



**SOPRONI
EGYETEM**

Dr. Heil Bálint
ERDŐMÉRNÖKI KAR
Környezet- és Természetvédelmi Intézet
9400 Sopron, Bajcsy-Zsilinszky u. 4.
+36 99 518 171 • heil.balint@uni-sopron.hu

MIKROBIOLÓGIA II. (oktatási segédlet)

Ezen oktatási segédlet a Soproni Egyetem Erdőmérnöki Karának hallgatói számára készült, Mikrobiológia tárgykör alkalmazott vonatkozásairól. E segédlet a SOE EMK-n készült Mikrobiológia I. oktatási segédlet tananyagára épül folytatásként. A jegyzet elkészítésének alapját az Eötvös Loránd Tudományegyetem Mikrobiológus Szakirányú Továbbképzési Szak oktatási segédletei és tananyagai, valamint Dr. Hornok László „Bevezetés a mikrobiológiába” c. egyetemi jegyzetpótló (SZIE Mezőgazdaságtudományi Kar, Gödöllő, 2000) adta.

Dr. Heil Bálint
egyetemi docens

Sopron, 2023

Tartalomjegyzék

A mikroorganizmusok anyagcseréje	3
A mikrobiológia ökológiája, szerepe a környezetvédelemben	26
Mikroorganizmusok a feldolgozóiparban	78
A mikroorganizmusok rendszerezésének alapjai, vizsgálati módszerei.....	98
A talaj, a vizek és a levegő mikrobái.....	119

A mikroorganizmusok anyagcseréje

Az anyagcsere (ógörög eredetű szóval: metabolizmus) fogalmába beletartozik a sejtben lezajló összes kémiai reakció és a sejt fizikai munkája egyaránt. Ezeknek két alapvető formája különböztethető meg:

Az egyik az *anabolizmus* vagy más szóval *bioszintézis*: ekkor a sejt a környezet anyagát saját élő anyagává és makromolekuláris komponenseivé alakítja át, a kiindulási anyagoknál nagyobb molekulák keletkeznek, általában új kémiai és fizikai kötések létrejöttével és energiefelhasználással. Ehhez az energiát struktúrelemei lebontásával szerzi, és a struktúrelemek helyreállításához, újraépítéséhez energiára van szüksége az elhasznált helyett. Fokozottan érvényes ez akkor, ha a sejt nem csak a meglévő struktúráit akarja újraépíteni, hanem célja a növekedés, szaporodás is.

A szervezett energiautánpótlást az anyagcserefolyamatok másik fajtája, a *katabolizmus* folyamatai végzik. Ezek lebontási folyamatok, kötések felszakadásával járnak, a nagy molekulák kisebbekre bontódnak és energia szabadul fel. A kétfajta reakció között az összekötő kapcsot a nagyenergiájú kémiai kötések jelentik. Ez a két folyamat minden élő sejtben lezajlik. Ami eltérést észlelünk, az nem az alapfolyamatoktól való eltérés, hanem az élő anyag szerkezetének, variációinak eltérése, amellyel az egyes élőlények környezetükhöz voltak képesek alkalmazkodni, alapvető életfunkcióik megtartása közben. Jó példa erre az áttérés az aerob légzésre, amely változás az oxidáló légkör megjelenéséhez kapcsolódik a Föld történetében. Ez az energiefelszabadító folyamatok új formáját tette lehetővé és szükségessé, de az alapfolyamat lényegén semmit sem változtatott.

A mikroorganizmusok világának anyagcsere-folyamatai óriási változatosságukkal különösen alkalmas az élő anyag tulajdonságainak vizsgálatára, hiszen a mikroorganizmusoknál egyaránt megtalálhatóak a magasabb szervezetségű élőlényekben lezajló folyamatok és a csupán a mikroorganizmusok világára jellemző folyamatok.

A két alapvető folyamat, az *anabolizmus* és a *katabolizmus* az élő anyagban természetesen nem térben is időben egymástól távol zajlanak le, hanem egymással szoros kölcsönhatásban, az energianyelő (endergon) folyamatoknak az energiefel szabadító (exergon) reakciókkal arányban kell lenniük.

Az energiefel szabadítással járó anyagcsere-folyamatok:

Az energiefel szabadító folyamatok alapja az élő sejtben lezajló oxidációs-redukációs folyamatok. Ezek az exergon folyamatok mind a hidrogén oxidációjára épültek, még akkor is, ha a mechanizmus alkalmazkodni tudott hidrogéntartalmú anyagok oxidációjához is. Földünkön az oxidációs folyamatok többsége valamilyen redukált szerves vegyületet igényel kiindulásként, de megtalálhatóak egyéb lehetőségek is.

A redoxi-folyamatokhoz két molekulára van szükség. Az egyik molekula elveszít egy hidrogént és/vagy egy elektronpárt, a másik pedig felveszi azt. Az előbbi oxidálódott, az utóbbi redukálódott, és a reakció közben energia szabadult fel!!! Ez az energia távozhat hőenergia formájában, de beépülhet más vegyületekbe kémiai kötések energiájaként lekötve. Ehhez megfelelő közvetítő rendszerekre van szükség.

Magát az oxidálódó molekulát nevezzük hidrogéndonornak, hiszen ez adja a hidrogént és az elektronokat. Gyakran nevezik még reduktánsnak,

mert ez idézi elő a másik molekula redukcióját a saját oxidációja révén, illetve hívják még szubsztrátnak is, mert ő a tulajdonképpeni alanya a reakciónak.

Ezek alapján alkalmazhatóak az oxidáns és hidrogénakceptor fogalmak a redukálódó molekulára.

Egy szubsztrátmolekula (például glükóz) rendszerint több eltávolítható hidrogénnel rendelkezik, amelyek egymás után szakadnak le és kerülnek át rendszerint több hidrogénakceptorra (pl. egy oxigén csak max. 4 hidrogénatomot képes felvenni). A szubsztrát oxidációjának első lépései rendszerint anaerob erjedéssel mennek végbe, majd a félig eloxidált szubsztrát bekerül a trikarbonsavciklusba (Szentgyörgyi-Krebs ciklus), és teljesen eloxidálódik szén-dioxiddá. Ez a második ciklus jóval több energiát szabadít fel, mint az erjedéses szakasz.

Az élőlényeket csoportosíthatjuk az exergon folyamatokban résztvevő anyagok minősége alapján.

Hasonlóan csoportosíthatók az élőlények a sejtjeikben lejátszódó redoxi- és energiefel szabadító folyamatok minősége alapján.

Azok az élőlények, amelyek a természetben található inorganikus vagy organikus eredetű, redukált anyagokat használják fel energianyerő folyamatokhoz, a kemotróf szervezetek. Ezek lehetnek az előző felosztás alapján, vagyis a résztvevő anyagok minősége szerint kemolitotrófok (pl. baktériumok) és kemoorganotrófok (pl. állatok, gombák, egyes baktériumok). A Föld felszínén található redukált szerves és szervetlen vegyületek hamar elfogynának, ha a bioszféra maga nem gondoskodna ezek újratermeléséről. Ezt a folyamatot végzik a fototrófok. Ezek

funkciója az élők rendszerében az, hogy, a nap sugárzó energiájának segítségével fotokémiai úton az oxidált vegyületeket redukálják, és ezzel lehetővé teszik bejutásukat saját és a kemotrófok oxidációs rendszereibe.

Ez a folyamat a fotoredukció. A fototrófok is lehetnek fotolitotrófok (zöld növények és fotoszintetizáló baktériumok) és fotoorganotrófok (egyes baktériumok) aszerint, hogy a hidrogéndonor, amelynek rovására a redukciót végzik, szervetlen (H_2O , H_2S) vagy pedig szerves vegyület.

Néhány rendszeresen használt alapfogalom tisztázása is szükséges még.

A magasabb rendű növényekkel kapcsolatosan használt fogalom a fotoszintézis, amely alatt a szén-dioxid fotokémiai úton történő redukcióját, egyben tehát a szén-dioxid alapú bioszintézist értjük.

Hasonlóan elterjedt fogalom a bioszintézis, mely alatt a zöld növényeknél szintén a CO_2 -bázisú, fotokémiai reakciók segítségével végbemenő bioszintézist értjük.

Az összes élőlényre kiterjesztve a szemlélődést, az előbbi két kifejezés ilyen értelmezése pontatlanná válik. Fotoszintézis ugyanis nem csak CO_2 alapon mehet végbe, hiszen a fotoredukáló baktériumok pl. végezhetnek molekuláris alapú nitrogénvegyület szintézist, nitrogénkötést is.

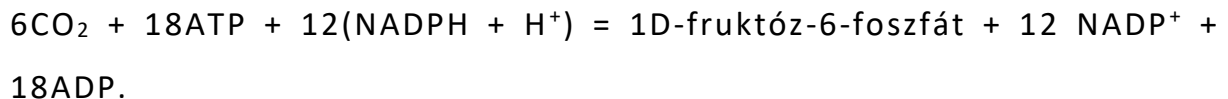
A fogalom további finomítása szerint a fotoszintézis fotolitotrófok fotoredukciója terhére történő autotróf CO_2 -asszimilációját jelenti.

A kemoszintézis pedig kemolitotrófok kemooxidációs reakcióinak terhére történő autotróf CO_2 -asszimiláció.

Ugyan az ábrán (ea ppt ábra!) a redukált molekulák felépítésének kiindulásaként CO_2 szerepel, az autotróf asszimilációnak (és vele a

kemoszintézisnek) lehet kiinduló alanya pl. N_2 is. A N_2 asszimilációját fototrófok és kemotrófok egyaránt végzik!

A CO_2 asszimilációja fototrófokban és kemotrófokban egyaránt zömmel a Calvin-ciklusban megy végbe. A reakció összevont egyenlete:



A reakció során 6 szén-dioxid molekula redukciója és megkötése történik 18 nagyenergiájú foszfátkötés energiája és 12 redukált NADP oxidációja terhére.

A szén-dioxid asszimilációja is végbemehet kemotróf folyamatokhoz kapcsolódva, fotokémiai redukció nélkül, ugyanannak a Calvin-ciklusnak a segítségével, amely a fotoredukciós CO_2 -alapú bioszintézist végzi a zöld növényeknél. Ilyen szintézist végeznek a kemolitotróf baktériumok.

A bioszintézis fogalma tehát nem csak az élőlényekben végzett anyagfelvételt jelenti, hanem komplexebb fogalom:

- Jelent anyagfelvételt általában, amely a bioszintézis alapjául szolgáló molekulák felvétele. Ezek a molekulák lehetnek szervetlenek (CO_2 , N_2) és szervesek.
- Jelent egyben redukciós folyamatokat is, mert a felvett molekulákat az élő szervezetbe történő beépítéshez redukálni kell. A redukcióhoz szükséges hidrogéndonor előállítása az energiefelszabadító folyamatok során szabaddá váló energia rovására történik.

A bioszintézis összességében olyan biológia folyamat, amely során szervetlen és szerves szubsztrátok felvétele, redukciója és makromolekulákba való átalakítása és az élő szervezetbe való beépítése történik.

Ha a felvett molekula - melynek felvételét és redukcióját együtt asszimilációnak hívunk - szervetlen vegyület, akkor autotróf asszimilációról, ha szerves, akkor heterotróf asszimilációról beszélünk.

Hasonló példa a légzés és erjedés fogalmainak elkülönítése, amelyeknél pontatlanná válnak a fogalmak, ha csak egy speciális területre alkalmazzuk őket. Légzésnek nevezzük tehát azon biológiai redoxifolyamatokat, ahol a hidrogénakceptor szervetlen vegyület. Ha ez a szervetlen vegyület (mint az állat- és növényvilágban általánosan, a baktériumok és gombák jó részénél elterjedt) a légköri molekuláris oxigén, akkor aerob légzésről beszélünk. Amennyiben a hidrogénakceptor szervetlen vegyület, de nem oxigén (pl. NO_3^-) akkor anaerob légzésről van szó. A hidrogénakceptor lehet szerves vegyület is, ebben az esetben az erjedés fogalmának használata alkalmazandó.

A légzésnél hidrogéndonor lehet szervetlen vagy szerves vegyület mindkét légzéstípusnál, az erjedésnél a hidrogéndonor és a hidrogénakceptor egyaránt szerves vegyület.

Tekintsük át az előzőekben csoportosított anyagcserefolyamatokat szénhidrát- és energiahasznosításuk vonatkozásában, a mikroorganizmusok körében:

Említettük, hogy aerob körülmények között a szubsztrát oxidációjának legalapvetőbb alanya a glükóz, mely két szakaszban bontódik le. Az első, erjedéses szakasz a piruvát képződéséig tart, anaerob úton megy végbe, kevés energia szabadul fel benne. A következő lépés a trikarbonsav ciklus (Szentgyörgyi-Krebs ciklus) és az oxidatív foszforilálás. Ekkor szabadul fel az energia nagyobbik része. Egy harmadik, csak a baktériumok egyes csoportjaira jellemző út az Entner-Doudoroff-út, amely szubsztrátja fruktóz, mely nem piruváttá (piroszőlősavvá), hanem dihidroxi-aceton-foszfáttá alakul, illetve tovább glicerinné.

Oxigénmentes körülmények között az előbbi reakciók nem működnek, ilyenkor a fermentációs folyamatok vesznek fel elektront, vagyis redukálódnak, a végtermékek szerves anyagok, az energianyerés pedig jóval kisebb az aerob folyamatokhoz képest. A fermentáció nem más, mint glükóz vagy más szénhidrátok tökéletlen oxidációja, ami oxigén hiányában zajlik le. Eredetileg Pasteur használta fogalmát, élesztők alkoholos erjesztésének jelölésére, de ma tágabb értelemben használják, olyan alkohol-, sav- vagy gázképződési folyamatok megjelölésére, melyeket baktériumok végeznek, piroszőlősavból kiindulóan. Az erjedés is két szakaszra bontható: az első szakasza piruvát képződéséig tart, majd ezt mint kiinduló szubsztrátumot felhasználva indul a második szakasz, melynek sokféle végterméke lehet, pl. tejsav, propionsav, hangyasav, ecetsav, etanol, izopropanol, szén-dioxid, hidrogéngáz, stb.

A fermentáció annak ellenére, hogy kevés energiát szabadít fel, komoly előnyöket is adott a mikroorganizmusoknak: lehetővé tette számukra a fennmaradást olyan környezetben is, ahol nem található meg molekuláris oxigén. Egyes fakultatív anaerobok pedig létezhetnek a környezet változó oxigénszintje mellett is.

Fontos fermentációs termékek a különböző alkoholtartalmú italok, a bor, a sör és a tömény készítmények, jelentősek az iparban használt oldószerek (aceton, butanol), a szerves savak (ecetsav) valamint a tejtermékek (joghurt, kefir, sajtféleségek).

A fermentációs folyamatokat a képződő termékek minősége alapján két csoportra oszthatjuk: alkoholos és savas fermentációra. Az alkoholos fermentációt olyan élesztők végzik, amelyek képesek a piroszőlősavat etanollá alakítani. E folyamat során a piroszőlősav dekarboxilálódik, így átalakul acetaldehiddé, majd tovább redukálódva etanollá. Ez a folyamat képi a bor- és sörkészítés alapját, természetes más kiindulási anyagok megfelelő reakciói mellett. Az alkoholos fermentáció során nem csak etanol keletkezik, hanem CO_2 is felszabadul, ez adja a sör és a pezsgő pezsgését, de ez jelenthet életveszélyt a rosszul szellőző borospincékben is (ezért égetnek gyertyát).

Baktériumokban is végbemennek erjedési folyamatok, melyek során nem etanol, hanem pl. butanol és izopropanol (Clostridiumoknál) keletkeznek. Ezt korábban a vegyiparban is felhasználták.

A savas fermentációnak többféle újta is van. A tejsavbaktériumok pl. tejsavvá redukálják a piroszőlősavat: ha a folyamat eredménye csak tejsav, más nem képződik, akkor homolaktikus fermentációról beszélünk (Streptococcus és Lactobacillus fajok). A savanyú tejkészítmények előállításához ezen baktériumokat használják. Heterolaktikus a fermentáció, ha ecetsav és szén-dioxid is képződik mellette (Leuconostoc fajok). Az Enterobacteriaceae-család számos faja egyidejűleg többféle savat képez a piroszőlősavból, melyek a közeg pH-ját 4,0 alá is lecsökkenthetik. A Propionbaktériumok termelte propionsav egyes sajtféleségeknek különleges aromát és nagy lyukakat kölcsönözhet. Vannak olyan baktériumok, amelyek a hangyasavat tovább bontják szén-

dioxidra és vízre, ezek a bélrendszerben okozhatnak puffadásokat a gázképzéssel.

A fermentáció a mikroorganizmusok közvetlen felhasználásának jó példája. Különböző élelmiszerkészítmények (alkoholos italok, tejtermékek), tartósított savanyúságok, alkohol, tejsav vagy az ecetsav ipari méretű előállításában, silótakarmányok készítésében használatosak. Fermentációra csak mikroorganizmusok képesek, leszámítva az izomban átmenetileg lejátszódó tejsavképződést (izomláz okozója).

A fermentációs technológiáknak két fő módja van: régebben több száz vagy ezer literes tartályokban, az ún. fermentorokban történt a bioszintézis. Ezekben abszolút steril körülmények betartása mellett, valamilyen starter kultúrával oltottak be nagy mennyiségű tápoldatot. A sterilitás mellett biztosítani kellett a megfelelő keverést, gázcserét, az optimális hőmérsékletet. Ez ma már automatizáltan, számítógépekkel is történhet (ld. sörgyár). A másik módja az immobilizált sejteken és enzimeken alapuló technológia. Ennél a termelő sejteket vagy a katalízist végző enzimeket megfelelő szubsztrátumra adszorbeálják. Különböző gélesítőanyagok – keményítő, poliakrilamid, ioncserélő gyanták – segítségével rögzítik a mikróbákat vagy makromolekulákat, de pórusaikon keresztülengedik az alapanyagokat és a képződött terméket. Így a hordozó felületen át folyamatosan lehet áramoltatni az átalakítandó oldatokat.

Csak a mikroorganizmusokra jellemző folyamat még az *anaerob légzés*, ami bizonyos baktériumoknál alakult ki. Lényege, hogy elektrontranszport rendszere végső elektronakceptorként nem szabad

oxigént (O_2), hanem valamilyen sókban tárolt oxigént használ fel. A legismertebb ilyen rendszerek a nitrát- és nitrit-redukció.

Összegezzük tehát az oxidációs-redukációs anyagcserefolyamatok lehetséges útjait, azon szempontok szerint, hogy:

- a szubsztrát molekulák - melyekről a hidrogén ill. az elektron származik - szervesetlen vagy szerves anyagok,
- mi a hidrogénakceptor molekula, tehát ez alapján milyen a terminális oxidáció típusa
- milyen molekulák a folyamat végtermékei,
- és milyen szervezetekben játszódnak le ezen folyamatok.

Kemolitotrófok és kemoorganotrófok:

anaerob légzés:

A baktériumoknak három ilyen csoportja ismert: A szulfátredukálók száma viszonylag alacsony (*Desulfovibrio*). Vannak kemoorganotrófok, ezeknél a leggyakoribb energiaforrás az acetát, formát, laktát és piruvát, és kemolitotróf fajok is, itt az energiaforrás az elemi hidrogén. A szén-dioxidot redukáló (metántermelő) baktériumok képesek a CO_2 -ot végső hidrogén- és elektronakceptorként felhasználva azt metánná alakítani. Az energiefelszabadító folyamat alapja az, hogy a szerves szubsztrát oxidációja során szén-dioxid képződik, és ez szolgál terminális hidrogénakceptorként, amennyiben nincs jelen szabad CO_2 . Ez tulajdonképpen egy anaerob légzés, mely során a képződött metán felszabadul.

Ezen mikroorganizmusok teljesen különböznek azon aerob metánoxidáló baktériumoktól, amelyek a talajokban amelyek a metánt szén-dioxiddá és vízzé bontják.

A harmadik csoport a nitrátredukálók. A fakultatív anaerobok a molekuláris oxigén helyett használhatnak szerves terminális hidrogénakceptort (erjedés), vagy oxidált nitrogénvegyületeket (anaerob légzés).

Valamennyi, a nitrátot a fehérjék felépítéséhez hasznosítani tudó mikroorganizmusnak azt előbb ammóniává kell redukálnia, hogy beépülését lehetővé tegye a sejtanyagba. Ez a folyamat a bioszintézis során játszódik le, nitrátasszimilációnak nevezzük, és elvében különbözik a légzés során történő nitrátredukciótól.

A mikroorganizmusokat aszerint, hogy milyen nitrogénvegyületet tudnak az asszimilációhoz hasznosítani, négy csoportra oszthatjuk. Az első csoport a nitrátokat, a második a molekuláris nitrogént (nitrogénkötők), a harmadik ammóniát tud felvenni és felhasználni, a negyediknek pedig szerves nitrogénvegyületekre (pl. aminosavak) van szüksége a sejtanyag felépítéséhez.

Míg a nitrát kemolitotróf redukciója a mikroorganizmusoknak csak egy kisebb csoportjánál található meg, addig kiemelkedő jelentőségű a nitrátok kemoorganotróf redukciója. A nitrátredukáló baktériumok többsége ebbe a kategóriába tartozik. A nitrátok nitritté történő redukcióját kétféle enzim végzi. Az asszimilációs folyamatokban a NAD vagy NADP, az energiefelszabadító folyamatokban pedig ezen energiefelszabadító folyamatok enzimjei, ehhez még vas jelenlétére is szükség van (citokróm rendszerben). Az utóbbi folyamatban a nitrát az

anaerob légzés terminális hidrogénakceptoraként funkcionál (az oxigén helyett).

A denitrifikációval ellentétes folyamat az aerob légzést végző kemolitotróf baktériumok által végzett ammónium- és nitrit-oxidáció, vagyis az ammonifikáció és nitrifikáció folyamatai. Mindkét esemény különböző tápanyag-molekulák (molekuláris tüzelőanyag) elégetését jelenti oxigén segítségével. Ilyen folyamat a Szentgyörgyi-Krebs ciklus, amelyre azonban a kemolitotróf baktériumok nem képesek!!! Utóbbiak ezért szerves anyagokat (tehát pl. ammóniát, molekuláris hidrogént, metánt, kétértékű vasat és mangánt, elemi kén és kénvegyületeket) használnak fel szubsztrátként, vagyis hidrogén- (elektron-) donorként.

aerob légzés:

Az előzőekben a denitrifikáció példáján már rátértünk az aerob légzési folyamatokra. Itt tehát lényegében a kemolitotróf baktériumokról lesz szó, amelyek szubsztrátként (hidrogéndonorként) szerves anyagokat használnak, és zömükben autotrófok, mivel CO₂-t használnak fel a bioszintézis kiindulóanyagaként.

Ide tartozó csoportok:

- nitrozobaktériumok (Nitrosomonas)
- nitrobaktériumok (Nitrobacter)
- hidrogénbaktériumok (Hydrogenomonas)
- vasbaktériumok (Ferrobacillus, Thiobacillus)
- metánoxidáló baktériumok (Methanomonas, Pseudomonas)
- kénbaktériumok (Thiobacillus).

A fototróf mikroorganizmusok:

Azokat az élő szervezeteket, amelyek a sugárzó energiát közvetlenül makroerg kötéseké (ATP) képesek alakítani és redukált állapotú vegyületeket tudnak létrehozni, fototrófoknak hívjuk.

Fő csoportjaik:

1. eukarióták
 - a. zöld növények
 - b. zöldalgák
2. prokarióták
 - a. kékbaktériumok (Cyanobacteria)
 - b. zöld kénbaktériumok (Chlorobacteriaceae)
 - c. bíbor kénbaktériumok (Thiorhodaceae)
 - d. bíborbaktériumok (Athiorhodaceae).

Az egyes élőlénycsoportok a fotoredukcióhoz különböző hidrogéndonorokat használhatnak fel. Ezek lehetnek szervetlenek (fotolitotrófok) és szervesek (fotoorganotrófok).

Bár a zöld növények és a zöldalgák egyaránt fotolitotrófok, a fototróf mikroorganizmusok több tekintetben különböznek a zöld növényektől, melyek közül az egyik fontos különbség a klorofill szerkezetében van, ami abban nyilvánul meg, hogy a két csoport fényelnyelési spektruma más és más hullámhossztartományba esik. A zöld növényeknél az elnyelési spektrum a klorofill-a esetében 683-695 nm tartományba esik, míg a bakterioklorofill-a egy maximumot mutat 590 nm-nél és egyet az infravörös sávban, 800-900 nm között. A bakterioklorofill-c maximuma

760 nm-nél, szintén infravörös tartományban van. Ezen spektrumok meghatározzák egyben a baktériumok mélységi elterjedését vízben.

A szubsztrátoxidáció H-donorja a fotolitotróf szervezeteknél következő molekulák lehetnek:

- a) a víz: A zöld növények, algák és kénbaktériumok hasznosítják.
- b) a szulfidok: Baktériumok hasznosítják, főleg kénes forrásokban.
- c) a tioszulfát: zöld kénbaktériumok azt szulfáttá oxidálják.
- d) a hidrogén: zöld kénbaktériumok használják fel az elemi hidrogént hidrogéndonorként.

A fotoorganotrófok szerves hidrogéndonort igényelnek a szén-dioxid redukciójához. Szén-dioxid hiányában egy részük más szerves anyagok redukciójára is képes. Sok fotoorganotróf szervezet kemoorganotróf anyagcserét is képes folytatni sötétben, anaerob viszonyok között. Ebben az esetben a légzéshez elektrondonorként szolgálhat minden olyan szerves vegyület, amely a fotoredukcióban is elektrondonorként szerepel. A leggyakoribb szerves elektrondonorok a következők:

- a) az acetát,
- b) a vajsav,
- c) a borostyánkősav
- d) az aceton és az alkoholok,
- e) a glicin,

f) a metán.

A mikroorganizmusok hatása a nitrogéntartalmú szerves vegyületekre:

A mikroorganizmusok nitrogéntartalmú szerves vegyületeket egyaránt felhasználhatnak bioszintézis-építőelemnek és hidrogéndonornak a redoxifolyamatokhoz. A legjelentősebbek közülük a fehérjék és az aminosavak, illetve származékaik. A nagy molekulású proteinek különböző fajtáit csak speciális mikroorganizmuscsoportok képesek bontani (egyes Clostridium-fajok, Pseudomonas és Vibrio fajok, sugárgombák). A kazein és zselatin bontása már a mikroorganizmusok széles körének képessége, a protein részleges hidrolizátumait pedig szinte valamennyi képes hasznosítani. A fehérjék lebontását elsősorban extracelluláris enzimek végzik és a létrejövő aminosavak alkotják a tulajdonképpeni kiindulópontot az egyes biológiai folyamatokhoz. Ilyen reakciók az alábbiak:

- Az aminosavak dekarboxilációja: Néhány baktérium aminosavakat alakít át anélkül, hogy ammóniát szabadítana fel, miközben aminok képződnek. Korábban ezeket a hullamérgekkel azonosították, de mára már tudjuk, hogy nem ennyire veszélyes anyagok. Ide tartozik több hasznos biológiai hatású anyag képződése is, így pl. a hisztaminé, ami az izmokat összehúzódnásra készíti, ill. szerepet játszik allergiás reakciókban és vérnyomáscsökkenést okoz.
- Az aminosavak oxidatív deaminációja.
- Az aminosavak redukciója: ammóniafelszabadulással járó redukciós folyamat, mely során az aminosavból telített zsírsav keletkezik. (aminocsoport leválik és ammónia lesz belőle). A

fehérjék ilyen lebontását anaerob körülmények között rothadásnak nevezzük.

A mikroorganizmusok anyagcsere folyamatait katalizáló anyagok: az enzimek és az elektrontranszport rendszerek:

Az anyagcsere reakciók egyes reakciólépéseit enzimek gyorsítják ill. könnyítik meg, és az enzimek jelenléte gyakorlatilag megszabja a lehetséges reakcióutakat. Molekuláris szinten nézve az enzim fizikailag segíti elő a reakciót azzal, hogy megfelelő helyszínt biztosít a reakcióban résztvevő molekuláknak (az enzim szubsztrátjaihoz). Bár az enzimek fizikailag (kémiaailag) kötődnek a szubsztrátjaikhoz, ez a kapcsolat nem állandó, a folyamatok végeztével felbomlik és az enzimmolekula készen áll új folyamatok katalizálására.

Az enzimeket összetételük alapján feloszthatjuk:

- egyszerű enzimekre, melyek csak fehérjéből állnak, és
- összetett enzimekre, amelyek nem fehérje-komponenseket is tartalmaznak. A fehérjerészt hívják apoenzimnek, a többit kofaktornak. A kofaktorok lehetnek szerves molekulák, ekkor nevük koenzim, s lehetnek szervetlenek, pl. féminonok.

Az apoenzimek nagysága nagyon eltérő lehet, csupán néhány száz aminosavmolekulától egész több ezer aminosavmolekuláig terjedően. Kémiai térszerkezetük elsődleges jellegét az aminosavak sorrendje, másodlagos és harmadlagos jellegét a térszerkezet és az egyes molekularészek között létrejövő, áthidaló kötések adják. A nagy, bonyolult enzimeknek még negyedleges szerveződéséről is beszélhetünk,

ami több fehérjemolekula laza összetapadását jelenti. A harmadlagos és negyedleges szerkezet által kialakított speciális helyeket, melyek adott szubsztrátumok befogadására alkalmasak, hívjuk aktív centrumnak.

Kofaktor nagyon sokféle fém lehet: vas, réz, magnézium, mangán, cink, kobalt, szelén, stb. A fémek azáltal fokozzák a katalízist, hogy külső elektronpályájukon található elektronjaik könnyen leválnak, ezért eléggé reakcióképesek. A koenzimek legfőbb feladata az, hogy funkciócsoportokat visznek át egyik szubsztrátról a másikra, de átvitelre kerülhetnek elektronok, hidrogénatomok, karboxil-, amino- és egyéb funkciócsoportok is. Minthogy a koenzimek vitaminok, érthető, miért olyan fontos az élőlények számára ez a vegyület-típus.

A mikroorganizmusok által termelt enzimeket aszerint, hogy hol fejtik ki hatásukat, három csoportba sorolhatjuk. Az elsők az intracelluláris enzimek, amelyek működésének feltétele, hogy szubsztrátjaik bejuthassanak a sejt belsejébe. Ezt biztosítja a másik két csoport, a felülethez kötött és az extracelluláris enzimek, amelyek a nagymolekulatömegű anyagokat lebontják, hogy azok építőkövei aztán már átjuthassanak a sejtfalon és sejthártyán. Az extracelluláris enzimek szerepe a talajokban kiemelkedő és nekik köszönhető, hogy az élővilág által megtermelt, vízben, híg savakban és lúgokban nem oldódó szerves polimerek az élővilág körforgalmába visszajutni képesek.

Az enzimeknek azt a csoportját, amely a mikroorganizmusokban állandóan kimutatható, konstitutív enzimeknek hívjuk. Az enzimek másik része csak akkor szintetizálódik, ha az enzimszubsztrát a környezetben jelen van, ezek az indukálható enzimek. Valamennyi enzim szintézisét

valamilyen specifikus molekula, induktor idézi elő. Az indukció sok esetben láncszerű, az enzim által lebontott szubsztrátból keletkezett termék újabb enzim szintézisét indukálja, amely a terméket tovább bontja. Ha elegendő mennyiségű szubsztrát van jelen, akkor a lebontott anyag mennyisége az enzimkoncentrációtól, a hőmérséklettől és a pH-tól, valamint más környezeti tényezőktől is függ.

Az enzimeknek több további felosztási rendszere létezik, melyek közül célszerű a Nemzetközi Enzimbizottság által javasoltat követni, ennek fő csoportjai:

1. Oxidoreduktázok: Az oxido-redukciós folyamatok, az ún. redoxfolyamatok katalizátorai. A hidrogén- vagy elektrondonorról hidrogéngyököt és/vagy elektront visznek át az akceptormolekulára. Koenzimjeik a nikotinsavamid-adenin-dinukleotid (NAD) és a flavinadenin-dinukleotid (FAD).
2. Transzferázok: A donormolekuláról gyököket (funkciós csoportokat) visznek át az akceptormolekulára (pl. metil-, amino-, foszfortranszferázok).
3. Hidrolázok: Katabolítikus reakciókban vízkilépés mellett, kötések felbontását és létesítését végző enzimek.
4. Liázok: Atomok közötti kötések felbontását végzik a kettőskötések szubsztitúciójával (pl. C–C, C–O, C–N, C–S liázok).
5. Izomerázok: A sejtek által nem hasznosítható anyagok izomerjeit állítják elő, vagyis azonos összképletű, de más térszerkezetű, ezért tulajdonságaikban rendkívül eltérő molekulákat állítanak elő.
6. Ligázok: Szintetizáló folyamatokban atomok közötti kötések létesítő enzimek (pl. aminosav-RNS-ligázok).

