományos települések elhelyezkedése rendszerint az ártéri öblözetek magas partjainak vonalát követi. Az utóbbi időkben azonban egyes településeken olyan mélyebben fekvő területeken is építkeztek, ahol a házak és az egyéb infrastruktúra ki van téve a fokozott árvízveszélynek és kockázatnak. A folyó parti Szentes városában például a demográfiai nyomás azt eredményezte, hogy a lakók elhagyták a város történelmi magját, és olyan területeken építettek házakat, amelyekről tudták, hogy árvíznek kitett részek, és fokozott a vizesedés veszélye (Filep 2009). Ha az ILD nagyléptékű megvalósításában gondolkozunk, meg kell fontolni bizonyos infrastruktúraelemek áthelyezését, vagy ezek számára árvíz elleni védelem biztosítását – ez utóbbinak nem kell feltétlenül költ-

ségesnek lenne, ha rendszeres, de sekély szintű árasztásról van szó, megoldható például egy alacsony körgáttal a település veszélyeztetett részei körül.

A jelenlegi földhasználat a Tisza egész árterében alapvetően egynemű szerkezettel jellemezhető, ahol nagytáblás szántókon monokultúrás növénytermesztés folyik búza, kukorica, lucerna és egyéb árunövények előállítása érdekében. A terület élővilága elszegényedett, a helyi ökoszisztémák és életközösségek ki vannak téve agresszív, idegen özönnövények és betelepülő állatfajok káros hatásainak, amelyre a legjobb példa a mindenütt megjelenő gyalogakác *(Amorpha fruticosa)*. Bizonyított, hogy ártéri legeltető gazdálkodással nemcsak ezek a nagyon agresszív növények szoríthatók vissza, de a biodiverzitás is növelhető, és egyúttal csökken az árvízi kitettség kockázata (Demeter et al. 2021). Az ILD sikerének egyik legfontosabb eleme lenne a tájhasználatban meghonosított gyökeres változtatások rendszere.

Ahhoz, hogy tudjuk, mit érdemes és mit lehet a föld használatában változtatni, elsőként a tájhasználati potenciál felmérésére van szükség, amit a Bodrogköz területére már el is végeztek (Midriak et al. 2008). Az ártéri jellegű gazdálkodás bevezetésével egy mozaikos elrendezésű, harmonikus megjelenésű tájkép alakulna ki, amely kiemelné a terület eredeti morfológiai változatosságát. A különféle tájhasználati lehetőségek főként az adott terület környezetéhez viszonyított magassága szerint változnak. Az alábbi relatív szinteket lehet egy ártéren megkülönböztetni:

| Relatív magasság | Vízborítás | Földhasználati típusok |
|---|---|---|
| ármentes szint | biztosan ármentes | emberi település, őszi gabona, erdő, állatok helye árvíz idején |
| magas ártér | ritkán, röviden | gyümölcs, kert, szántó, erdő, legeltetés |
| alacsony ártér | rendszeresen (évente, időszakosan) | legelő, rét, kaszáló, erdő, réti halászat |
| mély ártér | állandóan (évenkénti vízcserével) | hal, madár, nád, egyéb vízi növény |

A földhasználat megválasztásakor nem annyira a művelési módnak, inkább az adott tájrészlet típusának az igényeit kell alapul venni. Az alábbi lehetőségek kínálkoznak:

| Típus | tó | nádas | gyep | szántó | gyümölcsös, kert |
|---|---|---|---|---|---|
| ármentes szint | – | – | X | XXX | XX |
| magas ártér | – | X | XX | XX | XXX |
| alacsony ártér | XX | XX | XX | X | – |
| mély ártér | XXX | – | – | – | – |

A földhasználat típusát és a szükséges változtatásokat az alábbi összefüggések határozzák meg:

A) A mélyvonulatok természetes hálózata adja a potenciális vízrendszert.

B) A természetes szintek meghatározzák továbbá a potenciális tájhasználatot.

C) A vízrendszer részegységekre, egységesen működtetendő területekre osztható.

D) Ezen vízgazdálkodási részegységekhez tartoznak az általuk érintett parcellák, melyek gazdálkodását egyeztetve kell megoldani a választott árasztási változat szerint.

E) Gyakorlati okokból sokkal könnyebben lehet kielégíteni mind a fölhasználat, mind a vízgazdálkodás igényeit, ha a jelenlegi egybeszántott parcellákon új alrészleteket alakítunk ki, amelyeken megvalósíthatók a kívánt művelésiágváltások. Mindehhez nagyon le kellene egyszerűsíteni a jelenlegi ingatlanyilvántartási és bejegyzési folyamatokat, és át kell alakítani a támogatási rendszert.

A színes mellékletben található térképek (24. ábra) azt mutatják meg, hogyan lehetne a nagykörűi ártéri öblözetet a javasolt használati móddal működtetni az ILD-projekt keretén belül.

6.4.2.7. *Várható eredmények*

- Csökken a természet terhelése – legalább helyi szinten védekezünk a fenyegető ökológiai katasztrófa ellen. Lehetővé válik életfeltételeink hosszú távú fenntartása.
- A csökkentett terhelés mellett az új és korszerű haszonvételeknek köszönhetően megnő a táj jövedelemtermelő képessége, a vidék megszűnik költségvetési teher lenni.
- A szántó művelési ágban található és gazdaságosan csak az EU területalapú támogatásaival művelhető területeket csökkenteni kell. A szükségből erényt kovácsolhatunk, ha a belvizes, alacsony értékű területeket adjuk vissza a természetnek.
- A nem gazdaságos gabona-hús termékszerkezetet minőségi és munkaigényes hungarikumok, valamint biotermékek előállításával váltanánk ki.
- Növekedne a vidék önfenntartó/önellátó képessége. A nagyobb munkaerőigény helyben biztosítaná a lakosság megélhetését. Az új lehetőségek jellegéből adódóan a roma lakosság is inkább találna kedvére valót.
- A belvízveszély megszűnne, amennyiben a belvizes területeket vizes élőhelyekként hasznosítanánk. (Egyidejű ökológiai és gazdasági hasznosság.)
- A koncepció teljes körű alkalmazása esetén a hullámtér növekedésével az árvízveszély csökkenne, hiszen a szabályozottan szétterített ár csökkentené a vízmagasságot.
- A vegetációs időszak óriási csapadékhiányát az ugyanakkor jelentkező nagyvizek visszatartásával ellensúlyoznánk – ahogy az természetes körülmények között is történik.

- A mederben levonuló szennyezések ökológiai kártételeit jelentősen mérsékelné az elzárható ártér-hátország működtetése.
- Újrateremtődnek az egykor legendás tiszai halgazdagság ökológiai feltételei.
- Ez a tájhasználat a táj revitalizációját is jelenti. A természetközeli élőhelyek nagyarányú növekedése európai jelentőségű példává emelné a Tisza-vidéket. A természetközeli mozaikos táj alapot nyújtana a táj- és agroturizmus fellendítéséhez (Balogh 2002 alapján).

#### 6.4.2.8. *Ökológiai „szolgáltatások"*

Az összetett tájfejlesztési rendszer előnyei eléggé sokrétűek, de számos olyan tényező van bennük, amelyeket azonnali és létfontosságú adománynak tekinthetünk. Ezeket az újjáéledő ökoszisztéma és a rehabilitált táj nyújtja:

- a jelenlegi helytelen földhasználati módszerek által okozott defláció (szélerózió) és vízerózió az állandó növényzeti borítottság miatt csökken;
- a talajból kilúgozódó tápanyagokat ugyanezért a szezonális áradásokkal járó üledék lerakódása pótolja;
- a magas árszintek okozta veszély és kockázat az azonnal és véglegesen lecsökkenő árszintek miatt megszűnik vagy csökken;
- a magasabb fokú biodiverzitás számos kiegészítő és közvetett előnnyel jár még a jelenlegi árutermelő agrár-ökoszisztéma számára is: a madarak segítenek a kártevők elleni védekezésben, a méhek és más rovarok a növények beporzásában;
- a nedves területek hulladéklebontási kapacitását nem szabad lebecsülni. Több ízben is kimutatták, hogy a vízi környezetben élő társulások igen fejlett öntisztító képességgel rendelkeznek, és a lerakódott vagy lebegő anyagok biológiai lebontása útján csökken a rendszer káros környezeti terhelése.

Egy ilyen összetett megoldás esetén a társadalom biztonság iránti igénye is minden fontosabb területen kielégíthető. A csökkent árvízveszély mellett az emberek könnyebben és többen találnak tisztességes megélhetést saját biorégiójukon belül, és a folyamat során a régió ökológiai rendszereinek biztonsága is megerősödik.

Az árterek szerepének újragondolása máshol is megkezdődött már. A Dráva mentén például hidrológiai modellezéssel nézték meg, mennyire lehet a régi, levágott holtágakban a víz visszatartásával, a talajvíz és talajnedvesség megőrzésével enyhíteni a vízháztartási problémákon (Salem et al. 2020).

### 6.4.3. Vízaratás

Indiában, ahol a mértéktelenül növekvő népesség nyomását elsőfajú hibákkal terhelt vízügyi nagyberuházások is súlyosbítják, ezért a vízellátás minden szin-

ten nagyon komoly gond, egyúttal a legjobb és legtöbb példát látjuk az alternatív vízgazdálkodásra is. India hagyományai ugyanis lehetővé teszik, hogy modern módszerekkel, a schumacheri értelemben vett közbenső technológia alkalmazásával elégítsünk ki olyan igényeket, amelyek a technokrata szellemű nagyberuházásokkal nem oldhatók meg, és amelyeknek a kielégítése elejét veszi számos szociális, társadalmi gondnak is azáltal, hogy visszaadja a vidéki lakosság önrendelkezésének lehetőségét.

Az alapvető problémát ott is a vízgyűjtők növényzetének lepusztítása és a monszun időjárás-mintázatának sajátossága adja. A csupasz területen a hirtelen lezúduló víz nagyon nagy felszíni lefolyással és szinte semmilyen beszivárgással nem rendelkezik, ezért nem csupán a növényzet sínyli meg, hanem a talajvíz szintje is csökken az utánpótlás hiánya miatt. Az utóbbi néhány évtizedben azonban egyre nagyobb méretekben valósítanak meg olyan kis beavatkozásokat, amelyek együttesen a „vízaratás" nevet kapták, vagyis a monszunidőszakban lezúduló, nagy mennyiségű vizet fogják meg többféle módon. A legegyszerűbb és legeredményesebb a monszunidőszakban vízzel telt, de egyébként szárazon álló, időszakos patakmedrekre keresztgátakat építeni, és (a Radzsasztán államban dzsohadnak, Gudzsarat államban bandarának nevezett) kis víztárolókat létrehozni (Montaigne 2001b, Borsos 2003).

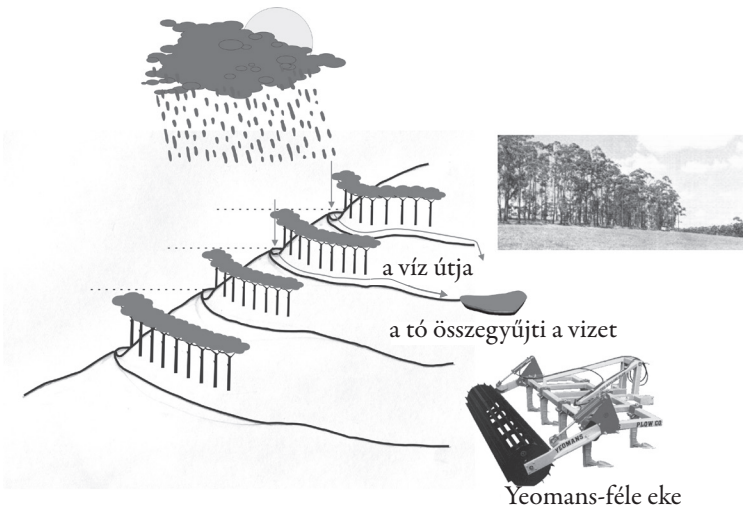
Ellentétben a nagy vízügyi beruházásokkal, e beavatkozásoknak inkább gyógyító és nem károsító hatásuk van a terület vízháztartására, a lakosságnak meg az év nyolc hónapjában rendelkezésére áll az oly nagy kincs, a víz. A patakmedreket, amelyeken a bandarákat építik, száraz évszakban szinte lehetetlen felfedezni, szürkén meghúzódnak a kopár tájon. Csak monszun alatt derül ki róluk, mit tudnak, amikor a medrükbe kőből, kevés cementtel, helyi tervezéssel és kivitelezéssel épített gátak (mérnök itt sok mérföldes körzetben nincsen) mögött a kimélyített meder megtelik (Borsos 2003: 152). Lelkes önképzett szakemberek járják az országot, és számos bandarát vagy dzsohadot építtetnek a helybeliekkel. Az eljárás a vízellátás megoldásán túl a talajvíz utánpótlását is segíti, mert a viszonylag nagy terjedelmű, de béleletlen tározók fenekén a talajba tud szivárogni a megfogott víz egy része. Másrészt az eddig lesodort talajt a gát megfogja, mögötte kiülepszik.

A nagy gátakkal ellentétben azonban ezt nem tölti fel, mert tavasz végére kiszárad és a helybeliek kihordják belőle a talajerőpótlásnak kiválóan használható üledéket. Van olyan hely, ahol kifejezetten víztározó tavakat is építenek a vízfolyás mellé, amely csak bizonyos vízszint felett töltődik, egyetlen csepp sem megy tehát az értékes monszunesőből kárba. A Dzsaipurtól, Radzsasztán fővárosától nem messze fekvő Neemi falujában csodát művelt a módszer, a korábban teljesen kiszáradt kutak miatt elvándorolt gazdák visszatértek, nemhogy nem vándorolnak el többé, de idénymunkásokat foglalkoztatnak a dús termés betakarításához. A siker titka, hogy a gátak a falusiak kezelésében

maradnak, nem valami idegen és távoli, általuk befolyásolhatatlan hatalomnak érzik kitéve magukat, hanem sajátjukként gondozzák (Montaigne 2001b).

Ahogyan a gátak is méret kérdései, az öntözés sem önmagában baj, hanem ha nem megfelelően csinálják. Afrikában elég sok olyan terület van, amely csak látszólag száraz, és valójában tele van a helyi nyelven *dambó*nak nevezett, mocsaras területekkel. Zambiában, Zimbabwében nem a víz hiánya okoz gondot, hanem hogyan lehetne azt a magasabban fekvő földekre kijuttatni: a szegénységgel sújtott lakosságnak nincs pénze a drága megoldásokra. Erre kínál gyógyírt az a lábbal hajtott szivattyú, amelyet egy amerikai vállalkozó szinte megszállottan terjeszt az ottani gazdák körében, és amelynek beszerzési ára is elérhető számukra, üzemeltetése pedig nem függ a kőolaj világpiaci árától. Egyben az is biztosítva van, hogy belátható időn belül lábbal nem fogják kiszivattyúzni az egész készletet, és a vizet oda juttatják, ahol ténylegesen szükség van rá: saját munkaerejét nem pocsékolja az ember (Postel 1992, Montaigne 2001b).

Egy másik megoldás, amely a mezőgazdasági vízigény csökkentését szolgálja és hasonlóan egyszerű, helyben megvalósítható módszereket alkalmaz, az Ausztráliában az 1950-es években kifejlesztett, de másutt nemigen alkalmazott, úgynevezett „áthajlási vonalak rendszere" (*keyline system*, kulcsvonalak rendszere) (Yeomans 1993).



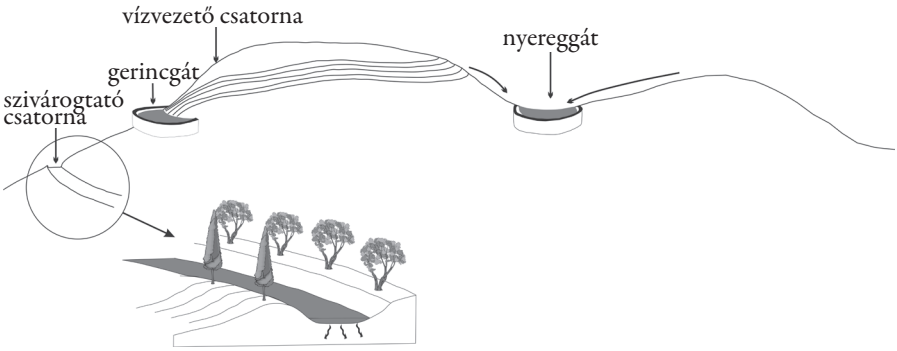

44. ábra. *Yeomans rendszere*

Ennek lényege, hogy a táj domborzatának a lehető legkedvezőbb módon való kihasználásával a lehulló csapadékot „megdolgoztatják", vagyis többféle elmés beavatkozásnak köszönhetően nem engedik egyszerűen a mélyebb területek felé lefolyni, hanem előbb elvezetik minél több helyre, sokszor éppen a gerincek, dombáthajlások és peremek felé. Ahol viszont alkalom kínálko-

zik rá, ott a terepen kialakított vízgyűjtő eszközökkel, gátakkal és töltésekkel megfogják, így kényelmes helyi tározók jönnek létre. Egy-egy farm egész területét be lehet így hálózni, a szintvonalas árkok rendszerét külön erre a célra kialakított, véső formájú ekével húzzák meg. A módszer kidolgozója, P. A. Yeomans eredetileg a hazájában is gondot okozó, egyenetlen csapadékeloszlást szerette volna kiegyenlíteni, és hatalmas biológiai produktivitás növekedést ért el ezzel a módszerrel. Az áthajlási vonalak nem azonosak a szintvonallal, hanem a lejtő inflexiós pontjainak összekötésével keletkezett görbék, amelyek egy-egy oldalvölgyből kifelé haladva a gerinc vagy él felé lejtenek, ezért a víz, amely egyébként a völgy közepén rohanna le, az itt húzott árkok vagy alagcsőszerű járatok segítségével, amelyekbe belefolyik, a gerincek és élek felé terelődik, ezzel a dombok hullámos felszínét egyenletesen nedvesíti (Baji 2013: 15).

Egy igazán zseniális asszociációval India olyan részein, ahol kő kevés van, az ott növő, a helyiek által *khus*nak nevezett, fűféle növényt *(Vetiver zizanoides)* használják a szintvonalas gátak elkészítéséhez. Ennek eredményeként a növény rostjai az általa felfogott víz hatására bomlani kezdenek, így kiváló termőtalaj is keletkezik ott, ahol a víz éri (World Bank 1987).

A Yeomans-féle rendszert fejlesztette tovább Mollison (Mollison 1988, 1990).




45. ábra. *Mollison vízgyűjtőrendszere*

Míg a keyline gyakorlatilag nem más, mint egy bonyolult öntözőrendszer, a permakultúrában ez csupán egyike az átfogó tervezés elemeinek. Itt alapvetően kétféle csatornát vagy árkot különböztetünk meg, amellyel a vizet manipulálhatjuk. Az egyik a *vízvezető csatorna* (diversion channel), amelynek a tervezésekor az a szándék, hogy abban a víz a kívánt irányba *mozogjon*. Ezek rendszerint a terepszintről összegyűjtött vagy vízfolyásból (patakból, folyóból, esetleg egy másik gát túlfolyójáról) származó vizet vezetik el valahova, a terepszint alakulását kihasználva. Ezzel ellentétes a *szivárogtató vagy szikkasztó árkok* szerepe (swale), amelyek úgy vannak tervezve, hogy bennük *a víz ne induljon el* egyik irányban sem, hanem minél nagyobb mennyiséget szikkasszon el, szivá-

rogtasson be a talajba. Ezért a vízvezető csatornákkal ellentétben ezek széles, lapos terepképződmények, amelyekben nyílt vízszint nincs. Ha mégis van, akkor rossz volt a tervezés, sűrűbben vagy szélesebbre kell építeni őket. Vonalvezetésük a terepszintet követi, tehát a beléjük kerülő víz nem gyorsulhat fel. Így nincs más útja, mint beszivárogni a talajba. A szikkasztó árkok alatt a talajnedvesség állandóan magas szinten marad, ezért a talaj szántóföldi kapacitása megnő. Megfelelő növényzettel kombinálva produktív vegetációt lehet körülötte (alatta és benne) kialakítani.

A harmadik fontos része a rendszernek a különféle *víztározók, gátak* láncolata, amelyek különféle méretűek, alakúak és más-más célt szolgálnak. A legmagasabban a két dombtető közötti *nyeregbe* épített gátak vannak, amelyek a dombtetők alá épített vízvezető csatornákban felfogott és beléjük vezetett vizet tárolják elsősorban tűzivíz-ellátás, vaditató és bizonyos mértékű öntözés céljából. A *gerincgátak* még ennél is valószínűtlenebb helyen, a dombok gerince mentén épülnek egymás alatt megfelelő távolságban, és mindegyik a domb két oldaláról érkező vízvezető árkok vizét fogadja magába, és hasonló célokra használatosak. A dombvonulat *áthajlási pontjain* létesített gátak már igazi víztározók, a bennük összegyűlt vízzel öntözni lehet. A *völgyzáró gátak* viszont létező vízfolyásra települnek, ezért túlfolyót kell nekik biztosítani, és nagyon óvatosan kell megtervezni. A *szintvonalra* akkor lehet gátat építeni, ha a lejtés 8% vagy kisebb. A hirtelen lefolyó vizek megfogására a *szabályozó gát* (check dam) alkalmas, amely a víz útjába van építve, és ilyenkor megtelik, csak mérsékelt mennyiségű vizet enged át. Az ilyen építményeknek rengeteg fajtája van, például a nagy folyókon is alkalmazott *bukógát*, amely csak egy bizonyos vízszint felett engedi át a vizet, a betonból épült szabályozó gát, amelynek az alján egy cső biztosítja a rendes átfolyást, az *üledékgát*, amelynek szerepe, hogy az eróziót megfogja, hasonló a *rőzsegát* és a *kőkosár* (gabion), amelyek a víz útjába rakva lassítják és mérsékelik a talajpusztulást, vagy lehet munkára is fogni, ha egy kis vízikereket építenek bele.

A gátak építését ilyen kis léptékben sokkal kisebb, de nem kevésbé gondos tervezőmunka előzi meg, helyi anyagok használhatók, gyakorlatilag semmilyen idegen bevitel nem szükséges, kivéve a gépészeti elemeket (például túlfolyók vagy zagyleeresztő zsilipek). Izrael – kényszerűségből – élen jár a permakultúráshoz hasonló rendszerek tervezésében, hiszen a Negev-sivatagban a kevés csapadéknak is elfolyik a fele, ezért hasonló vízaratási módszereket vetettek be. Sőt, még a sós vizet is felhasználják sótűrő haszonnövények öntözésére (Gabbay 1994: 147).

A víz megtartásának két alapvető módja – a földtöltésekkel kialakított nyílt *tározó* és a felfogott vizet a felszín alatt vagy a földbe mélyítve kialakított tárolókban (ciszternában) raktározó *víztartály* – között költséghatékonyság tekintetében fordított arányosság áll fenn. A tartályok ára ugyanannyi víz tárolása

esetén többszöröse lehet a gátakénak. Másrészt, míg a tartályok ára nagyságukkal arányosan növekszik, a földgátaknál van egy tartomány (500-1500 $m^3$ tároló kapacitás között), ahol a befektetett földmunka fajlagos költsége kisebb, mint akár a kisebb, akár a nagyobb gátaknál. Egy köbméter vizet tehát ebben a tartományban lehet a legolcsóbban tárolni, ami eleve kizárja a nagy gátak gazdaságosságát (Mollison 1988).

Szlovéniában nagy múltja és divatja van a kis méretű, a területi vízháztartást vízvisszatartással kedvezően befolyásoló tavacskák működtetésének. Ezek jelentős része nem felszíni vízfolyás elgátolásával jön létre, hanem a kimélyített tómedret források és a talajvíz táplálja. Ezek ugyanúgy rendelkeznek elterelő csatornákkal a hordalék és a vízfelesleg elvezetésére, mint a permakultúrás létesítmények. Fenntarthatóságuk és környezeti hatásuk az üzemeltetés szakszerűségétől függ, de adott esetben a tározótavakkal együtt az árvízveszély csökkentését és az aszályos időszak enyhítését is szolgálják (Ferk et al. 2020).

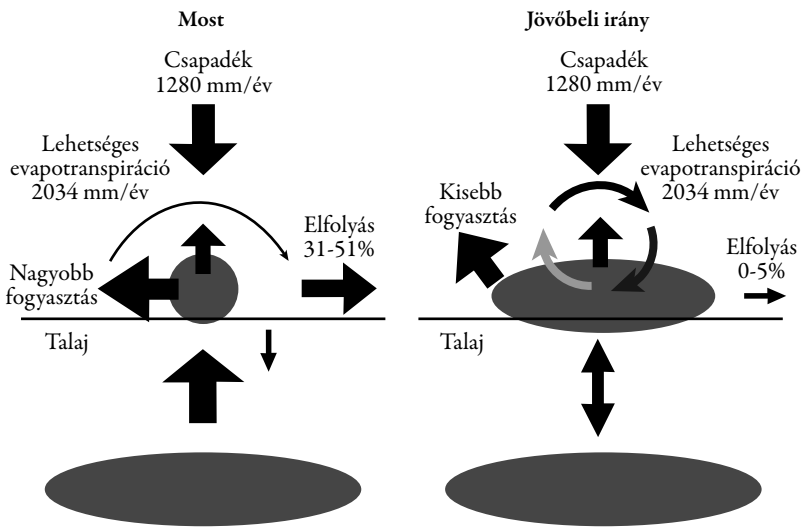
### 6.4.3.1. *Auroville*

Ezeket az elveket egy Shri Aurobindo nevű jógi sajátos filozófiájára épült indiai közösség, a Tamil Nadu államban található Auroville lakói a gyakorlatban is sikeresen alkalmazzák. Alapításakor, 1968-ban a ma majdnem 3000 fős város területe vörös laterittalajból álló sivatag volt, amit az év nagy részében a szél erodált, az esős évszakban meg agyagos mocsárrá változott. Ez az embernek nem való, terméketlen táj a kétszáz éves brit uralom alatt alakult ki, amikor az őshonos trópusi szárazerdőket faanyagukért kiirtották, és a beinduló erózió miatt a környéken máshol azóta sem sikerült a növényzetet újra megtelepíteni.

A ma itt lakók ezzel szemben környezettudatos rendszerben élnek, amelynek köszönhetően olyan sikeresen végezték el a táj „rehabilitációját", hogy az egyre gyakoribb szélsőséges körülményektől sem kell annyira tartaniuk. Úgy gondolják, hogy az évtizedek alatt kidolgozott, környezetkímélő életformájuk hasznos „sorvezető" lehet az éghajlatváltozásban érintettek boldogulásához. És tapasztalataik őket igazolják. 2011-ben a Thane hurrikánt, 2015-ben egy kivételesen esős évszakot, 2017-ben az aszályt viselték el nagyobb megrázkódtatások nélkül, miközben a környező településeken hatalmas pusztítást végzett a szél, 3 milliárd dollárnak megfelelő kárt okozott az áradás, és a szárazság miatt kiveszett termés sokakat kergetett öngyilkosságba (Nagy 2018). Hogyan lehetséges ez? (Lásd a 25. színes ábrát.)

Az 1980-as években, amikor személyesen jártam a már akkor ökofalunak nevezett településen, a táj helyreállításának éppen csak a kezdő lépéseit tették meg: biogáz-generátorokat építettek, napelemeket szereltek, de az időjárás hatásainak még eléggé ki voltak téve (Borsos 2003). Azóta a következetesen alkalmazott alapelvek – minél kevesebb víz felhasználása, a vízveszteség csökkentése és a vízfölösleg kezelése – meghozták gyümölcsüket. Mint Indiában máshol

is, nem az abszolút szárazság a gond, hanem a monszun éghajlat miatt nagyon rövid idő alatt leeső nagyon sok csapadék legalább egy részének a felfogása, megmentése és tárolása a szűkösebb időkre. A helyi maharadzsák ezért évszázadok óta óriási víztározókat, tavakat, csatornarendszereket hoztak létre az esővíz gyűjtésére. Ezekre az előzményekre alapozva – amelynek előnyeit máshol a gyarmati időszak alatt elfelejtették – az auroville-iek is kialakítottak egy olyan csatorna- és sáncrendszert, amely esővízgyűjtő tavakba tereli a vizet, ahonnan fokozatosan beszivárog a talajba, és a felszín alatti vízkészletet tölti. Az épületekről lecsorgó esővizet ciszternákban gyűjtik, a szürke (fekáliát nem tartalmazó) szennyvizet pedig megfelelő szellőztetés és gyökérzónás kezelés után öntözésre használják (lásd a 26. színes ábrát). A lakók számára külön weboldalt indítottak, amely ismerteti a táj vízzel kapcsolatos sajátosságait, és tanácsokat ad az okosabb vízfelhasználásra (Auroville Water Group: http://aurovillewater.in/).




46. ábra. *A jelenlegi, túlnyomórészt talajvízre alapozott vízellátást a jövőben egyre inkább a felszíni vizek irányába kívánják eltolni*

Ahogyan a pozitív visszacsatolás spirálja beindult akkor, amikor az őserdőt kiirtották, a szorgos munka eredményeként most egy fordított pozitív visszacsatolási folyamat élteti a tájat: a megmaradó víz és az újratelepített őshonos növényzet kedvez a vegetáció fejlődésének, az újra kialakult erdő a szivacshatás miatt még több vizet fog meg, immár a gyűjtőrendszer eróziós hatása nélkül. Több millió fát, bokrot és kúszónövényt ültettek el, mire kialakult Auroville térségében a természetes, trópusi örökzöld, száraz erdő (Nagy 2018). Hosszú távú vízgazdálkodási stratégiát alakítottak ki, ami a tapasztalatok fényében folyama-

tosan formálódik (Surroca et al. 2018). A stratégia hibája, hogy a jövőben is ugyanannyi csapadékkal számol, mint a jelenben, ami egyáltalán nem biztos, hogy így lesz (Turner és Annamalai 2012).

