



**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

## **TALAJBIOLÓGIA**

### **(oktatási segédlet)**

Ezen oktatási segédlet a Soproni Egyetem Erdőmérnöki Karának nappali tagozatos számára C-típusú fakultatív tantárgy anyagaként, valamint a Talajtani (Erdészeti Termőhelyismerettani) Szakmérnöki szakirányú továbbképzési szak hallgatói számára a *Talajbiológia* c. tárgyhoz történő felhasználásra készült.

A jegyzet elkészítésének alapját az Eötvös Loránd Tudományegyetem Mikrobiológus Szakirányú Továbbképzési Szak oktatási segédletei és tananyagai, valamint Szabó István Mihály „*Az általános talajtan biológiai alapjai*” c. könyvének (Mundus Kiadó, Bp., 2008) idézett kivonatai adták.

Dr. Heil Bálint  
egyetemi docens

Sopron, 2022

## Tartalomjegyzék

A mikrobiológia és talajbiológia oktatásának erdészeti vonatkozásai.....	3
A talaj mint anyag- energiaforgalmi rendszer.....	16
Példák a talajokban lejátszódó fontosabb biológiai reakciókra.....	37
Talajenzimek.....	63
A növények és a termőtalaj anyagforgalmi egysége.....	75
A mikrobák szerepe a talaj képződésében és fejlődésében .....	88

## A mikrobiológia és talajbiológia oktatásának erdészeti vonatkozásai

Ahogy a mikrobiológia ma is egy számos tudományágot átható diszciplína, úgy a hazai erdészeti felsőoktatás múltját is hosszú ideje végig kísérte. Igaz, hogy megjelenése az erdészeti tudományok területén jórészt nem önálló, valamely egyéb tantárgy anyagához kapcsolódóan oktatása mégis napjainkig fennmaradt.

A mikrobiológia erdészeti vonatkozásai kapcsán mindenkinek először **Fehér Dániel** neve juthat eszébe. A korábbi selmecebányai erdészeti akadémia Trianonhoz köthető Sopronba költözése után, 1923-tól ő vezette az akkor Növénytani Tanszéket, előbb főiskolai, majd rendes tanárként. A József Nádor Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetembe való beolvasztás alkalmából az 1933/34-es tanévtől bevezetett új tanterv szerint Fehér professzor az *Általános növénytan* és *Részletes növénytan* tantárgyakon kívül a 4. félévben heti 1 óra előadást tartott az „*Erdőtalaj mikrobiológiája*” címen, mely tárgyat az 1941/42-es tanév tantervi változásai után is megtartottak. A tárgy keretén belül foglalkoztak a mikrobiológia és a talaj mikrobiológiájának fejlődésével, az erdőtalajjal, mint élettérrel, az erdő talajában élő mikroorganizmusokkal, a szén, nitrogén, foszfor, kén, vas és a többi elem mikrobiológiai körfolyamatával a talajban, a talajlégzéssel, a hőmérséklet és a víz szabályozó szerepével, az R törvény mikrobiológiai vonatkozásaival, a fák gyökerének gombákkal és baktériumokkal való együttélésével, az erdőtalaj mikrobiológiájának jelentőségével a gyakorlati erdőgazdaság szempontjából.

Az erről az időszakról fennmaradt írásos emlékek azt bizonyítják, hogy bár a nemzetközi hírű professzor elsősorban a kutatómunkát szerette,

mégis oktatóként is igen közkedvelt volt, nagy tiszteletnek örvendett a hallgatóság soraiban. A vezetésével beindult élettani, mikrobiológiai kutatások nemzetközi visszhangra találtak, számos külföldről érkező doktorandusz munkáját irányította, rangos publikációk sorában beszámolva eredményeikről. A professzor önmaga is több sikeres tudományos expedíciót vezetett, így többek között nagy lelkesedéssel kutatott 1936-ben a Szahara forró homokjában a mikrobák életének nyomai után. Fehér professzor munkájának eredményeként a Növényteni Tanszék technikai feltételei is igen jók lettek, számos jól felszerelt laborban folyt a kutatási és oktatási tevékenység. Munkásságának középpontjában kutatóévei első két évtizedében a hazai erdőtalajok biológiai vizsgálata állt, amelyet az 1940-es évektől a mezőgazdasági talajokra is kiterjesztett. Kísérleteket folytatott a talajok szén-dioxid légzésének, a szerves anyag termelésüknek, a főbb tápelemek körforgalmának, a talajban élő baktériumok életének, a biológiai folyamatok időbeli periodicitásának, a moszatflóra és a gombavilág összetételének megállapítására. Oktatói pályafutása során Vági Istvánnal 1931-ben elkészítették „A talajtan elemei” című művet, Mágocsy-Dietz Sándorral elkezdtek megújítani az „Erdészeti növénytan I-II-III.” köteteit (1928-1935), megírta az „Untersuchungen über die Mikrobiologie des Waldbodens” (1933) könyvét, majd Ch. Kilian algéri professzossal közösen kiadták „Recherches sur la microbiologie des sols désertiques” (1939) művüket. Utolsó, nagy műve az 1954-ben kiadott „Talajbiológia” még hosszú ideig képezte alapját a hazai erdészeti talajbiológia oktatásnak.

Az 1940-es évek végén, az '50-es évek elején több tantárgyi reformra is sor került. Fehér Dániel 1946-ban javasolta az Erdőmérnöki Osztály hallgatói számára szóló Termőhelyismerettan tárgy bevezetését, melyet 1950. április 13-án a Reformbizottság elfogadott. A tárgy a talajbiológiát is tárgyalta, igaz csak röviden, mert a növény táplálkozási fejezetet

átengedte a Növénytani Tanszéknek, amely úgyszólván részletesen foglalkozott a talaj biológiai problémáival.

Fehér Dánielt 1952-ben koholt vádak alapján az oktatómunka alól felmentették, és ő munkáját a Magyar Tudományos Akadémia kiemelt tudósaként a Növénytani Intézet keretein belül kialakított Talajbiológiai Kutatólaboratórium vezetőjeként folytatta, egészen 1955-ben bekövetkezett haláláig.

Az Erdőmérnöki Főiskola 1953-ban ismét napirendre tűzte a tanulmányi rend megváltoztatását, ez tartalmazta Dr. Botvay Károly talajtani programját. Ebben a „*Talajbiológia*” már nem szerepelt önálló fejezetként. Mivel a „*Mikrobiológia*” külön tárgyként való oktatása is megszűnt, ezért bővebb a *Termőhelyismerettan* tárgyon belül a mikroorganizmusokkal kapcsolatos fejezet, amely az erdei talajok lebontási folyamatait is tárgyalja.

Az 1957. október 30-i kari ülésen szóba került, hogy ugyan évek óta folyik a „*Mikrobiológia*” című tárgy előadása, de évről évre más-más külső előadókkal. Mivel ez eddig hátráltatta a tárgy kialakítását, ezért kívánatosnak találták egy állandó előadó kinevezését: mégpedig Pántos György tudományos osztályvezetőt, az MTA soproni Talajbiológiai laboratóriumának helyettes vezetőjét. Pántos e tárgyból szerzett kandidátusi fokozatot a moszkvai Timirjazev-Akadémia mikrobiológiai tanszékén, ezért kellő színvonalon tudta ellátni a feladatot. Kinevezték félállású docenssé a Termőhelyismerettani Tanszékre, ahol elnyerte az 1958. novemberében kiírt tanszékvezetői pályázatot. 1960. január 1-től

lett a tanszék vezetője. Ezzel egyidőben az MTA Mikrobiológiai Intézetét a Növénytani Tanszékről áthelyezték a Termőhelyismerettani Tanszékre.

A Tanácsülési jegyzőkönyvekben olvasható, hogy 1959-ben számos új tanterv készítését kezdték meg. A 3. féléves hallgatók tanterve megosztott volt, mivel október 1-től 15-ig a Tanulmányi Erdőgazdaságban fizikai munkát végeztek, majd október 16- és december 19. között más tárgyak mellett a „*Talaj mikrobiológiája*”-t hallgatták heti 2 elmélet, 1 gyakorlati órában.

Az 1960/61-es tanévben a tanszéken oktatott 4 tárgy egyike volt az „*Erdészeti talajmikrobiológia*”. Ennek megalkotója és előadója Pántos György volt, a 4. szemeszterben oktatták, heti 2 elméleti és 1 gyakorlati órában. A tárgy oktatását Pántos azért tartotta fontosnak, mert a talajképződés és a talajtermékenység kialakulása a talajt benépesítő szervezetek élettevékenységének eredménye. A tantárgy célja, hogy a hallgatók megismerjék a talajban élő mikroszervezetek ökológiai igényét, élettevékenységét, ami által lehetőségük nyílik e szervezetek közül az erdészeti gyakorlat számára hasznosak életfeltételeit biztosítani.

Az elméleti órákat 4 gyakorlati foglalkozás egészítette ki, ahol lemezöntéses módszerrel meghatározták a talaj összes mikroorganizmus számát, külön oltási technikákat mutattak be, preparátumokat készítettek. A tananyag összeállításánál ügyeltek arra, hogy összhangban legyen az egyes biológia jellegű tanszékek (Növénytani Tanszék, Erdőműveléstan Tanszék) hasonló anyagával. Így volt elérhető, hogy a hallgatók a tanulmányi idejük alatt egy és ugyanazon alapelvekre felépült rendszertant sajátítsanak el.

A „*Mikrobiológia gyakorlatok*”-at megbízott gyakorlatvezetőként Takáts Tamás, az MTA tudományos segédmunkatársa tartotta. Takáts visszaemlékezéseiben ezt írja: „Az *oktatási tananyag-kiválasztás meglehetősen szabad volt. Pántos mindössze az órák pontos megtartását követelte meg. Általánosan előírt tanmenet nem volt, csak az volt meghatározva, mit tartalmazzon a tantárgy egésze. A tananyag főként abból állt, amit Fehér Dánieltől örököltünk, illetve az ehhez tartozó tankönyveket, az un. Fehér iskola munkáit használtuk... A szemlélet az volt, hogy a talajmikrobiológia és a biológia ökológiai tudomány. Ez eltért az akkori szovjet felfogástól. A gyakorlati oktatónak sokszor elméletet is kellett oktatnia. Egy gyakorlaton 10-20 fő volt, ezért hetente kb. 2x3 óra gyakorlatot tartottam. A gyakorlatokat a nyomtatott jegyzetek alapján állítottam össze, amelyben felhasználtam Varga Lajos akadémikus segítségét is. A gyakorlatok nem bemutató gyakorlatok voltak, a technikai és a manuális készségek elsajátítása volt a fő pedagógiai feladat. A mikroorganizmusok kitenyésztését, élettani sajátosságainak bemutatását és a morfológiai vizsgálatokat mind el kellett végezniük a hallgatóknak. Ez széleskörű feladat volt. Speciális orvos-mikrobiológiai könyveket is használtunk hozzá, hogy még eredményesebb gyakorlatokat lehessen tartani.*

*Sokszor a Varga Lajos kolléga segítségével tudtam a tananyagot összeállítani. Így sikerült azt az elvet követni, hogy a hallgató a mikroorganizmusokat, egysejtű állatokat el tudta helyezni a természetes környezetébe. Először mikroszkópos vizsgálatot kellett a hallgatóknak végezniük. (Ehhez szükség volt a preparátumok elkészítésére is.) Másik nagy témakör volt az un. Talajból való baktériumok kitenyésztése. Ehhez a Fehér-féle módszereket használtuk (izolálás, oltás?). Gyakorlati feladat volt, pl.: hogy 1 gramm talajban mennyi baktériumot tudott a hallgató kitenyészteni. Különböző cukor, ill. nitrogén alapú táptalajokat is*

*használtunk. Itt fontos volt a steril és biztonságos munkára való nevelés. Többen írtak talajbiológiából diplomamunkát. Összehasonlítva más akkori képzési, kutatási helyszínekkel, egyértelműen megállapítható, hogy nagyon korszerű gyakorlatokat sikerült összeállítanunk.*

*A 70-es évekig végeztem a gyakorlatvezetést. Utána Bellér Péter vette át a gyakorlatokat. Kétségtelen, hogy Pántosnak komoly szerepe volt abban, hogy magas színvonalú talajbiológia oktatás és ehhez tartozó gyakorlatok rendszere alakult ki. Ehhez hozzátartozik, hogy Pántos kapcsolatai révén az akkor legmodernebb laboratóriumokat sikerült kialakítani a tanszéken. Ezért végigjártam az ország összes mértékadó laboratóriumait és ötleteket szereztem (Pl. Szegedi Egyetem, Orvosi Egyetem, nemzetközi vásárok). A külföldi utak alapján megállapítható volt, hogy nemzetközi tekintetben is megállták a helyüket a műszereink, pl.: spektrofotométer, autoklávok, száraz sterilizálók, desztillálók, vízlágyítók, termosztátok, egyéb biokémiai vizsgálatokhoz szükséges eszközök.)”*

Ezek után az erdőmérnöki oktatásban az 1973-ig terjedő időszakban csökkentették a vizsgák számát. Ezen folyamat leírásából tudhatjuk meg, hogy ekkor a hallgatók *Erdészeti termőhelyismerettan*ból szigorlatoztak, ami magában foglalta a *Geológia, Éghajlattan, Mikrobiológia* és *Erdészeti talajtan* tárgyakat.

1974. március 21-én a *Termőhelyismerettani tárgyak* programvita ülésén arról döntöttek, hogy a mikrobiológiát, amit addig 2+1 órában oktattak, a jövőben beépítik a *Termőhelyismerettan* tárgyba. A tárgy keretén belül foglalkoznak a makroszkópos méretű állatok és a talajban élő mikroorganizmusok kapcsolatával, mivel a talajképződésben ezeknek is



fontos szerepük van. Ezek kölcsönhatásban vannak nemcsak egymással, hanem a talaj mikroflórájához tartozó szervezetekkel is. Az állatok az elhalt növényi maradványok elsődleges fogyasztóiként jelentkeznek, míg a teljes lebontás folyamatát enzimatikus úton a mikroflórához tartozó szervezetek – baktériumok és gombák – végzik a hátrahagyott, a felaprózás következtében felületileg rendkívüli módon megnövekedett szerves anyagon.

*Az Általános mikrobiológia* rész innentől kezdve azonban teljesen elmaradt, és összesen csak 6-8 órában foglalkoztak a fenti tananyaggal. Ez a folyamat iskolapéldája volt az akkori tantervi reformoknak, melynek célja az volt, hogy egy-egy tudományterületet integráltan, komplex módon kell oktatni.

A Termőhelyismerettani Tanszék kutatásairól 1961-ben Haracsi Lajos tudományos igazgatóhelyettes számol be, miszerint ez volt akkori időkben legjobban ellátott tanszék, ahol a legszélesebb körű kutatómunka folyt. Mikrobiológia/talajbiológia vonatkozásában a tanszék akadémiai kutatói akadémiai-mezőgazdasági témákon dolgoztak, amely főleg a búza és a kukorica rhizoszféra baktériumainak és a talajfauna táplálkozásban való szerepének felderítésére vonatkozott. Emellett egyre inkább kapcsolódtak az erdészeti témák kutatásába. Ezek: fásítások mikrobiológiai vizsgálata, erdei humuszfauna.

1962-68 között Pántos a *fás növények rhizoszférájában élő mikroorganizmusokat* vizsgálta. Kutatási témák voltak ezen kívül: *A mezőgazdasági és ipari szennyvizek biológiai derítésének lehetősége, a hígtrágya hatásának vizsgálata a talaj mikroszervezeteire.*

Az 1970-es években kutatási témák voltak többek között: *Mezőgazdasági és ipari szennyvizek biológiai derítésének lehetőségei* Pántos vezetésével, *Fehérjetermelés magasabbrendű gombáknál* Gyurkó Pál vezetésével.

1975-től az Erdészeti és Faipari Egyetem Erdőmérnöki Karának tantervében, az okleveles erdőmérnök képzésben sem a Mikrobiológia, sem a Talajbiológia nem jelentek meg önálló tárgyként. A Termőhelyismerettani Tanszék az 1980-as években alapvetően két részre volt tagolható: az egyik az Erdészeti és Faipari Egyetem által finanszírozott oktatási részleg, a másik az MTA által támogatott talajbiológiai kutatócsoport. A két részleg között éles határ nem volt, sok volt az átfedés, részben azért mert valamennyi oktatónak volt kutatási feladata, az oktatásban pedig hatékonyan részt vettek az MTA kutatók is.

1988. szeptember 28-án hagyták jóvá a tanszéken gondozott fakultatív tárgyként a *Talajkémia* és a *Talajmikrobiológia* tárgyak programját. Utóbbi csak a tudományterület „válogatott fejezeteinek” feldolgozására vállalkozhatott. A talajbiológiai jelenségek ismerete még teljesebbé tehetné az erdőmérnök hallgatók biológiai szemléletét, az erdőnek, mint rendszernek a megértését. Fontosnak tartották, hogy a hallgatók képet alkothassanak a talaj élőlények életközösségéről, ezek főbb csoportjairól és tevékenységéről, az erdőben, mint rendszerben betöltött szerepéről. A tantárgy célja volt, hogy a hallgatók megismerkedjenek a talaj biomasza talajbiológiai értelmezésével és fontosabb elemeivel, a talaj „biológiai aktivitásának” fogalmával, vizsgálatával, jellemzésével. Ismerjék meg az erdészeti szempontból legfontosabb talajbiológiai jelenségeket, folyamatokat. A tantárgy oktatása során sajnos ekkor már

jelentősen visszaszorultak a gyakorlati feladatok, ekkortól lényegében csupán elméleti ismeretek átadása történt, csak az *Erdőművelés és ökológia* szakirányon, heti 2 órában, a 7. szemeszterben. A tárgyból ennek megfelelően gyakorlati jegy sem volt.

Bár a tanszék terveiben az 1990-es évek elején szerepelt az önálló „Talajbiológia” jegyzet elkészítése, ez sajnos nem valósult meg.

Az 1983-95 közötti időszakban Szodfridt István irányítása alatt a következő főbb, mikrobiológiai/talajbiológiai vonatkozású kutatási témák kaptak helyet a Termőhelyismerettani Tanszéken:

- Szaprofita mikroszervezetek mikorrhiza kapcsolatainak vizsgálata;
- Erdei ökoszisztémák talaj-mikroélővilágának vizsgálata;
- Az erdőtalaj életközössége és az erdei fák kölcsönhatásának vizsgálata;
- Az avartakaróban és alatta a szervesanyag mennyiségének, minőségének és biológiai aktivitásának vizsgálata;
- A trágyázás hatása a talajra, és annak mikroélővilágára, ill. faállományára;
- A talaj életközösség-faállomány rendszerben az erdőművelési eljárások hatására bekövetkezett változások;
- Fenyők tápanyagkörforgalmi vizsgálata;
- A talajlakó pánccélosatkák elterjedése.

1992 februárjában az MTA által finanszírozott kutatócsoportot az Akadémia pénzhiányra hivatkozva megszüntette. Az ott dolgozó kollégák közül néhányan az egyetem állományába kerültek, mások távoztak az oktatásból, kutatásból. Az elkövetkező években részben a pénzhiány, részben a személyi állomány átalakulása következtében a mikrobiológiai/talajbiológiai vonatkozású berendezések állapota részben leromlott, részben elavultak, pótlásuk, modernizálásuk teljes mértékben elmaradt.