Ebben a felsorolásban az extracelluláris enzimek nincsenek elkülönítve, azokat a lebontandó anyagok minősége alapján is csoportosíthatjuk (pl. poliszacharidázok, proteinázok, stb. elkülönítése).

A mikroorganizmusok fontosabb anyagcseretermékei:

A mikrobák anyagcseréje során keletkeznek olyan anyagok, amelyeket a mikrobasejt közvetlenül, saját maga hasznosít: ezeket primer (elsődleges) metabolitoknak nevezzük. Képződhetnek olyan anyagok is, az ún. másodlagos (szekunder) metabolitok, amelyeket ugyan saját maguk közvetlenül nem használnak fel, tehát saját fejlődésükhöz alapvetően nem is szükségesek, de előnyösek lehetnek a különböző társulásokon belül, ahol ezek az anyagok toxikus vagy riasztó hatással vannak más fajokra, egyedekre, ill. szimbiózisban a társult élőlény számára hasznosak lehetnek.

Mind a primer, mind a szekunder metabolitok között számos olyan van, amit az ember is hasznosítani tud. Hasznunkra lehetnek továbbá azok az enzimek, extracelluláris és endoenzimek egyaránt, amelyek a mikroorganizmusok anyagcseréjének különböző lépéseit katalizálják. Mindezekre példák a következő vegyületcsoportok:

- Alkoholok, ketonok, szerves savak: Közülük az etanol a legjelentősebb. Biológiai előállítására fermentációs folyamatokkal gazdaságos, pl. cukornádból, cirokból, burgonyából, stb. Ehhez szinte kizárólag a *Saccharomyces cerevisiae* élesztőgombát használják.

- További alkoholos termékeket és aldehideket, mint pl. butanolt, izopropanolt, acetont és glicerint is lehet biológiailag előállíttatni.
- Szerves savak közül a citromsavnak van nagy jelentősége, melyet szinte kizárólag mikrobiológiai úton állítanak elő. Felhasználják az élelmiszeriparban ízesítésre, tartósításra; gyógyszer- és kozmetikai iparban, fémiparban, mosószeriparban, stb.
- Az ecetsavat ecetsavbaktériumokkal (*Acetobacter* genus) állítják elő, és a tej-, sör-, alma- és borecet az ismert termékek.
- Aminosavak: Az élelmiszeriparban ízjavító anyagként, antioxidánsként, beltartalom javítására használják. Alkalmazza a vegyipar kozmetikai készítmények készítésekor. Egyik előállítását az auxotróf mutánsok felhasználása, amelyek valamilyen regulátorgén mutációja következtében zavart anyagcseréjűek, így képesek a kívánt aminosav rendellenes túltermelésére. Egyik fontos aminosav a lizin, amelyet főként takarmányadalékként hasznosítanak.
- Enzimek: Elsősorban az élelmiszeriparban, a mosószergyártásban és félszintetikus antibiotikumok előállításában alkalmazzák. Amilázokkal pl. a glükóz keményítőből (búza, kukorica) való előállítása valósítható meg, a cukorrépatól, mint szezonjellegű alapanyagtól függetlenül. Ezek termelésére egyes *Bacillus* fajok alkalmasak.
- További felhasználási lehetősége a mikrobiális enzimeknek a söriparban az erjeszthetőség javítása, a ruházati iparban a formatartás fokozása (vasalás), a papíriparban, cukorgyártásban és mosószeriparban a keményítőtartalom eltávolítása, stb.

Kiváltható segítségükkel a glükóz mint édesítőszer, annak fruktózzá alakításával.

- Vitaminok: Mivel ezen anyagok más, kémiai módszerekkel könnyebben előállíthatók, ma csak a B12-vitamint és a B2-vitamint (riboflavint) állítják elő mikrobiológiai úton. Az előző hiánya vészes vérszegénységet okoz, előállításukra pedig csak a mikroorganizmusok képesek, az állati szervezetek így a bélflórájuk (pl. Propionbacterium genus, Pseudomonas fajok) által megtermelt mennyiségét tudják csak felvenni. A riboflavin a FAD fontos alkotója, hiánya bőrgyulladásban és látási zavarokban nyilvánul meg.
- Mikrobaeredetű poliszacharidok: A xantán nevű heteropoliszacharid a könnyű vegyipar fontos adalékanyaga, ahol kozmetikumok, festékek viszkozitásának növelésével formajavítóként alkalmazzák.
- Az alginátok sav-polimerek, melyeket jégkrémek, puddingkészítmények formatartást segítő anyagaként használják, de alkalmas facsemeték és egyéb átültetésre kerülő növények gyökérzetének bevonására, a kiszáradás gátlása céljából.
- A dextránokat vérplazma kiegészítőként és az élelmiszeriparban adalékanyagként használják. Ipari méreteken a Leuconostoc baktériumból nyerik ki.
- Antibiotikumok: A mikroorganizmusok termékei közül ezek a legfontosabbak. Ma már közel 10.000 mikrobaeredetű antibiotikum ismert, de közülük csak mintegy 100-at állítanak elő ipari méreteken, s további 50-et szintetikus vagy félszintetikus úton. Az így nyert antibiotikumok azonban széleskörűen felhasználhatók: fertőző és daganatos betegségek

leküzdésére, élelmiszerek konzerválására, takarmányozásban kiegészítő anyagként, vagy növényvédelmi célra.

- Sokféle mikroorganizmus termel antibiotikumokat, közülük azonban csak néhány gomba- és sugárgomba, valamint Eubacteriales-fajokból nyerik ki őket. A gombák közül a Penicillium-, Cephalosporium, a baktériumok közül a Bacillus és Streptomyces nemzetségekben találunk jó antibiotikumtermelőket.
- Legfontosabb antibiotikumok a penicillinek, melyek a Gram-pozitív baktériumok ellen hatásosak, a sejtfalképzést gátolják. A gyógyászatban a benzil-penicillint mint természetes, az ampicillint mint félszintetikus anyagot használják széles körben. A további antibiotikumok részletezését ld. a Hornok jegyzetben (1995).
- Hormonhatású anyagok: Itt a mikrobák termelte gibberelinek a legjelentősebbek. A növénytermesztésben közismerten növekedésserkentő anyagként, a szesziparban pedig a malátatermelés során hasznosítják. A *Fusarium moniliformae* gomba terméke.
- Alkaloidok: A mikroorganizmusok csak kivételesen szintetizálnak hasznosítható alkaloidokat. Erre példa *Claviceps* gombafajok által termelt anyarozs-alkaloidok, melyek közül az ergotamin és a metil-ergobazin a szülészetben vajúadás siettető, méhösszehúzó hatású. Egyéb fajtái szintén orvosi felhasználásúak. A *Claviceps paspali* termelte lizerginsav félszintetikus származéka LSD („Lucy in the Sky with Diamonds”) néven lett közismert.
- Mitotoxinok: Ezek az ember számára káros, másodlagos anyagcseretermékek. Az állattenyésztésben és a

humánegészségügyben okoznak súlyos gondokat, különböző szervi károsodásokat, rákos daganatok képződését okozva. Termelőik lehetnek baktériumok, gombák. Hatásuk ellen legjobban a megelőzéssel védekezhetünk, hiszen a szennyezett terményt vagy élelmiszert már nem lehet gazdaságosan toxinmentesíteni, és a hőkezelés (főzés) sem segít.

1. Bevezetés

1.1. Környezeti problémák, ártalmak

Környezet alatt biotikus és abiotikus tényezők olyan komplex rendszerét értjük, amelyen az ember természetes életfeltételei alapszanak. Ebbe beletartozik az élőlények –emberek, állatok, növények, mikroorganizmusok-, valamint a talaj, víz, levegő. Az ember, mint ennek a rendszernek eleme, felhasználja azt a gazdaságban, technikai fejlődésében, közlekedésben. Ezek az elemek egymásra és az emberre is visszahatnak. Az emberi egzisztencia alapjai az anyagkörforgalmak kiegyensúlyozott együttműködéséből származnak, melyeket a nap energiája tart fenn. A környezet és a **bioszféra** fogalmait gyakran azonosítják. A bioszféra csak az élő szervezetek összeségét jelenti, melyekhez az ember is tartozik. A bioszféra az ember nélkül is létezhetne, de fordítva ez nem igaz. A civilizációs és technikai folyamatainkkal kihatunk a bioszférára, mely szintén kifejti ránk hatását. Ezáltal válik a bioszféra a környezetünké.

A környezeti problémák az ember biogeoszférára kifejtett hatásaira vezethetők vissza. Napjainkban ezek már annyira jelentősek, hogy a jövő emberiségének létezési alapjait fenyegetik. A Föld, mint bolygó eltartóképessége nem lesz elegendő a jövő társadalmainak elfogadható emberi élet biztosítására, ha ezeket a gondokat nem kezeljük gyorsan és hatékonyan. A cél tehát az, hogy a problémákat felismerjük, elkerüljük és a már meglévő környezeti ártalmakat felszámoljuk.

A környezeti problémák összeségéből három tárgykör különösen fontos:

- **Környezetszennyezés:** A talajok, vizek, levegő terhelése antropogén hulladékok által túllépi a bioszféra "elnyelő-képességét" (Senkenfunktion).
- **Nyersanyagforrások kimerítése:** A nem újratermelődő energiaforrások túlzott mértékű felhasználása az emberi egzisztencia alapjait jelentő források elfogyásához vezet.
- **Természetes ökoszisztémák elpusztítása:** A globális ökoszisztéma stabilitása megköveteli az élő szervezetek fajgazdagságát (biodiverzitást) ahhoz, hogy a globális körforgalmak újrahasznosító funkcióját biztosítani tudja. A természetes evolúcióból eredő fajgazdagság egy kimeríthetetlen értékforrást jelent.

A környezeti problémák azért is annyira jelentősek, mert összefüggenek az **emberi népesség** növekedésével, fokozatosan növekvő igényeivel és ezáltal kihatásaival a természetes folyamatokra és forrásokra szoros kapcsolatban vannak.

Mi vezetett a környezeti problémák kialakulásához? Az emberi elme fejlődésével kilépett a természetes evolúciós folyamatokból. A **kulturális forradalomban** a szellemi alkotások szóban és képben gyorsan továbbításra, kölcsönös cserére kerülnek, elterjednek. Az ismeretek mennyiségének növekedése és az információcsere a technika fejlődéséhez vezetett. Az ember ezáltal szerszámokat, eszközöket alkotott, melyek a természetnek a saját képére formálását teszik lehetővé. Az ember nem alkalmazkodik többé a környezetéhez, hanem megpróbálja azt kontrollálni. A kulturális evolúció a természet

gazdagításához is vezetett. Egyes kultúr-tájokban nagyon fajgazdagság alakult ki, mint az eredeti ökoszisztémákban. A tudományos felismerések eredményeinek felhasználásával a technikában a Föld több régiójában legyőzték az éhezést, betegségeket és fáradalmakat. Ezen fejlődés egyik eredménye a népesség rohamos fejlődése.

A technikai fejlődés a gazdasággal összeforrva saját dinamizmust nyert, ami a természet használatából annak kizsákmányolásához vezetett. A szántás megnövelte a talajok termékenységét, az olajfúrókutak a fosszilis energiaforrások kimerítéséhez vezetnek. A források értékét nem ismerik fel, a modern emberi szükséglet-kielégítés ellentétben áll a környezet racionális kezelésével. Az emberekben nem tudatosodik eléggé, hogy milyen nagy területen és mekkora mértékben hat ki környezetére. A hétköznapi életünkből nem ismerünk exponenciálisan, láncreakcióként lefutó folyamatokat. A légkör gázösszetételébe történő beavatkozásunk nagyságrendje a látszólag kis mennyiségű üvegházhatást okozó gázok által csak most kezd tudatosulni bennünk. A gazdasági, kereskedelmi érdekek ellentétben állnak az egyének cselekedeteivel. Az ember önfenntartó ösztöne csak a közeli környezetére és a következő generációra terjed ki, nem pedig globális dimenziókra és a távoli jövő generációira. A természetnek nincs ügyvédje.

Mindezek miatt is egyre sürgetőbb szükséglet az, hogy felismerjük a **felelősségünket** és éljünk vele. A tudomány és a technika számára ez a kihívásnak egy új dimenzióját jelenti. A feladatunk az, hogy **az ipari folyamatokat a természetes körforgalmakba integráljuk**. Eddig az ember jóléte állt a középpontban, most pedig arra van szükség, hogy az ember és a természet egységét visszaállítsuk, valamint a természet megőrzését mint új feladatunkat elismerjük.

Az erre nemzetközileg használt fogalom "**sustainable development**" magyar fordítása körülbelül így hangozhat: tartamos fejlődés. A folyamatos fejlődésnél többről van szó, alatta a természetbarát technológiákat, a jövőbeli létezésünk lehetőségének megőrzését kell értenünk. Mára már ráébredt az emberiség, hogy az eddigi kezdeményezések nem bizonyulnak elegendőnek a problémák megoldására. Egy komplex stratégiára van szükség, nem pontszerűen elhelyezkedő megoldásocskákra. A tartamos fejlődés fogalma messze meghaladja a környezetvédelemét. Meg kell szüntetni a környezeti terheléseket, és a nyersanyagforrások kiaknázását és feldolgozását a természet számára elviselhetővé kell tenni.

1.2. A civilizációs folyamatok beolvasztása a természetes körfolyamatokba

A civilizációs és ipari fejlődés az utolsó 50 évben oda vezetett, hogy a természetes körfolyamatok mellett az antropogén anyag- és energiagazdálkodás mind nagyobb léptéket vett fel.

A **természetes C-körforgalom** évenként mintegy 10^9 t szenet keringet meg újra. Az ipari társadalmak gazdaságai a fosszilis energiahordozókon, kőolajon, földgázon és kőszénen alapszanak. Ezeket az energia- és nyersanyagforrásokat egy bár óriási, de korlátozott készletből nyerik ki. Az éves kőolajtermelésnek mintegy 90%-át a háztartások, az ipar és a közlekedés hasznosítja, 10%-ot pedig vegyszerek alapanyagként használunk fel. Az energiafelhasználás fedezésére történő elégetésükből olyan mértékű CO_2 -felszabadítás következik be, melyet a természetes körfolyamatok nem tudnak kompenzálni, s ami ezáltal az üvegházhatás

fokozódásához vezet. A kőolajkitermeléshez hozzájön még a földgáz és a kőszén kinyerése is.

A **vegyszerek globális termelése** az évi 400 millió tonna nagyságrend körül mozog. Több mint 100 000 féle vegyületet állítanak elő világszerte, s a belőlük készült termékek száma ennél is sokkal nagyobb. A termelés közben **hulladékok** keletkeznek, melyek mennyisége nehezen becsülhető meg, de használat után minden végtermékből is hulladék lesz. Az évenként felhalmozódó hulladékmennyiségekről a legfontosabb ipari országokban egy a múlt század 80 éveinek végéről származó adatsora áll rendelkezésemre, OECD-forrásokból:

- - ipari hulladékok:	1400 x 10 ⁶ t/év
- - kommunális hulladékok	400 x 10 ⁶ t/év
- - veszélyes hulladékok	300 x 10 ⁶ t/év
- - CO ₂	6000 x 10 ⁶ t/év
- - légköri emissziók CO ₂ -n kívül	200 x 10 ⁶ t/év

A megadott értékek magukba foglalnak szerves és szervesetlen hulladékokat. A szerves hulladékoknál lebontható és perzisztens anyagok között tehetünk különbséget. Ezek az anyagok nem kellő mértékben tűnnek el a környezetből, ha a természetes lebontási képességeket túlterheljük velük. Sok vegyi, szintetikus anyag csak lassan bomlik el, ha a természetbe kikerül. Ez a **perzisztencia** a környezetben történő felhalmozódásukhoz vezet. Az 1. FÓLIA ábráján néhány ilyen **nem környezetbarát** anyagot felsoroltam. A legszembeütközőbb a csomagolóanyagok műanyagjainak felhalmozódása: ezen anyagok nagy része perzisztens, de biológiailag inert, tehát mérgező hatás nélküli. Más

hogyan viselkednek a növényvédőszerrel. Míg az ő arányuk a körfolyamatokban aránylag kicsinek tekinthető, ezek biológiailag aktívak. Ha nem kerülnek teljesen vagy legalább elegendő mértékben lebontásra, akkor a táplálkozási láncokba kerülve azok egyes pontjain felhalmozódhatnak, és az ökoszisztémákra és az emberre káros hatással lehetnek. Ezért nem is hiányzanak azok a törekvések, hogy a termékeket környezetbarát anyagokból készítsék el, hogy a szerepük ellátása után ismét beleolvadhassanak a természetes körfolyamatokba. A műanyagoknál ezt az újrahasznosítással (recycling) és az újrahasználattal, valamint lebontható termékek előállításával érhetjük el. A növényvédőszerknél is közelebb kerültek már ezen célokhoz, környezetbarát, környezetet kevésbé terhelő termékek kifejlesztésével.

A tartamos fejlődés nem csak az újrahasznosítható termékek kifejlesztését, de a nem újratermelődő nyersanyagokkal való takarékoskodást is megköveteli. A nyersanyagok takarékosabb felhasználása mellett ez csak azáltal valósítható meg, ha a fosszilis energiahordozók helyett fokozatosan átállunk az újratermelődő energiaforrásokra, mint a nap, szél, hullámenergia.

Hogyan mennyire pazarlóan bánunk a fosszilis energiahordozókkal, azt az a példa is bizonyítja, hogy a fejlett ipari országok mezőgazdasága ma 1 kg kenyér előállításához mintegy 0,5 kg kőolaj felhasználását igényli. A tudományos technikai fejlődésnek arra a nagy célra kell koncentrálnia, hogy a civilizációs és ipari folyamatokat beleolvassza a természetes körfolyamatokba.

Az itt felvázolt problémák a következő fő feladatokat állítják a modern emberiség elé:

- A hulladékok és káros anyagok keletkezése csak olyan mértékben történhet meg, hogy azokat a természetes ökoszisztémák képesek legyenek lebontani, megsemmisíteni. Ez a klímareleváns gázok kibocsátásának jelentős csökkentését, hatékony környezetvédelmi technikákat és újrahasznosítható nyersanyagok felhasználását jelenti.
- A fosszilis energiahordozók és az ásványi nyersanyagok felhasználását döntő mértékben csökkenteni kell, s ezzel egyidőben az újratermelődő energiaforrások és nyersanyagok alkalmazásának lehetőségeit kell kifejleszteni és érvényesíteni. Ennek során a napenergia és a biotechnológiai módszerek hasznosítása fogják döntő mértékben meghatározni az újratermelődő nyersanyagok megtermelésének lehetőségeit.
- A bioszféra és annak funkció fenntartásához szükség van az ökoszisztémák faji diverzitásának megőrzésére. Ez egyben a forrása új termékeknek és biotechnológiáknak is. Nagyon óvatos becslések szerint évente mintegy ezer faj pusztul ki Földünkön, más becslések évi 27000 fajról szólnak. Újonnan keletkezik egy, maximum 10 faj évente. Az okok a természetes életterek csökkenésében, s a visszamaradó életterek utakkal történő felaprózásában rejlenek. Ökológusok szerint ha egy természetes habitát terét 10%-ra csökkentjük, akkor hosszútávon az a fajok 50%-ának kipusztulásához vezet. Középeurópában az életterek már ezen érték alá, eredeti területük kb. 5%-ára zsugorodtak. Ez arra kötelez minket, hogy a Föld más területein, ahol ezen folyamatok még nem haladtak előre ennyire, hozzájáruljunk

ahhoz, hogy több, nagyobb méretű és egymással összeköttetésben álló habitátot alakítsunk ki, tartsunk fenn.

Ezen feladatok tükrében az ember ugyan láthatólag felismerte a problémák horderejét, de hiányzik még a tudásunk ahhoz, hogy a jövő nagy feladatainak konkrét lépéseit megfogalmazzuk.

1.3. A mikroorganizmusok szerepe az anyagok körforgalmában

A környezeti problémák megoldásában a mikroorganizmusoknak döntő szerepük van, nélkülük az lehetetlen lenne. Az anyagok körforgalmában nekik jut a **lebontás szerepe**.

A 2. fólián egy ökoszisztéma anyag- és energiaforgalmának leegyszerűsített vázlatát látjuk. A különböző élő szervezetek különböző táplálkozási- és lebontási szinteken kapcsolódnak ezen körfolyamatokba. A növények az elsődleges termelők, az állatok és az ember a fogyasztók (konzumensek), a mikroorganizmusok pedig a lebontók. Az ábrán egyszerűsítve feltüntetett körfolyamatok természetesen bonyolult hálózatot szimbolizálnak, melyben olyan már példák által is konkrétan megismert folyamatok/kapcsolódások zajlanak, mint pl. a kooperáció, parazitizmus, szimbiózis. Nem is minden anyag futja le a teljes ábrázolt körfolyamatot. A növények által termelt szerves anyagok jelentős része közvetlenül kerül mikrobiális lebontásra. Ez a rövidrezárt körfolyamat a primer termelők és a lebontók között óriási szereppel bír az ökoszisztémákban. Szinte minden állatok és növények által termelt szerves anyagot a mikróbák aerob viszonyok között mineralizálják, vagyis újra ásványi formára hozzák. Ezen az úton játszódik le a tápanyagok

újrahasznosítása (a már említett recycling), ami a növények számára a mindig megismétlődő növekedést lehetővé teszi.

Mialatt az anyagok körbe-körbe forognak az ökoszisztémákban, addig a napenergia egyirányban keresztüláramlik azon. Az ökoszisztémák az anyagokra vonatkozóan így zárt, az **energiára** nézve nyílt rendszerek. Az ábra egyre vékonyabbá váló nyilai azt jelképezik, hogy a napenergia a különböző trófikus lépcsők között tovább haladva folyamatosan elhasználódik, termodinamikai értelemben hőenergiává alakul át és növekvő entrópiaként távozik a rendszerből. A nap sugárzó energiájának kémiai energiává történő átalakítására alapul a természet teremtő ereje, a jelenkorban a körfolyamatok kiegyensúlyozottságával, a Földtörténetben pedig a fosszilis energiahordozók készleteinek keletkezésében.

A mikroorganizmusok nem csak természetes anyagokat mineralizálnak, hanem a kémiai ipar termelte szerves anyagok nagy számát is. Azon képességük által, hogy sok a természet számára **idegen (ún. xenobiotikus) anyagot** képesek lebontani, a mikroorganizmusoknak meghatározó szerepe van a szennyezéssel terhelt környezeti helyszínek megtisztításában. A környezeti technológiák lényegében ezen lebontási folyamatoknak teremtik meg a megfelelő környezeti feltételeket.

A mikroorganizmusoknak nem korlátozódik a szerepük csak a lebontásra. Az ő **szintetikus képességeik** is óriási szerepük, főleg a növényekkel és állatokkal létesített szimbiotikus kapcsolatokban. A légköri nitrogén megkötése csakúgy mint sok növény foszfátátlakozása szimbiotikus kapcsolatokon alapszik, ezekre előző órákon láthattunk példákat (mikorrhizák, rhizobiumok, stb.). Az újratermelő nyersanyagforrások biotechnológiai feltárásában a **mikróbák által termelt enzimeknek** kulcsfontosságú szerep jut.

A következőkben a mikroorganizmusok csodálatos teljesítőképességének biotechnológiai alkalmazásainak lehetőségeit tekintjük át.

1.4. Szennyvíztisztítás és természetes vizeink tisztítása:

A vizek voltak a természetnek azon helyei, ahol elsőként jelentkeztek a szennyezőanyagokkal történő túlterhelésük miatti ártalmak. A 19. század végi városok gyors létszámnövekedése következtében a szennyvizek mennyiségei megnöttek, melyből járványok eredtek. Németországban például 1892-ben volt az utolsó kolerajárvány, ami az Elba folyó szűretlen, tisztítatlan vizének felhasználásából eredt. Ezen okok vezettek a **szennyvíztisztító berendezések** kifejlesztéséhez. Ezek jól levegőztetett víztárolók voltak, mint a lebontó mikroorganizmusoknak kedvező életterek, vagy a talajok tisztító képességéhez hasonló felépítésű csepegtető, szivárgó módszerek. A folyamatok célja a szervesanyagtartalom mineralizációjának elősegítése és a patogén mikroorganizmusok elpusztítása.

A második világháborút követően egyértelművé vált, hogy a szerves anyagok mineralizációja nem elegendő. A csak így megtisztított vizek nagy mennyiségben tartalmaztak ásványi alkotóelemeket, mindenek előtt foszfátokat és nitrátokat, melyek a természetes vizekbe történő levezetés után azok **eutrofizációjához** vezettek. Ezalatt a tápanyagoknak egy olyan túlzott kínálatát értjük, ami algák és cianobaktériumok túlburjánzó növekedéséhez (ún. vízvirágzásokhoz) vezet. Ezek elhalása és az azt követő mikrobiális lebontásuk olyan nagy oxigénigénnyel jár, hogy az adott víz anaerobbá válik. Egy elterjedt anaerob lebontási folyamat, a szulfátredukció során, ahogy azt korábban már láttuk, H_2S keletkezik. Az

oxigénhiány és a H₂S-képződés sok szervezet halálát okozzák, elvezetve a vizek "átbillenéséhez". Ezek a tapasztalatok vezettek a szennyvíztisztítás egy újabb lépcsőjéhez, a nitrogén- és a foszfor eliminációjához. A nitrogén eliminációja mikrobiális denitrifikáció által, a foszfáté pedig főleg kémiai tisztítással történhet meg. Mivel ez utóbbi folyamat költséges alapanyagokat igényel, intenzív fejlesztése folyik a bakteriális foszfátelimináció polifoszfátok akkumulációjával lejátszódó útjai felhasználásának.

A mikrobiális lebontási folyamatok eredményeként az ásványi végtermékek mellett a lebontási folyamatokat ellátó mikroorganizmusok biomasszája is végtermékként fennmarad, **szennyvíziszap** formájában. A szennyvíziszapok felhalmozódása különösen a bennük akkumulálódott veszélyes szennyezőanyagok (pl. nehézfémek) miatt egyre növekvő problémaként jelentkeznek. Ennek megoldására alkalmas a biogáztermelés. Az ekkor lejátszódó metántermelés köti össze a hulladékhasznosítást és a nyersanyagkinyerést. A metanogenezisre alapuló technológiák továbbfejlesztése segíthet az erősebben szennyezett vizek mikroorganizmusok általi közvetlen megtisztításához. Ez az anaerob folyamat nem igényli a magas energiaigényű levegőztetést, de hozzátartozik a biogázreaktorok (rothasztótornyok) építése.

Mostanáig a szennyvíztisztítás messzemenőig csak a víz káros anyagoktól történő mentesítésére korlátozódik. A folyamat során **nyersanyagok kinyerése** még fejletlen, ez még a jövő feladata.

A tengerek olajszennyezése a nagy olajszállító tankhajók katasztrófái által egy igen látványos példája a vizek szennyezésének. A kőolaj hosszúszénláncú szénhidrogénjeinek lebontással szembeni perzisztenciája és a természetes ökoszisztémákra gyakorolt káros hatásai nyomatékosítják ezt. Itt kell azonban megjegyeznünk, hogy a

tengereket szennyező kőolaj mennyiségének csak mintegy 4%-a származik az ilyen hajókatasztrófákból, mintegy 40% a folyók és hulladékvizek olajfinomítók általi szennyezésére vezethetők vissza.

1.5. Talajszanalízis és talajtermékenység

A talajnak mint nyersanyagforrásnak az óriási értéke csak lassan kezd tudatosulni az emberben, még mindig intenzíven folyik a talajaink letakarása (pl. aszfalttal, betonnal) és beépítése. A talajnak sokféle funkciója van. A legszembeötlőbbek a mező- és erdőgazdasági hasznosítás, sokkal kevésbé feltűnő az a szűrőhatás, amivel a talajvíz megtisztításához járul hozzá. Az **ivóvízkészletek** nitrátok, foszfátok és növényvédőszeresek általi szennyezése ezen szűrőképesség túlterheléséhez vezetett. Ezen szennyezőanyagok vízből történő kivonása olyannyira drága, hogy elébe kell menni a nitrogénműtrágyák, a növényvédőszeresek mennyiségeinek csökkentésével, jól lebontható szerek kifejlesztésével. A nitrátok főleg a csecsemők számára jelentenek veszélyt, ha az ivóvízbe jutnak, a methemoglobinémia okozásával. Ugyan az új növényvédőszeresek engedélyezése hosszadalmas folyamat (erről a tanulmányúton lesz szó), de az alkalmazott anyagok és a belőlük a talajban később keletkező metabolitok (lebontási termékek) sokféleségének kombinációs hatásai kiszámíthatatlan veszélyeket rejthetnek.

Csak mintegy húsz éve ismerték fel a **régi anyagok ("Altlasten")** környezet számára képviselt veszélyeit. Ide értjük a régebbi eredetű lerakóhelyeket és létesítményeket, melyekből eredően az emberi egészséget veszélyeztető károsító anyagok kerülhetnek ki. A kommunális és ipari hulladékokból létesített illegális szemétkerakók mellett ide

tartoznak olyan már termelésből kivont vagy még működő ipari és szolgáltatói telephelyek is. Különösen elterjedtek és veszélyesek az ásványi olajok szénhidrogénjeit, FCKW-eket (poliklórozott szénhidrátokat), poliklórozott aromatikusan szénhidrogéneket (PAK), robbanóanyagokat (TNT) és nehézfémeket.

Az utóbbi években több különböző módszert dolgoztak ki az ilyen hulladékanyagok ártalmatlanítására, biológiai, kémiai-fizikai és termikus eljárásokat. A kémiai-fizikai kezelésnél talajon történő atmosféra tisztítók keletkeznek mint hulladék, melyet tovább kell kezelni, a hőkezeléskor pedig minden élőlényt elölnek a talajban. Ezért fordítanak különös figyelmet a biológiai talajjavításra (**bioremediáció**). Ásványi olajokkal történt szennyezésekre már elég jó hatásfokú eljárások vannak a gyakorlatban, olyan ellenálló anyagokra mint a PAK és a TNT még javítani kell a módszerek hatékonyságát. Jól tudják kezelni az így szennyezett talajokat ex-situ módon, vagyis ha kiemelik a földtömeget eredeti helyéből, majd a komposztáláshoz hasonló tárolókban kezelik. In-situ módszerek még váratnak magukra a kifejlesztésükkel.

A régi anyagok hulladékproblémáiból egy nagyon fontos következtetést azért levontak: a hangsúlyt az újabb hulladékok keletkezésének megelőzésére kell helyezni. A rendszerezve, szabályozottan kialakított depóniák és veszélyesanyag-tárolók csökkentik a talajvíz szennyezésének veszélyét, de a csapadékból származó, a hulladékon keresztül szivárgó vizet továbbra is kezelni kell.

1.6. Levegőtisztaságvédelem és az atmoszféra védelme

A levegő az a közeg, amelyen keresztül sok káros anyag a környezetbe kerül. Egyben az atmoszféra az a környezeti tér, amelyben az

üvegházhatást okozó gázok felhalmozódása és az ózonréteg lerombolása miatt az ipari társadalmak termelte szennyezőanyagok globális hatása jelentkezik. Különböző nemzetközi megegyezésekkel próbál az emberiség ezen folyamatokat ellensúlyozni.

A „Környezeti terhelések: Emissziós és imissziós utak, nagyságrendek és koncentrációk a szerves kémiai vegyszerek környezetbe kerüléséről” című (ea ppt) ábra megmutatja a különböző emissziós- és imissziós utakat ill. koncentrációkat, amelyekkel szennyezőanyagok kerülnek környezetünkbe. Ha a szennyezések nagyterületen kis koncentrációban jelentkeznek, a környezetvédelmi technikák már nem hatnak, és ekkor a természetes tisztítási potenciálokra kell hagyatkoznunk. A környezetvédelmi technika feladata tehát az, hogy a káros anyagokat már a keletkezésük helyén megsemmisítse, ártalmatlanítsa, ha már a keletkezésüket nem tudja megakadályozni.

