

A talaj alatt kezdődik az erdő

A mikrobiom jelentősége az erdei ökoszisztémákban

Félegyházi Fruzsina¹, Parádi István²

Az erdőket hajlamosak vagyunk a felszínen értelmezni: fák, cserjék, lágyszárúak, állatok, élőhelyek. Pedig a természetes rendszerek működésének egyik legfontosabb alapeleme és egyben egyik legalapvetőbb természeti kincsünk jórészt láthatatlan, ugyanis a talpunk alatt terül el: a talaj. Kialakulása számos tényező kölcsönhatásának eredménye: az éghajlat, a domborzat, a kőzettani háttér, az élő szervezetek jelenléte, valamint az az időtartam, amely rendelkezésre állt a talajképződéshez.



Magyarország taljai rendkívül változatosak – gyakran előfordul, hogy néhány méteres távolságon belül is teljesen eltérő talajok fordulnak elő. Ez a mozaikosság azt jelenti, hogy az egyes területek ökológiai adottságai és hasznosíthatósága is nagymértékben eltérhet.

A láthatatlan erdő a lábunk alatt

A talaj alapvetően meghatározza, hogy egy adott élőhely mire alkalmas, milyen ökológiai szerepet tölthet be. *Szerpe az erdők művelésében is kiemelt: az erdők szerkezete, működése és alkalmazkodóképessége szoros kapcsolatban áll a talaj típusaival és állapotával.*

A talaj persze nem pusztán egy élettelen közeg, amelyben a növények gyökereznek, hanem egy dinamikusan működő, élő rendszer, amely befolyásolja az erdei ökoszisztéma vízháztartását, a vegetáció összetételét, a mikroklimát, sőt még a levegőminőségre is hatással van.

Amennyiben az erdei talajok természetes folyamatait zavart szenvednek – például túlhasználat, nem megfelelő erdőgazdálkodás vagy a klímaváltozás

miatt –, az az egész erdőállomány stabilitását és regenerációs képességét is veszélyezteti. *A talaj degradációja erdőpusztuláshoz, vízvisszatartási problémákhoz, fajszegényedéshez és fokozódó érzékenységhöz vezethet.*

Talajbiológia és talajegészség

A talaj egyik legmeghatározóbb jellemzője az élővilága – azaz azoknak a mikro- és makroszervezeteknek a sokfélesége és mennyisége, amelyek benne élnek.

Ezek az élőlények alakítják ki mindazokat a tulajdonságokat, amelyek miatt a talaj számunkra is értékes: ilyen például a víz- és tápanyagmegőrző képesség, a kedvező szerkezet vagy a humusztartalom.

Gyakran halljuk, hogy egy gramm egészséges talaj több milliárd mikroorganizmust tartalmaz, de azt kevesebben tudják, hogy *a földi élőlényfajok körülbelül kétharmada, a mikroszkopikus baktériumoktól a fonalférgeken, gyűrűsférgeken, rovarokon át a magasabb rendű élőlényekig talajlakó.*

Ez a hatalmas biodiverzitás egy rendkívül komplex biológiai és ökológiai hálózatot alkot, amely folyamato-

san biztosítja az életfeltételeket a növények és az állatok számára. *Ha ez a változatosság egy bizonyos batár alá csökken, a talaj elveszítheti életfenntartó funkcióit – ami súlyos következményekkel járhat.*

A talajok termőképességének legfontosabb letéteményeseit szabad szemmel nem is láthatjuk, és nagy részüket még a tudomány sem ismeri: *ez az ún. talaj-mikrobiom.*

A mikrobiom fogalma az utóbbi évtizedben vált széleskörűen ismertté, főként az emberi egészséggel kapcsolatban, de ma már világos: az ökoszisztémák egészsége is a mikroorganizmusokon múlik. A mikrobiom a gazdaszervezet szöveteiben vagy felszínén élő mikroorganizmusok összessége. A talajmikrobiom – baktériumok, gombák, archaeák, protozoák összessége – nemcsak a szerves anyagok lebontásáért felel, irányítja a tápanyagok körforgását, támogatja a növények víz- és tápanyagfelvételét, vagy védelmet nyújt a patogénektől szemben, *hanem az egész talajökoszisztéma fenntartásáért is felel.*

Az ember esetén is egyre több bizonyíték utal arra, hogy beleink mikrobiomjának állapota közvetlen hatással

¹ ELTE TTK, Talajtérkép Kft.