#### 6.4.3.2. *Adelaide*

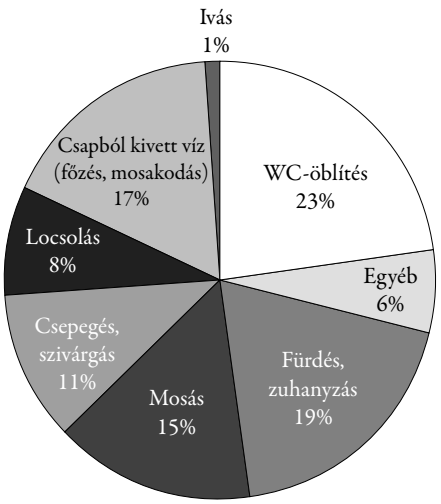
A kétezres évek elején Ausztráliát sújtó katasztrofális szárazság, mely során több nagyvárosban komoly vízellátási gondok adódtak, és vízkorlátozást kellett bevezetni, országszerte tudatára ébresztette a kontinens lakóit, hogy az ivóvíz minőségű vízzel kiépített, hálózatos vízellátás ilyen körülmények között már nem tölti be a feladatát. A folytatásban azonban csupán Adelaide, Dél-Ausztrália fővárosa volt annyira következetes, hogy megpróbált újszerű, elsődlegesen a záporvíz tárolásán alapuló vízforrást bevezetni (Bettini et al. 2013).

### 6.4.4. Kétkörös rendszerek

A technikai megoldások jellegzetes példája a városok – és már lassan a vidék – vízellátásának ellentmondásos jellege. Míg egyik oldalon egyre bonyolultabb és költségesebb vízkivételi rendszereket és víztisztítási módszereket alkalmaznak, hogy az ivóvíznek titulált vizet előállítsák, addig a másik oldalon komoly tervezési problémákat kell megoldani, hogy megszabaduljanak az egyébként ingyen érkező vízellátástól, a városra hulló csapadéktól. A legtöbb városban azért kell extrém méretűre (ezért drágára) tervezni a csatornákat és a vízelvezető rendszereket, hogy az időszakosan előforduló heves esőzések következtében beléjük zúduló vízmennyiséget el tudják vezetni. Az elvileg tiszta esővíz, amely legfeljebb a tetőkön és burkolt felületeken található szennyeződéseket veszi fel, a városi szennyvíz tisztítására kiépült szennyvíztisztítók kapacitását terheli, holott semmi szükség nem lenne a tisztítására és számos vízigényt el tudna látni. Koncepcionális tévedésről van szó itt is, amelyre a kézenfekvő megoldást a vízigények minőségi rangsorolása és a decentralizált ellátás lehetőségeinek megteremtése jelentené. A 20. század elején és közepén a fejlett világ városainak nagy büszkesége az volt, hogy lakosságukat és sok esetben iparukat is ivóvíz minőségű vízzel látták el, bármit jelentsen is ez a szó. Mindenesetre válogatás nélkül mindenütt ugyanaz a víz folyt a csapokból és a vécétartályokból egyaránt (Simonffy 2011b).

A 20. század végére azonban már ez sem volt elég, és a csapvízben megrendült bizalom miatt a fogyasztó palackos vizet kezdett el inni. Közben a csapból még mindig a klórozással ivásra „alkalmassá" tett víz folyik, amelyet nagyrészt felszín alatti vízbázisok megcsapolásával vagy felszíni vízkivételi művekkel nyernek. Az esővíz továbbra is elfolyik, bár manapság már egyre több helyen külön gyűjtőrendszerben, hogy a szennyvíztisztítókat ne terheljék. Ám nem az elvezetést kellene megkettőzni, hanem az ellátást: ha a vízszolgáltató felvállalná, hogy a jelenleg kiépített vezetékeken használati vizet juttat el a fogyasztóhoz és nem

ivóvizet, akkor az esővizet minden további nélkül bele lehetne vezetni az elsődleges vízellátásba, ezzel jelentős mértékben csökkentve a felszín alatti vízbázisokra háruló nyomást. Az ideális megoldás a kétkörös vízrendszer lenne, ahol a használati víz mellett minden lakásban van egy olyan csap is, amelyen ivóvíz érkezik. Ennek nem kellene ugyanolyan komoly vezetéknek lennie, hiszen ivóvízre mindössze napi egy, ha a főzést is belevesszük, 2,5 literre lenne szükségünk (47. ábra), a többi nyugodtan mehet esővízzel.




47. ábra. *Vízfelhasználás a háztartásban*

Persze vannak technikai, szervezési és főleg szemléleti problémák egy ilyen radikális váltás útjában. Indiában már városi körülmények között is alkalmazzák a közbenső technológiát a vízaratásra. Az ország legkisebb államában, Goában például évi 3000 mm csapadék esik, mégis szikkadt, kiszáradt a táj. A tengerpart közvetlen közelében fekvő, sziklás domboldalak a denudálás (lecsupaszítás) és a város nagy területeinek leaszfaltozása, lebetonozása után már egyáltalán nem tartják a rájuk eső vizet, hanem közvetlenül az Arab-tenger vizét szaporítják vele. Egy főiskola azonban úgy döntött, hogy nem hagyja 3000 hallgatóját szomjazni, és kétféle módon segítenek magukon: a felhagyott, kiszáradt kutakba és forrásokba, sziklák repedéseibe vezetik a háztetőkre, autóutakra és parkolókra lehulló csapadékot, amely ott elszikkasztva a talajvíztükör szintjét emeli, illetve ciszternákben gyűjtik saját használatra. A rendszer még indiai viszonylatban sem kerül sokba, és ha egyszer a helyén van, minimális karbantartást igényel csupán (Noronha 2003).

Kisebb igények esetén – például családi háztartás vagy háztáji, családi gazdaságok számára – az esővíz tartályokban történő felfogása igen ígéretes megoldás

lehet, különösen akkor, ha a tartály olcsón előállítható és nincs túlbonyolítva. Vidéki körülmények között a vízaratás legegyszerűbb módja az esővíz háztetőről való felfogása, a gyűjtőfelület adott, csak az ereszcsatorna alá kell egy hordót állítani. A vízínségre tehát régóta rendelkezésre állnak a megoldások, csak nem használják ki eléggé őket, mert a nagy, központosított rendszerek nem érzékelik – nem is érzékelhetik – a helyi igényeket. A jelenség általánosságban is igaz, hiszen a globalizációt ellenző tüntetők a szegénység felszámolására létesült nemzetközi szervezeteket éppen azért támadják, mert azok deklarált céljukkal ellentétes eredményeket érnek el.

A vízaratás helyi módszereinek régi hagyományai vannak szerte a világban, és csak fel kellene újítani ezeket. Thaiföldön, Indonéziában és a Fülöp-szigeteken éppen ezt teszik: előzetes felmérést követően a rendszerint nem kormányzati társadalmi szervezetek által szervezett programok keretében olyan egyszerűen megvalósítható eszközöket adnak a helyiek kezébe, amelyek nemcsak a technikai-műszaki megoldást hozzák emberközelbe, hanem „pénzügyi" konstrukciót is kínálnak a beruházás fedezésére. Indonéziában például kecske bértartására kell vállalkozniuk az esővízgyűjtő ciszterna reménybeli tulajdonosainak, és a szaporulat felnevelésével „fizetnek" a kölcsönt folyósító gazdának (Appan 2001). Az sem igaz, hogy a helyben gyűjtött víz veszélyes és fertőzött. Valójában az esővíz általában (kivéve a savas és higannyal dúsított esőket) az egyik legtisztább formája a víznek, bár ásványi anyagokban szegény. A feladat csupán megőrizni tisztának, amit a felszín alatti tartályokban lehet legkönnyebben elérni. Ha fény nem éri, nem indul meg az esetlegesen belekerült mikroorganizmusok és főleg az algák szaporodása. A fizikai szennyeződések kiszűrésére elmés szerkezetek és különféle szűrők alkalmazhatók (Mollison 1988).

### 6.4.4.1. *Vízönellátó*

Még tovább megy a helyi csapadék felfogásában Országh József, a koronavírus-járványban 2020 őszén elhunyt magyar származású, Belgiumban élő vegyész és egyetemi tanár. Országh egy komplex rendszert fejlesztett ki, amit Vízönellátónak nevezett el (a magyar nevek az eredeti francia kifejezések kissé erőltetett tükörfordításai). Ebben nem csupán a lehulló csapadék kezelésével, hanem a víz használat utáni sorsával is foglalkozik. A rendszernek egy hátulütője van, hogy jól csak vidéki körülmények között működik, városokban a megvalósítása nehézkes, és nem is valószínű, hogy a jelenlegi beépítettségi mutatók mellett vele a teljes körű ellátás megoldható lenne.

Kertes házakban azonban ideális technológia egy olyan világban, ahol az éghajlatváltozás következtében várhatóan egyre kevesebb lesz a hagyományosan rendelkezésre álló vízforrások (vezetékes víz, ásott és fúrt kutak vize, felszíni vizek, talajvíz, esővíz) utánpótlása. Ezért nem csupán meg kell fogni minden csepp csapadékot, de azzal takarékosan is kell bánni. Az összegyűjtött csapadék

célszerűen föld alatti ciszternában tárolható a leghatékonyabban. Mediterrán vidékeken ez már régóta bevett megoldás, a kidolgozója által Teleső-rendszernek (a teljes esővízgyűjtő rendszer rövidítése) nevezett modern változata azonban a mérsékelt égöv, de adott esetben más éghajlati övek és övezetek lakói számára is alkalmas a családi önellátás megvalósítására – legalábbis vízfelhasználás tekintetében.

Országh valóban körültekintően tanulmányozta azokat a tényezőket, amelyek egy ilyen házilagos technológia hátulütői lehetnek. Az általános vélekedéssel ellentétben az esővíz nem csak kertöntözésre, vécéöblítésre és az úszómedence feltöltésére alkalmas, hanem szó szerint minden igényt kielégít – megfelelő tervezéssel és kezeléssel. Lényege, hogy az épületek, melléképületek tetőfelületeiről az ereszekkel megfogott és egy föld alatti vezetéken át a ciszternába vezetett vizet egy házi vízmű segítségével vissza lehet juttatni a házba, ahol ugyanúgy minden célra felhasználható, mint a vezetékes víz. Ehhez szűrőkre, a tető lemosását végző és a szilárd szennyeződéseket tartalmazó első adag víz elöntésére, szűrésre, levegőztetésre és a túlfolyó felől vagy máshonnan idegen anyag (állatok, rovarok, szél által szállított növényi részecskék, pollen stb.) bejutásának megakadályozására van szükség. Ha nem használják folyamatosan, az ilyen autonóm rendszereknek egy komolyabb problémája szokott lenni, hogy rendszeres térfogatcsere híján bebüdösödnek. A tárolóban leülepedett iszap, a nem megfelelő tetőburkolat, a vízmelegítő bojler vagy állati tetemek is okozhatnak kellemetlen szagokat. Ezt a problémát levegőztetéssel (egy nagyobb teljesítményű buborékoltató készülék behelyezésével) rendszerint meg lehet oldani. Ha ivásra is kívánjuk használni, fordított ozmózisos szűrőt kell arra a csapra helyezni, ahonnan az ivóvizet kívánjuk nyerni. Ezt ma már sokan a vezetékes ivóvízre is rákötik – és teljes joggal. Az ivóvízszabványok elavultak, és egy mechanikus, technokrata szemléletet tükröznek, ezért alkalmatlanok valóban egészséges víz előállítására (Országh 2020). A Teleső-rendszer azonban igazán a komposztálással és a szennyvíz kezelésével együtt működik jól.

#### 6.4.4.2. *Komposztálás*

Amikor azt állítom, hogy ma Európában az egy főre jutó napi vízfelhasználás 240 liter, akkor ebben a kézen-közön elszivárgó, elveszett víz is benne van, amit elő kellett állítani, meg kellett tisztítani, de soha nem jutott el a fogyasztóhoz. De benne van még egy fontos vízfelhasználási mód is, ami – a megbotránkozás ide vagy oda – teljesen felesleges: a toalettek öblítésére használt víz. Márpedig ez egy városi család vízfelhasználásának egyharmadát is kiteheti az intézményekről, irodákról nem is beszélve. Ivóvíz minőségű vizet használunk fel arra, hogy egy teljesen használható, értékes anyagból fertőzővé váló, veszélyes hulladékot állítsunk elő. Pedig régóta rendelkezésünkre áll már számos olyan módszer, amelyyel ezt a jelenséget ki lehet küszöbölni. Nem arról van szó, hogy víztakarékos

módon kell a saját székletünktől megszabadulnunk. Maga az elv, hogy vízzel hígítsuk fel, hibás. Komposztálni kell.

A komposztálás – mint a mezőgazdasági kötetben láttuk – régóta ismert eljárás a növényi és – egyes esetekben – állati hulladékok takarékos visszaforgatására, újból erőforrássá való alakítására. A komposztvécé ennek egy sajátos formája, amikor saját bélsarunkat és vizeletünket alakítjuk át hulladékból értékes tápanyaggá. Ehhez nem kell mást tenni, mint újító szemmel nézni a régire: az árnyékszék bizonyos körülmények között kiválóan megfelelt a célnak, és bizonyos átalakításokkal most is megteszi. A lényeg, hogy a széklet és vizelet viszonylag magas nitrogéntartalmát nagy cellulóztartalmú anyaggal (szalma, faforgács, kaszálék stb.) ellensúlyozva és a felesleges vizet elpárologtatva olyan aerob körülményeket hozunk létre, amelyek között a mindenhol jelen lévő aerob mikroflóra kényelmesen le tudja bontani mindkét anyagot, és a keverékből megfelelő hőmérséklet elérésekor nagy tápanyagtartalmú szerves anyagot állít elő. A folyamat teljesen analóg a kerti komposztálással, csak a kiindulási anyagok mások (Gellért és Ruepp-Vargay 2001).

Vidéki körülmények között bárhol megvalósítható, és némi átalakítással, egy kis plusz technológia beépítésével (például mesterséges szellőztetőventilátorral), valójában a városokban sem lenne akadálya a vízöblítéses vécék kiváltásának. A helyi igényektől és lehetőségektől függően számos megoldás van, az úgynevezett kétaknás kültéri árnyékszéktől a hordozható elektromos fűtésű változatig, de mindegyik sajátossága, hogy víz nem kell hozzá, és a végeredmény rendkívül kis mennyiségű (kedvező esetben évekig „tölthető" ürítés nélkül), szagtalan, kellemes barnás színű és földszerű tapintású anyag, amely kertbe, parkba minden további nélkül kihordható (Ertsey 1997) (lásd a 27–28. színes ábrát).

#### 6.4.4.3. *Alomszék és komposztvécé*

A fentebb vázlatosan ismertetett, az emberi ürülék komposztálására tervezett komposzttoalett vagy komposztvécé kiváltására ajánlott másik megoldás az úgynevezett alomszék (Országh 2020: 350). Ez tulajdonképpen egy mini komposzttoalett, amelyben a komposztálás első fázisa már megtörténik, de további kezelést igényel. Méretéből következően nem szükséges hozzá nagy hely, akár városi lakásban, a hagyományos vízöblítéses vécé helyére is berakható, hátránya viszont, hogy amennyiben ilyen helyen használják, állandóan gondoskodni kell a széntartalmú anyagok (fatörek, fűrészpor, forgács, kerti hulladék, szalma stb.) utánpótlásáról és az alomszék tartalmának viszonylag sűrű ürítéséről. További gond, hogy kell hozzá még egy külön komposzthalom vagy komposztáló keret, ahol a komposztálás tovább folytatható, amíg el nem éri – nagyjából egy év után – ugyanazt az állagot, mint a komposztvécé tartalma (lásd a 29. színes ábrát).

Használatának kedvező és kedvezőtlen tapasztalatait a következőképpen foglalja össze egy kommentelő:

Pozitív tapasztalatok:

1. Egyszerű és olcsó elkészíteni.
2. Kényelmes használni (egy vízöblítéses vécé ülőkéjével van ellátva).
3. Helyes használat esetén szagtalan.

Negatív tapasztalatok:

1. Furán néz rád mindenki, aki először hall ilyesmiről.
2. Kicsit macerás, hogy a fűrészport kézzel, kis lapáttal kell használni.
3. Viszonylag kevés használat után már üríteni kell.
4. Még nem tapasztaltam, de télen, amikor minden fagyott, gond lehet az ürítés.
5. A széklet lefedéséhez szükség van cellulóz alapú törmelékre, ami nem mindig áll rendelkezésre.
6. A legnagyobb negatívum: óriási visszalépés komfort tekintetében (ürítés stb.).
7. Minimális vízre azért itt is szükség van – használat után még le kell spriccelni a fedőréteget (Sleeper, komment 2018).

Érdemes egy pár szót szólni az alomszék és a száraz toalett különbségéről. Vidéki házamban a komposztáló mellékhelyiség 24 éve üzemel különösebb zavarok nélkül. Valójában csak méretbeli és kényelmi különbségek vannak köztük, egy modern komposztvécé pontosan úgy működik, mint az alomszék, csak éppen helyben komposztálja a beléje került anyagot, nem kint a kertben vagy egy erre a célra kialakított telepen. A közhittel ellentétben nem igényel különösebb tervezést – ahogy az alomszék sem –, és komolyabb szaktudás nélkül is megépíthető. A friss és az érett komposzt elkülönítéséről, az utóbbi üríthetőségéről kell csak gondoskodni, ami a beltéri létesítmény esetében például a ház alapja mellé ásott, külső ürítő aknából lehetséges az e célra kialakított nyíláson keresztül. A szellőzéshez sem kell nagy technikai felkészültség, egy fekete színű, a ház gerince fölé érő, nagyobb átmérőjű cső a kéményhatás kihasználásával megoldja a problémát: a napsugarak még télen is felmelegítik annyira a sötét színű csövet, hogy a benne levő levegő kiáramoljon, és helyébe a komposztáló üregből érkezzen az utánpótlás. Karbantartásmentes, ami az alomszékről nem mondható el. Megfelelő méretezés esetén elegendő négy-öt évente egyszer üríteni.

### 6.4.5. A szennyvízkezelés integrált megközelítése

Az immár hagyományosnak nevezhető megközelítésben a környezeti, gazdasági és társadalmi fenntarthatóságról mint háromdimenziós rendszerről beszélünk, amelyek egymást kölcsönösen kiegészítik. Amíg ezt a három dimenziót egymással egy szinten lévőnek tekintjük, szükségszerűen elsőfajú hibát követünk el. Amikor a rendszerökológia által alkalmazott holisztikus, egységszemléletű hierarchiában gondolkodunk, a cél az, hogyan tudunk a szennyvízkezelésben is a környezeti feltételeknek megfelelő rendszereket alkotni, amelyek azokat asszimilálni tudják, nem pedig idegen testként kezelni. Ekkor értelmét veszti az életciklus elemzésnek a fogalma is (Grönlund és Carlman 2013). Érdekes

megfigyelés például, hogy ha a szennyvíztisztítóból kikerülő szennyvíziszapot egy hulladéklerakóban helyezzük el, és a lerakó csurgalékvizét megint ráeresztjük a szennyvíztisztítóra, a folyamatban a csurgalék körülbelül 10%-a óhatatlanul a befogadóba (talajba, felszíni, felszín alatti vízbe) kerül. Aztán az iszap megint megy a lerakóba stb., tíz kör után gyakorlatilag a szennyvízben található összes foszfor mégiscsak belekerül a környezetbe. Nem csináltunk mást, mint késleltettük a folyamatot, eloszlattuk és felhígítottuk a szennyezést (Günther 1998).

A rendszerszintű gondolkodás nemcsak a szennyvíz, de minden egyéb társadalmi tevékenység esetében is három alapfeladatra vezethető vissza:

1. A földkéregből kiaknázott anyagok koncentrációja nem növekedhet szisztematikusan.
2. A társadalom által termelt anyagok koncentrációja nem növekedhet szisztematikusan.
3. Az ökoszféra hosszú távú termelőkapacitását lehetővé tévő fizikai feltételek nem romolhatnak szisztematikusan (Azar et al. 1996).

A modern társadalom az összes fenti alapelvet következetesen sérti, tehát rendszerszinten fenntarthatatlan: az üvegházhatású gázok termelése, anaerob folyamatok metánkibocsátása, a CFC, ózon légkörbe kerülése, a nagyléptékű erdőirtás, az eutrofizálás, a savasodás, nitrogén műtrágya előállítása, mérgező anyagok garmadájának a természetbe juttatása, a földhasználat fenntarthatatlan módjai mind-mind ellentétben állnak egy vagy több korábban kifejtett elvvel. Ezeket a problémákat mindig helyi, regionális és globális szinten kell vizsgálni, és minden élőhely, biorégió esetében más és más a határvonal, amikortól rendszerszintűnek kell tekintenünk a felhalmozódást. A fenntarthatóság társadalmi és gazdasági dimenziója tehát teljes mértékben a természeti dimenziótól függ, ami a szennyvíztisztítás esetében azt jelenti, hogy a csővégi megoldások helyett, még ha azok a legjobb elérhető technológiát (BAT) képviselik is, jobb, ha olyan megoldásokra koncentrálunk, amelyek tekintetbe veszik a környezeti rendszerek befogadó- és feldolgozóképességét, legjobb esetben pedig olyasmit állítanak elő, ami hasznos az emberi társadalom számára (Gröndlund és Carlman 2013).

A valóban fenntartható szennyvízkezelés kérdése nem választható el attól a kontextustól, amelyben keletkezik. A kezelési stratégia megítélésénél vannak szerzők, akik a városok jelenlegi helyzetéből és felépítéséből kiindulva úgy gondolják, hogy elvileg sem lehet fenntartható módszereket kidolgozni, legfeljebb a fenntarthatatlanság mértékén lehet javítani (Butler és Parkinson 1997). Ez beigazolódni látszik egy másik szerzőnek a fenntartható szennyvízkezelésre adott négypontos javaslatában: 1. a nagy energiatartalmú komponensek (vizelet) elválasztása az energiaszegény alkotóelemektől (esővíz), 2. tápanyagok energiahatékony felhasználása és visszaforgatása, emésztés, komposztálás, öntözés, 3. a szennyvíz szennyeződésének elkerülése, 4. az elkerülhetetlen szennye-

ződések lerakóba rejtése. A fémek például megfelelő tisztítás után az iszapba kerülnek, mennek a lerakóba vagy ha égetés van, a levegőbe (Kärrman 2001). A következtetés az, hogy csak olyan társadalom és gazdaság lehet valóban fenntartható, amely el tudja kerülni ezeket a csapdákat (Grönlund 2014).

A szanitáció, a szennyvízkezelés mérnöki tudománya egyértelműen zsákutcában van. Ha úgy tetszik, tudományosan túlhaladott. Az új felismerés szerint olyan különböző tartományok, mint a vízellátás, a víz minősége, a szennyvízkezelés, az energia- és élelmiszertermelés, a talajok képződése és a klímával való kölcsönhatása, az életanyag (biomassza) gazdálkodás, az élővilág (bioszféra) állapota, valamint a klímaváltozás között igen szoros kapcsolatok vannak. Ehhez járul még a higiéniáról és az egészségről kialakított újszerű felfogás, ami a szakterületek sokféleségét foglalja magában (Országh 2016). Az a tény, hogy a nagyvárosok egy részében, különösen a világ szegényebb térségeiben, a mérnöki szennyvízkezelés eszközei hiányosak, és nincsenek kiépítve a modern csatornázási rendszerek, előnynek is tekinthető, ha egy újfajta infrastruktúra kiépítése a cél (Lüthi et al. 2011).

A vízfelhasználás és a szennyvízkezelés kérdése elválaszthatatlan egymástól, nem véletlen, hogy a Fővárosi Vízművek és a Csatornázási Művek is ugyananynyit számláz a kétféle szolgáltatásért: az oda- és elszállításért. Gyökeresen más megközelítés esetén persze gyökeresen mások lesznek a megoldások is.

A jövő integrált vízgazdálkodásában ugyanis a lineáris pályák helyett a víz anyagforgalmát a lehető legtöbb helyen körré kell zárni. Egy adott vízmennyiséget nem csak egyféle módon lehet felhasználni. A kaszkád elve (lépcsős vízesés) szerint a vizet mindig a következő fokozat megkívánta tisztasági állapotba kell hozni, vagyis fokozatosan még több felhasználási módot is lehet alkalmazni az elszennyeződés után. A másik elv az anyagforgalom körciklussá zárása, amely feltételezi, hogy az eddig egyutas vízhasználati módokat váltogatni lehet. A városi szennyvíz egy része például kijuttatható a földekre, a mezőgazdaságban megmaradó öntözővizet az ipar még hasznosítani tudja, és az iparban is keletkezik olyan szennyvíz, amely tovább hasznosítható. Ezekkel az átvezetésekkel, ha feltételezzük, hogy a városok körül például kellő mennyiségű mezőgazdasági terület van, egészen más készletgazdálkodást lehet megvalósítani. Persze ahhoz, hogy egy ilyen rendszer létrejöjjön, nemcsak a városi infrastruktúrának, hanem magának a városnak is újra kell gondolnia magát, hiszen ma éppen az ellenkező a tendencia, a nagyvárosok elnyelik a környező mezőgazdasági területeket. A mezőgazdaságban olyan műszaki megoldásokra van szükség, amelyek lehetővé teszik a víz hatékonyabb felhasználását a mai pocsékló rendszerekkel szemben. Az iparnak amúgy is egészen más alapokon kell működnie, ha a fenntartható névre igényt tart.

A városi szennyvíz kezelésének is lehetnek új megközelítései. Régóta köztudott, hogy a háztartási szennyvíz alapvetően háromféle forrásból tevődik össze:

1. A viszonylag nagy mennyiségű, de aránylag könnyen tisztítható és a szerves anyagok három alkotóelemét, a szenet, nitrogént és foszfort nagyjából egyforma mennyiségben tartalmazó technológiai vagy használati víz (a fürdés, mosás, mosakodás vízigénye).

2. A viszonylag kis mennyiségű, de komoly tápanyagterhelést jelentő, és főként nitrogént tartalmazó, ürülékkel szennyezett víz, amelyet fiziológiai szennyvíznek neveznek. A háztartási szennyvíz nitrogénterhelésének 80%-át a napi 1,5 liter emberi vizelet adja: szervezetünk ezen az úton választja ki a nitrogént, amely részben húgysav, nagyobb mennyiségben pedig karbamid formájában jelenik meg benne.

3. A biohulladék, konyhai zsíros mosogatólé és kisebb-nagyobb növényi és állati szövetdarabkák, amelyek a fiziológiai szennyvízzel együtt 50-50%-ban felelősek a vízben megjelenő foszforterhelésért (Somlyódy 2003).

Abban az esetben, ha a fiziológiai szennyvíz keletkezésének lehetőségét nem zárjuk ki komposztvécé alkalmazása útján, a keletkező szennyvizet és a biohulladékot együttesen kezelve sokkal sűrűbb, kis mennyiségű, nagy tápanyagtartalmú szennyvizet kapunk, amelyet fekete szennyvíznek nevezünk. Kezelése lehetséges komposztálással (aerob környezetben), ezt követően trágyaként értékesíthető, vagy történhet anaerob környezetben, amikor a keletkező biogázt hasznosítják. Egy felmérés szerint az 1980-as évek elején Amerikában 53 millió hordó olajból készült műtrágyával egyenértékű, trágyázásra alkalmas, szerves tápanyag ment veszendőbe évente a szennyvíz útján (Sheaffer és Stevens 1983). Ezzel ellentétben a nagy mennyiségben keletkező, de híg szürkevíz csak nagyon kis mennyiségű nitrogént és foszfort tartalmaz. Nem is kell feltétlenül eltávolítani belőle, ha a kaszkádelv alapján olyan célra használják, amely ezt nem igényli: öntözésre, locsolásra, technológiai vízként. Ezért kezelése olcsó és könnyen megoldható. Az ötlet olyannyira nem új, hogy szennyvízgazdaságokat már 1650-ben alkalmaztak Londonban, majd másutt is, és ma a világon a legnagyobb ilyen üzem Ausztráliában 10.000 hektár öntözését végzi folyamatosan. Bár a 20. század elején a technikai hurráoptimizmus és a szennyvízzel közvetített betegségektől való félelem visszadobta az ilyen jellegű felhasználásokat, ma már ismét feltörekvőben van ez a megoldás (Shuval et al. 1986). A legnagyobb profi itt is Izrael, amely igencsak híján van a víznek. Miután szennyvíz folyamatosan keletkezik, öntözésre viszont csak szezonálisan van szükség, az országban több szennyvíztározót készítettek, és egyúttal olyan öntözési módszerekkel kombinálták, amelyek az egészségügyi kockázatot minimálisra csökkentették. Sajnos, ez nem mondható el más fejlődő országokról, például Chiléről vagy Mexikóról, ahol szintén hagyományosan használják a szennyvizet öntözésre, de az ezzel járó fertőzésveszéllyel együtt. Santiago de Chilében az 1980-as években több tífuszjárványt is okozott a nyers szennyvízzel öntözött zöldség (Postel 1992). Nálunk is vannak proponensei a szennyvíz mezőgazdasági hasznosításának, amely előtt álló akadály állítólag a társadalmi elfogadtatás nehézsége (Bodáné 2017).

A szennyvíz más célra történő felhasználásakor nem árt azért sem óvatosnak lenni, mert az ember notórius szokása, hogy mindenféle egyebet is beleereszt a hagyományos szennyező anyagokon kívül. Különösen a rákkeltő és mérgező szerves vegyületekkel kell vigyázni, mint amilyenek a PCB-k, vagy a fémszennyezésekkel (például ólom, higany). Komoly kísérletek történtek az egyébként nem nagy újdonságot jelentő szántóföldi alkalmazás kidolgozására (Adjei és Rechcigl 2002). A floridai egyetem munkatársai a műtrágya városi szennyvízzel kiváltásának esélyeit latolgatták, aminek Florida esetében az a nagy előnye, hogy ipari eredetű szennyezés nincs benne. Ám a National Research Council 2002 júliusában kiadott egy tanulmányt, amely szerint a fertőzés és mérgezés veszélye miatt az ilyen alkalmazásoknál nagyon kell vigyázni mind a dolgozók, mind a közelben élők egészségére. Megint csak bebizonyosodott, hogy a legjobb el sem szennyezni azt, amit nem kell. Ellenkező esetben olyan rendkívül költséges megoldásokhoz kell folyamodni, mint a szennyvíz csúcstechnológiával való tisztítása. Ezt azonban a vízhiányos területeken, mint amilyen Namíbia már most is megéri valóra váltani: Durban szennyvizét a Vivendi cég remeke olyan tisztára szűri, mint az ivóvíz, ezért az teljes egészében visszatáplálható a vízhálózatba (Montaigne 2001b).