A levegő nem alkalmas közeg a mikrobiológiai aktivitások számára. Az illékony károsító anyagok lebontásához ezért szilárd vagy folyékony hordozó anyagoknak kell hordozniuk a mikroorganizmusokat, amelyeken a szennyezett levegő átáramolhat. Ezen illékony anyagok közé tartoznak a természetes szaglóérzéklet zavaró anyagok csakúgy, mint a szerves oldószerek mint a benzol, toluol, triklóretán, metilklorid, tri- és tetraklóretilén. Az elszívott szennyezett levegő tisztításához vagy **biofiltereket** alkalmaznak, szilárd hordozókkal mint a beton, kompost, vagy tehéntrágya, vagy **biomosóleveket**, melyek a szennyvíztisztításhoz hasonlóan lebegtetett állapotban (szuszpenzióként) tartalmazzák a mikroorganizmusokat.

A 4. fólián (ea ppt) a legfontosabb üvegházhatást okozó gázokat foglaltuk össze, forrásaikkal és mennyiségeikkel. Mennyiségük az atmoszférában folyamatosan növekszik, mert nagyobb mennyiségben keletkeznek mint ahogy megsemmisülnek. A metán és a dinitrogén-oxid („Lachgas”) keletkezésében mikroorganizmusok vesznek részt. A metanogén baktérium a rizstermelés kiterjesztése és a szarvasmarhatartás fokozódása miatt egyre bővülő életteret kapnak. A depóniákra és szennyvíztisztítókra épülő biogáztermelés valamennyire ellensúlyozza ezt. A N_2O a fokozódó nitrogénműtrágyázással egyre nagyobb mennyiségben keletkezik. A N_2O -t nem szabad összetéveszteni a NO_x -ekkel (NO és NO_2), mely gázok főleg égési folyamatok közben, a belső égésű motorokban keletkeznek. A N_2O a troposzférában az ózon lerombolásával, a Földfelszín közelében pedig az ózonkoncentrációk megnövelésével fejt ki káros hatásait. Ezekre a folyamatokra, csakúgy mint a savas esőkre itt most nem térünk ki bővebben.

1.7. Bioprevenció: környezetbarát termékek és folyamatok

Az a felismerés, hogy a vegyipari termékek olyannyira perzisztensek lehetnek, hogy a természetben nagy mennyiségekben felhalmozódnak, nagy mértékben hozzájárult a környezeti tudat kialakulásához. Először a DDT rovarirtó szer alkalmazásának következményei vezettek belátásra, amely a vízi táplálékláncokban az eredeti koncentrációk 10.000-ére feldúsulva akkumulálódtak. Következményként a nehezen vagy nem lebontható vegyszereket forgalmazását betiltották és helyettesítették őket **környezetbarát termékekkel**. Az ilyen termékek gyártásánál fontos szerepet játszik az a felismerés, hogy az olyan kémiailag szintetizált anyagok, melyek szerkezetükben hasonlítanak a természetben is

megtalálható anyagokhoz, könnyebben lebontásra kerülnek, ezzel környezetbarátabbak.

A rovarirtószereknél pl. ez a folyamat több lépcsős fejlesztésben valósult meg. A kezdetben lemásolt növényi anyagok túl instabilnak bizonyultak, ezért később ellenállóbb, de még mindig lebontható anyagokra kellett átállni. A biológiailag aktív anyagok nagyon ritkán mentesek teljesen mellékhatásoktól.

A környezetbarát csomagolóanyagok bevezetése még gyerekcipőben jár. A baktériumok által képzett Poly- β -hidroxialkánsavak révén olyan anyagok állnak rendelkezésünkre, amelyek ugyanolyan kedvező fizikai tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a kőolajból szintetizált műanyag csomagolóanyagok. Bevezetésük mégis csak lassan indul meg, a nagyon alacsony kőolajárak miatt.

A környezetbarát termékeknél nem csak a lebonthatóság a kritérium, hanem a termelési folyamatok ún. **ökomérlege** is. A tartamos fejlődés szempontjából fontos, hogy a nem újratermelődő nyersanyagok és energiaforrások felhasználását minimalizáljuk, a termékek gyártásánál, használatukkor és megsemmisítésükkor ill. újrahasznosításukkor. A hosszú használati időtartamú termékek készítése kell hogy a norma legyen. Az ökomérlegek készítésének az a célja, hogy a tartamos gazdálkodás szempontjából mérlegelje a legfontosabb paramétereket, melyek közül a legfontosabbak:

- nyersanyagfelhasználás nem regenerálható nyersanyagokból
- energiafelhasználás pl. kőolajekvivalensre átszámítva
- a gyártáskor és szállításkor jelentkező emissziók, pl. CO₂-ekvivalensben kifejezve
- vízfelhasználás és újrahasznosítás

- hulladékmennyiség, pl. depónia-léghőméterben kifejezve.

Szennyvíztisztítás

1.1 Szennyvizek keletkezése és összetétele

Szennyvizek lakókörzetekben, a mezőgazdaságban és iparban keletkeznek. Jelenleg a mezőgazdaságból ered a legnagyobb mennyiségben, míg az iparban nehezen lebontható és mérgező anyagok szennyezik a vizeket. Minden esetben nagyon bonyolult összetételű a szennyvíz, s az összetétel és mennyiség erősen változó.

Hogy a vízben található szennyező anyagok mennyiségét egységes paraméterrel fejezzék ki, megadják, olyan összegző paramétert adnak meg, ami a vízben található szennyezőanyagok oxidációjához és mineralizációjához a mikroorganizmusok által **felhasznált oxigén mennyiségén** alapszik. A mikrobiálisan lebontható anyagoknál a **biológiai oxigénigény (BOI)** fogalmat használják.

Így pl. a BOI_5 (BSB_5) azon mg/l-ben kifejezett oxigénmennyiség, amelyet 20°C -nál, 5 nap alatt, sötétben igényelnek a mikroorganizmusok a biológiai lebontáshoz. Ez a módszer azt az esetet szimulálja, amikor olyan természetes vízbe jut ki a szennyvíz, ahol elegendő mikroorganikus élőlény áll rendelkezésre a lebontáshoz. Ezzel a standardizált módszerrel nem minden anyag lebontását lehet leírni, csak a biológiailag könnyen lebonthatókat. Ilyen a cukrok, fehérjék és aminosavak, szerves savak, lipidek és zsírsavak. A tömegegységnyi anyag teljes oxidációja 1g mennyiségnél különböző oxigénmennyiségeket igényel:

1 g glükóz	1,07 g O ₂
1 g ecetsav (oxidált)	0,97 g O ₂
1 g fehérje (redukált)	1,46 g O ₂
1 g vajsav (redukált)	1,82 g O ₂
1 g fenol (redukált)	2,39 g O ₂
1 g metán (redukált)	4,00 g O ₂

Miután a kommunális szennyvizek elsősorban szénhidrátokat és fehérjéket tartalmaznak, ezért rájuk átlagosan 1,3-as BOI₅ vezethető le. A gyakorlatban azonban általában nem fejeződnek be a lebontási folyamatok 5 nap alatt, ami ezt a tényezőt 0,7-re csökkenti. Nagyságrendileg így a kommunális szennyvizek BOI indexei a könnyen lebontható vegyületekének felelnek meg.

A hétköznapi gyakorlatban nem végeznek ilyen átszámításokat, így a kommunális szennyvizeknél a BOI₅ értékek 200-300 mg O₂/ml-nél vannak. Az élelmiszeriparban ezen értékek jóval magasabbak, pl. tehenészetek és sörgyárak szennyvizeinél ez az érték 500-2000. Nagyon magas szennyezettséget mutatnak az ipari méretű állattenyésztésből eredő szennyvizek, így a trágyalé 10.000-25.000 mg O₂/ml értékű. Itt az oxigén nem csak a szerves anyagok oxidációjához használódik fel, hanem még a fehérjebontásból származó ammónium nitráttá oxidálásához is.

Nem minden szerves szennyvízösszetevő bontható le mikrobiológiailag. Hogy ezen anyagokat is fel tudjuk mérni, a **kémiai oxigénigényt (KOI)** használjuk, szintén mg O₂/ml mértékegységben. A nagyjából teljes

oxidációt kálium-bikromáttal érik el. Értéke természetesen a BOI_5 értékeknél magasabb. Kommunális szennyvizeknél a $BOI_5:KOI$ arányok 1,5-2, ipari szennyvizeknél gyakran >2 értékűek.

További nagyon fontos szennyvízparaméterek az összes szerves széntartalom (Total Organic Carbon – TOC) és az abszorbeálható szervesen kötött halogének (AOX-érték) mennyisége.

A keletkező szennyvizek mennyisége **lakó-egyenértékben** adható meg. Ez átlagosan 60 g BOI_5 /nap értékű. Ez a mennyiség a helyi viszonyoktól függően 130-200 l szennyvízben található meg. A lakott területeken a lakó-egyenértékekből számított értékek általában meghaladják a tényleges települési lakószámot, mivel ezen értékeket a kommunális szennyvízzel keveredő ipari vizek megnövelik. Így pl. tehenészetekben 1000 l tej előállításakor átlagosan 100-200 lakó-egyenértékű szennyvíz keletkezik. Egy olyan vágóhídon, ahol napi 100 disznót dolgoznak fel, a szennyvíznek ez az értéke 3000 lakó-egyenérték. A papírgyártásnál 1 t kész papírra 200-2000 lakó-egyenértéknyi szennyvíz jut.

1.2. A szennyvíztisztítás mikrobiológia alapjai

A mikrobiális lebontási folyamatok asszimilációval és disszimilációval kapcsolódnak. Így a szennyvízben található szerves anyagok lebontása összefügg a mikrobiális sejtanyagok képzésével. A mikrobák mint a lebontás katalizátorai működnek, s három fő folyamattal vesznek ebben részt:

- légzés
- asszimiláció

- adszorpció.

Az első két fogalomról már korábban beszéltünk. Az **adszorpció** alatt a szennyezőanyag-részecskék és szerves vegyületek rá- és bekapcsolását értjük az extracelluláris poliszacharidokba (EPS) a szennyvízben található **baktériumokban**.

A szennyvíz tisztításában fajban gazdag mikroorganizmus-társulások egész sora vesz részt. Több mint 100 különböző baktériumtörzset tudtak kimutatni. A társulásokban tápanyag- és oxigéngradiensek alakulnak ki, amelyek mentén a különböző igényű fajok helyezkednek el. A baktériumokat aztán **protozoák** falják fel. Ezek sokféleségét mikroszkópizálással is látni a szennyvízpróbákban: flagelláták, amőbák, ciliáták láthatók. Ezek mellett nematódák is jelen vannak. A táplálkozási lánc révén a szennyvíztisztításnál mint szennyvíziszap jelentkező elhalt biomassza redukciója játszódik le. A baktériumok jelentik azonban mindig a szennyvízben élő mikroorganizmusok fő tömegét.

A biológiai szennyvíztisztítás alapja a folytonos tenyészeteken alapul. Olyan nyílt rendszerről van szó, amelyben a mikroorganizmusok létszáma, növekedése egyensúlyi állapotban van. (emlékezzünk a mikroorg-ok szaporodásánál, növekedésénél elmondottakra).

1.3. Egy kommunális szennyvíztisztító felépítése:

A kommunális szennyvizet a csatornarendszerek vezetik a szennyvíztisztítóhoz, amelyek annak mennyisége és természetesen a megépítésük ideje függvényében különböző felépítésűek. A jellegzetes lépcsői a szennyvíztisztításnak a 2. fólián láthatók.

Az **első lépcsőben** a mechanikai tisztítás történik meg, átgerblyezés és homokágyon történő leszűrés által. Ezek a durva szennyeződések és homokszemcséket fogják fel. A zsírokat és olajokat a könnyű fajsúlyuk miatt a szennyvíz felszínéről lehet leválasztani. A csatlakozó előtisztító tartályban leülepednek a nem oldható részecskék egy több órás szakaszban. Az itt leválasztott szennyvíziszapot anaerob módon megrothasztják és komposztálásra használják. Az oldott anyagokat és lebegő részecskéket tartalmazó, fennmaradt vizet a második lépcsőre vezetik át.

A **második lépcsőben** az aerob biológiai lebontási folyamatok játszanak döntő szerepet. Az erre szolgáló eszközök a különböző levegőztetési eljárások. A legelterjedtebb az **eleveniszapos eljárás**. E helyett vagy ennek kiegészítőjeként **csepegőtestes** módszert is alkalmaznak. Az ezekhez kapcsolódó, nem levegőztetett felfogókádakban ülepednek le az eleveniszapból származó mikroorganizmusok. Innen ennek egy részét újra visszavezetik oda, hogy a lebontás mértékét fokozzák. A másik, feleslegben maradó részét a központi iszapfeldolgozóba vezetik.

A **harmadik lépcső** a lebontáskor keletkező mineralizációból eredő termékek, mint az ammónium, nitrát és foszfát megsemmisítésére szolgál. A nitrogénvegyületek lebontása a **denitrifikáció** folyamatán alapulva jórészt egyre inkább a második fokozatba épül be. A **foszfátelimináció** kémiai kicsapás vagy bakteriális felhalmozás által történik.

A három fokozaton átment szennyvízből kikerülő szennyvíziszapot modern berendezéseknél **anaerob iszaprothasztókba** vezetik, ahol **biogáztermelés** folyik. Ezzel jelentősen lecsökkentik az iszap mennyiségét. A régebbi berendezések ehelyett csak az *iszapok víztelenítését és komposztálását* végzik el.

A messzemenőig megtisztított vizet ezek után folyókba vezetik vissza.

1.4. Aerob lebontási folyamatok a szennyvíztisztításkor

A lebontáskor a mikroorganizmusok légzéséhez óriási mennyiségű oxigénre van szükség. A víz azonban csak korlátozott mértékben képes oldani e gázt, 8,9 mg/l –t 20°C hőmérsékleten, normál nyomásnál. Ha tehát nem pótolják a levegőztetéssel a felhasználandó mennyiséget, nagyon hamar oxigénhiány állhat be. Ezért minden aerob rendszerű szennyvíztisztító leglényegesebb eleme a jól működő levegőztető berendezés.

Talajszanalás és szemét-komposztálás

2.1 Ipari hulladékok („Altlasten”) problematikája

A **talajszanalás** alatt olyan beavatkozások összességét értjük, amelyek ahhoz vezetnek, hogy a talaj annyira megtisztuljon, hogy a talajvíz, felszíni vizek, termőtalaj és levegő számára belőle veszély ne legyen eredeztethető. Még a legjobb és legköltségesebb módszerekkel sem érhető el az eredetinek megfelelő állapot visszaállítása. Ez is aláhúzza a megelőzés fontosságát: a megelőzés mindig olcsóbb, mint a szanalás.

Milyen szanalási célokat kell elérni? Az anyag- és koncentrációvonatkozású kritériumok mint az értékelés alapjai a szennyeződések leírására eléggé vitatottak. A felhasználás szempontjait figyelembe vevő értékelések egyre inkább előtérbe kerülnek. Így pl. egy jövődöbeli játszótérnek tisztábbnak kell lennie, mint egy parkolónak,

ipari telephelynek. Hátránya ezen módszereknek, hogy nehéz hosszú időtartamra érvényes felhasználási módot megadni.

2.2. Az ipari hulladékok szanálásának alapelvei

Alapvetően az **in-situ** és **ex-situ** módszereket választhatjuk szét (9.7 és 9.8 ábrák fóliára). Előbbinél helyben történik a talaj kezelése, utóbbinál kitermelik a talajt, és tisztítás céljára elszállítják. Itt különbséget tesznek az **on-site** és **off-site** módszerek között: on-site esetben közvetlenül a kitermelés helyszíne mellett folyik a kezelés, nem pedig erre a célra épített berendezésekben, mint az off-site esetben. Lehetséges még az is, hogy a szennyezett talajt teljesen elszigetelt, körülzárt tárolókban helyezik el véglegesen.

A szanálási módszerek következő alapelvekre épülnek:

- biológiai lebontás
- talajmosás (extrakció)
- talajlevegő-leszívás
- termikus kezelés (elégetés).

Legtöbbször ezek kombinációjáról van szó.

A **talajmosást** leginkább az ex-situ módszereknél használják fel. Mint a legolcsóbb szer a víz szolgál, gyakran tenzidek hozzáadásával. Az ekkor keletkező kontaminált vizet persze további kezelésnek kell alávetni. Ez lényegében egy szuszpenzió nagyon finom talajrészecskékkel, amelyet

olajleválasztókkal, centrifugálással vagy biológiai kezeléssel lehet pl. megtisztítani.

A **talajlevegő leszívást** illékony anyagoktól való mentesítésre használják, a talajvízzel nem telített zónából. Vákuumot képeznek, melynél az illékony szénhidrogének és klórozott-szénhidrogének gázfázisba mennek át. Ezeket aztán adszorpcióval vagy égetéssel vonják ki a gázközegeből.

A **termikus kezelésnél** elégetik a talajt. Eközben gázok mellett nagy mennyiségű hamu is keletkezik, melyet depóniákban kell tárolni. A hamuban felhalmozódnak ugyanis az alkáli- és alkáliföldfémek, valamint a nehézfémek. Ennek következtében a hamu kémiaailag nagyon aktív, pH-ja 11-13 értéket érhet el, és nehézfémtartalmais veszélyt rejt magában. A depóniákban ezért a talajvíztől teljesen elzártan kell tárolni, ami igen magas költséggel jár.

A **biológia lebontásnál** a szennyvíznél komplexebb közegről lévén szó, az ott kifejlesztett eljárásokat tovább kell finomítani. Nagyon jól bevált a talajok biológiai kármentesítése ásványi olajszennyeződések felszámolásánál, míg más anyagokra, mint a PAK vagy robbanóanyagok kevésbé. Egy erdészeti hasznosítást hozhatunk fel még példaként, az ún. **phytoremediációt**.

Bányameddők beerdősítéséhez olyan fűz- és nyárfajtákat használnak, melyek gyökerei mikorrhiza gombákkal szimbiózist képesek kialakítani. Az ezen mikrobatörzsekkel beoltott talajban egyrészt megnő a gyökerek nehézfém-tűrése, mert a magas koncentrációt a gombák magukba felvéve lecsökkentik, másrészt a szimbiózisból eredő nagyobb biomasszatermelés által a keletkező faanyag egységnyi tömegére eső nehézfémterhelése alacsonyabb, ami a további felhasználásban előnyös.

2.3 Komposztálás

A háztartási szemét anyagainak és a benne rejlő energiának az újrahasznosítására egy lehetőség a komposztálás. A komposztálás folyamatának előfeltétele a szemétszétválasztás, mivel az utólagos szétválasztás nagyon költséges. Ezen túlmenően nem tartalmazhat a komposztálásra kerülő szemét túl sok fémszennyeződést és biológiailag nem lebontható xenobiotikumokat, hogy káros anyagoktól mentes komposztot kapjunk végtermékként.

A komposztálás két fő fázisra választható szét:

- mineralizációra és
- humifikálódásra.

Az ábrán erősen sematizálva láthatjuk a folyamatot. A könnyen és közepesen bontható összetevőket a mikroorganizmusok asszimilálják és CO₂-dá és vízzé oxidálják, míg a nehezen lebontható lignin részleges lebontás után beépül a huminanyagokba. Ezekbe a lebontási folyamatokba természetesen befolynak a fehérjék, szénhidrátok és lipidek lebontási termékei, valamint a mikroorganizmusok másodlagos anyagcseretermékei is. A komposztálásban három fázis különíthető el:

- Kezdő szakasz: A bioszemétben található mikróbák gyorsan szaporodnak (kb. 10¹⁰ csíra/g szárazanyag). A könnyen lebontható összetevőket asszimilálják ill. lebontják, a szerves anyag mennyisége mintegy felére csökken. A mezofil (20-40°C) szakasz átmegy a termofil (40-75°C) fázisba. Ha ekkor a levegőztetés nem kielégítő, akkor erjedés következik be, ami bűzös gázok termeléséhez vezethet. Az erjedéskor keletkező

savak hátráltatják a további lebontást. Nagyon fontos tényező a prizmába rakott anyag kezdeti víztartalma, alsó határként 30-35%-ot, felső határként 60-65 tömeg%-ot adhatunk meg. A gombák a kisebb, a baktériumok a nagyobb nedvességet kedvelik.

- Az aerob mikrobiológiai folyamatok első szakaszában a mezofil baktériumok és sugárgombák, továbbá a valódi gombákhoz tartozó élesztőgombák együttesen bontják a zsírokat, fehérjéket és vízdoldható szénhidrátokat. A felmelegedéskor 52-55 °C felett már kiszorulnak a gombák, csakúgy mint a mezofil szakaszban még lassabban szaporodó sugárgombák. A prizma pH-értéke ebben a szakaszban a savas tartományba lép, 4,0-4,5 értéket vehet fel.
- Fő szakasz: A hőmérsékletemelkedés 40-75°C-ra termophil aerob *Bacillus* baktériumfajok felszaporodásához vezet. Ezek képesek extracelluláris enzimeikkel a fehérjéket, hemicellulózokat és cellulózt depolimerizálni. Ebben a szakaszban az összes csíraszám 10^8 - 10^{10} csíra/g szárazanyag értékre esik vissza. Sok Gram-negatív baktérium ebben a szakaszban pusztul el, s mivel ezek közé több potenciálisan humánpatogén faj tartozik, ekkor beszélhetünk a komposzt higiénizálásáról. A pH ebben a szakaszban felemelkedik, s 8,0-8,5 értéket érhet el. Ez a szakasz 3-5 napig tart.
- Záró vagy utólagos szakasz: Amint a középső szakaszban tapasztalható körülmények között szinte kizárólagosan szaporodó termofil baktériumok kimerítették tápanyagaikat, a lebontás leáll, a prizma húlni kezd. Ismét a mezophil

mikroorganizmusok kezdenek túlsúlyba kerülni, mindenek előtt sugárgombák és gombák. A sugárgombák közül főleg a *Streptomyces* fajok jelentősek, melyek spóratömege szabad szemmel is látható, lisztszerű bevonatként jelentkezik a felületeken. A gombák közül a *Penicillium*-, *Aspergillus*-, *Mucor*- és *Geotrichum* fajok a fontosabbak, mellettük még *Basidiomycetes*-ek lépnek fel. Ezek a szervezetek az extracelluláris enzimeik segítségével lebontják a lignocellulózt, a lebontáskor aromatikusan vegyületek képződnek, amelyek gyökökké alakulnak. Ezek a kiinduló anyagai a **humifikálódásnak**. A humifikálódás végtermékei a huminanyagok, főleg huminsavak. Ezek kolloidális anyagok, 5.000-6.000-es molekulatömeggel. Aromatikusan vegyületek vázából épülnek fel, amelyekre különféle aminosavak, aminocukrok, alifatikus szénhidrogének és fémionok kapcsolódnak belső és külső felületeken.

2.4. Komposztálási eljárások

Minden módszer célja a lebontáshoz szükséges oxigénmennyiség biztosítása szellőztetéssel. A félián látható időtartamok a hagyományos módszerek átlagos időszükségleteit ábrázolják. Gyakran az a kiemelt cél, hogy a folyamatokat felgyorsítsák, időt és helyet spóroljanak. Meg kell továbbá előzni a kellemetlen szaganyagok túlzott képződését is, ehhez zárt rendszereket alkalmaznak. Az elvezetett levegőt légszűrőkkel tisztítják.

A tényleges komposztálást **mechanikai előkészítő lépések** előzik meg. Ezekben a kiindulási anyagokat szétválogatják, leszitalják, felaprítják,

megnövelve ezzel a mikroorganizmusok támadási felületét. Egy további felaprózást végezhetnek a talajállatok. A víztartalom szerepére itt már utaltam. Így pl. szennyvíziszapot keverhetnek össze faforgáccsal, fűrészporral.

A **legegyszerűbb módszerek** a nyílt prizmák, háromszög vagy négyszög alakú nyílt tárolóikkal, melyek alul döngölt, tömörödött földre készülnek. A keverést, levegőztetést munkagépekkel végzik, ritkábban levegőztető csövekkel. Ezen tevékenységeknek különösen az elő- és főszakaszokban van nagy szerepe, hogy megelőzzék anaerob ill. kiszáradt gócok kialakulását.

Az **intenzív eljárásokat** ún. reaktorokban végzik. Itt megkülönböztetnek statikus és dinamikus módszereket. A **statikus módszereknél** zárt konténerekbe, dobozokba vagy csövekbe kerül az anyag, amelyeket lukacsos alsó lemezeiken át levegőztetnek. Egy **dinamikus eljárás** a forgódobos módszer. Itt hőszigetelt, forgatható, mintegy 3 m átmérőjű hordókban, 9-50 hosszúságban dolgozzák fel az anyagot. Folyamatosan áramlik a csövön keresztül az anyag, 1-2 nap időtartamra lerövidítve a komposztálás időigényét. Az innen kikerülő anyagnak tárolókba kerül, ahol a mozgásra érzékeny gombák a komposztálás utolsó fázisának lépéseit végzik el.

2.5. Anaerob szeméttértékesítés erjesztéssel

Ezen új módszer arra épül, hogy a durván felaprított biohulladékot vízben szuszpendálják (mintegy 30% száraz-hulladékanyag, 70% víz) úgy, hogy egy kétfázisú rendszer jön létre. Alkálikus anyagokat alkalmazhatnak előzetesen, a jobb lebontás érdekében. A szuszpenziót speciális biogázreaktorokba vezetik, amelyekben szakaszosan vagy félig

folyamatosan történik a gáztermelés, mintegy 15-20 napos időtartamban. A lebontási folyamatok a korábban tárgyalt metanogén táplálkozási láncnak megfelelően játszódnak le. Mind mezofil (32-38°C), mind termofil (50-55°C) módszerek ismertek. A végtermékek a biogáz (metán) és a nem lebontható biomassza. A módszer végén víztelenítést és aerob végső komposztálási szakaszt kell kapcsolni. Ez utóbbi csak 4-8 hétig tart, mert az erjesztés során a biomassza már jelentősen feltáródott.

Ismertek száraz fermentációk is, víz hozzáadása nélkül. Ezzel jelentősen csökkenthető a szennyvíz mennyisége. A módszer légmentesen zárt anyagbejuttatást és kivételt igényel. Időtartama a nedves módszerével azonos. Előnyei a gyorsasága, a zavaró szagok messzemenő kizárása és a biogáztermelés.

Biotechnológiai levegőtisztítás

Korábban már elmondtuk, hogy a levegő mint közeg nem alkalmas a biológiai környezetvédelmi módszerek alkalmazására. Szükség van valamilyen szilárd vagy folyékony közegre, amelyen a mikroorganizmusok megtelepedhetnek, s ahol tevékenységüket végezhetik. Mindezek alapján a levegőtisztítás alapelvei a szennyvíztisztításra vezethetőek vissza leginkább.

3.1 A környezetet károsító levegőszennyezések

Mind szerves, mind **szervetlen vegyületek** fellépnek a levegőben káros anyagokként. A szervetlen anyagokhoz tartoznak a korábban már említett, üvegházhatást okozó gázok, a CO₂, N₂O és a CH₄. Itt nem térünk

ki az ipari szénkitermelésből származó SO₂-szennyeződések kén- és vasoxidáló baktériumok általi eliminációjának részleteire.

Illékony **szerves vegyületek** az ipar, szolgáltatóipar és lakossági szektor széles körű szennyező forrásaiból kerülhetnek a levegőbe. Az iparban főleg szerves oldószerek keletkeznek. A szolgáltatóiparban, kommunális és mezőgazdasági szektorban főleg szaganyagok a komposztálásból, szennyvíztisztítókból, állattartásból és –feldolgozásból kerülnek ki.

Fenti anyagok mennyiségeit gyakran alábecsülik. Számítások szerint Európában kb. 1.650.000 tonna toluol, 1.360.000 t benzol és 50.000 t sztirol emisszió jelentkezik. Amennyiben az anyagkoncentrációk néhány g/m³ feletti értékűek, úgy hatékonyan eltávolíthatóak a levegőből olyan fizikai és kémiai folyamatokkal, mint a kondenzáció, adszorpció, valamint katalitikus és termikus oxidáció. Az 1 g/m³ alatti értékek esetében ezen módszerek nem hatékonyak. Ezekben az esetekben bio- és mechanikus szűrőket alkalmaznak. A **biofilterekben** egy szilárd mátrixon, pl. fakérgen, mikroorganizmusokat telepítenek meg. A tisztítandó levegő e felülete mentén áramoltatják, és egy vízfilm segítségével jut el közvetlenül a lebontást végző mikrobacejtekhez. **Biomosó-berendezésekben** a mikroorganizmusok szuszpenzióban találhatóak, melyben a káros anyagok feloldódnak.

3.2 A biotechnológiai levegőtisztítás alapelvei

Az előfeltétel itt is a szennyező anyagok mikrobiológiai lebonthatósága, valamint a vízoldhatóságuk. Mivel ezen anyagokat gyakran csak kometabolikusan képesek bontani a mikroorganizmusok, ezért adalék tápanyagok használata szükséges. Ilyenek lehetnek pl. a melasz a cukorgyárakból, vagy metán, ill. nitrátok.

Mivel az ilyen levegőszűrő berendezésekben a leghatékonyabb mikroorganizmus fajok, törzsek természetes szelekció révén bekövetkező kiválasztása nagyon lassú, ajánlott **a beoltás speciális törzsekkel**. Ilyen pl. a *Thiobacillus thioparus*, amivel H₂S-t, metándiolt, dimetiszulfidot és dimetildiszulfidot lehet lebontatni.

Fehérkorhasztó gombák növekedési szubsztrátumként szalmát igényelnek ahhoz, hogy lebontsák a sztirolokat, klórfenolokat és az α -pinint. Ezen a szalma felületén lerakódó anyagok primér felbontása a gombák extracelluláris enzimjeivel történik.

Nehezen oldódó anyagok esetében a vizes fázishoz az oldódást javító adalékanyagokat kevernek. Ezeknek biológiailag nem lebontható anyagoknak kell lenniük, mint pl. szilikonolaj.

3.3 Levegőtisztítási eljárások

Az ilyen eljárásoknak két követelményt kell kielégíteniük:

- az **adszorpciót**, azaz a gázfázisból folyadék vagyis oldott fázisba való átvitelt,
- és a **biológiai lebontást** ill. metabolizálását az anyagoknak.

A **biofilterek** nyitott, szilárd ágyú reaktorok, melyekben a vivőanyag lehet tehéntrágya, komposzt, nád vagy sás. A szerves hordozókhoz az állékonyság javítására műanyagokat kevernek (mint pl. nikecellt), ill. agyagot, vulkáni kőzetporokat. Szűrőként speciális üveghabok és műanyagok is szolgálhatnak. A szűrőanyagoknak következő követelményeknek kell megfelelniük:

- nagy hatékony felület a mikroorganizmusok anyagcseréje számára,
- Porozitás és homogenitás, hogy egyenletes és jó átáramlást biztosítsanak,
- Vízretartóképesség, hogy a kiszáradást megelőzzék,
- Nehéz biológiai lebonthatóság, a hosszú élettartamért.

A **biomosókban** a kimosás és adszorpció az oszlopszerű berendezés felső részében folyik. A beáramoltatott szennyezett levegő ellenében szétporlasztott oldatot spriccelnek, ami az adszorpciós szilárd zónában veszi fel az anyagokat. A kiszűrt anyagokat aztán főleg a berendezés alsó részében bontják el a mikroorganizmusok, ami egy eleveniszapos szennyvíztisztónak felel meg. A lebontáskor a mosóelegy regenerálódik, s a lebontó mikroorganizmusokkal együtt újra kispriccelik.

Az előző módszerek közötti átmenet a **csepegtető eljárásoké**, amelyekben a mikroorganizmusok helyhez kötötten egy hordozóanyagon növekednek, mialatt a vizes fázis a benne oldott káros anyagokkal mozgásban marad.

Különleges problémát jelentenek az **utcai csatornák levegője**, melyben CO és NO_x-ek találhatóak. A CO-t baktériumok kevert tenyésztésével teljesen el lehet oxidálni CO₂-dá. A NO_x-ek valószínűleg olyan redukáló baktériumokkal kezelhetők, amelyek a denitrifikációban is részt vesznek.

Az eddigiekben ismerttetett módszerek megismerésekor nem szabad elterelni a figyelmet a megelőzésről, ami a káros anyagok keletkezésének minimalizálását, az emissziók csökkentését jelenti.