² ELTE TTK, ExperiPlant Kft.

van egészségünkre – ha sérül, számos betegség iránt válunk fogékonyabbá. *Ugyanígy egy erdő állapota, ellenálló képessége és regenerációs képessége, „immunitása” is nagyban múlik azon, milyen állapotban van a gyökerek körüli talajélet – legfőképpen a mikrobiális közösség.*

A napjainkban egyre több figyelmet kapó „One Health” (Egy Egészség) szemlélet szerint az emberi egészség elválaszthatatlan kapcsolatban áll az élelmiszerek eredetével és az emberi környezettel, végső soron tehát az azokat biztosító talajok egészségi állapotával.

Így tehát, ha hosszú távon is egészségesen szeretnénk élni, alapvető fontosságú, hogy a talaj, amely táplálékunk és jólétünk alapját képezi, maga is egészséges legyen.

A talajegészség összetett fogalom, alapvetően egy egyensúlyban lévő természetes ökoszisztémára jellemző talajt nevezünk egészségesnek, ám ennek jellemzői, adott esetben mérhető paraméterei folyamatos diskurzus és kutatások tárgyát képezik: egy már széleskörűen használt kifejezés folyamatban lévő finomodásának és megszilárdulásának lehetünk tanúi.

Annyi bizonyos, hogy a talajegészség legfontosabb összetevője a talajban élő biológiai szervezetek mennyisége, sokfélesége és kapcsolatrendszere, hiszen végső soron a talaj minden egyéb tulajdonsága rajtuk múlik.

Hol található és mik is alkotják a növény számára kedvező talajmikrobiomot?

A talajmikrobiom elsődleges előfordulási helye a rizoszféra, a növényi gyökér és a talaj érintkezési zónája, ahol közvetlen kölcsönhatás jön létre a növény és a talaj mikroorganizmusai között.

A rizoszféra tehát a talaj azon része, amelyre a növény hatást gyakorol – kiemelt területe a gyökerek felülete, amelyet *rizoplánnak* nevezünk.

A rizoszféra határai nem élesek, mérete attól is függ, hogy milyen szempontból vizsgáljuk: például a rizoszférában élő mikroorganizmusok aktivitása, a tápanyagok mozgékonyasága vagy a gyökér által kibocsátott illékony vegyületek terjedése alapján.

A gyökerek által a talajba juttatott ún. *gyökérexudátumok* – például cukrok, aminosavak, szerves savak – valamint az elhalt gyökérrészek tápanyagforrásként és kommunikációs jelekként szolgálnak a rizoszféra mikrobaközösségei számára.

Az exudátumok mennyisége és összetétele kulcsszerepet játszik e mikrobiális életformák gyökérhez csalogtatásában és populációik – a növény számára kedvező – méretének és aktivitásának szabályozásában, amelyhez a gyökér által befolyásolt talaj pH és az oxidációs-redukciós viszonyok is hozzájárulnak.

A fotoszintézis által megtermelt összes szénhidrát akár 40%-a is ilyen módon a talajba juthat: *a talajmikrobiom és ezáltal a talaj egészsége tehát közvetlenül a növényi forrásokon alapul és általa szabályozott.*

A növény természetesen elsősorban a számára kedvező, kölcsönösen előnyös szimbiózist alkotó mikroszervezeteket igyekszik feldúsítani a rizoszférájában. Rendkívül fontos csoport pl. a növényi növekedést serkentő *rizobaktériumok* (plant growth promoting rhizobacteria – PGPR), amelyek becslések szerint a rizoszférában élő baktériumok akár 5%-át is alkothatják.

Ide tartoznak azok a szabadon élő vagy a gyökérfelszín, illetve a sejtek közötti tereket kolonizáló baktériumok, amelyek elősegítik a növény fejlődését, vagy fokozzák stressztűrését.

Sokszor a pillangósok vagy az *éger* gyökérgümőit képző baktériumokat (pl. *Rhizobium*, *Frankia*) is ide sorolják.