A lakossági vízfelhasználást és szennyvízkezelést egyetlen átfogó és komplex rendszerbe álmodó Országh József szerint a lakossági szennyvizet eleve el kellene különíteni minden egyéb (főként ipari) szennyvíztől, és azon belül is külön kellene választani a székletet tartalmazó feketevizet és az attól mentes szürkevizet. Mivel városi környezetben elég nehéz lenne a komposztálást közvetlenül a forrásnál megvalósítani, a kétféle szennyvíz külön csatornarendszerben való gyűjtését javasolja. Az ily módon elkülönített feketevíz kezelésére úgynevezett alomátitató telepeket képzelt el, ahol már beállítható a megfelelő szén-nitrogén és víz-oxigén arány (Országh 2020). Bár működnek már ilyen telepek a világban, a csatornázás megduplázása nem realisztikus elképzelés, hiszen még az esővíz elkülönítésére is csak mostanában vannak próbálkozások. Az intézményi (például kórházi) és egyéb (műhelyek, kisipari létesítmények, üzletek stb.) szennyvizének a lakosságitól elkülönítése pedig egyértelműen nem lehetséges.

### 6.4.5.1. *Decentralizált szennyvízkezelés*

Vidéki vagy harmadik világbeli körülmények között az elégtelen közegészségügyi körülmények, a higiénia hiánya ördögi kört indít be, amelynek lényege, hogy a szennyvízzel, az emberi és állati ürülékkel, külső anyagokkal stb. a talajba jutó szennyezés a talajvízbe is beszivárog, ahonnan az ivóvízzel visszakerül a társadalmi-biológiai körforgásba, és újabb problémákat okoz.

A probléma megkerülésének egyik módja a száraz ürülék kezelési megoldások bevezetése, amelynek legrégebbi formája, a hagyományos árnyékszék, még nem véd a talajba jutó szennyeződésektől, csak ha megakadályozzuk a víz beha-

tolását a latrinába. A dehidrációs toalettben a vizeletet és a székletet elválasztjuk egymástól, majd megfelelő szellőzéssel beszárítjuk. Ez sem ideális, mert a (tévesen) skandináv toalettnek nevezett rendszerrel a kétféle „termékben" meglévő értékes tápanyag hasznosítása helyett megint csak megoldásra váró problémát generálunk (Országh 2020: 349). A harmadik megoldás, a korábban említett komposztvécé a szén és hidrogén arányának beállításával, megfelelő szellőzéssel és párologtatással a kiürített anyagok teljes átalakulásához és hasznosulásához vezet.

A szennyvíz decentralizált kezelésének számos módja ismert, ami azt jelenti, hogy egyik sem tökéletes, és a körülmények döntik el, melyik az optimális megoldás. Ha technokrata megközelítést alkalmazunk, választhatunk mesterséges levegőztetést nem tartalmazó vagy mesterséges levegőztetéssel működő berendezéseket. Az első esetben szennyvíz-stabilizáló tavak, anaerob szűrők, tartályok, mesterséges mocsár, árokszűrő, szűrőtartály, míg a második esetben eleveniszapos tartály, fix ágyas berendezések, szakaszos üzemű eleveniszapos szennyvíztisztító berendezések (SBR), csepegtető szűrők, forgótárcsás biológiai kontaktorok (biodisc, RBC) jöhetnek szóba (Krekeler et al. 2008). A következő alfejezetben ezek egy sajátos, Japánban használt módját láthatjuk.

### 6.4.5.2. *Dzsókaszó*

Japánban a szennyvizek tisztítása egyedi kezelés esetén a dzsókaszónak (szó szerint „tisztító tartályt") nevezett rendszerek létesítésével történik. A dzsókaszó inkább a ritkábban lakott területeken javasolt megoldás. Ha megfelelően adaptálják a helyi viszonyokhoz, lehetővé teszi, hogy a népesség nagyobb arányban részesülhessen a szennyvíztisztítás előnyeiből, és a szennyvízkibocsátás során se szennyeződjön a környezet (Furuichi et al. 2017) (lásd a 30. színes ábrát).

A dzsókaszónak a hagyományos csatornázással szemben számos előnye van. Csatornázás nélküli településeken is lehet vízöblítéses illemhelyet alkalmazni, a terep felszínformái kevésbé befolyásolják, nem kell hozzá kiterjedt csőhálózat, bármilyen háztartási és kommunális szennyvizet tud kezelni, kis vízfolyások és a talajvíz minőségét védi, gyorsan, olcsón építhető, különösen kisebb méretekben, a kezelt víz megbízható minőségű, újra felhasználható használati vízként, a belőle származó szennyvíziszap trágyázásra használható, valamint a berendezés ellenáll a földrengésnek és egyéb természeti katasztrófáknak is (Ogawa 2005).

A rendszer komoly műszaki fejlődésen ment keresztül. Először csak fekália kezelésére használták, majd kialakították a szürkevíz és fekália együttes kezelésére is alkalmas változatát, ahol az elsődleges cél a biológiai oxigénigény (BOI) csökkentése volt. Van olyan változata is, amely külön kezeli az illemhelyről és a használati vízből érkező a szennyvízáramokat. Ezek a változatok drágák voltak, állandó karbantartást igényeltek, és nem is végeztek tökéletes munkát. Bár az ára nem csökkent, a membránnos, eleveniszapos dzsókaszó már jobb eredményeket

adott, mint a hagyományos eleveniszap (Zhang és Yamamoto 1996). A későbbiek során olyan berendezések is készültek, amelyek a háztartás teljes szennyvizét visszaképesek forgatni a használati vízellátásba. Ez a nagyon sűrűn lakott Japánban komoly előnyt jelent. A szennyvíziszapot évente legalább egyszer el kell távolítani a tartályokból, majd megfelelő kezelés után számos célra használható, biogáz gyártására, komposztálásra, trágyázásra vagy a cementgyártásban (Gaulke 2006).

Persze a rendszernek korlátai is vannak. Ha a kifolyó tisztított szennyvízben nagy a lebegtetett szilárd üledék koncentrációja, ez eltömítheti a talajt, ami a továbbiakban már nem fogja elvezetni az elfolyó szennyvizet. Ezért meg kell vizsgálni a kibocsátás befogadójának viszonyait, és a kibocsátási előírásokat eszerint kell meghatározni. Csak háztartási eredetű szennyvizet képes kezelni, és pontosan ismerni kell az érkező (tisztítandó) és a távozó (tisztított) szennyvíz minőségi jellemzőit is. Összességében azonban a dzsókaszó csatornázás életképes alternatíváját kínálja. Nemrégiben megvizsgálták annak a lehetőségét is, hogy Magyarországon, ahol a szabályozás teljesen más, milyen jogi és műszaki megoldások tehetnék lehetővé az alkalmazását (Furuichi et al. 2017). Emellett a japán Környezetvédelmi Minisztérium támogatásával a Bács-Kiskun vármegyei Szentkirály egyik tanyáján Kék Tanya címmel egy kísérleti projekt is megvalósult (MASZESZ 2018).

### 6.4.6. Mesterséges ökoszisztémák

A következőkben több olyan megoldást mutatok be, amely még a technokrata megközelítésű rendszereken is túlmegy, mert alapvetően más, biológiai módon áll hozzá a szennyvíztisztítás kérdéséhez. Ezekben a rendszerekben a technika csak kisegítő szerepet játszik. A főszereplők mesterséges ökoszisztémák, amelyek kapcsolatait ugyan első lépésben emberi elme tervezi meg, később idegen hatásokkal szemben felügyeli, de végső soron működésük már az ökológia törvényszerűségei és dinamizmusa útján megy végbe. Sajnos, ezekkel az összefoglalóan természetközeli szennyvízkezelési eljárásoknak nevezett módszerekkel szemben rendkívül nagy a szakmai ellenállás, hiába léteznek évtizedek óta mind a városi, mind a kistelepülési szennyvízkezelésre megbízható és olcsó, csekély energiaigénnyel és externális, környezetszennyező, -terhelő hatással járó megoldások, a megszokás és a profitérdek miatt csak lassan terjednek (Kocsis 2001).

Az alternatív megoldások korai, átfogó képét tartalmazza walesi Alternatív Technológia Központ kiadványa (Grant et al. 1996). A természetközeli szennyvízkezelésnek alapvetően három változata lehetséges: a *természetes vízi élőhelyek* természetes öntisztuló képességének kiaknázása, az épített, *mesterséges vízi élőhelyek* (további alcsoport a szabad felszínű, vagyis nyíltvízi, a felszín alatti átfolyású rendszerek, ahol víz nem látható, bár van, illetve az egészen finom vízfilmet kialakító rendszerek), és a *szennyvízregeneráló és újrahasznosítási rendszerek*, amelyek már elég távol állnak a természetközelitől, de még mindig jobbak, mint

a hagyományos szennyvíztisztítók (Márczis 1996). A vékony vízréteget átfolyásos technikával hasznosító, a saját gyökerükre támaszkodó szennyvízvisszanyerő rendszeren kívül (Jewell 1994) egy felszín alatti átfolyású és egy nyílt felszínű épített rendszert mutatok be részletesebben.

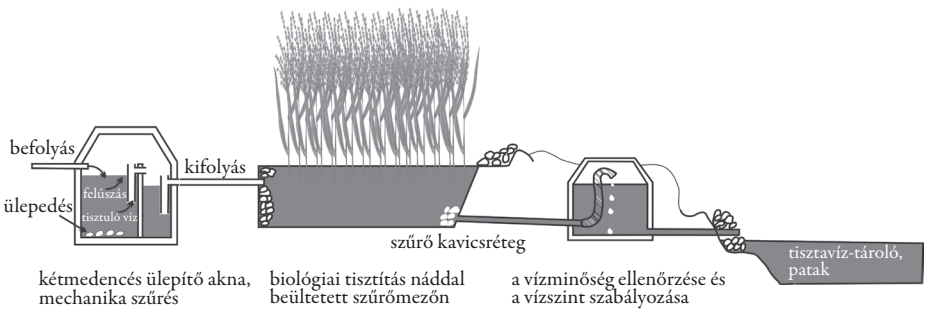
#### 6.4.6.1. *Gyökérzóna*

Az alternatív megoldások közül sokoldalú alkalmazhatósága és viszonylagos olcsósága miatt a leginkább ismert az úgynevezett nádfalas, avagy gyökérzónás nyílttéri szennyvíztisztító, amely kis méretekben és megfelelő szabad tér rendelkezésre állása esetén vitán felül a legoptimálisabb megoldás mind a szürke-, mind a feketevíz kezelésére: akár a környezetbe való visszajuttatására, akár újrafelhasználására. Talán egyetlen komoly hátránya, hogy meglehetősen helyigényes, egy fő szennyvizének biztonságos megtisztításához a körülményektől függően 4-5 $m^2$ nádas felületre van szükség. Ezért leginkább egyedülálló vagy csatornázás nélküli településeken, külterületen álló házak és gazdaságok szennyvizének kezelésére javasolt, illetve kistelepülések szennyvízgondjainak az enyhítésére vethető be.

A gyökérzónás rendszer elve teljesen egyszerű: azokat a mocsarakat, lápokat, természetes szennyvíztisztítókat utánozzuk, melyeket hatalmas energia bevetésével az elmúlt évszázadokban – ha a rómaiak ténykedését is ideszámítjuk, évezredekben – megszüntettünk. A folyóvölgyi rendszereknek nagy a természetes víztisztító kapacitásuk, ami hozzájárul a folyók és tavak öntisztulásához. A bennük élő növény-, állat- és bakteriális, protozoális közösségek ugyanis olyan körülményeket teremtenek, amelyben lebontják és felszívják a vízben oldott szerves és szervetlen anyagok jó részét. Nincs más teendőnk tehát, mint elkészíteni egy jókora medencét, és betelepíteni a vízparti nedves környezetre jellemző társulásokkal. A magasabbrendű növények ugyanis szimbiózisban élnek egy rakás egyéb organizmussal, amelyeket hoznak magukkal áttelepítéskor, a magasabb rendű állat- és rovarvilág pedig hamar megtalálja őket, ha eredeti élőhelyük a közelben van. Vidéki körülmények között tehát elegendő néhány tő nád *(Phragmites communis)*, gyékény *(Typha latifolia)* és sásfaj (*Carex* sp.) beültetése, a többi szerencsés esetben megy magától, ha élőhelyüket kellő szaktudással konstruáltuk meg.

A nádtér kiépítése egyszerű és olcsó építészeti feladat. A beérkező szennyvizet egy kettős falú aknába kell vezetni, ahol a felülúszót és az üledéket egyszerű fizikai úton szeparáljuk, és csak az oldott szennyezést tartalmazó középső fázist engedjük tovább. Az ülepítőakna tartalmát néhány évente mechanikusan el kell távolítani és komposztálni. Az átfolyó szennyvíz belép a medencébe, amely a közhiedelemmel ellentétben nem büdös szennytó, hanem egy körülbelül 80 cm mély (hogy télen se fagyjon be) beton vagy vízhatlan fóliával védett, földfalú létesítmény a szennyvíz mennyiségének megfelelő méretben, enyhén a kifolyás felé szűkülő trapéz alakban, és föld-homok-szalma rétegelt

keverékével van feltöltve. Ebbe ültetjük a növényeket. A befolyásnál egy kavicsprizmába húzott dréncső a medence teljes szélességében eloszlatja a befolyó vizet, amely a feneken lassan a kifolyás irányába szivárog, mert a mederfenék a szennyvízcsatornákra jellemző 2-4 %-os lejtéssel van ellátva. Menet közben a nád gyökérgumóin élő baktériumflóra elbontja és a nád számára felszívható állapotba hozza a legtöbb szennyeződést, még a nehézfémionokat is. A szerves eredetű, lebontott szennyezés tápanyagként hasznosul, a felvett nehézfémionok és egyéb nem bomló szennyezések a nád üreges szárában halmozódnak fel. Ennek eredményeként a medence végén elhelyezett második kavicságyban az alsóponti elfolyásnál kilépő víz gyakorlatilag ivóvíz minőségű lesz. A nádteret többféle méretben, egyetlen lakóháztól a néhány ezer lakosú községek szennyvizének tisztításáig lehet igénybe venni. Magyarországon is vannak már bíztató kísérletek (Márczis 1996), a gyűrűfűi ökofaluban a teljes rendszer üzemel: a háztetőről gyűjtött esővíz látja el a házakat, ahol komposzttoalettek vannak, tehát a szennyvíztisztítóba csak szürkevíz kerül (Borsos 2016).

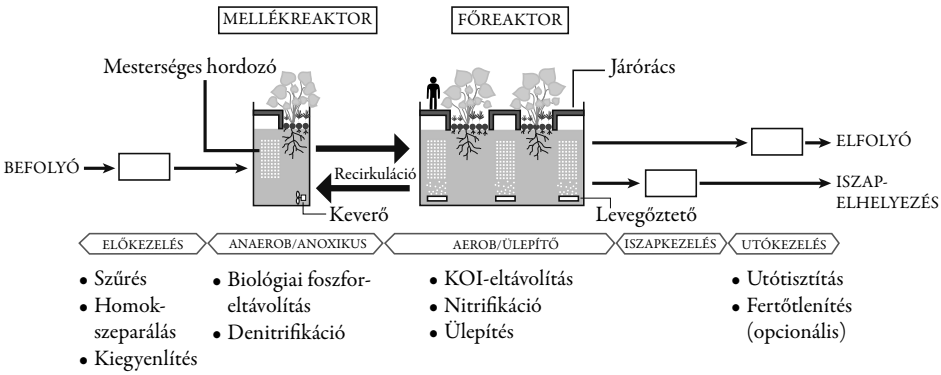



48. ábra. *Gyökérzónás szennyvíztisztító vázlatos rajza*

### 6.4.6.2. *Élőgép*

Az olyan vaskosabb szennyvizek esetére is, amelyek mindenféle emberalkotta csúnyaságot is tartalmaznak, vannak értelmes megoldások, amelyekben nem csak beton és vegyszerek vesznek részt. Sőt, bár beton itt is kell, vegyszerek csupán minimális mértékben. Az élőgépnek (Living machine) elnevezett módszert John Todd és munkatársai fejlesztették ki az 1980-as években.

Todd rendszerében az úgynevezett harmadfokú szennyvíztisztításban már eddig is alkalmazott, lebontó baktériumokkal dúsított, ezért eleveniszaposnak nevezett eljárások részét képező levegőztetett (aerob) reaktorokra telepítenek egy összességében mintegy 2-3000 fajból álló mesterséges ökoszisztémát. Ennek összetétele több évtizedes kutatás eredménye, rugalmassága páratlan, mert a permakultúrás növénytársításokhoz hasonlóan nagyfokú reziliencia és önálló alkalmazkodóképesség jellemzi. A reaktorok olyan nagy tárolóedények, amelyeken




49. ábra. *Az élőgép vázlatos felépítése (Forrás: Elek 2009)*

a szennyvíz kaszkádszerűen, egyikből a másikba áramlik, és közben a bennük zajló biológiai reakciók révén tisztul.

Szépséghibája a módszernek, hogy elég sok gépészeti kelléket igényel, a tartályokat folyamatosan kell levegőztetni, az anyagokat cirkuláltatni és a vizet szivattyúzni, viszont ennek fejében mindentől megszabadítja a rajta áthajtott vizet, amit korábban egy nagyváros képes volt beletenni. Az aerob reaktor olyan, mint egy nagy, nyitott hordó alul levegő befúvással, ami lebegésben tartja a baktériumszuszpenziót (eleveniszap). Az így nagy felületen érintkezik a szennyvízzel, és a bacik csinálhatják, amiért odatették őket. A tartály szabad vízfelszínén kis műanyag tutajok úszkálnak, amelyek a már ismertetett aktív gyökérzóna itteni megfelelői, mert a rájuk telepített növények hosszú, lelógó, 1-1,5 méterre a vízbe benyúló gyökérzetük révén kiváló életteret biztosítanak a tisztításban részt vevő élőlények sokaságának. A receptben szerepelnek halak, rákok, kagylók, csigák, növények, egysejtűek és baktériumok egyaránt, általánosságban elmondható, hogy ahogyan haladunk egyik tartálytól a másik felé, egyre magasabb rendűek, a végén már ehető halak is élnek benne. A rendszerben minden elemnek megvan a maga helye, a csigák például a szennyvíziszap mennyiségét csökkentik jelentős mértékben, amit egy hagyományos szennyvíztisztítónál már veszélyes hulladékként kellene elhelyezni, míg a kagylók speciális étvágyat fejlesztettek ki coliform (fertőző bélbaktérium) csírákra, ezért a kikerülő tisztított víz minősége jóval meghaladja a jelenleg kötelező szabvány értékeit, és gyakorlatilag azonnal felhasználható, ha nem is ivásra, de öntözésre és háztartási célokra.

A módszer egy másik alkalmazási területe az eutrofizálódó, eliszaposodó tavak tisztítása. Egy adat szerint egy 7 hektáros tó iszapmennyisége kotrás nélkül két év alatt 50 000 $m^3$-rel csökkent. Az új módszerrel és az élőlények kevéssé szabványosítható vonásaival szemben bizalmatlan bürokrácia a rá jellemző merevséggel

fogadja a találmányt, és a Rhode Island-i Providence-ben például csak a helyi városi szennyvíztelepen adtak neki helyet azzal a feltétellel, hogy a kikerülő vizet ráeresztik a városi (sokkal gyengébb teljesítményű) tisztítóra is (személyes észrevétel, 1994). Persze nem mindenütt ilyen bikkfafejűek a hivatalnokok. Skóciában, egy Findhorn nevű spirituális közösségben a kommunális szennyvíztisztító vizén értékesítésre szánt dísznövények, kála, szekfű, írisz és orchideák nőnek, tehát még bevételt is termel (szermélyes megfigyelés, 1995). Magyarországon Nagytétényben, a Harbor Park ipari parkban működik az első ilyen beruházás a Körte-Organica cég tervezésében és kivitelezésében (Uzunov 2003). Az élőgépek és a hozzájuk hasonló egyéb rendszerek teljesítményéről, előnyeiről és hátrányairól széles körű szakirodalom áll rendelkezésre (például Teal-Peterson 1991, Teal et al. 1992, Peterson-Strong 1993).

#### 6.4.6.3. *Huszárvágás*

Van, aki egy huszárvágással az egész szennyvízügyet megoldhatónak látja. Országh József szerint a szennyvíz tisztítására egyáltalán nincs is szükség, csupán a megfelelő kezelését kell megoldani. Meglátása szerint a feketevíz elkerülésére az alomszékhasználat marad a legolcsóbb és leghatékonyabb megoldás. Fekáliás víz ekkor a háztartásban már nem keletkezik, és az út nyitva áll a szappanos víz kerti felhasználására, amelyet szerinte a legtöbb esetben egyáltalán nem kell tisztítani, ezért a gyökérzónás megoldást is feleslegesnek tartja. Elegendő napfény és levegő hatásának kitenni. A házból kijövő szappanos vizet nyáron és száraz időben a kerti növények tövébe lehet vezetni minden előzetes kezelés, környezeti- és egészségi ártalom nélkül. A szappanos víz tisztítása (növényekkel is) a párolgás miatt nagy vízveszteséget von maga után. Télen és nagyon esős időben, a szennyvizet egy kis méretű emésztőn keresztül egy szikkasztóba vagy szórógödörbe (szivárogtató) lehet vezetni.

Árterületeken, karsztos vidéken és talaj nélküli, sziklás hegyvidékeken kell csupán gondoskodni arról, hogy a víz megfelelő kezelése megtörténjen egy általa Kegyedi-nek nevezett rendszerrel. Ez négy részből áll, egy anaerob emésztőből, egy aerob buborékoltató tartályból, egy vízkedvelő növényekkel beültetett, kavicscsal töltött szivárogtató árokból és egy derítő medencéből, amely tulajdonképpen a tisztított szürkevizet tartalmazó kerti dísztavacska (Országh 2020: 9. fejezet).

## 6.5. ÚJABB PRÓBÁLKOZÁSOK

Mivel a klímaváltozás okozta, egyre gyakoribb szélsőséges időjárási jelenségeket (aszályok, árvizek, hőhullámok) és azok következményeit az emberiség már kezdi saját bőrén érezni, ideje a világ minden pontján, így Magyarországon is felkészülni.

A Belügyminisztérium és a WWF Magyarország LIFE-MICACC projektje olyan településeket támogat, amelyek vízgazdálkodási problémákkal küszködnek, öt településen már el is készültek a természetes vízmegtartásra épülő prototípusok.

Magyarország 2020-ban az aszályos tavaszt és az 50 mm-t is elérő felhőszakadásokkal tarkított júniust is megszenvedte, de már az elmúlt években is jellemzők voltak a klímaváltozással járó, szélsőséges időjárási események. A 2010-es, közel 1000 mm-es csapadékot hozó, nagy belvíz után két száraz év következett, mindössze 400 mm körüli csapadékkal, 2019 és 2020 között pedig egymás után dőltek meg a melegrekordok, amióta 1901-ben elkezdődtek a mérések. A projekt alkalmazható módszereket keres, amivel ellenállóbbá válhatnak a kistelepülések az éghajlatváltozással egyre súlyosbodó vízgazdálkodási szélsőségekkel szemben. A projekthelyszíneken országszerte tipikusnak mondható vízgazdálkodási problémák tapasztalhatók, így ezek a megoldások jó példák lehetnek más települések számára is.

A Közép-Tisza mellett fekvő Rákócziújfaluban a napsütéses órák száma magas, ezért a potenciális párolgás jóval meghaladja az éves csapadék mértékét: az ország legaszályosabb vidéke ez. Ugyanakkor tavasszal gyakran károkat okoz a gazdáknak a hóolvadásból vagy esőből származó, a földeken megálló belvíz. Az önkormányzati beruházásban készülő belvíztározó erre a kettős problémára kínál megoldást azzal, hogy a tavaszi vízbőség idején eddig a Tiszába engedett, ezzel elpazarolt vizet a belvízelvezető csatornából egy mélyebb fekvésű területen kialakított vizes élőhelyre kormányozza.

Bátyán a hirtelen lezúduló nagy esők, majd hosszú, száraz időszakok váltakozása jelent problémát, ezért elvezetés helyett az esővíz megőrzése mellett döntöttek, hiszen az éves csapadék ott sem haladja meg az 550 mm-t, ami jóval kevesebb a szükségesnél. A MICACC-projekt keretében az összegyűjtött esővizet egy régi, korábban elhanyagolt anyagnyerőhelyre (agyaggödör, kubikgödör) vezették a falu szélén, ezzel egy mintegy 1 hektáros vizes élőhelyet hoztak létre. Az így születő kis tó megőrzi Bátya értékes vízkincsét a szárazabb időkre, beszivárogva visszapótolja a talajvizet, elpárologva javítja a mikroklímát, táplálja a növényzetet, és mérsékli a klímaváltozás hatásait. A part egyik oldala jól megközelíthető, kikapcsolódásra alkalmas, a másik oldala háborítatlan, így menedéket biztosít az élővilágnak, többek között védett hüllőknek és a nádasban fészkelő madaraknak. A parton a lakosokkal közösen őshonos fafajokat ültettek: fekete nyárfát, fehér füzet, magyar kőrist és enyves égert.

Püspökszilágyon a gyakran villámárvizeket okozó Szilágyi-patakon a gyorsabb vízelvezetés helyett a lefolyás lassítására, a víz megőrzésére került a hangsúly. A falu feletti vízgyűjtőterületen nemzetközi tapasztalatok felhasználásával hét darab szivárgó rönkgát épült a patakot tápláló időszakos vízmosásokon.

A Homokhátságon fekvő Ruzsa évtizedek óta küzd a vízhiánnyal és a talajvízszint folyamatos süllyedésével. Az egyre szárazabb tájban a belvízelvezető csa-

tornák is sok éve üresek, erre épül rá még az éghajlatváltozás hatása is. Ebben a helyzetben minden csepp víz számít: a szennyvíztisztítóból kikerülő napi átlag 150 $m^3$ tisztított szennyvíz és az új ivóvíztisztítóból elfolyó 10-20 $m^3$/nap technológiai víz is értékes erőforrás. A LIFE-projektben mindkettő visszatartására készült megoldás. A szürkevizeket nem engedik elfolyni a csatornába, hanem egy-egy kis tóba gyűjtik össze, majd egy második medencébe juttatva beszivárogtatják a talajba. Emellett egy kisebb belvízelvezető csatornára egyszerű, fából épült zárások kerültek, hogy ha mégis beköszöntene egy csapadékosabb időszak, a víz ne folyjon el a területről, hanem a parti legelőn terüljön szét.

Tiszatarjánban a hullámtéri vizes élőhelyek szárazodása és az özönnövények terjedése jelzik a környezeti változást. A falu a Borsodi-ártérhez tartozik, sorsa szorosan a Tiszához kötődik. A folyó szabályozását követően a vizes élőhelyek lecsapolása, a szántóföldi gazdálkodás terjedése a hullámtéren, a szárazodás erősödő hatása, majd az állattartás visszaszorulása miatt az ártéren özönnövények (például a gyalogakác) uralkodtak el. Néhány évvel ezelőtt a WWF Magyarországgal együttműködve Tiszatarjánban kialakítottak egy fenntartható ártéri gazdálkodási modellt, amely megoldást jelentett a gyalogakác visszaszorítására. Az özönnövénytől megtisztított terület egy részén szürkemarhák és vízibivalyok legelnek (Bodnár 2020).

# 7. MI A JÖVŐ ÚTJA?

*Egyetlenegy probléma sem oldható meg azon a tudatossági szinten, amelyen az keletkezett.*
Albert Einstein

## 7.1. KILÁTÁSOK

A szárazföldek szárazodnak. E meglepő kijelentés mögött egyre több tény áll (Kravčík et al. 2008). A szárazodás lényege az, hogy az emberi beavatkozások miatt mind a nagy vízkörzés, mind a helyi vízkörök egyensúlya megbomlik, a felszín borítottságának változásai a gyülekezési idők lerövidülését okozzák, ezért a csapadék hamar visszajut a tengerbe, illetve eleve nem, vagy csak kevesebb képződik. A felszín alatti vízkészletek kiaknázásával hamar eljutunk a dinamikus készletek kimerüléséig, és a stabil vízkészlet felszínre hozása a szárazodás jelenségét csak tovább fokozza: nem csupán a felszín, de a sok ezer vagy sok millió éves ásványkincs lesz oda, amelynek pótlódási üteme nem a mi időtávlatunkban mérhető (Borsos *in press*). A stabil és dinamikus vízkészlet nem csak a felszín alatti forrásoknál számít. Eddig a felszíni vizeket tápláló csapadékviszonyokba nem tudtunk beleszólni, ma már ez is megy: a vízgyűjtő területek gleccsereinek olvadása nem más, mint az évezredek óta stabilnak tekintett vízkészlet megbolygatása. Márpedig az emberi civilizáció csak a holocénben jött létre és fogalmunk sincs, mi lesz, ha megváltoznak a peremfeltételek. A folyók még az antropocén idején is vándorolnak, a betonkolosszusok már csak ezért sem jelentenek semmire megoldást.

A mérnöki tudományok nagy jelentőséggel bírtak a 19. és 20. század természetátalakító beavatkozásainak kivitelezésénél. Ez egy optimista korszak volt. A tudományág képviselői először nem tudták, hogy mit csinálnak, ezért jelent-

keztek a problémák. Később már tudták, de hajtotta őket a megszokás. Most meg azért van minden másképp, mert beindult az éghajlatváltozás. Mindenesetre a korábban statisztikai alapon számolt és az úgynevezett Monte Carlo-módszerrel[10] előre jelzett, 100 éves gyakoriságú árvízszintek az utóbbi fél évszázadban 20 éves gyakoriságúvá váltak. „Lehet, hogy a módszerünk a hibás s javítandó, és nem a hidrológiai körfolyamat különös viselkedése az ok? Lehet, hogy nem vettük észre a változást? Félő, hogy a válasz erre a kérdésre igenlő" – fogalmaz Szöllősi-Nagy András professzor a fenntartható vízgazdálkodásról való töprengésében (Szöllősi-Nagy 2019). Kulcskérdés tehát, hogy mérnöki műtárgyaink méretezési alapelveit hozzáigazítsuk a nem stacionárius világhoz. De nem lesz könnyű – ahogy ő mondja – az „egyenes-csatorna-vasbeton-szerkezet" paradigmájából a „soft engineering" új világába átmenni, ahol a természet megint maga láthatja el azokat a funkciókat, amelyeket eleddig csak műtárgyakkal véltünk megvalósíthatónak. Jellemző gőgös beképzeltségünkre, hogy ökoszisztéma-szolgáltatásnak nevezzük a természetes folyamatokat, holott nem a mi kedvünkért vannak, nagylelkű adományok inkább. A 2021. év katasztrofális következményekkel járó, nyári európai árvizei figyelmeztetést jelentenek az egyre több tudományos tanulmányban is megerősített tényre: az éghajlati kockázatok, köztük az árvizekkel szembeni védekezésben a természetalapú megoldások óriási előrelépést jelenthetnek a hagyományos mérnöki megoldásként alkalmazott infrastruktúrával szemben, számos járulékos hasznot hoznak, és a legtöbb esetben gazdaságilag is megéri ezeket alkalmazni (Lehoczky 2021). Ahhoz, hogy ez a csodálatos átmenet megvalósulhasson, nem elég csak a mérnöki tudásra alapozni, transzdiszciplináris – az egyes tudományágak közötti gátak lebontásával járó – és rendszerszemléletű megközelítésre van szükség.