Biogázelőállítás

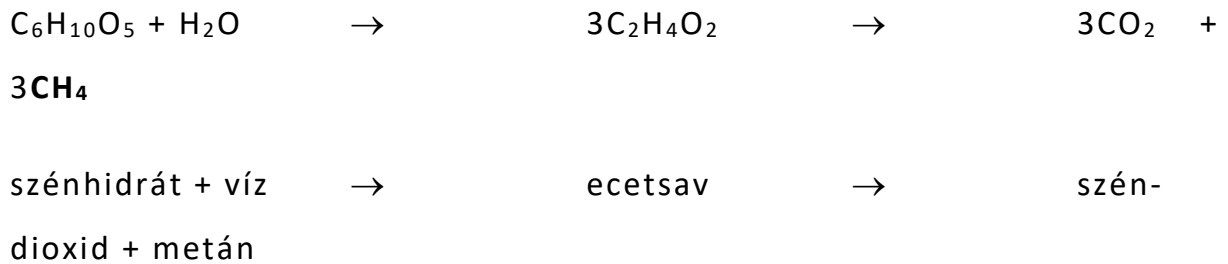
Az előzőekben több példát említettünk nagy szervesanyagtartalmú, mezőgazdasági, ipari ill. települési hulladékok környezetvédelmi szempontból történő ártalmatlanításának technikáiról. Az egyszerű ártalmatlanításnál fejlettebb módszerek a hulladék hasznosítását is szem előtt tartják, ennek egyik útja a biogáz előállítás.

A biogázelőállítás alapvetően eltér a komposztálástól abban, hogy anaerob, azaz oxigénmentes körülmények között zajlik a mikroorganizmusok lebontó tevékenysége. Hőmérsékletigényük szerint részt vehetnek benne mezofil (30-37,5°C) vagy termofil (49-50°C) mikrobák, ám míg utóbbiak endoterm folyamatokat indítanak be, azaz tevékenységük megindításához a lebomló anyagtömeg melegítésére van szükség, addig a mezofilek exoterm, azaz hőtermelő folyamatai külső energiabefektetés nélkül is lejátszódnak, azaz gazdaságilag sokkal előnyösebbek számunkra.

Az anaerob lebontás nagyobb nedvességtartalmú közegben megy végbe, mint az aerob, mégpedig két lépésben, két baktériumcsoport közreműködésével. Első lépésben a komplex szervesanyagokat (szénhidrátokat, fehérjéket) egyszerű szerves savakra lebontó mikroszervezetek fejtik ki hatásukat, a második lépésben pedig egy másik baktériumcsoport, a metánképző ősbaktériumok bontják ezeket az anyagokat szén-dioxiddá, metánná és egyéb gázokká. Egyszerű kémiai képlettel kifejezve:

baktérium I.

baktérium II.



Bár a képlet szerint ugyanannyi szén-dioxid keletkezik, mint metángáz, a gyakorlatban a felszabaduló metán részaránya a nagyobb, mert a szén-dioxidot a reakcióvíz oldatban tartja, leköti. Városi szemét lebontásakor ez az arány megközelíti az 50-50 %-ot, állati trágya esetében azonban 35-65 % , a szennyvíziszap anaerob lebontása során pedig 30-70 % .A lebomló anyagok jellege mellett a hulladék nedvességtartalmának is lényeges része van a felszabaduló gáz metánhányadának alakulásában.

A biogáz e két fő komponensének elkülönítése, illetve a metántartalom növelése szempontjából is kedvezően felhasználható a szén-dioxid vízben vagy vizes oldatban való lényegesen jobb oldódása, lekötődése. A biogáz fűtőértéke általában 20-26 MJ/m³. A szén-dioxid lekötődésével 98 %-os metántartalomra is tisztítható a biogáz, amely így megfelel a földgáz minőségének. Ebben az esetben a biogáztermelő egység be is kapcsolható a földgázhálózatba.

Az anaerob lebomlás optimális pH-tartománya 7,0- 7,2. A folyamat rendszerint 15-20 nap alatt zajlik le, amely alatt 90 %-os lebomlás megy végbe. Ezután a folyamat nagyon lelassul, a 40. nap után is csak 95 %-os lebomlás érhető el. A lebomlás mértékére jelentős hatással van a hulladékanyagban lévő szén, nitrogén és foszfor aránya (ugyanúgy , mint a komposztálás során).

A hulladékanyagtól és a folyamat körülményeitől függően, a biogáz tartalmazhat még 0,6-3 % nitrogéngázt, 1-6 % hidrogéngázt, 0,1 % szén-monoxidot és 0,2 % hidrogén-szulfidot is. A hasznosítást ezek rendszerint nem zavarják.

Szénhidrogéntartalmú veszélyes hulladékok mikrobás ártalmatlanítása

A világ energiatermelésében és vegyiparában kiemelt szerepet játszó szénhidrogének hulladéka a környezetet súlyosan károsítja. Az alkánok nagymértékben indifferens vegyületek ugyan, tiszta állapotban jelenlétükkel "csak" közvetve károsítják a környezetet, pl.oxigémől elzárják az élő rendszereket, anyagtranszformációs zavarokat okoznak, stb., hulladékaik azonban a közvetlenül káros vegyületek tucatjait is tartalmazzák. A nyers kőolaj pl. a telített szénhidrogénekén kívül tartalmaz aromás, sőt poliaromás vegyületeket, poláros, N-, S-, O-tartalmú szerves vegyületeket és számos toxikus szerves vegyületet is, következésképpen direkt mérgező hatása mellett mutagén, karcinogén és növekedésgátló is. A kőolaj kitermelése és szállítása bizonyos szintű környezetszennyezéssel alapvetően együtt jár, váratlan műszaki hiba, háborús esemény következtében azonban ezen anyag környezetbe kerülése olykor katasztrófaméretű szennyeződéseket okoz.

A szénhidrogén hulladékok fizikai és kémiai úton történő lebomlása a természetben igen lassú folyamat. Egyes mikroorganizmusok azonban a szénhidrogéneknek a Földön történő megjelenésével egyidőben képessé váltak ezen szerves vegyületek átalakítására, illetve szén- és energiaforrásként való felhasználására. A fosszilis szén e formájának a geológiai korokban folyó felhalmozódásával az óceánok és a szárazföldek egyaránt ki voltak téve egy bizonyos mértékű kőolajszenyeződésnek,

szinten tartva, sőt fejlesztve ezzel a lebontó mikroorganizmusok populációit. Az utóbbi évtizedekben a környezetszennyeződésben szinte új korszakot jelentő olajömlések (évente 10- 20 millió tonna, az összes szállított mennyiségnek mintegy 0,5 %-a hulladékként a környezetbe kerül) hatására ezen mikrobák száma megnőtt.

A szénhidrogénbontó mikroorganizmusok környezetvédelmi célú oltóanyagként való alkalmazásának előzményeként a természetből izolálni kell őket, majd az egyes törzsek anyagcseréjének, kémiai, biológiai és ökológiai igényeinek megismerése után kerülhet sor azok technológiai szintű felszaporítására, illetve élő biomasszájuk termékként történő felhasználására.

A mikroorganizmusok számottevő mértékben csak a folyadékfázisban diszpergált szénhidrogén molekulákat képesek átalakítani) illetve felhasználni. Laboratóriumi kísérletekből ismert tény, hogy vizes olajban, szénhidrogéneken szaporítva egyes élesztőgomba fajok, pl. a *Candida tropicalis* a sejt felszínének mannán-zsír-sav komplexei segítségével közvetlenül is, mások, pl. a *Yarrowia lipolytica* a sejtjeik által termelt extracelluláris emulgeáló vegyületek segítségével stabilizálják az olaj/víz emulziót. Ugyanezt a hatást fejtik ki egyes baktériumok (*Arthrobacter*, *Brevibacterium*, *Corynebacterium*, *Pseudomonas* fajok) által termelt és az olajfázisban oldódó glükolipidek is. A kolloid méretű szénhidrogén részecskék kémiaiilag változatlan állapotban jutnak be a sejtbe, ahol azokat mint zárványtesteket egy intracitoplazmás eredetű membránrendszer veszi körül. Az alkánok enzimátikus átalakításának első lépése három különböző mechanizmus valamelyike szerint megy végbe. Leggyakoribb esetben a terminális metilcsoportot vegyes funkciójú oxidáz támadja, primer alkoholt hozva létre, mely viszont aldehiddé és zsírsavvá oxidálódik tovább. A második

út közvetlen dehidrogénezést jelent és alként eredményez, ami alkohollá, aldehiddé és végül zsírsavvá alakítható tovább. A harmadik mechanizmus alkil-hiperoxid képződésével jár, amely azután közvetlenül zsírsavvá alakítható, megkerülve ezzel az alkohol- és aldehidlépéseket. A keletkezett zsírsav már közvetlenül a béta-oxidáció útjához kapcsolódhat. Az alkán-átalakítás felsorolt típusos mechanizmusai mellett gyakran megvalósul azok néhány alosaja is, pl. mindkét terminális metilcsoport egyidejű oxidációja, vagy a lánc (és az aliciklusos molekulák) szubterminális támadása szekunder alkohol létrejöttével, stb. Emellett a kőolajban jelen lévő aromás, poláros és egyéb típusú vegyületek átalakítása számos egyéb mechanizmus szerint történik.

A szénhidrogének oxidációja a sejt anyagcseréjében indukálható folyamat, az ehhez szükséges enzimek szintézisét az alkánok anélkül is kiválthatják, hogy maguk oxidációnak alá lennének vetve. Ismeretes továbbá (*Pseudomonas*-törzseknél igazolták), hogy az illető enzimek kódolásáért felelős gének többsége átvihető plazmidon helyezkedik el, géntechnikával fokozatosan növelhető tehát az egyes törzsek szénhidrogénbontó képessége.

Természetes körülmények között -és különösen talajokban -a szénhidrogének bontásának körülményei lényegesen eltérnek a laboratórium-beliekétől. A talajok emulgeáló kapacitása több fizikai, kémiai, kolloidikai és biotikus tényezőtől függ, és általában nagyobb, mint a laboratóriumi, szintetikus rendszereké. Általános tapasztalat, hogy mind laboratóriumi, mind természetes körülmények között két vagy több olajbontó mikroorganizmus törzs együtt magasabb összhatást fejt ki, mint egyenként alkalmazva.

A szénhidrogén-tartalmú hulladékokkal (elfolyt kőolajjal, fáradt kenőolajjal, stb.) szennyezett talajok megtisztítására, művelt területek

rekultivációjára világszerte a legelterjedtebb megoldások élő mikroorganizmusokkal történő oltáson alapulnak. A technológiailag is alkalmazható szénhidrogénbontó mikroorganizmusok a legkülönbözőbb rokonsági körökben megtalálhatók: a Gram-negatív *Pseudomonas putida*, *Flavobacterium* fajok, a Gram-pozitív *Bacillus megatherium* és *B. subtilis*, *Nocardia* és *Streptomyces* fajok, az élesztőgomba *Yarrowia lipolytica*, stb. Az említett technológiák viszonylag olcsóak, lényegében a természetben is lezajló folyamatok hatékonyságának növelésén és összehangolásán alapulnak. Mikrobiológiai szempontból lényeges feltétele a folyamat indításának a megfelelő szilárd vivőanyagra (alginit, tőzeg, stb.) felvitt, grammonként 10^9 - 10^{11} élő mikrobaset tartalmazó oltóanyagának a megtisztítandó talajba történő egyenletes bekeverése, továbbá a mikrobapopulációk kezdeti tápanyagellátásához, megfelelő kondícióban tartásához valamely könnyebben bontható szerves anyag (lignocellulóz hulladék, kész komposzt stb.) adagolása. Mivel a bontó mikroorganizmusok aerob szervezetek, a keveréket több alkalommal átkeverik. A teljes folyamat mérsékelt övön egy évnél hosszabb ideig tart.

Magyarországon jelenleg elsősorban a kőolajvezetékek meghibásodásakor, valamint a szállítás közben történő kényszerű elfolyás alkalmával kerül kőolaj a természetbe. Emellett számottevő környezetvédelmi feladatot jelent az élővizekből mechanikai úton eltávolított, és tárolóhelyeken elhelyezett olajnak, továbbá az autósók olajtartalmú szennyvíziszapjának ártalmatlanítása, valamint a hadi objektumok talajának olajszennyeződéstől való utólagos megtisztítása is. Valamennyi felsorolt esetben legolcsóbb és globális környezetvédelmi szempontból is a legcélszerűbb az elbontás, illetve a rekultiváció elvégzése szénhidrogénbontó mikroszervezetek helyi alkalmazásával, számos hazai és külföldi szabadalom alapján.

Mikrobiológiai eljárásokat alkalmaznak az elsődlegesen már kiaknázott és vízbeáramlások miatt elhagyott olajlelőhelyek maradék készleteinek kitermelésére is. Ezen technológiák lényege, hogy a vizet tartalmazó olajrezervoárakba megfelelő tápoldattal szénhidrogének bontására képes baktériumok szuszpenzióját injektálják, majd a kutakat néhány hónapra lezárják. Ez idő alatt a baktériumok a lezárt térben elszaporodnak, tevékenységük eredményeként ott biogázok és más anyagcseretermékek halmozódnak fel. A kutak ismételt megnyitása után a biogázok nyomásának hatására az olaj egy része feltör. A folyamat eredményessége függ számos természetes adottságtól, pl. a közeg részecske-eloszlásától, az olaj minőségétől és nem utolsósorban az alkalmazott baktériumoknak (*Bacillus subtilis*, *Pseudomonas putida*, *Clostridium acetobutylicum* stb.) az adott helyen való szaporodó képességétől.

Bányavizek mikrobiológiai vonatkozásai

A szénbányák és ércbányák savas bányavizeinek pH-értéke gyakran 4 alatt van, és nagy mennyiségű oldott szulfát- és vasiont tartalmaznak. A bányavizek cink-, réz-, alumínium-, néha arzén- és kadmiumion koncentrációja az élővilágra nézve letális értékig emelkedhet. A bányából származó, mikrobiális tevékenységből eredő szennyeződések a felszíni vizekbe kerülve sokszor km-es folyószakaszokon a halak pusztulásához vezetnek; vízi növények, állatok, a víz tisztaságát biztosító mikrobaközösségek pusztulását, némely más élőlény-csoportok elszaporodását okozhatják. A vízi ökoszisztémákban bekövetkező negatív változások az általa befolyásolt teresztris ökoszisztémákra is kihatnak.

A savas bányavizek jelentős hatást gyakorolnak az adott biotópban élő mikroszervezetekre. Ezen hatás alapján a kénbányászat is környezetszennyezővé válhat, aminek során például a savas bányavíz akadályozhatja a szennyvíztisztítást végző mikrobaszervezetek, különösen a protozoa- és algaközösségek lebontó tevékenységét. Példa erre a jelenségre a Rudabánya, Recsk és Gyöngyösoroszi térségében keletkezett bányavizek és a körzetükben tárolt meddőhányókból elcsurgó vizek károsító hatása. Az ernyített folyamat (a bányavíz savassá válása a mikrobiális $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{SO}_4$ -képzés következtében) elsősorban a *Thiobacillus ferrooxidans* nevű kemolitotróf baktérium tevékenységének eredménye. A keletkezett környezeti kár nagymértékben fokozódik azáltal, hogy az alacsony pH-érték következtében különböző lekötött nehézfémionok is nagyságrendekkel nagyobb mennyiségben mobilizálódnak.

A *T. ferrooxidans* környezetvédelmi szerepét értékelve e baktérium pozitív szerepéről is tudnunk kell. A kén biológiai körfolyamatában ugyanis szabályozólag vesz részt. Mint ismeretes, a talajban képződő szulfátionok némely esetben előnyösen befolyásolják a talaj kémhatását, másrészt a növények számára hozzáférhető kénvegyületként jelennek meg.

Nehézfém-ionok hatása a talaj-mikroorganizmusokra

Különböző ipari, mezőgazdasági és települési hulladékokkal az utóbbi években egyre nagyobb mennyiségű, az élőlényekre, és azok között is elsősorban a prokarióta mikroorganizmusokra toxikus nehézfém-ion kerül a talajba. Mivel a talaj anyagforgalmának jelentős hányada mikroba-tevékenység eredménye, a toxikus nehézfém-ionok a talaj legalapvetőbb funkcióit veszélyeztetik.

Igen súlyos szennyezések esetén már szemmel is látható a károsodás, amikor a talajban vagy annak felületén az egyébként könnyen lebomló szerves anyagok, például a szerves trágyák átalakulás nélkül felhalmozódnak. Hazai viszonylatban a károsodás általában még kevésbé látható, mikrobiológiai módszerekkel (a talajlégzés vagy a nitrogéntranszformáció lépéseinek mennyiségi vizsgálata, talajenzimek aktivitásának mérése, stb.) azonban már egyértelműen kimutatható.

A talaj-mikroorganizmusok szaporodásának legkisebb gátló koncentrációi in vitro, laboratóriumi tenyészetben a következők (mg kg^{-1}): Cd^{2+} : 5, Pb^{2+} : 120, Hg^{2+} : 2, Zn^{2+} : 10, Cu^{2+} : 100, Cr_{6+} : 150, As_{3+} : 5, Ni_{2+} : 120. A hazai talajok –és különösen a mezőgazdasági művelésűek– nehézfém-ion tartalmának az erre vonatkozó szabvány szerint ezen értékek alatt kell lennie, gyakran azonban, különösen bányászati és ipari eredetű szennyezés eredményeképpen a fenti szintek többszöröse is észlelhető. Az érzékenység baktériumcsoportonként jelentősen eltérő: a Gram-negatívok között a nitrogén-kötők a legérzékenyebbek, más Gram-negatívok, pl. a *Pseudomonas*-fajok rezisztensebbek; a Gram-pozitívok közül az erjesztők igen érzékenyek, míg valamennyi prokarióta szervezet közül általánosságban az aktinomiceták a legrezisztensebbek a nehézfém-ionok jelenlétével szemben.

A szennyezett talajokban –a szennyezés letális határáig– a rezisztens fajok illetve törzsek relatív túlsúlyba kerülnek, átvéve bizonyos mértékig a már kipusztult populációk ökológiai funkcióit. A nehézfém-ionokkal szembeni rezisztencia kialakulása a következő mechanizmusokkal történhet:

1. Energiafelhasználó efflux pumpával a sejt a külső magas értékek ellenére alacsonyan tartja az intracelluláris szintet.

2. Oxidálja kevésbé toxikus vegyületté.
3. Hozzáköti valamely intracelluláris polimer vegyülethez, amely ilyenformán "csapdaként" szolgál.
4. A sejt a külső felületéhez adszorbeálja.
5. A sejt aktív felületén csapadékképződéssel köti.
6. Metilezi valamilyen illékony vegyületté.

Utóbbi folyamatok némelyike részét képezi az illető fémek biogeokémiai körfolyamatának.

Mikroorganizmusok mint környezetvédelmi teszt-szervezetek

Az ipar, a mezőgazdaság és a települések által létrehozott hulladékok a környezetre többé-kevésbé károsak. Veszélyességük mértékét az utóbbi években különböző fizikai, kémiai és biológiai módszerekkel minősítik. A fizikai és kémiai paraméterek igen pontosak, korszerűbb mérőműszerekkel megállapíthatók, és egy-egy irányban nagyon megbízhatóak. A kevésbé pontos biológiai módszerek iránti igény mindemellett az utóbbi években megnövekedett. Ennek oka egyrészt abban áll, hogy a biológiai módszerek "műszerei" a teszt-szervezetek a számos egyidejűleg és együtt ható vegyület, illetve faktor hatását integráltan mutatják, másrészt utóbbiak érzékenyek olyan ágensekre is, melyek jelenlétét a célzott kémiai vagy fizikai műszeres vizsgálat nem mutatja ki.

A biológiai módszerek, melyeket az ember egészségére is káros toxikus anyagok jelenlétének és hatásának megállapítására elsősorban a higiénés gyakorlatban alkalmaznak, számos tesztorganizmet egyidejű felhasználásán alapulnak. Gerinces és gerinctelen állatok, virágos és virágtalan növények mellett talajban és vizekben élő mikroorganizmusok is szerepelnek a szabványosított eljárásokban. Az egyik legelterjedtebb módszer azon alapul, hogy egy a vizekben viszonylag gyakori, nitrogénkövető baktériumfaj, az *Azomonas agilis* különösen érzékeny a toxikus vegyületekre, és laboratóriumi tenyésztése alkalmas ezen vegyületek hatásának jelzésére. A vizsgálandó anyag ökotoxikus hatását a tesztbaktérium 28°C hőmérsékleten, meghatározott inkubációs idő alatti szaporodása, illetve a szaporodás gátlása alapján értékelik (34. ábra). A szaporodást vörös szín megjelenése kíséri, mely a táptalajhoz adott trifenil-tetrazolium-kloridnak dehidrogenáz-enzim hatására redukálódott formájától, a trifenil-formazántól származik.

Talajmikroorganizmusok környezetvédelmi jelentősége

A talaj-mikroorganizmusok mezőgazdasági jelentősége mellett napjainkban előtérbe kerültek a környezetvédelmi szempontok is. Az egyre erőteljesebb műtrágyázás káros hatását már felismertük, és olyan környezetkímélő földművelési technológiák kidolgozása a cél, melyek biztosítják a természetes ökoszisztéma fennmaradását.

Növényvédőszeres mikrobiális átalakítása

A talajmikroorganizmus-közösségek bontják le a növényvédőszer-maradványokat, illetve egyéb xenobiotikumokat is. A növényvédő szerek (peszticidek) mikrobiológiai transzformációjának négy fő útja van:

1. A peszticid szubsztrátként szolgál a mikroorganizmus szaporodásához és energia-utánpótlásához.
2. A mikroba a peszticidet átalakítja, de szaporodásához abból energiát nem merít (kometabolizmus).
3. A teljes peszticidmolekula vagy annak közti terméke a mikroba hatására valamilyen természetes más vegyülettel konjugál.
4. A peszticid beépül és felhalmozódik a szervezetben.

Az, hogy a peszticidmolekulák megváltoztatásának előbb említett lehetőségei közül adott körülmények között melyik megy végbe, függ a vegyület típusától és attól, hogy milyen faj vagy változat melyik törzse végzi az átalakítást. A peszticidekre jellemző, hogy természetidegen molekulák, ezért a transzformációjukban résztvevő mikrobiális enzimek jelenlétük hatására indukálódnak. Peszticidet degradáló mikrobák nagy mennyiségben vannak jelen a természetben, a szerek teljes eliminálását azonban csak azok a mikroorganizmusok végezhetik el, amelyek a kérdéses anyagot egyedüli szén- és energiaforrásként képesek hasznosítani. Ílymódon a peszticidek töredékekre bontva bekerülnek az oxidatív ciklusokba, és mind energetikai kihasználásuk, mind pedig teljes lebontásuk megvalósul.

Egy peszticidmolekula bontásához nem ritkán két különböző mikroba, esetleg kevert tenyészetek szükségesek. Ezért a peszticidek átalakítását a folyamatban résztvevő enzimreakciók, nem pedig a bontást végző mikrobák szerint csoportosíthatjuk az alábbi típusokra: hidroxilezés, dealkilezés, éterkötés hasítása, aromás gyűrű oxidációja, epoxidáció, szulfoxidáció, hidrolízis, dehalogénezés és szintetikus reakciók. A reakciótípusok nagy száma miatt néhány kiragadott példával szemléltetjük csak a mikrobiális peszticidbontást.

A peszticidmolekula gyakori elsődleges átalakításai közé tartozik egy hidroxilcsoport bevitele, melynek révén könnyebben metabolizálható, még polárosabb vegyület jön létre. A hidroxilezés mind alifás, mind aromás vegyületeknél észlelhető és gyakorta ez csak bevezető lépése egy sokkal bonyolultabb reakciónak. A *Fusarium oxysporum* például a p-klór-anilint (számos herbicid intermedierét), p-klór-fenil-hidroxil-aminná hidroxilezi; az átalakulás a gomba tápközegében az elméletileg lehetséges szint 76%-át is elérheti. A p-klór-fenil-hidroxil-amin utólag p-klór-nitrozo-benzollá, majd p-klór-nitro-benzollá metabolizálódik.

Évtizedek óta igen fontos gyakorlati kérdés a DDT mikrobiológiai degradációja is. Környezetünkben ez a peszticid az egyik legellenállóbb, legnehezebben bomló anyag. A *Hydrogenomonasok* képesek a DDT - analógok gyűrűit hasítani, a teljes degradációban azonban más mikrobák is részt vesznek. A DDT átalakításának másik lehetősége a dehalogénezés, amelyre az *Enterobacter aerogenes* képes.

A peszticideket bontó mikrobák más alkalmazása is elterjedőben van. Szántóföldi kísérletek bizonyítják, hogy a *Rhodococcusok* tiokarbamáttal szennyezett területek peszticid-mentesítését is biztosíthatják. Ugyanakkor, a természetes rendszerekben (talajban) jelenlévő törzsek peszticidbontó aktivitásának a visszaszorításával lehetőség van az

alkalmazott herbicid mennyiségének a csökkentésére is; az ilyen anyagokat extendereknek nevezzük. Természetesen a módszer széleskörű elterjesztéséhez további vizsgálatok szükségesek, de a kezdeti próbálkozások eredményei optimizmusra adnak okot.

A növények társulása gyökérszimbionta gombákkal (mykorrhiza)

Szimbionta gombákkal számtalan növényfaj gyökerei társulnak. Frank (1885), aki a mérsékelt övi erdők fafajain elsőként tanulmányozta ezt az együttélést, és "gombagyökérnek", mykorrhizának nevezte el. Feltételezte, hogy a gombák hifafonalai a gyökér funkcióját töltik be. Azóta a mykorrhiza fogalmát kiszélesítették, és ma így jelölünk minden, a növények föld alatti szervei és gombák között létrejött szimbionta kapcsolatot.

Annak ellenére, hogy növényfajainknak közel 90%-a mykorrhiza kapcsolat kialakítására képes, ez a társulás korántsem olyan ismert, mint például a pillangósvirágú növények gyökere és *Rhizobiumok* között létrejövő szimbiotikus kapcsolat. Ennek magyarázata lehet, hogy a gyökérgümő szemmel látható, ugyanakkor a mykorrhiza szimbiózis gyakran nem okoz szabad szemmel látható változást, tanulmányozása csak a gyökerek szövettani festése után lehetséges. A mikotrófia, azaz a növényi gyökér szimbionta gombákkal történő együttélése hosszú evolúció eredménye. A gazdanövény fennmaradása a zavartalan tápanyag- és vízellátástól függ, amit a gyökérszimbionta gombapartner kedvezőtlen ökológiai feltételek között képes elősegíteni. Ugyanakkor a gomba, mint heterotróf szervezet, szerves tápanyagforráshoz juthat a növény gyökérzete révén.

A szimbiózis kialakulása nagymértékben függ a talaj sajátosságaitól. Gazdag tápanyagtőkés talajokban a mykorrhiza-szimbiózisra a növény

kevésbé van ráutalva, mint tápszegény talajokban. A valódi szimbiózisban részt vevő gombák azonban nem tudnak megélni a növénytől függetlenül.

A természetben a mikotrófiás szimbiózis különböző típusaival találkozhatunk, melyek közül mezőgazdasági jelentőségük miatt kiemelkedik az arbuszkuláris típusú endomykorrhiza.

1. Arbuszkuláris típusú mykorrhizák (AM), endomykorrhizák.

Az 1987-ig felfedezett 120 AM-faj mind egy családba, az *Endogonaceae* tartozik; e család hét nemzetsége közül hatban vannak olyan fajok, amelyek képesek erre a mikotrófiás szimbiózisra: *Acaulospora*, *Gigaspora*, *Glaziella*, *Glomus*, *Modicella* és *Sclerocystis*.

A korábbi elnevezés szerint az AM szimbiózisnak a vezikuláris-arbuszkuláris mykorrhiza nevet adták, mert a gombahifák a gyökérszövet endodermiszébe behatolva sajátos képleteket, arbuszkulumokat és vezikulumokat hoznak létre. Az arbuszkulumok, melyek a hifa többszörös elágazódásából jönnek létre, leginkább a tüdőhólyagokra hasonlítanak. Annak ellenére, hogy a növényi sejt belsejében keletkeznek, sohasem hatolnak be a citoplazmába. A sejtbe benyomuló hifaelágazás kesztyűujj-szerűen veszi körbe a citoplazma membránját, melynek a gomba és növény közötti tápanyagforgalom lebonyolításában van szerepe. Az arbuszkulumok 4-15 nap múlva visszafejlődnek, ekkor sötét masszaként mutatkoznak az eredeti behatolási pont közelében.

A vezikulumok hólyagszerű képletek és raktározó szerepet töltenek be. Mivel a vezikulumok jelenléte nem minden AM endomykorrhiza kapcsolatban mutatható ki, szükséges volt a korábbi elnevezés (vezikuláris- arbuszkuláris) arbuszkuláris mykorrhizára (AM) történő módosítására.

Az AM gombák hifái nemcsak a gyökérben fejlődnek, hanem a gyökérközeli talajt is behálózzák. Ezeknek a gyökéren kívül elhelyezkedő ún. externális hifáknak köszönhetően a talaj olyan régiójának a "feltárása" is megtörténik, mely a gyökerek által hozzáférhetetlen. Az externális hifáknak hajszálgökökernél kisebb átmérője (~8 µm) többféle előnnyel szolgál. Biztosítják a talaj olyan kis aggregátumaiba történő bejutást, mely hajszálgökökerekkel nem érhető el, valamint a kisebb méret relatíve nagyobb felületet biztosít, megnövelve a tápelemek és víz felvételére szolgáló abszorbeáló felület nagyságát.

Számos tapasztalati tény utal arra, hogy a mykorrhiza-szimbiózis a gazdanövény tápanyag- és vízháztartásának befolyásolásán kívül növeli a növény betegségek elleni rezisztenciáját is. Ennek a jelenségnek a pontos magyarázata még nem ismert, de feltételezhető, hogy a mykorrhiza növényre gyakorolt közvetlen hatása mellett a közvetett, a rizoszférapopulációt befolyásoló tevékenységével éri ezt el.

2. Ektotróf vagy ektomykorrhizák.

Ez a társulási forma főleg a mérsékelt égövi fák gyökerein figyelhető meg. A csoport elnevezése onnan adódik, hogy a gombafonalak a gyökér epidermiszének legkülső rétegének sejtjei közé hatolnak be, így ektotróf mykorrhiza másodlagosan megvastagodott gyökereken nem tud kifejlődni. Az ektotróf mykorrhizát hordozó fák legismertebb képviselője a fenyő (*Pinus*-fajok).

Az ektotróf mykorrhiza gombák többsége (*Boletus*, *Laccaria*, *Russula*, *Lactarius*) a Basidiomycetesbe, az *Agaricales* rendbe tartozó nagygomba. Az Ascomycetesbeli, *Tuberales* rendbe tartozóak közül legismertebb a

Tuber melanosporum, mely a *Quercus* és *Corylus* egyes fajainak gyökereivel társul.

További három mykorrhizatípust -az *Orchidaceae*-család mykorrhizáit, az *Ericales* rend mykorrhizáit, valamint az ektendomykorrhizát - tartanak még nyilván, de ezek részletes ismertetésétől eltekintünk, hiszen mezőgazdasági jelentőségük csekély.

A mykorrhiza szimbiózis környezetvédelmi vonatkozásai is ismertek.

Savasabb talajokban, illetve ahol a mezőgazdasági növények foszforellátása nem kielégítő, a foszforműtrágyázás adagjának csökkentését, illetve részleges kiváltását érhetjük el mykorrhizaoltással. A mykorrhizaoltás előnyösnek bizonyulhat számos kórokozó gomba, többek között *Phytophthora*-, *Pythium*-, *Rhizoctonia*- és *Fusarium*-fajok által előidézett növénybetegségek megelőzésében is. Segítségükkel lehetőség nyílik a kórokozók ellen alkalmazott fungicid-kezelések mérséklésére. Talajtani szempontból sajátos probléma a holt kőzetek, hányóföldek, valamint a toxikus nehézfémek, és nagy kéntartalommal jellemezhető ipar által roncsolt talajfelszínek talajmikrobiológiai rekolonizációja. Újabb vizsgálatok egyértelműen bebizonyították, hogy a mykorrhizaoltás előnyösen alkalmazható toxikus elemek lebontásának elősegítésére, valamint az ipar által tönkretett területek vegetációjának az újraélesztésében is.

Foszforoldó mikroorganizmusok

A mikroorganizmusok a foszfor körforgalmának alapvetően fontos aktivátorai. Azon kívül, hogy a foszfort szerves kötéseiből fölszabadítják, szaporodásuk során a szerves foszfort ismét immobilizálhatják. A

sejtek, illetve a gyökérzet számos foszforforma felvételére alkalmas, bár legnagyobb része HPO_4^{2-} és H_2PO_4^- formában adszorbeálódik.