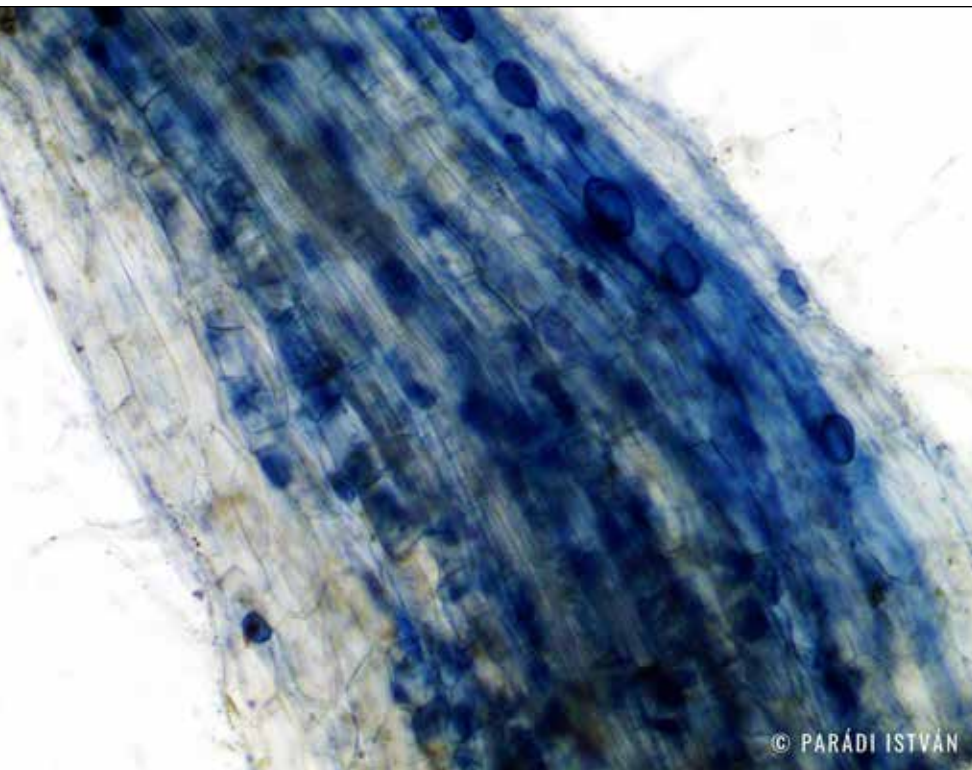
Ezek a baktériumok többféle módon támogatják a növényt: javítják a tápanyagellátást (pl. nitrogénkötés, foszformobilizáció), csökkentik a kórokozók hatását, növekedésszabályozó anyagokat és vitaminokat termelnek, lebontják a káros vegyületeket, és növelik az ellenálló képességet különféle abiotikus stresszhatásokkal szemben (pl. szárazság, só, hőmérséklet, UV).

Egyes törzsek többféle pozitív hatással is bírnak egyszerre – például egyszerre képesek hormontermelésre, kórokozógátlásra és a növény védekező mechanizmusainak aktiválására.

A növény számára előnyös gombák közül az ún. *mikorrhizagombák* a legfontosabbak, amelyek az elsődleges kapcsolatot alakítják ki a gyökerek és a talaj között. A kifejezés a görög gomba (myco) és gyökér (rhiza) szavak összetételéből származik.

A mikorrhiza kapcsolat lényege, hogy a gomba hifái a gyökér belsejébe hatolva anyagcsere-kapcsolatot alakítanak ki a növénytel: a növény szerves anyagokat biztosít, cserébe a gomba javítja a tápanyag- és vízfelvételt, valamint segít a környezeti stresszek – például szárazság vagy kórokozók – kivédésében.

A legelterjedtebb típus az *arbuskuláris mikorrhiza* (AM), amely már a növények szárazföldi megjelenésével együtt fejlődött ki félmilliárd éve, és ma is a legtöbb mezőgazdasági növénytel és számos fásszárú fajjal (pl. gyümölcsfák, kőris-, juhar-, nyár-, és fűzfélék) alakít ki szimbiózist. Az AM



Arbuskuláris mikorrhiza képletek a gyökérben (festett minta, Parádi I. felvétele)

gombák a gyökérsejtek belsejébe is behatolnak, és ott speciális tápanyagátadó felületeket (arbuszkulumokat) alakítanak ki.