Az 1992-es év tantervében az 1988-ban létrehozott *Talajkémia* és *Talajmikrobiológia* tárgyak már összevontan, *Talajkémia és talajbiológia* címen jelentek meg. Továbbra is szakirányú tárgyként, kizárólag elméleti órák keretében, heti 2 órában.

A mikrobiológia és talajtan vonatkozásában jelentős változást hozott az, hogy az Egyetem 1993-ban megkezdte a vadgazdamérnök és környezetmérnök képzést, ami megnövelte az erdészeti ágazaton kívüli szaktárgyak számát. Így 1995-ben, hosszú idő után újra megkezdődött a *Mikrobiológia* önálló tárgyként folyó oktatása, heti 2 óra elméleti, 2 óra gyakorlati foglalkozás keretében, a környezetmérnök hallgatók számára. Ebben az időszakban a tárgyat Kovács Gáborné Ligetfalusi Ildikó gondozta. A tárgy oktatásában az eszközök hiányában túlsúlyosak voltak az elméleti ismeretek, a gyakorlati feladatokkal szemben.

1996. szeptember 1-től az Erdészeti és Faipari Egyetem új neve Soproni Egyetem lett. Miután 1997-ben a Erdőmérnöki Kari Tanács ismételten

foglalkozni kezdett a Kar szerkezeti átalakításával, 6 intézet felállítására tettek javaslatot. 1998-tól megalakult a Növényteni és Termőhelyismerettani Intézet, amely a *Mikrobiológia* oktatását is végezte.

2000. november 13-án megalakult a Nyugat-Magyarországi Egyetem, amely az akkori egyetemi integrációs folyamatok eredményeként hét karból álló egységgé vált.

A folyamat eredményeként további új szakok jelentek meg az Erdőmérnöki Kar oktatásában, így a *Mikrobiológia* tárgyat párhuzamosan hallgathatták az erdőmérnök, természetvédelmi mérnök, környezetmérnök és környezettudományi szakos hallgatók is. A *Mikrobiológia* tárgy terjedelme mindeközben a 2006/07-es tanév 2. szemeszterétől heti 2 óra elméleti óra fennmaradása mellett, heti 1 óra gyakorlati foglalkozásra csökkent.

További bővülést jelentett viszont az hogy, a Környezettudományi Szakon az 5. szemeszterben megjelent a *Talajbiológia* mint önálló, kötelező A-típusú tárgy, heti 1 óra elmélet és 1 óra gyakorlat keretében. Kidolgozását és oktatását Heil Bálintra bízták, aki a Göttingeni Georg-August Egyetemről 2000-ben tért vissza a Termőhelyismerettani Tanszékre. Heil a németországi doktori fokozatszerzése alatt erdei talajok C- és N-körforgalmának vizsgálatával kapcsolatosan végzett talajbiológiai vizsgálatokat. 2003-2005 között elvégezte az ELTE Mikrobiológus szakképzését, ehhez kapcsolódóan Sopron környéki erdőtalajok talajmikrobiológiai közösségeinek összetételét vizsgálta, a talajok kémiai és fizikai paramétereivel összefüggésben. A *Talajbiológia* tárgyhoz önálló

egyetemi jegyzet nem állt rendelkezésre, ezért Szabó István Mihály művei jelentették az alapot az ismeretek elsajátításához. Utóbbi műveket a *Mikrobiológia* oktatásához is felhasználta, de annak tematikáját alapvetően Hornok László akadémikusnak a gödöllői egyetemi hallgatók számára elkészített jegyzetpótló műve („Bevezetés a mikrobiológiába”) képezte. Mivel a fent felsorolt szakok hallgatói későbbi munkájuk során mikrobiológiával elsősorban a mezőgazdasági/erdészeti gyakorlati vonatkozások révén találkozhatnak, ezért további szakkönyvek egyes fejezetei is alapját képezik a mai mikrobiológia oktatásnak Sopronban.

Szintén Heil Bálint dolgozta ki a *Mikrobiológia II.* című tantárgyat, a környezettudományi szakos hallgatók számára. A tárgy heti 1 óra elméleti oktatás során főleg az alkalmazott mikrobiológia tárgykörével foglalkozott, míg a *Mikrobiológia I.* a mikrobiológia történetét, a mikrobák alapvető rendszertani egységeit, élettani folyamataikat, rendszertanát valamint a mikrobák különböző ökoszisztémákban betöltött szerepével, működését tárgyalta. Az utóbbi évek felsőoktatásában tapasztalt turbulenciájának köszönhetően sajnos a *Mikrobiológia II.* tárgy oktatására csak 2008 évben került sor, az újabb és újabb tantervi reformok kapcsán a Kari Tanácsnak 2009-ben sikerült fel is számolnia az új tárgyat.

A mikrobiológia és a talajbiológiai tárgykörének a soproni Erdőmérnöki Karon folyó oktatása segítésének, valamint az e témakörökben folyó kutatások fellendítésének reményét táplálja a Nyugat-magyarországi Egyetem által 2009-ben elnyert Társadalmi Infrastruktúra Operatív Program 1.3.1-es pályázata, melynek keretén belül a soproni campus

területén egy új kutatási központ épül. A tervek szerint 2011. őszén kerülhet átadásra az ennek egy önálló részét képező kis talajbiológiai labor.

Felhasznált irodalom:

*Albert et al.: „Az erdészeti felsőoktatás 200 éve” Emlékkönyv, Selmezbánya 1808 – Sopron 2008, I. kötet, NymE Erdőmérnöki Kar, Sopron*

## A talaj mint anyag- energiaforgalmi rendszer

### **A talaj fogalmának rendszerelméleti megközelítése**

„A talaj definíciója rendszerelméleti megközelítésben szemléletesen fogalmazza meg a talaj összetettségét:

A talaj két, önmagában is részrendszerek sokaságának hierarchiájából felépülő nagy alrendszer – egy élő szervezetekből álló biológiai és egy szerves és szervetlen vegyületek szilárd és oldott fázisaiból, ásványokból, organominerális komplexekből, stb. felépülő abiotikus alrendszer integrációjából, elválaszthatatlan együttműködéséből jön létre.

A talaj működése ilyen szempontból felfogható egy olyan rendszerként, amelynek elsősorban a szerves kötésben lévő elemek ásványi kötésbe vitele a funkciója, ill. amely rendszer a szerves vegyületek alkotóelemeit átmenetileg termodinamikailag stabilabb konfigurációba hozza a humifikáció folyamatában.

Élő szervezetek nélkül tehát nincsen talaj, illetve talajt csupán élőlények, élettelen környezetük nélkül nem alkothatnak.

A talaj fogalmán belül beszélhetünk tehát biológiai, tisztán kémiai ill. fizikokémiai alrendszerekről. Az egyes élőlények populációinak bonyolult anyagcseréjéhez szükséges információkat a genetikai örökítő anyag (DNS, RNS) tárolja. A másik két alrendszer folyamatait csupán a termodinamika törvényei alapján folynak (míg persze mellettük a biológiai alrendszer folyamatait sem vonhatják ki magukat e törvényszerűségek alól). Ezen alrendszerek tehát csak egymással összefonódva, együtt működhetnek.



A talajok tipikus ökológiai rendszerek, melyekben a biotikus és abiotikus történések szorosan összefonódnak. Bennük mikrobiális fermentációk, kooxidációk, elemtranszformációk csakúgy lejátszódnak, mint a másodlagos ásványok abiotikus genezise, sók vándorlása, kémiai mállási folyamatok. Történik ez párhuzamosan és időbeni egymásutánban is, egymás befolyásolása vagy akár alapvető meghatározása mellett.

Az ökológiai rendszerek, így maguk a talajok sem zártak, a külvilágtól nem izoláltak: környezetükkel sokoldalú anyag- és energiaáram köti őket össze, vagyis nyílt rendszerek. A talajok is rendelkeznek állandó anyag- és energiabevétellel és -kiadással.

A talajok dinamikájának megértéséhez tehát nem elég a tisztán fizikusi, biológusi vagy kémikusi egyoldalú szemlélet, ezek ötvözésére van szükségünk.

### **A talajrendszer élettelen alrendszere**

Ezen alrendszer alapjában véve háromfázisú:

- a) gázfázis (talajlevegő);
- b) szilárd fázis (szerves és szervesetlen vázelemek, talajplazma, organominerális komplexek, stb.
- c) folyadék fázis (talajoldat).

Közöttük állandóan zajlanak tisztán kémiai, ill. fizikokémiai folyamatok: másfélszeres oxidok kiválása és vándorlása, szervesetlen vázelemek kémiai mállása, humuszsavak polimerizációja szerves, de nem enzimkarakterű katalizátorok hatására, agyagásványok és szerves kolloidok kapcsolódása, átliszapolódás, fémek kelátolása és szállítása, stb. Mindezek, még ha a

talajban élő szervezetek több-kevesebb mértékben módosítják is őket, összességében a talaj abiotikus dinamikáját tükrözik.

Egyes talajtípusokban az év egész tartama alatt elsősorban ezen abiotikus folyamatok uralkodnak, és az élőlények aktivitása meglehetősen háttérbe szorul. Ilyenek pl. a szoloncsákok, kérges szolonyecék, nyers vázталajok. Az ilyen talajokat gyakran abiotikus dinamikájúaknak jelölik meg, jóllehet biológiai folyamatok bennük is lejátszódnak, csak kisebb jelentőséggel.

Más típusokban, például a különböző trópusi talajokban, a biológiai folyamatok túlsúlya jellemző az egész év folyamán, de biológiailag ellenőrizetlen, tisztán kémiai történések természetesen itt is lejátszódnak.

A harmadik csoportot olyan talajok alkotják, melyekben egy bizonyos éves dinamikának megfelelően az abiotikus, ill. biotikus folyamatok túlsúlya az év valamely szakára korlátozódva jelentkezik csak. Ilyen pl. a rendzinák és a mezősígi talajok. Utóbbiakban mindez a szervesanyag-gazdálkodás sajátos menetében nyilvánul meg: a téli fagy és a nyári szárazság idején – a biológiai lebontási folyamatok erős gátlódása révén – az abiotikus folyamatok uralkodnak, közöttük döntően az organominerális (szerves-ásványi) komplexek képződése jut előtérbe, míg a nedves tavaszi és őszi periódusra a biológiai aktivitás (beleértve a humusz-bontást is) növekedése a jellemző.

### **A talajrendszer biológiai alrendszere**

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. Az ízeltlábúak (ászkarák, ezerlábúak, léglyárvák, 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 könnyebben támadják és ásványosítják őket. A földigiliszták ezenkívül még a humuszos feltalajban (szintben) szerteágazó és ürülékükkel kitapétázott járatrendszereket építenek, ami segíti a talaj átlevégőződését, továbbá ürülékükkel a jó morzsás szerkezet kialakításához a legkitűnőbb

alapanyagot, az ún. „biokémiai cementtel” összetartott koprogén aggregátumokat szolgáltatják, amelyek stabilitása a vízerózióval szemben igen nagy.

A talajok anyagforgalmában résztvevő állatokat különböző szempontok szerint csoportosíthatjuk. Egy ilyen felosztás történhet pl. az alapján, hogy életciklusuk mekkora hányada kötődik a talajhoz:

- permanens talajlakók, pl. földigiliszták, amelyek életciklusuk valamennyi stádiumában a talajhoz kötődnek;
- időszakos talajlakók, pl. egyes rovarlárvák, melyek életük jelentős részét a talajban töltik;
- periódusos talajlakók, pl. üreglakó állatok, melyek a talajt gyakran elhagyják, de oda vissza is térnek;
- egyes darazsak egy vagy több generáción át a talajban élnek, majd ezt követően néhány generációjuk föld feletti biotópokba vonul és ott tölti el életét;
- átmenetileg a talajhoz kötődtek, pl. azon állatok, melyeknek csak az inaktív alakjaik (petéik, bábjaik) fordulnak csak elő benne.

A talajbiotóp fajainak szerepét döntő módon befolyásolja testméretük is. Ennek megfelelően fordulnak ugyanis elő a talaj pórusrendszerének különböző tartományaiban, járataiban.

A talajbióta felosztása történhet az élőlények tömege alapján is. A következő táblázatban egy Sopron környéki rendzina talaj fontosabb élő és élettelen komponenseinek tömeg szerinti eloszlását mutatjuk be.

Látható, hogy jóllehet e talaj (holt) szerves anyagban viszonylag gazdag, mégis az ásványi alkotóelemek tömegaránya a döntő. Maga az edafon

(leszámítva a növényi gyökereket) arányát tekintve elenyészően kicsi, jóllehet ezt a talajt élő szervezetekkel gazdagon benépesültnek tekinthetjük. Alapvető megállapítás, hogy az edafon a talajfolyamatokban nem a tömege arányában játszik szerepet. Fontossága ennél összehasonlíthatatlanul nagyobb, mert tagjai a katalizátor szerepét töltik be. A következő ábrán Tischler nyomán a talaj élő és holt szerves anyagának frakcionálhatóságára egy további példát mutatunk be. Ez esetben is jól látható a holt szerves anyag mennyiségének döntő túlsúlya a különböző mikroflóra és –faunaelemek biomasszájával szemben.

### **A talaj mint kibernetikai rendszer**

A talajrendszer felfogható kibernetikai rendszernek is. Utóbbinak az olyan rendszereket nevezzük, amelyek akár élők, akár élettelenek, egyrészt nyíltak, mert környezetükből anyagot és energiát vesznek fel és oda anyagot és energiát adnak le, másrészt ezt az anyag- és energiaforgalmat ún. visszacsatoló mechanizmusok segítségével szabályozni is tudják, vagyis önszabályozó rendszerek. A talajrendszerekre e kritériumok mindegyike teljesül. Így pl. a talajokba holt szerves anyagok épülnek be, amelyek egyúttal a biótának energiaforrást is jelentenek, ugyanakkor a talajokból a szerves anyagok mineralizációjából származó szén-dioxid, kénhidrogén, metán, nitrátok, ammónia stb. távozik a környező légtérbe, az altalajvízbe, stb. Az ásványosítás során a biológiai rendszerekben energetikai degradáció is végbemegy, és a talajokat folytonosan biológiailag már hasznosíthatatlan hőenergia hagyja el.

Számtalan példája ismert a talajok biotikus és abiotikus önszabályozásának is. Általában ún. negatív visszacsatoló

mechanizmusokat mutattak ki. Ezen a szabályozási rendszerek azon alapvető típusát értjük, amelyben a rendszer optimális működéstől vagy állapottól elterelő valamilyen faktor érvényesülését egy akcióba lépő másik tényező megszüntetni vagy közömbösíteni igyekszik, miáltal a rendszer egészének működése ismét az optimumhoz közeledik (ld. ábra)

Tekintsünk át erre három konkrét példát:

- Amennyiben a talajoldatban a hidrogénionok mennyisége növekszik, úgy azokat, mintegy automatikusan, az adszorpciós komplexum cseréli le, amelyből a protonok helyett pl.  $\text{Ca}^{2+}$  - ionok lépnek ki. Ezáltal csökken a talajoldat káros aciditása, ami kedvezőtlenül befolyásolná pl. a mikrobiális lebontó folyamatokat is. Természetesen ez a puffereles volumenében függ az adszorpciós komplexek bázistelítettségének mértékétől, ami véges és kimeríthető.
- Másik példaként azt az esetet hozzuk fel, amikor a talajban az értékesíthető fixált nitrogénkészletek kimerültek. Ekkor ott a  $\text{N}_2$ -kötő baktériumok (Azotobacter, Clostridium) kerülnek túlsúlyba, és a talaj N-készlete ismét gyarapodik. A visszacsatolás itt az ellenkező irányba is működik, hiszen a talaj megfelelő nitrogéntartalma mellett a  $\text{N}_2$ -kötést lehetővé tevő enzimek már nem működnek, így nem következhet be káros nitrogén-felhalmozódás.
- Amennyiben egy talajban az ipari szennyeződésekől származó higany mennyisége már a talajéletet is gátló toxikus szintet ér el, meggyorsul a higanyt metilezni képes fajok szaporodása, aminek eredményeként illó metil-higany keletkezik, ami elhagyja a talajt, ahol ezáltal a higany mennyisége lecsökken.

A negatív visszacsatoló rendszerek bonyolult együttműködésének példaként az erdei alomban és az alatta az erdőtalaj humuszos horizontjában végbemenő anyagforgalom szabályozásának főbb vonásait mutatjuk be a következő ábrán.

A felvázolt négy negatív visszacsatolású kör feladatköreit a következőkkel jellemezhetjük:

- 1.) A növényzet helyileg lehetséges maximális szervesanyag-termelése, majd – az évi dinamika során – ennek egy része visszatér a talajba, s ezzel a talaj-növény elemkörforgalomba.
- 2.) Ha a holt szerves anyagok a talajon bomlatlanul felhalmozódnak, a bennük foglalt kémiai elemek nem kerülnek vissza a producens szintre. Ezt a káros hatást akadályozza meg a leghatékonyabban a mikrobaközösségek szelekciója, miáltal az adott talajviszonyok között biológiailag lehetséges maximális sebességű ásványosítás valósul meg.
- 3.) A teljes ásványosítást mégis elkerült, holt szerves anyagban humifikáció bontakozik ki. Alapjában véve ez is elterelést jelent a gyors, biológiailag katalizált elemkörforgalomtól. A humifikált anyagok kémiai elemeit szelektált humusz-bontó közösségek aktiválása tereli vissza a gyorsabb körforgalomba.
- 4.) A durva struktúrájú és a mikrobák számára nehezen megközelíthető szerves anyagokat (levelek, ágak, rönkök, stb.) állati szervezetek aprítják fel, és e fizikai destrukcióval segítik elemeiket visszatérni a mikrobák kémiai degradációján át a producens szint felé.

A kibernetikai rendszerekben pozitív visszacsatolást is találunk. E kifejezésen a rendszerben érvényre jutó azon sajátos (és önpusztítónak is nevezett) szabályozást értjük, ami az optimális működéstől elterelő tendenciákat ahelyett, hogy meggyengítené, felerősíti. Ezek alapján korábban azt hitték, hogy természetes ökológiai rendszerekben ilyen szabályozással nem találkozhatunk. Mára már tudjuk, hogy változó életkörülmények közé került élő szervezetekben, de ökológiai rendszerekben is a pozitív visszacsatolás bizonyos fokú érvényesülése lehetővé teszi, hogy új működési optimumok alakuljanak ki, és az önszabályozó kibernetikai rendszer ne rekedjen meg egyetlen (és emiatt gyakori működési, ill. létbizonytalanságot jelentő) optimális működési szinten, hanem alkalmazkodni és fejlődni is tudjon.

### **Az egységes talajanyagcsere**

A talajrendszer egyes alrendszereinek, elemeinek működéséről gyakran beszélnek a talaj egészétől mintegy elvonatkoztatva. Így pl. szólnak a földigiliszták által művelt vagy végzett anyagforgalomról, a talaj mikrobiológiai aktivitásáról, a nyomelem-háztartásról, a mészdinamikáról, a nitrogéngazdálkodásról, stb. Ez érthető is, ha figyelembe vesszük a talajrendszer bonyolultságát, melyet egyszerre nem tudunk pontosan leírni. Mégsem téveszthetjük szem elől, hogy minden esetben egységes és a valóságban felbonthatatlan talajanyagcserével állunk szemben, a biotikus és abiotikus folyamatok szoros együttműködésével.