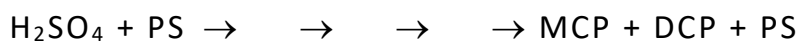
A talaj oldható foszforkészletének a kimerülése után több lehetőség van a növények által felvehető foszfor mennyiségének növelésére, oldhatatlan foszforvegyületek mozgósítására. Számos rizoszféra-mikroorganizmus képes oldhatatlan szerves foszforvegyületek oldhatóvá tételére, nem enzimatikus úton. Ezeknek az ún. "foszfobaktériumok"-nak a rendszertani hovatartozása igen tág, képviselőik megtalálhatók mind a gombák, mind pedig a baktériumok között. Leggyakoribbak a Gram-pozitív, spórás baktériumok, sztreptomiceszek, valamint gombák közül a *Penicillium*- és *Aspergillus*-fajok. Ezek a mikroorganizmusok különböző szerves savak képzésével, közülük többen 2-ketoglukonsav segítségével fejtik ki foszformobilizáló hatásukat. A szerves és szervesetlen savképzésen kívül egyes foszfobaktériumok komplex vegyületek, vagy H_2S gáz képzésével végzik a foszfor oldását. A foszfátoldó mikroorganizmusok a rizoszféra populációnak csak néhány százalékát adják, de jelentőségük kis mennyiségük ellenére is igen nagy.

Más mikrobák szerves foszforvegyületek, valamint szervesetlen piro- és metafoszfátok enzimatikus bontásával vesznek részt a foszfor mobilizálásában. Az enzimatikus bontásban a foszfatáz enzimek játszanak nagy szerepet, melyek C-O-P észterkötések hidrolízisét végzik. Az enzimek pH-optimuma alapján megkülönböztetünk savas és bázikus közegben működő foszfatázokat. (A bakteriális foszfatázok általában savas foszfatázok). Foszfatázok képzésére a növény gyökerein kívül elsődlegesen a gombák, az aktinomicéták és egyéb Gram-pozitív baktériumok képesek. Képződésüket a talaj foszfor- és szervesanyag-tartalma jelentősen befolyásolja.

Az ektomykorrhizák foszfáttermelése ismert, s valószínűleg az endomykorrhizák is képesek az enzim szintézisére, elősegítve a mykorrhizált növény foszfortartalmának gyarapodását.

A foszfátoldó baktériumok megismerése után egyre több próbálkozás történt ezen mikroorganizmusok oltóanyagként történő felhasználására. Indiában például foszobakterin néven *Bacillus megaterium var. phosphaticum* tenyészeteket használtak a talaj foszforvegyületeinek oldhatóvá tételére, a foszforműtrágyázás mértékének csökkentése céljából. A több-kevesebb sikerrel alkalmazott oltóanyag mellett *Bacillus polymyxa*, valamint *Pseudomonas striata* keverék tenyészetekkel is történtek hasonló kísérletek. Egy másik változatot Új-Zélandban próbáltak ki, ahol a foszfátoldó baktériumokkal (PS) együtt elemi ként is adagoltak a talajhoz.

A következő sematikus ábrán figyelhetjük meg ezt a jelenséget:



ahol MCP , DCP: mono- és dikalciumfoszfát

Növényi növekedést serkentő rizobaktériumok (plant-growth-promotion-rhizobacteria, PGPR)

A *Pseudomonas fluorescens-putida* csoportba tartozó nem növénykórokozó baktériumok oltóanyagként történő alkalmazásakor az oltás gyakran növekedés- és terméstudbpletet eredményez. A *Pseudomonas*ok növényre gyakorolt hatása itt közvetett módon érvényesül.

Ezek a baktériumok sziderofor vegyületeket termelnek, melyek a talaj hasznosítható vastartalmát komplexként megkötve, azt más mikrobák számára hozzáférhetetlenné teszik. A talajban élő, potenciális kórokozó mikrobák sem tudnak vas hiányában szaporodni, így a *Pseudomonas*okkal oltott növények erőteljesebbek, egészségesebbek lesznek.

Más talajmikroorganizmus is képes sziderofor anyag termelésére (sőt maga a növény gyökere is), de a *Pseudomonas*ok sziderofor anyagának komplexkötő képessége többszöröse ezekének. A *Pseudomonas*ok által megkötött vas a növény által felvehető formába kerül, további előnyt biztosítva az oltott növénynek. A sziderofor anyagon kívül különböző hormonok (auxin, gibberellin), és hormonszerű anyagok termelésével is fokozódik a baktériumok által előidézett kedvező hatás.

A növényi növekedést serkentő mikroorganizmusok jól használhatók az újratelepítési betegség kiküszöbölésére. Ez a betegség többek között a növények satnya fejlődésével, gyenge terméshozamával jár. Gyümölcsösökben, ahol az újratelepítés igen költséges, megoldást jelenthet a PGPR-törzsek oltóanyagként való alkalmazása.

Az élelmiszerek és élelmiszeripari nyersanyagok általános jellemzése

Az élet kémiai szempontból anyagcsere-folyamatok sorozatának tekinthető, amelynek feladata

- a) a szervezet sejtjeinek, szöveteinek felépítéséhez szükséges tápanyagok biztosítása,
- b) a szervezetet alkotó sejtek, szövetek működéséhez szükséges környezet kialakítása,
- c) energiaszolgáltatás az életfolyamatokhoz, a munkavégzéshez.

Ez egyben azt is jelenti, hogy az élelmiszerek többsége rendezett módon működő élő anyag vagy annak valamely része. Nyers és feldolgozott élelmiszereink túlnyomó többsége a mikroorganizmusok részére is kiváló tápanyag. Kedvező körülmények között bennük vagy rajtuk a mikroorganizmusok elszaporodhatnak, és életműködésük során az élelmiszer összetevő anyagait lebontják, átalakítják. Ez az élelmiszer minőségének csökkenését, gyakran teljes megromlását okozza, fogyasztásra alkalmatlanná teszi. Bizonyos mikroorganizmusok vagy mérgező anyagcseretermékeik az élelmiszerrel az emberi szervezetbe jutva egészségártalmat, megbetegedést okozhatnak.

Nem minden, az élelmiszerben előforduló, elszaporodó mikroorganizmus káros, romlást okozó vagy kórokozó. A mikroorganizmusok egy részének tevékenysége hasznos, hozzájárul a termék érzékszervi tulajdonságainak kialakításához, elősegíti annak tartósítását.

A viszonylag kevés hasznos mikroorganizmustól eltekintve, a mikrobák előfordulása, elszaporodása és tevékenysége élelmiszereinkben nem kívánatos, sőt káros. Élelmiszereink nyersanyagai azonban mindig szennyezettek velük, és a feldolgozás, gyártás folyamata is számos lehetőséget ad bejutásukra. Az élelmiszeripar feladata, hogy a mikroorganizmusok tevékenysége ellen védekezzen, és minőség romlás nélküli, teljes biológiai és tápértékű, egészségügyi veszélytől mentes, rövidebb-hosszabb ideig eltartható élelmiszereket állítson elő.

Az élelmiszerek feldolgozása technológiai, műszaki feladat, amelynek -az élelmiszer minőségi tulajdonságainak kialakításán kívül- mindig célja a mikroorganizmusok elleni védekezés is. Az élelmiszer- mikrobiológia korszerű ökológiai szemlélete az élelmiszert, mint a mikroorganizmusok élőhelyét tekinti; az élelmiszer jellegzetes mikroflóráját pedig a mikroorganizmusok olyan társulásának, amelynek kialakulását és tevékenységét is ökológiai tényezők irányítják. Ezeket mikroökológiai tényezőknél nevezzük, jelezve nemcsak azt, hogy mikrobákra hatnak, hanem azt is, hogy mikroméreteken érvényesülnek.

A korszerű mikrobiológiai szemléleten alapuló, jó gyártási gyakorlat megelőzi az élelmiszer minőségének csökkenését és romlását. A jó gyártási gyakorlat a technológiai, higiéniai és mikrobiológiai követelmények betartását jelenti, és a jó minőségű élelmiszer előállításának alapja.

Mikroorganizmusok hasznosítása az élelmiszeriparban

Élesztőket hasznosító hagyományos (mikrobiológiai) eljárások

Az élesztők technikai és ipari szempontból egyaránt fontos szerepet játszanak. Habár sok élesztőnemzetség és -faj létezik a természetben, és sokat közülük iparilag is alkalmaznak, mégis a *Saccharomyces cerevisiae* egyes törzsei a legfontosabbak. A borkészítésben, a sörgyártásban, valamint a kenyérgyártásban ezeket használják.

Az alkoholtartalmú italokat már a korai civilizációk is ismerték. A felfedezés, hogy az alkoholt lehet desztillálni -s ugyanígy besűríteni -, Kínából vagy az arab világból származik. Desztilláló üzemek Európában csak a XVII. sz. közepén kezdtek megjelenni. Kezdetben kizárólag emberi fogyasztásra állítottak elő alkoholt, az ipari forradalom kezdetétől azonban egyre nagyobb lett az igény az alkoholnak oldószerként és kémiai nyersanyagként való felhasználására, s így a desztilláló ipar gyorsan fejlődött. Az élesztő kenyér kelesztésére való felhasználása a kb. 6000 évvel ezelőtti Egyiptomból ered, s innen terjedt el lassan a nyugati országokban.

Borászat

A borkészítés tulajdonképpen nem más, mint az érett szőlő levében található oldható cukrok (glükóz és fruktóz) fermentációja alkohollá és CO₂-dá. Miután a szőlőbogyókat összegyűjtik, összepréselik őket, s így keletkezik a nyers szőlőlé, a must, mely savas pH-jú és 10-25 tömeg% cukor van benne. A szőlőből préselt must spontán alkoholos erjesztését azok az élesztők indítják meg, amelyek a szőlőbogyókon voltak. A szőlőre az élesztőgombák a talajból kerülnek rá a szél, a felvert esőcseppek és

főleg a rovarok közvetítésével. Számuk az érés előrehaladtával egyre nő, közülük azonban a *Hanseniospora*- (anamorf: *Kloeckera*) fajok dominálnak, az erőteljesen erjesztő *Saccharomyces*- fajok aránya viszont kicsi. A szőlő természetes élesztőflórájának jellegzetes tagjai az ún. vadélesztők. Ezek alkoholtűrése gyenge. A *Candida*- és *Pichia*-fajok csak 1-2 térf% , a *Hanseniospora*- és *Kloeckera*-fajok 5-6 térf% alkoholtartalomig erjesztenek. Spontán erjesztésnél csak ezután kerülnek uralomra a jól erjesztő *Saccharomyces cerevisiae* törzsek (pl. *S. cerevisiae* var. *ellipsoides*, ill. *S. oviformis*), amelyek 8-12 térf% , olykor nagyobb alkoholtartalomig képesek erjeszteni. A kialakuló alkoholtartalom, valamint az erjedés másik végtermékének, a CO₂-nak a képződésével létrejövő anaerob körülmények visszaszorítják minden más mikroorganizmus tevékenységét. A bor tartósságát az alkoholkoncentráción kívül a 0,5-0,8 % savtartalom ill. a 3,0-3,2 pH biztosítja.

A nagyüzemi borászat nem hagyatkozhat a spontán erjedés kedvező alakulására, hanem az erjesztés körülményeinek szabályozásával irányítja azt. A must természetes mikroflórájára nagy befolyással van a kén-dioxidos kezelés. A baktériumokkal és a vadélesztőkkel szemben ugyanis, amelyek szaporodását 50-100 mg/l SO₂- koncentráció gátolja, a borélesztők még 150-200 mg/l, bizonyos törzsek ennél nagyobb SO₂-tartalmat is eltűrnek. , 'Kénezzéssel " tehát gyorsabb és tisztább erjedés segíthető elő. Fontos tényező az erjesztés hőmérséklete is, amelynek optimális értéke fehérboroknál 18-23 °C, vörösboroknál 26-30 °C. Gyakran szükséges a fermentáció folyamatát ellenőrizni és hűteni az erjedő levet, ugyanis a nagyobb hőmérséklet kedvez a baktériumok (főleg a tejsavbaktériumok) elszaporodásának, hibás erjedés indulhat meg, elpusztulhat az élesztő.

Fehérborok készítésekor a szőlőfürt szilárd részeitől különválasztott mustot erjesztjük. Vörösborok készítésekor viszont a héjsejtekben lévő szín- és cserzőanyagok kioldódásának elősegítése érdekében a szőlő levét a zúzott bogyók szilárd részeivel együtt erjesztjük. Az alkoholos erjesztés irányításának legkorszerűbb módszere a fajlesztővel történő beoltás. A fajlesztők különleges tulajdonságú borélesztő törzsek, amelyeket különböző borvidékekről izoláltak és tiszta tenyészetben tartanak fenn. Ezek mind a *S. cerevisiae* változatai, amelyekre alkohol-, cukor-, SO₂- vagy hidegtűrésük, valamint különleges aromatermelésük jellemző.

A must főerjedése fehérboroknál 2 hétig, vörösboroknál csak 4-6 napig tart. Ezalatt a cukortartalom nagy része etanollá és szén-dioxiddá alakul. Az erjedés főtermékei mellett döntő jelentőségűek a bor ízét, zamatát meghatározó, csak kis mennyiségben képződő melléktermékek. A bor jellegzetes aromája részben a szőlőfajtának tulajdonítható, számos aroma-összetevő viszont az élesztőgombák anyagcseréjének terméke. Ezek többsége kedvező ízhatású (pl. az etilacetát), míg más anyagcseretermékek -nagyobb mennyiségben -károsak. Ilyenek a kozmaolajok és a kéntartalmú vegyületek, melyek főleg az élesztősejtek aminosav-anyagcseréjének melléktermékei.

Az erjedés után a fiatal bor fokozatosan tisztul és kiválik a seprő. A seprő a must alakos elemeinek, az elpusztult élesztősejteknek és a kicsapódott szerves anyagoknak a kiülepedett tömege. Az újbort lefejtik a seprőről és további derítési, szűrési, házasítási és egyéb, ún. pinceműveletek alakítják ki a borok jellegzetes ízét és aromáját.

A nagyobb savtartalmú vörösborok harmonikus ízének kialakításához olykor szükséges a savtartalom tompítása, vagyis a borban lévő almasav átalakítása tejsavvá. Az almasav-tejsav fermentáció egy második spontán fermentáció a bor érlelésének első évében. A fermentáció az almasavat

lebontja tejsavra és CO₂-ra, tehát dikarbonsavból monokarbonsav keletkezik, ezáltal csökken a bor savassága. Ezt a folyamatot nevezik biológiai almasavbontásnak, melyet a borban előforduló, alkoholtűrő, heterofermentatív tejsavbaktériumok (*Pediococcus*, *Leuconostoc* vagy *Lactobacillus*) jó hatásokkal elvégeznek.

A már leerjedt borok további mikrobiológiai átalakításának lehetőségei közül a két legfontosabb: a sherryzálás és a pezsgősítés.

A sherry-jellegű borokat bizonyos élesztőtörzsek által a bor felszínén képzett hártya alatti érleléssel alakítják ki. A sherryélesztők anyagcseréjük során a borokban lényeges összetételi, íz- és zamatváltozásokat visznek végbe.

A pezsgőgyártásban a 10-11 térf% alkoholtartalomig leerjedt alapbort mentesítik a mikrobáktól, majd alkohol, CO₂, valamint cukor hozzáadása után hideget tűrő fajélesztővel oltják be, és újraerjesztik. A klasszikus technológia szerint ezt palackokba töltve végzik, és a második erjedés után a pezsgőt 1-2 évig érlelik. Az újraerjesztés alatt az alkoholtartalom csak kismértékben (1-2 térf%-kal) növekszik, a CO₂-tartalom azonban jelentősen nő. Az érés időszakában az élesztősejtek autolízisével keletkező vegyületeknek tulajdonítják a pezsgő jellegzetes zamatát. Az érlelés alatt a palackok gyakori rázásával a kiülepedett élesztőtömeget (seprőt) a palackok nyakába tömörítik, majd az üveg nyakának lehűtésével -a seprőből jégdugót képezve -eltávolítják. Ezután a nyerspezsgőt ízesítik (likőrözik) és a palackot ismét lezárják. E hagyományos módszer mellett elterjedt a nagyüzemi tankpezsgőgyártás is, amit szakaszosan és folyamatosan is végezhetnek. A tankpezsgőgyártáshoz jól szűrhető fajélesztő alkalmas, amivel a nagy tartályokban a kiülepedő sejteket az autolízis elősegítésére többször felkeverik, és eltávolításuk a nyerspezsgőből szűréssel történik.

Egyes bortermelő vidékeken (pl. Tokaj) bevárják a szőlő aszúsodását. A szőlőszemekben a *Botrytis cinerea* penészgomba telepedik meg, melynek micéliuma perforálja a bogyót, és savtartalmát is csökkenti. A perforált bogyók vizet veszítenek, így nő a relatív cukortartalmuk. A folyamat, amit nemesrothadásnak nevezünk, javítja a szőlő minőségét, mert illat- és zamatanyagok is képződnek. A csapadékos időjárás az aszúsodási folyamatot megállítja, a bogyókat kilúgozza.

Habár a borok magas alkoholtartalmuk (10-12 térf%) és alacsony pH-juk (3,0) miatt a legtöbb mikroorganizmus számára kedvezőtlen tápanyagforrást jelentenek, mégis bekövetkezhet mikrobiológiai romlásuk. Ezeket a borbetegségeket tudományosan először Pasteur írta le, s az általa leírt mikroorganizmusok és az ellenük alkalmazható védekezési stratégiák mind a mai napig érvényesek. A legfontosabb ilyen mikrobiológiai romlás akkor következik be, amikor a bort kint hagyjuk a szabad levegőn. A hártyát képező élesztők és ecetsav-baktériumok elsavanyítják a bort, mert az etanolt ecetsavvá oxidálják. A másik komoly romlási folyamatot a tejsavbaktériumok (pl. *Lactobacillus trichoides*) okozzák, mivel anaerob körülmények között (lezárt palackban) növekednek - felhasználva a bor cukortartalmát -és kellemetlen ízhatást okoznak ("egéríz"). A borbetegségeket meg lehet előzni 1) pasztórizálással, 2) kénezéssel és 3) sterilre szűréssel.

Sörgyártás

A sörkészítésnek két fő szakasza van: a malátázás és magának a sörnek a gyártása. A sör alapanyaga az árpa, amelynek keményítőtartalmát az élesztőgombák közvetlenül nem tudják erjeszteni. Ezért szükség van a keményítő hidrolízisére, amit magában a csíráztatott árpában keletkező

amilázokkal végeztetnek el. Az α - és β -amilázok mellett a csíra proteázainak is fontos szerep jut a későbbiekben. Az árpa csíráztatását, majd az enzimek inaktiválására szolgáló szárításnak és hőkezelésnek (aszalásnak) műveleteit nevezzük malátázásnak. A sörgyártás közvetlen alapanyaga a kész maláta. A gyártási technológia során a malátát megőrlik és 50-52 °C-on cefrézik. A cefrézés célja a keményítő és a fehérjék hidrolízise. Az így készült sörlét szűrik, majd komlót adnak hozzá és felfőzik. Ezzel az enzimeket inaktiválják, a komló hatóanyagait kioldják, elősegítik az íz- és színanyagok képződését. A főzéssel az alapanyagokkal a sörlébe került sokféle mikroorganizmust is elpusztítják, és kizárják tevékenységüket az erjesztés alatt. A szűrt és lehűtött sörlét az ún. anyaélesztővel beoltva az erjesztőpincében 4-5 °C-on erjesztik.

A söriparban a *Saccharomyces cerevisiae* különleges törzseit használják, amelyek képesek a sörlé oligoszacharidjainak (maltodextrineknek) az erjesztésére is. Korábban a törzseket külön fajként tartották számon (*S. carlsbergensis*). A söripari élesztőtörzsek kitűnnek különleges hidegtűrésükkel és csomósodó, ülepedő hajlamukkal.

A 6-12 napig tartó főerjedés után a sör utóérlelése (ászokolás) következik. Az ászokpince hőmérséklete csak 0-2 °C. Itt, a zárt tartályokban lassan, néhány hónapig tovább folytatódó erjedés alatt a sör szén-dioxiddal telítődik, tisztul, kialakul érett, jellegzetes íze. A hagyományos sörgyártás szakaszos erjesztésekkel történik. Ilyenkor egy anyaélesztő-tenyészetet többször is felhasználhatnak, ha vigyáznak arra, hogy idegen mikroorganizmusokkal ne fertőződjék, erjesztési képessége ne romoljék le. Időnként új, tiszta anyaélesztőt kell elszaporítani, hogy az esetleges befertőződést elkerülhessük.

Kenyérgyártás

Élesztők alkoholos fermentációja alapvető, nélkülözhetetlen lépése a kenyérgyártásnak; ez a folyamat, mint tudjuk, a kenyér kelesztése. A benedvesített lisztet élesztővel keverik össze és meleg helyen néhány óráig állni hagyják. A liszt maga nem tartalmaz szabad cukrot, amely a fermentáció szubsztrátjaként szolgálna, de vannak benne keményítőbontó enzimek. A búzaliszt túlnyomórészt β -amilázt tartalmaz, melynek működése révén a keményítőből erjeszthető maltóz keletkezik. A csírázott gabonából származó liszt nagyobb mennyiségű α -amilázt is tartalmaz, melynek működése káros, mert a keményítőbontás során dextrinek keletkeznek, s ezek ragadós, rossz tulajdonságú kenyérbélzetet eredményeznek. A nagymértékben finomított lisztek enzimeinek nincs aktivitásuk, ezért külön cukrot kell a tésztába adagolni (az Egyesült Államokban sok helyen használnak ilyen liszteket a sütőiparban).

A tésztában zajló alkoholos erjedés során az erjeszthető cukrokból etil-alkohol és szén-dioxid keletkezik. Ez a folyamat a kenyér végső tulajdonságainak kialakulása szempontjából igen fontos, mivel a kis buborékok formájában a tésztában visszamaradó CO_2 biztosítja a kenyérbélzet megfelelő lazítottságát. Az erjedési folyamat sebességét a rendelkezésre álló erjeszthető cukor mennyisége, a hőmérséklet és a pH befolyásolja. Optimális az 5-6 közötti pH és a 30 °C körüli hőmérséklet.

Az élesztő a tészta fizikai és kémiai tulajdonságaiban apróbb változásokat idézhet elő, melyek befolyásolják a kenyér állományát és ízét. A XIX. században Justus von LIEBIG, német kémikus felfedezte a sütőport, mely karbonát- tartalmú vegyületek keveréke és CO_2 szabadul fel belőle, ha nedvesítik. Liebig jelezte, hogy a sütőporral lehetne helyettesíteni az élesztőt. Habár Liebig "találmánya" széles körben elterjedt a sütőipar más területein, a kenyér kelesztésének folyamatában nem tudta

kiszorítani az élesztőt. Az élesztők, melyeket a kenyérfőzésben használnak, mindegyike a *Saccharomyces cerevisiae* fajba tartozik, s nagyjából ugyanazok a törzsek, melyeket a söriparban alkalmaznak. Ez volt a magyarázata annak, hogy a múlt század végéig a kenyérgyártáshoz felhasználható élesztőket egyenesen a legközelebbi sörfőzdéből szállították. Manapság a nagyüzemi termelésben szárított és sűrített élesztőt használnak. A modern sütőipari üzemek hihetetlenül nagymennyiségű élesztőt használnak fel (60 kg liszthez kb. 1 kg élesztő kell), s a jövőben az élesztők iránti fogyasztási igény csak növekedhet.

Hagyományos mikrobiológiai eljárások ecetsav-baktériumok felhasználásával

Amikor bort és sört levegőn hagyunk, gyakran fanyar ízűvé válnak. Az elsavanyodást az okozza, hogy a szigorúan aerob ecetsav-baktériumok az italok alkoholtartalmát ecetsavvá oxidálják. A bor spontán savanyodása az ecetsav- gyártás hagyományos módszere. Az ecetgyártás napjainkban is jórészt hagyományos eljárással folyik. A fő módosítások, melyeket a múlt században vezettek be, inkább az eljárás mechanikai mintsem mikrobiológiai szempontjaira vonatkoznak. Az orleans-i eljárás szerint, melyet még most is használnak Franciaországban, fakádakat részlegesen megtöltenek borral, és az ecetsav-baktériumok a folyadék felszínén egyfajta kocsonyás hárttyát alakítanak ki. Az etilalkohol ecetsavvá konvertálódása hetekig tart; a folyamat gyorsaságát az korlátozza, hogy a levegő csak lassú diffúzióval jut a folyadékba. Ez a lassú, nem túl hatékony módszer azért maradhatott fenn, mert a végtermék nagyon tiszta és jó minőségű.

Ha a termék ízének nincs elsődleges fontossága, az ecetet gyorsabb eljárásokkal és olcsóbb nyersanyagokból készítik (pl. hígított desztillált alkohol és almabor). Ezekben a módszerekben az oxidációt úgy gyorsították, hogy javították a levegőztetést és szabályozták a hőmérsékletet; e folyamatokban sem valósult meg azonban a mikroorganizmusok pontos kontrollja. A legrégebbi ilyen módszert a XIX.sz. elején fejlesztették ki. Egy tartályt használtak, melyet lazán, hézagosan megtöltöttek faforgácsokkal s ezen keresztül áramoltatták a folyadékot. A folyadékot a tartályba szivárogtatták és a folyadék áramlási irányával ellentétesen levegőztették. Az ecetsav- baktériumok egy vékony hárttyát képeztek a faforgácsokon, így biztosítva volt a viszonylag nagy (sejt)felület, mely egyidejűleg érintkezett a közeggel és a levegővel. Ha már egyszer a baktériumpopuláció megtelepedett a forgácsokon, az ecetsav-fermentációs ciklusok gyorsabban követhetik egymást; a kezdetben 10 % alkoholtartalmú oldatok 4-5 napon belül ecetsavvá alakulhatnak. Napjainkban még sokfelé használják ezt a módszert ecetgyártásra, de a modern, óriási méretű keverős tartályfermentorok (ezeket más fermentációs technológiákban is használják) egyre inkább kiszorítják őket.

Az ecetsav-baktériumok az etanol ecetsavvá történő oxidálását nem teljesen hajtják végre (részleges oxidáció). Ezen baktériumoknak vannak még más, iparilag fontos átalakítási folyamataik is, melyek ugyancsak részleges oxidációval mennek végbe. A glükonsavat, melyet a gyógyszeripar használ, glükóz oxidációjával állítják elő ecetsav-baktériumok felhasználásával. Sok cukoralkohol cukorrá konvertálását is ezek a baktériumok végzik. Egy ilyen reakció például a kereskedelemben használatos D-szorbit előállítására a glükóz redukciója útján. A szorbitot egyes gyógyszerkészítmények gyártásánál használják még hozzá olyan reakciópartnerként, mely bizonyos lépés(ek)e)t fel tud függeszteni. A D-

szorbit továbbá egy mindenki számára nélkülözhetetlen vegyület, az L- aszkorbinsav (C- vitamin) gyártásának egyik köztiterméke.

Tejsavbaktériumok alkalmazása

Az élesztőgombák alkoholos erjesztése mellett a másik fontos mikrobás erjesztési folyamat a tejsavbaktériumok által végzett tejsavas erjedés. Ezen alapul a **savanyúságok**, a **tejtermékek**, továbbá bizonyos **érlelt húskészítmények** gyártása. A mikroorganizmusok erjesztésének termékei -ha az élelmiszerben elegendő koncentrációban , felhalmozódnak - megakadályozzák a további mikrobatevékenységet, s a **tartósító hatáson** kívül az élelmiszernek egyúttal kellemes **íz** és **élvezeti értéket** is adnak.

Az erjesztéseket véghezvivő, hasznos mikroorganizmusok uralomra jutását a nyersanyagok kevert mikroflórájában kétféle módon lehet elősegíteni:

1. a környezeti tényezők számukra kedvező módosításával, vagy
2. a hasznos mikroorganizmusok nagy számban történő mesterséges bevitelével. A legjobb eredményre a két módszer együttes alkalmazása vezet.

A tejtermékek tejsavas erjesztése

A tejiparban a tejsavbaktériumok színtenyészeteivel (ún. kultúrákkal) oltják be a tejet, amelyet előzőleg pasztöröznek a vetélkedő mikroorganizmusok elpusztítására. A tejipari színtenyészet egy vagy több mikrobafajból áll, közülük a tejsavbaktériumok a legfontosabbak. A **vaj**, **tejföl**, **túró** és **bizonyos sajtok készítéséhez** használják az ún. vajkultúrát.

Ez általában kétféle tejsavbaktérium vegyes tenyésztete, amelyek közül az egyik erősebb savtermelő (*Streptococcus lactis*, *S. cremoris*), a másik íz- és aromatermelő (*Leuconostoc citrovorum*, *L. dextranicum*). A **joghurt-kultúra** is két tejsavbaktérium vegyes tenyésztete (*S. thermophilus* és *Lactobacillus bulgaricus*).

A tejipari gyártástechnológiák mikrobiológiailag kritikus része a kultúrakészítés. A tenyésztetnek csak a jellegzetes ízt, állományt adó tejsavbaktériumokat (olykor egyéb mikroorganizmusokat) szabad tartalmaznia. Fontos, hogy a tenyésztet életerős legyen (a sejtek szaporodásuk exponenciális szakaszában tartsanak), és tagjai élettevékenységükben egymást segítsék, kiegészítsék, tehát asszociációt alkossanak. A kultúrakészítés a laboratóriumban fenntartott törzstenyésztetből indul ki. Ebből -még csak lombikméretben -szaporítják el az ún. anyasavanyítót, amelyből a beoltásra használt tömegsavanyító készül. Ezeket a savanyítókultúrákat többször átoltva ismételtelen is felhasználják, de az elkerülhetetlen mikrobiológiai szennyeződés miatt a kultúrakészítést 1-2 hét múlva újra kell indítani tiszta laboratóriumi törzsből. A mikrobiológiai befertőződés mellett a tejipari tenyésztetek hatékonyságát súlyosan leronthatja a tejsavbaktériumok bakteriofágok okozta elpusztulása. A tejbe bekerülhetnek továbbá a tehének tőgygyulladásának kezelésére használt antibiotikumok, amelyek a tenyésztet mikroorganizmusainak működését gátolják.

A sajtok készítéséhez sokféle szintenyésztetet használnak a sajt jellegének megfelelően. Ezek általában egy vagy több *Streptococcus* és *Lactobacillus* tenyésztetből állnak. A sajtgyártáshoz azonban nemcsak tejsavbaktériumokat használnak, hanem bizonyos típusú sajtok érlelésében fontos szerep jut a propionsav- baktériumoknak (*Propionibacterium shermanii*), a korineform-baktériumoknak

(*Brevibacterium linens*) és a penészgombáknak is (*Penicillium roqueforti*, *P. camemberti*, *P. candidum*).

A sajtok érlelésekor a fehérjebontás feladatát döntő részben a színtenyézzel bevitt egyéb mikroorganizmusok végzik el. A lágy sajtok esetében a fehérjebontás csaknem teljes. Az erősen fehérjebontó *Brevibacterium linens*, valamint a nemes penészek a koagulált kazeinból peptideket, aminosavakat, sőt ammóniát képeznek. A *Brevibacterium*-ot tartalmazó ún. rúzkultúra a sajtok felületén sárgászöld bevonatot képez. A *P. camemberti* vagy a *P. candidum* is a lágysajt felületén növekszik, a *P. roqueforti* viszont átszövi a sajt belsejét is. A penészes sajtokban végbemenő zsírbontás termékei (kapron-, kapril-, vajsav stb.) jellegzetes ízt adnak. A kemény sajtokban a mikroorganizmusok a sajt belsejében elterjedve is tevékenykednek. A fehérjebontás csak kismértékű, 25-35 %-os. A lyukacsosság kialakításában főleg a propionsav-baktériumok szerepelnek; ezek a tejsavat szén-dioxid képződésével propionsavvá és ecetsavvá alakítják.

A tenyésztel bevitt mikroorganizmusok mellett a sajtok felületén az érés alatt elszaporodó egyéb mikroorganizmusok tevékenysége általában nem kívánatos. Az élesztő- és élesztőszerű gombák (pl. *Candida*, *Torulaspóra*, *Geotrichum*, *Trichosporon*) savfogyasztása azonban előnyös az 5-nél nagyobb pH-t kedvelő *Brevibacteriumok* tevékenységéhez. Ilyenkor megnő az anaerob *Clostridium*-fajok által okozott romlás veszélye. Ezeket viszont többnyire eredményesen gátolja a *S. lactis* által termelt nizin.