Az ektomikorrhiza főként fászszerű növényekben (tölgy-, bükk, fenyőfélék) gyakori – a gyökér felszínén és a sejtek között képez kiterjedt hálózatot, amely szabad szemmel is látható.

Az ektomikorrhiza hatékonyabban tudja feltárni a talajban lévő szerves eredetű tápanyagokat, kialakulása is a nyitvatermők 160 millió évvel ezelőtti globális elterjedéséhez és a szerves anyagok felhalmozódásához köthető. Az ektomikorrhiza kapcsolatok különösen fontosak a hideg és mérsékelt égövi természetes erdők tápanyagforgalmában és egészségi állapotának fenntartásában.

A növényfajokra tehát jellemző, milyen mikorrhizát alkotnak, de a mikorrhizaképző gombákra is igaz ugyanez. Az AM szimbiózist egy elkülönült gombatörzs, a *Glomeromycota* fajai alkotják, míg az ektomikorrhiza-képző gombafajok jóval szélesebb skálán mozognak: az aszkuszos és bazídiumos gombák között is találunk képviselőket, pl. galócák, galambgombák, róka-gombák, tinóruk vagy akár a szarvasgombák.

Globális mikrobiom-térképek: mit tanulhatunk belőlük?

A talajban található mikrobiom globális eloszlását számos tanulmány vizsgálta, talajminták sokaságát feldolgozva világszerte. Az eredmények alapján bebizonyosodott, hogy a mikroorganizmusok közösségei a vártak megfe-



Arbuszkuláris mikorrhiza képletek a gyökérben (festett minta, Parádi I. felvétele)

lelően nem véletlenszerűen oszlanak el, hanem szoros kapcsolatban állnak a talaj kémiai és fizikai tulajdonságaival, a növényborítottsággal, a klímával és az emberi zavarás mértékével.

Az erdős területeken gyűjtött minták kimutatták: a természetes, bolygatatlan erdők talajában nagyobb fajgazdagságú és strukturáltabb mikrobiális közösségek találhatók, mint a mezőgazdasági vagy városi talajokban. Ugyanakkor ezek a közösségek érzékenyek is: a talaj bolygatása, vízháztartásának meg-

változása, a fajkészlet átalakulása könnyen felboríthatja a mikrobiális egyensúlyt.

A felrajzolható mikrobiális térképek egyre pontosabbak – és ez hasznos az erdészet számára is.

A mikrobiom nem látható, de ma már jól mérhető. A molekuláris biológiai módszerek rohamos fejlődésével és a környezeti mintákra alkalmazható egyre megbízhatóbb szekvenálási módszerek megjelenésével a mikrobiális világ egyre jobban, pontosabban és mélyebben térképezhető.

A közelmúlt fontos kutatási áttörése volt pl. a *Global Microbiome Project*, amely olyan nyílt adatbázist hozott létre, amely hozzáférhetővé teszi több ezer talajminta mikrobiális összetételét, taxonómiáját, funkcionális jellemzőit. A cél: megérteni, milyen környezeti tényezők határozzák meg egy adott mikrobiom állapotát, és hogyan reagálnak ezek az élő rendszerek az emberi beavatkozásokra.

A mikrobiom ismerete az erdőgazdálkodás számára is kulcsfontosságú lehet. Ha tudjuk, milyen mikrobiális összetétel támogatja az erdő egészséges működését, úgy irányíthatjuk a kezeléseket, hogy ne rontsuk, hanem javítsuk a talajéletet – ez különösen fontos a regenerálódás, újulatképződés és a klímaváltozáshoz való alkalmazkodás szempontjából.