Példa erre a következő: a fermentáló mikrobák savtermelése növeli a H<sup>+</sup>-ionkoncentrációt, ami a szabad CaCO<sub>3</sub> mennyiségének csökkenéséhez és



a mész ill. más pufferelési funkciójú anyagok (agyag) mélybe vándorlásához vezethet. Ezzel csökken a talaj felső régiójának pufferkapacitása, és ha az aeráció megjavul, kénsavtermelő tiobacillusok szaporodhatnak el, amelyek tevékenysége folytán nagyon alacsony pH-értékek alakulhatnak ki. Ez az agyagásványok széteséséhez (podzolosodás) vezethet, ami miatt megindulhat a vas és az alumínium oxidjainak vándorlása. A talaj a mélyben ezáltal tömődöttebbé válik, és a korábban AC horizontokkal jellemezhető szelvény előbb ABC, majd AEBC szintekre tagozódik. Csökken egyben a feltalaj szerkezetessége, agyagtartalma, s ennek következtében víztartó képessége, miközben a B szint a víz számára egyre nehezebben átjárhatóvá válik. A gravitációs víz a B szint fölött egy idő után megrekedhet, s anaerob viszonyokat idézhet elő, lehetővé téve, hogy a szulfátredukálók és a társuló obligát anaerobok ott pszeudo-glejesedést váltsanak ki. Ennek hatására a növények gyökerei károsodnak, sőt megváltozhat a növénytakaró összetétele, ezt követően a talajba jutó szerves anyagok mennyisége és minősége is. Utóbbi közvetlenül kihathat a humuszsintézis irányára, és meghatározhatja a talajban a fulvó-, himatomelán- és huminsavak arányát, N-tartalmát, aromatizációs fokát, stb.

A talajtan elméleti és gyakorlati vonatkozásaiban az egyik legfontosabb és legnehezebben megoldható feladat az egységes talajanyagcsere megértése.”

Felhasznált irodalom:

*Szabó István Mihály „Az általános talajtan biológiai alapjai”, Mundus Kiadó, Bp., 2008.*

## **A talajok biológiailag ellenőrzött és spontán biokémiai folyamatai**

### *Biológiailag ellenőrzött és ellenőrizetlen biokémiai aktivitások*

„A talajokban végbemenő kémiai reakciókat feloszthatjuk három kategóriára a következők szerint:

1. tisztán kémiai reakciók
2. biológiailag ellenőrzött biokémiai történések
3. biológiailag ellenőrizetlen biokémiai folyamatok

A talajtani gyakorlat azt mutatja, hogy ezt a felosztást gyakran teljesen figyelmen kívül hagyják, aminek főleg az az oka, hogy a biológiailag nem ellenőrzött folyamatokat, bár azok széles körben elterjedtek, nagyon kevésbé ismerjük. Példát rájuk igazából sokkal többet ismerünk más tudományterületekről ill. mezőgazdasági alkalmazásokból: így pl. ezen folyamatok a tejiparban megkülönböztetett fontosságúak, minthogy többek között a sajtok érlelésekor a kezelés során tönkrement mikrobacejtek felszabadult enzimeit éppen a saját fajtájára jellemző ízek és szagok kialakulásáért is felelős folyamatokat katalizálnak.

A talajfolyamatok tanulmányozásakor általában a tisztán kémiai, továbbá a biológiai reakciólánccokat igyekeznek nyomon követni, míg a biológiailag ellenőrizetlen biokémiai reakciólánccok dinamikája csaknem mindig rejtve marad. Márpedig a talajokban rendszeresen a mikrobaközösségek tömegkatasztrófái, amelyeket pl. a mélyszántáskor a felszíni rétegek mélybe forgatását követő, gyorsan kialakuló anaerobiózis vagy a kiszáradás, a sók emelkedése a talajvízzel vált ki, és amelyek következtében nagy mennyiségű mikrobaenzim, kofaktor, fehérje,

szabályozó komponens, stb. válik szabaddá. Ezek egy része a talaj adszorpciós komplexumában rögzülve aktivitását megtarthatja, ill. esetenként tovább működhet.

Kutatók találtak olyan poliszacharidokat is a talajban, melyek előállítására in vivo egyetlen élő szervezet sem képes. Ezeket az összetett cukrokat az alap-építőelemekből különböző, ellenőrizetlenül működött szabad enzimek véletlenszerű sorrendben polimerizálhatták.

Másik példát szolgáltatnak azon vízdékony enzimek, melyek a széteső mikrobajelemből szabadulnak ki (pl. végoxidázok, fenol-oxidázok, ill. polifenol-oxidázok), és kaotikus szerkezetű, véletlenszerűen felépített aromás vegyületeket szintetizálnak, amelyek a humuszsavak folytatólagos szintéziséhez képezhetnek építőelemeket. A szabad enzimek katalizálta szintéziseknél valószínűleg sokkal gyakoribb ezen enzimek részvétele a talajoldatban szabadon előforduló különböző szubsztrátmolekulák hasításában.

Jelenleg nem léteznek olyan finom módszerek, amelyek segítségével a biológiailag kontrollált biokémiai aktivitásokat az ellenőrizetlenektől elválaszthatnánk. A szabad enzimek elkülönített aktivitását közvetlenül kimutatni nem is lehet, mert ha a talajszuszpenzióhoz mint reakcióközeghez valamilyen szubsztrátot (pl. szacharózt) adunk, akkor azt főleg az elszaporodó élő mikrobák hasítják el. Amennyiben a talajszuszpenziót óvatosan sterilezzük, az ezután mért aktivitási szint részben már a kezelés hatására szétesett élő sejtekből felszabadult enzimeknek tulajdonítható.

Ezért tehát nincsenek adatok arról, hogy az egyes talajtípusok egyedeiben, ezek különböző szintjeiben a tisztán kémiai, a biológiailag ellenőrzött és ellenőrizetlen reakciók milyen aránnyal, s milyen évi dinamikával zajlanak le. Ettől függetlenül pedig sohasem feledkezhetünk meg a tisztán kémiai talajdinamikáról sem: kutatók kimutatták, hogy nagyon kis talajnedvesség értékeknél, olyan pF-értékeknél (>4,0), amikor élő mikrobák aktivitásával már nem számolhatunk, a szabad talajenzimek még mindig funkcionálhatnak.

### **Biológiailag ellenőrzött aktivitások: a talajokban élő mikroszervezetek anyagcseretípusai:**

A talajokban kimutatható és bizonyítottan biológiailag ellenőrzött biokémiai folyamatoknak megszámlálhatatlanul sok válfaját tartják nyilván. Ezek elsősorban a mikroorganizmusok saját anyagcseréje keretében mennek végbe. Itt nem nyílik lehetőség mindezen folyamatok ismertetésére, csupán egy bizonyos rendszerezésüket mutatjuk be, kiemelve azon biológiailag szabályozott működésű enzimekkel katalizált anyagcsereutakat, amelyek hatásukban a talaj működésére, a talajtermékenység alakulására, a földművelés hatékonyságára, stb. nézve meghatározóak.

Az ezen folyamatokért felelős szervezeteket, elsősorban a mikroorganizmusokat, energiaszerző- és –konzerváló mechanizmusaik szerint csoportosítva mutatjuk be, mert ezek már eleve meghatározzák szerepüket az egységes talajanyagcsere viszonylatában. Az, hogy a talaj valamely szintjében, adott időben a nitrogén, kén, vas, mangán, stb. milyen vegyületekhez kötve és milyen állapotban lelhető fel, tehát hogy redukáltan vagy oxidálva, vízdékonnyan vándorlásra készen vagy

kicsapódva helyhez rögzítetten, az adszorpciós komplexumhoz erősen kötődve vagy ellenkezőleg, könnyen kicserélhetően, mind-mind ezen elemeknek a talajmikroorganizmusok anyag- és energiaszerző mechanizmusában betöltött szerepétől függ.

A következő felosztás a biológiailag energiaszerző mechanizmusok valamennyi típusát mindössze 5 gyűjtőkategóriába csoportosítva mutatja be (ea ppt anyaga).

Ezen felosztásba be tudjuk sorolni az összes talajlakó baktériumot, növényt és állatot. Tekintsük át az energiaszerző és –konzerváló anyagcsere ezen öt alapkategóriáját:

1. Szervetlen vegyületeket oxidáló aerob légzők:

Azon szervezetek tartoznak ide (kizárólag talaj- és vízi baktériumok), amelyek redukált szervetlen vegyületeket (pl. ammóniát, kén-hidrogént, elemi ként, tioszulfátot, tetracionátot, mangano állapotú mangánt, ferro állapotú vasat, stb.) molekuláris oxigén segítségével oxidálnak el (nitráttá, szulfáttá, a mangánt mangani, a vasat ferri állapotba, stb.), miközben az oxigén vízzé redukálódik, a mikroba pedig a felszabaduló energiával nagy energiájú foszfátkötéseket (ATP) szintetizál.

A csoportnak három fontos megkülönböztető jegye van:

a) aerob légzők, tehát energiaszerzésük a molekuláris oxigénhez, mint végső elektronakceptorhoz kötődik.

b) Energiát a redukált szervetlen vegyületek, mint elsődleges elektrondonorok oxidálásával szereznek, mégpedig rendszerint obligát módon.

c) Szerves anyagukat CO<sub>2</sub>-ból vagy karbonátok szenéből, mint egyedüli szénforrásból építik fel (szénautotrófok). Szervezetükben a szén a Calvin-ciklussal kötődik meg.

Az ebbe a csoportba tartozó élőlények tisztán ásványi összetételű táptalajokon szaporodnak.

A szerves anyagokat oxidáló aerob légzők a talajokban számos növényi tápelem körforgalmának kulcsfontosságú irányítói. Szerepüket legjobban a nitrogén és a kén körforgalmában tisztázták.

## 2. Aerob légzők (szerves vegyületekkel):

Nagyon különböző szerves vegyületeket égetnek el, és az ennek során felszabaduló energiát hasznosítják nagy energiájú P-kötések szintéziséhez. A végső elektronakceptor itt is a molekuláris oxigén, mely vízzé alakul. Ez a légzési típus a bioszférában az evolúció során az öt itt bemutatásra kerülő kategória közül a legkésőbb jött létre. Egyben ez a leghatékonyabb energiaszerző mechanizmus, számos baktériumban, továbbá valamennyi növényben, állatban és az emberben is ez működik.

Az ilyen típusú mikrobák a talajban általában óriási csíraszámúak, jelen, ezek végzik a legnagyobb intenzitással az ásványosítási folyamatokat, részvételük a növényi tápelemek szerves kötésből ásványi kötésbe vitelében és a növények számára felvehető állapotba alakításában mennyiségileg is döntő fontosságú.

A talajokból számtalan anyagcseretípusuk ismert, egyesek pl. cellulózt, lignint bontanak, de vannak főleg fehérje-, szénhidrát- vagy zsírbontók is. Ismertek szűk és széles tápanyag-értékesítési spektrummal rendelkező aerob légzők, s különleges specialisták is. Sokuknak a mikromilió valamely

faktorával szemben van meghatározott igényük (pH, hőmérséklet, sókoncentráció, stb.).

A talajok biológiai dinamikájának irányításában és főleg a talajok szervesanyag-háztartásának szabályozásában e kategória szervezetei döntő súllyal szerepelnek.

3. Légzésükhöz szervesetlen vegyületeket felhasználó, anaerob szervezetek:

Ebbe a csoportba csak mikroorganizmusok tartoznak!

Általános szabály, hogy légzés esetén a terminális elektronakceptor mindig valamilyen szervesetlen vegyület, és hogy erre a donorról – ami lehet szerves vagy szervesetlen vegyület egyaránt – az elektronok elektrontranszport-láncon át jutnak (ez utóbbiaknak többek között a citokrómok csaknem mindig részei). Ehhez az elektrontranszporthoz ATP szintézise kapcsolódik, amiért a légzést szinonim kifejezéssel „elektrontranszport-foszfórilációnak” is nevezik.

Az ezen kategóriába tartozó élőlények jelenléte viszonylag nem túl gyakori a természetben, vagy legalábbis ez ideig nem túl sok képviselőjük ismert.

Az ezen csoportba tartozó anaerob légzők olyan baktériumok, amelyek az elektronokat a transzportlánc végén nem oxigénre, hanem ennek hiányában (anaerob körülmények között) valamilyen más redukálható szervesetlen elektron-akceptorra juttatják, amelyet a mikroba aktiválni és redukálni, vagyis energiaszerzéséhez felhasználni képes. E kategóriában donorként is szervesetlen vegyület szerepel, tehát valamilyen redukált állapotú anorganikus vegyület oxidációja szolgáltatja az energiát, ami

szintén ATP szintézisére fordítódik. Az ily módon energiát szerző mikrobákra példa a *Thiobacillus denitrificans*, amely kénhidrogént nitráttal oxidál, miközben szulfát keletkezik, a nitrát nitrogénje pedig  $N_2$  alakjában távozik a rendszerből. Az ilyen típusú mikrobák, amelyek egyébként szénautotrófok, vagyis  $CO_2$ -on kívül más szénvegyületet nem igényelnek, valószínűleg fontosak lehetnek az át nem szellőzött anaerob talajokban, és közreműködhetnek környezetünk nitrátmentesítésében.

Azt tartják, hogy az anaerob légzők az aeroboknál feltétlenül ősiabb szervezetek, bár az anaerobok között a légzés viszonylag modern mechanizmusnak számít. Az anaerob légzők anyagcseréjének energia-kihasználása gyengébb hatékonyságú, mint az aerob légzőké, és metabolizmusuknak több más vonatkozásban is figyelemre méltó a korlátozottsága.

4. Oxidált szervesetlen vegyületekkel, mint terminális elektronakceptorral, szerves vegyületeket elégető, anaerob légzők:

Az előző csoportnál sokkal gyakoribb és nagyobb számú szervezetet felölelő csoport. Sok ilyen mikroba elsősorban nitrátokkal dolgozik, és ezekből  $N_2$ -t és nitrogén-oxidokat termel, ill. juttat a légkörbe. Mások a szerves vegyületeket szulfáttal égetik el, miközben nagy mennyiségű kénhidrogént állítanak elő. Az előbbi nitrátlégzőkkel szemben ezek az ún. szulfátlégzők.  $O_2$  hiányában vassal is lehet légzést folytatni, ilyenkor a mikroba az elektronokat az energiaforrásul szolgáló szerves vegyületekről ferri állapotú vásra juttatja, amely redukálódik, és ferro alakban vízoldhatóbb állapotba kerül. Ismereteink szerint nagy lehet a számuk azoknak az oxidált szervesetlen vegyületeknek, amelyekkel  $O_2$



hiányában szerves vegyületeket lehet elégetni. Számtalan kísérlet igazolta azonban azt, hogy anaerob légzéssel korántsem lehet olyan sokféle szerves vegyületet hasznosítani, mint  $O_2$ -vel. Így míg egyes nitrátlégzők számos szerves elektrondonorral dolgoznak, mások jóval kevesebbet tudnak csak értékesíteni, de pl. szulfáttal már csak szó szerint néhány molekulatípus elégetése válik lehetővé. Keveset tudunk a vassal elégethető szerves vegyületek számáról, és alig valamit a mangánnal ellélegezhetőkéről.

A szerves vegyületekkel anaerob körülmények között légzők felelősek azért, hogy a mezőgazdaságilag művelt talajok időnként oxigénmentessé váló szintjeiben a káros fermentációs, ill. rothadási folyamatok nem kerülnek előtérbe, és az ilyen talajok még átlegezőzeten viszonyok között is képesek azt a kedvező állapotot megőrizni, ami a növényi gyökerek számára nem jelent toxikus hatású, ártalmas környezetet. A talajokban működő denitrifikáló szervezeteknek az utóbbi időkben megkülönböztetett fontosságot tulajdonítanak, minthogy ezektől várják a bioszférában már aggasztó méreteket öltő nitrátfelhalmozódások természetes felszámolását.

## 5. Fermentáló szervezetek:

A fermentáció képezi az energiaszerzés sajátos és valamennyi között legősibb mechanizmusát, amelynek definíciója körül – bár a folyamat lényege problémamentesen ismert – érthetetlen módon valóságos zűrzavar uralkodik. A Föld történetének őskorában, a mintegy 3,8 milliárd évvel ezelőtt létrejött első primitív baktériumok obligát anaerob fermentálók voltak. Egyszerű anyagcseréjükben a bonyolult elektrontranszport rendszerek még teljesen hiányoztak, így még anaerob

légzésre is képtelenek voltak. ATP-t tehát elektrontranszport-foszforilációval nem állítottak elő! Lényegében ez igaz a ma ismert obligát fermentáló szervezetekre is. Ennek megfelelően a fermentációt így határozhatjuk meg: energianyerés (ATP-szintézis) – anaerob körülmények között – energiagazdag szerves vegyületek (mint elsődleges elektrondonorok) energiájának terhére, mindig szubsztrátszintű foszforiláció útján. Az ADP energiagazdag kötéssel magához a szerves vegyülethez kötődik, és lehasadásakor anorganikus foszfát felvételével ezt az energiát az újonnan kialakított foszfátkötésben konzerválja ( $ADP + P_i = ATP$ ). Az egyidejűleg lehasadó hidrogének, ill. az elektronok általában a kiinduló szerves vegyület kisebb molekulájú töredékeire kerülnek. Ezek képezik a terminális elektronakceptort. Ez a hidrogénátvitel azonban további energianyeréssel már nem jár.

A fermentáció esetében mind a H-donor, mind a H-akceptor szerves anyag. Mára már kimutatták, hogy egyes esetekben a hidrogének szervesetlen redukálható vegyületekre is kerülhetnek. A fermentáció lényegén azonban ez sem változtat, mert a szervezet ATP-t ez esetben is csak szubsztrátszinten állít elő, és csupán a fölösleges hidrogénektől szabadul meg oly módon, hogy azokat szervesetlen vegyületre juttatja.

A fermentáló szervezetek a szerves anyagokat nagyon kedvezőtlen hatékonysággal értékesítik, és tevékenységük során nagy mennyiségű energia-gazdag, kihasználatlan szerves vegyületet hagynak hátra, amelyek között számos toxikus hatású lehet a magasabb rendű szervezetekre. A talajokban a fermentáció akkor bontakozik csak ki, ha nemcsak az oxigén fogyott már el, hanem az anaerob légzéshez terminális elektron-akceptorként hasznosítható valamennyi oxidált anorganikus vegyület (nitrát, szulfát, stb.) is. Nagyon kedvezőtlen talajállapot ez, melyben igazi rothadási folyamatok indulhatnak meg, és ezek súlyosan és

hátrányosan befolyásolhatják az egész biológiai dinamikát, többek között a termesztett mezőgazdasági növények, az erdő fáinak növekedését. Míg az ipari folyamatok során (pl. tejiparban) érvényre jutó fermentációkat elég jól ismerjük, addig a talajban lezajló komplex (vajsavas, propionsavas, tejsavas, ecetsavas, butil-alkoholos, stb.) fermentációs folyamatok résztörténéseiről, csakúgy mint együtthatásukról csak nagyon kevés konkrét adat áll rendelkezésünkre. A talajokban azonban fontos szerves vegyületek (pl. cellulóz, pektin, stb.) óriási mennyiségben bomlanak le fermentáció útján, ezen folyamatok alaposabb megismerése fontos cél a jövőben.