A **savanyú tejkészítmények** gyártási folyamatának leglényegesebb része a tejcukor átalakulása tejsavvá. A spontán keletkező, aludttejnek nevezett termék két rétegből áll: a felső, vékonyabb tejszírrétegből és az

alsó, vastagabb alvadékból. A savanyú tejkészítmények közül a **joghurt** sokak által kedvelt és széles körben elterjedt.

A **joghurt** a tejjel azonos értékű tápanyag. Élettani szempontból abban különbözik a tejtől, hogy cukortartalmának egy része már tejsavvá alakult, fehérjetartalma pedig koagulált állapotban van, ennélfogva könnyebben emészthető. A joghurt készítéséhez a legjobb minőségű tejet használják fel. Ennek zsírtartalmát sűrített tejjel vagy sovány tejpor és tejszín adagolással állítják be. A zsírtartalom beállítása után a tejet pasztőrözik, majd 47 °C-ra hűtik és ekkor oltják be 3-5 %-os joghurtkultúrával (*Streptococcus thermophilus* és *Lactobacillus bulgaricus* tenyészetekkel). Az utóbbi években erősen megnőtt az ízesített, elsősorban gyümölcsízű joghurtkészítmények gyártása.

A **kefir** értékes tápszer, amit a szervezet jól kihasznál, elősegíti az emésztést, növeli az étvágyat, kellemes ízű és vitaminokban gazdag. Használata régebbi a joghurtnál. Megkülönböztetünk teljes és sovány tejből készült kefirteket, melyet úgy állítunk elő, hogy a 95 °C-on pasztőrözött tejet azonnal kb. 20 °C-ra hűtjük le, 5-8% kefirtenyésztéssel beoltjuk és palackozzuk. A beoltáshoz ún. "kefirgombát" használunk. A kefirgomba lényegében fehérjéből és a benne élő mikroorganizmusokból áll. A kefirgombában állandó szimbiózis jön létre a tejsavsztreptokokkuszok (*Str.lactis*, *Str.cremoris*), a laktobacillusok (*Lb.casei*, *Lb.caucasicus*), a laktózerjesztő és laktózt nem erjesztő élesztők (főként a *Candida pseudotropicalis*), valamint a szokásos táptalajokon nem fejlődő pálcikaalakú mikrobák, a kefirbacillusok között. A beoltás után a lezárt palackokat termosztátban 20 °C-on tárolják, ahol gázképződés mellett megindul az erjedés; először tejsavas, később alkoholos erjedés játszódik le. A kefirkészítésnek kétféle technológiája ismert. Egyik esetben műanyagpoharakba adagolva végzik az alvasztást, a másik esetben

tankokban történik mindez. A kefir végül 1-3 napig érlelik, mely idő alatt 0.2-0.6 % alkoholtartalmat ér el.

A **tejföl** zsírtartalma nagyobb, mint a savanyú tejkészítményeké, mégis ebbe a csoportba szokták sorolni. Készítéséhez alaptejet és frissen fölözött tejszínt használnak fel. Az alaptejet pasztőrözik és zsírtartalmát tejszínnel legalább 20 %-ra állítják be, majd a zsírdús tejet homogénezik. Ezután tejsavbaktérium szintenyészettel és annyi oltóenzimmal kezelik, hogy 24-26 °C-on az alvadás 8-10 óra alatt bekövetkezzen. A beoltott alapanyagot poharakba töltik ki, majd savanyítják. Ezután 4-6 °C-os térben 24 órán át érlelik. Érlelés alatt jellegzetes sűrű konzisztencia, megfelelő aromásodás következik be.

Savanyúságok tejsavas erjesztése

A savanyúságok gyártása spontán tejsavas erjesztéssel történik. A tejsavbaktériumok elszaporodását sózással és anaerob körülményekkel segítik elő. Az erjesztésük eredményeként keletkező tejsav részben gátló hatása, részben pH-csökkentése révén fokozatosan háttérbe szorítja, majd elpusztítja a nem savtűrő mikroorganizmusokat. A termék így módon tartóssá válik, egyúttal a sótól és a tejsavtól kellemes ízt is kap.

Az erjedés folyamán a tejsavbaktériumok között is szelekció megy végbe a csökkenő savtűrő képesség szerint. Az erjesztést általában a *Streptococcus*- és *Leuconostoc*-fajok kezdik. Ezeket, amint a pH 4,1-4,2 alá csökken, fokozatosan felváltják a *Pediococcus*- és a *Lactobacillus*-fajok. Utóbbiak 1,5-2,0 % tejsavat képesek termelni.

A tejsavbaktériumokon kívül a sós, anaerob környezet néhány más mikroorganizmus életfeltételeinek is megfelel. Ilyenek a kóliform-

baktériumok és az élesztőgombák. Az előbbiek kevert savas erjesztése a termék ízét kedvezően befolyásolja, de savtűrésük nem nagy, ezért hamarosan visszaszorulnak. Az élesztőgombák nagy só- és savtűrése lehetővé teszi, hogy a savanyítás körülményei között jól szaporodjanak. Egy részük a cukrokat erjesztve az etil-alkoholon és a szén-dioxidon kívül kis mennyiségben íz- és aromaadó vegyületeket is képez. Az élesztőgombák más fajai nem, vagy csak gyengén erjesztenek, de a savanyúságok felületén elszaporodva oxidálják a tejsavat. Ezeknek az ún. hártvaképző élesztőknek a tevékenysége káros, mert a savasság csökkentésével utat nyithatnak a romlásnak. Tejsavbaktérium szintenyészeteket (starterkultúrákat) ma még nemigen alkalmaznak a savanyúságok gyártásában.

Húskészítmények tejsavas érlelése

Többféle húskészítményt (pl. nyerskolbászok, szalámik) szárítással tartósítanak. A szárítási idő alatt, mely a terméktől függően 1-2 héttől néhány hónap lehet, kialakul a termék jellegzetes színe, állománya, íze. Ebben az érlelési folyamatban a pácsónak (nitrát vagy nitrit) és a mikroflóra tevékenységének van szerepe. Az érlelés alatt spontán tejsavas erjedés indul meg, ami visszaszorítja a Gram-negatív romlásokozó baktériumokat és gátat szab a kórokozók (*Clostridium botulinum*, *Staphylococcus aureus*) fejlődésének is.

Az érlelés meggyorsításához gyakran alkalmaznak starterkultúrákat. Ezek főleg tejsavbaktériumok (*Lactobacillus*-, *Pediococcus*-fajok), de íz- és színekialakítás (nitrátredukció) érdekében a savképzők mellett *Micrococcus*-törzseket is használnak. A szintenyészet beoltásakor erjeszthető cukrot is adnak a húskeverékhez, elősegítve a gyors

savképzést, pH-csökkenést, ami a terméket megvédi a romlástól, amíg a szárítás alatt a vízaktivitás 0,9 alá csökken, és ezzel a készítmény tartóssá válik. A vízaktivitás (a_v vagy a_w) az élelmiszerek szabad víztartalmának -a mikroorganizmusok számára hozzáférhető vízmennyiségnek -kifejezésére szolgál. A vízaktivitás az oldatok gőznyomása (p) és a tiszta oldószer nyomásának (p_0) hányadosával fejezhető ki (emlékezz korábbi előadásra). Az egyensúlyi relatív páratartalom (ERP) pedig ennek az értéknek a százszorososa.

A szárított húskészítmények egy részének felületén penészbevonat is kialakul. A vegyes penészflórában potenciális mikotoxinképzők is lehetnek, bár a kis vízaktivitás miatt a toxintermelés gátolt. A szalámi felületének beoltása alkalmas, mikotoxint nem termelő penésztörzsszel még nem megoldott.

Mikrobák, mint fehérjeforrások

Mivel gyorsan növekednek, magas a fehérjetartalmuk, és alacsony költséggel képesek hasznosítani a szerves alapanyagokat, a mikroorganizmusok értékes forrásai az állati takarmányozásnak. A takarmányozásnak mint tudománynak a növekedése új iparág kifejlesztéséhez vezetett, mely azon alapult, hogy a mikroorganizmusok tenyésztetei az állati táplálékok kiegészítőiként használhatók. Főképp az élesztők és a metilotrófbaktériumok kerülnek felhasználásra, s termékük általános elnevezése az ún. egysejt-fehérje (single-cell protein, SCP). Az egysejt-fehérjének az állatok etetésében van jelentős szerepe; helyettesíthet fő takarmány-alkotórészeket, mint pl. szóját, hallisztet. Mivel sok európai országban nagymértékű a húsfogyasztás, s ezeken a területeken nem kielégítő hozamokkal terem meg a szója, illetve

importálni kell a halat, természetes, hogy fő szerepet játszik az egysejt-fehérje eljárások fejlesztése.

A mikroorganizmusok nagy fehérjetartalmuk miatt nagyon értékesek, mint táplálékok vagy táplálék- kiegészítők. Gyorsan és hatékonyan tudják a rendelkezésre álló szerves komponenseket fehérjévé átalakítani. Ez tüstént szemléletesebbé válik, ha elvégzünk egy egyszerű összehasonlítást. Egy 500 kg súlyú szarvasmarha kb. 0,4 kg fehérjét termel 24 óra alatt, míg 500 kg élesztő -természetesen megfelelő növekedési körülmények között -több, mint 50 tonna (!) fehérje előállítására képes ugyanennyi idő elteltével. A mikrobák közreműködésével ipari méretekben előállított aminosavakról már szóltunk.

Növényi nyersanyagok tejsavas fermentációja

Egyes tejsavbaktériumok jellegzetesen adott gazdanövényen fordulnak elő. A tejsavfermentáció konzerváló hatását nagyon jól lehet hasznosítani az állati zöldtakarmányok silózásakor. Miután a növényi nyersanyagban lejátszódott a fermentáció, a silózás után a takarmány szinte korlátlan ideig tárolható anélkül, hogy a rothadási vagy egyéb károsító folyamatok áldozata lenne.

Áztatásos eljárások

Az áztatás során az egyes növényi szövetek alkotórészeit -kontrollált körülmények között- mikrobák bontják szét. Például a len és a kender áztatása során így válnak szabaddá a rostok. A növényi rostok cellulózból épülnek fel, s a növényi szárban egy szilárdító tulajdonságú anyag, a

pektin tartja össze őket; elválasztásuk fizikai módszerrel nehéz. Az áztatás célja, hogy a pektin szétesését előidézzük, így a szálak szabadabbá válnak anélkül, hogy szétbomlanának. A növényi szárakat vízbe mártják; ezek vízzel átítatódnak és elkezdődik a mikrobiális folyamat. Kezdetben az aerob mikroorganizmusok növekednek és felhasználják az oldott oxigént. Ezzel kedvező környezeti körülményeket alakítanak ki az anaerob vajsavbaktériumok későbbi elszaporodásának. Ezek a mikrobák gyorsan nekilátnak a pektinnek, s így szabadabbá teszik a cellulózrostokat. Ha az áztatás nem tart megfelelően hosszú ideig, elszaporodnak a cellulózbontó baktériumok és szétrombolják a rostokat.

Hasonló áztatási eljárást alkalmaznak burgonya-keményítő készítésekor. Itt az áztatásnak az a célja, hogy a gumóban lévő keményítő-tartalmú sejteket szabadabbá tegyék a pektintől, ami beágyazza, helyhez köti őket.

A mikroorganizmusok rendszerezésének alapjai, vizsgálati módszerei

A **rendszertan (taxonómia)** többféle feladat teljesítését szolgáló összetett tudomány. Feladata a rendszerezés (angol szóval: *classification*), az a tevékenység, melynek során az élőlényeket rendszertani egységekbe csoportosítják hasonlóságuk alapján; a rendszerezés alapegysége a faj. A rendszertan magába foglalja az azonosítást (*identification*) is, azt az eljárást, amelyben valamely vizsgálatba vont, begyűjtött egyedet az ismert rendszertani egységek valamelyikébe besorolják. A rendszertan eleme még a nevezéktan (*nomenclature*), azaz a különböző rendszertani egységek elnevezése a megfelelő nemzetközi kódexek szabályai szerint.

A mikroorganizmus fajok többségét -éppúgy, mint a Botanikában vagy a Zoológiában- kettős latin névvel látjuk el: közülük az első a nemzetségbeli hovatartozást fejezi ki, a második pedig a fajnév. Például: *Bacillus subtilis*, *Thielaviopsis basicola*. A vírusok elnevezésében viszont az angol dominál, kettős, hármas vagy akár ennél hosszabb nevet használnak, amivel utalnak a vírus gazdaszervezetére és valamilyen tüneti vagy kórtani jellemzőjére; tudományos dolgozatokban, népszerűsítő irodalomban, szűkebb szakkörökben az angol nevek egyezményes rövidítését használják. Például: *cucumber mosaic virus* (CMV -uborka mozaik vírus), *human immunodeficiency virus* (HIV -emberi immunitáshiányt okozó vírus). A rendszertan nem a kartotékolás, nem a dobozolás tudománya, hanem ennél jóval több. Segítségével evolúciós összefüggésekre derül fény, törekvése a valós rokonsági viszonyok feltárása, eredménye pedig a megbízható azonosítás, kórokozók esetében a pontos diagnózis. Mint láttuk, a rendszerezés alapegysége, úgy is mondhatjuk az alapvető rendszertani egység (taxon): a faj. A fajon

felüli, szupraspecifikus taxonok a következők: **Regnum** -például az állatoké -Animalia, a gombáké -Fungi, az algáké és protozoáké -Protista; **törzs** (Phylum) -például a gerinceseké -Chordata, a valódi gombáké -Eumycotina; **osztály** -például az emlősöké -Mammalia, a bazídiumos gombáké - Basidiomycetes; **rend** -például a főemlősöké -Primates, a rozsdagombáké -Uredinales; **család** -például az emberszabásúaké -Hominoidea, a nyeles teleutospórákat hozó rozsdagombáké -Pucciniaceae; **nemzetség** -például az emberé -*Homo*, a pszeudoperídiumos rozsdagombáké -*Puccinia*; a **faj** -például a mai emberé -*Homo sapiens* , a gabonarozsdáé -*Puccinia graminis*. Tudományos dolgozatokban, könyvekben a nemzetség - és fajneveket rnindig dőltbetűvel írják, az előbbit nagy kezdőbetűvel.

A mikrobiológiában nagy jelentőségük van a fajalatti, intraspecifikus taxonoknak is. **Varietas** (változat) névvel jelöljük azokat a fajnál kisebb egységeket, amelyek kicsiny morfológiai eltéréseket mutatnak az alapfajhoz viszonyítva, de – általában - hajlandók rekombinációra az alapfaj más tagjaival. **Specializálódott forma** (latinul: forma specialis, rövidítve: **f.sp.**) névvel illetjük a gombák körében azokat a taxonokat, amelyek az alapfajtól semmiféle morfológiai eltérést nem mutatnak, de meghatározott gazdanövény-fajt képesek fertőzni; a búzarozdát például *Puccinia graminis* f.sp. *triticeae* hívjuk. Ezzel átfedő taxon a bakteriológiában a **patovar** (rövidítve: pv.) - a *Pseudomonas syringae* sok gazdanövényen élő baktériumfaj babot fertőző alakja a *P. syringae* pv. *phaseolicola*. Ugyancsak főként a kórtanban használatos taxonok a **rasszok**, amelyek meghatározott fajtákat képesek megbetegíteni. (Megjegyezzük: nincs teljes egyezés e tekintetben a gombáknál és a baktériumoknál követett nomenklatúrában).

Találkozhatnak baktériumok esetében a **szerotípus** fajalatti kategóriával is, ezzel olyan alcsoportokat jelölnek, amelyek szerológiai tulajdonságaik (ama képességük, hogy az alapfajtól és a többitől eltérő immunválaszt váltanak ki, más és más immunsavókkal reagálnak) alapján különböznek egymástól; ezek a humán egészségügyben és az állatorvosi tudományban különösen fontos taxonok.

Nem túl szerencsés, de általánosan használt fajalatti kategória a **törzs** (nem tévesztendő össze a Phylum-mal); ezzel a **genetikailag homogén, egyetlen sejtből (vagy szülőtől) származó, tiszta kultúrában fenntartott olyan vonalakat jelölik, amelyek genetikai markerek, patogenitás vagy földrajzi eredet tekintetében különböznek az adott faj egyéb törzseitől.** Vannak egy-egy kutatónak vagy kutatócsoportnak törzsei, de vannak nemzetközileg nyilvántartott törzsek is. A szakirodalomban gyakran találkozhatnak -a fajnév mellett -ilyen jelzésekkel: ATCC 2365, IMI 156 790, CBS -21 976. Ezek "**törzskönyvezett**" mikroorganizmusok, s valamilyen fontos tulajdonságuk (eredetük) miatt nemzetközi gyűjteményekben tartják fenn őket, s különböző csoportok folytatnak kísérleteket velük. Az ATCC az American Type Culture Collection (USA), az IMI az International Mycological Institute (Nagy-Britannia), a CBS a Centraalbureau voor Schimmelcultures, Baam (Hollandia) elnevezésű nemzeti gyűjtemények rövidítése, a szám pedig egy-egy katalógusszám vagy sorszám. Lehetnek azonban *egyéb jelzések is az ilyen törzsszámok mellett, rövidítések, amelyek egy-egy genetikai markert (auxotrofiát, drogrezisztenciát, termelőképeséget) takarnak.*

Használják még az **izolátum** elnevezést is, az amerikai szakirodalomban (s részben az ezen nevelődő világirodalomban) a törzs szinonimájaként, de ez nem igazán helyes, hiszen **az izolátum nem egyéb, mint egy adott**

forrásból izolált, tiszta tenyészetbe vett, de markerekkel nem jellemzett mikroorganizmus-törzs.

A mikroorganizmusok rendszerbe sorolása többféle módon történhet és többféle célt szolgál. Az egyik megközelítés (**fenetikus rendszer**) a hasonló sajátosságokat mutató mikroorganizmusokat olyan, többé-kevésbé jól körülhatárolt csoportokba sorolja, melyek általában *gyakorlati szempontokat figyelembe véve is jól kezelhetők* és aminek eredményeként az egyes mikróbákról rendelkezésre álló információk is megfelelően csoportosíthatók. Ezáltal természetesen arra is lehetőség nyílik, hogy az új izolátumok megfelelő identifikálás (meghatározás) után a hozzájuk hasonló jellegeket mutató csoportba besorolhatók legyenek. Ezen megközelítési móddal ellentétben egy **filogenetikai rendszer** a természetes rokonsági viszonyok feltárása révén hozható létre és így az *a valódi evolúciós (leszármazási) kapcsolatokat* tükrözi.

A gyakorlati célokat szolgáló mesterséges rendszerek sajátossága lehet, hogy kiemelnek egy vagy néhány (az adott alkalmazás szempontjából fontos) jelleget és kizárólag ez alapján kategorizálnak (pl. a *B. thuringiensis* csak az inszekticid parasporális kristályok jelenlétében különbözik a *B. cereus* fajtól). Az ilyen monotetikus csoportosítással szemben a ma használatos rendszerezések általában politetikusak, azaz a rendszerbe sorolás a mikroba több sajátosságának figyelembevételével történik.

Egy sajátos, az utóbbi néhány évtizedben a mikrobiológián belül is teret nyert megközelítési mód a **numerikus taxonómia**. Ennek során a politetikus csoportosítás alapján létrehozott fenetikus rendszerekben a vizsgált (alapvetően fenotípusos) sajátosságok, különböző kódolási

stratégiák alkalmazásával olyan karakterekké alakíthatók, melyek először egy statisztikai feldolgozást, majd a kapott eredmények grafikus ábrázolását (dendrogram) teszik lehetővé. Amennyiben egy hasonló taxonómiai vizsgálat olyan karakterekre épül (általában nukleinsav- és aminosav-szekvenciák) amelyek esetleges hasonlósága a valódi rokonsági kapcsolatokat tükrözi, a létrehozott törzsfát **kladogramnak** nevezzük.

A mikrobiológia tárgykörébe tartozó rendszerezés alapegysége a magasabb rendű (növényi, állati) szervezetekhez hasonlóan a **faj**. Mivel azonban itt a szexuális rekombinációhoz vezető folyamatok hiányozhatnak (pl. aszexuális gombák), esetleg kevésbé rendszeresen, illetve más jelleggel játszódnak le, a biológiai fajkonceptió alkalmazása gyakran nehézségekbe ütközik. Még egyértelműbben kirajzolódó korlátai vannak a morfológiai bélyegekre alapozó morfológiai fajkonceptiónak. A molekuláris bélyegek (elsősorban a DNS-homológia) alapján történő faj meghatározás képezi a filogenetikai fajkonceptió alapját. Mindez érzékelteti, hogy a mikróbatörzsek pontos fajmeghatározása és egymástól való elkülönítése sokszor igen problematikus.

A vírusok rendszerezésének alapelvei

A vírusok jelenleg használatos felosztása mesterséges; esetükben ma még nem beszélhetünk filogenetikai rendszerről. Korábban (molekuláris szerkezetük feltárása előtt) csoportosításuk alapvetően a fertőzött gazdaszervezet (pl. bakteriofágok, növények és állatok vírusai), illetve az abban kiváltott kórfolyamat alapján történt. A felsoroltakon kívül a vírusok rendszerezésében kulcsszerepe van a virális genom jellemzésének. Ezen belül a nukleinsavak minősége, szerveződése, a vektorok milyensége számít. Ilyen, gyakorlati szempontok alapján készült, jól áttekinthető

felosztások ma is léteznek. Mivel ma már nagy számban ismerünk különböző molekuláris sajátosságait tekintve is jól jellemzett vírusokat, lehetővé vált ezen információkra alapozott vírusrendszer létrehozása is.

A baktériumok rendszerezésének alapelvei

A baktériumok többségének jó tenyésztetősége jelentős mértékben elősegítette a bakteriális taxonómia kialakulását és későbbi fejlődését. Komoly nehézséget jelentett azonban ezen a területen, hogy a prokariota sejt mikroszkópos vizsgálata nem nyújt kellő alapot egy megbízható identifikáláshoz. Ennek okán a baktériumok meghatározásában és rendszerezésében már a kezdeti időktől fogva nagyobb szerepet játszott a különböző diagnosztikai reakciók, sejtfestési eljárások és szelektív tenyésztési módszerek segítségével kapott eredmény, mint a vizsgált baktériumsejt morfológiai jellemzői.

A fejezet bevezető részében a fajfogalommal kapcsolatosan említett problémák a baktérium rendszertanban is fellelhetők. Ennek következtében a baktériumfajok és a bakteriális rendszertanban használt taxonok jelentős része mesterséges. Lényegi változás a molekuláris taxonómiai módszerek alkalmazásától várható, amelynek eredményei elősegíthetik egy, az evolúciós kapcsolatokat is tükröző filogenetikai rendszer kialakítását (lásd pl. az Archea és Eubacteria elkülönítése).

A baktériumok rendszerezésének **hagyományos módszerei között** elsőnek a morfológiai vizsgálatokat kell említenünk. Ezen belül a sejtmorfológia fénymikroszkópos vizsgálata révén meghatározható a baktériumok mérete, alakja (pl. kokkusz, pálcika, vibrio, spirillum), a sejtek jellegzetes elrendeződése (pl. diplokokkusz, szarcina), élő sejtek

esetében a mozgékonyaságuk. Mikroszkópos festések alkalmazásával feltárható a bakteriális tok, vagy az endospórák jelenléte és elhelyezkedése. Ezen festések közül kiemelendő a Gram-festés, amely segítségével lehetséges az eltérő falszerkezetű Gram-pozitív és Gram-negatív baktériumok megkülönböztetése. A mikromorfológiai jellemzőkön túl az identifikálásban lényeges szerep jut a különböző táptalajokon megfigyelhető telepmorfológiai sajátosságoknak is; ilyen például a telep mérete, színe vagy általános morfológiája.

A különböző biokémiai teszteknek, a metabolikus sajátosságok vizsgálatának kulcsszerep jut a baktériumok hagyományos identifikálásában. A különböző tápoldatokban és táptalajokon, változatos feltételek mellett történő tenyésztéssel meghatározhatók a vizsgált baktérium növekedéséhez szükséges optimális és minimális feltételek (pl. oxigénellátottság, pH, sókoncentráció, hőmérséklet, tápanyagigény). Különösen fontos a különböző szén- és nitrogénforrások hasznosítási képességének vizsgálata, továbbá azok a tesztek, melyek különböző enzimek és toxinok termelését mutatják ki. Ilyen többek között a koaguláz (a vérplazma koagulálása), az ureáz (urea bontása), az amiláz (keményítő hidrolízise), a kataláz (a hidrogén-peroxid elbontása), vagy a zselatináz (zselatin hidrolízise) reakció. A toxinok közül leggyakrabban a hemolizinek kimutatása történik, melyek véres táptalajon a-, vagy b-hemolízist okoznak. A baktérium izolátumok rutinmeghatározásában mind nagyobb szerep jut azoknak a szelektív és differenciáló táptalajoknak, amelyek csak egy-egy faj vagy taxon karakterisztikus növekedését teszik lehetővé.

A baktériumok rendszerezésére a korábbi idők hagyományos technikáin kívül **kemotaxonómiai és molekuláris taxonómiai módszerek** alkalmasak

még. A sejt kémiai összetétele indirekt módon az adott sejt genetikai állományát jellemzi, ezért a baktériumsejtek által mutatott ilyen különbségek kitűnően felhasználhatók taxonómiai vizsgálatokhoz is. A sejtalkotók közül a sejtfa összetételében (és szerveződésében) is számottevően különbözik a Gram-pozitív és a Gram-negatív baktériumokban; ez előbbieknél a teichonsavak, míg a Gram-negatív sejtekben a csak rájuk jellemző felszíni lipopoliszaharidok (O-antigén) jelenlétét kell kiemelnünk. Esetenként Gram-pozitív baktériumokban olyan sejt felszíni poliszacharidok detektálhatók, melyek differenciáló értékűek (pl. Streptococcus fajok Lancefield-féle szerológiai csoportosítása (A-H, K-U). A baktériumok karakterisztikus különbségeket mutathatnak a sejtmembrán összetételében, elsősorban a benne előforduló lipidek kémiai természetében is.

Számos molekuláris metodika is felhasználható a baktérium-izolátumok identifikálására, a fajok és egyéb taxonok közötti rokonsági kapcsolat vizsgálatára. Közülük a fontosabbakat a későbbiekben, a vírusokra, baktériumokra és gombákra egyöntetűen alkalmazható molekuláris taxonómiával együtt ismertetjük részletesen.

A gombák rendszerezésének alapelvei

A gomba elnevezés sokféle, egymástól lényeges tulajdonságokban különböző és filogenetikailag is heterogén élőlényeket jelöl. Taxonómiájukkal kezdetben a növényrendszertan foglalkozott egy alapvetően mesterséges rendszer keretein belül. A korszerű gombataxonómia a valódi gombák esetében filogenetikai alapokon, monofiletikus (valamely feltételezett, közeli közös őstől származó) csoportok kialakítása révén kísérli meg a rendszerezést. Mivel a gombák

esetében is (a baktériumokhoz hasonlóan) kevés fosszilis lelet áll a rendelkezésünkre, a filogenetikai rendszer kialakítását alapvetően a molekuláris technikák alkalmazásával kapott eredmények teszik lehetővé. A feladat nehézségét mindenesetre jól érzékelteti, hogy a leírt gombafajok száma ma megközelítőleg 120 ezer, amely a becslések szerint azonban csak mintegy 8%-a az összes létező gombafajnak.

A gombafajok elnevezése szintén kettős latin névvel történik a Nemzetközi Botanikai Kódex szabályainak megfelelően; a név után esetenként a faj leírójának nevét is megtaláljuk (pl. *Mucor piriformis* Fischer). Az általános, baktériumoknál is érvényes nevezéktani szabályok (pl. tipizáció, prioritás) a gomba rendszertan esetében is érvényesek. A szinonim és homonim nevek előfordulásán kívül azonban találkozunk néhány speciális problémával is. Számos gombafaj több morfológiai alakban is ismert (**pleomorf**). Ebben az esetben eltérő nevet visel az aszexuális (**anamorf**) és a szexuális (**teleomorf**) forma: pl. az *Aspergillus tetrazonus*-nak (anamorf) az *Emericella quadrilineata* teleomorf felel meg. Egy speciális eset a zuzmók rendszerezése, ahol a besorolás a szimbióta gombapartner alapján történik.

A gombarendszertanban használatos nevezéktan:

-mycota: törzs

-mycotina: altörzs

-mycetes: osztály

-mycetidae: alosztály

-ales: rend

-aceae: család

A gombarendszerben esetenként faj alatti (infraspecifikus) kategóriák is felbukkannak, ezekről e fejezet elején már említést tettünk (pl.: varietas, f.sp.).

A **gombák hagyományos rendszerezésénél** felhasznált eljárások között elsősorban a mikro- és makromorfológia bélyegek, fiziológiai és biológiai sajátosságok vizsgálatát, továbbá esetenként a keresztelési kísérleteket kell megemlítenünk.

A morfológiai bélyegek között például a telepmorfológia (pl. szín), a micéliális vagy élesztőszerű növekedés könnyen vizsgálható jellemzők. Fonalszombáknál a micélium szeptált vagy cönocitikus (harántfalak nélküli) volta, speciális kitartóképletek (pl. klamidospóra), illetve specializálódott hifarészek (pl. rhizoidok) esetleges előfordulása is jellemző bélyeg. A legtöbb morfológiai sajátosság általában a vegetatív szaporítóképletekkel kapcsolatban azonosítható, de az ivartalan spóraképzés hiánya szintén jellemző lehet. Esetenként az ivaros spórák morfológiája is jellemző bélyeg (pl. a zigospóra mérete, felszíni képletei és színe).

A fiziológiai jellemzők közül például az, hogy a gomba milyen hőmérsékleti, pH -és ozmotikus viszonyok között növekszik optimálisan, továbbá ezek minimum- és maximumértékei lehetnek fontos bélyegek. Könnyen meghatározható a spórák hőtűrése, hatóanyagokkal szembeni érzékenysége, illetve rezisztenciája. A különböző szén- és nitrogénforrások hasznosítási képessége (asszimilációs spektrum) kellő számú vegyület tesztelése esetén önmagában is igen informatív lehet. Ezen megközelítést az élesztők identifikálásában már régóta, míg a

fonalaszombák esetében az utóbbi időszakban alkalmazzák sikeresen. Hasonlóképpen a vizsgált törzsek enzimettermelése, amely változatos módon meghatározható (pl. tesztcsőben, mikrotiterlapon) differenciáló értékű karaktereket szolgáltat.

A biológiai jellemzők közül az izolálás helye, továbbá különösen patogén gombák esetében az eredeti gazdanövény, illetve az izolátummal mesterségesen fertőzhető növények ismerete a lényeges.

Keresztezési kísérletek eredményeit értelemszerűen csak olyan gombák esetében használhatjuk fel, amelyek képesek ivaros folyamatokban való részvételre.

A gombák rendszerezésénél használt kemotaxonómiai módszerek közül a másodlagos metabolitok termelésének vizsgálatát kell kiemelnünk. Ilyen anyagok például a pigmentek, a toxinok, az antibiotikumok, amelyek jelenléte, akár sejten belül felhalmozódva, akár a sejtből kiválasztva jellemző bélyegként szolgálhat. Ezen anyagok vizsgálatának nagy előnye, hogy sokszor viszonylag egyszerű metodikákkal (pl. vékonyréteg-kromatográfia) is elvégezhető.

Vannak ritkábban alkalmazott kemotaxonómiai eljárások is. Esetenként sikerrel alkalmazták az elektrontranszport lánc részét képező ubikinonok (koenzim Q) vizsgálatát is taxonómiai célra, az izoprén egységek számában mutatott eltérés alapján. Hasonlóképpen találunk példát a sejtfal kémiai összetétele, továbbá a sejtmembrán lipidtartalmában mutatott különbségek taxonómiai célú felhasználására is.

A következőkben olyan **molekuláris taxonómiai eljárásokat** ismertetünk, melyek egyaránt alkalmazhatók a mikroorganizmusok különböző csoportjaira. Ide tartoznak a fehérjék és a nukleinsavak vizsgálatán alapuló módszerek tartoznak.