Romero Calvo/EMBL

A talajélet és az erdőgazdálkodás kapcsolata – a mikrobiom szerepe

Az erdőgazdálkodás során számos beavatkozás történik, amely közvetlenül vagy közvetve hat a mikrobiális közösségekre:

- **Talajbolygatás:** a géphasználat, a tuskózás, a feltáró utak kialakítása a talajlakó élőlények élőhelyét pusztítja.
- **Fajösszetétel változása:** egyes fajok gyökérváladekai más-más mikrobiális közösségeket vonzanak, így a faállomány-összetétel megváltoztatása átalakítja a talajéletet is.
- **Vegyszerhasználat:** a növényvédőszeresek direkt vagy közvetett módon károsíthatják a talajban élő mikroorganizmusokat.
- **Kitermelés:** természetesen pl. a tarvágás egy „atomtámadás” a talajélet szempontjából. Amikor eltűnnek az addig a mikrobiomot tápláló növények, a talajélet elpusztul, és sajnos nagyon nehezen épül újra, nem beszélve az eróziós veszélyről.

- **Homogén faj- vagy korösszetételű állományok:** a szimbiotikus partnerek iránti igény is viszonylag szűk, ezért nem tud egy ilyen állomány sokféle mikrobiális fajt eltartani, csökkentve pl. az esélyét egy idősebb állományban a megfelelő partnerek megtalálásának.

Az erdőfelújítás, erdőrekonstrukció során lehetőség van arra, hogy tudatosan támogassuk a talajélet helyreállítást.

A fakitermelések, fahasználatok során mindenképpen célszerű meghagyni *néhány idősebb fát*, amelyeknek a gyökerén számos szimbiotikus mikroba menedéket talál. Ezekből a „mikroba refúgiumokból” azután majd az újonnan ültetett állomány hozzájut a megfelelő szimbiota partnerekhez, *jelentősen csökkentve így a telepítési veszteséget is.*

Természetesen mesterséges oltásokkal is segíthetünk a kiültetett csemetéknek,

ám a piacon található oltóanyagok *mesze nem tartalmaznak még olyan változatos közösséget, mint egy-egy ilyen hagvársfa.*

Élőhely-rekonstrukció és mikrobiom – hazai gyakorlati tanulságok

A Kiskunsági Nemzeti Park által kiadott 2025-ös élőhely-rekonstrukciós összefoglaló jól példázza, hogy *a sikeres ökológiai helyreállítás a talajélet helyreállításával kezdődik.*

A tanulmány több projekt példáján keresztül mutatja be, hogy a talaj mikrobiális állapotának ismerete segíthet a megfelelő módszerek kiválasztásában: mikor érdemes a bolygatást minimalizálni, mikor szükséges szervesanyag-visszapótlás, és milyen módon lehet a természetes regenerációt elősegíteni.

A szerzők egyik legfontosabb megállapítása, hogy az önfenntartó természetes közösségek kialakulásához a mikrobiális közösségek helyreállása is szükséges. Enélkül a növények nem jutnak megfelelő tápanyaghoz, gyengébb a stressztűrésük, és nagyobb a kitétségük a betegségekkel szemben is.

A jövő erdeje mikrobiom-alapú

Ahogy a modern orvoslásban is alapelv lett, hogy az egészség nemcsak a tünetek, *hanem az egyensúly helyreállításáról* szól, úgy a természetes ökoszisztémák kezelése során is *a rendszer egészét kell figyelembe venni* – beleértve a talaj szintjén zajló, szabad szemmel nem látható folyamatokat.

A mikrobiom figyelembevétele nem extra tudományos luxus, hanem megalapozott, költséghatékony támogatása a fenntartható erdőgazdálkodásnak. Paradigmát kell váltanunk: az erdő nem pusztán a faállomány és a köztük található flóra és fauna, hanem a fakkal együtt élő mikrobiális talajélet.

A növények ugyanis nem képesek minden stresszhelyzetet megoldani, amennyiben csak a saját génállományukra vannak utalva. Természetes igényük van a talajbiológia által biztosított „szolgáltatásokra”, amelyek külső faktorokként számos funkciót biztosítanak a túlélés és alkalmazkodás érdekében.

A jövő kihívásai tehát – mint a klímaváltozás, szárazodás, inváziós fajok megjelenése – csak akkor kezelhetők hatékonyan, *ha az erdő életének valódi alapjával is foglalkozunk.* Ez az alap pedig: a talaj. 🌱

Illusztráció: Shutterstock



Talajszelvény vizsgálata erdei környezetben (Bagi I. felvétele)