Az energiaszerző mechanizmusok itt ismertetett 5 kategóriáján belül számtalan változat létezik. Az egyes kategóriákhoz tartozó mikrobák pedig mintegy összedolgozva valósítják meg a talaj biológiai frakciójának közösségi anyagcseréjét és ezen keresztül az egész talaj elemforgalmát.

Így pl. azok a baktériumok, amelyek szerves vegyületekkel vasat redukálnak, a ferrovas ( $\text{Fe}_2^+$ ) előállításával egyúttal energiaforrást nyújtanak a vasat oxidáló szénautotrófoknak. A szulfátredukáló *Desulfovibrio desulfuricans* kén-hidrogént termel, ami számára már sürgősszerű, de energiaforrása a *Thiobacillus*oknak, amelyek ezt szulfáttá oxidálják, stb. Vagyis a sok-sok sejtszinten végbemenő energia- és anyagcsere a talaj egységes energia- és anyagáramává összegződik.

A talajok szervesanyag-, továbbá anorganikus vegyületkészleteinek minőségi és mennyiségi változásaival ezek az energiahasznosítási és táplálkozási láncok rugalmasan módosulnak, sőt, a mikrobafajok közül sokan képesek önmaguk is nagymértékben alkalmazkodni a

körülményekhez. Sok olyan faj ismert pl., amely nemcsak aerob, de anaerob légzésre és még fermentációra is képes aszerint, hogy a környezeti feltételek miként alakulnak.

Példa: A *Clostridium pasteurianum*, a talajoknak egy fontos mikrobája, a cellulózt vajsavas erjesztéssel bontja. A felszabaduló energia egy részét a molekuláris nitrogén megkötésére fordítja. Nitrogénszegény talajokban kolóniáit körülveszik az aerob légzők és elvonják tőle az oxigént, aminek révén gyorsan szaporodhat és  $N_2$ -t fixálhat. Később elpusztuló sejtjeit az előzőleg védő hatású aerob légzők mint N-forrást értékesítik.”

Felhasznált irodalom:

*Szabó István Mihály „Az általános talajtan biológiai alapjai”, Mundus Kiadó, Bp., 2008.*

## Példák a talajokban lejátszódó fontosabb biológiai reakciókra

Ezen előadás anyagban a talajokban lejátszódó néhány fontosabb reakciót, azok észlelési módjait, elemzését vizsgáljuk.

### **A talajlégzés**

„A talajokban mineralizáció folyik: ez az elemek szerves kötésből ásványi kötésbe vitele, a szerves vegyületek energiájának felszabadítása, a biológiailag hasznavehetetlen hőfejlés, másrészt a biokémiai komplexitás csökkentése, vagyis a termodinamikai rendezetlenség felé történő elmozdulás.

A szerves vegyületek elégetése, mint azt a korábbiakban láttuk, nemcsak oxigénnel mehet végbe, hanem anaerob viszonyok között is, amikor az oxigént nitrát, nitrit, nitrogén-oxid, ferrivas, szulfát, kén, stb. helyettesíti. A talaj oxigénfogyasztása tehát legfeljebb a talaj egészének aerob légzését tükrözi, tehát mérésével csak bizonyos körülmények között juthatunk értékelhető adatokhoz. Erre mutat példát az 1. Táblázat (ea ppt).

Az aerob talajlégzést általában a termelt  $\text{CO}_2$  és a fogyasztott  $\text{O}_2$  mérésével határozzák meg. Nagyon sokszor azonban csak a  $\text{CO}_2$ -termelést mérik: ezt ugyanis mind az aerobok, mind az anaerobok egyaránt kibocsájtják (ea ppt: 1. Ábra):

A talajokból kilehelt  $\text{CO}_2$  mérését infravörös gázanalízissel, gázkromatográfiával, a  $\text{CO}_2$ -nak KOH-ban (vagy NaOH-ban) való elnyeletésével, stb. mérik meg. Ezen mérések igen egyszerűek, s elég

nagy pontosságot mutatnak. (ld. göttingeni mérések...). Valamikor ezt tartották a talaj biológiai aktivitásmérésének legjobb módszerének, ma már több más módszerrel kombinálva alkalmazzák, ezekről a későbbiekben külön előadás fog szólni.

### **Az elemek mobilizálása és immobilizálása**

A talajokban mint ökoszisztémákban az elemek ún. biogeokémiai ciklusainak részfolyamatai zajlanak. E ciklusokban az a mintegy 30-40 elem vesz részt, amelyek az élő szervezetek fejlődéséhez szükségesek. Közülük a C, N, H, O, S és a P jelentőségét szokták kiemelni, de több más elem is nélkülözhetetlen valamely biokémiai reakcióhoz, struktúra felépítéséhez. Minthogy ezen elemek utánpótlása korlátozott, az élet megújulását a légkörön, hidro- és litoszférán át végbemenő körforgalmuk teszi lehetővé. A biogeokémiai ciklus megjelölés arra utal, hogy az elemek ezen körforgalmában élő szervezetek, a geológiai környezet és tisztán kémiai történések egyaránt részt vesznek. E ciklusok fő jellemvonásai:

- az elemek az élettelen környezettől az élő szervezetek felé, majd ezeken át vissza az élettelen környezethez vándorolnak;
- az elemek körforgalmában hatalmas geológiai tartalékelemraktárak iktatódnak be, melyekben az elemek akár geológiai léptékben is igen hosszú ideig tartózkodhatnak;
- az elemek a ciklusok során szerves kötésből szervetlenbe és vissza vándorolnak, közben oxidációs fokuk változik;
- az ilyen ciklusoknak két alakját ismerjük:
- gázfázisú tartalékokkal rendelkező elemciklusok, és
- üledékes kőzetek tartalékaira támaszkodó ciklusok.

Az első esetben az elem nagy földi tartalékraktára a légkör. Ez esetben a ciklusok gyorsak és veszteségük kevés vagy semmi. Az üledékes ciklusokban az elem nagy tartalékraktárai üledékes kőzetekben találhatóak. Az ilyen ciklusok lassúak és emiatt az élő szervezetek szaporodására gyakran korlátozó hatású.

Tipikus gázfázissal jellemezhető a szén, a nitrogén és az oxigén. A foszfor és nagyjából a kén is üledékes tartalékkal működtetett ciklusokon át haladhatnak. A biogeokémiai ciklusok a nagy földi vízciklustól elválaszthatatlanok, ami lényeges eszköze valamennyi elem cirkularizációjának.

Az elemek vándorlásának katalizálásában mikroorganizmusok nagyon különböző utakon és módokon vehetnek részt, ilyenek:

- ásványosítás vagy mineralizáció
- immobilizáció
- oxidáció
- redukció
- volatilizáció
- geológiai üledékek kialakítása
- szerves kelatáló vagy komplexező vegyületek termelése
- elemek koncentrációja és gyűjtése
- izotópfractionálás.

1. A mineralizáció fogalmát az előzőekben már leírtuk. A mineralizáció során aerob körülmények között a növényi, állati maradványok degradálásakor CO<sub>2</sub>, ammónium, nitrát, ortofoszfát, szulfát és

oldódó szilikátok szabadulnak fel. Anaerob viszonyok között viszont nitrát és gyakran szulfát sem jön létre, hanem jelentős mennyiségben CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, ammónium, szulfid, CO<sub>2</sub> és ortofoszfát a végtermékek.

2. Az immobilizáció a mineralizáció fordítottja, az elemek szerves kötésből szervesbe vitele és az élő anyagba történő beépítése. Azok az elemek, melyek pl. a talajmikrobák sejtjeibe épülnek be (átmenetileg), immobilizáltnak tekinthetők, mert a növényi gyökerek számára felvehetetlenné válnak.

A talajokban ezen két folyamat a legfontosabb, melyek együtt az egész biológiai talajdinamikát szabályozzák. A lebontó folyamatokat megvalósító mikrobák közben maguk is szintetizálják sejtanyagaikat, szaporodnak és ehhez az ásványosításra kerülő anyagok egy frakcióját használják el. Egy idő után aztán sejtjeik nem szaporodnak tovább, elpusztulnak és az őket felváltó, későbbi mikrobáknak szolgálnak szubsztrátul. Ennek során az összes hasznosítható szerves anyag tömege folyamatosan csökken, csakúgy, mint a szerves kötésekben raktározott összes, hasznosítható energiamennyiség. Eközben azonban nő az ásványosított anyagok mennyisége, amit azután a növényi gyökerek felvehetnek. Az immobilizáció esetenként a természetett növény terméshozamát érzékenyen befolyásolhatja. Amennyiben pl. a talaj könnyen értékesíthető szénvegyületekben (pl. cellulózban) gazdag, de nitrogénben és foszforban szegény, úgy műtrágyázás esetén a mikrobák a szénvegyületekből végbemenő sejtszintézisükhöz a műtrágya nitrogénjét és foszforát a növény elől elvonják (nitrogén-immobilizáció), amelynek fejlődése emiatt visszamarad. Az így létrejött mikroba sejt-tömeg később ásványosodhat, de gyakran ez



csak olyan hosszú időszak után következik be, amely meghaladja a termesztett növény élettartamát.

3. Az oxidációk alatt a szerves ionok mikrobiológiai oxidációját értjük, mely történhet a mikrobák energianyerése céljából (ld. kemolitotrófok), energiát nem termelő folyamatok közben mellékesen (egyes heterotróf gombák és baktériumok), valamint bizonyos esetekben közvetett hatásokra, így pl. mikrobák anyagcseretermékei és valamely anorganikus ion közötti, nem enzimatis reakciók révén.
4. Szerves és szerves vegyületek redukciójára képes mikrobák a talajokban szintén közönségesek. Itt is háromféle mechanizmust különböztethetünk meg: a) a redukció az energia- és anyagcserehez közvetlenül kapcsolódhat; b) a vízzel elárasztott talajokban a redukció az O<sub>2</sub>-felhasználásra visszavezethető redoxpotenciál-csökkenésre vezethető vissza (Fe<sup>3+</sup> és Mn<sup>4+</sup> redukciója); c) a redukció lehet savképződés következménye. A pH csökkenésekor pl. spontán ferri → ferro, mangani → mangano átalakulások mennek végbe. Vannak elemek, mint a foszfor és a szilícium, amelyek oxidált állapotukban mint foszfátok és szilikátok anaerob környezetben is stabilak. Ezzel szemben a nitrogén és a vas pl., ha a mikrobák az O<sub>2</sub>-t elfogyasztják, redukálódnak. Számos vegyületet ismerünk, amelyek anaerob körülmények között mind oxidált, mind redukált állapotban egyaránt előfordulnak: CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>; szulfát-szulfid; szerves savak – megfelelő alkoholok; stb.
5. Volatilizáció és fixáció: A fixáció során valamely elem gáz halmazállapotából nem gáz halmazállapotúvá alakul, a volatilizációnál fordítva. Ilyenek a mineralizáció CO<sub>2</sub>-vesztése,

a denitrifikáció N<sub>2</sub>-felszabadítása, ill. a utóbbit ellensúlyozzák a N<sub>2</sub>-kötő baktériumok.

6. A mikrobák geológiai üledékek kialakításában is részt vesznek. Ennek számos példáját ismerjük (kén-, kőszéntelepek, kőolajlelőhelyek). A talajokban magukban is tapasztalhatók időnként ilyen tevékenységek, pl. a gyeppasércek, mangángumók kialakulásakor.
7. A talajmikrobák környezetükbe számos szerves anyagot bocsájtanak ki, melyek között több olyan is van, amelyik gyengén oldódó szerves vegyületekkel kapcsolódva, azokkal jól oldódó, stabil komplexeket alkotnak. Így módon a mikrobák pl. megvédhetik a fémionokat a precipitációtól. Az említett oldékony szerves kötésben gyakran szerepel a vas, a kalcium, a magnézium, a cink, a mangán és a kobalt. Kelatáló és komplexező vegyületekként a polipeptidek, aminosavak, 2-ketoglukonsav, stb. gyakran szerepelnek. E vegyületek közreműködnek a fémek vándorlásában, de a kőzetek mállásában is. Mivel ezen komplexeket is bontani képesek a mikrobák mineralizációs tevékenységük során, ilyenkor a szerves rész lebomlik, a fém rész felszabadul és az oldatból kicsapódik, immobilizálódik. A mikrobák tehát az elemek ilyen vándorlását mind pozitív, mind negatív irányban igen hatásosan befolyásolhatják.
8. A mikrobák sejtjei elemeket koncentrálnak magukban is, pl. ezüstöt, vasat, higanyt, egyéb nehézfémeket. Ezt használják fel bizonyos bioremediációs eljárásokban is.
9. A talajokban a biológiai immobilizáció mellett nagyon hatékony abiotikus immobilizációs is működik. Pl. a pozitív töltésű

ammóniumionok negatív töltésű agyagásványokon adszorbeálódva nagyon nehezen kicserélhetővé válnak, és emiatt nitrogénéhség jelentkezhet nitrogén jelenlétében is.

### **A fémek korróziója a talajokban**

A talajokba került vagy azokba beépített fémtárgyak mind aerob, mind anaerob körülmények között mikrobiológiailag serkentett korróziónak vannak kitéve.

Valamely szilárd fémnek a korrózióhoz ionokat tartalmazó, elektrolitként ható vízzel (talajnedvességgel) kell érintkezésbe kerülnie. Ennek hatására a fémfelület különböző pontjai között feszültségkülönbségek jelentkeznek és elektromos erő ébred. A fém felületén parányi lokális, korróziós elektromos elemek jönnek létre. A fém reaktívabb pontjai anódként viselkednek és az atomok ionos állapotba mennek át. Itt tehát a fém pusztul, oxidálódik és oldatba megy. A fémfelület kevésbé reaktív pontjai katódként viselkednek, ahonnan elektronok távoznak, amelyek a környező oldatból ide hatoló hidrogénionokkal atomos hidrogént, ill. hidrogéngázt fejlesztenek. Az anód fémes oldódása mindaddig tart, amíg az egyre csökkenő elektromos erő ezt lehetővé teszi. A korrózió azonban egy idő után megáll, amikor a katódon fejlődő hidrogén és az anódról kilépő fémionok olyan mennyiségben halmozódnak fel, hogy a  $H/H^+$  és a  $fém/fém^{++}$  elektródpotenciál kiegyenlítődik. Ebbe a folyamatba avatkoznak be többek között a mikroorganizmusok, és a korróziót anyagcsere-aktivitásukkal folyamatossá teszik.

A 2. ábrán (ea ppt) láthatjuk, hogy egy vastárgyon a *Desulfovibrio*-k a katódra települve a hidrogént hidrogenáz-enzimjük segítségével elvonják és anaerob légzés keretében szulfáttal vízzé oxidálják, miközben kénhidrogént termelnek. Utóbbi az anódnál oldatba került fémionokkal reagál. A termék fémszulfid, esetünkben FeS, ami kicsapódik. Ez a mikroba tehát a korróziót azzal tartja fenn és teszi folyamatossá, hogy elvonja az elsődleges termékeket.

A talajmikrobák más típusai pl. kielégítő O<sub>2</sub>-ellátás esetén az anódra települve a termelődött Fe<sup>2+</sup>-t Fe<sup>3+</sup>-vá oxidálják. Ezek lehetnek tipikus aerob légző, kemolitotróf, autotróf vasbaktériumok, amelyek valóságos lyukkorróziót idéznek elő. Így módon a talajba került vastárgy lassan tönkre megy.

### **Műanyagok lebontása a talajokban**

A műanyagok felhasználása mára világszerte hatalmas méreteket öltött, s szerepük a továbbiakban is nőni fog. Mivel alkalmazási területük mind a mezőgazdaságban (pl. fóliaborítással termesztett növények), mind az iparban nagyon széles, a talajok szennyezése a műanyagokkal is igen gyakori jelenség. Mindez természetesen veti fel a műanyag termékek mikrobiológiai úton való lebontásának lehetőségét, ami sajátosan kétoldalú. Szükség van arra, hogy a műanyagok rendeltetésszerű használatuk alatt ellenálljanak a mikrobák támadásának és tartósak legyenek. Ugyanakkor az is követelmény lenne, hogy alkalmatlanná, szükségtelenné válva (kiszolgálva) éppen a mikrobák hatására gyorsan eltűnjenek és ne legyenek környezetünk szennyezői.

Sajnos a műanyagok mikrobiológiai bontásának még a kimutatása sem egyszerű feladat. Ezek az anyagok ugyanis szennyeződésként sokféle

oligomert, monomert, stb., továbbá mikrobiológiailag könnyen bontható ún. adalék anyagokat tartalmaznak, melyeknél együttesen igen nehéz a tényleges polimerbontás megállapítása. A baktériumok pl. polietilén vízvezeték-csőveken anélkül is szaporodni képesek, hogy magát a polimer mátrixát károsítanák.

Egyébként is, a műanyagok nagy része hosszú, lineáris vagy elágazó láncú szintetikus polimerekből áll. A C-C gerincet tartalmazó nagy molekulatömegű polimerek rezisztensek a mikrobák támadásával szemben és ellenállnak a reciklizációnak.

A talajokban gyakori penészgombák paraffinokon C34-ig is képesek szaporodni. Az elágazó izomerek biológiailag alig hasznosíthatók. A polietilén esetében úgy tűnik, hogy ennek megbontása mikrobák révén nem biológiai természetű kezdeményezésű reakciók nélkül gyakorlatilag lehetetlen. A szénhidrogének biológiai bonthatósága a növekvő lánchosszúsággal és az oldalláncok számával csökken. Gondot okoz az is, hogy az enzimmolekulák mérete 1- néhány 10 nm, a polimerek dimenziói pedig ehhez közeliak. Ezen kívül az enzimek csak vizes közegben aktívak és szubsztrátjukkal szoros kölcsönhatást igényelnek. Következésképpen a felületi reakciók valószínűsége a normál esetben hidrofób, alig penetrálható polietilén és egy esetlegesen megfelelő enzim között nagyon kicsi. Másrészt a polimernek a fő szénlánc végéről elinduló és befelé haladó fokozatos lebontása az oldalláncok miatt elakad.

Az ilyen polimerek biológiai lebontását csak úgy tehetjük lehetővé, ha a fő szénláncot már az előállítás során fizikai vagy kémiai hatásokkal szemben érzékenyé tesszük, aminek következtében a biológiai támadás már kibontakozhat. Ilyen megoldást jelentenének azok a fejlesztések, amelyek fény hatására megbomló polimerek előállítására törekednek. Előállítottak olyan érzékenyített műanyagokat is, amelyek UV-sugárzás

hatására vasionokkal lépnek reakcióba, aminek révén az anyag autooxidálódik, töredezni kezd. A megbontott láncok már biodegradálhatóak.