A fehérjék alapvető izolálási, tisztítási és vizsgálati módszerei

A biokémikus munkás életének legnagyobb részét a vizsgálandó anyag izolálásával tölti. Ez bármilyen elrettentő is, azért van így, mert egy sejt:

- több ezer különböző anyagot tartalmaz,
- az általában izolálni kívánt anyaghoz számos más fizikai-kémiai szempontból nagyon hasonló anyag van jelen a sejtben,
- az izolálni kívánt anyag rendszerint instabil,
- az izolálni kívánt anyag nagyon kis mennyiségben van jelen.

A tipikus az, hogy a sejtből, szövetből 0,01 %-nál kisebb mennyiségben jelen lévő anyagot kell izolálni, mintegy 98%-os tisztaságot elérve. Bátran állíthatjuk, hogy ez olyan mértékű nehézség, hogy az egész biokémia, molekuláris biológia haladását lényegében a biológiai anyagok izolálási-tisztítási módszereinek a fejlődése határozza meg. Bonyolultságuk és a tantárgy keretének korlátoltsága miatt mi itt ezen technikák sorát nem tárgyaljuk, csak a már tisztított fehérjék további vizsgálatának módszereiből szemezgetünk.

A **fehérjék taxonómiai célú analízisének** legfontosabb formái a következők: fehérjemintázat elektroforézises vizsgálata, izoenzim analízis, fehérje szekvenálás és izoelektromos fókuszálás.

Fehérjemintázat elektroforézises vizsgálata: A vizsgálandó sejtekből különböző anyagokkal (pl. szerves oldószer, detergens, víz) fehérjekivonatot készítünk, ezt elektroforézissel elválasztjuk, majd a rögzítést és megfelelő festést követően (pl. Coomassie brilliant blue) az így nyert proteinmintázatot vizsgáljuk. Az elektroforézises elválasztáskor a fehérje- (ill. nukleinsav-) kivonatot géles rendszerbe viszik, s ezen egyenáramot áramoltatnak keresztül. A fehérje kivonatoknak nagy tisztaságúnak kell lennie. Ha egy fehérje több alegységből épül fel, úgy az egyes aminosav láncokat izolálni kell ahhoz, hogy a szekvenciájukat egyenként meg lehessen határozni. Az alegységek disszociációja a denaturációhoz hasonlóan savas vagy bázikus körülmények között megy végbe, kis sókoncentrációnál és magas hőmérsékleten. A disszociációhoz közismert denaturálószeret alkalmaznak, így ureát, guanidin-HCl-at, vagy nátrium(szódium)-dodecil-szulfátot (SDS). A gél lehet agar, agaróz, keményítő vagy poliakrilamid (PAGE). Az elektromos erő hatására a méretükben és töltésükben különböző molekulák különböző mértékben mozdulnak el, ezért szétválnak. Az elválasztás végeztével a fehérjék szétdiffundálását a gélben rögzítéssel kell megakadályozni. Az elválasztott fehérjéket csak a speciális festékanyagok teszik láthatóvá a gélben, jellegzetes csíkoltságot létrehozva.

A mikroorganizmusok teljes fehérjekészletének szétválasztása és elemzése csak a legegyszerűbb mikrobák esetében képzelhető el (pl. vírusok köpenyfehérjéinél). A nagyobb és összetettebb fehérjeállományú baktériumok és gombák esetében ezen módszer nem kielégítő, helyette

alkalmazható azonban két módosított változata, a kétdimenziós elektroforézis és az izoelektromos fókuszálás.

A *kétdimenziós elektroforézis* során az elektroforézissel egyszer már elválasztott (de nem fixált és nem festett) fehérjéket tartalmazó géllemez 90°-os szögben elfordítva újabb elektroforézisnek vetjük alá, megnövelve ezzel a szétválasztás finomságát. Ezeken túlmenően kidolgozták már a katód és anód helyzetváltoztatásának többféle kombinációját, speciális igényeknek megfelelően finomítva az elektroforézises elválasztásokat.

Izoelektromos fókuszálás során a fehérjéket pH grádienszt tartalmazó poliakrilamid gélen választják szét. Minden fehérje a rá jellemző értéket képviselő izoelektromos pontjának megfelelő pH-értékű pontig vándorol, ahol elektromos töltése nulla lesz, az elektromos erő hatására kifejtett mozgása leáll.

Fehérje szekvenálás: A fehérjéket felépítő aminosav alegységek sorrendjének meghatározását jelenti. Az előzetesen megtisztított fehérjepreparátumban a harmadlagos szerkezetet stabilizáló diszulfid hidak felbontását követően (perhangyasavas oxidáció) parciális hidrolízissel (pl. tripszinnel) kapott peptideket analizálják. A fehérje szekvenálását kezdenek az N- és a C-terminális végek felől is. Az N-terminális aminosav meghatározására ismert módszerek közül az Edman-féle lebontás a legelterjedtebb. Ekkor fenil-izotiocianáttal kezeljük a fehérjét, amely vegyület rákapcsolódik a fehérje N-terminális végére, s onnan az egyetlen N-terminális aminosavval együtt választható le, melyet utána róla is lehasíthatunk és meghatározhatunk. A polipeptidek

szekvenálását ma már kizárólag automata szekvenátorok segítségével végzik, az Edman-reakció alapján.

Izoenzim analízis: Izoenzimnek egy adott enzim különböző formáit nevezik. Ezek előfordulhatnak egy faj ugyanazon, ill. különböző egyedeiben; jelen lehetnek egyazon sejtben, de lehetnek szövetspecifikusak, vagy az egyedfejlődés különböző fázisaiban expresszálódnak. Az izoenzimek a genom többféle módosulásával létrejöhetnek, ha a változás olyan kicsi, hogy nem okozza az enzim funkció elvesztését. Az aminosavsorrendben létrejött eltérések visszatükröződnek az elektroforetikus tulajdonságokban, s eredményezhetnek némi módosulást az izoelektromos pontban is.

Az izoenzim mintázatok összehasonlítására a fehérjekivonatok elektroforetikus elválasztása vagy izoelektromos fókuszálása után nem egyszerű fehérjefestést alkalmaznak, hanem specifikus enzimreakcióra bírják a gélben lévő, még nem fixált fehérjéket. Jól láthatóvá válnak pl. az eltérések, ha az enzimreakció eredményét pl. fluoreszcenciával lehet detektálni.

A molekuláris taxonómiai vizsgálatok kiterjedhetnek a **RNS-, ill. DNS-molekulák analízisére** is.

Elektroforézis: A nukleinsavak elektroforézises vizsgálatának, összehasonlításának elve megegyezik a fehérjéknél az előzőekben ismertetettekkel. Az elektroforetikus kariotipizálás segítségével meghatározhatjuk a kromoszómaszámot és –méretet, továbbá a genom

méretét. Megfelelő számú törzs vizsgálata a fajon belüli kromoszóma hossz polimorfizmusról (CLP) ad információt.

A gélelektroforézis során az azonos molekulatömegű DNS-darabok sávokba rendeződnek. Ezek láthatóvá tétele úgy lehetséges, hogy a gállapot planáris aromás kationok oldatába merítjük (etidiumion, akridin-narancs vagy proflavin). Ezek a festékek az egymás után következő bázisok síkja közé rétegződnek, és ezáltal rendkívül megnő az ultraibolya fényben mutatott fluoreszcenciájuk a szabad festékhez képest. Így pl. 50 ng DNS jelenléte is már kimutatható!

DNS-bázisösszetételének meghatározása: Baktériumok összehasonlítására, különösen új rendszertani egységek jellemzésére elterjedten alkalmazzák a DNS bázisösszetételének meghatározását. A különböző prokarióta fajok között a (G + C) : (A + T) arány 25-75% között ingadozik, miközben fajon belül ez az arány állandó. Ismerete tehát sokat segíthet egy-egy új izolátum beazonosításához.

Ha tömény (8 M) CsCl-oldatot megfelelő sebességgel és ideig centrifugálunk, egy lineáris sűrűséggradiens alakul ki a centrifugacsőben, ahol a cső alján a sűrűség 1,80 g/cm³, míg a tetején 1,55 g/cm³. Ha mindezt DNS-molekulák belekeverése után tesszük, a megfelelő sűrűségű DNS-molekulák csak a nekik megfelelő sűrűségű zónáig vándorolnak, majd ott megállnak. Mivel a kettős láncú DNS-molekulák sűrűsége a (G+C) tartalomtól függ, ezért ez az ún. *sűrűséggradiens ultracentrifugálás*: a bázisösszetétel szerint választja szét a DNS-molekulákat.

A GC/AT bázisarány vizsgálatával kapott eredmények kellő óvatossággal kezelendők, az összefüggések nem 100%-ak!

DNS-reasszociációs vizsgálatok: A módszer a kettős szálú DNS azon tulajdonságán alapszik, hogy a mesterségesen széttekert – kísérletes módszerek között hővel denaturált – egyszálú DNS-szekvenciák képesek a nekik megfelelő szakaszokon újraegyesülni. Ennek megtörténte, előrehaladása az oldat optikai tulajdonságainak (denzitásának) változásával jár, s spektrofotométerrel egyszerűen detektálható. Minden faj jellemezhető egy rá érvényes reasszociációs értékkel, vagyis a láncok újraegyesülésének ütemével.

DNS(RNS)-hibridizáció: Az eljárás során a kétszálú DNS denaturációját követően (ekkor a komplementer szálak elválnak egymástól) két különböző mikroba-törzs vagy izolátum vagy minta DNS-ének jelenlétében hozzuk létre a renaturációt: ennek mértéke arányos lesz a két különböző eredetű DNS homológiájával. A módszer során gyakran alkalmazzák az egyik minta nukleinsavának radioaktív jelölését, mely a létrejött kapcsolódások detektálását könnyíti meg. A nukleinsav hibridizációt végre lehet hajtani kétszálú, nem denaturált DNS-re történő ráhibridizálással is (dot-blot hibridizáció), mely módszer gyors, de durvábbnak számít.

Southern blotting (átítatás) specifikus DNS-szekvenciák kimutatására: A módszert Edwin Southern dolgozta ki, specifikus DNS-szekvenciák kimutatására alkalmas, és igen nagy jelentőséggel bír a biotechnológiában. A gélelektroforézis után a különböző DNS-sávokat tartalmazó gélt festés nélkül NaOH-ba helyezzük, ahol a DNS egyszálúvá válik. Ezután a gélt nitrocellulóz lapra helyezzük, és egyszerű átítatás

révén vagy elektroforetikusan a DNS-t a lapra visszük. A nitrocellulóz filter csak az egyszálú DNS-eket köti meg, ugyanabban a pozícióban, ahogy azok a gélben is elhelyezkedtek. Ezután a nitrocellulóz lapot 80°C-on vákuumban megszáritjuk. Ilyenkor a DNS-láncok szorosan hozzákötődnek a filter anyagához. A következő lépésben a filtert minimális mennyiségű olyan folyadékba helyezzük, ami ^{32}P -izotóppal jelölt komplementer DNS-t vagy RNS-t tartalmaz. Ez az ún. nukleinsav-próba DNS vagy RNS. Több órán át tartó és megfelelő hőmérsékletű inkubáció után a nukleinsav-próba hibridizál a megfelelő DNS-sávokhoz. Ezután a filterről lemoszuk a nem kötődő nukleinsav-próbát, megszáritjuk, majd autoradiografáljuk röntgenfilmen. A filmen az előhívás után csak azok a DNS-sávok láthatók, amelyek a nukleinsav-próba DNS-szekvenciájának komplementer módon megfelelnek. Így specifikus gének izolálása, kimutatása lehetséges.

Az is gyakori, hogy a nukleinsav-próbát nem radioaktívan jelölik, hanem olyan enzimmel kapcsolják össze, amely megfelelő színreakcióval jelzi a helyét a blotban, és ezzel a radioaktív anyagok használata elkerülhető.

A northern és western blotting (átítatás) technikája: A northern blothoz hasonló western blot (vagy immunoblot) eljárásban itt fehérjét immobilizálunk a nitrocellulóz lemezre elektroforézis után, és a specifikus fehérjét az ellenük termeltetett specifikus antitestekkel keressük ki.

Fontos megjegyezni, hogy bármelyik átítatási módszernél azért szükséges mind a DNS-t, mind az RNS-t, mind a fehérjét nitrocellulóz

lemezre vinni, mert itt hozzáfér a megfelelő nukleinsav-próba, míg a gélben ez nagymértékben gátolt lenne.

Restriktációs endonukleázok analízis: A restriktációs enzimek olyan speciális endonukleázok, melyek arra szolgálnak, hogy a sejtbe került idegen DNS-molekulákat felismerjék és felaprítsák, a sejt védelme érdekében. Ezek az enzimek akkor vágják el a DNS-láncot, ha egy speciális nukleotid szekvenciasorrendet felismernek. Mára már százával ismertek négy-, öt-, hat-, sőt tíz-felismerőhelyes endonukleázok.

Egy endonukleáz a DNS-molekulát a specifikus felismerési/hasítási helyek számától és elhelyezkedésétől függően adott számú és méretű fragmentre hasít. A DNS-ben bekövetkező minden olyan változás, amely befolyásolja ezen hasítási helyek számát és elhelyezkedését (pl. bázispár-helyettesítések, deléciók, inszerciók, stb.), egyben megváltoztatják a hasítási fragmentumok számát, méretét. Az ilyen, a homológ kromoszómális régiók közötti különbségeket nevezzük restriktációs fragment hossz polimorfizmusnak (RFLP). Elektroforetikus szeparálást követően ezen fragmentek jellegzetes mintázatként jelennek meg, amelyek alkalmasak pl. különböző izolátumok, DNS-minták összehasonlítására.

PCR (Polymerase Chain Reaction) technika: A polimeráz láncreakció egy több ciklusban lezajló folyamat, melynek során megfelelő primerek (kezdő szakaszok a nukleinsav-lánc polimerizációjához) segítségével, több ciklusban (ált. 25-45) felszaporítható egy adott DNS-molekulának a primerekkel komplementer régiói közé eső szakasza.

Lépései:

1. A folyamat a láncok magas hőmérsékleten történő szétválasztásával (15` keresztül 95°C) kezdődik.
2. Az elegyet ezután hirtelen lehűtik 54°C-ra, ilyenkor a primerek a DNS-lánc megfelelő régióihoz kapcsolódnak, hibridizálnak. A vizsgált minta DNS-láncainak hibridizálása nem jön létre, mivel a primereket sokkal nagyobb mennyiségben adjuk az elegyhez. A primerek hossza rendszerint 20-30 bázis.
3. A DNS-szintézis a minta 72°C-ra való melegítésével kezdődik. Ez az a hőfok ugyanis, melyen a Taq-polimeráz optimálisan működik. Ez a polimeráz egy termofil baktériumtól származik. A primerek elongációja (a róluk induló DNS-láncépítés) mindkét irányba megindul, s mintegy 30`-en át folyik. Két különböző primert egyszerre alkalmazva az ő felismerési helyeik közötti DNS-szakasz 2^n -szeresére szaporítható fel, a rajtuk kívül eső $2 * n$ db szakasszal szemben.

A módszer számos előnye közé tartozik, hogy nem kell ismernünk a felszaporítandó DNS-szakasz szekvenciáját, s a szaporítandó DNS-szakasz akár 10 kbázis méretű is lehet. A PCR haszna az orvosi diagnosztikában, az igazságügyi orvostanban (a módszert kombinálhatjuk az előzőekben ismertetett módszerrel: PCR-RFLP) és a molekuláris evolúciós kutatásban jelentős.

DNS-szekvenálás: A rokonsági fok legfontosabb megállapítása gének vagy a teljes genom bázissorendjének, szekvenciájának meghatározásával történhet. A rendszertani vizsgálatokhoz olyan egy kópiában meglévő

(vagy egységként viselkedő) gének szekvenálása jöhet elsősorban szóba, amelyek a vizsgált mikroorganizmusokban azonos funkciót töltenek be és nagyjából hasonló evolúciós sebességgel változnak. Példa erre a 16S Svedberg féle ülepedési állandóval jellemezhető 16S rRNS, mely az evolúció során fokozatosan, sohasem ugrásszerű nagy léptékben változott meg, hanem mindig csak csekély mértékben.

A DNS-szekvenálási módszerek közül a ma igen elterjedt Sanger et al. féle dideoxi-nukleotid módszert mutatjuk be. Ennek kezdetén valamilyen módszerrel előállítjuk a szekvenálandó DNS egyes szálát, majd egy radioaktívan jelölt „primert” hibridizálunk hozzá. Ezután négyfelé osztjuk az elegyet, és kiegészítő szálát szintetizálunk az eredeti lánchoz dNTP-k (dezoxiribonukleotid-trifoszfát) jelenlétében (T7 DNS-polimeráz segítségével) minden esetben úgy, hogy egy-egy dideoxi-nukleotid is jelen van bizonyos arányban a reakcióelegyben. A DNS-polimeráz hatására megindul a radioaktív kiegészítőlánc szintézise, de esetenként egy-egy helyen meg is áll, mert a dideoxi analóg épül be a normál nukleotid helyett a láncba, ami ezután nem tud tovább folytatódni. Gélelektroforézissel és autoradiográfia után a kapott szekvencia 3' → 5' irányban leolvasható. Ennek komplementere az eredetileg vizsgált szekvencia.

A levegő mikrobanépessége

A Föld felszínén élő szervezeteket körülvevő levegőtengernek, a légkör legalsó régiójának, a troposzférának összetétele és halmazállapota – a kondenzált vízgőz és portartalmától eltekintve – egyoldalúan a gázfázissal jellemezhető.

A levegőt általában úgy tekintik, mint ami nem élőhelye a mikroorganizmusoknak, és ezek abban csak elvétve fordulnak elő. A levegőben a mikrobák száma általában sokkal alacsonyabb, mint a talajokban és a vizekben. A légtérben anyagcsere-aktív alakjaik csak nagyon ritkán fordulnak elő. Ennek feltehető oka a levegő alacsony víztartalma és csekély tápanyagszintje lehet.

A levegőben utazó életképes mikrobák főleg gomba, baktérium és alga spórák, továbbá protozoonok cisztái, míg a vegetatív alakok általában gyorsan elpusztulnak. Általában a levegő örvénylése és áramlása emeli őket a magasba, illetve sodorja és szállítja őket laterális irányban. Légmozgás hiányában különböző sebességgel bár, de ülepednek.

A bioszféra mikrobiológiájában a levegőnek elsősorban a mikrobák transzportjában és diszperziójában van fontos szerepe. A légáramlatok az egész Földön szakadatlanul dolgozva a mikroorganizmusokat a magasba emelik, szállítják, az Egyenlítő és a sarkok között mindenütt teregetik és szórják. Óriási méretű földi inokuláció ez, mely az újabb és újabb típusokat, változatokat és fajokat széles körben terjeszti. Velük bővül a távoli vidékek mikroflóráinak lebontó kapacitása, és a különböző biokémiai teljesítőképességű szervezetek típusgazdagsága. Mindez növeli a szerves anyagok mineralizációjának sebességét, a biogén elemek

visszacsatolását a producens szintre, és végső soron a bioszféra produktivitását.

A talajmikrobák legtöbbször porrészecskére tapadva utaznak. A magasba felszálló tengeri permet ezzel szemben a planktont és neusztont (lásd később) indítja távutazásra. Az esők létrehozta aeroszolok mikroba tartalmú cseppekből állnak. Az esőcseppek ugyanis vagy port és mikrobát tartalmazó rétegen haladnak át, vagy a földfelszín baktériumokban gazdag talajra csapódnak.

Ami a mikroorganizmusok légköri megoszlását illeti a levegőben, az általános megállapítások szerint emberi települések vagy nagy állattartó farmok közelében főleg baktériumok, máshol inkább gomba spórák a gyakoriak. 1 m³ levegőben a kimutatható csírák száma néhány száz és több ezer között ingadozhat. A városok poros levegője természetesen jóval nagyobb csíratartalmú, mint a zöldsövényeké, és ezekénél még tisztábbak a tavak és tengerek felett lebegő légterek. Egyes épületek, házak, intézmények, így mikrobiológiai laboratóriumok légmikroflórája összetételében nagyon sokszor tükrözi a környező parkok, kertek, útszegélyek, stb. talajainak szaprofita mikroba-populációját. A mezőgazdaságilag művelt területek felett a gombaspórák mennyisége m³-enként sok ezer is lehet. Természetesen ez a szám függ a gombaspórák szóródási göcainak lokalizációjától. A sarkvidékek légterében csak kevés spóra van, ami érthető, hiszen a helyi légörvények a hó és a jég felszínéről aligha ragadhatnak fel sok élő szervezetet vagy ezek kitartó alakjait a magasba. Mégis, a délről és északról jövő, alászálló légáramlatok az örök hó világának jégkérgére nem ritkán terítenek finom porréteget, benne baktériumokkal, gombaspórákkal.

A levegő áramlásával a spórák és a mikroorganizmusok más kitartó képletei nagy távolságokra vándorolhatnak. Messzi földektől jöve városokra vagy tengerfelszínre ereszkedhetnek le. Maguk a

gombaspórák csaknem kivétel nélkül szárazföldi eredetűek. Vándorlásuk a horizontális légáramlatokkal gyakran valóságos felhők alakjában történik. Ilyenkor az egyes, egymás után vonuló felhők nemcsak nagyon különböző spóra-összetételűek lehetnek, hanem a felhők eredete is igen eltérő geográfiai régiókra vezethető vissza. Általában az óceánok felett vándorló spórafelhők sűrűsége fokozatosan csökken. Kisebb tengeröblöket és belvizeket csekély veszteséggel keresztezhetnek, és ez a tény súlyosan esik latba, ha pl. patogén gombákról van szó. Természetesen az esetek többségében a talajfelszínről felkapott spórákat a szél néhány 100 m-en belül már teregeti is; nagyarányú légmozgások azonban a spórákat sok száz km-re hurcolhatja.

Természetesen nem csak a gombaspórák vándorolnak, hanem a baktériumok, sőt, vírusok is. A száj- és körömfájás vírusa nedves, hideg levegőben, fertőzőképes állapotban akár 120 km-t is megtehet.

A spóráknak több olyan tulajdonságát tartjuk nyilván, melyek meghatározó szerepűek vándorlásuk biztosításában. A levegőben észlelt spórák gyakorisága általában logaritmikus léptékben csökken a magassággal a felett a földfelszíni pont felett, ahonnan erednek. Gyakran a gombák spórái sajátos struktúrképletek viselnek, melyek elősegítik passzív repülésüket a kedvező légáramlatokkal, és távoli elterjedésüket. A troposzférában több kilométeres magasságban sötét spórájú *Clamidosporium* és *Alternaria* gombák, továbbá sok *Bacillus* szerű baktérium és *Micrococcus* mutatható ki. A csíraszám még 3-5 km magasságban is m³-enként több száz lehet. Nagyobb magasságokban azonban az UV sugárzás és a kiszáradás erősen csökkentik a szóródó mikrobák túlélését. Megfigyelték, hogy életképességük csökkenéséhez egyes területek felett, és pedig éjjel egy ma még ismeretlen tényező, az úgynevezett „open air factor” is hozzájárul. Ez feltehetően valamilyen kémiai légszennyeződés lehet.

A levegőn át nagy tömegben és nagy távolságokra terjedhetnek azok a mikroorganizmusok, közöttük gyakran patogének is, melyek erősen szennyezett vizekből létrejött aeroszolokkal kelnek útra. Az aerob szennyvíztisztító berendezések szinte állandóan juttatnak baktériumokkal telt aeroszolat a levegőbe, és ezek esetenként veszélyesek is a telepek dolgozóinak egészségére. A háztartási szennyvizek patogénjeinek többsége az *Enterobacteriaceae* soraiból kerül elő, és aeroszolizációjuk kétségtelenül kimerítheti a környezeti ártalom kritériumait. Egyes vizsgálatok határozottan igazolták, hogy a szennyvízkezelő telepekről származó aeroszolizált baktériumok a teleptől szélirányban még 930 m távolságban is kimutathatók. Az aktivált-iszap tankok közelében a levegőből rendszerese lehetett enteriális baktériumokat izolálni, ugyanakkor az ilyen telepektől 10 km távolságban gyűjtött aeroszol minták csak nagyon ritkán tartalmaztak enteriális alakokat.

Érdekes kutatási terület a helységek belső légterének mikrobiológiája. A belső terek levegője legtöbbször állandó mozgásban van, még akkor is, ha a helységet lakatlanok. Az ablakok és ajtórepedések keltette légáramlatok (huzat) nem mindig kimutathatók. A fűtőtestek felfelé irányuló konvekciós légáramlatokat keltenek, míg a hideg ablakoktól a levegő lefelé „húz”. A helységekben tartózkodó emberek testükkel maguk is mintegy 105 kJ/óra veszteséggel konvekciós áramot keltenek. Ez a test felületéről akár 50 µm átmérőjű részecskék eltávolítására is képes. A belső terek legnagyobb mérvű turbulenciáját a lakók mozgása és tevékenysége idézi elő. A lakások légterének legközönségesebb gombái a szaprofita *Penicillium* és *Aspergillus* fajok, és különösen azok, melyek a nedves falfelületeken is szaporodhatnak.

A baktériumok száma jól szellőztetett lakószobákban m³-enként esetleg csak néhány száz, de a tenyésztésre alkalmas zárt terekben, pl.

üvegházakban sok százezer/m³-ig emelkedhet. A belső terekben cirkuláló baktériumok egyik fontos kiinduló forrása az emberek és állatok felső légutaiból kikerülő aeroszol baktériumtartalmú cseppecskéi, melyek köhögéssel, tüsszentéssel, beszéddel intenzíven szóródnak. Másik fontos baktériumforrás a bőr hámladéka lehet. Ha a helyiségben fertőzött egyének is tartózkodnak, úgy a levegőben a kórokozók is megjelennek. A belső terekben patogén képességüket tovább megtarthatják, mivel pl. sugárhatásnak nincsenek kitéve.

A belső terek levegőjébe porrészecskék elsősorban azokkal a mozdulatokkal, mozgásokkal kerülnek, melyek egyúttal elősegítik a bőr felületéről a részecskék lehámlását, leválását, illetve a ruházatról ilyenek leporolását. Az aljzatra átlag 45 cm/perc sebességgel, gyorsan ülepednek. Az egyes részecskékre általában nagyon sok baktérium települ. Külső, izzadt testfelületen, tapadnak meg, vagy a felső légutakba hatolnak.

Források, folyók, tavak, tengerek, óceánok mikrobaközösségei

A mikroorganizmusok számára mind a föld feletti, mind a föld alatti vizek és források élőhelyet jelentenek, bár ezek fizikokémiai tulajdonságai rendkívül eltérőek. Az altalajvizek lehetnek kemények, kalcium-karbonátban gazdagok, vagy lágyak, melyek csak kevés meszet tartalmaznak. Ismerünk hideg és termálforrásokat. Az úgynevezett ásványvizek lehetnek vasas, kénes, keserűsós, gyakran gyógyhatású vizek. A savanyú vizek szénsavat tartalmazhatnak. A források vizét csaknem kizárólag mikrobák, és pedig baktériumok, algák népesítik be. Közösségeik faji összetételét elsősorban a hőmérséklet és a kémiai összetétel determinálja. A folyóvizek is jellegüket tekintve eltérőek; a

különböző esés különböző áramlási sebességet eredményez. A folyók különböző biodegradálható és nem bontható lebegő anyagot szállítanak, amit nagy mennyiségben a torkolatvidéken raknak le. E hordalékanyag adszorbeált állapotban hatalmas mennyiségű mikrobát ragad magával. Ezek viszont a folyó öntisztuló kapacitását határozzák meg. A sík területek felszíni vízfolyásai nagy mennyiségű humuszsavat tartalmaznak, míg a lakott területek környékén ipari és mezőgazdasági szennanyagokkal terheltek. A folyók szervesanyag-tartalma vidékenként nagyon eltérő lehet, ami biológiai dinamikájukat mélyrehatóan befolyásolja. A plankton és a bentoszvegetáció s folyóvizekben csak ott fejlődik ki, ahol az áramlási sebesség nem túl nagy, ezért a gyors folyású vizek csekély produktivitásúak, és fajszegény társulásaik az extrém áramlási viszonyokhoz alkalmazkodott állatokból és növényekből állnak.

Az egyes víztípusokban a bennszülött autochton baktériumok mellett mindig nagy mennyiségű jövevény is található, minthogy a vizek felszínére a levegőből állandó baktériumeső hullik. Egyesek az utóbbiak közül ubikvisták, melyek képesek a legkülönbözőbb életterekben, így a vizekben is szaporodni. Mások vizekben csak rövid élettartamúak. Ilyenek a humánpatogének, továbbá a normális körülmények között szaprofita módon élő *coli* baktériumok.

A vízi baktériumok többsége általában csillókkal aktívan mozog, egyesek szilárd felületeken csúszással haladnak. A valódi vízi baktériumokra jellemző, hogy nagyon csekély tápanyag-koncentrációk kihasználására is képesek. Általában vagy lebegve a szabad vízben élnek, vagy szilárd aljzatra telepednek. A legtöbb mindkettőre képes.

A vizek mikrobaközösségeit lokalizációjuknak megfelelően tagolhatjuk. A *plankton* közösségébe azok a szervezetek tartoznak, melyek legalábbis életük egy részében a nyílt vízben szabadon élnek. Azokat a

mikroorganizmusokat, melyek különböző felületeket kolonizálnak, a *bentosz* tagjaiként jelöljük meg. A bentosz szervezeteit még tovább csoportosíthatjuk. A különböző növények felszínére települők az *epifiták*, míg az állatok felszínét kolonizálók az *epizoák*. Az iszapban élők az *epipelon*, a sziklára települők az *epiliton*, míg a homokszemcsékre települők az *epipszammon* közösségek képviselői. A víz közvetlen felszínén a *neuszton* populációit találhatjuk.

A plankton felosztható *fitoplanktonra* és *zooplanktonra*. Az ún. *nanoplankton* vagy *törpeplankton* többnyire ostorosokból áll. A vízben lebegő, úszó vagy lassan süllyedő baktériumok közösségét az irodalomban gyakran, mint *bakterioplankton* jelölik meg. Egyes fajok nagy gyakorisággal, ha nem is kizárólagosan, fordulnak elő a bakterioplanktonban.

Tavakban a felsőbb vízrétegek gyorsabb felmelegedése következtében a tavaszi időszaktól kezdve stabil rétegződés jöhet létre, vagyis a felsőbb meleg zóna alatt hideg zóna található. A kettő határán a hőmérséklet nagyon gyorsan csökken, ezért ezt a szűk övezetet „metalimnionnak”, ill. a hőmérsékleti ugrás rétegének nevezzük. E rétegződésnek rendkívül nagy biológiai jelentősége van. A felső meleg és még jól megvilágított, ún. „epilimnion” a fitoplankton produktív zónája, míg a hideg fényt szegény „hipolimnion” a heterotróf mikroorganizmusok hatóterülete, ahol a lebontó folyamatok uralkodnak.

A *neuszton* sajátos összetételű mikrobaközössége a nyugodt vizek közvetlen felületén hosszabb-rövidebb ideig, de mindenképpen átmeneti időtartammal észlelhető. Faji szerkezetét még kevéssé tanulmányozták, bár mindenféle vizekben egyetemes előfordulásának tételezhető fel. A vizek felszínén szerves anyagok, szervetlen vegyületek jelentős

koncentrációt érhetnek el, mely akár 300-szorosan is meghaladhatja a belső, több méteres vízrétegekben észlelt értékeket.

Az altalajvizek általában csíraszegények. A különböző filtrációs hatású és kemizmusú geológiai rétegekből származó altalajvizek mikrobiotája kvalitatív és kvantitatív különbségeket árulhat el. Például a kőolajtartalmú kőzetek területein az altalajvizekben szénhidrogénbontó baktériumok nagy számban fordulnak elő.

A forrásokban az altalajvizek baktériumain kívül további fajokat találhatunk. A vas tartalmú forrásvizekben vasbaktériumokat, a kénes forrásokban kénbaktériumok a gyakoriak. A termálvizekben még 90 °C-nál is előfordulnak *termofil* baktériumok. A tápanyagszegény források baktérium tartalma általában csekély, legfeljebb néhány ezer/ml. A tápanyaghiány miatt a sejtek gyakran degeneráltak, zsugorodottak. A folyókban, patakokban a valódi autochton vízi baktériumok száma általában kevesebb, mint az állóvizekben.

Ami az állóvizeket illeti, mérsékelt és a boreális klímazóna tavaiban a nem spóráképző pálcikák uralkodnak. Az eutróf tavakban a spóráképzők ritkán haladják meg az összes mikrobaszám 10%-át. A mezotróf tavakban gyakoribbak, számuk 20-25%. Legközönségesebbek a disztróf tavakban, ahol a nem spórák felett számbeli dominanciára juthatnak. Sok tóban a Gram-negatív baktériumok dominálnak, néha 95%-ban.