És mi van, ha az óceánból elpárolgó víz marad az óceán felett, és már ott kicsapódik? Nem lesz szárazföldi utánpótlás? A monszun már felborult, lehet még más is? A gátépítés szószólói minden adandó alkalommal hangsúlyozzák, hogy az éghajlatváltozás hatásait figyelembe kell venni a tervezéskor, de ez semmit sem jelent (Lumbroso et al. 2014). Néhányan kis jégkorszakot vizionálnak, ami nem több a vágyak kivetítésénél a valóságra. Az éghajlatot vizsgáló történészek szerint akkor kell ezzel foglalkozni, ha a nagy alpesi tavak teljesen befagynak, nem pedig, amikor még a gleccserek is elolvadnak (Rácz 2016).

Ugyanez érvényes a felszín alatti vizekre is. Floridában már jön be a tenger felől, máshol belenyúltunk a stabil vízkészletbe, ahol meg az utánpótlás fogy el (nagy folyók vízgyűjtőin a gleccserek elolvadása miatt), ott a stabil vízkészlet mennyisége abszolút értelemben is csökkenni fog. Mi ebből a tanulság? Minél kevesebbet szabad csak felhasználni, azt sem elszennyezni, és mindent visszaforgatni. A legendás öntisztuló képesség csak természetes anyagokra vonatkozik,

[10] Neumann János által kifejlesztett álvéletlenszám-generátoron alapuló, sztochasztikus szimulációs módszer.

a fémek, mesterséges vegyületek valahol megmaradnak (CFC, DDT stb.), perzisztensek, és hosszú távú hatásaik kiszámíthatatlanok (Somlyódy 2008).

## 7.2. AZ EGYBITES MAGYARÁZATOK

A politikai mantra szerint, ha megállítjuk a szén-dioxid-koncentráció emelkedését a légkörben, el tudjuk kerülni a drámai átalakulásokat. Ez sajnos egyáltalán nem így van. A szén-dioxid légköri koncentrációja csak egyetlen eleme a komplex, ember okozta változásoknak. Ráadásul a közvetlen, lineáris kapcsolat a szén-dioxid-koncentráció emelkedése és a bolygó átlaghőmérsékletének emelkedése között egyáltalán nem bizonyított, ennél sokkal bonyolultabb a helyzet, és ez akkor is igaz, ha egyesek erre hivatkozással az egész folyamat jellegét és antropogén voltát megkérdőjelezik (Miskolczi 2018). A szkeptikusok újabban már nem annyira megát a jelenséget, hanem az enyhítésére tett intézkedések értelmét kérdőjelezik meg (Painter 2023). Ugyanakkor a vízháztartás felborulása és a kontinensek kiszáradása például csak részben következménye, részben éppen hogy egy másik kiváltó oka az éghajlatváltozásnak. Az erdőirtás, a burkolt felületek növekedése, a szivacshatás kiesése stb. miatt csökkenő albedo[11] felborítja a helyi vízkörzést, a párolgási viszonyok megváltoznak, és a föld felszíne pozitív visszacsatolással felmelegszik. De következmény is a kontinensek szárazodása, hiszen a gleccserek és a hegyek hósapkája az éghajlat felmelegedése miatt olvad, ezért a felszíni vízfolyások vízhozama egy átmeneti csúcsot követően várhatóan csökkenni fog. Rövid távon tehát nőni fog a folyók vízhozama a Himalájában, mert a gleccserek olvadnak. Ezek szerint az olvadékvíz által táplált ázsiai folyók legalább 2050-ig még alkalmasabbak lesznek a gátépítésre, mint eddig (lásd Lutz et al. 2014, Immerzeel et al. 2013). A megállapítással két baj van. Az egyik, hogy nem annak ellenére, hanem éppen azért emelkedik meg átmenetileg a vízhozam, mert a stabil készlet fogy el. A másik probléma, hogy utána mi lesz, azzal senki nem törődik. Márpedig egy vízerőművet nem 30 évre terveznek, és az emberi társadalom is szeretne még egy kis ideig itt a Földön életben maradni.

A szén-dioxidon kívül a metán és egyéb vegyületek koncentrációja is nő, a legnagyobb gond mégsem az átlaghőmérséklet emelkedése – ez csupán egy tünet –, hanem a Földre beeső napenergia eloszlási mintázatának megváltozása. Ez együtt jár a vízeloszlás mintázatának megváltozásával, a kontinensek kiszáradnak, és mi kontemplálhatunk a sivatagban. A mérnöki megoldások nem működnek, nem lesz honnan áthozni, felhozni, vagy ha igen, több lesz a baj belőle, mint a haszon. Ez eddig még mindig bebizonyosodott. Csak az utolsó részben taglalt

[11] Az albedo egy felület fényvisszaverő képességének mérőszáma. Minél magasabb, a felület annál több fényt ver vissza, ezért annál fehérebbnek, fényesebbnek látjuk.

drasztikus szemléleti változások esetén van némi esélyünk a túlélésre. Jó irányban tett tapogatózás az immár elkerülhetetlen katasztrófák hatásainak mérséklése az ökoszisztémákra alapított védekezés. A természetközeli módszerek költséghatékony és olcsó megoldást kínálnak számos természeti és éghajlati kockázat csökkentésére (Sudmeier-Rieux et al. 2021). Addig azonban, amíg minden politikai, gazdasági és társadalmi döntést a pénz motivál és nem a józan belátás, kár abban reménykedni, hogy a katasztrófa elkerülhető.

Civilizációnk ebben a formában menthetetlen.

# KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a könyv borzasztóan hosszú ideig készült. Nem én akartam így, az élet hozta. Ez alatt az idő alatt nagyon sok kollégám kezén fordult meg a kézirat, illetve sokakkal dolgoztam együtt. Néhányan, sajnos, már nem érhették meg, hogy a könyv megjelenjen, és én köszönetet mondhassak nekik. Mégis, talán valahol, valahogyan megtudják, mennyire hálás vagyok a szellemi táplálékért és a gyakorlati útmutatásokért, amiket tőlük kaptam.

Először Molnár Géza, Flachner Zsuzsa és Varga Gábor nevét említem. A sorrend az időrendre vonatkozik, és nem akar semmiféle minőségi különbséget tükrözni. Molnár Géza az alternatív magyar vízügyi élet kiemelkedő alakja volt, aki jogász végzettsége ellenére ásta bele magát a Tisza-völgy történetébe, ember és természet viszonyába, és vált annak egyik legjobb hazai ismerőjévé. Gondolkodásomat nagy mértékben alakította, és a nyolcvanas évek végétől haláláig mindvégig kapcsolatban maradtunk.

A sajnálatosan korán elhunyt Flachner Zsuzsa, a Talajtani Kutatóintézet munkatársa, ha lehet, még sokkal döntőbb szerepet játszott az életemben, amikor az ENSZ Fejlesztési Programja által finanszírozott tájgazdálkodási programon együtt dolgoztunk, majd azt halála után rám hagyományozta. Bár csak rövid ideig volt alkalmam ismerni őt, mégis rengeteget tanultam tőle, és a könyvben leírtak során ezt a tudást is hasznosítottam.

Végül Varga Gábor, aki „előolvasóm" volt, de sajnos a könyv megjelenését már ő sem érhette meg.

Szerencsére többen vannak, akik reményeim szerint élvezni is tudják munkám eredményét. A 2010-es években ama bizonyos UNDP-program és elődje során kiváló munkakapcsolatba kerültem Balogh Péter geográfussal, Koncsos László egyetemi tanárral, Kajner Péter közgazdásszal, Nagy Gergő ornitológussal és Fehér Lóránt jogásszal. Hálás vagyok nekik az együttműködésükért, és anyagaikat tisztelettel felhasználtam, beépítettem a szövegbe.

Még korábban, a nyolcvanas évek közepén-végén és a kilencvenes évek elején vettem részt a bős–nagymarosi vízlépcsőrendszer ellen szerveződő, szakmai indíttatású civil szervezet, a Duna Kör munkájában. Felsorolni sem tudom, hány

emberrel kerültem ilyen módon kapcsolatba, most csak Vargha Jánost, Lányi Andrást és Szekfű Andrást emelném ki közülük. Mindegyiküktől kaptam olyan személyre szabott útravalót, ami máig kitart.

Könyvem másik „előolvasója", Licskó Béla vízépítő mérnök még nagyon kezdeti állapotában látta az írást, ennek ellenére sok hasznos tanáccsal látott el.

Nagyon hálás vagyok annak a rengeteg embernek, akik utazásaim során, konferenciákon, írásaikon keresztül vagy személyes beszélgetésekben, esetleg még más módon formálták, alakították az ember és a vizek közötti kapcsolatról vallott nézeteimet. Közülük is kiemelkedik Ballabás Gábor geológus, aki magányos keresztes vitézként küzd a Gerecse alatti karsztvízkészlet ostoba és felelőtlen felhasználása ellen. Ez a szerteágazó történet jelen könyvben már nem kaphatott helyet.

Végül, de nem utolsósorban szeretném kifejezni hálámat hűséges feleségemnek, Dévényi Mártának, aki türelmesen hallgatta a dolgozószobából időnként kiszűrődő, nem mindig szalonképes monológjaimat egy-egy technikai vagy logisztikai probléma felmerülésekor.

# IRODALOMJEGYZÉK


Environmental News Service (http://www.ens-newswire.com)

ENS March 14, 2002: Climate change spreads drought across Australia, Perth, Australia;
ENS April 25, 2002: NASA's Aqua spacecraft to study Earth's water cycle Pasadena, California
ENS August 14, 2002: Central Europe swept by fatal 100 year floods Prague, Czech Republic
ENS September 12/2, 2002: Snake river dams to be improved, not breached Portland, Oregon
ENS October 29, 2002: Climate Credits from Hydropower Dams Challenged New Delhi, India – Seven hydropower dam projects in Chile
ENS November 22, 2002: Massachusetts Team Explores Acid Mine Runoff ROWE, Massachusetts
ENS December 9, 2002: Arctic ice melting at a record rate Washington, DC
ENS January 3, 2003: Trade in Australian Irrigation Water Rights Proposed Sydney, Australia
ENS January 3, 2003: Drought Deprives 11 Million Ethiopians of Food Addis Ababa, Ethiopia
ENS May 23, 2003: Louisiana Sinking, One Third of State's Coast Could Vanish By 2050 Lafayette, Louisiana
ENS December 19, 2003: Exxon Valdez Shows Oil Spills Persist Longer Than Expected CHAPEL HILL, North Carolina
ENS AmeriScan December 13, 2014: California Breathes Rainsoaked Sigh of Relief. Megtekintés: 2018.12.10. http://ens-newswire.com/2014/12/13/ameriscan-december-13-2014/
ENS January 5, 2012: China's Largest Freshwater Lake Shrinks in Record Drought, NANCHANG, Jiangxi Province, China, http://ens-newswire.com/2012/01/06/chinas-largest-freshwater-lake-shrinks-in-record-drought/ Megtekintés: 2019. 01. 11.
ENS April 4, 2013: New Niagara Tunnel Helps Ontario Replace Coal with Hydro, TORONTO, Ontario, Canada, https://ens-newswire.com/new-niagara-tunnel-helps-ontario-replace-coal-with-hydro/ Megtekintés: 2022. 06. 09.

Ábrahám Á. (2018): Megkezdődött a Május 1. úti burkolatbeszakadás helyreállítása. *Városkapu, Tata kéthetente megjelenő ingyenes közéleti lapja* 4/16, augusztus 9., 1.
Adams, R. (1974): Historic patterns of Mezopotamian irrigation agriculture. In Drowning, T. és Gibson, M. (eds): *Irrigation' impact on society*. Anthropological papers of the University of Arizona 25, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 3.
Adjei, M. és Rechcigl, J. (2002): Sewage Sludge Touted for Waste Management. *Agronomy Journal* November–December.
Agarwal, A. (1980): *Water and sanitation for all*? Earthscan Press Briefing Document 22, Earthscan, London, 53.
Agarwal, A. és Narain, S. (1985): *The State of India's environment 1984-85*. The Second Citizen's Report, Centre for Science and Environment, New Delhi.

AghaKouchak, A. (2016): Anthropogenic drought: How humans affect the global ecosystem, *Eos* 97. https://doi.org/10.1029/2018EO061985.

Agrárszektor online (2020): https://www.agrarszektor.hu/fold/regota-tudhato-volt-hogy-ausztraliaban-iden-el-fognak-szabadulni-a-tuzek.18831.html

Ahmed, N. (2015): War crime: NATO deliberately destroyed Libya's water infrastructure. *The Ecologist. The Journal for the Post-Industrial Age.* https://theecologist.org/2015/may/14/war-crime-nato-deliberately-destroyed-libyas-water-infrastructure. Megtekintés: 2020. 07. 16.

Ahmed, T. (2013): Transboundary flow and water management in Bangladesh. In: M. Feroze et al. (eds), 13–20.

Alam, M. E. (2013): Rapid fall of groundwater table in Bangladesh. In: M. Feroze et al. (eds), 21–28.

Aliyeva, D. (2017): Uzbekistan discloses average water consumption volume. Trend News Agency, https://en.trend.az/casia/uzbekistan/2814190.html

Andrásfalvy B. (1973): A Sárköz és a környező Duna-menti területek ősi ártéri gazdálkodása és vízhasználatai a szabályozás előtt. *Vízügyi Történeti Füzetek* 6, Vízdok, Budapest.

Andrásfalvy B. (1975): Duna mente népének ártéri gazdálkodása Tolna és Baranya megyében az ármentesítés befejezéséig. *Tanulmányok Tolna megye történetéből* 7, Szekszárd.

Andrásfalvy B. (2002): Adatok a fokok készítéséről. *Hidrológiai Közlöny* 1, 55–57.

Andrásfalvy B. (2007): *A Duna mente népének ártéri gazdálkodása*, Ekvilibrium, Budapest, 2007.

Andrásfalvy B. (2009): Bevezetés: A gazdálkodás következtében végbement földfelszínváltozások a Kárpát-medencében. In: Andrásfalvy B. és Vargyas G. (szerk.): *Antropogén ökológiai változások a Kárpát-medencében. A Kárpát-medence felszínének változása a földhasználat és az életmód változásának következtében*. PTE Néprajz-Kulturális Antropológia Tanszék, Pécs és L'Harmattan Kiadó, Budapest, 9–20.

Anisfeld, S. (2010): *Water resources*. Island Press, Washington, 349.

Ansar, A., Flyvbjerg, B., Budzier, A., Lunn, D. (2014): Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. *Energy Policy* 69, 43–56.

Antal E. (2003): A Balaton párolgása és az éghajlatváltozás. In: Frisnyák S. és Tóth J. (szerk.): *A Dunántúl és a Kisalföld történeti földrajza*. PTE Földrajzi Intézete és a Nyíregyházi Főiskola Földrajz Tanszéke, Nyíregyháza–Pécs, 127–134.

ÁNTSZ (2013): Ivóvíz minőség 2013. www.antsz.hu

Appan, A. (2001): Water, water everywhere. *The Ecologist* 31/8, 54–55.

Aqua (2018): https://aqua.nasa.gov. Megtekintés: 2018. 11. 10.

Araújo, J. C. de, Landwehr, T., Alencar, P., Paulino, W. (2023): Water Management causes increment of reservoir silting and reduction of water yield in the semiarid State of Ceará, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 121, 104102. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104102.

Ariza, M. L. (2003): Oiling up Spain. *Scientific American*, April, 9–10.

Ast, J. van, Bouma, J., Bal, M. (2013): Values Connecting Societies and Water Systems. In: Edelbos, J., Bressers, N. és Sholten, P. (eds): *Water Governance as Connective Capacity*, Ashgate Publishing Limited, Farnham, 249–266.

Auel, C., Berchtold, T., Boes, R. 2011. *Sediment bypass tunnel design – review and outlook*. Dams and Reservoir under Changing Challenges. Taylor & Francis Group, London.

Auroville Water Group: Auroville: A Water Sensitive City, http://aurovillewater.in. Megtekintés: 2018. 11. 02.

Awulachew, S., Smakhtin, V., Molden, D., Peden, D. (eds) (2012): *The Nile River Basin: Water, Agriculture, Governance and Livelihoods.* Routledge, 344.

Azam, M. F., Wagnon, P., Berthier, E., Vincent, C., Fujita, K., Kargel, J. S. (2018): Review of the status and mass changes of Himalayan-Karakoram glaciers. *Journal of Glaciology* 64/243, 61–74. doi.org/10.1017/jog.2017.86

Azar, C., Holmberg, J., Lindgren, K. (1996): Socio-ecological indicators for sustainability. *Ecological Economics* 18, 89–112.

Babbitt, B. (1991): Age-old challenge: water and the West. *National Geographic*, June, 2–3.

Babinszki E. (2016): A Pannon-tó emlékei a magyar tenger partján. *National Geographic Magyarország*. http://www.ng.hu/Termeszet/2016/08/28/A-Pannon-to-emlekei-a-magyar-tenger-partjan

Bachmann, J. és Wurzer, A. (2001): The Danube: a river of life. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds) (2001): *River restoration in Europe. Practical approaches*, 85–89.

BÁCSVÍZ (2023): A Bácsvíz Víz- és Csatornaszolgáltató Zrt. honlapja: https://www.bacsviz.hu/cegunkrol/tevekenysegek-szolgaltatasok/ivoviz-szolgaltatas/ivoviz-kecskemet. Megtekintés: 2023. 08. 12.

Badenoch, N. (2001): *Transboundary Environmental Governance*. Washington, D.C., World Resources Institute.

Badenoch, N. (2006): *Social Networks in Natural Resource Governance in a Multi-Ethnic Watershed of Northern Thailand*. Thesis, Kyoto University, 242.

Bagi G. (2000): Adatok a Közép-Tiszavidék természeti képéhez és a vizek hasznosításához a török hódítás előtt. In: Sári Zsolt (szerk.): *Ezer év a Tisza mentén*. Jász-Nagykun-Szolnok megyei Múzeumok Igazgatósága, Szolnok, 113–158.

Baji B. (2013): *Permakultúra és önellátó biogazdálkodás. Harmadik, bővített kiadás*. Első Lánchíd Bt., Biri, 228.

Balázs D. (1978): *Ausztrália, Óceánia, Antarktisz*. k.n. Budapest, 497.

Ballabás G. (2004): Visszatérő karsztforrásokkal kapcsolatos településfejlesztési és környezetvédelmi lehetőségek és veszélyek Tata város példáján. In: *Táj, tér, tervezés: geográfus doktoranduszok VIII. országos konferenciája*. Szeged, SZTE TTK Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, CD 76.

Balogh P. (2002): Az ártéri tájgazdálkodás koncepciója. In: Buka L. és Gyarmathy I. (szerk.): *Élőtáj 2*, Válogatott írások természetről, térről, teremtésről. Dél-Nyírség Bihari Tájvédelmi és Kulturális Értékőrző Egyesület, Debrecen.

Baráz Cs. (2014): A Csörsz-árok tól a fokgazdálkodásig. Földből épült struktúrák az ősi vízrendezés szolgálatában. In: Füleky Gy. (szerk.): *A táj változásai a Kárpát-medencében. A vízgazdálkodás története a Kárpát-medencében. (X. Tájtörténeti Konferencia kiadványa)*. Baja, 218–224.

Bárdos Deák P. (2004): Szigetköz története. *Máskép*, tavasz, 12–17.

Barnett, J. és O'Neill, S. (2010): Maladaptation. *Global Environmental Change* 20/2, 211–213.

Barros, N., Cole, J., Tranvik, L., Prairie, Y., Bastviken, D., Huszar, V., del Giorgio, P., Roland, F. (2011): Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience* 4, 593–596. http://www.nature.com/ngeo/journal/v4/n9/full/ngeo1211.html?WT.ec_id=NGEO-201109. Megtekintés: 2020. 07. 26.

Báthory R. (2023): Aszályország. Van, aki már klímamenekült lett a saját Tisza menti falujában. *Szabadon – a Szabad Európa tényfeltáró műsora* 2023. április 23. https://www.facebook.com/szabadeuropahu/videos/591313339606917/

Batica, J., Gourbesville, P. és Fang-Yu Hu (2013): Methodology for flood resilience index. *International Conference on Flood Resilience: Experiences in Asia and Europe* 5–7 September 2013, Exeter, United Kingdom.

Batuca, D. G. és Jordaan Jr, J. M. (2000): *Silting and Desilting of Reservoirs* (1st ed.). CRC Press, 330. https://doi.org/10.1201/9781003210993

Baurick, T. (2020): Rising Rivers More Room. Should We Follow Suit? *WWNO - New Orleans Public Radio*, March 10. https://www.wwno.org/coastal-desk/2020-03-10/water-ways-the-dutch-are-giving-rising-rivers-more-room-should-we-follow-suit

BBC (2014): Bitesize. A case study: the impact of drought in the UK (2004). http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/water_rivers/drought_rev4.shtml. Megtekintés: 2019. 01. 11.

BDP (2020): *Bangladesh Delta Plan (BDP), 2100*. Embassy of Bangladesh to the Netherlands, http://bangladeshembassy.nl/bangladesh-delta-plan-2100/

Bedő I. (2020): Nem is gondolná, mennyire visszaüthet, ha spórol otthon a vízzel. HVG, január. 07. https://hvg.hu/tudomany/20200107-csatornahalozat-csatornazat-ivoviz-halozat-vizfogyasztas-takarekoskodas-rejtett-vizfogyasztas

Bellon T. (2000): Ártéri gazdálkodás a Tiszai Alföldön. In: Sári Zsolt (szerk.): *Ezer év a Tisza mentén*. Jász-Nagykun-Szolnok megyei Múzeumok Igazgatósága, Szolnok, 241–258.

Bellon, T. (2004): Living together with nature: Farming on the river flats in the valley of the Tisza. *Acta Ethnographica Hungaria* 49/3–4, 243–256.

Bellovits K. (2014): *Az ivóvíz arzéntartalmának szerepe a rákos megbetegedések kialakulásában*. BSc szakdolgozat, ELTE, TTK, Környezettudományi Centrum.

Bettini, Y., Rijke, J., Farelly, M., Brown, R. (2013): Connecting Levels and Disciplines: Connective Capacity of Institutions and Actors Explored. In: Edelbos, J., Bressers, N., Sholten, P. (eds): *Water Governance as Connective Capacity*, Ashgate Publishing Limited, Farnham, 129–149.

Bevis, M. et al. (2018): Accelerating changes in ice mass within Greenland, and the ice sheet's sensitivity to atmospheric forcing. *PNAS* published ahead of print January 22, 2019 https://doi.org/10.1073/pnas.1806562116

Bharadwaj, D. (2021). Controlled Flooding in Assam, Brahmaputra Valley: A Perspective. *Academia Letters*, Article 1882 https://doi.org/10.20935/AL1882.

Bhushal, R. (2019): Thirsty Kathmandu waits for water that never arrives. thethirdpolenet.net: Understanding Asia's Water Crisis. https://www.thethirdpole.net/en/2019/12/13/thirsty-kathmandu-waits-for-water-that-never-arrives/

Biddulph, J. (1986): *Tribes of Hindoo Koosh*. Mohammad Book Stall, Gilgit, Ijaz Ahmad Ali Karman Publishers, Lahore, 164.

Binetti, R., Costamagna, F., Marcello, I. (2008): Exponential growth of new chemicals andevolution of information relevant to risk control. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanità* 44/1, 13–15.

Blackwelder, B., Harding, B., Colborn, T. (1987): Alternatives to traditional water development in the United States. *Ambio* 16/1, 32.

Blackwell, M. S. és Maltby, E. (2006a): Restoration of flooding on floodplains. In: Blackwell, M. S. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 24–27.

Blackwell, M. S. és Maltby, E. (2006b): Gaps in knowledge. In: Blackwell, M. S. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 101–104.

Blackwell, M. S. és Maltby, E. (eds) (2006): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*. European Communities, Directorate – General for Research Sustainable Development, Global Change and Ecosystems, 148.

Bodáné Kendrovics R. (2017): A szennyvíz mezőgazdasági hasznosításának indokai és feltételei. *Maszesz Hírcsatorna* 6, 5–23.

Bodnár Zs. (2020): Öt magyar település, amely innovatív módszerekkel készül fel a klímaváltozásra. Qubit, augusztus 5. https://qubit.hu/2020/08/05/ot-magyar-telepules-amely-innovativ-modszerekkel-keszul-fel-a-klimavaltozasra. Megtekintés: 2020. 08. 06.

Bodnár G. 2009: *A Tiszába érkező vizekről. A Felső Tisza vízmegtartása.* Konferenciaelőadás: Kezünkben a jövőnk. Víz – minden cseppje érték, Budapest, Aranytíz Rendezvényközpont, 2009. május 7.

Bodor E., Jakab G., Medzihradszky Zs., Sümegi P., Törőcsik T. (2008): A Bodrogköz negyedidőszak végi környezettörténete. In: Dobos E. és Terek, J. (szerk.): Élet a folyók között. A Bodrogköz tájhasználati monográfiája, Miskolci Egyetem, 151–168.

Bolch, T. et al. (2012). The State and Fate of Himalayan Glaciers. *Science* 336/6079, 310–314. doi: 10.1126/science.1215828

Boldis Gy. et al. (2012): *Azbesztcement víznyomócsövek évenkénti felülvizsgálati eredményeinek értékelése*. A BME a Fővárosi Vízművek megbízásából készült szakértői véleménye.

Booth, W. (1989): Beneath rivers, another realm. *Washington Post*, October 26, A1.

Bora Gy. és Nemerkényi A. (1999): *Magyarország földrajza*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.

Boroviczeniy F. (1989): A hidrogeológia és talajvíz problémaköre. In: *WWF (Természetvédelmi Világalap) állásfoglalása a Gabčíkovo–Nagymaros vízlépcsőrendszerről*. WWF-Auen-Institut, Rastatt (kézirat).

Borsos Balázs (2000): *Három folyó között. A bodrogközi gazdálkodás alkalmazkodása a természeti viszonyokhoz a folyószabályozási munkák előtt és után* (1840–1910). Akadémiai Kiadó, Budapest.

Borsos Balázs (2011): Árvíz és ártéri gazdálkodás. In: Vargyas G. (szerk.): *Párbeszéd a hagyománnyal. A néprajzi kutatás múltja és jelene*. Studia Ethnologica Hungarica XIII, h.n., L'Harmattan – PTE NKAT, 49–58.

Borsos B. (1991): Socio-political aspects of the Bős–Nagymaros dam system. *International Water Power & Dam Construction* 43/5, 57–61.

Borsos B. (1992): *Folyófojtogatók*. Ister Intézet, Budapest (kézirat)

Borsos B. (2002): *Azok a bizonyos könnyű léptek. I. Ökológia és rendszerelmélet*. L'Harmattan, Budapest, 251.

Borsos B. (2003): Ázsiától Ázsiáig. Útleírás. L'Harmattan, Budapest, 223.

Borsos B. (2005): Öntözéses gazdálkodás és régi vízhasználati módszerek Ázsiában. In: Balogh T., Bayankhuu B., Kiss K., Ulcz Gy. (szerk.): *Keleti Kiskönyvtár*. PTE TTK Földrajzi Intézet Ázsia Központ, Pécs, 101–115.

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

Borsos B. (2010b): *ILD kézikönyv*. A Tisza völgyében a földhasználat és vízgazdálkodás hatékonyságának javítására szolgáló integrált tájfejlesztési módszerek elméleti összefoglalása és gyakorlati útmutatója. Flachner Zsuzsa, Balogh Péter, Nagy Gergő és Fehér Lóránt anyagainak felhasználásával. ICPDR/ UNDP/GEF Integrált vízgyűjtő gazdálkodás a Tisza völgyében IC/ WD/384-HU 2010. december 1.

Borsos, B. (2013): Type One Error and the Impact of Human Societies on Large Rivers. *Journal of Geography and Geology* 5/3, 135–157. doi:10.5539/jgg.v5n3p135

Borsos, B. (2014): *A practical guide to integrated land management methods. Methods Intended To Improve Land Use And Water Management Efficiency In The Floodplains of the Tisza Basin*. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, 212.

Borsos B. (2016): *Az új Gyűrűfű. Az ökofalu koncepciója és helye a fenntartható település- és vidékfejlesztésben*. L'Harmattan, Budapest, 247.

Borsos B. (2018): *Termő televény. II: Mezőgazdaság és rendszerelmélet*. Typotext, Budapest, 248.

Borsos B. (in press): Vízmegtartás a tájban. In: *A másik út mérföldkövei – Ablakok a fenntartható világra* NKE

Borsos, B. és Sendzimir, J. (2013): Integrated Water Resources Management in Hungary. *International Journal of Water Governance, Special Issue on Integrated Water Resources Management* 3/4, 379–402.

Borsos, B. és Sendzimir, J. (2018): The Tisza River: managing a lowland river in the Carpathian basin. In: Schmutz, S. és Sendzimir, J. (eds): *Riverine Ecosystem Management. Science for governing towards a sustainable future*. Springer Verlag, 541–560.

Borsos, B., Flachner, Zs., Nagy, G., Fehér, L., Balogh, P. (2010): ILD Manual: A practical guide to integrated land management methods intended to improve land use and water management efficiency in the Tisza basin. ICPDR/ UNDP/GEF Integrated River Basin Management in the Tisza IC/WD/384-HU 30 September 2010, 167.

Borsos, B., Sendzimir, J., Balogh, P., Koncsos, L. (2013): Barriers and Opportunities to Adaptive Co-Management of the Tisza River Basin in Hungary. In: Grover, V. I. és Krantzberg, G. (eds): *Water Co-Management*. Taylor and Francis, London, 197–226.

Borsy Z. (1993): *Általános természetföldrajz*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.

Brown, A. G., Toms, P., Carey, C., Rhodes, E. 2013. Geomorphology of the Anthropocene: time-transgressive discontinuities of human-induced alluviation. *Anthropocene* 1, 3–13.