### **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 mikroba számuk 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, szénhidrogénekben 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 enzimatis 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 alosa 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-beliéktől. 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<sup>9</sup>-10<sup>11</sup> 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 olajrezervoárokba 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.

### **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<sup>-1</sup>): Cd<sup>2+</sup>: 5, Pb<sup>2+</sup>: 120, Hg<sup>2+</sup>: 2, Zn<sup>2+</sup>: 10, Cu<sup>2+</sup>: 100, Cr<sup>6+</sup>: 150, As<sup>3+</sup>: 5, Ni<sup>2+</sup>: 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-negatívak között a nitrogén-kötők a legérzékenyebbek, más Gram-negatívak, pl. a Pseudomonas-fajok rezisztensebbek; a Gram-pozitívak közül az erjesztők igen érzékenyek, míg valamennyi prokarióta szervezet közül általánosságban az aktinomyceták 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 teszt-szervezet 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,

nitrogénkötő baktériumfaj, az *Azomonas agilis* különösen érzékeny a toxikus vegyületekre, és laboratóriumi tenyésztete 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.

124. dia

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 *Hydrogenomonas*ok 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 *Rhodococcus*ok 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 szimbióta 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 szimbióta gombákkal történő együttélése hosszú evolúció eredménye. A gazdanövény fennmaradása a zavartalan tápanyag- és vízellátástól függ, amit a gyökérszimbióta 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 tápanyagtőkéjű 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 endomikorrhiza.



### *1. Arbuskuláris típusú mykorrhizák (AM), endomykorrhizák.*

Az 1987-ig felfedezett 120 AM-faj mind egy családba, az Endogonaceaebe 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-arbuskuláris mykorrhiza nevet adták, mert a gombahifák a gyökérszövet endodermiszébe behatolva sajátos képleteket, arbuskulumokat és vezikulumokat hoznak létre. Az arbuskulumok, 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 kesztyűujjszerűen veszi körbe a citoplazma membránját, melynek a gomba és növény közötti tápanyagforgalom lebonyolításában van szerepe. Az arbuskulumok 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- arbuskuláris) arbuskuláris 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 hajszálgyökereknél kisebb átmérője (~8 µm) többféle előnnyel szolgál. Biztosítják a talaj olyan kis aggregátumaiba történő

bejutást, mely hajszálgyökerekkel 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 felszabadítják, szaporodásuk során a szerves foszfort ismét immobilizálhatják. A sejtek, illetve a gyökérzet számos foszforforma felvételére alkalmas, bár legnagyobb része  $\text{HPO}_4^{2-}$ - és  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ - formában adszorbeálódik.

A talaj oldható foszforkészletének a kimerülése után több lehetőség van a növények által felvehető foszfor mennyiségének növelésére, oldhatatlan foszforvegyületek mozgósítására. Számos rizoszféramikroorganizmus képes oldhatatlan szerves foszforvegyületek oldhatóvá tételére, nem enzimikus 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<sub>2</sub>S 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 enzimatis bontásával vesznek részt a foszfor mobilizálásában. Az enzimatis 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 foszfatáztermelése 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 foszfobakterin néven *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* tenyészeteket használtak a talaj foszforvegyületeinek



rnikrobák sem tudnak vas hiányában szaporodni, így a Pseudomonasokkal oltott növények erőteljesebbek, egészségesebbek lesznek.

Más talajmikroorganizmus is képes sziderofor anyag termelésére (sőt maga a növény gyökere is), de a Pseudomonasok sziderofor anyagának komplexkötő képessége többszöröse ezekének. A Pseudomonasok 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.”

Felhasznált irodalom:

*Szabó István Mihály „Az általános talajtan biológiai alapjai”, Mundus Kiadó, Bp., 2008.*

### **Az enzimek eredete a talajban**

„Az enzimek fehérjék, az élő sejt katalizátorai, amelyek a biológiai rendszerekben végbemenő kémiai átalakulásokat katalizálják. A felépítésükért és működésükért felelős információk a sejtek genomjában, a DNS-ben vannak kódolva, csakúgy, mint azok az információk, amelyek a szervezet nagyszámú enzimének és enzimrendszerének összehangolt működéséért felelősek. Összességükben a szervezet anyagcseréjét és energiaforgalmát szabályozzák. Ugyanakkor az egyes enzimek csak meghatározott reakciókat katalizálnak (enzimspezifitás), meghatározott összetételű és szerkezetű szubsztrátumokra hatnak. Működésüket a reakcióközeg állapota, a hőmérséklet és a pH lényegesen befolyásolja.

Az enzimek katalitikus aktivitásáért az ún. aktív centrum a felelős. Ez a centrum az enzimfehérje egy bizonyos régiója lehet, amely az aktivitás kifejtéséhez szükséges konformációval rendelkezik. Sok enzim a fehérjerészhez stabilan vagy reverzibilisen kötődő prosztetikus csoportot, ill. koenzimet visel. A szubsztrátspezifitásért a proteinrész felelős, a hatáspecifitás többé-kevésbé a koenzimnek tulajdonítható.

A talajokban és vizekben is – a talajmikrobák által biológiailag kontrollált biokémiai reakciók mellett – nagy számban zajlanak olyan biokémiai történések, amelyek irányításában a biológiai ellenőrzés alól már felszabadult, a sejtes kötelékből kilépett, de aktivitásukat még megtartó, ún. „szabad enzimek” vesznek részt. Ezek mint biokatalizátorok kaotikus és irányítatlan módon degradatív és szintetikus reakciókat egyaránt serkenthetnek. Részt vehetnek olyan anyagok biokémiai szintézisében, amelyre élő szervezetek egyáltalán nem képesek, ill.

amilyen szintézisek az élő szervezetek számára teljesen célszerűtlenek lennének. A szabad enzimek aktivitásukat a talajban hosszú ideig megtarthatják és ellenőrizetlen működésük sajátos módon kerül a talajok általános dinamikája, forgatása, trágyázása, öntözése, stb. befolyása alá.

Bármely talaj akár egygrammnyi egységében is sok ezer és millió mikrobacejt lehet jelen, melyek mindegyike a fajra jellemző enzimkészlettel, ill. ennek szintézisére potenciálisan képessé tevő genetikai kapacitással rendelkezik. A metabolizáló baktériumsejt adott pillanatban számos enzim sok ezer molekuláját üzemelteti. Emellett a talajban egyidejűleg számtalan ellenőrizetlen enzimaktivitás is zajlik. Valamennyi jelenlévő enzimet együttesen „talajenzimnek” neveznek. Eredetük szerint a következőképpen lehet őket felosztani:

Fólia: Talajenzimek felosztása az eredetük szerint:

1. Szaporodó vagy vegetáló mikrobacejteknek, aktív növényi gyökereknek, továbbá a mikro- és mezofauna élő tagjainak endocelluláris enzimeit. Ezek tehát még nem szabad enzimek.
2. Valódi szabad enzimek a talajban, amelyek működése már nincs közvetlen biológiai szabályozásnak alárendelve:

2.1. folyamatosan a környezetbe leadott extracelluláris enzimek, amelyek főleg mikrobákból vagy növényi gyökerekből származnak;

2.2. a talajban korábbról akkumulálódott enzimek. Ezekben belül:

2.2.1.a mikroorganizmusok sejtalakelemeihez kötődve

2.2.1.1. intakt, de már elhalt sejtekben,



2.2.1.2. sejtfagmenteken

2.2.2. nem sejtalakelemekkel társulva

2.2.2.1. növényi gyökerekből származók,

2.2.2.2. mikrobáktól és faunaelemektől származók,  
lehetnek:

2.2.2.2.1. extracelluláris enzimek vagy

2.2.2.2.2. tönkrement sejtek endocelluláris  
enzimeit.

Mivel a felsorolt kategóriákba tartozó enzimek aktivitásának elválasztása egyelőre megoldatlan, általában valamely meghatározott szubsztrátokra ható egyes talajenzimek totális aktivitását mérjük, mikor is valamennyi, az előbb megadott kategória azonos funkciójú enzimeit egyidejűleg hatnak. A méréskor a reakcióközeghez az élő sejtek lízisét és az endocelluláris enzimek felszabadulását elősegítő sejtoldó vegyületet, pl. toluolt adunk. Ez utóbbi egyúttal bakteriosztatikus hatású is.

A különböző talajokból ma gyakorlatilag a legtöbb esetben nem magukat az enzimeket sikerül kimutatni, hanem leginkább az enzimaktivitásukat tudják nagy valószínűséggel bizonyítani. A leggyakrabban tanulmányozott talajenzimek oxidoreduktázok és hidrolázok. Egyes esetekben transzferáz- és liázaktivitásokat is kimutattak, izomeráz- és ligázaktivitásokat azonban még nem.

## **A szabad enzimek sorsa a talajban**

A 2.1 és a 2.2.2. pontokban felsorolt enzimek a talaj folyadékfázisában vagy szerves- és szervetlen komponensekhez kötődve fordulnak elő. Az enzimek a talajokban immobilizált állapotban, a degradációnak többé-kevésbé ellenállva, aktivitásuk valamilyen szinten történő megtartásával hosszabb időn keresztül megmaradhatnak. Lekötődésüknek ill. immobilizációjuknak lehetőségeire az 1. ábra (ea ppt) mutat be példákat.

Egyes feltételezések szerint az exoenzimeket a talajok szerves kolloidjai fogják fel, és ezáltal immobilizálódnak (mozgásképtelenné válnak). A szerves kolloidok maguk viszont agyagrézecskekhez kötődhetnek. Amikor a talajokban humuszanyagok szintetizálódnak, a folyamat az exoenzimeket és a lizáló sejtekből származó endoenzimeket is magával ragadhatja és a friss humuszanyagokhoz kötheti vagy azokba beépítheti. Az enzimek ilyen lokalizációja még nem feltétlenül gátolja meg, hogy szubsztrátjaik oda diffundáljanak, és a keletkezett termékek távozhassanak, ugyanakkor magát az enzimet bizonyos makromolekulákkal szemben meg is védheti. Ezt a feltételezett modellt eredetileg az ureáz enzimre állították fel.

A talajokban felhalmozódó szabad enzimek azonban nemcsak kis molekulatömegű, oldódó szubsztrátok bontásában vesznek részt. Azt viszont nehéz elképzelni, hogy olyan nagymolekulájú anyagok kezdeti depolimerizációja, mint pl. a cellulóz vagy a keményítő, szerves anyagok szövetébe zárt enzimek hatására menjen végbe. Az ilyen esetek értelmezésére más, megfelelőbb modellt szerkesztettek (2. ábra, ea ppt).

E szerint egyes enzimmolekulák meghatározott orientációban a humuszanyagok felületén – feltehetőleg lipofil csoportok segítségével kapcsolódva – helyezkednek el, miközben kritikus denaturációs helyeik a

támadás elől mintegy leárnyékolódnak. Az exoenzimek, mint pl. az ureáz, feltehetően a humuszanyagok legkülönbözőbb csoportjaihoz kapcsolódhatnak, ilyen szempontból különleges (specifikus) vonzatuk nincsen. Stabilizálásukhoz poliszacharidok éppúgy hozzájárulhatnak, mint aromás polimerek. Szabad enzimek ezenkívül agyagásványokhoz is társulhatnak (2. ábra). Az elmondottakból nyilvánvalóvá válik, hogy a szabad enzim megjelölés csakis a biológiai ellenőrzés alóli mentességet jelöli. Ezek a biokatalizátorok mozgásszabadságukat a talajokban általában igen gyorsan elvesztik, és többnyire ásványi vagy szerves komponensek felületéhez irreverzibilisen kötődnek.

## **A talajból kimutatható enzimaktivitások**

A következőkben a talajból kimutatott enzimaktivitásokat vesszük sorra, röviden kiemelve működésük lényegét.

### *1. Oxidoreduktázok*

Ezen enzimek redoxreakciókat katalizálnak, tehát olyan reakciókat, amelyekben oxidáció és redukció együtt zajlanak. Ennek során elektronátvitel történik, legtöbbször H-hez kapcsolva, O<sub>2</sub> jelenlétében.

Például:  $2 \text{H}_2\text{O}_2 \text{ -----} > 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2,$   $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{Al} \text{ --} > 2 \text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$

**1.1. Dehidrogenázok:** (A talajhoz adott 2,3,5-trifenil-tetrazolium-klorid trifenil-formazánná redukálása mértékének alapján mutatják ki (TTC-módszer)). A talajmikrobák sejtjein belül lejátszódó légzési anyagcsere indikátorai, aerob esetben. Az oxigén vízzé alakításában

azzal vesznek részt, hogy a dehidrogenáz enzimek hatására tárolódnak a szubsztrátról érkező elektronok NADH-ban. A talajban aktív dehidrogenázok gyakorlatilag csak intakt sejtek integráns alkatelemeiként szerepelnek, és emiatt feltételezik, hogy a mérhető dehidrogenázaktivitások a talajmikroflóra teljes oxidatív aktivitását tükrözik. Igaz ugyan, hogy mivel a baktériumok többféle dehidrogenázzal rendelkeznek, ezen mérés sosem mutatja a teljes kapacitás összegét, hisz mindig csak egy-egy enzimet mérünk vele, mégis az enzimek közül a dehidrogenázok jellemzik a legjobban a talaj mikrobiológiai aktivitását. Könnyen mérhető aktivitásuk, és annak nagysága arányos a talajlégzéssel, egyben közvetlenül függ a talaj szervesanyagtartalmától is. A mérhető aktivitás ennek megfelelően a talajmélységgel párhuzamosan csökken. Nem alkalmas azonban arra, hogy a talaj termékenységét megjósoljuk vele, azzal nem áll ilyen szoros összefüggésben.

**1.2. Kataláz:** A talajok hidrogén-peroxidból 2-60 perc alatt különböző intenzitással oxigént szabadítanak fel. Ezen aktivitásnak mintegy 5-65%-át a szervesetlen mangán- és vasvegyületek okozta hidrogén-peroxid bomlás adja. A katalázaktivitás a talajban a mélységgel általában csökken, de szezonális változások is kimutathatók, ill. még a növénytakarónak is van szerepe.

**1.3. További,** a talajokból kimutatott **oxidoreduktázok:** glükóz-oxidáz, aldehid-oxidáz, peroxidáz, stb.

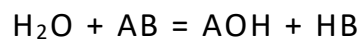
## *2. Transzferázok*

Olyan enzimek, melyek bizonyos funkciós csoportokat visznek át egy donorról egy akceptorra.

### 3. Hidrolázok

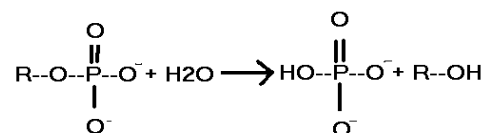
Ezek az enzimek reverzibilis reakciókban a szubsztrátumot hidrolítikusan hasítják.

Hidrolízis: egy kondenzáció által létrejött kémiai kötés hasítása, víz hatására:



**3.1. Foszfátáz:** A foszforkörforgalom növényzet számára különösen fontos enzime. A legtöbb talajban a szervesen kötött P mennyisége magasabb, mint a szervesetlen foszforé. Ezen szervesen kötött foszfor növények általi felvehetőségének előfeltétele a foszfátázok általi mineralizációs lépés.

Foszfátázok főleg alacsony az alacsony P-tartalmú talajokban képződnek, és érzékenyen reagálnak a talajba jutó szerves anyagra. Ekkor a foszfátáz a szerves vegyületről (foszfátészterek) hidrolítikusan fenolt hasít le, amely fontos a mérés szempontjából.



A talaj foszfátázaktivitás évszakos változást mutat, és azt a növénytakaró is befolyásolja. A talajba került szerves vagy szervesetlen trágya hatására a

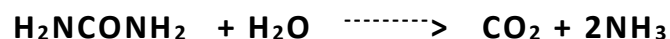
foszfatázaktivitás általában növekszik, ugyanezt figyelték meg meszezéskor is. Egyesek a foszfatázaktivitás nagyságrendjét a talaj teljes szervesfoszfor-készletének nagyságával egyenesen arányosnak találják, mások ezt cáfolják.

3.2. **Amiláz:** A keményítő hidrolízisében  $\alpha$ - és  $\beta$ -amilázok vesznek részt. A talajamiláz-aktivitás a talajmélységgel csökken, szezonálisan ingadozik, és a növénytakaró is befolyásolja.

3.3. **Celluláz:** A cellulázaktivitást vagy a szubsztrát (celofán, cellulózpör, karboximetil-cellulóz) eltűnésének vizsgálatával (gravimetrikus vagy viszkozitás méréssel), vagy a redukáló cukrok megjelenésével detektálják.

3.4. **Invertáz:** A besugárzott vagy toluollal kezelt talajok szacharózt glükózra és fruktózra hidrolizálnak. Az aktivitás kimutatásához 4,2-5,0 pH (optimum) esetén is néhány órától napokig inkubálhatunk. Az invertázaktivitás a talajmélységgel, szezonálisan, a növénytakaró szerint, a talaj szervesanyag-tartalmával, trágyázással stb. párhuzamosan változhat, ill. ingadozhat. Egyes szerzők a talaj mikrobiális aktivitása általános szintjének becslésére is ajánlják.

3.5. **Ureáz:** A nitrogénkörforgalom indikátorenzime. A következő reakciót katalizálja:



Az ureázaktivitást vagy a szubsztrátként adott urea fogyásából, vagy az ureából lehasított  $\text{CO}_2$  produkciójának mérése alapján állapíthatják meg,

de lehetőség nyílik az  $\text{NH}_4^+$ -termelés alapján is mérni. Igen széles körben elterjedt talajenzim, amely nagyon érzékenyen reagál a könnyen felvehető N-forrásokra, mint pl. trágyára, valamint az ökotoxikus peszticidekre. Az ureázaktivitás a talajtulajdonságokkal is szorosan összefügg, így pl. egy agyagos-vályog fizikai féleségű talajban sokkal magasabb az aktivitása, mint egy homokos talajban. Az ureázaktivitás szintén szezonálisan, ill. a növénytakarónak megfelelően ingadozik. Az aktivitás a talajmélységgel csökken és korrelál a szervesanyag-tartalommal. Az ureázaktivitást extracelluláris enzimek hatására vezetik vissza. Általában a nedvességtartalom, a szubsztrátkoncentráció, a hőmérséklet és még több más faktor együttesen alakítják ki a karbamidbontás enzimeinek mindenkori aktivitásszintjét.

**3.6. Proteázok, peptidázok:** Proteinekkal (ovalbumin, kazein, haemoglobin és főleg zselatin) inkubált talajokban kis molekulatömegű aminovegyületek jelennek meg, amit a talajproteáz aktivitás megnyilvánulásának tekintenek, tehát a proteázok a könnyen felvehető N-forrásokat mobilizálják. A proteázok megkötődve a humuszösszetevőkön és az agyagásványokon stabilizálódhatnak. A többi talajenzimmel ellentétben igen érzékenyek a kiszáradásra, ilyenkor erősen lecsökken aktivitásuk. A proteázaktivitás csökken a talajmélységgel, változik az évszakokkal. Proteázokat talajokból már extraháltak is.

#### 4. Liázok

Ezen enzimek vagy két szubsztrátum összeépülését katalizálják egy vegyületté, vagy egy szubsztrátumból egy molekula lehasításával egy új kettőskötést, ill. egy aromás (ciklikus) molekulát hoznak létre.