Az eutróf tavak hipolimnionjának még kielégítően megvilágított anaerob zónájában fotoautotróf baktériumok szaporodnak.

Az oligotróf tavakban a baktériumok direkt meghatározásokkal mért száma általában 50-200 ezer/ml, míg az eutrófokban néhány százezertől néhány millió lehet. A lemezöntéses módszerrel kapott értékek jóval kisebbek. A tiszta tavakban a legmagasabb baktériumszámot gyakran a

fitoplankton legintenzívebb tápanyagtermelésének idejében észlelik, vagyis vagy tavasszal, vagy az ősz kezdetén, illetőleg késő nyáron.

A sós tavak mikrobiotája fajszegény, de nagy sejtszámú. A sókoncentrációnak és a sók összetételének döntő biológiai hatása van. Nagy sókoncentrációknál általában halofilek élnek, míg a sótoleránsok száma csekély. Az extrém halofilek szaporodási optimuma 2 és 30% sótartalomnál van. Az ilyen mikrobák általában vörösen pigmentáltak.

A nyílt tengereknek sajátos összetételű tengeri mikrobiotája van. Ezek általában halofil baktériumok, melyek optimális szaporodásukhoz nátrium-kloridot igényelnek. Legjobban 25-40‰ sótartalomnál tenyésznek, míg édesvízi közegben nem vagy csak alig. A valódi tengeri baktériumok optimális sókoncentrációja a tenger sótartalmához áll közel. Nátrium igényük sejtjeik anyagtranszportjával lehet kapcsolatos. Mindemellett tengervízkezegekben jobban szaporodnak, mint izotóniás NaCl-oldatokban. Megjegyzendő, hogy a mérsékelten halofilek optimuma 50-200‰, az extrém halofileké 200-300‰ között van. Vannak azonban a tengerekben és édesvízi kezegekben is egyaránt szaporodni képes halotoleráns baktériumok is. Ez utóbbiak inkább a partközelen fordulnak elő, és jelentőségük a nyílt tengerben csekély.

A tengeri baktériumok többsége (80-90%) Gram-negatív, és aktívan mozog. 70-80%-uk csillókkal rendelkezik. A tengervízben a spóráképzők is szerepet játszanak, fontosak azonban az üledékekben. A tengeri iszapból a *Bacillus* genus sok fajtát izoláltak már. Ugyanitt *Clostridium*ok is előfordulnak. A legtöbb tengeri baktérium fakultatív anaerob, mindamellett inkább oldott oxigén jelenlétében, mint anélkül szaporodnak. A tengerben kevés az obligát aerob, és még kevesebb az obligát anaerob. Általában sokkal lassabban szaporodnak, mint a teresztrikus talajmikrobák. Talajszuszpenzióval beoltott agarlemezek

a kolóniák számát általában már 2-7 nap inkubáció után megszámlálhatjuk, míg a tengervízzel beoltottakon csak 14 nap után. A legtöbb tengermikroba nagyon csekély tápanyag-koncentrációt is hasznosít. Jellemző rájuk a *paleomorfizmus*, azaz az ősi formák, sejtstruktúrák megőrzése.

Többségük 0-4°C között is szaporodik, de hőmérsékleti optimumuk gyakran 18-22°C a hidegkedvelők száma a tengerekben igen nagy: elsősorban *fakultatív pszichrofilek* ezek, melyek 0°C-on jól szaporodnak, de optimumuk 20°C-on, vagy a felett van. Ez a tény azzal függhet össze, hogy a tengerek vizének kereken 90%-a állandóan 5°C alatti hőmérsékletű.

A tengeri baktériumok között a *barotoleránsok* száma is igen nagy. A proteolitikus aktivitású baktériumok aránya a tengeriek között általában nagyobb, mint a talaj- és édesvízi mikrobák között. Amíg a tengeri denitrifikálók fajszáma viszonylag nagy, addig a szulfátredukálóké már kevésbé. A tengeri baktériumok rendszertanilag nem egységesek. Ugyanazon genushoz gyakran tartoznak édesvízi-, talaj- és tengeri baktériumok.

Szennyvizek

A szennyvíztisztítás ma már minden iparosított országban anyagi áldozatok révén az ésszerű vízgazdálkodás és a környezetvédelem szempontjainak figyelembe vételével történik.

A szennyvíz megjelölés gyűjtőfogalom. Általában három szennyvíztípust különítenek el:

- Háztartási szennyvíz
- Ipari szennyvíz
- Mezőgazdasági szennyvíz

Az első a háztartásokból kikerült használt vizet jelenti, mely emberi ürüléktől konyhai hulladék anyagokon át a mosószeresig mindent tartalmazhat. Az ipari szennyvizek az előállító iparág szerint nagyon eltérő összetételűek lehetnek. A mezőgazdasági szennyvizek különösen az állattenyésztés fejlesztésével és a mezőgazdaság kemizálásával egyre nagyobb volumenben jelentkeznek. A szennyvizekben a legkülönbözőbb mikroorganizmusok képesek szaporodni, és a szennyananyagokat ásványosítani. Ezeknek főleg a mennyiségi dinamikáját és tevékenységük végső kihatását ismerjük, míg a közreműködő egyes baktériumfajokról és metabolizmusukról sajnos csak kevés ismeretünk van.

A szennyvizek kezelése az alábbi legfontosabb célok érdekében történik:

- A szervesanyag-tartalom mineralizálása, vagyis a BOI csökkentése.
- Ásványtalanítás
- A patogén vírusok, baktériumok és élesztők inaktiválása

A szennyvíztisztítás lehetőségei

A szennyvíztisztításban alkalmazott módszerek nagyon szerteágazóak abból az okból kifolyólag, hogy az egyes ipari ágazatok, eljárások különböző mennyiségű és minőségű szennyvizet „termelnek”. Ezeknek a szennyvizeknek a tisztítása mind más és más módszert, eljárás igényel.

A szennyvíztisztításra alapvetően a következő módszerek állanak a rendelkezésre:

- eleveniszapos tisztítás
- csepegőtestes tisztítás
- szennyvíztisztítás jól levegőzött víztározókban
- szennyvíziszapból történő biogáztermelés.

A legelterjedtebb módszerről, az eleveniszapos tisztításról bővebben

Az eleveniszapos tisztítóberendezésben gömb és pálcika alakú, úgynevezett pehelyképző, illetve fonalas és csavar alakú, nem pehelyképző **baktérium**fajok fordulnak elő. Az iszappelyhek alakja a közel gömb alakú és a szabálytalan forma között változhat. Teljesen gömb alakú pelyhek nincsenek, ezért minden pehely, ami többé-kevésbé gömb alakú, lekerekítettnek tekinthető. Csak akkor mondjuk az alakra, hogy szabálytalan, ha a gömbalaktól nagyon eltér, különböző kinövések találhatóak rajta. A fonalas baktériumok jelenléte eredményezheti ilyen pelyhek kialakulását, melyek mintegy vázként szolgálnak a baktériumok megtelepedésére.

Az *eleveniszapos pelyhek* túlnyomó részében szerves és szervesetlen részecskék egyaránt megfigyelhetők. Ezekre, a befolyó szennyvizekkel a levegőztető medencékbe kerülő részecskékre települnek a baktériumok a pelyhek képződés során. A szerves részeket rostos szerkezetükről ismerjük fel, a szervesetleneket pedig arról, hogy a mikroszkópi preparátumban világos színűek, átlátszóak.

Egy jól működő eleveniszapos berendezésben majdnem minden baktérium iszappehelybe épült. A biomassza növekedése a pelyhek nagyobbodásában jelentkezik. A folyadékfázisban azonban mindig vannak *szabadon lebegő baktériumok* is. Utóbbiak mennyiségének növekedése a berendezés működésében bekövetkező romlásra hívja fel a figyelmet: nagy terhelés, kevés oldott oxigén, sok tápanyag, mérgező anyagok jelenléte. A nem megfelelő levegőztetés miatti oxigénhiány egyrészt közvetlenül növeli a szabadon lebegő baktériumok számát, másrészt az a pelyhekben levő aerob baktériumok pusztulása miatt is növekedhet.

Fonális mikroszervezetek majdnem minden eleveniszapban előfordulnak., hozzátartoznak annak normális állományához. Tömeges elszaporodásuk azonban komoly gondot jelent, mert olyankor iszapfelfúvódás, iszapelúszás következik be. A jelenséget nem csak baktériumok okozhatják, hanem egyes gombafajok is kiválthatják. Közvetlen kiváltó oka lehet a berendezés szerves anyagokkal való túlterhelése, bőséges oxigénellátottsága is.

Az eleveniszapban élnek olyan jellegzetes baktériumfajok is, amelyek fénymikroszkóppal könnyen meghatározhatók, és jól felhasználhatók a tisztítóberendezés működésének jellemzésére. Ezek közé tartoznak a következő fajok: *Zooglea ramigera*, *Zooglea filipendula*, *Zooglea uva*. Telepeik egyféle sejtből állnak, életfeltételeik, megjelenésük az eleveniszapban közel azonos. Alakjuk jellegzetes, ami vagy az emberi kéz

ujjaira, vagy faágra hasonlít, de gömb alakú is lehet. A sejteket nyálkaréteg veszi körül, ami összetartja azokat. Elszaporodásuk esetén a levegőztető medencében nagyméretű iszapelyhek találhatóak, amelyek sok vizet köznek meg. Az ilyen iszap rendszerint nehezen ülepszik és könnyen elúszik a medencéből.

A **kékmoszatok**nak olyan különleges sajátossága van, melyek létét a legszélsőségesebb életfeltételek között is lehetővé teszi. Megjelenésük és elszaporodásuk a környezeti tényezők gyors és szélsőséges változását árulja el: szennyvíz hatása, hőmérséklet-emelkedés, sótartalom növekedés. Fellazíthatják a pehelyállományt, ezért iszapelúzás következhet be. A levegőztető medencében hat nemzetségük képviselőit írták le: *Anabanea*, *Lyngbya*, *Nostoc*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Spirulina*.

Az **ostoros egysejtűek** az állat és a növényvilág határán állnak. Általában nagyobbak a baktériumoknál. Az oldott anyagokat képesek közvetlenül is felvenni, ugyanakkor baktériumfalók is. A levegőztető medencékben élő fajaik közül a legtöbb az erősen szennyezett, nagy terhelés indikátora. A tisztítóberendezés üzemelésének kezdetén egyedszámuk mindig nagy, ezt követően azonban háttérbe szorulnak. Üzemelés közbeni elszaporodásuk erőteljes rothadási folyamatok megindulását, meglétét jelzi. Ennek oka lehet a túl nagy tartózkodási idő, nem megfelelő keveredés, szerves anyagok általi túlterhelés, rossz oxigénellátás.

Az eleveniszap élőlényei közül a baktériumok mellett a **csillós véglények** (protozoák) a legfontosabbak. Testalakjuk igen változatos,

részaránytalan vagy csavarmenetes szimmetrikus. Többségük szabadon él, de nem ritkák a helyt ülő, telepes fajok sem. Az eleveniszapban lévő fajaik többsége baktériumfaló, de előfordulnak ragadozók is. Jelenlétük, hiányuk, egyedsűrűségük az eleveniszapban rendkívül fontos, elárulja annak állapotát, működését. Hiányukból mérgező anyagok jelenlétére, oxigénhiányra, a rendszer túlterheltségére, berothadásra következtethetünk, ami egyes baktériumok tömegszaporulatával járhat együtt. A helybenülő és a szabadúszó fajok arányából a medence hidraulikai viszonyaira következtethetünk. A szabadúszó fajok a nagy turbulenciát nehezen bírják. Nagyobb állományaik általában optimális körülményekre utalnak, míg a kisebb és egyhangúbb faji összetétel rosszabb működést indikál.

A talaj mikrobiológiája

A talajképződés szerves és szervetlen nyersanyagai

A bioszférában bárhol, ahol új kőzetfelületek jelennek meg, azokon a talajképződés megindul, ha:

- az élő szervezetek működéséhez szükséges hőmérséklet és nedvesség együtt van, és
- a térségben a talajképző szervezetek számára energia- és elemforrásként szereplő szerves anyagok szintézise, és ebből kialakult holt szerves anyagok akkumulációja folyik, ill. oda ilyen anyagok külső forrásból beáramlanak.

Ahol ez a két feltétel nincs meg, ott talaj nem jöhet létre, és csupán kémiai és fizikai mállástermékek halmozódnak fel. A talajképződésnek tehát a kőzetekbe zárt ásványok a szervesetlen, az élőlények elhalt maradványai pedig a szerves kiinduló alapanyagai. Mindezekből a talajképző folyamatok – amelyek maguk is biotikus és abiotikus folyamatok összetett hálózata – talajmátrixot hoznak létre, ami szerkezetében és összetételében a kiinduló nyersanyagoknak nem csak keveréke, hanem minőségileg új egysége.

A talajképződés szerves alapanyaga: az erdei avar (ill. egyéb növényi kultúrák szerves anyagai), és az annak lebontásában részt vevő élőlények

Az avar lebomlása lényegében két fő történéssorozatra bontható: az avar növényi maradványainak egy része viszonylag gyorsan ásványosodik, és az így anorganikus kötésbe került elemeket a növények újra felvehetik; más része „talajosodik” és az erdőtalaj megújuló, de csak hosszú évek után rendkívül lassan mineralizálódó mátrixát, a talaj humuszanyagait képezi. Az erdők fás növényi anyagainak lebomlása, ásványi tápelemeik reciklizálása lassabban játszódik le, mint pl. a füves vegetációké.

Az avar lebomlásának két fő szakasza van: a *fizikai destrukciót* követi a *kémiai degradáció*. Az elsőért főleg a talaj mezo- és makrofaunája (ászkarák, ezerlábúak, stb.), a másodikért a mikrobák a felelősek.

Fizikai destrukción a holt szerves anyagok, pl. a lehullott levelek, ágak felaprítását, finom méretű felaprózását értjük. Az ízeltlábúak (ászkarák, ezerlábúak, légylárvák, ugróvillások, stb.) rágásukkal felaprítják az elhalt nagyobb szerves növényi maradványokat, amelyek

bélcsatornájukon áthaladva és csak kevéssé megváltozva (emésztve), mint ürülék kerülnek vissza a talajba.

Ilyen állapotban, már felaprózott, mikroszkópos méretű szerves struktúrákként a baktériumok és gombák könnyebben támadják és ásványosítják őket. A felaprítás a szerves maradványok rágásával kezdődik, ezt követi az összeőrölt anyag béltranszportja, majd a leadott ürüléknek újabb és újabb faunaelemek (koprofágok = ürülékevők) révén megvalósuló ismételt fogyasztásával, aprításával folytatódik. Számos vizsgálat igazolja, hogy ha a lehullott leveleket a talaj felszínére olyan lyukbőségű nylonszita hálóbba zárva helyezük, amelyen az avart aprító faunaelemek nem hatolnak át, a mikrobiológiai kémia lebontás (ásványosítás) – előzetes felaprítása nélkül – csak nagyon vontatottan halad előre. A felaprításban az avartakaró és a humuszszint (-horizont) gerinctelen állatvilágának tagjai vesznek részt.

A talaj szerves anyaga lebontásában részt vevő élőlények: az edafon

A talaj élővilágának összességét a magyar származású talajbiológus, Roul Francé (Francé Rezső) nyomán *edafonnak* nevezzük. A nyugati szakirodalomban a talajbióta (soil biota) kifejezés szolgál valamennyi talajlakó szervezet összefoglaló megjelölésére.

A talajokban – még a növénytakaró teljes hiányában is – rendkívül bonyolult faji összetételű életközösségek vannak, amelyek nagyon különböző biokémiai teljesítőképességű szervezetek ezreiből és millióiból tevődnek össze. A talaj anyagának részecskéin, nagyrészt adszorbeált állapotban, inaktív mikroorganizmusok (baktériumok, gombák, élesztők, protozoonok, algák, stb.) csillagászati számokkal kifejezhető tömegei vesztegelnek. Ezek egy rendkívül sokoldalú biokémiai

kapacitás nyugvó potenciálját képviselik, melynek csak egy csekély része realizálódik, akkor, amikor a talajba jutott és számukra értékesíthető anyag- és energiaforrásokkal kerülnek érintkezésbe. Aktivitásuk azonban csak rövid ideig tart, mivel az energiaforrások fogytával újra nyugalmi állapotba térnek, s ezen ciklusok vég nélkül követik egymást.

A talajbiótának tömeg szerinti legnagyobb frakcióját a mikroorganizmusok adják. Rajtuk kívül a talajok élőlényeinek közösségi anyagcseréjében számtalan gerinctelen és gerinces állat is részt vesz, bár ezek egyedszáma és területegységre számított összes tömege jóval csekélyebb. Alapvető megállapítás, hogy az edafon a talajfolyamatokban nem a tömege arányában játszik szerepet. Fontossága ennél összehasonlíthatatlanul nagyobb, mert tagjai a katalizátor szerepét töltik be.

Az avartakaróban, ill. a humuszhorizontban tevékenykedő és a talajképzésben fontos szerepet játszó flóra- ill. faunalemek főbb csoportjai a következők:

Mikroflóra:

Az edafon biomasszáján belül a legnagyobb jelentőséggel a mikroflóra szervezetei bírnak, tevékenységük a talaj biokémiai folyamataiban meghatározó. A mikroflóra biomasszája a talajban folyamatosan változik, növekszik és pusztul, a talajba jutó szerves anyagok mennyisége és minősége, valamint a környezeti tényezők függvényében.

A mikroflóra mennyisége a talaj felső, könnyebben bontható szerves anyagokat nagyobb mennyiségben tartalmazó rétegeiben,

szintjeiben a legnagyobb, s a talajban lefelé haladva a mélységgel csökken. Vertikálisan a talajmikrobák összetétele is változik, míg felsőbb talajrétegekben inkább az aerobok, addig a mélyebb, rosszabbul átlevégőzött, esetleg már a talajvíz által is érintett régiókban inkább anaerobok uralkodnak. Hazai talajainkban 90 cm-es mélységben már számos aerob baktérium nem mutatható ki, így többek között az aerob cellulóz és pektinbontók, valamint a nitrifikáló baktériumok sem.

Baktériumok:

A mikroszervezetek közül is kiemelkedő jelentőségűek. Kedvező körülmények között testtömegük 100-1000-szeresének megfelelő anyagmennyiséget tudnak egy nap alatt lebontani. A baktériumok a talajban csaknem minden felépítő és lebontó folyamatban részt vesznek, egyes elemek, mint pl. a N körforgalmában szerepük majdnem kizárólagos, míg más elemek (pl. P, Fe) esetében is kiemelkedőnek nevezhető.

A talajok legfontosabb baktériumai a *Bacillus*, *Clostridium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Cytophaga*, *Flavobacterium*, *Arthrobacter* és *Spirocheta* nemzetségek fajai közül kerülnek ki.

Aktinomiceták:

Ezeknek a rendszertanilag a baktériumokhoz legközelebb álló ún. *sugárgombáknak* a telepmorfológiája hasonló a mikroszkópikus gombákéhoz, innen ered nevük is. Legelterjedtebb fajaik a *Streptomycesek* és *Actynomycesek* közé tartoznak.

A sugárgombák elsődleges funkciója a szerves anyag és ezen belül főleg a növényi sejtfalból származó cellulóz, és más, a lebontásnak ellenálló makromolekulák bontása. A talajok jellegzetes illata főleg ezen sugárgombák jelenlétének tudható be.

Gombák:

Heterotróf, aerob táplálkozású mikroszervezetek, melyek elhalt növényi vagy állati szöveteket hasznosítanak. A gombasejtek fonalszerű micéliumokat alkotnak, melyek a talajokat sűrűn behálózó hifafonalakká állnak össze. Ezen szétterjed hálózat gyakran és jól megfigyelhető részét képezik a föld felszíne feletti, a szaporodást szolgáló termőtestek, a hagyományos köznyelvben gombának nevezett részeik is. Biokémiai szempontból kevésbé változatosak, mint a baktériumok, de jelentőségük a lignin majdnem kizárólagos bontási képessége miatt óriási. Megjegyezzük, hogy sok esetben a gombák úgy is képesek a lignin bontására, hogy annak anyagait közvetlenül sem energia- sem anyagforrásként nem hasznosítják, a bontásuk által ilyenkor mindössze jobban hozzáférnek egyéb hasznosítható szerves anyagokhoz.

Savanyú talajokban a mikroflórán belül a mikroszkópikus gombák dominálnak, miközben a baktériumok és sugárgombák fokozatosan visszaszorulnak. Utóbbiak elsősorban a semleges és lúgos kémhatás mellett élveznek előnyöket.

A talajok mikroszkópikus gombái közül a legfontosabbak a *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Penicillium* és *Rhizopus* nemzetségek fajai közé tartoznak.

Cianobaktériumok és algák:

Főleg a talajok felső pár centiméterében előforduló, fotoszintetizáló élőlények. Mint autotrófok, széndioxidot fixálnak és eközben molekuláris oxigént termelnek, amivel a talajok szerves anyag tartalmát növelik és jó levegőzöttségét segítik elő. A 10-20 cm-es talajmélységben esetenként még grammonként 10ezres nagyságrendben fordulnak elő.

Mikro-, Mezo- és Makrofauna:

Fontos kiemelni, hogy ezek a gerinctelen állatok testméretükhöz viszonyítva igen nagy tömegű összerágott, nyers növényi maradványt fogyasztanak és hajtanak át bélcsatornájukon, ill. ürítenek fécesz alakjában, maguk azonban ezen szervesanyag-őrleményből csak keveset emésztenek meg, gyakran mindössze néhány százalékot hasznosítanak. Úgy tűnik, hogy ezen állatoknak a talajbiológiai jelentősége éppen szakadatlan rágó tevékenységükben és alig emésztett, de finomra aprított szerves törmelékeket tartalmazó ürülékprodukción rejlik.

Az avarlakó állatvilág tagjai között természetesen nemcsak a holt szerves anyagok fogyasztására specializálódtak vannak, hanem ragadozók is, amelyek mintegy szabályozói a populációsűrűségnek. Tevékenységükkel a „korhadékevők” népességét fokozatos megújulásra, szaporodásra készítetik. Ez azért nagyon fontos, mert a gyorsan előregedő baktériumok, gombák már nem, vagy alig szaporodnak, a szerves anyagok kémiai lebontása lelassul. Egysejtű mikroszkópos méretű állatok, a talaj baktérium- és gombaközösségeit fogyasztva és ritkítva azokat megújuló intenzív szaporodásra készítetik, ami egyúttal a kémiai bontást

is magas szinten tartja. A mikroorganizmus közösségeinek ez a csíraszámában is mérhető mennyiségű fluktuációja egyúttal mindig újabb és újabb, eltérő és megújuló biokémiai teljesítőképességű mikrobafajok előtérbe kerülését vonja maga után. Ezek a mindenkori előző, megritkított mikrobaközösségek által félbehagyott ásványosítást folytatják. A baktériumokat faló egysejtű állatok túlzott aktivitását viszont a ragadozó egysejtű állatok korlátozzák, amelyek az előbbiek számát, a mineralizációs folyamatokat még károsan nem érintő szintre süllyesztik.

Az e csoportokba tartozó, igen nagy számú élőlények közül csak a legjelentősebbeket, ill. eddig legjobban megismerteket emeljük ki:

- Az egysejtű, élelciklusuk legalább egy szakaszában heterotróf táplálkozású állati egysejtűek (*Protozoa*) vizsgálata igen nehéz, mert elhalt egyedeik a talajokban azonnal megsemmisülnek, a bennük uralkodó ozmotikus nyomás ugyanis a lüktető üröcske leállása után rövidesen szétpukkasztja a sejtfal nélküli sejtjüket. Jelentőségük a baktériumok és egyéb mikroorganizmusok ragadozóként való pusztításában, azok számának kordában tartásában van.
- A fonálféreg (*Nematoda*) a talajokban széles körűen elterjedtek. Fő szerepük szintén a többi mikroorganizmussal történő táplálkozásuk, így a mikrobák számának korlátozása. A növényi parazita fonálféreg érzékeny veszteségeket okozhatnak kultúrnövényeinkben, csemetekertekben is.
- Az ikerszelvényesek vagy ezerlábúak (*Diplopoda*) nedvességkedvelő, avarlakó, bomló növényi anyagokat fogyasztó és felaprózó szervezetek.

- A százlábúak (*Chilopoda*): az erdei avarban élő, gyors éjjeli ragadozók, meleg- és nedvességkedvelők, az avar faunájának ritkításával a biológiai egyensúlyt és az avarevők szelekcióját szabályozzák.
- Az ugróvillások (*Collembola*) az előbbieknél jóval kisebb testű, de tömeges előfordulású avar-, ill. talajlakó, hűvös, páratelt levegőt igénylő, főleg bomló növényi anyagokkal táplálkozó állatok, szerepük a talajosodás folyamatában jelentős.
- A földigiliszták (*Lumbricus terrestris*) a talajképző folyamatok talán legfontosabb biológiai tényezői. Fogyasztják az avar szerves anyagait, ezeket felaprítva keverik az ásványi talaj anyagával, a humuszos feltalajban (szintben) szerteágazó és ásványi-szerves komplexekben gazdag ürülékükkel kitapétázott járatrendszereket építenek, ezzel a talajoknak kitűnő morzsás, szivacsos szerkezetet adnak. Az ún. koprogén talajanyag stabilitása a vízerózióval szemben is igen nagy.
- Televényférgék (*Enchytreidae*): A 30-40 mm hosszú, fehér, sárgás ill. vöröses színű televényférgék a földigilisztákéhoz hasonló tevékenységet végeznek, egyes talajokban a földigilisztákénál jóval nagyobb szerepet betöltve. Számuk rendkívül nagy lehet, elérheti a milliárdos nagyságrendet hektáronként. Járataikkal a talajt keresztül-kasul fúrják, lazítják, emellett a növényi maradványok bontásában is részt vesznek.
- Szárazföldi ászkarák (*Isopoda*): ezek az ászkák lapos testű, párás és nedves környezetet igénylő éjjeli állatok, a lehullott avart fogyasztják és annak felaprításával egyrészt az ásványosítást serkentik, másrészt humuszos talajjá alakulását is gyorsítják.

- Talajlakó atkák: kis termetűek, gyakoriak az avarban és a talajban, sok közülük a lehulló nedves lombot, korhadó növényi anyagokat fogyasztja: ezek ürüléke sötét, humifikáló szerves anyagokban gazdag; más fajok ragadozók, ezek a kisebb fajok túlzott elszaporodását, ill. elöregedését akadályozzák meg.
- A talajban előforduló légylárvák típusok: ezek között több is tömeges gyakoriságú lehet. A lehullott falevelek gyors destrukciójáért felelősek.

Gerinces talajállatok

Az ún. nagy testű állatok (nyulak, róókák, egerek, ürgék, pockok, borzok, vakondok, stb.) életük során nagy talajmennyiséget mozgatnak meg és kevernek össze, tevékenységük ezért a talajműveléshez hasonlítható. Amellett, hogy sok növényi anyagot dolgoznak be a talajba, járataikkal lazítják azt, javítják a szellőzését és vízgazdálkodását.

Kiemelkedő fontosságú képviselőik a rágcsálók (Rodentia), közülük is főleg a vakond, mégpedig különösen mezőségi talajainkban. Ez az aprócska állat igen gyorsan dolgozik, naponta mintegy 10-20 m-nyi új járatot is képes készíteni, s alagútrendszerének teljes kiterjedése elérheti a 400-2000 m²-es területet is.

Az avartakaró tömege és bomlási sebessége

A lebontó szervezetekre az erdőkben háruló feladat nagyságrendjéről néhány kísérleti eredménnyel kaphatunk képet: az évi avarprodukciónak különösen a trópusi esőerdőkben jelentős, így pl. Panamában kevert

állományú erdők alatt átlag $11.000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{év}^{-1}$ avarprodukciónak észleltek, amiből $5800 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{év}^{-1}$ az avarlevél frakcióra esett. A mérsékelt égöv erdeiben az évi holt szervesanyag-produkció lényegesen kisebb.

Hazai erdeinkben (Gere, 1971) $760\text{-}3160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{év}^{-1}$ értékekkel számolhatunk, amely mennyiség a talajon fekvő, korábbi évekből származó de még el nem bomlott avarral együtt mintegy $1531\text{-}6693 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ mennyiséget ad összegül. Dudich mérései szerint ezen avarmennyiségnek mintegy 40%-a, más szerzők szerint akár ennél nagyobb hányada is áthaladhat a makrofauna bélcsatornáján, eljutva a koprogén fázisba.

A talajba kerülő szerves anyagok típusai, lebomlásuk

A talajban lakó élőlények tevékenységének eredménye a szerves anyag lebomlása, ásványosodása ill. humifikációja. A kémiai átalakításokat főleg a mikroszervezetek végzik, különböző enzimeik segítségével. Ezek az enzimek csak egyes vegyületcsoportok átalakítására, bontására alkalmasak. A talajba kerülő szerves anyagok a lebontással szemben különböző ellenálló képességgel rendelkeznek, ennek sorrendje a növekvő ellenállás szerint:

Cukrok < keményítő < fehérje < nyersfehérje < hemicellulóz < cellulóz < zsírok < lignin.

Az egyes növények maradványai különböző mennyiségeket tartalmaznak ezekből a szerves anyagokból, tehát különböző sebességgel bomlanak le: a fenyőtűk lassabban (9-10 hónap alatt), a lágyszárú növények és a lombos fák levelei gyorsabban (8-9 hónap alatt).

A szerves anyagok lebomlásában a lényeges mikrobiológiai folyamatok közül a szén- és nitrogénvegyületek átalakítása a legfontosabb. Ezeknek a szerves vegyületeknek a mineralizálása általában két módon mehet végbe, aerob és anaerob módon. Ezen folyamatok egyúgyazon talaj különböző pórusaiban, mikro-terekben egyidőben, egymással párhuzamosan is lejátszódhatnak. Közülük az aerob lebontási folyamatok volumene jóval nagyobb, de egyes vízzel telt talajokban az anaerob folyamatok jelentősége lehet a döntő.

A növényi maradványok főleg cellulózt, hemicellulózt, keményítőt, lignint és pektint tartalmaznak, míg az állati maradványok nitrogénmentes szerves szénvegyületei közül a zsírok a legjelentősebbek.

Cellulózbontás:

Lebontásában a baktériumok, sugárgombák és mikroszkopikus gombák egyaránt részt vesznek. A bontás lényegében két enzim, a celluláz és a cellobiáz segítségével történik.

A leggyakoribb aerob cellulózbontó baktériumok a *Pseudomonas*, *Cellvibrio*, *Cellfalcicula*, *Cellulomonas* és *Sporocytophaga* nemzetségekhez, míg az anaerob cellulózbontók legtöbbször a *Clostridium*-okhoz tartozik.

A cellulóz biodegradációját a talaj kémhatása nagymértékben befolyásolja. Savanyú talajokban elsősorban *Aspergillus* és *Penicillium* gombafajok végzik, s csak kisebb szerepűek a sugárgombák és baktériumok. Semleges kémhatású talajokban viszont a baktériumoké a főszerep, közülük is kiemelkedőek a *Cellvibrio* fajok.

Hemicellulózok bontása:

A szénkörforgalom szempontjából a xilánnak van nagyobb jelentősége, mivel a gabonafélék szalmája 25-30 %-ban is tartalmazza. Lebontásukban elsősorban az alacsonyabb rendű penészgombák (*Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* fajok), baktériumok és aktinomiceták vesznek részt.

Pektin bontása:

A növényi sejtek legfontosabb ragasztóanyagát jelentő pektin lebontásáért elsősorban anaerob baktériumok (pl. *Clostridium felsineum*, *Cl. butyricum*) felelősek, főleg vajsavas erjedés révén.

Az aerob mikrobák közül *Bacillus* nemzetségű baktériumok, *Aspergillus* és *Penicillium*, *Mucor* és *Cladosporium* nemzetségű gombák képesek a pektin bontására.

Lignin bontása:

A lignin biológiai bontása általában lassabban történik, mint az előbbi növényi anyagoké. Legnagyobb szerepe a bazídiumos gombáknak van, míg kisebb jelentőséggel bírnak a lignin bontására szintén képes *Bacillus*, *Actinomyces* és *Streptomyces* fajok.

Zsírok bontása:

Degradációjukra főleg a *Pseudomonas*, az *Achromobacter* és a *Flavobacterium*, valamint az *Aspergillus*, *Penicillium* és az *Oidium* mikroszkópikus gombák képesek.