Brown, A. et al. (2018): Natural vs anthropogenic streams in Europe: History, ecology and implications for restoration, river-rewilding and riverine ecosystem services. *Earth-Science Reviews* 180, 185–205.

Brown, L. R. (2001): Worsening Water Shortages Threaten China's Food Security, Washington, D.C., October 17, (ENS). http://ens-news.com/ens/oct2001/2001L-10-17-03.html

Brown, R., Ashley, R., Farrelly, M. (2011): Political and Professional Agency Entrapment: An Agenda for Urban Water Research. *Water Resources Management* 23/4, 1–14.

Buijse, A. D. et al. (2002): Restoration strategies for river floodplains along large lowland rivers in Europe. *Freshwater Biology* 47, 889–907.

Bulla B. és Mendöl T. (1999): *A Kárpát-medence földrajza*. Kisebbségkutatási Könyvek, Lucidus Kiadó, Budapest, 420.

Bunting, M. (2000): Rosetta. *The Guardian*, November 14.

Bunyard, P. (1999): Eradicating the Amazon Rainforests Will Wreak Havoc on Climate. *The Ecologist* 29/2, 81–84.

Burden, J. (2019): Water Shortage and Unrest in Iraq. Global Risk Insights. Know your world. https://globalriskinsights.com/2019/11/water-shortage-and-unrest-in-iraq. Megtekintés: 2020. 07. 16.

Burek, P. et al. (2016): *Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final Report)*. IIASA Working Paper. Laxenburg, Austria, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). www.pure.iiasa.ac.at/13008/

Burger, F. (2012): Change of Groundwater Flow Characteristics After Construction of the Waterworks System Protective Measures on the Danube River – A Case Study in Slovakia, Studies on Water Management Issues, Kumarasamy, M. (ed.), InTech. http://www.intechopen.com/books/studies-on-water-management-issues/change-of-groundwater-flowcharacteristics-after-construction-of-the-waterworks-system-protective-me

Butler, D. és Parkinson, J. (1997): Towards sustainable urban drainage. *Water Science and Technology* 35, 53–63.

Buzás K. és Somlyódy L. (2011): Települési vízgazdálkodás. In: Somlyódy L. (szerk.): *Magyarország vízgazdálkodása: Helyzetkép és stratégiai feladatok*. Köztestületi Stratégiai Programok, MTA, Budapest, 255–288.

Byatt, A., Fothergill, A., Holmes, M. (2002): *A kék bolygó. Az óceánok természetrajza*. Alexandra Kiadó, Pécs, 384.

Cals M. J. és C. Van drimmelen (2001): Space for the river in coherence with landscape. Planning in the rhine-meuse delta. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*, 189–195.

Carrier, J. (1991): Water and the west: the Colorado river. *National Geographic Magazine*, June 2–35.

Castelvecchi, D. (2023): Rampant Groundwater Pumping Has Changed the Tilt of Earth's Axis. *Scientific American*, July. https://www.scientificamerican.com/article/rampant-groundwater-pumping-has-changed-the-tilt-of-earths-axis/#

Ccopa Rivera, E., Queiroz, J., Ferraz, J. M., Ortega, E. (2007): Systems models to evaluate eutrophication in the Broa Reservoir, São Carlos, Brazil. *Ecological Modelling* 202/3–4, 518–526.

Chan, F., Mitchell, G., Adekola, O., McDonald, A. (2012): Flood Risk in Asia's Urban Mega-deltas: Drivers, Impacts and Response. *Environment and Urbanization Asia* 3/1, 41–61. doi: 10.1177/097542531200300103

Chen, S. (2018): Water scheme threatens Yangtze River porpoises with extinction, scientist warns. *South China Morning Post* online, 24 September, 2017, updated: 03 July, 2018, https://www.scmp.com/news/china/society/article/2112556/water-scheme-threatens-yangtze-river-porpoises-extinction. Megtekintés: 2019. 01. 11.

Chen, Y., Syvitski, J., Shu Gao, Overeem, I., Kettner, A. (2012): Socio-economic Impacts on Flooding: A 4000-Year History of the Yellow River, China. *AMBIO*, Royal Swedish Academy of Sciences. doi:10.1007/s13280-012-0290-5

Chhukan, K. N. és Durga PD. Sangraula (2016): *Challenges of operation and maintenance of hydropower projects in Nepal related to sediment issues*. Manuscript, Tribhuvan University, Masters In Water Resources Engineering, 20.

Chorley, R. J. (ed.) (1969): *Water, Earth and Man*. Methuen and Co., London.

Lüthi, C. et al. (2011): *Sustainable Sanitation in Cities – A Framework for Action.* Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA) és International Forum on Urbanism (IFoU), Papiroz Publishing House, 169.

Chunhong, Hu, Wu Deyi, Jayakumar, R., Shingo Ajisawa (2004): *Warping Dams – Construction and its Effects on Environment, Economy, and Society in Loess Plateau Region of China*. Contribution to UNESCO-IHP project on International Sedimentation Initiative, International Hydrological Programme (IHP), UNESCO Office Beijing **és** The International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation (IRTCES), Beijing, 32.

Clarke, J. S. (2017): Fores fires rage across Indonesia as the dry season begins. *Unearthed*. https://unearthed.greenpeace.org/2017/08/03/indonesia-forest-fires-begin/

Clement A. és Somlyódy L. (2011): Vízminőség-szabályozás. In: Somlyódy L. (szerk.): *Magyarország vízgazdálkodása: Helyzetkép és stratégiai feladatok*. Köztestületi Stratégiai Programok, MTA, Budapest, 169–206.

Climate Adapt (2020): Room for the River Waal – protecting the city of Nijmegen. *Sharing Adaptation information across Europe.* https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/case-studies/room-for-the-river-waal-2013-protecting-the-city-of-nijmegen

Coates, D. R. (1981): *Environmental geology*. Wiley and Sons, New York etc.

Cook, B. I., Ault, T., Smerdon, J. (2015): Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Science Advances* 1/1, e1400082. doi: 10.1126/sciadv.1400082

Cook, E. R., Seager, R., Cane, M. és Stahle, D. (2007): North American drought: Reconstructions, causes, and consequences. *Earth-Science Reviews* 81, 93–134.

Criss, R. és Schock, E. (2001): Flood Enhancement through Flood Control. *Geology*, October.

Crutzen, P. (2006): The Anthropocene. In: Ehlers, E. **és** Krafft, T. (eds): *Earth System Science in the Anthropocene: Emerging Issues and Problems*. Springer Verlag, Berlin, 13–18.

Cuppen, M. és Pardoe, J. (2013): The Influence of Connective Capacity on the Legitimacy of Flood Management. In: Edelbos, J., Bressers, N., Sholten, P. (eds): *Water Governance as Connective Capacity*. Ashgate Publishing Limited, Farnham, 291–313.

Czelnai R. (1999): *A világóceán. Modern fizikai óceanográfia*. Vince Kiadó.

Dai, Zhijun, Liu, J., Wen Wei, Jiyu Chen (2014): Detection of the Three Gorges Dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta. *Scientific Reports* 4, 6600. doi:10.1038/srep06600 (2014). www.nature.com/scientificreports

Daubner, I. (1981): *Dunai vízlépcsők létesítésének biológiai aszpektusai*. Az MTA Biológiai Osztályának 1979. október 11-i tudományos ülésén elhangzott előadás. *MTA Biológiai Tudományok Osztályának Közleményei* 24, 57–65.

Davies, P. A. és Westgate, R. (2018): China Faces Serious Water Supply Problems. China's uneven distribution of water sources presents unique difficulties to China as demand for water is increasing rapidly. Latham ***és*** Watkins LLP on June 6, 2018 Posted in China, Contaminated Properties és Waste, Water Quality and Supply

Davis, C. (2018): Laos dam: Aerial footage shows extent of devastation cause by dam collapse. *Express. Home of the Daily and Sunday Express*, Jul 24, 2018. https://www.express.co.uk/news/world/993429/Laos-dam-collapse-news-map-Attapeu-dam-break-latest-aerial-video-San-Sai

Day, J. W. és Boesch, D. F. (2007): Restoration of the Mississippi delta: lessons from hurricanes Katrina and Rita. *Science* 315/5819, 1679–1684.

de Châtel, F. (2010): Q és A: Nader al-Bunni. Syrian Minister of Irrigation. *Syria Today*, 44–46.

de Châtel, F. (2014): The Role of Drought and Climate Change in the Syrian Uprising: Untangling the Triggers of the Revolution. *Middle Eastern Studies.* doi: 10.1080/00263206.2013.850076

Deák A. A. (2001): Fokok és délibábok. *Hidrológiai Közlöny* 1, 39–41.

Deák A. A. (2002a): A fok „metamorfózisa"? *Hidrológiai Közlöny* 6, 368–369.

Deák A. A. (2002b): Fok vagy csatorna? *Hidrológiai Közlöny* 4, 241–242.

Deák A. A. (2002c): Válasz Andrásfalvy Bertalan „Adatok a fokok készítéséről" című mondolatára. *Hidrológiai Közlöny* 1, 57–59.

Deinet, S. et al. (2020): *The Living Planet Index (LPI) for migratory freshwater fish – Technical Report*. World Fish Migration Foundation, 55.

Demeter, L., Molnár, Á., Bede-Fazekas, Á., Öllerer, K., Varga, A., Szabados, K., Tucakov, M., Kiš, A., Bíró, M., Marinkov, J., Molnár, Zs. (2021): Controlling invasive alien shrub species, enhancing biodiversity and mitigating flood risk: A win–win–win situation in grazed floodplain plantations. *Journal of Environmental Management* 295, 113053.

Deming, D. 2002: *Introduction to Hydrogeology*. McGraw-Hill Higher Education, 480.

Deneven, W. M. (1970): Aboriginal drained-field cultivation in the Americas. *Science* 169, 467.

Derksen, A. és ter Laak, T. (2015): *Human pharmaceuticals in the water cycle.* STOWA 2013-23 KWR 2013-062, 66.

Dey, Nepal C., Ratnajit Saha, Mohammad Najmul, Sujit K. Bala, AKM Saiful Islam (2013): Influence of climate change and river water level on groundwater table in Bogra district of Bangladesh. In: M. Feroze et al. (eds), 68–75.

Di Baldassarre, G., Schumann, G., Bates, P. D., Freer, J. E., Beven, K. J. (2010): Flood-plain mapping: a critical discussion of deterministic and probabilistic approaches. *Hydrological* Sciences *Journal* 55/3, 364–376.

Discovering Pakistan (2023): *Hunza Water – Where to get it and how to make it!* 17 January 2023, https://discoveringpakistan.com/hunzawater. Megtekintés: 2023. 09. 04.

Dister, E. 1986. Hochwasserschutzmaßnahmen am Oberrhein. Ökologische Probleme und Lösungmöglichkeiten. *Geowissenschaften in unserer Zeit* 6, 194–203.

Dobó I. (2018): *Mikroműanyagok a felszíni vizekben*. Konferencia-előadás, Maszesz, dr. Dulovics Dezső Junior Szimpózium, 2018. 03. 22.

Dobos E. és Novák P. (2008): Jelenkori tájhasználat. In: Dobos E. és Terek, J. (szerk.): Élet a folyók között. A Bodrogköz tájhasználati monográfiája. Miskolci Egyetem, 169–176.

Dobosi E. (2020): Tönkretesszük a Földet azzal, ahogy mosunk. HVG, január. 23. https://hvg.hu/gazdasag/20200123.fenntarthatosag.ruhaipar.mosas.okologiailabnyom.kornyezetvedelem.vegyianyag

Dóka K. (2009): A Duna-mappáció (1823–1845). In: Andrásfalvy B. és Vargyas G. (szerk.): *Antropogén ökológiai változások a Kárpát-medencében. A Kárpát-medence felszínének változása a földhasználat és az életmód változásának következtében*, PTE Néprajz-Kulturális Antropológia Tanszék, Pécs és L'Harmattan Kiadó, Budapest, 21–32.

Dourte, D. és Fraisse, C. (2012) *What is a water footprint? An overview and applications in agriculture*. University of Florida. Available at: http://edis.ifas.ufl.edu/ae484. Megtekintés: 2020. 07. 16.

Downs, P. (2001): Geomorphological evaluation of river restoration schemes: principles, method, monitoring, assessment, evaluation. Progress? In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*, 243–249.

Droppa Gy. (2002): Hozzászólás a VTT vitához: Harc helyett békét a folyóval. *Zöldlevél, a Magyar Természetvédők Szövetségének hírlevele*, április, 5–7.

Duffy, A. (2021): What the Ottoman Empire can teach us about the consequences of climate change – and how drought can uproot peoples and fuel warfare. *The Conversation*, 7 June. https://theconversation.com/what-the-ottoman-empire-can-teach-us-about-the-consequences-of-climate-change-and-how-drought-can-uproot-peoples-and-fuel-warfare-159781

Dulovics D., Dulovicsné Dombi M., Öllős G. (1978): A csatornázás korszerű rendszerei és kialakításuk szempontjai. *Hidrológiai Közlöny* 58/6, 260–270.

Dupar, M. és Badenoch, N. (2002): *Environment, Livelihoods and Local Institutions: Decentralization in Mainland Montane Southeast Asia*. Washington, D.C., World Resources Institute.

Eckstein, G. és Sindico, F. (2014): The Law of Transboundary Aquifers. Many Ways of Going Forward, but Only One Way of Standing Still 10.1111/reel.12067. *Review of European, Comparative & International Environmental Law.*

Edelbos, J., Bressers, N., Sholten, P. (2013): Introduction: Conceptualizing Connective Capacity in Water Governance. In: Edelbos, J., Bressers, N. és S holten, P. (eds): *Water Governance as Connective Capacity*. Ashgate Publishing Limited, Farnham.

EEA (2002): *Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000.* Environmental issue report No. 22/2001.

Elek E. (2009): Ökológia és szennyvíztisztítás. *Víz, Gáz, Fűtéstechnika és Hűtő Klíma, Légtechnika Szaklap*, 2009. március. https://www.vgfszaklap.hu/lapszamok/2009/marcius/1445-okologia-es-szennyviztisztitas. Megtekintés: 2021. 07. 23.

Endreffy Z. (1989). *Technikai önkorlátozás, mértékletesség, aszkézis*. Előadás a Duna Kör ökológiai konferenciáján Budapesten, január 28–29-én.

Engloner A. (2018): *A Nemzeti Víztudományi Kutatási Program*. Víztudományi Nap, MTA, november 15.

ENS (2008, 23 October): New Treaty Aims to Protect Shared Transboundary Aquifers. http://www.ens-newswire.com/ens/oct2008/2008-10-23-01.asp

Entz G. és Sebestyén O. (1942): *A Balaton élete*. Királyi Magyar Természettudományi Társulat, Budapest, 366.

Erdősi Cs. (2020): Mi az, amit iszunk? Több mint harmincféle gyógyszermaradvány van a budapesti ivóvízben. *Víz, gáz, fűtéstechnika és hűtő, klíma, légtechnika szaklap*, 2020. június 25. 2117. https://www.vgfszaklap.hu/hirek/6094-mi-az-amit-iszunk

Ertsey A. (1997): *Saját építésű komposztáló toalettek*. Ökológiai Intézet, Miskolc.

European Commission (2018): *Guidance on The requirements for hydropower in relation to Natura 2000*, DG Environment, Working paper, 83.

Evans, R. L. (2023): Undersea Aquifers. *Scientific American* 329/1, 58–63. doi:10.1038/scientificamerican0723-58

Fábián E. (2015): A világ legnagyobb árapály erőművei. *Ecolounge Magazin*, NHKV Zrt. http://ecolounge.hu/zoldmotor/a-vilag-legnagyobb-arapaly-eromuvei. Megtekintés: 2018. 12. 04.

Fabregat, L. (2012): The Ebro water battle is back. *Catalan News*, 12 June. https://www.catalannews.com/society-science/item/the-ebro-water-battle-is-back. Megtekintés: 2020. 07. 28.

Faludi G. és Kalocsa B. (2002): A fokok történetisége és funkciója – Adalékok egy vitához. *Hidrológiai Közlöny* 2002/1, 127–129.

Barancheshme, F. és Munir, M. (2019): Development of Antibiotic Resistance in Wastewater Treatment Plants. *Antimicrobial Resistance – A Global Threat, Yashwant Kumar*, IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.81538.

Fearnside, P. (2004): Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies provide a springboard for rethinking a supposedly 'clean' energy source – An editorial comment. *Climatic Change* 66/1–2, 1–8.

Fejér L. (2018): Történelmi pillanatkép. *Hidrológiai Közlöny* 98/1, 7.

Ferenczi C. (1989). A rendszer-környezet kölcsönhatás elemzése energiatermelés esetén és a Bős–Nagymaros-i példa. Előadás a Duna Kör ökológiai konferenciáján Budapesten, 1989. január 28–29-én.

Ferk, M., Ciglič, R., Komac, B., Loczy, D. (2020). Management of small retention ponds and their impact on flood hazard prevention in the Slovenske Gorice Hills. *Acta Geographica Slovenica* 60/1, 107–125. https://doi.org/10.3986/AGS.7675

Filep A. (2009): Víz a „magasban". Megjegyzések az árvízmentes térszínek és a domb-, illetve hegyvidékek hagyományos vízgazdálkodásához. In: Andrásfalvy B. és Vargyas G. (szerk.): *Antropogén ökológiai változások a Kárpát-medencében. A Kárpát-medence felszínének változása a földhasználat és az életmód változásának következtében*. PTE Néprajz-Kulturális Antropológia Tanszék, Pécs és L'Harmattan Kiadó, Budapest, 65–108.

Fischer, H. et al. (2018): Palaeoclimate constraints on the impact of 2 °C anthropogenic warming and beyond. *Nature Geoscience*, 11, 1–12. doi:10.1038/s41561-018-0146-0.

Fischetti, M. (2012): How Much Water Do Nations Consume? *Scientific American* online https://www.scientificamerican.com/article/graphic-science-how-much-water-nations-consume/#

Fodor Z. (2002): A Tisza-menti fokok tájhasznosítási szerepe az újkori folyószabályozások előtt. *Falu, Város, Régió, A vidékfejlesztés hírei* 4, 14–17.

Fodor Z. (2009): Fokok a magyarországi Tisza szakaszon az átfogó szabályozás előtt. In: Andrásfalvy B. és Vargyas G. (szerk.): *Antropogén ökológiai változások a Kárpát-medencében. A Kárpát-medence felszínének változása a földhasználat és az életmód változásának következtében*. PTE Néprajz-Kulturális Antropológia Tanszék, Pécs és L'Harmattan Kiadó, Budapest, 33–48.

Foley, G. (1999): The Threat of Rising Seas. *The Ecologist* 29/2, 76–78.

Foley, G. (1999): The Looming Environmental Refugee Crisis. *The Ecologist* 29/2, 96–97.

Forrester, N. (2023): Meet the scientists planning for disasters. Five disaster-planning scientists share what they have learnt from their experiences in how to restore order after chaos. *Nature* 619, S1–S3.

Francis, R. A., Petts, G. E., Gurnell, A. M. (2008) Wood as a driver of past landscape change along river corridors. *Earth Surface Processes* and *Landforms* 33, 1622–1626.

Frischherz, H. és Bolzer, W. (1984): Problems with bank filtrated wells in Austria. *Paper presented to the Working Group on Bank Well Filtration*, Budapest, February 20–24th.

Frisnyák Zs. (1987): A Tisza szabályozás és kára. *História* 9/2, 13–15.

Furuichi M., Kovács A. F., Yoshitaka, E., Yamazaki, H. (2017): A dzsókaszó külföldi elterjedésének kilátásai és a kapcsolódó műszaki kérdések. *Meszesz Hírcsatorna* 6, 5–23.

Gabbay, S. (1994): *The environment in Israel*. State of Isreal, Ministry of the Environment, Jerusalem.

Gajurel, D. (2002a): Dry season grips thristy Kathmandu, Kathmandu, Nepal. May 7, 2002 (ENS) http://ens-news.com/ens/may2002/2002L-05-07-01.html

Gajurel, D. (2002b): Nepal's New National Park Protects Kathmandu Water Supply. Kathamndu, Nepal, February 19, 2002, ENS: http://ens-news.com/ens/feb2002/2002L-02-19-01.html

Gálhidy L. és Jordán F. (2010): Őserdők Európában. *Természet Világa* 141/8, 356–360.

Ganguly, S. S. (2013): Troubled waters in South-East Asia. In: M. Feroze et al. (eds), 76–84.

GAO (U.S. Government Accountability Office) (2013). *Toxic substances: EPA has increased efforts to assess and control chemicals but could strengthen its approach*. Washington, D.C.

Garbrecht, G. (1983): Ancient water works – Lessons from history. *Impact of Science on Society*, UNESCO, 1, 10.

Garnaut, R. 2008: *The Garnaut Climate Change Review*. Cambridge Books, Cambridge University Press. http://www.garnautreview.org.au/pdf/Garnaut.Chapter5.pdf

Garstecki, T. és Amr, Z. (2011): *Biodiversity and Ecosystem Management in the Iraqi Marshlands – Screening Study on Potential World Heritage Nomination*. Amman, Jordan, IUCN.

Gartner, J. (2007): Climbers Bring Climate Change from Mountaintop to Laptops. *Environmental News Service* WEST LINN, Oregon, July 31 (ENS).

Gaulke, L. S. (2006): On-site wastewater treatment and reuses in Japan. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water Management 159* June, WM2, 103–109.

Gellért M. és Ruepp-Vargay M. (2001): *Mindennapi komposztálás*. Öko-Fórum Alapítvány, Budapest.

Gerin, R. (2017): Faulty construction, heavy rain cause dame to flood Lao villages. Radio Free Asia, 20 September. https://www.rfa.org/english/news/laos/faulty-construction-heavy-rain-cause-dam-to-flood-lao-villages-09202017151556.html

Gibbens, S. (2018): Microplastics found to permeate the ocean's deepest points. *National Geographic*, December. https://www.nationalgeographic.com/environment/2018/12/microplastic-pollution-is-found-in-deep-sea. Megtekintés: 2019. 01. 26.

Gies, E. (2023): The ocean is missing its rivers. *Nautilus online*. https://nautil.us/the-oceans-are-missing-their-rivers-302187. Megtekintés: 2023. 08. 15.

Giles, J. (2006): Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature* 444, 524–525.

Giosan, L., Constantinescu, S., Filip, F., Bing Deng (2013): Maintenance of large deltas through channelization: Nature vs. humans in the Danube delta. *Anthropocene* 1, 35–45. http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2013.09.001

GIZ (2020): *Mekong Delta Climate Resilience Programme (MCRP)*. Supporting the regionally – coordinated institutional frameworks for water and coastal zone management in the Mekong Delta. https://ngocentre.org.vn/files/20200729-tor-for-water-and-resouces-management-consultant-in-ha-noi.pdf.

Gleick, P. H. (1992): Environmental consequences of hydroelectrical development: the role of facility size and type. *Energy* 17/8, 735–744.

Glick, D. (2004): The Big Thaw. *National Geographic* 206/3, 12.

Godoy, M. (2002): Kilimanjaro's Ice Fields Are Melting Away. Washington, D.C., October 17, 2002 (ENS).

Goldsmith, E. és Hildyard, N. (1984): *The Social and Environmental Effects of Large Dams*. Wadebridge Ecological Center.

Gorbunov, A. K. (2001): Impact of the river flow regulation on the hydrological regime and ecosystems of the Volga delta. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches*. *Conference on river restoration*, 103–107.

Gorzó Gy. (1985b): A Balaton üledékéből kitenyészthető planktonikus, heterocisztás cianobaktériumok. *Hidrológiai Közlöny* 6, 357–360.

Goyal, S. (2019): 10 Interesting and Unknown Facts about Sardar Sarovar Dam. https://www.jagranjosh.com/general-knowledge/facts-about-sardar-sarovar-dam-1568703654-1. Megtekintés: 2020. 07. 25.

Graf, W. L. 1996: Geomorphology and Policy for Restoration of Impounded American Rivers: What is „Natural"? In: Rhoads, B. L. **és** Thorn, C. E. (eds): *The Scientific Nature of Geomorphology*. John Wiley and Sons, New York, 443–473.

Grant, N., Moodie, M. és Weedon, C. (1996): *Sewage Solutions*: *Answering the Call of Nature*. Centre for Alternative Technology Publications, 128.

Greenpeace France (2006): Nuclear Waste Management: the lessons from the CSM Disposal Site. Acro Laboratory, 7. https://www.acro.eu.org/wp-content/uploads/2013/11/CSM_GP_GB06.pdf

Grill, G. et al. (2019): Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature* 569, 215–221. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9

Grimm, N. et al. (1989): *Contribution of the hyprheic zone to stability of an arid land stream*. Arizona State University, Tempe, Arizona, 9.

Grosvenor, G. H., Graves, W. és Shupe, J. (1993): Precious resource: Water, Map supplement. *National Geographic* November.

Grönlund, E. (2014): *Sustainable Wastewater Treatment from:* Handbook of Engineering Hydrology, Environmental Hydrology and Water Management Routledge. Megtekintés: 2018. 09. 28. https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/b16766-20

Grönlund, E. és Carlman, I. (2013): A systems ecology view on wastewater treatment sustainability, *Ecotechnology working paper 2013-1a.* Dept. of Engineering and Sustainable Development, Mid Sweden University.

Guerrin, J. (2014): *A floodplain restoration project on the River Rhône (France). Analyzing challenges to its implementation Regional Environmental Change*. Manuscript, IRSTEA – UMR G-Eau. Megtekintés: 2019. 01. 20. https://serval.unil.ch/resource/serval:BIB_C776F3191A21.P001/REF

Gulyás K. (2000): Ármentesítés és szabályozás a Tisza völgyében. In: Sári Zsolt (szerk.): *Ezer év a Tisza mentén*. Jász–Nagykun–Szolnok megyei Múzeumok Igazgatósága, Szolnok, 215–240.

Guynup, S. (2013): Analysis: Waterworld USA: Climate Harming Regional Waters. Posted by News Editor in Latest News, RSS, Water on October 29, 2:49 pm. Megtekintés: 2018. 12. 10. http://ens-newswire.com/2013/10/29/analysis-waterworld-usa-climate-harming-regional-waters/

Günther, F. (1998): Phosphorus management and societal structure. Hampered effluent accumulation process (heap) in different areas of the Swedish society. *Vatten* 554, 199–208.

Gyulai, I. (2009). Fenntartani a fenntarthatatlant. In: Kóródi M. (szerk.): *Az erőszak kultúrája. Fenntartható-e a fejlődés*? Pallas, Budapest, 135–159.

Habersack, H., Piégay, H., Rinaldi, M. (eds) (2008): *Gravel-bed rivers VI – From Process Understand-*

*ing to River Restoration*. Proceedings of the 6th International Gravel-Bed Rivers Workshop, Sankt Jakob, Austria, Sept. 5–6, 2005.

Haggett, P. (2001). *Geography. A Global Synthesis*. Pearson Education Limited, Harlow.

Haidvogl, G. (2018): Historic Milestones of Human River Uses and Ecological Impacts. In: Schmutz, S. és Sendzimir, J. (eds): *Riverine Ecosystem Management. Science for governing towards a sustainable future*. Springer Verlag, 19–39.

Halder, S., Sadhukhan, D., Naha, N. (2013): Transboundary water governance in Indo-Bangladesh lower Ganges basin. In: M. Feroze et al. (eds), 85–96.

Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Blöschl, G. (2014): Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 2735–2772. www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/2735/2014/ doi:10.5194/hess-18-2735-2014

Hamar J. (2000): *Lesznek-e még folyóink*? In: Gadó György Pál (szerk.): *A természet romlása, a romlás természete: Magyarország*. Föld Napja Alapítvány, Budapest, 67–93.

Haq, S. A. (2013): Controlled land raising: sustainable option for flood risk management in Bangladesh. In: M. Feroze et al. (eds), 97–106.

Hardy, D. (2018): Greatest Snowfall on Kilimanjaro Glaciers in Years https://glacierhub.org/2018/04/04/greatest-snowfall-on-kilimanjaro-glaciers-in-years/

Hargitai M. (2001): A gátak nem nőhetnek az égig. *Népszabadság*, március 22.

Harrison, P. és Pearce, F. (2000): *AAAS Atlas of Population & Environment*. University of California Press, Berkeley.

Hauer, C., Gerald, K., Elisabeth, J., Helmut, H. (2009): Floodrisk II – New Strategies for an Integrative Flood Risk Management. The Scientific Scope to find Mutual Solutions in Large River Management and Restoration. Workshop. University of Vienna, Vienna Ecology Centre, Vienna, Austria, 2009. September 7–10.

Hayakawa, H. (1995): A légköri nukleáris kísérletek következményei. *Fizikai Szemle* 1995/6, 186.

Head, B.W. (2010): Water policy – Evidence, learning and the governance of uncertainty. *Policy and Society* 29/2, 171–180.

Hehmayer, I. 1989: Irrigation farming in the ancient oasis of Ma'rib. *Proceedings of the Semiar for Arabian Studies* 19, 33–44.

Héjjas I. (2013): *Az élet megóvása és a környezetvédelem* – tények és hiedelmek. Magánkiadás, Nagykanizsa, 155.

Henry, D. (1978): Designing for development. What is appropriate technology for rural water and sanitation. In: Widstrand, C.: *The social and environmental effects of water development in developing countries*. Pergamon, Oxford, 365.

Hirsch, D. (2013): Institutional Dynamics of Khorezmian Water Management on the Farmer Level in Uzbekhistan: From Ancient Practices to the Present Situation. In: Grover, V. I. és Krantzberg, G. (eds): *Water Co-Management*. Taylor and Francis, London, 337–352.

Hoanh Chu Thai, Suhardiman, D., Le Tuan Anh (2014): Irrigation development in the Vietnamese Mekong Delta: Towards polycentric water governance? *International Journal of Water Governance* 2, 61–82. doi:10.7564/14-IJWG59

Hoegh-Guldberg, O. et al. 2018: Impacts of 1.5 °C global warming on natural and human systems. In: *Global warming of 1.5* °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Masson-Delmotte, V. et al. (eds). In Press.

Hoekstra, A. Y. és Mekonnen, M. (2012): The water footprint of humanity. PNAS February 28, 109/9, 3232–3237. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1109936109

Hoff, B. (1994): *Micimackó és a Tao*. Tericum Kiadó, Budapest, 166.