Például: glutaminsav-dekarboxiláz

5. Talajokból még nem mutattak ki **izomeráz és ligáz**-aktivitásokat.

### **A talajenzimek aktivitását befolyásoló tényezők**

A talajenzim-aktivitások megnyilvánulását számos tényező sokszor áttekinthetetlen módon befolyásolja.

A foszfatázaktivitás méréséhez kezdetben igen nagy reményeket fűztek, remélve, hogy ezek hűen tükrözik a teljes mikroflóra biomasszájának méretét vagy tevékenysége szintjét. Ám a foszfatázaktivitást is annyi tényező befolyásolja, hogy univerzális módszernek ez sem tekinthető.

Az extracelluláris enzimek igen nagy különbségeket mutathatnak a sugárzásokkal szembeni rezisztencia terén, amit a talaj nedvességi állapota lényegesen befolyásol. Nedves talajban az enzimek sokkal érzékenyebbek, mint szárazban, ami feltehetően az aktivált vízgyökök denaturáló hatására vezethető vissza. A kolloidális komplexumban megkötődött enzimek denaturációja sokkal kisebb mértékben megy végbe.

### **A talajenzimek aktivitásából levonható következtetések**

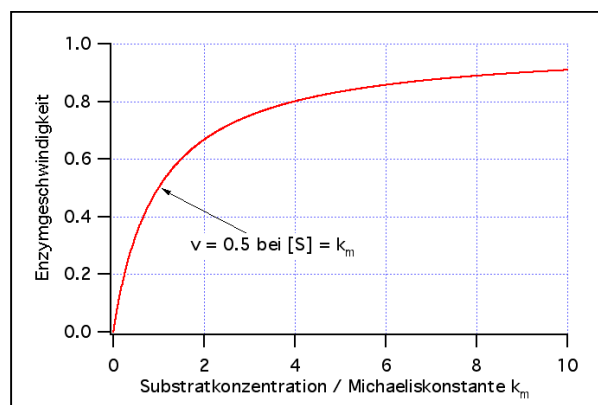
A talajenzimek aktivitásainak mérésével a talajok biológiai potenciáljáról vonhatunk le következtetéseket. A talajenzim-aktivitás mérési módszerek a múlt század közepe táján igen széles körben elterjedtek, mivel tőlük azt



várták, hogy a talaj mikrobiális dinamikájának aktivitásszintjét, s ezzel a talaj termékenységét jól leírhatják. Hamar kiderült azonban, hogy bár a talajenzimek vizsgálata számos hasznos információval szolgált, ezen módszerek mégsem alkalmazhatók univerzálisan a talajtermékenység jellemzésére. A talajokba kerülő rendkívül különböző eredetű enzimek, amelyek kumulációját és aktivitását számtalan faktor nagyon nehezen követhető módon befolyásolja, pillantanyilag mérhető aktivitásértékeikkel kizárólagos módon aligha jellemezhetik a talajok komplex biológiai dinamikáját, és különösen nem azok termékenységét.

A talajenzimek mellett vizsgálni kell a szubsztrát mennyiségét is a talajban, valamint ennek arányát az enzimek mennyiségéhez. Ezt befolyásolhatja több tényező, mint pl.:

- növekvő szubsztrátkötődés esetében egyre kevesebb szabad enzim lelhető fel a talajban, tehát nem lesz többé lineáris az összefüggés az aktivitásuk és a szubsztrátkoncentráció között.



3. Ábra: a reakciósebesség és a szubsztrátkoncentráció közötti összefüggés a talajban

- A szubsztrát mennyisége  $\neq$  a rendelkezésre álló mennyiséggel!
- Az enzimek optimumai eltérőek.
- Sokszor azt sem tudjuk, mennyi enzimet mérünk egyszerre, s melyeket mérjük pontosan!

A talajokban ezen kívül számtalan szervetlen és szerves, de nem enzimkarakterű katalizátor is működik, amelyek hatása csak még bizonytalanabbá teszi az enzimaktivitás-értékek megítélését. Így a talajok biomasszáját, csíraszámát és enzimaktivitásait mérve és összehasonlítva a korreláció hol kimutatható, hol nem. A talajenzimek tehát csak igen korlátozott mértékben szolgáltatnak információt a talajok mikrobaközösségeinek szerteágazó közösségi anyagcseréjéről.”

Felhasznált irodalom:

*Szabó István Mihály „Az általános talajtan biológiai alapjai”, Mundus Kiadó, Bp., 2008.*

## A növények és a termőtalaj anyagforgalmi egysége

### **A magasabb rendű növényi szervezetek**

„A földi élet több évmilliárdos történetében mintegy 400 millió évvel ezelőtt (szilur) kezdték meg a szárazföld meghódítását a növények, 180 millió évvel ezelőttre tehető a nyitvatermők megjelenése, majd kb. 1 00 millió évvel ezelőtt követte őket a zárvatermők térhódításának kezdete, melyek a mai növényvilág uralkodói tagjai. A zárvatermő virágos növényekkel az evolúció a heterospóras nemzedékváltakozás fejlődésmenetében a fejlettség mai, legmagasabb szintjét érte el. A zárvatermők rendkívül aktív talaj-, ill. gyökérmikroflórákkal társulnak, és nagy elsődleges produktivitást érnek el. Náluk a test vegetatív része jelentősen tökéletesedett, vonatkozik ez a szállító berendezésekre (tracheák), a vízraktározás alapszövetekre és a párologtatás csökkentés sajátos szerkezeti megoldásaira. Az egyes szervek, így a gyökér, a szár és a levelek maguk is nagyfokú alkalmazkodást mutatnak akár a fény intenzív felfogásához, a produkció növeléséhez, avagy a talajmikroflóra tagjaival való szoros kontaktus kiépítéséhez, stb. Erre vezethető vissza, hogy napjainkra a szárazföldek túlnyomó részét meghódították, és több mint 200.000 fajuk ismeretes. A növényvilág tagjainak hosszú fejlődése végig szinkronban, elválaszthatatlanul haladt azzal a talajmikroba-közösséggel, amelynek tagjaival való együttműködésük eredménye az elemek állandó körforgalma. Tekintsük át ennek szellemében vázlatosan, mik és milyenek a növények és szerveik fő működésének elemei, s milyen ezek kapcsolata a talajjal és annak mikrobáival.

## A növényi gyökerek vízfelvétele

A növényi gyökérnek számos funkciója van. Mindenekelőtt hatalmas felületet fejlesztve közvetlen kontaktust épít ki a talaj ásványosító mikroflórájával, amelynek tagjaival anyagokat cserél, kommunikál, a talaj biológiai dinamikáját szabályozza, szelektíven serkent és gátol, stb. Mindezen folyamatokban döntő fontosságú a víz- és tápelemfelvétel, továbbá a gyökérváladékok kiválasztása. A gyökerek ezen kívül még rögzítő funkciót is betöltenek, részt vehetnek a tápanyagok raktározásában, stb. A növény és a talaj közötti anyagcsere-kapcsolat rendkívül szoros közvetlen kontaktusát bizonyítja, hogy pl. egyetlen rosnövény gyökérrendszere elérheti a 80 km hosszúságot! A gyökerek a talajba általában 2-3 m mélyre hatolnak, és a növény fejlődésének korai szakaszaiban a teljes száraztömeg akár 50%-át kitehetik.

A gyökerek vízfelvételéért felelős mechanizmusok ismerete talajtani, növényélettani, mező- és erdőgazdasági szempontból is fontosak.

**Gyökérnyomás:** A növények képesek arra, hogy szállítóelemeibe az azokat körülvevő gyökéresejtekből sókat válasszon ki. Ezzel ott alacsony vízpotenciált alakít ki, melynek következtében a víz a gyökér szállítóelemeibe áramlik, és ha innen rövid időn belül nem haladhat tovább, ún. turgornyomás alakul ki. Lényegében ez a gyökérnyomásgyökérnyomás, amelyet azzal szemléltethetünk látványosan, hogy ha a növény szárát a talaj felett elvágjuk (dekapitáljuk), mert ekkor a vágásfelület a turgornyomás következtében könnyezni fog. Ennek a nedvkiáramlásnak a nyomása általában mindössze 2-3 bar. Amennyiben a talaj vízpotenciálja 2-3 bar-nál kisebb, ami igen gyakran előfordul, úgy a gyökérnyomás nullára redukálódik, a vágás felületén ekkor vízleadás nem következik be. Következik mindebből, hogy

egy egészséges, transzspiráló növény vízellátásában a gyökérnyomásnak nagyon kis szerepe van csak.

**Guttáció:** Lényegében ezért a jelenségért is a gyökérnyomás a felelős. Azt a folyamatot nevezzük így, amelynek során a növény a sértetlen levelek felületén úgy préseli ki a vizet, hogy az folyadékként, vízcseppek alakjában jelenik meg. Ez rendszerint annak a következménye, hogy a víz a gyökereken át sokkal gyorsabban lép be a növénybe, mint amekkora sebességgel azt a növény elpárologtatni képes. Az így leadott víz különösen tavaszi reggeleken, ill. meleg napot követő hideg, párás reggeleken jelentkezik a növények levélszegélyeiről lehulló cseppecskék formájában, főleg ha még a talaj víztartalma is magas. A leveleken át így kilépő víz különböző szerves és szervetlen oldott anyagokat tartalmazhat, tehát a guttáció a növénynek ásványianyag-veszteséget okozhat.

**Kapillaritás:** A víz a növények szállítóelemeiben a kapillaritás, a kapilláris erők hatására is mozoghat.

Azt az erőt, ami a vizet a növényekben a föld feletti részekbe, akár több méter magasra is megemeli, semmiképpen sem származhat a gyökérnyomásból, feltételezik, hogy a víz a gyökerekből annak a kis vízpotenciálnak (nullától távolabbi negatív érték) a következtében emelkedik a magasba, amelyet a növényi levelek párologtatásából származó vízveszteség idéz elő. Utóbbi a szállítónyalábokban vízhiányt, s ezzel kis vízpotenciált idéz elő. A víz ennek irányában halad, és a sztómákon keresztül a levelek mezofil sejtjeinek felületéről párolog el.

Tekintsük át a gyökerek vízfelvételét: a víz a talajból a gyökérbe csupán akkor lép be, ha a gyökér vízpotenciálja kisebb (negatívabb), mint a talajé. Ellenkező esetben a víz a gyökérből akár a talajba is távozhat. A víz nemcsak a gyökérszőrökön át hatol a gyökérbe, hanem a gyökér

valamennyi, még az idősebb felületein is. Eközben a növényi gyökérsejtek szállítónyalábjait a külvilágtól elhatároló sejtrétegek komoly hidraulikus ellenállását kell legyőzniük. A víz áramlásának három útját ismerik, melyek közül feltételezhetően a sejtfalon keresztüli áramlás a legjelentősebb, ahol többféle szövetet, sejtréteget elkerülve, a víz a hidrosztatikus nyomásgrádiensnek megfelelően nyomulhat előre (1. ábra: ea ppt).

### A gyökerek ion- ill. tápelemfelvétele

Ahogy a csírázó magvak tartalék tápanyagkészlete kezd kimerülni, a gyökérszövet fejlődésével fokozatosan megkezd a talajból való táplálkozást. A tápanyagok áramlása két fő folyamattal jellemezhető, ezek a **diffúzió** és az ún. **tömegfolyás (mass flow)**.

A gyökerek vízfelvétele a gyökérközeli talajban víztenziós grádienszt épít ki, ami a gyökerek felé irányuló vízáramlást idéz elő. Ezzel a vízzel a gyökerek felé az oldatban lévő tápanyagok is vándorolnak (**tömegfolyás**). Az ily módon felvehető tápelemek mennyisége a víz áramlási mennyiségétől és a talajoldat összetételétől függ. Néhány tápelem mennyiségének a talaj nedvességtartalmára vonatkoztatott lehetséges alsó és felső határértékét a 2. Ábra (ea ppt) mutatja:

Látható, hogy amíg a kalcium esetében a kukoricanövénynek saját tömege 275-szörösét elég vízből felvennie, ami azt jelenti, hogy ezen elemre nézve a tömegáramlás elegendő ellátást biztosít, addig pl. a foszfor esetében ez az arány már több mint 60-ezerszeres. Itt tehát ez a forrás önmagában természetesen nem elég, ennél hatékonyabb mechanizmusra van szükség, ez pedig a diffúzió: a tápelemeket tartalmazó anorganikus vegyületek ionjai a talajoldatban, ill. a talajrészecskék felületén

elhelyezkedő kicserélődési pontokon, helyeken keresztül folyamatosan vándorolnak a gyökerek felszínéig. A vándorlást az tartja fenn, hogy a gyökerek szelektíven veszik fel őket, és emiatt a gyökérközelben nagyon kicsi a koncentrációjuk. A talajban így az egyes elemekre ill. az ezeket hordozó vegyületekre nézve koncentráció grádiensek alakulnak ki, amelyek ezeket az elemeket még a talaj távolabbi körzeteiből is a gyökerek közelébe vonzzák. A növények tápelemutánpótlásában a kalcium és a kén esetében elsősorban a tömegfolyás, míg a foszfort illetően a diffúzió a döntő fontosságú. A kálium, a magnézium és a nitrogén felvételében – ezek talajoldatbeli koncentrációjától függően – mindkét mechanizmus jelentős lehet.

A tápelemek, ill. az ezeket hordozó vegyületek felvételének harmadik mechanizmusaként az ún. **kontakt-cserét (contact exchange)** is nyilvántartják. Eszerint a hajszálgökerek talajrészecskékkel vagy baktériumok sejtjeivel érintkezve, ionokat azokkal közvetlenül is kicserélhetnek.

A gyökerek tápelem-abszorpciója *energiaigényes*. Ha a gyökerek légzését gátolják, a tápelem-felvétel minimálisra csökken, tekintet nélkül arra, hogy az elem a talajoldatban milyen koncentrációban van jelen. A növényi tápelemfelvétel erősen szelektív is. A növények pl. a káliumot jóval nagyobb mennyiségben veszik fel, mint az azonos vegyértékű nátriumot. Durva megközelítésben úgy képzelik, hogy a talajoldatból származó ionok a gyökérsejtek felületéhez diffúzióval jutnak el. Ez a folyamat reverzibilis, és a növény anyagcsere- aktivitásától függetlenül is végbemegy. Ezután az ionok irreverzibilis membrántranszportja következik, ami már energiakiadással jár. E folyamatban transzport fehérjék játszanak szerepet. A segítségükkel jutnak át a szerves ionok a membránon, s a sejtben általában a vakuólumba kerülnek. A befektetett energia

segítségével tudja a növény azt elérni, hogy benne egyes ionokból a külső talajoldat ionkoncentrációinak sokszorososa alakulhasson ki. Az ionszállító fehérjék általában meghatározott ionokra, vagy ezek csoportjaira specifikusak.

Amennyiben a talaj átlegegőzöttsége kedvezőtlen, a gyökerek légzése az O<sub>2</sub>-hiány következtében lelassul, a tápelemek gyökérszorpciója is lelassul. Ekkor a növény növekedése lelassul, bizonyos idő eltelte után hanyatlik. Az ionok felvételét a növény számára felvehető talajnedvesség mennyiségének csökkenése érzékenyen érinti. Ez elsősorban a foszforra vonatkozik, amely nagyon nehezen oldható, és csekély a mobilitása. A tápelem-abszorpciót természetesen ezen kívül a gyökerek helyi denzitása is befolyásolja.

### **A rizoszféra és a rizoplán fogalma**

A talajban növekedő gyökerek felületéhez talajszemcsék tapadnak. Utóbbiakon és magukon a gyökereken is baktériumok és gombák tenyésznek. A gyökérepidermisz felületét nyálkaréteg borítja, amelynek kémiai összetételét csak kevéssé ismerjük. Sok esetben oligo- és poliszacharidok dominálják, de fenolvegyületeket is tartalmaz. A mikroorganizmusok ezt a növényfajonként változó vastagságú nyálkaréteget gazdagon, sokszor több sejtrétegben, a gyökert hüvelyként körülfogva kolonizálják. A gyökerek közvetlen felületén – elsősorban a felszíni nyálkarétegben, az ún. **rizoplánban** és a gyökerekhez közel eső (néhány mm távolságban levő) talajban, az ún. **rizoszférában** a mikrobák száma általánosan mindig nagyobb, mint magában a gyökértávoli talajban, a gyökerektől több cm-es távolságban. Természetesen a gyökerekre a mikrobák nem csak a gyökérszőrökön



települnek, bár a növényvel itt folytatják a legélénkebb anyagcserét, hanem mindenütt, még az elöregedő gyökerek felületén is.

A mikrobák eloszlása a rizoplánban sem egyenletes. A *Pinus radiata* talajban növekedő gyökerein mikroszkóppal figyelték meg, hogy ezek különböző szakaszainak benépesültsége rendkívül változó: a három hétnél idősebb gyökérszakaszok már csak gyéren kolonizáltak. A kolonizáltság a növény korával is változik: a 3-4 napos növényke gyökerének kolonizáltsága még nagyon csekély, és feltehetően ez az oka annak, hogy a gyökérfelületeken ilyenkor a szaprofita mikrobák a gyökérkórokozók támadásával szemben csak kevés védelmet nyújtanak.

A baktériumok gyakoriak a gyökerekre tapadó gomba-hifafonalak mentén is: részben azért, mert vándorlásukhoz a hifafonal váladékát is értékesítik. A gombák különösen gyakoriak a gyökerek felületén. A *Lolium perenne* és a *Plantago lanceolata* gyökerein növekvő hifafonalak hosszát 1 mm<sup>2</sup> gyökérfelületre számítva 12,1 ill. 14,3 mm-nek találták!

Az elektronmikroszkópos vizsgálatok egyre inkább a nyálkaréteg, az ún. **mucigél** felé irányítják a figyelmet. Ez általában 1-10 µm vastagságú lehet és legterjedelmesebb a gyökér megnyúlási zónájában, továbbá az epidermiszsejtek kapcsolódásainál. A talaj és a gyökerek között végbemenő tápanyag-diffúzió számára lényegében ez teremt kontaktust, aszály idején a fiatal gyökereket a kiszáradástól védi és feltehetően mikrobákkal szemben is védelmet nyújt. A gyökérsüveg kiválasztotta mucigél a talajon áthatoló gyökér számára valóságos csúszdát képez. A baktériumoktól mentes, teljesen sterilen tartott növény is termel mucigélt, de kevesebbet, mint a természetes körülmények között tartottak. A baktériumok behatolnak a mucigélbe, és abban egy kb. 1-2 µm vastag elektrontranszparens réteget hoznak létre. A mucigélt

fogyasztják, de teljesen nem emésztik fel, mert azt a növény folyamatosan újratermeli.

A gyökerek közvetlen felszínén élő rizoplánközösségek és a gyökérközeli talajban tevékenykedő rizoszféraközösségek elkülönített vizsgálata nem könnyű. Még bonyolultabb technikára van szükség ahhoz, hogy e szervezeteknek a növényekkel kialakított kapcsolatát vizsgálhassuk.

A gyökerek hatását a mikroorganizmusokra tenyészedény-kísérletekben, fény- és elektronmikroszkópos közvetlen megfigyelésekkel, csíraszámolásokkal, manometriás technikákkal, ismert baktériumokkal visszafertőzött steril növénytenyészetekkel, autoradiográfiával stb. tanulmányozzák. A rizoplán, ill. a rizosféra mikrobáit nagyon különböző összetételű folyékony és szilárd tápközegekben tenyésztik ki, ugyanakkor fiziológiai és morfológiai csoport-csíraszám meghatározásokat végeznek, tiszta tenyészeteket hoznak létre, ezeket taxonómiailag meghatározzák és/vagy kísérletekbe vonják. Az ún. "*rizosféra talaj*" előállítására a gyökereket steril vízben enyhén rázzák és az aláhulló nedves talajrészecskékből szuszpenziót állítanak elő, abból hígítási sort készítenek, és ezt baktérium-, aktinomiceta- és gombacsíra-számlálásra vagy izolálásukhoz lemezelik. Gyakran az eredetileg is gyökérmentes talajból nyert mintákkal kontrollvizsgálatot végeznek. A rizoplán (közvetlen gyökérfelszíni) populáció tanulmányozásához az előbbi mosóvízből kiszedett gyökereket váltott, steril vízzel még többször, akár 10-20-szor is tovább mossák, majd a talajrészecskéktől teljesen mentes fehér gyökereket steril papír között felületesen vízmentesítik, mérik és mechanikailag zúzzák, ill. homogenizálják. A zúzatból hígítási sort készítenek és ezt lemezelik. A csíraszámot a gyökér száraz, ill. nedves tömegére vonatkoztatva adják meg. A gombák kitenyésztéséhez esetenként agarlemezekre mosott gyökérszegmenteket helyeznek, és a

kinövő hifacsúcsokból izolálnak. A rizoszfératalaj általános anyagcsere-aktivitását manometrikusan mérik, vagy specifikus talajenzim-aktivitás meghatározásokkal derítik fel. A gyökérizzadványok tanulmányozásához érzékeny módszerek szükségesek, minthogy ezek mennyisége nagyon csekély. E téren legfontosabb módszerek elsősorban a kromatográfiás eljárások és biológiai tesztek. A steril gyökerekből származó exszudátumokat pl. szűrőpapírra abszorbeáltatják, és futtatással elkülönített komponenseket, vegyületeket szelektív sprayk segítségével mutatják ki. A bioassay technikákkal különleges érzékenységgű, reaktivitású vagy deficienciájú mikrobák növekedési válaszát detektálják: spóracsírázási vagy gombavonzó faktorokat, antibiotikus hatóanyagokat, stb. mutatnak ki. Az ilyen tesztek a gyökérizzadmányok valódi kémiai összetételéről gyakran csak kevés felvilágosítást adnak. Az egyes komponensek kémiai természetének felderítése sokszor igen fáradságos, komplex munkát igényel.

### **A gyökérváladékok sajátos mikroflórát szelektálnak**

A gyökerek felületén és a gyökérközeli rizoszféra talajban szaporodó mikrobák magából a talajból származnak. A talajmikrobák a gyökérváladékok hatására szelektálódnak, azaz közülük bizonyos típusok kiválogatódnak és a gyökereken, vagy azok közvetlen közelében elszaporodnak. A csírázó magvak és a gyökerek illó és oldódó váladékai a talajmikrobák szaporodását és esetleg aktív mozgását is a gyökérfelszíntől –mikrobiális méretekben mérve -viszonylag nagyobb távolságban is befolyásolhatják. Növényi magvaktól eredő serkentést a *Fusariumok* klamidospórái a magtól akár 10 mm távolságban is felfoghatnak. Különös ellentmondás, hogy a gyökérváladékok a

gyökerektől elfelé diffundálnak, a víz viszont ellenkező irányban, a gyökerek felé, azok szívó hatására mozog.

A gyökérváladékok serkentő hatására a baktériumok a gyökér irányába aktív mozgással (csillók segítségével) úszhatnak. A baktériumokról tudjuk, hogy 5-10 bar szívóerővel visszatartott talajvíz jelenlétében is szaporodhatnak, aktív mozgásukhoz azonban 0,5-1,0 bar alatti értékeket igényelnek, ami megközelítőleg a szabadföldi vízkapacitásnak felel meg. Ez érthető is, ha figyelembe vesszük, hogy úszni csak folyamatos vízhártyában képesek.

Tény, hogy a talajrészecskéket borító vízhártyában már kisebb szívóerőnél diszkontinuitások lépnek fel. Így pl. a *Rhizobium trifolii* sejtjei durva homokban 0,035, finom homokban 0,20, agyagos vályogban pedig 0,40 bar szívóerő (vízvisszatartó erő) értékeknél már alig vándorolnak.

A gyökerek felületén bizonyos baktériumfajok szaporodási sebessége meggyorsul. Ezt úgy lehet megállapítani, hogy meghatározott időközökben gyökérmintákat vesznek, amelyekben identifikált mikrobafajok csíraszámát detektálják. Az adatok alapján a generációs idő kiszámítható és összehasonlítás tehető faj és faj között, pl. a gyökerek különböző részeinek hatására vonatkozóan (ld. 3. Ábra, ea ppt)

A 3. ábra táblázatában láthatjuk, hogy:

1. a gyökéren a mikroorganizmusok generációs ideje viszonylag hosszú (rövidebb, mint a gyökértávoli talajban szaporodóké, de sokkal hosszabb, mint a laboratóriumi táptalajokon szaporodóké);
2. A rizoszférában a talajjal összehasonlítva a szaporodás nagyfokú serkentése észlelhető. Ezt **rizoszféra-effektusnak** nevezik. A táblázatból az is látszik, hogy a *Pseudomonasok*, amelyek

jellegzetesen gyökérlakó baktériumok, sokkal gyorsabban szaporodnak, mint a *Bacillusok*, amelyek alapján véve idegenek a gyökérközeli régióktól, az igazi élőhelyük a gyökértávoli talaj.

3. A talaj sterilizését követően az oltással bevitt *Pseudomonasok* gyors szaporodással indulnak, míg a *Bacillusok* serkentése sokkal gyengébb mérvű, ami megint arra utal, hogy a növényi gyökerek szelektálnak a mikrobák között.

Közvetlenül a gyökér körül (a rizoszférában) a baktériumok száma sokszorososa lehet a kontrolltalajénak. Az ún. R:S-érték (rizoszféra:talaj arány) a baktériumokra vonatkoztatva még a 100-at is elérheti. A gyökérszónában a baktériumokon kívül még algák, protozoonok és szabadon élő nem parazita nematódák serkentése is kimutatható.

A gyökér körüli mikrobaközösség faji összetételét vizsgáló számtalan kísérletben mára már egyértelműen kimutatták, hogy a gyökerek serkentő hatása szelektív, és nem minden fajnak szól. A legtöbb növény gyökerén Gram-negatív, spórát nem képző, pálcika alakú baktériumok szaporodnak, míg a Gram-pozitív, spóraképző pálcikák, a pleomorf pálcikák és a kokkuszok száma sokkal kisebb. A búza rizoplánjában pl. *Pseudomonas* fajok uralkodnak, míg a *Bacillus* fajok előfordulását ugyan több esetben kimutatták, jelenlétük a gyökérszónában mégsem általános, az nem igazi otthonuk. Szintén nem tekinthetjük tipikusnak pl. a nitrogénkötő *Azotobacter* előfordulását a gyökereken.

Összességében a gyökerek mikrobanépségének összetétele a gyökértávoli talajétól lényegesen eltér, azonban az egyes növényfajok egyedeinek nincs a fajra jellemző specifikus mikroflórája.

## **A gyökérmikroflóra szerepe a növények táplálékfelvételében**

A mikroorganizmusok közreműködnek a növény és a talaj közötti tápelemforgalomban, ezzel rendkívül fontos szerepet játszanak a növények táplálkozásában. A növényi gyökerek három mechanizmus révén léphetnek kontaktusba a tápelemekkel:

1. a gyökerek szétterjedésével a talajban;
2. a víz tömeges áramlásával a gyökerek irányába, és
3. a koncentrációs grádiens mentén végbemenő diffúzióval.

Az első mechanizmussal a talaj térfogatának csupán 2-5%-ából lehet ionokat hasznosítani! Ez egyes esetekben, különösen a 2. mechanizmussal együtt, már elegendő lehet a növény kalcium- és magnéziumigényének kielégítésére. Azonban a 3 együtt sem elegendő a nitrogén-, foszfor- és káliumszükséglet fedezéséhez. Ezeket elérhető alakban és mennyiségben a mikrobák aktivitása szolgáltatja. A víz tömegfolyása (2. mechanizmus) jelentős mennyiségű szerves szén- és nitrogénvegyületet áramoltat a gyökerek felé. Ezek ásványosítása és elemeik felvehető állapotba transzformálása a növényi gyökerek közelében folyik, a mikrobák által. Jórészt ez a folyamat látja el a növényeket foszforral, kénnel és mangánnal is.

A mikrobák a növényt hatékony szerves anyagcseretermékeikkel is befolyásolhatják, pl. növekedésgátló vagy -stimuláló metabolitokkal. A rizoszféra-mikrobák aminosavakat, vitaminokat, indol-3-ecetsavat, indolszármazékokat és gibberelint állítanak elő. A növény és annak a talajban élő mikrobapartneri közötti szoros anyagcsere egységét bizonyították egy levéltrágyázási kísérletben is: a növények leveleire permetezett urea hatására a búza gyökerein megnőtt a baktériumok

száma és csökkent a gombáké, ami a gyökérfelszín teljes anyagcseréjének lényeges módosulását vonja maga után.

### **A magvak és palánták bakterizációjának kedvező hatása**

A magvak vagy a gyökerek ún. **bakterizációja** alkalmával a növény magvait vagy a palánták gyökereit növekedésserkentő baktériumok kultúráival kezelik. A használt baktériumkészítményeket gyakran "*baktériumtrágyának*" nevezik (*bacterial fertilizers*). A legjobban bevált és széles körben elterjedt a hüvelyes növények magjainak kezelése *Rhizobium* baktériumokkal. Hasonlóan elterjedt az *Azotobacter chroococcum* felhasználása nitrogénfixálásra és a *Bacillus megaterium phosphaticum* törzsek használata a szerves foszforvegyületek ásványosítására."

Felhasznált irodalom:

Szabó István Mihály „Az általános talajtan biológiai alapjai”, Mundus Kiadó, Bp., 2008.

## A mikrobák szerepe a talaj képződésében és fejlődésében

### **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 szervetlen, 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, és 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 képezi. Az erdőkben a fás növényi anyagok lebomlása, ásványi tápelemek reciklizálása természetesen lassabban játszódik le, mint pl. a füves vegetációé.

Az avar lebomlásának más szempontból is felbontható két fő szakasza: a fizikai destrukciót követi a kémiai degradáció. Az elsőért főleg a talaj mezo- és makrofaunája (ászkarákok, ezerlábúak, stb.), a másodikért a mikrobák a felelősek. Fizikai destrukción a holt szerves anyagok, pl. a lehullott levelek, ágak felaprítását, finom méretű felaprózását értjük. Ez a felületnagyságnövelés a gombák és baktériumok számára sokszorosára növeli az általuk támadható felületet. A felaprítás a szerves maradványok rágásával kezdődik, ezt követi az összeőrölt anyag béltranszportja, majd a leadott ürüléknek újabb és újabb faunaelemek (koprofágok = ürülékkevők) révén megvalósuló ismételt fogyasztásával, aprításával folytatódik. Számos vizsgálat igazolja, hogy ha a lehullott leveleket a talaj felszínére olyan lyukbőségű nyílászáróba zárva helyezzük, amelyen az avaraprító faunaelemek nem hatolnak át, a mikrobiológiai kémia lebontás (ásványosítás) – előzetes felaprítása nélkül – csak nagyon vontatottan halad előre. A felaprításban az avartakaró és a humuszint (-horizont) gerinctelen állatvilágának tagjai vesznek részt (1. Ábra, ea ppt).

Az avartakaróban, ill. a humuszhorizontban tevékenykedő és a talajképzésben fontos szerepet játszó faunaelemek gyakori típusai a következők:

- 1-2. ikerszelvényesek vagy ezerlábúak (*Diplopoda*): nedvességkedvelő, avarlakó, bomló növényi anyagokat fogyasztó és felaprózó szervezetek;
- 3. százlábúak (*Chilopoda*): az erdei avarban élő, gyors éjjeli ragadozók, meleg- és nedvességkedvelők, az avar faunájának ritkításával a biológiai egyensúlyt és az avarevők szelekcióját szabályozzák;
- 4-5. 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;
- 6. földigiliszta (*Lumbricus terrestris*): A földigiliszta a talajképző folyamatok talán legfontosabb biológiai tényezői. Fogyasztják az avar szerves anyagait, ezeket felaprítva keverik az ásványi talaj anyagával, bélcsatornájukban ásványi-szerves komplexek keletkeznek, s ezek ürülékükkel kijutva és fehalmozódva a talajoknak kitűnő morzsás, szivacsos szerkezetet adnak.
- 7. 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.
- 8. 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. előregedését akadályozzák meg.

- 9-25. A talajban előforduló légylárvák típusok: ezek között több is tömeges gyakoriságú lehet. A lehullott falevelek gyors destrukciójáért felelősek.

További példák:

- 5. *Atypus sp.*, folyosós torzópók: földbe vájt, kibélelt aknában lakik, ragadozó.
- 6. *Geophilus*, vak földi rinya.
- 7. *Neobisium*, álskorpió, kis méretű avarlakó, a korhadékevő atkákat és collembolákat támadja.
- 16. *Myrmeleon*, hangyaleső, lárvája a homokban tölcsért ás, amelynek alsó végén lesben áll. A tölcsérbe eső apró rovarokat szájszerveivel kiszívja.
- 17. *Cicindella*, homokfutrinka, ragadozó, lárvája a földbe vájt aknában áll lesben.

Fontos kiemelni, hogy ezek a gerinctelen állatok testméretükhöz viszonyítva igen nagy tömeg 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 (pl. az előbb látott százlábúak), amelyek mintegy szabályozói a populációsűrűségnek. Tevékenységükkel a „korhadékevők” népességét fokozatos megújulásra, szaporodásra készítetik. Ez azért nagyon fontos, mert a gyorsan elöregedő 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 meg-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, megritkített mikrobaközösségek által félbehagyott ásványosítást folytatják. A baktériumokat faló egysejtű állatok túlzott aktivitását viszont a ragadozó egysejtű állatok korlátozzák, amelyek az előbbieket számát, a mineralizációs folyamatokat még károsan nem érintő szintre süllyesztik.

### **Az avartakaró tömege és bomlási sebessége**

A lebontó szervezetekre az erdőkben háruló feladat nagyságrendjéről néhány kísérleti eredménnyel kaphatunk képet: az évi avarprodukción különösen a trópusi esőerdőkben jelentős, így pl. Panamában kevert állományú erdők alatt átlag  $11.000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{év}^{-1}$  avarprodukción 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-produkción 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 1531-6693 kg\*ha<sup>-1</sup> mennyiséget ad összegül. Dudich mérései szerint ezen avarmennyiségnek mintegy 40%-a, más szerzők szerint akár ennél nagyobb hányadát is áthaladhat a makrofauna bélcsatornáján, eljutva a koprogén fázisba.

### **A talajképződés szervesen alapanyaga: az alapkőzet mállási folyamatai és a mikrobák szerepe ezen folyamatokban**

A kőzetek összetételéről, ásványi alkotóikról és ezek mállási termékeiről az egyetemi tanulmányok korábbi szakaszaira utalunk vissza. Ezen tárgy körében a mikrobák mállásban betöltött szerepéről szólnunk.

#### Mállás:

A talajmikrobák jelentős szerepet játszanak a kationok felszabadításában, pl. agyagásványokból. A szilikátbaktériumokról feltételezik, hogy a növényeket felvehető káliummal látják el. A *Bacillus circulans*-ról 1981-ben kimutatták, hogy biotitból és ortoklászából szilíciumot és káliumot tesz szabaddá. A talajbaktériumok az agarlemezekbe beépített oldhatatlan foszfátokat és szilikátokat a telepeik körül oldatba viszik.

A *Thiobacillus ferrooxidans* számos ásványt oxidál, így pl. a bornitot (Cu<sub>3</sub>FeS<sub>2</sub>), a szfaleritet (ZnS) és a molibdenitet (MoS<sub>2</sub>). Hasonló módon megy végbe az arzenopirit (FeAsS) és a galenit (PbS) oxidálása is.

A talajoldat növekvő H<sup>+</sup>-koncentrációja mind a szilikátok, mind számos más ásvány mállását gyorsítja. A CO<sub>2</sub>-ben gazdag vizekben számos szilikát mállása sokkal gyorsabb, mint a CO<sub>2</sub>-mentesekben. Jóllehet a szén-sav gyenge sav, minthogy azonban a talajokban – főleg baktériumok hatására

– nagy mennyiségben és gyakran keletkezik, a mállásnak mégis jelentős tényezőjévé válik. A szénsav hatása nemcsak hidrogénion-szolgáltatásán keresztül érvényesül, hanem azzal is, hogy serkenti a Ca-, Mg- és Fe(II)-hidrogénkarbonátok képződését. Ezek ugyanis azzal, hogy a mállási rendszerből eltávoznak, a hidrolízis intenzitását folyamatosan magas szinten tartják.

A kémiai mállást a mikrobák tápanyagelvonása hatékonyan serkenti. A felvett kationok (Ca, Mg, K, stb.) túlnyomó többsége a talaj szerves és szervetlen kation-, ill. anionkicserélésre képes alkotóeleméről (agyagásványok, humusz szerves anyaga) származik. A kicserélt kationok helyébe H<sup>+</sup>-ionok lépnek. A mikrobák tehát egyrészt közvetlenül kationokat elvonva hidrolitikus hatást fejtenek ki az agyagásványokra, másrészt a talajoldat pH-jának lecsökkentésével járulnak hozzá az ásványi szerkezetek elleni támadáshoz.

A talajokban, vizekben vagy érctelepeken a tiobacillusok a vas- és más szulfidokat oxidálva kénsavat termelnek, míg a nitrifikálók az ammóniát oxidálva salétromsavat állítanak elő. Számos heterotróf szervezet különböző savakat termel, és valamennyi részt vesz a CO<sub>2</sub>-produkciójában. Az előállított savak oldatba viszik a foszfátokat, szilikátokat, a káliumot, alumíniumot, magnéziumot, kalciumot, vasat és mangánt, részt vesznek az agyagásványok lebontásában, a kőzetek támadásában, a felszíni talajszintek kilúgzásának faktoraivá válnak, és a talajásványokból biológiai úton felszabadított kalciumot és magnéziumot az altalajba transzportálják.

A talajképződés szerves és szervetlen nyersanyagaira egyaránt kiterjedő biológiai transzformációs folyamatok a növények és a mikroorganizmusok számára létfontosságú makrotápelemeket az általános talajbiodinamika

számára – legalábbis részben – könnyebben hozzáférhetővé teszik, és ezáltal meggyorsul ezen elemek lokális körforgalma is (2. ábra, ea ppt).