Hoffman, C. és Blackwell, M. (2006): Naturally functioning floodplains affect water and soil quality. In: Blackwell, M. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 46–59.

Horgan, J. (1998): *The End of Science. Facing the limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*. Abacus.

Horváth B. (1993): A függetlenség mint hübrisz. Az ember és természet kölcsönhatása az Alföldön. *Tér és Társadalom* 3–4, 105–114.

Horváth B. és Pestiné dr. Rácz É. (2011): Ökológia. Digitális tankönyvtár. https://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop425/0021_Okologia/ch04s03.html

Houtman, C., Kroesbergen, J., Lekkerkerker-Teunissen, K. és van der Hoek, J. (2014): Human health risk assessment of the mixture of pharmaceuticals in Dutch drinking water and its sources based on frequent monitoring data. *Science of The Total Environment* 496, 54–62.

Howard, A. J., Brown, A. G., Carey, C. J., Challis, K., Cooper, L. P., Kincey, M., Toms, P. 2008: Archaeological resource modelling in temperate river valleys: a case study from the Trent Valley, UK. *Antiquity* 82, 1040–1054.

https://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/three-gorges-dam-disaster3.htm

Huntjens, P., Pahl-Wostl, C. ***és*** Grin, J. (2010): Climate change adaptation in European river basins. *Reg Environ Change* 10, 263–284.

Huss, M. és Hock, R. (2018): Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8, 135–140. doi:10.1038/s41558-017-0049-x

HVG (2018): Azért a víz az úr, *Heti Világgazdaság*, december 20.

HVG (2019. április) Még mindig pazarolja a vizet? április 29. https://hvg.hu/elet/20190429.Meg.mindig.pazarolja.a.vizet

HVG (2019. június): Ha nagy eső zúdul Budapestre, a szennyvíz egy része tisztítatlanul ömlik a Dunába. június 03. https://hvg.hu/gazdasag/20190603.Ha.nagy.eso.zudul.Budapestre.a.szennyviz.egy.reszevel.egyutt.tisztitatlanul.omlik.a.Dunaba

HVG (2021): Etiópia duzzaszt. Harc a vízért. *Heti Világgazdaság*, 2021. július 15., 21.

hvg.hu/MTI (2018): Túl kevés a víz a Dunában, emelték a paksi atomerőmű intézkedési tervének fokozatát. https://hvg.hu/kkv/20181017.Annyira.keves.a.viz.a.Dunaban.hogy.emeltek.a.paksi.atomeromu.intezkedesi.tervenek.fokozatat.

Hvistendahl, M. (2008): China's Three Gorges Dam: an environmental disaster? *Scientific American*, March 25. Available at: http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=chinas-*three-gorges-dam-disaster*. Megtekintés: 2010. 07. 18.

Ibáneza, C., Dayb, J., Reyesca, E. (2014): The response of deltas to sea-level rise: Natural mechanisms and management options to adapt to high-end scenarios. *Ecological Engineering* 65, 122–130.

Illényi B. (2019): Szertelenül. *Heti Világgazdaság* 4, 36–37.

Immerzeel, W., Pellicciotti, F., Bierkens, M. P. (2013): Rising river flows throughout the twenty-first century in two Himalayan glacierized watersheds. *Nature Geoscience* 6, 742–745. doi:10.1038/ngeo1896

Inhabitat Staff (2017): The devastating reason Mumbai dogs turn blue. *Inhabitat*, 17 August, https://inhabitat.com/the-devastating-reason-mumbai-dogs-are-turning-blue/

Insarova, K. (2002): Parched Uzbekistan covets Russian river waters. – NUKUS, Uzbekistan, April 30 (ENS). http://ens-news.com/ens/apr2002/2002L-04-30-03.html

Jackson, J. (2012): *Earthquake Hazards and Large Dams in Western China*. A Probe International Study, Adams, P. (ed.), 29.

Jain, N. (2018): Himalayan glaciers are wasting away, threatening mountain communities. Mongabay-India, 14 May. https://india.mongabay.com/2018/05/14/himalayan-glaciers-are-wasting-away-threatening-mountain-communities. Megtekintés: 2019. 01. 13.

Jakab G. (2023): Az utóhatás – egy évvel az aszálykatasztrófa után. *A Földgömb*, **július**–augusztus, 19–21.

Jakab G. és Csengeri E. (2020): A Kőrösök. A vizek változó útja. *A Földgömb* 37/30, tavaszi különszám, 56–67.

Jakucs L. (1971): *A karsztok morfogenetikája*. k.n. Budapest, 310.

Jalil, S. M. (2013): Participatory watershed management to augment water flow during dry period of the year. In: M. Feroze et al. (eds), 187–191.

Jeki G. (2023): Exkluzív fotókon az áradó Dráva – menekülnek az állatok, lakókocsikat sodor el a víz. *Helló Vidék*, 2023. augusztus 10. https://www.hellovidek.hu/kert/2023/08/08/exkluziv-fotokon-az-arado-drava-menekulnek-az-allatok-lakokocsikat-sodor-el-a-viz

Jewell, W. J. (1994): Resource-recovery wastewater treatment. *American Scientist* 82, July–August, 366–375.

Johnson, S. (2006): *The Ghost Map. The Story of London's Most Terrifying Epidemic – and How it Changed Science, Cities and the Modern World*. Pinguin Books Ltd., London, 328.

Jotheri, J. (2018): Recognition criteria for canals and rivers in the Mesopotamian floodplain. In: Zhuang Y. és Altaweel, M. (eds): *Water Societies and Technologies from the Past and Present*, 109–126.

Józsa J. (2018): *A víztudományok helyzete*. Víztudományi Nap, MTA, november 15.

Juhász E. (2008): *A csatornázás története*. Magyar Víziközmű Szövetség, Budapest.

Juhász E. (2018): Beszéljünk a szennyvíztisztítás IV. fokozatáról... avagy... A fenntartható IV. fokozat szükségessége, feltételei és lehetőségei Magyarországon. *Maszesz Hírcsatorna* 2, 7–16.

Jungwirth, M., Hohensinner, S., Muhar, S., Schmutz, S. (2009): Is scientific knowledge on ecology of large rivers adequately represented in ecology, management and legislation? The Scientific Scope to find Mutual Solutions in Large River Management and Restoration. Workshop. University of Vienna, Vienna Ecology Centre, Austria, 2009 September 7–10.

Kajner P., Fazekas I., Flachner Zs., Molnár G. **és** Balogh P. (2009): Szelídvízország. Kézikönyv a Tisza menti ártéri gazdálkodás megalapozásához. www.elotiszaert.hu/

Kalpavriksh és the Hindu College Nature Club (1984): The Narmada valley project: development or destruction? In: Goldsmith, E. és Hildyard, N. (eds): *The Social and Environmental Effects of Large Dams, II. Case studies*. Wadebrdge Ecological Center.

Karácsonyi D. (2021): Borneó. Dayakok és vízi erőművek. *Földgömb*, 2021. július-augusztus, 28–41.

Karácsonyi Z. (2001): Rehabilitation of the 'notch'-system as tool for multipurpose floodplain management on the Upper-Tisza river. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*, 119–123.

Karoly, D., Risbey, J. és Reynolds, A. (2003): *Global Warming Contributes to Australia's Worst Drought*. WWF Australia, Sydney.

Kärrman, E. (2001): Strategies towards sustainable wastewater management. *Urban Water* 3, 63–72.

Kató P. (1990): A bős-nagymarosi vízlépcsőrendszer ökológiájának néhány fontos kérdése. *Hidrológiai Közlöny* 70/6, 359–365.

Kelley, C. (2015): Climate change and drought: a spark in igniting Syria's civil war. *The Conversation*, 3 March. https://theconversation.com/climate-change-and-drought-a-spark-in-igniting-syrias-civil-war-38275

Kelly, C. et al (1997): Increase in flixes of greenhouse gases and methylmercury and loss of total mercury following flooding of an experimental reservoir. *Environmental Science Technology* 31, 1334–1344.

KEM KH (2020): A Komárom-Esztergom Megyei Kormányhivatal KE/06/KTO/00035-46/2020. számú határozata. Tárgy: ÉDV Zrt., Tata, Fényes I. tartalék kút újbóli termelésbe állítása – Előzetes vizsgálat.

Keresztes I. (2009): Bölcső, majdan sír. *Heti Világgazdaság*, augusztus 15.

Keresztes I. (2018): Száraz tények. *Heti Világgazdaság*, november 15.

Keresztes I. (2020): Gátszakadás. *Heti Világgazdaság* 8, 31–32.

Keresztes I. (2020): Gátszakadás. Egyiptom „a Nílus ajándéka", de mostantól Etiópia is az akar lenni. *Heti Világgazdaság* február 20., 31–32. oldal. Online változat: https://hvg.hu/360/202008.kie.anilus.etiop.ujjaszuletes.egyiptomi.katasztrofa.gatszakadas. Megtekintés: 2020. 03. 22.

Keresztes I. (2023): Harc a vízért. *Heti Világgazdaság*, augusztus 17. https://hvg.hu/360/hetilap360/2023/33/20233311szellem4

Kerr, R. A. (2003): Climate change: A Perfect Ocean for Four Years of Globe-Girdling Drought. *Science* 299, 636.

Kiderül (2017): Texas történetének legnagyobb áradását okozza Harvey. augusztus. 28. https://

kiderul.startlap.hu/idojaras-hirek/texas-tortenetenek-legnagyobb-aradasat-okozza-harvey. Megtekintés: 2019. 02. 19.

King, C. A. M. (1962): *Oceanography for geographers*. London.

Kis É. és Lóczy D. (2018): Természeti és antropogén tényezők szerepe az Alsó-Tisza menti partfal-instabilitások kialakulásában. *Földrajzi Közlemények* 142/4, 328–343. https://doi.org/10.32643/fk.142.4.5

Kisgyörgy É. (2017): Bözödújfalu nem akar meghalni. *National Geographic Magyarország*, Kultúra, 08. 19., http://www.ng.hu/Civilizacio/2017/08/18/Bozodujfalu-nem-akar-meghalni

Klijn, F. és Duel, H. (2001): Nature rehabilitation along rhine river branches: Dilemmas and strategies for the long term. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*, 179–188.

Kocsis A. (2001): Természetközeli szennyvíztisztítás Magyarországon. *Zöldlevél*, július–augusztus, 8–10.

Koestler, A. (1967): *A ghost in the machine*. London, Hutchinson & Co.

Koncsos L. (2006): *A Tisza árvízi szabályozása a Kárpát-medencében*. Magyar Természetvédők Szövetsége, 32.

Koncsos L. (2011): Árvízvédelem és stratégia. In: Somlyódy L. (szerk.): *Magyarország vízgazdálkodása: Helyzetkép és stratégiai feladatok*. Köztestületi Stratégiai Programok, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, 207–232.

Kondolf, G. M. (1995): Managing bedload sediments in regulated rivers: examples from California, USA. In: *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology*. AGU Monograph 89, 165–176.

Kondolf, G. M. et al. (2014), Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents, *Earth's Future* 2. doi:10.1002/2013EF000184.

Kondor, A. Cs., Jakab, G., Vancsik, A., Filep, T., Szeberényi, J., Szabó, L., Maász, G., Ferincz, Á., Dobosy, P., Szalai, Z. (2020): Occurrence of pharmaceuticals in the Danube and drinking water wells: Efficiency of riverbank filtration. *Environmental Pollution* 265, 114893. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114893

Konecsny K. (2018): Recenzió Nagy László: Gátszakadások a Kárpát-medencében. Gátszakadások kialakulásának körülményei című könyvéről. *Hidrológiai Közlöny* 98/1, 81–82.

Konkolyné Gyúró É. (2003): Tájkaraktert formáló történelem. Történeti tájalakítás és jelenkori konfliktusok a Fertő-Hanság vidékén. In: Frisnyák S. és Tóth J. (szerk.): *A Dunántúl és a Kisalföld történeti földrajza*. PTE Földrajzi Intézete és a Nyíregyházi Főiskola Földrajz Tanszéke, Nyíregyháza–Pécs, 95–108.

Kordina, H. és Hanish, K. (eds) (2004): *Flussbauliches Gesamtprojekt Östlich von Wien. Umweltverträglichkeitserklärung. Alternative Lösungsmöglichkeiten – Projektsgeschichte, Alternativen und Varianten*, a report commissioned by the Wasserstraßendirektion, Wien.

Kotowski, W., Penning, E., Platteeuw, M., Siedlecki, T., de Swart, E. (2006): Case studies. In: Blackwell, M. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 111–142.

Kovalchuk, A. (2001): Tereble-Rikske reservoir: an example of magnificent engineering approach with catastrophic ecological consequences. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*, 145–150.

Kozák M. (2018): Vízlépcsők üzembe helyezése utáni rendellenességek, okaik, elhárításuk és tanulságaik. *Hidrológiai Közlöny* 98/1, 8–14.

Kraaijenbrink, P. D., Bierkens, M., Lutz, A., Immerzeel, W. (2017): Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers. *Nature* 549, 257–260.

Kravčík, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kováč, M., Tóth, E. (2008): *Water for the recovery of the climate. A new water paradigm*. People and Water NGO, Košice, 122.

Kreier, F. (2022): Tropical forests have big climate benefits beyond carbon storage. *Nature*, 1476-4687. *doi:* https://doi.org/10.1038/d41586-022-00934-6

Krekeler, T., Struckmeier, W., Gersdorf, U. (2008): *Decentralised sanitation and wastewater treatment*. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover, 69.

Krimsky, S. (2017): The unsteady state and inertia of chemical regulation under the US Toxic Substances Control Act. *PLoS Biol* 15/12, e2002404. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2002404

KSH (Központi Statisztikai Hivatal) (2018): Környezeti helyzetkép, 2018, 7., 5. ábra. http://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/idoszaki/pdf/kornyhelyzetkep18.pdf. Megtekintés: 2020. 03. 22.

Kuhn, E. (2020): 2020 Is a Dry Year on the Colorado River. What Happens Next Year Will Be More Important. http://www.inkstain.net/fleck/2020/05/2020-is-a-dry-year-on-the-colorado-river-what-happens-next-year-will-be-more-important/

Kulkarni, A., Shashikantha, P., Chaturvedi, R., Kulkarni, A. V., Satheesh, S. K. (2018): State of Himalayan glaciers and future projections. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/323991338.Policy.Brief.State.of.Himalayan.glaciers.and.future.projections

Kun, Z. (2016): *Ecological restoration and water system development in the protected site and floodplain areas of Szigetköz in Hungary*. North-Transdanubian Water Directorate (ÉDUVIZIG), Győr.

Kuzma, S., Saccoccia, L., Chertock, M. (2023): 25 Countries, Housing One-quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress, World Resources Institute, Insights. https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries August 16 2023. Megtekintés: 2023. 08. 21.

Laessing, U. és Elumami, A. (2019): In battle for Libya's oil, water becomes a casualty. *Reuters World News* July 2. https://www.reuters.com/article/us-libya-security-water-insight/in-battle-for-libyas-oil-water-becomes-a-casualty-idUSKCN1TX0KQ. Megtekintés: 2020. 07. 16.

Lakatos M. (2018): *Változó csapadékeloszlás, gyakoribb szélsőségek*. Víztudományi Nap, Magyar Tudományos Akadémia, 2018. november 15.

Láng I. (szerk.) (2002): *Folyóinkkal való gazdálkodásról*. Folyógazdálkodási Tárcaközi Bizottság, Észak-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság, Győr.

Lászlóffy W. (1982): *A Tisza* [The Tisza]. Budapest.

Laurentino, T. G., Moser, D., Roesti, M., Ammann, M., Frey, A., Ronco, F., Kueng, B., Berner, D. (2020): Genomic release-recapture experiment in the wild reveals within-generation polygenic selection in stickleback fish. *Nature Communications* 11/1. doi: 10.1038/s41467-020-15657-3

Lavergne, M. (1984): The seven deadly sins of Egypt's Asvan hig dam. In: Goldsmith, E. és Hildyard, N. (eds): *The Social and Environmental Effects of Large Dams, Vol II: Case studies*. Wadebridge Ecological Center, 181.

Lazaroff, C. (2001a): Biodiversity Gives Carbon Sinks a Boost. UPTON, New York, April 13 (ENS: http://ens.lycos.com/ens/apr2001/2001L-04-13-06.html/)

Lazaroff, C. (2001b): Warming Oceans Attributed to Greenhouse Gases. Washington, D.C., April 16 (ENS) (http://ens.lycos.com/ens/apr2001/2001L-04-16-06.html)

Lazaroff, C. (2001c): Aerosol Pollution Could Drain Earth's Water Cycle. SAN DIEGO, California, December 7 (ENS), http://ens-news.com/ens/dec2001/2001L-12-07-06.html

Lazaroff, C. (2002a): Arctic Ice Melting at Record Rat. December 9 (ENS), http://ens-news.com/ens/dec2002/2002-12-09-06.asp. Megtekintés: 2019. 01. 13.

Lazaroff, C. (2002b): City Sprawl Worsens Water Shortages. Washington, D.C-, August 28 (ENS) Full report at http://www.americanrivers.org/docs/PavingOurWay1.pdf

Lazaroff, C. (2003a): U.S. Ecosystems Altered by Nitrogen Pollution. January 25 (ENS)

Lazaroff, C. (2003b): Warming Oceans Linked to Four Year Drought. CAMP SPRINGS, Maryland, February 4 (ENS).

LeBlanc, D. (2002): Cape Cod Groundwater Cleanup Challenges Managers Boston, Massachusetts. February 13 (ENS).

Ledec, G. és Quintero, J. (2003): *Good dams and bad dams: Environmental criteria for site selection of hydroelectric projects*. *Latin America and Caribbean Region Sustainable Development Working Paper*. World Bank.

Lehoczky A. (2021): Az árvíz ellen sokszor többet érnek a természetalapú megoldások, mint a gátak.

https://masfelfok.hu/2021/07/23/arviz-ellen-sokszor-tobbet-ernek-a-termeszetalapu-megoldasok-mint-a-gatak/

Lénárt L., Soltész, A., Barokova, D. (2008): Hidrogeológiai értelmezések. In: Dobos E. és Terek, J. (szerk.): Élet a folyók között. A Bodrogköz tájhasználati monográfiája. Miskolci Egyetem, 25–38.

Leopold, L. B: *Sediment problems at Three Gorges dam*. International Rivers Network, Berkeley, California, 4. (http://www.irn.org.programs/threeg/leopold/html)

Lewin, J. (2013): Enlightenment and the GM floodplain. *Earth Surface Processes* and *Landforms* 38, 17–29.

Ligetvári F. (2016): The power of irrigation. *Hidrológiai Közlöny* 96/3, 35–42. 2nd Budapest Water Summit.

Lima, I., Ramos, F., Bambace, L., Rosa, R. (2008): Methane emissions from large dams as renewable energy resources: A Developing nation perspective. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 13, 193–206.

Lóczy D. (2001): Folyóduzzasztás, víztározás – Áldás vagy átok? In: *A vizek és az ember. Tiszteletkötet Lovász György professzor úr 70. születésnapjára*, PTE TTK Földrajzi Intézet, Pécs, 197–215.

Lóczy D., Gál-Balogh R., Prokos H. (2016): Ártérhelyreállítási lehetőségek a Dráva magyarországi szakaszán. *Acta Climatologica et Chorologica, Universitatis Szegediensis*, 50/B, 63–75.

Lóczy, D. és Sütő, L. (2011): Human Activity and Geomorphology. In: *The SAGE Handbook of Geomorphology*. Gregory, K. és Goudie, A. (eds), Sage Publications, London, 260–278. doi: http://dx.doi.org/10.4135/9781446201053.n15

Lóczy, D. (2007): The Changing Geomorphology of Danubian Floodplains in Hungary. *Hrvatski geografski glasnik* 69/2.

Loczy, D. és Gyenizse, P. (2011): Fluvial micromorphology influenced by tillage on a Danubian floodplain in Hungary. *Zeitschrift für Geomorphologie* 55, Suppl. 1, 66–75.

Lóczy, D., Dezső, J., Ronczyk, L. (2016): Floodplain rehabilitation projects in Hungary: case studies from the Danube, Tisza, Körös and Drava rivers. *Bulletin of the Serbian Geographical Society* 96/1, 1–10.

Lóczy, D., Dezső, J., Gyenizse, P., Czigány, Sz., Tóth, G. (2019): Oxbow Lakes: Hydromorphology. In: Lóczy, D. (ed.): *The Drava River*. Spinger Geography. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92816-6_12

Lovejoy, T. és Nobre, C. (2019): Amazon tipping point: Last chance for action. Sci Adv. 2019 Dec 20; 5(12):eaba2949. doi: 10.1126/sciadv.aba2949. PMID: 32064324; PMCID: PMC6989302.

Lovelock, J. E. és Margulis, L. (1973): Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis. *Tellus*, 26, 2.

Lubell, M. és Edelenbos, J. (2013): Integrated Water Resources Management: A Comparative Laboratory for Water Governance. *International Journal of Water Governance* 1, 177–196.

Lucas, C., Hennessey, K., Mills, G., Bathols, J. (2007): *Bushfire Weather in Southeast Australia: Recent trends and projected climate change impacts, consultancy report prepared for the Climate Institute of Australia.*

Luik, A. (2011): Meeting the environmental challenges in farming – organics as best practice model. *Organic Farming as an Opportunity for European Agriculture, European Organic Congress*, May 31st – June 1st 2011, Gödöllő, Hungary.

Lumbroso, D., Hurford, A., Winpenny, J. (2014a): *Synthesis report: Harnessing Hydropower*. Evidence on Demand. Climate, Environment, Infrastructure and Livelihoods Professional Evidence and Applied Knowledge Services (CEIL PEAKS) programme, UK, 81.

Lumbroso, D., Hurford, A. és Winpenny, J. (2014b): *Harnessing Hydropower. Literature Review*. Evidence on Demand. Climate, Environment, Infrastructure and Livelihoods Professional Evidence and Applied Knowledge Services (CEIL PEAKS) programme, UK, 103.

Lutz, A. F., Immerzeel, W. W., Shrestha, A. B., Bierkens, M. (2014) Consistent increase in High Asia's runoff due to increased glacier melt and precipitation. *Nature Climate Change*.

Lüthi, C., Panesar, A., Schütze, T., Norström, A., McConville, J., Parkinson, J., Saywell, D., Ingle, R. (2011): *Sustainable Sanitation in Cities – A Framework for Action*, Papiroz Publishing House, Rijswijk, 164.

Lydersen, K. (2004): USA: Kesergő a palackozott vízről. *Kukabúvár*, a Humusz lapja, 10/1, 48–49.
M. Feroze, A., Khalequzzaman, M., Ahmed, T. (eds) 2013: *Water Resources in South Asia: Conflict to Cooperation*. An outcome of the International Conference on Water Resources of South Asia – Conflict to Cooperation (IC WRSA CC), 4–5 January 2013, Dhaka, Bangladesh.
Macklin, M. G. és Lewin, J. (2015): The rivers of civilization. *Quaternary Science Reviews* 114, 228–244.
Maggs, C. J. (2002): Central Europe Floods August 2002. In: NFT, Scandinavian Insurance Quarterly, 4/2002, http://www.nft.nu/en/central-europe-floods-august-2002. Megtekintés: 2018. 12. 10.
Mäkinen, K. és Khan, S. (2010): Policy considerations for greenhouse gas emissions from freshwater reservoirs. *Water Alternatives* 3/2, 91–105.
Mallet, V. (2000): Waving and drowning. *Financial Times Weekend*, March 11/12.
Maltby, E. és Blackwell, M. (2006): Floodplain processes, functions, values and characteristics. In: Blackwell, M. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 33–34.
Márczis M. (szerk.) (1996): *WETLAND, A tisztuló víz világa. Környezetkímélő és természetközeli szennyvíztisztítási eljárások alkalmazása Magyarországon*. Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium, Budapest.
Marshall, M. (2022): Did a mega drought seed global chaos 4,200 years ago? *Nature* 601, 27 January, 498–501.
Márta I. (2018): „Kedves Jani!" – a volt MVM-vezér utolsó figyelmeztetője a Paks II.-ért felelős Süli Jánosnak. https://hvg.hu/gazdasag/20181120-paks-2-martha-imre-levele-suli-lajosnak
Marten, G. G. (2001): *Human Ecology: Basic concepts for sustainable development*. Earthscan.
Maszesz (2018): Nemzetközi kitekintés: Japán – V4 országok egyedi szennyvíztisztítás workshop 2018.01.23. *Maszesz Hírcsatorna* 1, 61–62.
Matsumoto, N. (ed.) (2015): *Dams in Japan – Overview 2015*. Japan Commission on Large Dams, 30.
Maucha R. (1942): A vízi élettér egyensúlya. *A Magyar Biológiai Kutatóintézet Munkái*, 192–230.
McDonnell, I. (2018): Is Australia's current drought caused by climate change? It's complicated. *The Conversation*, June 8, BST. http://theconversation.com/is-australias-current-drought-caused-by-climate-change-its-complicated-97867
McGuire, G. (1974): Violation of fallow: an engineered disaster in Mezopotamian civilization. In: Drowning, T. és McGuire, G. (eds): *Irrigation' impact on society*. Anthropological papers of the University of Arizona 25, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 10.
Meharg, A., Abedin, J., Cresser, M., Meharg, A., Feldmann, J., Cotter-Howells, J. (2002): Arsenic Accumulation and Metabolism in Rice (Oryza sativa L.). *Environmental Science & Technology* 36/5, 962–968.
Mészáros B. (2004): A Kékkúti Ásványvíz Rt. és a Káli-medence vízkészlete – Ki szárad a végén? *Magyar Narancs* 16/10.
Metcalfe, E. (2000): Nor any drop to drink. *The Ecologist* 30/5, 46–50.
Mezősi G. (2011): *Magyarország természetföldrajza*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 392.
Micklin, P. P. (1984): Soviet river diversion plans: their possible environmental impact. In: Goldsmith, E. és Hildyard, N. (eds): *The Social and Environmental Effects of Large Dams, Vol II: Case studies*. Wadebrdge Ecological Center, 91.
Midriak, R., Sallai R. B., Szemén T., Terek, J., Zaušková, L. (2008): Tájhasználati potenciál. In: Dobos E. és Terek, J. (szerk.): Élet a folyók között. A Bodrogköz tájhasználati monográfiája. Miskolci Egyetem, 177–198.
Miehle D. (2018): Bözödújfalu újra a felszínen. *A Földgömb*, január-február, 17–19.
Milillo, P. et al. (2019): Heterogeneous retreat and ice melt of Thwaites Glacier, West Antarctica. *Science Advances* 5/1, eaau3433. doi: 10.1126/sciadv.aau3433
Millan, L. (2023): One of Europe's Hottest Cities Is Using 1,000-Year-Old Technology to Combat Climate Change. 2022. augusztus 18., CES. https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-08-18/one-of-europe-s-hottest-cities-has-a-climate-change-battle-plan#xj4y7vzkg

Millman, O. (2018): Deepwater Horizon disaster altered building blocks of ocean life. *The Guardian* online, 28 June. Megtekintés: 2019. 02. 12. https://www.theguardian.com/environment/2018/jun/28/bp-deepwater-horizon-oil-spill-report

Miskolczi F. (2018): Értekezés az üvegházhatásról. *Magyar Energetika*, 2018/3, 11.

Mitchell, J. G. (2001): Down the Drain? *National Geographic Magazine*, September, 34–51.

Mitchell, J. (2011): Himalayan glaciers are 'not just melting, they are dying'. *The Ecologist* online, 13th July. https://theecologist.org/2011/jul/13/himalayan-glaciers-are-not-just-melting-they-are-dying

Mollison, B. (1990): *Permaculture: A Practical Guide for a Sustainable Future*. Washington: Island Press.

Molnár G. (1990): *A Tisza völgy vízrendezésének története*. (Kézirat)

Molnár G. (1991): Folyószabályozás régen és ma. *Öko* 2/1.

Molnár G. (1992): Néhány megjegyzés Szigyártó Zoltán: A fokgazdálkodás és az ármentesítés című cikkéhez. *Öko* 3/1, 15–31.

Molnár G. (2002a): A folyó, mint ökológiai rendszer. In: Buka L. és Gyarmathy I. (szerk.): *Élőtáj 2*, Válogatott írások természetről, térről, teremtésről. Dél-Nyírség Bihari Tájvédelmi és Kulturális Értékőrző Egyesület, Debrecen.

Molnár G. (2002b): Adalékok a tiszai vízrendszer anomáliáihoz. *Zöldlevél*, a Magyar Természetvédők Szövetségének hírlevele, június, 3–4.

Molnár G. (2007): *Bodrogköz. Öt folyó ajándéka*. Abiprint, Budapest 2007, 159.

Molnár G. (2009): *Ember és természet, természet és ember*. Kairosz Kiadó, Budapest, 173.

Molnár G. és Pásztor A. (é. n.): Ártéri tájgazdálkodás a Bodrogközben. Egy mintaprogram tanulságai dióhéjban. Bokartisz Környezetgazdálkodási és Tájrehabilitációs Közhasznú Társaság, Karcsa.

Molnár S. (2011): *Az ártéri gazdálkodás környezettörténeti szempontú vizsgálata két alföldi mintaterület példáján*. Doktori értekezés, Szegedi Tudományegyetem Földtudományok Doktori Iskola, 125.

Monosowski, E. (1984): Brazil's Tucurui Dam: development at environmental cost. In: Goldsmith, E. és Hildyard, N. (eds): *The Social and Environmental Effects of Large Dams, Vol II: Case studies*. Wadebridge Ecological Center, 191.

Montaigne, F. (2001a): A river dammed. *National Geographic Magazine*, April, 2–33.

Montaigne, F. (2001b): Water pressure. *National Geographic Magazine*, September, 2–33.

Moore, D., Dore, J., Gyawali, D. (2010): The World Commission on Dams + 10: Revisiting the large dam controversy. *Water Alternatives* 3/2, 3–13.

Moran, E. F., Lopez, M. C., Moore, N., Müller, N., Hyndman, D. (2018): Sustainable hydropower in the 21st century. *PNAS* November 20, 115/47, 11891–11898; first published November 5. https://doi.org/10.1073/pnas.1809426115

Moriarty, J. R. (1968): Floating gardens (chinampa) agriculture in the old lakes of Mexico. *America Indigena* 28/2, 463.

Moss, T. és Monstadt, J. (2008): Institutional dimensions of floodplain restoration in Europe: an introduction. In: Moss, T. és Monstadt, J. (eds): *Restoring floodplains in Europe: policy contexts and project experiences*. IWA Publishing, London.