### **Szerves kelatizáló és komplexképző vegyületek, mint a mikrobák anyagcseretermékei, kilúgozás és podzolosodás**

A talajmikroorganizmusok számos komplexképző vegyületet választanak ki. Ezek a fémek kationjait vízoldható komplexekben kötik meg, és ilyen állapotban mintegy védik azokat az immobilizációtól, lehetővé téve vándorlásukat a talajban. Az oldódó stabil komplexképző vegyületek (főleg kelátok) molekulái a szilikátok fémionjait is magukkal ragadják és szállíthatóvá teszik.

A mikrobiális eredetű kelatizáló ágensek között a bórsav, citromsav, ketoglutársav, benzkatechin, szalicil-aldehid, szalicilsav, stb. szerepelnek. Különösen hatásosak lehetnek az o-dihidroxi-benzol származékai, mert ezek stabil kelátokat nemcsak többértékű kationokkal (Al, Fe, Ti), hanem szilíciummal is képeznek.

A komplexképző mikrobiális anyagcseretermékek a kilúgzási folyamatokban kiemelkedő jelentőségűek. A kilúgozás többnyire humid klíma alatt észlelhető, amelynek során a talaj felső szintjéből (horizontjából) a sók, karbonátok, könnyen oldódó ásványok, szerves és szervesetlen kolloidok, stb. a mélybe mosódnak, amit a talaj savanyú kémhatása és a felülről lefelé haladó perkolációs víz mozgása segít elő. Ennek során az ún. eluviális (A, kilúgzási) szint (horizont) elszegényedik, míg az illuviális (B, felhalmozódási) szint (horizont), amelyben a felsőbb szintekből transzportált anyag – akár oldatból precipitációval, akár szuszpenziójának mechanikai kiszűrődésével – felhalmozódik, tápanyagokban gazdagodik.

Podzolosodáson lényegében erősen savanyú talajreakció esetén végbemenő, lefelé haladó szerves anyag, továbbá (főleg ionos formában) Al- és Fe-vándorlást majd azt követő felhalmozódást értünk, a talaj agyagásványai szerkezetének irreverzibilis felbomlásával egyidejűleg (megjegyzés: agyagvándorlás esetén még nem esnek szét az agyagásványok, a folyamat egyébként alapjában megegyezik a podzolosodással, az utóbbinak folytatása). A lefelé haladó szerves anyagok elsősorban olyan kis molekulatömegű humuszsavak és vízdékony, nyers szerves vegyületek, amelyek az Al- és Fe-ionokkal vízdékony szerves-fém komplexeket (pl. kelátokat) alkotnak. A vasionok kötődése a humuszsavakhoz általában redukált állapotban (ferrovasként: Fe(II)) megy végbe. A podzolosodáskor Al- és Fe-ionok kolloidális állapotban is vándorolhatnak, ami az intenzív mállási folyamatok kísérő jelensége.

Az agyagvándorláskor ill. a podzolosodáskor a vertikális anyagvándorlást a mélyebb régiókban kicsapódás ill. akkumuláció követi. Ennek okai különbözőek. Fontos faktor a pH-növekedése. A nagyobb pH-értékeknél a komplex kötődésű Al- és Fe-ionok kicsapódnak. Ezenkívül a lúgosabb pH a kis molekulatömegű szerves savak részleges neutralizációját és polimerizációját váltja ki, miáltal csökken az oldékonyságuk. Nagyobb Ca-telítettségénél a szólok flokkulációja növekszik. A mélyebb talajszintekben a levegőtlenebb viszonyok mellett a redoxpotenciál növekszik, ami a ferroionok oxidációja folytán a komplexek lebomlását segíti elő. *(A ferrovas Fe(II) oxidálása kemolitotróf aerob vasbaktériumok szaporodásához nyújt energiát. Ezek az anaerob körülmények között felhalmozódott ferrovast az oxigénnel egy citokrómokat tartalmazó elektrontranszportlánc segítségével oxidálják el, és környezetükben ferri Fe(III) alakban akkumulálják. Újabb O<sub>2</sub>-hiány alkalmával az anaerobok a ferrivasat terminális elektronakceptorként használják, szerves anyagokat*



*vassal égetnek el, így szereznek életfenntartásukhoz energiát, miközben ferrovasat halmoznak fel.)*

Ezenkívül a már kicsapódott Al- és Fe-oxidok az ionizált alakban vándorló Al-t és Fe-t mechanikai szűrőként hatva is felfoghatják. Az illuviális (felhalmozódási) szint legfelső részében többnyire szerves anyagok, míg mélyebben a Fe- és Al-oxidok (szeszkvioxidok) halmozódnak fel.

A podzoltalajok mikromorfológiai szerkezetének tanulmányozása kimutatta, hogy a fémek szeszkvioxidjainak akkumulációja szintjében sejtes és fonalas struktúrájú baktériumok halmozódnak fel, különösen az üregekben és a partikulumok szegélyein. Ezeket egyre növekvő vastagságban vastartalmú lerakódás borítja, ami feltehetően tehát biogén eredetű. Az ásványi szemcsék felületén nagy nagyítású mikroszkópos szemlélésnél, korróziót kifejtő baktériumok kolóniái, ill. bevonatai észlelhetők. Ezen folyamatok azonban láthatóan nem társultak másodlagos ásványok megjelenésével.

Összefoglalóan tehát a fémek körforgalma a talajokban a következő módon írható le: a fémionokat a talajokban természetesen előforduló szerves anyagok kötik meg olyan átmeneti állapotot előidézve, amely megakadályozza, hogy a szabad kationok vagy az egyszerű szerves-fém komplexek a perkolációval a rendszerből eltávozzanak. A fémionokkal telített talaj-szervesanyagok alkotják a biológiai rendszerek legfontosabb felvehető mikrotápelem tartalékdepóit.

### **Glejesedés: talajképződés anaerob mikroorganizmusok hatására**

Humid klíma alatt, az altalajvíz jelenlétével erősen befolyásolt talajokban, a kedvezőtlen átlevegőzés következtében gyakran lépnek fel

– átmeneti időtartammal – anaerob, redukáló viszonyok. Az ekkor előtérbe kerülő anaerob légző kemoorganotróf fermentáló, továbbá anaerob kemolitotróf baktériumok hatására a talajszelvényben szabad szemmel is megfigyelhető átalakulások és agyagvándorlások mennek végbe. E folyamatok, melyeket összefoglaló néven *glejesedés*nek nevezünk, különösen a Fe-t, Mn-t és a S-t érintik.

Amennyiben a talaj valamely szintjében víztelítettség miatt oxigénhiány lép fel, úgy ott szerves anyagok jelenlétében főleg a vassal és a mangánnal mint terminális elektronakceptorral légzők hatására a  $\text{Fe}^{(III)}$  és a  $\text{Mn}^{(III, IV)}$ -oxidok redukálódnak és oldatba mennek. Ilyen alakban szerves vegyületekkel komplexet képeznek, és mint ilyenek, ill. mint oldható anorganikus sók is [pl.  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ ] a talajszelvényben vándorolni képesek. A komplexképzésben egyes mikrobiális anyagcseretermékek és huminsavak egyaránt részt vesznek. A vándorló ferrovas átalakulhat nehezen oldható ferrovegyületekké is, mint pl. a szennyesfehér színű szideritté ( $\text{FeCO}_3$ ), a levegő hatására megkékülő vivianittá, zöld  $\text{Fe}^{(II, III)}$ -hidroxiddá vagy fekete vasszulfiddá ( $\text{FeS}$  és  $\text{FeS}_2$ ), ahol a szulfid szulfátokból vagy ásványosodott szerves kötésű kénből származik.

Különbséget teszük **glejesedés** és **álglejesedés** (Vergleyung és Pseudovergleyung) között, ahol a fő különbség a nehézfémek vándorlási irányában jelentkezik. A **valódi glejesedésnél** az állandó víztelítettség régiójában a Fe- és Mn-oxidok redukálódva oldatba mennek, majd mint Fe- és Mn-ionok a finom pórusokon át a tenzió- vagy oxidációs grádiens követve a felsőbb, vízzel még telítetlen talajrétegekbe vándorolnak. Ott az  $\text{O}_2$ -tartalmú, levegővel telt durva pórusokba jutnak, ahol – legalábbis részben – obligát aerob, kemolitotróf autotróf vasbaktériumok közreműködésével oxidálódnak és kicsapódnak. A **pszeudoglejesedés** esetében, amely főleg vízzel csak átmenetileg telített szinteket

tartalmazó talajokban fordul elő, a víztelítettség idején, redukáló ágensek jelenlétében a póruszegélyek Fe- és Mn-oxidjai redukálódnak és oldódnak, és ezt követően az ionok az aggregátumok belsejébe diffundálnak. A később bekövetkező szárazság idején elsőnek a durva pórusok víztelenednek el, ami után az oxigén behatol az aggregátumokba és a ferro- és manganoionokat oxidálja. Ez esetben a rozsdafolt és konkrécióképzés főleg az egyes aggregátumok belsejében megy végbe.

A glejes talajszelvényben a talajvízzel állandóan érintkező régió (redukációs szint) színe szürkészöld, kékesfekete vagy kékesszürke (a  $\text{Fe}^{(II)}$  miatt), mely színét a talajszelvényt feltárva, a levegő hatására gyorsan elveszti. A glejszintnek jellegzetes fakultatív és obligát anaerob baktériumközössége van. Tagjai között fontos szerepet játszanak a szulfátredukáló *Desulfovibrio* génusz tagjai, főleg a *D. desulfuricans*, amely szulfát, mint terminális elektronakceptor segítségével egyszerű szerves vegyületek elégetésére képes. Egyes törzsei kemolitotróf autotrófok. A ferrivas szerves vegyületek elégetésekor számos fakultatív kemoorganotróf baktériumnál is az elektronakceptor szerepét töltheti be. A glejszintben a *Desulfuromonas acetoxidans* típusú szervezetek is gyakoriak lehetnek, amelyek pl. acetáttal mint egyedüli C- és energiaforrással, anaerob körülmények között szaporodnak, miközben az elektronokat elemi kénre vezetik, és azt szulfiddá redukálják. Ezek a mikrobák tehát anaerob kénlégzést valósítanak meg. A *Thiobacillus denitrificans*, ez a fakultatív anaerob, szerves vegyületekkel légzést folytatni képes, kemolitotróf autotróf kénbaktérium ugyanitt az egyre fogyó szulfátot, mint elektronakceptort szulfidokból mások számára redukálni képes, miközben a nitrátokat redukálja és molekuláris nitrogént szabadít fel. A glejszintben fermentálók is tevékenykednek. Közöttük a *Clostridium pasteurianum*  $\text{N}_2$ -t is köt, ami e mikrobaközösség

aktivitásának folyamatosságát teszi lehetővé – legalábbis a fixált nitrogént illetően.

A glejtalajokban a vasvegyületek redukciójáért nemcsak a mikrobákat teszik felelőssé, a redukció ugyanis tisztán kémiai úton is végbemehet.

Azokban a homokos talajokban, amelyekben az oxigénben szegényebb altalajvizek mozgásának nagyobb lehetőségei vannak, ezek a vizek az oxidációs szintbe – a talajvízszint ingadozási dinamikájának megfelelően – mind újabb és újabb oldott vasat ( $\text{Fe}^{(II)}$ ) szállítanak, ami ott a kemolitotróf autotróf vasbaktériumokra visszavezethető és rendszeresen bekövetkező vaskicsapódások következtében vasfelhalmozódást idéz elő. Kemény gumók alajkában **gyepvasérc** jön létre, ill. az A és a  $G_0$  szintek határán kőkemény tömörülés jelentkezik.

### **A lateritesedés mint a meleg, csapadékos régiók erdei biodinamikájának következménye**

A lateritesedés (ferralitosodás) többnyire a meleg, ill. a forró humid régiókban, általában trópusi-, szubtrópusi övezetekben megy végbe, rendkívül erős mikrobiális szervesanyag-lebontás és a kőzeteknek, ill. ásványoknak biológiai hatásra bekövetkező gyors mállása folytán. Kémiailag ez a folyamat elsősorban a kovasav, továbbá az alkáli és földalkáliionok kimosódását jelenti, amely olyan nagymértékű lehet, hogy akár a talaj eredeti készleteinek 90%-ára is kiterjedhet. Bár egyúttal a vas és az alumínium is mobilizálódhat, ezek azonban oxidjaik csekély oldhatósága folytán csak olyan kis mértékben mozognak, hogy valójában az Al- és Fe-oxidok in situ egyoldalú relatív felhalmozódása jelentkezik (laterites vasérctelepek!), ami a lateritikus mállásra rendkívül jellemző, és a Fe- és Al-tartalom anyagközettől a felszín felé folyamatosan növekvő

értékeiben nyilvánul meg. Ilyen talajokban a Fe és Al mellett a Ti, Mn, továbbá nyomelemek (Cr, Ni, Co és V) is kumulálódhatnak.

### **A szikesedés és annak talajmikrobiológiai háttere**

A szikesedés talajképző folyamatában az oldható sók, közöttük is elsősorban a nátriumsók játszanak döntő szerepet. A nátriumsókban gazdag felemelkedő talajvizek hatására megváltozik a talajok szelvénytípusa, az adszorpciós komplexumban a kationok aránya, a humuszanyagok jellege, a baktériumflóra anyagcseretípusok szerinti összetétele, stb. A szikes talajok, amelyek esetében a Na<sup>+</sup>-ionok az adszorpciós komplexumban az S-értéknek már >12%-át is eléri, lehetnek sókban gazdagok vagy kilúgozottak. A sókban gazdagokat **szoloncsákoknak**, a kilúgozottakat **szolonyeczeknek** nevezzük. A szoloncsákokban elsősorban a Na, Ca és Mg kloridjai, szulfátjai és karbonátjai fordulnak elő. Ha a talajban található Ca-ionok, továbbá a kicserélhető Ca-ionok nagy része karbonát vagy szulfát alakjában kicsapódott, úgy a talajban a rendkívül kedvezőtlen Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (szóda) és NaHCO<sub>3</sub> jelenik meg.

A nátriummal fokozottan telített talajokban a baktériumok és a gombák által termelt CO<sub>2</sub>-vel gazdagodott szénsavas talajoldat hatására az adszorpciós komplexum és a talajoldat reakciójaként szódaképződés jelentkezhet. Anaerob viszonyok között a Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-nak mint terminális elektronakceptoraként a kemoorganotróf anaerob légző baktériumok, elsősorban *Desulfovibriok* által kiváltott redukciója Na<sub>2</sub>S-t eredményez, amelyből szénsav hatására már abiotikus úton Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> és H<sub>2</sub>S keletkezik. A szulfátok anaerob mikrobiológiai redukciójakor keletkező kén-hidrogén újra szulfáttá oxidálódhat, mégpedig nitráttal mint terminális

elektronakceptorral, fakultatív anaerob kemolitotrófok hatására, miközben a talajt  $N_2$  hagyja el; de kénné vagy szulfáttá oxidálódhat a talaj anaerob fotoautotrófjainak részvételével is; a  $H_2S$  a talajokból el is illanhat: a visszamaradó kationok közül a nátrium az adszorpciós komplexumba becserélődve gyorsítja az elszikesedést. A szulfátok ezen redukcióját a kemoorganotrófok részéről a nyers, transzformálatlan szerves anyagok jelenléte serkenti, mivel így azokkal először fermentációs, részleges lebontás, majd a szerves végtermékekkel a szulfátokra mint elektronakceptorra támaszkodó elektrontranszport-foszforiláció bontakozhat ki.

### **Talajképződés, talajfejlődés, talajevolúció**

Az ún. **talajképző faktorok** (geológiai szubsztrátum, klíma, víz, a vegetáció szerves hulladékanyagai, talajállatok és mikrobák, stb.) a maguk összhatásában általában rövid időtávon, a környezet szerves és szervetlen kiinduló anyagait talajmátrixá alakítják. E talajképző folyamatokkal szemben az a hosszú távon érvényesülő, mélyreható átalakulás, amely elsőnek a talajképző anyagzetnek baktériumok és zuzmók (gomba+zöld- ill. kékalga együttélése) hatására bekövetkezett mállásával kezdődik és különböző talajtípusok egymást szukcesszíve váltó sorozatába torkollik, már valódi **talajfejlődés**. Utóbbinak a talaj-életközösségek lokális összetételében jelentkező szukcessziója természetes kísérő jelensége. A talajmikrobák közösségeinek rövidlejárátú, ún. mineralizációs szekvenciái a talajképződési folyamatokat tükrözik, a mikrobiális népségek évszázadokig tartó lassú, de gyökeres átalakulása pedig a talajtípusok szukcesszióját, vagyis a talajfejlődést kísérik.

Egy-egy területen az évszázadok, évezredek során kibontakozó talajfejlődési sorozatban sajátos talajrendszerek sokfélesége alakult ki. A talajok repertoárja azonban nem volt mindig olyan gazdag, mint ma. A földtörténet ókorában pl. mulltalajok még nem is léteztek, és a szerves anyagok lebomlása akkor még minden talajban olyan csekély mértékű volt, hogy valamennyi szintben csak módor halmozódott fel. Ezt az őstalajtani kutatások igazolták. Fejlett, intenzív biodinamikájú mulltalajok és ezek első típusai csak a földtörténeli középkorban, a jura időszakban jelentek meg. Van tehát a talajoknak új talajtípusok megjelenéséhez vezető rendkívül hosszú időtartamú, évszázadezredekre, évmilliókra szóló fejlődése is, és ezt **talajevolúciónak** nevezzük.

A talajokban végbemenő, egymástól elválaszthatlan fizikai-kémiai-biológiai történéseket időtartamuk szerint feloszthatjuk csoportokra:

1. napokon belül végbemenő, gyors talajképző vagy talajdegradációs folyamatok;
2. éves lefutású, rendszerint szezonális jellegű talajképző vagy talajdegradációs folyamatok;
3. éveken, évszázadokon vagy évezredekken át tartó fejlődési vagy leromlási folyamatok (soil development)
4. évmilliók során kibontakozó talajevolúció (soil evolution), amelynek eredményeképpen a Föld történetében korábban még nem létezett, új talajtípusok jelennek meg.

A talaj élőlényei mind a négy időtávban kifejtik hatásukat. A talajok anyagcseréjének napi változásait kimutatták már a talajlégzés ritmusában, a baktériumszám-ingadozásokban, a talajállatok napi vertikális vándorlásában, stb. A valamivel hosszabb időtávon észlelhető talajképző folyamatokban a korábbiakban részletesen leírt folyamatok szintjén láthattuk a talajfauna és talajflóra fontosságát, szerepét. Az ezen folyamatokban részt vevő élőlények hosszabb időtávban maguk is evolúciós változásokon mennek át: alkalmazkodva az őket körülvevő talajmátrix anyagainak, tényezőinek változásaihoz, újabb és újabb fajok szelektálódnak ki, egy soha be nem fejeződő fejlődés folyamán. Sajnos a talajevolúció évmillióinak szintjén a régmúlt korok élővilágának vizsgálata korlátokba ütközik. Nem kaphatunk pl. információt a talajmikrobák korábbi összetételéről, hiszen ezek nem szolgáltatnak kövületeket.”

Felhasznált irodalom:

*Szabó István Mihály „Az általános talajtan biológiai alapjai”, Mundus Kiadó, Bp., 2008.*