Mote, P. W., Salathé, E. P., Dulire, V., Jump, E. (2008): *Scenarios of Future Climate Change for the Pacific Northwest*. Report prepared by the Climate Impacts Group, Center for Science in the Earth System, Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Oceans, University of Washington, Seattle.

MTI (2020): Jelentős a mikroműanyag-szennyezettség a Tiszában és mellékfolyóiban. https://hvg.hu/tudomany/20200831-tisza-mikromuanyag-mellekfolyo. Megtekintés: 2020. 08. 31.

MTI/HVG (2020): Már tesztelik a gátat, amivel Etiópia magára haragította a Nílus menti országokat. https://hvg.hu/vilag/20200722-nilus-gat-etiopia. Megtekintés: 2020. 07. 24.

Muggiati, A. (2003): Four Nations Guard Giant South American Aquifer. *Environmental News Service*, May 29. Megtekintés: 2020. 07. 16.

Mukherjee, K., Bhattacharya, A., Pieczonka, T., Ghosh, S., Bolch, T. (2018): Glacier mass budget and

climate reanalysis data indicate a climatic shift around 2000 in Lahaul-Spiti, western Himalaya. *Climatic Change.* doi.org/10.1007/s10584-018-2185-3

Murányi V. (2019): Újraírt tér-képek 2. a bősi vízerőmű és az „Új-Duna" a helyiek szemszögéből. *Fórum Társadalomtudományi Szemle* 21/2, 61–92.

MyNorthwest Staff (2018): New climate change report lays out grim future for the Northwest. https://mynorthwest.com/1199040/national-climate-assessment-pacific-northwest. Megtekintés: 2020. 07. 25.

Nagy Boglárka (2018): Auroville – pusztaságra épült ökogalaxis. *A földgömb*, január-február, 26–40.

Nagy Boldizsár (2012): *A mozdulatlan folyó ügy: Bős–Nagymaros*. Előadás a Galilei Fórumon december 9-én.

Nagy D. (2008): Történeti tájhasználat, In: Dobos E. és Terek, J. (szerk.): Élet a folyók között. A Bodrogköz tájhasználati monográfiája. Miskolci Egyetem, 135–150.

Nagy I., Ligetvári F., Schweitzer F. (2010): Tisza River valley: future prospects. *Hungarian Geographical Bulletin* 59/4, 361–370.

Nagy J., Kiss T., Fiala K. (2018): Hullámtér-feltöltődés vizsgálata az Alsó-Tisza mentén. II. Folyóhátak (parti hátak) feltöltődését befolyásoló tényezők. *Hidrológiai Közlöny* 98/1, 33–39.

NAS (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine) (2019): *Framing the Challenge of Urban Flooding in the United States*. Washington, D.C., The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/25381

National Geographic (2001): *Earth Pulse*, December.

National Hydropower Association (NHA). (2010): *Environmental mitigation technology for hydropower: Summary report on a summit meeting convened by Oak Ridge National Laboratory, the National Hydropower Association, and the Hydropower Research Foundation*. Washington, D.C.

Néma S. (2009): Vízbíráskodás a Győr vármegyei Csilizközben. Vizek, árvizek és társadalmi konfliktusok összefüggései a 18–19. században. In: Andrásfalvy B. és Vargyas G. (szerk.): *Antropogén ökológiai változások a Kárpát-medencében. A Kárpát-medence felszínének változása a földhasználat és az életmód változásának következtében*. PTE Néprajz-Kulturális Antropológia Tanszék, Pécs és L'Harmattan Kiadó, Budapest, 109–128.

Nemani, R., Votava, P., Michaelis, A., Melton, F., Milesi, C. (2011): Collaborative Super computing for Global Change Science. *EOS* 92/13, 109–110.

Neumann, J. (1955): Can we survive technology? *Fortune* 51/6, Reprinted from John von Neumann Collected Works, ed. A. Taub, VI, 523–525.

Newson, M. és Sear, D. (2001): Geomorphological procedures and river Restoration: science, survey and sustainability. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*, 251–253.

Nguyen, L. (2017): Nestlé Competition for the Guarani Aquifer Threatens Guarani Land Rights https://intercontinentalcry.org/nestle-competition-guarani-aquifer-threatens-guarani-land-rights/

Nijland, H. J. és Cals, M. J. R. (eds) (2001): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*. Wageningen, The Netherlands 2000, Proceedings, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment/RIZA Lelystad, 348.

Nilsson, C., Reidy, C., Dynesius, M., Revenga, C. (2005): Fragmentation and flow regulation of the world's largest river systems. *Science*, April 15.

NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate (2018): *National Climate Report for November 2018*, published online December 2018, retrieved on December 9, 2018 from https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/national/201811.

Nogueira, E. (2021): Brumadinho Dam Rupture Judicial Class Action Case Study. *Academia Letters*, Article 4452. https://doi.org/10.20935/AL4452

Norbu, D. (é. n.): *Sedimentation in hydropower dams and reservoirs*. Manuscript, Department of Civil Engineering, College of Science and Technology, 6.

Noronha, F. (2003): Parched Goa College Looks to Rainwater Harvesting. GOA, India, April 7, (ENS).

Norris, S. (2002): The river is life. *The Ecologist* 32/4, 39.

Nováky B. (2011): Az éghajlatváltozás és hatásai. In: Somlyódy L. (szerk.): *Magyarország vízgazdálkodása: Helyzetkép és stratégiai feladatok*. Köztestületi Stratégiai Programok, MTA, Budapest, 85–102.

Nováky B., Ligetvári F., Somlyódy L. (2011): Területi vízgazdálkodás. In: Somlyódy L. (szerk.): *Magyarország vízgazdálkodása: Helyzetkép és stratégiai feladatok*. Köztestületi Stratégiai Programok, MTA, Budapest, 233–254.

Nyírő A. (2020): *Karsztvízkatasztrófa: Antropogén és természeti folyamatok kölcsönhatásai, Dunántúli-középhegység, 1949–1989*. Doktori értekezés, Szent István Egyetem, Enyedi György Regionális Tudományok Doktori Iskola, Gödöllő, 175.

Odum, E. P. (1997): *Ecology: A Bridge between Science and Society*. Sunderland, USA: Sinauer Associates Inc., 331.

Odum, H. T. (1994): *Ecological and General Systems: An Introduction to Systems Ecology*. (Revised edition of: Systems Ecology, 1983, John Wiley, 644.) University Press of Colo., PO Box 849, Niwot, CO., 80544. 644.

Ogawa, H. (2006): Domestic wastewater treatment by johkasou systems in Japan. https://www.env.go.jp/recycle/3r/en/asia/02_06/01.pdf. Megtekintés: 2023. 12. 18.

Okruszko, T. és Querner, E. (2006): Natural flood defences can contribute to flood risk management. In: Blackwell, M. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 41–46.

Oláh J. (1998): Dunai krétakör. *Liget* 1998/5.

Olson, E. et al. (2002): *What's On Tap? Grading Drinking Water in U.S. Cities*. Natural Resources Defense Council (NRDC), San Francisco.

Opperman, J. J., Moyle, P. B., Larsen, E. W., Florsheim, J. L., Manfree, A. D. (2017): *Floodplains: Processes and Management for Ecosystem Services*. Oakland, University of California Press, 258.

Opperman, J. J., Galloway, G., Fargione, J., Mount, J., Richter, B., Secchi, S. (2009): Sustainable Floodplains Through Large-Scale Reconnection to Rivers. *Science* 326, 11 December, 1467–1488.

Origo (2014): Összedőlt a vízzel elárasztott bözödújfalusi templom. MTI 2014.06.30. 19:23, http://www.origo.hu/nagyvilag/20140630-osszedolt-a-vizzel-elarasztott-bozodujfalusi-templom.html

Orr, D. (2002). *The Nature of Design: Ecology, Culture, and Human Intention*. New York: Oxford University Press.

Országh J. (2016): A Vízönellátó honlap vezérvonala. http://www.eautarcie.org/hu/

Országh J. (2020): *A víz és gazdája*. Víztisztító Szerviz Kft., Budapest, 730.

Outerbridge, T. (1987): The disappearing chinampas of Xochimilco. *The Ecologist* 17/2/3, 76–83.

Overeem, I. és Syvitski, J. (eds) (2009): *Dynamics and Vulnerability of Delta Systems.* Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone, IGBP/IHDP Core Project. LOICZ Reports és Studies No. 35. GKSS Research Center, Geesthacht, 54.

Overeem, I., Kettner, A., Syvitski, J. (2013): Impacts of humans on river fluxes and morphology. In: Wohl, E. (ed.): *Treatise of Geomorphology: Volume 9, Fluvial Geomorphology*. New York, Elsevier, 828–842. DOI: 10.1016/B978-0-12-374739-6.00267-0

Painter, J (2023): Climate change: multi-country media analysis shows scepticism of the basic science is dying out. *The Conversation online*. https://theconversation.com/climate-change-multi-country-media-analysis-shows-scepticism-of-the-basic-science-is-dying-out-198303

Palmer, M. A. et al. (2008): Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers* in *Ecology* and the *Environment* 6/2, 81–89. doi:10.1890/060148

Pandit, M. K. és Grumbine, R. E. (2012): Potential Effects of Ongoing and Proposed Hydropower Development on Terrestrial Biological Diversity in the Indian Himalaya. *Conservation Biology* 26/6, 1061–1071. doi: 10.1111/j.1523-1739.2012.01918.x

Parfit, M. (1993): The chaos of supply. *National Geographic Special Edition* 184/5A, 18–37.

Parkinson, C. L. (2003): Aqua: An Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41/2, 173–183.

Paulovics P. (2002): Vélemény a Vásárhelyi Terv Továbbfejlesztése (VTT) című koncepciótervről. *Zöldlevél, a Magyar Természetvédők Szövetségének lapja*, március, 1–4.

Pazwash, H. (1983): Iran's modes of modernisation: greening the desert, deserting the greenery? *Civil Engineering*, March, 50.

Penning, E., Gerritsen, A., Querner, E., de Swart, E., Haasnoot, M., Leenen, I. (2006): The roles of floodplains from a socio-economic perspective. In: Blackwell, M. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 71–83.

Penning, E., Platteeuw, M., Hoffman, C. (2006/2): Organising a floodplain restoration project? In: Blackwell, M. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 83–93.

Pennington, B. T., Bunbury, J., Hovius, N. (2016): Emergence of Civilization, Changes in Fluvio-Deltaic Style, and Nutrient Redistribution Forced by Holocene Sea-Level Rise. *Geoarchaeology* 31/3, 194–210. https://doi.org/10.1002/gea.21539

Perakis, S. S. és Hedin, L. O. 2002: Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature* 415, 416–419.

Péteri L. (1977): http://realzoldek.hu/dok/PeteriLaszlo/Bos-Nagymaros-2/1977-BNV-eredeti-tervhelyszinrajz.jpg

Peterson, B., Vorosmarty, C., Lammers, R., Shiklomanov, A. (2002): Increasing River Discharge to the Arctic Ocean. *Science*, December 13.

Peterson, S. és Strong, B. (1993): Ecological engineering for wastewater treatment. *US Water News*, April, 7.

Petts, G. E. és Amoros, C. (eds) (1996): *Fluvial Hydrosystems*. Chapman and Hall, London, 322.

Phillips, T. (2020): *A világ hülyéi. Hogyan cseszett el mindig mindent az emberiség*. Athenaeum, Budapest, 256.

Pinke Zs. (2015): *Adaptation and Rise – Modernization and Decline: Little Ice Age Challenges and Social Responses on the Trans-Tisza Region (Hungary)*. Doctoral thesis, University of Pécs Faculty of Humanities Interdisciplinar Doctoral School 'Europe and Hungarians in the 18th-20th centuries' Historical Doctoral Program.

Pinke, Zs., Ferenczi, L., Gábris, Gy., Nagy, B. (2015). Settlement patterns as indicators of water level rising – Case study on the wetlands of the Great Hungarian Plain. *Quaternary International* 415, 204–215.

Pinke Zs., Ferenczi L., Laszlovszky J., Majláthné Sipos Cs., Szabó B., F. Romhányi B. (2023): Változás és változatlanság. Kérdések az Alföld késő középkori és kora újkori erdősültségéről. *Magyar Nyelvjárások* 61, 673–696.

Pinke, Zs. (2014): Modernization and decline: an eco-historical perspective on regulation of the Tisza Valley, Hungary. *Journal of Historical Geography* 45, 92–105.

Pintér J. és Szabó Z. (2020): Karakorum: Édenkert és puskaporos hordó. *A földgömb* 38/338, 20–39.

Platteeuw, M., Okruszko, T., Maltby, E. (2006): Existing international policy and floodplain management? In: Blackwell, M. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 94–99.

Pokorný, J. és Rejšková, A. (2008): Water Cycle Management. In: Jorgensen, S. E. és Fath, B. (eds): *Encyclopedia of Ecology* Vol. 5.

Polonyi P. (1986): *Kína*. Útikönyv, Panoráma Athaneum Nyomda, Budapest

Postel, S. (1992): *Last oasis: facing water scarcity*. Worldwatch Environmental Alert Series, Norton and Company, New York, 240.

Potgieter, S., Pinto, A., Sigudu, M., du Preez, H., Ncube, E., Venter, S. (2018): Long-term spatial and temporal microbial community dynamics in a large-scale drinking water distribution system with multiple disinfectant. *Water Research* 139, 406–419.

Pottinger, L. 2000: The Environmental Impacts of Large Dams. International River Networks, Berkeley, CA, 1–3. http://irn.org/basics/impacts.html. Megtekintés: 2020. 07. 25.

Pottinger, L. (2001): Nagy gátak árnyékában. *Liget* 1991. december, 93–96. https://ligetmuhely.com/liget/nagy-gatak-arnyekaban/ Látogatás: 18 .12 .2023.

Pournelle, J. R. (2013): Physical Geography. In: *The Sumerian World* (Crawford, H. ed.). Routledge Companion to Museum Ethics. Oxford: Routledge, 13–32.
Pralong, R. (1987): Entschlammung von Stauseen bis 200 m Tiefe. *Wasserwirtschaft* 77/6, 386–388.
Probáld F. (szerk.) (2000): *Európa regionális földrajza*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 580.
Rácz L. (2016): Mi a kis jégkorszak? *Történeti Földrajzi Közlemények* 4/1, 15–46.
Rácz L. I. (2014): A kútfúrás története, az artézi kutak magyarországi helyzete. *Hadmérnök* 9/3, 296–303.
Radović, T., Grujić, S., Petković, A., Dimkić, M., Laušević, M. (2015): Determination of pharmaceuticals and pesticides in river sediments and corresponding surface and ground water in the Danube River and tributaries in Serbia. *Environ Monit Assess* 187, 4092.
Rădulescu, M. A., Leendertse, W., Arts, J. (2021): Metamorphosis of a Waterway: The City of Nijmegen Embraces the River Waal, Arcadia, Autumn 2021, no. 29 – Arcadia Collection: Water Histories, https://www.environmentandsociety.org/arcadia/metamorphosis-waterway-city-nijmegen-embraces-river-waal
Rákóczi L. (1989): A vízlépcsők hatása a hordalék és mederviszonyokra. *Vízügyi Közlemények* 71/1, 5–24.
Rangnekar, D. (1996): Rights over resources. *The Ecologist* 26/6, 312–314.
Rátvai D. (2015): *Tata és Tőváros karsztforrásainak vízhozamváltozása térképen ábrázolva*. Szakdolgozat, Földtudományi Alapszak, ELTE TTK. Kézirat, 33.
Reclus, É. (1890–1892): *A hegyek története*, Magyar Természettudományi Kiadó Vállalat, Budapest, 198.
Reich Gy. (2011): A hazai vízgazdálkodás intézményrendszere. In: Somlyódy L. (szerk.): *Magyarország vízgazdálkodása: Helyzetkép és stratégiai feladatok*. Köztestületi Stratégiai Programok, MTA, Budapest, 289–330.
Renaud, F., Syvitski, J., Sebesvari, Z., Werners, S., Kremer, H., Kuenzer, C., Ramesh, R., Jeuken, A. és Friedrich, J. (2013): Tipping from the Holocene to the Anthropocene: How threatened are major world deltas? *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5/6, 644–654.
Retallack, S. és Bunyard, P. (1999): We're Changing Our Climate! Who Can Doubt It? *The Ecologist* 29/2, 60–63.
Rhodes, E. C., Perotto-Baldivieso, H. L., Tanner, E. P., Angerer, J. P., Fox, W. E. (2023): The Declining Ogallala Aquifer and the Future Role of Rangeland Science on the North American High Plains. *Rangeland Ecology & Management* 87, 83–96.
Rignot, E. et al. (2019): Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *PNAS* January 14. https://doi.org/10.1073/pnas.1812883116
Rijke, J., Ashley, R., Gersonius, B., Sakic, R. (2016): *Adaptation mainstreaming for achieving flood resilience in cities*. Melbourne, Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, 45.
Ritter, K. (2019): Tehran Faces Crisis As Iran's Water Supply Runs Low. *The Circle of Blue*, https://www.circleofblue.org/2018/middle-east/tehran-faces-crisis-as-irans-water-supply-runs-low. Megtekintés: 2020. 07. 16.
La Riviére, J. W. Maurits (1989): *"Threats to the World's Water" in Scientific American Magazine Vol. 261 No. 3 (September 1989), p. 80*
Robinson, J. A. (2023): *Law of Water Rights and Resources, 2023 ed. (Environmental Law Series)*. Thomson Reuters, 908.
Rockström, J. et al. (2009): A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475. doi:10.1038/461472a.
Rónai A. (1985): Az Alföld negyedidőszaki földtana. *Geologica Hungarica – Ser. Geol.* 21, 446.
Rosenkranz, E. (1977): *Das Meer und seine Nutzung*. Gotha/Leipzig, 128.
Rost, S. (2017): Water management in Mesopotamia from the sixth till the first millennium B.C.. *WIREs Water* 4, Inc. 4:e1230. doi: 10.1002/wat2.1230
Rothé, J.-P. (1970): Man made earthquakes. *Tectonophysics*, 215–238.
Ruane, L. (2018): What takes pressure off drinking water aquifers serving Southwest Florida? *Fort Myeres News Press*, 20 July. https://eu.news-press.com/story/news/2018/07/20/drinking-water-aquifer-safeguards-how-they-working/802835002. Megtekintés: 2019. 02. 19.
Rubin, Z. K., Kondolf, G., Carling, P. (2014): Anticipated geomorphic impacts from Mekong

basin dam construction. *International Journal of River Basin Management*, 1–17, doi: 10.1080/15715124.2014.981193

Rudd, J., Harris, R., Kelly, C., Hecky, R. (1993): Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases? *Ambio* 22, 246–248.

Ruggeri, G. (2002): International Workshop on "Ecological, sociological, and economic implications of sediment in reservoirs". Paestum, Italy, 8–10 April.

Russell, M. (2018): Water in Central Asia: an increasingly scarce resource. *EPRS, European Parliamentary Research Service*, Briefing, September. http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/625181/EPRS_BRI(2018)625181_EN.pdf

Saatsaz, M. és Rezaei, A. (2023): The technology, management, and culture of water in ancient Iran from prehistoric times to the Islamic Golden Age. *Humanities and Social Sciences Communications* 10:142. https://doi.org/10.1057/s-01617-023-41599x

Šakić Trogrlić, R., Rijke, J., Dolman, N., Zevenbergen, C. (2018): Rebuild by Design in Hoboken: A Design Competition as a Means for Achieving Flood Resilience of Urban Areas through the Implementation of Green Infrastructure. *Water* 10, 553. doi:10.3390/w10050553

Sale, K. (1991). *Dwellers in the Land, The Bioregional Vision*. New York, New Society Publishers 216.

Salem, A., Dezső, J., El-Rawy, M., Lóczy, D. (2020). Hydrological Modeling to Assess the Efficiency of Groundwater Replenishment through Natural Reservoirs in the Hungarian Drava River Floodplain. *Water* 12/1, 250. https://doi.org/10.3390/W12010250

Samu A. (2022): Mi fán terem a folyók újjáélesztése? WWF Blog, 2022.06.03. https://wwf.hvgblog.hu/2022/06/03/mi-fan-terem-a-folyok-ujjaelesztese/

Sándor A. (szerk.) (1983): *A Bükki Nemzeti Park. Kilátás a kövekről*. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.

Sardar Sarovar Narmada Nigam Ltd. (2020): Main Canal. https://sardarsarovardam.org/main-canal.aspx. Megtekintés: 2020. 07. 28.

Sarkadi P. és Maász G. (2020): Gyógyszermaradványok a Balatonban. https://greenfo.hu/hir/gyogyszermaradvanyok-a-balatonban. Megtekintés: 2020. 05. 27.

Scheaffer, J. R. és Stevens, L. (1983): *Future water: an exciting solution to America's most serious resource crisis*. William Morrow & Company, New York.

Scheuerlein, H. (2002): Management of sediment deposits. International Workshop on "Ecological, sociological, and economic implications of sediment in reservoirs". Paestum, Italy, 8–10 April.

Schiermeier, Q. (2008): Water: A long dry summer. *Nature* 452/7185, 270–273. doi:10.1038/452270a

Schindler, S. et al. (2016): Multifunctional floodplain management and biodiversity effects: a knowledge synthesis for six European countries. *Biodiversity and Conservation*, May. doi: 10.1007/s10531-016-1129-3

Schlanger, Z. (2018): Swiss residents are wrapping glaciers in blankets to keep them from melting. World Economic Forum online, https://www.weforum.org/agenda/2018/03/swiss-residents-are-wrapping-glaciers-in-blankets-to-keep-them-from-melting. Megtekintés: 2019. 01. 13.

Schmutz, S. et al. (2015): Response of fish communities to hydrological and morphological alterations in hydropeaking rivers of Austria. *River Research and Applications* 31, 919–930.

Schneider, E. (2001): Restoration of floodplain meadows and forests. Results of 15 years of monitoring in natural and controlled succession on re-flooded areas in the nature reserve Kühkopf / Knoblochsaue / Upper Rhine. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*, 201–203.

Schumm, S. A. (1977): *The Fluvial System*. John Wiley and Sons, New York, 338.

Schweitzer F. (2002): Szempontok a Tisza vízgyűjtőjének vizsgálatához a földrajztudományok szempontjából. *A Duna Kör hírei*, november, 1–6.

Schweitzer F. (2009): Strategy or disaster. Flood prevention related issues and actions in the Tisza river basin. *Hungarian Geographical Bulletin* 58/1–4, 3–17.

Scorpio, V., Surian, N., Cucatoc, M., Dai Prád, E., Zolezzi, G., Comitia, F. (2018): Channel changes of the Adige River (Eastern Italian Alps) over the last 1000 years and identification of the historical fluvial corridor. *Journal of Maps* 14/2, 680–691. https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1531074

Seneviratne, S. I. et al. (2012): *Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 109–230, Cambridge University Press, Cambridge.

Seo, Ki-Weon, Dongryeol Ryu, Jooyoung Eom, Taewhan Jeon, Jae-Seung Kim, Kookhyoun Youm, Jianli Chen, Wilson, C. (2023): Drift of Earth's Pole Confirms Groundwater Depletion as a Significant Contributor to Global Sea Level Rise 1993–2010. *Geophysical Research Letters* 50/12. https://doi.org/10.1029/2023GL103509

Şerban, G., Sabău, D., Bătinaș, R., Brețcan, P., Ignat, E., Nacu, S. (2020): Water Resources from Romanian Upper Tisa Basin. In: Negm, A. et al. (eds): *Water Resources Management in Romania*. Springer Water. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22320-5_12

Shashikantha, P. és Kulkarni, A. (2018). Decadal change in supraglacial debris cover in Baspa basin, Western Himalaya. *Current Science* 114/4: 792–799. doi: 0.18520/cs/v114/i04/792-799

Sheldrake, R. (1987). *A New Science of Life. The Hypothesis of Formative Causation*. London, Paladin Grafton Books, 286.

Shermer, M. (2003): Bottled twaddle. *Scientific American*, July, 23.

Shirley, R. és Kammen, D. (2013): *Kampung Capacity: Local Solutions for Sustainable Rural Energy in the Baram River Basin, Sarawak, Malaysia*. University of California, Renewable and Appropriate Energy Laboratory (REAL). https://rael.berkeley.edu/Kampung-Capacity

Shuval, H. I. et al. (1986): *Wastewater irrigation in developing countries: health effects and technical solutions*. World Bank, Washington, D.C.

Simon T. (1999): *Természetföldrajz*. AKG Kiadó, Budapest.

Simonffy Z. (2011a): 3. fejezet: A Vízkeretirányelv. In: Somlyódy L. (szerk.): *Magyarország vízgazdálkodása: Helyzetkép és stratégiai feladatok*. Köztestületi Stratégiai Programok, MTA, Budapest, 103–120.

Simonffy Z. (2011b): 4. fejezet: Vízkészletek és vízigények. In: Somlyódy L. (szerk.): *Magyarország vízgazdálkodása: Helyzetkép és stratégiai feladatok*. Köztestületi Stratégiai Programok, MTA, Budapest, 121–168.

Sleeper (2018): Komment Antalffy Tibor blogjához, http://www.antalffy-tibor.hu/2590-alomszek. Megtekintés: 2022. 04. 16.

Smits, A., Cals, M. és Drost, H. (2001): Evolution of European river basin management. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*, 41–48.

Sneed, M. et al. (2003): Detection and Measurement of Land Subsidence Using Interferometric Synthetic Aperture Radar and Global Positioning System, San Bernardino County, Mojave Desert, California. *U.S. Geological Survey Report.* http://water.usgs.gov/pubs/wri/wri034015/

Somlyódy L. (2003): *Az értől az óceánig. Víz: a jövő kihívása*. Mindentudás Egyeteme, Duna Televízió, február 6.

Somlyódy L. (2008): Töprengések a vízről. Lépéskényszerben. *Magyar Tudomány* 4, 462.

Somlyódy L. (2011): Quo vadis, hazai vízgazdálkodás? Stratégiai összegzés. In: Somlyódy L. (szerk.): *Magyarország vízgazdálkodása: Helyzetkép és stratégiai feladatok*. Köztestületi Stratégiai Programok, MTA, Budapest, 9–84.

Somlyódy L. (2018): *A felszíni vizek minősége. Modellezés és szabályozás.* Typotex, Budapest, 372.

Sommer, C. et al. (2020): Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century. *Nature Communications* 11, 3209. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16818-0

Somogyi S. (1967): Az ármentesítések és a folyószabályozások (vázlatos) földrajzi hatásai hazánkban. *Földrajzi Közlemények* 15/91/2, 145–158.

Southwick, C. H. (1976): *Ecology and the Quality of Our Environment.* Van Nostrand Reinhold, New York.

Sparks, R. (2016): Controversy and Science at the Meeting of Great Rivers. *Elsah History* 109, 110, Summer, 7–19.

Spitzer, A. (2001): Nunavut earns cold cash by bottling bergs, IQALUIT, Nunavut, Canada, October 11, 2001 (ENS) http://ens-news.com/ens/oct2001/2001L-10-11-03.html

Staley, J. (1982): *Words for my brother. Travels between the Hindu Kush and the Himalayas*. Oxford University Press, Oxford.

Stanford, J. A. és Ward, J. V. (1988): The hyporheic habitat of river ecosystems. *Nature* 335/6185, 64–66.

Stanners, D. és Bourdeau, P. (eds) (1995): *Europe's Environment: The Dobříš Assessment*. European Environmental Agency, Copenhagen.

Starosolszky Ö. (1994): *Az éghajlatváltozás hatása a hidrológiai és vízminőségi paraméterekre.* Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Rt., VITUKI, 59.

Steding, D. et al. (2002): Mercury From China Rains Down on California SANTA CRUZ, California, December 20 (ENS).

Stepanova, N., Petrov, A., Shagidullin, R., Gabaydullin, A. (2001) Determination of the maximum allowable load for waste water discharges. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*, 159–163.

Stone, G. S. (2001): Exploring Antarctica's Islands of Ice. *National Geographic Magazine*, December, 36–51.

Stratégia 2014 konzorcium (2014): Szennyvíziszap kezelési és hasznosítási stratégia 2014–2023. Vállalkozási szerződés keretében stratégiai felülvizsgálat, szennyvíziszap hasznosítási és -elhelyezési projektfejlesztési koncepciókészítés (KEOP-7.9.0/12-2013-00 09). Megbízó: Országos Vízügyi Főigazgatóság, 144.

Sudmeier-Rieux, K. et al. (2021): Scientific evidence for ecosystem-based disaster risk reduction. *Nature Sustainability*. https://doi.org/10.1038/s41893-021-00732-4

Sugár É. (2015): *Hazai élelmiszerek és az előállításukhoz felhasznált víz arzéntartalmának vizsgálata*. Doktori értekezés, ELTE Kémia Doktori Iskola, 120.

Surroca, C. et al. (2018): *An Auroville Water Management Strategy: Version 7 (March 2018).* http://aurovillewater.in/water-management-strategy-feedback. Megtekintés: 2018. 11. 02.

Sutherland, D. (2001): Central Florida drinking water could run out in five years. ENS Ameriscan, 11 December.

Swart, E. de (2006a): Flooding in Europe. In: Blackwell, M. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 21–24.

Swart, E. de (2006b): Flood risk management. In: Blackwell, M.S.A. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 27–33.

Swart E. de, Okruszko, T., Piórkowski, H. (2006): The main characteristics of naturally functioning floodplains. In: Blackwell, M. és Maltby, E. (eds): *How to use floodplains for flood risk reduction. Ecoflood Guidelines*, 36–39.

Syvitski, J. P. M. és Saito, Y. (2007): Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and Planetary Change* 57, 261–282.

Syvitski, J. et al. (2009): Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience* 2, 681–686. https://doi.org/10.1038/ngeo629

Syvitski, J. et al. (2014): Anthropocene Metamorphosis of the Indus Delta and Lower Floodplain. http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2014.02.003

Szabó G. (2009): A természet ereje. *Heti Világgazdaság*, augusztus 15., 34, 61–63.

Szabó G. (2017): Pár párhuzam. *Heti Világgazdaság*, október 26.

Szabó G. (2020/2): Fiatalíthatom. *Heti Világgazdaság*, július 30., 31, 58–59.

Szabó J. (1993): A víz földrajza. In: Borsy Zoltán (szerk.): Általános természetföldrajz. Budapest, 124–250.

Szabó M. (2003): A Duna környezetformáló hatása a Szigetközben. In: Frisnyák S. és Tóth J. (szerk.): *A Dunántúl és a Kisalföld történeti földrajza*. PTE Földrajzi Intézete és a Nyíregyházi Főiskola Földrajz Tanszéke, Nyíregyháza-Pécs, 119–126.

Szabó Ö. (2000): Árvíz, belvíz, természet. *Népszabadság*, július 26., 10.

Szabó P. (2009): Hagyományos erdőgazdálkodás a Kárpát-medencében. In: Andrásfalvy B. és Vargyas G. (szerk.): *Antropogén ökológiai változások a Kárpát-medencében. A Kárpát-medence felszínének*

*változása a földhasználat és az életmód változásának következtében*. PTE Néprajz-Kulturális Antropológia Tanszék, Pécs és L'Harmattan Kiadó, Budapest, 129–144.

Szabó Y. (2020): Zavarosban bogarásznak. *Heti Világgazdaság*, február 27., 50–51.

Szalontai, Cs. (2016): Flood risk in szeged before river engineering works: A historical reconstruction. *Journal of Environmental Geography* 9/3–4, 1–12.

Szigyártó Z. (1991): A fok-gazdálkodás és az ármentesítés. *Öko* 2/2, 15–21.

Szigyártó Z. (2018): Javaslat a vízszinttartással működő árvízi szükségtározó-rendszer üzemeltetésére. *Hidrológiai Közlöny* 98/1, 15–24.

Szöllősi-Nagy A. (2019): Víz – A XXI. század nagy kihívása. Mit tehetnénk a fenntartható vízgazdálkodásért a felsőoktatásban? In: Lányi A. és Kajner P. (szerk.): *A fenntarthatóság témaköre a felsőoktatásban*. UNESCO Magyar Nemzeti Bizottság, 29–40.

Szűcs P., Madarász T., Dobos E., Turai E. (2018): *INNOVÍZ – Innovatív megoldások a felszín alatti vízkészleteink hasznosításában*. Víztudományi Nap, MTA, november 15.

Taghavi-Jeloudar, M., Mooyoung Han, Davoudi, M., Mikyeong Kim (2013): Review of Ancient Wisdom of Qanat, and Suggestions for Future Water Management. *Environmental Engineering Research* 18/2, 57–63. doi: https://doi.org/10.4491/eer.2013.18.2.057

Takács K. (2001): Árpád-kori csatornarendszerek kutatása a Rábaközben és a Kárpát-medence egyéb területein, I-II. rész. *Korall* (2000) Nyár, 27–61; *Korall* (2001) Tavasz-Nyár, 297–314.

Takács K. és Füleky Gy. (2003): Középkori csatornarendszerek nyomai a Kisalföldön. In: Frisnyák S. és Tóth J. (szerk.): *A Dunántúl és a Kisalföld történeti földrajza*. PTE Földrajzi Intézete és a Nyíregyházi Főiskola Földrajz Tanszéke, Nyíregyháza-Pécs, 127–134.

Tal, M., Gran, K., Murray, A. B., Paol, A. C., Hicks, D. M. (2004): Riparian vegetation as a primary control on channel characteristics in multi-thread rivers. In: Bennett, S. J. és Simon, A. (eds): *Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology*. American Geophysical Union, Washington, D.C., 43–58.

Tamás E. A. és Kalocsa B. (2002): Hozzászólás a fokokról szóló cikksorozathoz. *Hidrológiai Közlöny* 4, 242–244.

Tamás J., Németh T., Rajkai K., Bíró T. (2018): *Belvíz és aszály, esetenként mindkettő*. Víztudományi Nap, MTA, november 15.

Tarpy, C. (2002): Danube River. *National Geographic Magazine,* March.

Taylor, J. (2012): *Az óceánok atlasza*. Pannon-Literatúra Kft., Kisújszállás, 239.

Teal, J. M. et al. (1992): *Nutrient processing in an artificial wetland engineered for high loading: a septage treatment example*. Global Wetlands Old World & New, INTERCOL's IV International Wetlands Conference, Columbus, Ohio, September 13–18, 1–9.

Teal, J. M. és Peterson, S. (1991): The next generation of septage treatment. *Research Journal Water Pollution Control Federation* 63/1, 85–89.

TEG (2020): Levonult az árhullám a Dunán, a Tiszán meg hozza a szemetet. https://index.hu/belfold/2020/06/25/levonult_az_arhullam_a_dunan_a_tiszan_meg_nem. Megtekintés: 2020. 07. 24.

The Ecologist Campaign (2002): China begins destruction for the Three Gorges dam. *The Ecologist* 32/2, 12.

Thyssen, N. (2001): Rivers in the european union: water quality, status and trends. In: Nijland, H. J. és Cals, M. (eds): *River restoration in Europe. Practical approaches. Conference on river restoration*, 63–71.

Timár, G. és Rácz, T. (2002): The effects of neotectonic and hydrological processes on the flood hazard of the Tisza region (East Hungary). *EGU Stephan Mueller Special Publication Series* 3, 267–275.

Tolnai B. (2018): Kérdések és válaszok a biológiai víztisztítással kapcsolatban. *Maszesz Hírcsatorna* 1, 9–22.

Tongdeelert, C. és Lohman, L. (1991): The *muang faai* irrigation sytem of Northern Thailand. *The Ecologist* 21/2, 101–106.

Tóth A. (2000): A Tisza völgy vízrajzi állapotának változása a történelem folyamán. In: Sári Zsolt

(szerk.): *Ezer év a Tisza mentén*. Jász-Nagykun-Szolnok megyei Múzeumok Igazgatósága, Szolnok, 15–30.

Tóth I. J. (2002): *A tiszai ciánszennyezés. Rendszerszemléletű elemzés*. CSEMETE Természetvédelmi Egyesület, Szeged, 280.

Töpfer, K. (2002): Asian brown cloud: Climate and other environmental impacts. UNEP Assessment Report, London (UNEP).

Treecoin (2019): The Guarani Aquifer. Where these countries meet https://medium.com/treecoin/the-guarani-aquifer-30f0bcfb5fb

Tuncok, K. (2021): Impacts of Climate Change in Central Asia. *Academia Letters*, Article 1219, https://doi.org/10.20935/AL1219.

Turner, A. G. és Annamalai, H. (2012): Climate Change and the South Asian Monsoon. *Nature Climate Change* 2, 587–595. doi:10.1038/nclimate1495.

Twain, M. (Samuel Clemens) (1883): *Life on the Missisippi*. James R. Osgood and Company, Boston.

Tyler, C. R. és Jobling, S. (2008): Roach, Sex, and Gender-Bending Chemicals: The Feminization of Wild Fish in English Rivers. *BioScience* 58/11, 1051–1059. https://doi.org/10.1641/B581108

Újszászi I. (2019): Műanyagszennyezés a Marosban. *Alma Mater Magazin* 1, 21.

Ulseth, A. J., Bertuzzo, E., Singer, G., Schelker, J., Battin, T. (2018): Climate-Induced Changes in Spring Snowmelt Impact Ecosystem Metabolism and Carbon Fluxes in an Alpine Stream Network. *Ecosystems* 21, 373–390.

Umare, M. (2021). Ageing Water Storage Reservoirs: An Overview of Emerging Risk in India. *Academia Letters*, Article 2684. https://doi.org/10.20935/AL2684

UNEP (2007): A Global Outlook for Ice and Snow (p. 238). A report by the United Nations Environment Programme.

USBR (United States Bureau of Reclamation) (2005): *Hydroelectric power*. USA. Available at: http://www.usbr.gov/power/edu/pamphlet.pdf. Megtekintés: 2020. 07. 25.

Uzunov, D. (2003): Flower power. *The Bullletin* 12/1, 10.

Vajna T. (2020): Létezik olyan árvízvédelem, ami miatt nem kell tarra vágni az erdőt. *Qubit*, február 14. https://qubit.hu/2020/02/14/letezik-olyan-arvizvedelem-ami-miatt-nem-kell-tarra-vagni-az-erdot Letöltés: 2020. augusztus 7.

Van Loon, A. F. és Van Lanen, H. (2013): Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research* 49, 1483–1502. doi:10.1002/wrcr.20147, 2013

Van Loon, A. F. et al. (2016): Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience* 9, 89–91. doi: 10.1038/ngeo2646

Várallyay Gy. (1990): A szikesedés és a víz kapcsolata. *Agrokémia és Talajtan* 39/1, 17–22.

Vargha M. (2018): *Tiszta ivóvíz: a biztonságos ellátás multidiszciplináris értékelése a forrástól a fogyasztókig*. Víztudományi Nap, MTA, 2018. november 15.

Vas A. (2019): Harminc éve függesztették fel a nagymarosi gát építését. *Népszava*, 2019. május 13. https://nepszava.hu/3035658_harminc-eve-fuggesztettek-fel-a-nagymarosi-gat-epiteset

Veerbeek, W. Gersonius, B., Ashley, R., Rijke, J., Radhakrishnan, M., Rodriguez, C. (2016). Appropriate flood adaptation. Adapting in the right way, in the right place and at the right time. Melbourne, Australia: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities.

Verebélyi G. (2002): *A bükki karsztvíz*. Életfa Környezetvédő Szövetség, Eger.

Verrasztó Z. (2017): Holisztikus környezeti modellezés kartográfiai, GIS és távérzékelési módszerek alkalmazásával. *Remote Sens* 7/1, pp 490-516

Verrasztó Z., Németh R. és Szalkai I. (2003): Miért szükséges a Kárpát-medence térinformatikai alapjait létrehozni? Előadás, XIII. Országos Térinformatikai Konferencia, 2003. szeptember 25–26.

Világi M. (2019): Egy hónapig hordtam egy pólót mosás nélkül. *Index*, https://index.hu/techtud/2019/09/17/merino_gyapju_polo_ing_teszt. Megtekintés: 2020. 06. 21.

Vörösmarty, C. J., Meybeck, M., Pastore, C. L. (2015): Impair-then-repair: a brief history & global-scale hypothesis regarding human-water interactions in the anthropocene. *Daedalus* 144, 94–109.

Vreudenhil, H., Slinger, J., Kater, E., Thissen, W. (2010): The Influence of Scale Preferences on the Design of a Water Innovation: A Case in Dutch River Management. *Environmental Management* 46, 29–43. doi:10.1007/s00267-010-9524-0

Wang, H., Zuosheng Yang, Yoshiki Saito, J. Paul Liu, Xiaoxia Sun, Yan Wang (2007): Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): Impacts of climate change and human activities. *Global and Planetary Change* 57, 331–354.

WCD (World Commission on Dams) (2000): *Dams and development. A new framework for decision making*, London and Sterling, Earthscan Publications Ltd, V.A., 404.

Weisberger, M. (2017): Monster 'Fatberg': 143 Tons of Grease and Garbage Clog UK Sewer. September 12, 2017, https://www.livescience.com/60391-fatberg-clogs-uk-sewer.html

WEPA (2020): Johkasu for residence: http://www.wepa-db.net/technologies/individual/datasheet/jpn/16-picture.htm. Megtekintés: 2020. 03. 19.

West, R. C. és Armillas, P. (1950): Las Chinampas de Mexico, *Cuadernos Americanos* 5, 1.

Weyer B. (2021): Az árvízi látogatásán röhögcsélő Merkel-utódnak van már más is a rovásán. *Heti Világgazdaság*, július 22., 29, 26.
https://hvg.hu/360/20210722_A_viznek_arja. Megtekintés: 2021. 07. 22.

Wilkinson, T. J., Rayne, L., Jotheri, J. (2015): Hydraulic landscapes in Mesopotamia: the role of human niche construction. *Water History* 7, 397–418. doi:10.1007/s12685-015-0127-9

Williams, B. P. (é. n.): Dam safety analysis. In: Ryder, G. (ed.): *Damming the Three Gorges, A critique of the Three Gorges water control project feasibility study*. Probe International, Toronto.

WMO (2013): *The Global Climate 2001-2010. A decade of climate extremes. Summary report*, WMO-No. 1119, 20.

WMO (2018): The State of the Global Climate in 2018. https://wmo.maps.arcgis.com/apps/Cascade/index.html?appid=855267a7dd394825aa8e9025e024f163. Megtekintés: 2019. 01. 13.

Wolf, S., Esser, V., Schüttrumpf, H., Lehmkuhl, F. (2021): Influence of 200 years of water resource management on a typical central European river. Does industrialization straighten a river. *Environmental Sciences Europe 33:15.* https://doi.org/10.1186/s12302-021-00460-8

Wolfner A. (2000): Tokió trópusi várossá válik. *Környezetvédelem* 6, 30.

Wood, A. és Kees, B. (2001): Many hands. *The Ecologist* 31/8.

Worster, D. (1977): *Nature's economy*. Sierra Club Books, San Francisco, 281.

Wright, J. S. et al. (2017): Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *PNAS* 114/32, 8481–8486. https://doi.org/10.1073/pnas.1621516114

Wu, J. (2020): Challenges for Safe and Healthy Drinking Water in China. *Current Environmental Health Reports*. https://doi.org/10.1007/s40572-020-00274-5

Wu, J., Desch, S. J., Schaefer, L., Elkins-Tanton, L. T., Pahlevan, K., Buseck, P. R. (2018): Origin of Earth's water: Chondritic inheritance plus nebular ingassing and storage of hydrogen in the core. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123. https://doi.org/10.1029/2018JE005698

Wulf, H. E. (1968): The qanats of Iran. *Scientific American* 218/4, 94.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water (2018): *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*. Paris, UNESCO.

WWF (2002): Waterway transport on Europe's lifeline, the Danube. Impacts, threats and opportunities. Vienna, January 2002 http://www.panda.org/downloads/freshwater/ExecutiveSummary.pdf

Xiaoning Liu, Wenke Yuan, Mingxiao Di, Zhen Li, Jun Wang (2019): Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China. *Chemical Engineering Journal* 362, 176–182. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.033

Xinjian Guan, Baoyong Wang, Wenge Zhang, Qiongying Du (2021): Study on Water Rights Allocation of Irrigation Water Users in Irrigation Districts of the Yellow River Basin. *Water* 13/24, 35–38. https://doi.org/10.3390/w13243538

Xu, Liang, Samanta, A., Costa, M., Ganguly, S., Nemani, R., Myneni, R. (2011): Widespread Decline in Greenness of Amazonian Vegetation Due to the 2010 Drought, *Geophysical Research Letters* 38/7, L07402. doi:10.1029/2011GL046824, 2011.

Yeomans, K. (1993): *Water for Every Farm*. Griffin Press, Australia, 261.

Yong J., Zevenbergena, C., Yongchi Mab (2017): Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy. *Environmental Science and Policy* 80, 132–143, https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.016

Zádori Zs. (2011): Magyar vízügyi csoda: Nagykőrösnél hömpölygetnék a Duna vizét. *Heti Világgazdaság*, november 30. https://hvg.hu/itthon/20111130_dunatiszacsatorna_homokhatsag. Megtekintés: 2020. 06. 26.

Záray Gy. (2020): Innovatív fotooxidációs víztisztítási technológia kidolgozása szerves mikroszennyezők eltávolítására biológiai úton tisztított szennyvizekből. *NVKP_16-1-2016-0045* azonosító számú projekt, Nemzeti Versenyképességi és Kiválósági Program. *ELTE Hírlevél*, január 16.

Zatykó, Cs. (2009): Aspects of fishing in Medieval Hungary. In: *Processing, Storage, Distribution of Food. Food in the Medieval Rural Environment* Ruralia VIII, 7th – 12th September 2009, Lorca, Spain.

Zatykó Cs., Mesterházy G., Pető Á., Saláta D., Stibrányi M. (2022): Folyó, táj és település a középkorban: tájrégészeti, környezettörténeti és lelőhelydinamikai kutatások a Körös-vidéken. A Flott-projekt indulása. *Magyar Régészet* 11/4, 56–64. https://doi.org/10.36245/mr.2022.4.5

Zebarth, B. J., Drury, C. F., Tremblay, N., Cambouris, A. N. 2009: Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. *Canadian Journal of Soil Science* 89/2, 113–132. doi.org/10.4141/CJSS07102.

Zeng, Q. L., Yue, Z. Q., Yang, Z. F., Zhang, X. J. 2009: A case study of long-term field performance of check-dams in mitigation of soil erosion in Jiangjia stream, China. *Environmental Geology (Berlin)* 58/4, 897–911.

Zevenbergen, C., Rijke, J., van Herk, S., Chelleri, L., Bloeme, P. (2016): Towards an adaptive, flood risk management strategy in The Netherlands: An overview of recent history. In: Constantinescu, G. és Hanes, K. (eds): *River Flow 2016*. Taylor & Francis Group, London.

Zevenbergen, C., van Herk, S., Rijke, J., Kabat, P., Bloemen, P., Ashley, R., Speers, A., Gersonius, B., Veerbeek, W. (2013): Taming global flood disasters. Lessons learned from Dutch experience. *Natural Hazards* 65, 1217–1225. doi 10.1007/s11069-012-0439-3

Zhang, B. és Yamamoto, K. (1996): Seasonal change of microbial population and activities in a building wastewater reuse ystem using a membrane separation activated sludge process. *Water Science and Technology* 34/5–6, 295–302.

Zhang K., Shi H., Peng J., Wang Y., Xiong X., Wu C., Lam PKS (2018): Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management. *The Science of the Total Environment* 630, 1641–1653. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.300

Zhang, X., Zwiers, F. W., Hegerl, G. C., Lambert, F. H., Gillett, N. P., Solomon, S., Stott, P. A., Nozawa, T. 2007: Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448 (7152), 461–465.

Zhisheng An et al. 2015: Global Monsoon Dynamics and Climate Change. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 43, 29–77.

Zhou, J., Zhang, M., Lu, P. (2013), The effect of dams on phosphorus in the middle and lower Yangtze river. *Water Resources Research* 49, 3659–3669. doi:10.1002/WRCR.20283

Zwingle, E. (1993): Ogallala Aquifer: Wellspring of the High Plains. *National Geographic Magazine* March, 81–109.

Zwingle, E. (2002): Italy's Po: River of Pain and Plenty. *National Geographic Magazine* 201/5, p 92, May 2002.

Zsuffa I. és Starosolszky Ö. (1994): Vélemény az MTA ad hoc bizottságának a bősi vízlépcső ökológiai-környezeti kockázatait összefoglaló állásfoglalásáról. *Hidrológiai Közlöny* 74/1, 58–64.

# TÁRGYMUTATÓ


## A, Á

albedó 34, 95, 277
alga 116–118, 179, 318
alomszék 261–262, 272, 328
alsó szakasz 71, 74, 80, 149, 153, 160, 162, 170
Amazonas 33–35, 38, 62, 67–68, 74, 89, 173, 180, 193
áradás 81, 86, 150, 153, 161, 165, 172, 184, 189–190, 206, 215, 221, 230, 234, 236, 242, 244, 250, 255, 322
Aral-tó 59, 203
árnyékszék 124–126, 261, 266
ártér 39–40, 73–76, 78, 80–81, 149, 154–155, 157–158, 160–161, 164–165, 168, 179, 181–183, 196, 198, 200–202, 214–218, 232–243, 245–250, 274, 320
ártéri gazdálkodás 154–155, 158, 214, 235–236, 238, 242, 274
árvíz 35, 66, 78, 81, 86–87, 93, 133, 148, 151, 155–156, 158–161, 165, 169–172, 176–177, 179, 184–186, 190, 199, 201, 214–217, 219–221, 233, 237–238, 240–245, 247–250, 255, 276
árvízvédelmi töltés 151, 159–160, 190, 237, 242, 245
aszály 78, 83, 87–95, 98, 108, 141, 147–148, 159, 165, 176, 198, 203, 205, 221, 255, 272–273
Auroville 255–256, 326–327

## B

Balti-tenger 118
befogadó 64, 66, 76, 111, 118, 132, 143, 263, 268
belvíz 35, 46, 80, 144, 159, 161, 165, 193, 196, 228, 238, 242, 244–245, 249, 273–274
belvízcsatorna 80, 165
bentosz 77, 200

## C

chinampa 228–231
Colorado 60, 70, 108, 166, 175–176, 186

## D

deltatorkolat 63, 178, 189
Duna 63, 67, 74, 78, 102, 108, 118–119, 122, 136, 149, 151, 155–156, 183, 191, 194–195, 197–200, 205, 214, 220, 232–235, 238–239, 279

## DZS

dzsókaszó 267–268, 328

## E, É

édesvízkészlet 29, 43, 107, 139, 143, 189
éghajlatváltozás 20–21, 27, 34, 42, 83–84, 86–90, 92, 95, 99, 106, 131, 133, 142, 147–148, 162, 172, 179–180, 189, 192, 199, 205–206, 210, 214–215, 219–220, 227, 242, 245–246, 255, 259, 273–274, 276–277, 321

Egyiptom 50, 106, 108, 147, 166, 182, 187, 189
eleveniszap 129, 267–268, 270–271
élőgép 270–272
elsőfajú hiba 16–17, 21, 23–25, 60, 86, 92, 94, 101, 107–108, 111, 120, 124–126, 128, 131–133, 135, 139, 148, 152, 157, 166, 169, 177, 199, 203, 205, 207, 212, 214, 236, 250, 262
elszivárgás 59, 182, 209–210, 227, 240, 246
erdőirtás 17, 22, 34, 36, 41, 89, 148, 150–151, 154–155, 161, 180, 187, 237, 263, 277
erdőtakaró 41, 148
erózió 34–35, 38–41, 54, 56, 63, 69–70, 150, 153–155, 161–162, 184, 187–189, 191, 194, 201, 215, 229, 250, 254–256
esőerdő 33–34, 123, 192
Etiópia 108
Eufrátesz 109, 322
Európa 34, 50, 52, 62, 64, 85–87, 89, 92, 95–97, 102, 107, 114, 117, 119, 126–127, 130, 139, 141, 149–150, 152–153, 155–157, 163, 166, 170–171, 177, 182–183, 187, 203–204, 224, 226, 230, 240, 250, 260, 276
evapotranspiráció 33, 38, 49, 182, 208, 240, 246

## F

felső szakasz 70–71, 150, 170, 178, 191
felszín alatti vízkészlet 57, 139, 141–143, 166, 181, 256, 275
felszínborítottság 275
felszíni lefolyás 36–38, 45, 49, 64–65, 68, 88, 98, 107, 206, 251
fokgazdálkodás 152, 158, 232, 238–239, 242, *lásd még:* ártéri gazdálkodás
folyószabályozás 21, 76, 148–153, 156–162, 165–166, 177, 194, 199, 207, 233, 236–237
folyóterasz 74
foszfor 67, 112, 116–118, 129–130, 188, 263, 265

## G

gátak 73, 148, 150–151, 153, 156, 159–161, 164, 166–167, 169–171, 173–175, 177–178, 180, 185–188, 191–192, 204, 214, 217, 231, 240, 251–255, 276, *lásd még:* árvízvédelmi töltés
gátépítés 87, 95, 148, 150–151, 153, 166, 176–177, 190–191, 204, 214, 219, 232, 276–277
geotermikus gradiens 52–53
gleccser 20–21, 29–31, 37, 42, 60, 66–67, 95–99, 176, 224–227, 275–277
görgetett hordalék 39, 69
Guarani 144–145, 319

## GY

gyökérzónás szennyvíztisztító 270

## H

Himalája 21, 96–98, 177, 224, 277
hordalék 39, 41, 54, 63, 68–70, 72–74, 78–80, 148–149, 153, 155, 158, 160–161, 165, 170, 176, 178, 181, 184, 186–191, 193–194, 196, 198, 201, 225, 231, 233–234, 255
hőfoklépcső *lásd:* geotermikus gradiens
hőkapacitás 35
hullámtér 148, 150, 153, 161–162, 165, 215, 237, 247, 249, 274
Hunza-völgy 224, 226–227

## I

ILD 238, 242, 244, 247–249, 326
Indus 21, 97–98, 124, 147, 149, 190–191
integrált tájfejlesztés 241
integrált tájgazdálkodás 219, 238
ivóvízminőség 105

## K

Karakorum 21, 59, 96, 224
karéz 223–225, 227, 323
Kárpát-medence 32, 38–39, 74, 76, 79, 154, 163, 242, 246
karsztvíz 53–56, 58, 108, 114, 138, 280
kisvízi meder 76, 179

kis vízkör 34, 36, 38–39, 79
klímaváltozás 34, 92, 98, 107, 173, 264, 272–273 *lásd még:* éghajlatváltozás
kolera 125–126
komposztálás 260–261, 263, 265–266, 268
komposztvécé 261–262, 265, 267, 327
Körösök 158–159, 163, 179, 220
középső szakasz 71–72
közműolló 124–125, 136

## L

lebegtetett hordalék 69, 74, 155, 188

## M

meander 60, 72–73, 76, 80, 87, 147–149, 159, 194, 219, 233, 243
megújuló energiaforrás 19–20, 214
mentett oldal 150, 161, 165, 241
mikroműanyag 119–121
mocsár 32, 109, 141, 179, 209, 228, 234, 255, 267
Mollison 17, 30, 37–38, 65, 212, 253, 255, 259
muang faai 231–232
Murray-folyó 91
műszaki rendszerek 16–17, 21–23, 25, 136, 148, 165, 212
műtrágya 33, 112, 116, 119, 130, 136, 144, 184, 263, 265–266

## N

nagyvízi meder 237
nagy vízkör 37–38, 275, 317
negatív visszacsatolás 18–19, 23, 36, 49, 75, 84, 93, 212
Nijmegen 218–219
Nílus 60, 63, 106, 108, 147, 149, 175, 182–184, 189–190
nitrogén 33, 67, 112, 116–118, 129–130, 188, 208, 261, 263, 265–266

## O

Ogalalla 139, 141, 319

## Ö

öntözés 15, 20, 60, 88–90, 92, 94–95, 98, 102, 104–106, 111–112, 135–136, 140, 142, 144, 148, 152, 165, 167, 169–170, 173, 176–177, 184, 190, 205–210, 220, 224, 227, 242–243, 246, 252, 254, 256, 263, 265, 271
övzátony 73, 76, 80, 101, 147, 149, 158, 233, 242–243

## P

párolgás 33–34, 36–43, 48–50, 59, 65, 78–79, 83–84, 94, 165, 175, 179, 182, 193, 201, 205–210, 224, 246, 272–273, 277
parti szűrésű kutak 77, 104, 122, 183, 197, 200
permakultúra 212, 253–255, 270
pozitív visszacsatolás 16, 19, 21, 23, 25, 39, 84, 94–95, 143, 153–154, 256, 277

## Q

qanat 143, 14 9, 2 27–228, 324–325

## R

Rajna 60, 86, 150–151, 155, 166, 186, 191, 217–218, 240
rehabilitáció 17, 109, 200, 214–216, 219–220, 240, 255
rendszerelmélet 15–16, 23, 75, 93, 98, 101, 107, 124, 131, 148, 157, 179
rétegvíz 29–30, 44, 50–52, 57–58, 111, 113, 116, 137, 142

## S

Sárga-folyó 68, 147, 149, 153
síkvidéki erőmű 170, 176, 178–179

## SZ

szakaszjelleg 67, 70, 74, 76
szennyvíz 104, 113–114, 117–122, 124–133, 141, 200, 205, 211, 257, 260, 262–272, 274, 327
szikesedés 35, 95, 106, 140, 144, 165, 184, 193, 196, 203, 205–209, 224, 228

Szíria 92, 109, 125
szivacshatás 41, 68, 78–79, 81, 87, 154, 161–162, 256, 277
szukcesszió 78, 80, 240
szürkevíz 105, 193, 265, 267, 270

## T

talajnedvesség 30, 36, 42–46, 48–49, 67, 87, 95, 111, 136, 206, 246, 250, 254
talajvíz 30–31, 39, 42, 44–52, 56–58, 67, 76–78, 88, 90, 93, 102, 106, 108, 110–113, 116, 119, 122, 125, 131, 135–140, 142–144, 150, 159–160, 165, 179, 181–183, 196–198, 201–202, 207–210, 215–216, 227, 233, 239–240, 246, 250–251, 255–256, 258–259, 266–267, 273, 318
tározó 87, 91, 108, 148, 159, 167–173, 175–185, 187–188, 192–197, 201, 204–205, 210, 220, 227, 231, 237, 243–244, 251, 253–255
természeti rendszerek 17, 20, 23, 25, 40, 75, 101, 108, 110, 138, 148, 211–212, 220
Tisza 78, 93, 108, 119, 120, 136–137, 149, 154–157, 159–164, 178, 187, 193, 205, 210, 220, 235–239, 241, 244–248, 250, 273–274, 279, 325
tölcsértorkolat 61–63, 189
töltés 115, 147–151, 156, 159–163, 165–166, 168, 179, 190, 205, 214, 217, 237–238, 242–245, 247, 253
töltésmagasítás 163
Turfán 223–224, 323

## V

Vásárhelyi-terv továbbfejlesztése (VTT) 159, 220, 236–237, 239–241, 244
vízaratás 250–251, 254, 258–259
vízáteresztő réteg 46, 52, 58, 183, 227
vízbázisminőség 110, 112, 120, 122, 127, 144, 186, 205, 257–258
vízfelhasználás 22, 84, 88, 93, 100–108, 110–112, 143, 176, 211–212, 219, 228–229, 256, 258, 260, 264, 266
vízgyűjtő 17–18, 20, 36, 38, 40–42, 64–67, 74, 76, 78–79, 81, 86, 90, 97–98, 106, 108–109, 118, 148, 152–155, 161–162, 172, 174, 178, 180, 186, 190–191, 203–204, 212, 215, 217, 227, 232, 241, 243, 251, 253, 273, 275–276, 319–320
vízhasználat 20–21, 100–103, 152, 264
vízháztartás 28, 31, 39, 43, 54, 57, 59, 78–79, 81, 83–84, 86, 136, 140, 148, 176–177, 181, 183–184, 189, 191, 203, 206, 212, 215, 239, 243, 246, 250–251, 255, 277
vízkészlet 18, 20, 27, 29–31, 34, 37, 56–57, 90, 94, 98, 106–107, 135, 138–139, 141–145, 166, 181, 189, 205–206, 256, 275–276
víz körforgása 32–33, 35–36, 40, 167, 317
vízlépcső 169–170, 177–178, 183, 187, 193–197, 199–202, 279
vízminőség 73, 100, 124, 130–131, 173, 179, 181, 196–197, 206, 215
vízöblítés 116, 125–126, 128, 261–262, 267
vízönellátás 259
víztest 52, 55–57, 111, 136, 138, 243–244, 246
vízzáró réteg 46–48, 50–51, 54, 58, 227
völgyzáró gát 166, 170–172, 177, 254

## Y

Yeomans 252–253

# SZÍNES ÁBRÁK