

IDŐJÁRÁS

Az Országos Meteorológiai Szolgálat folyóirata. 90. évf. 2–3. szám, 1986. március–június
Journal of Hungarian Meteorological Service, Vol. 90. No 2–3. March–June 1986. Budapest

A légköri eredetű savasodás hatása a természetes élővilágra

JAKUCS PÁL, KLTE Ökológiai Tanszék, H—4010 Debrecen

The impact of atmospheric acidification on living organisms. Atmospheric pollutants – including the ones which cause acidification – have a direct or indirect impact on living organisms and their populations and communities. A direct impact is established when air pollutants (for example, SO_2 , NO_x , O_3 molecules) entering the living organism set off chemical processes with toxic effects, or by means of their ion-exchange mechanisms they disrupt the normal functioning of cells. A large part of the direct effects are so called „residue-pathological phenomena”, that is, such molecular processes in which inorganic free residue reactions start in the course of auto-oxidation. In the case of indirect effects, the pollutant first initiates processes of change in some other large exterior group of factors (for example, water and soil) which, in turn, influence the tolerance spectrum of living organisms directly and actually. While signs of direct effects can be soon and easily detected, indirect effects – for their complex and accumulative character – can only be revealed and determined by means of rigorous ecological investigations. This paper presents cases of damages of both types in Hungary as well as the response (indication) living organisms give to them. A detailed discussion of the results obtained from the investigation of dying sessile oaks in Hungary is offered. The paper proves that aluminium and other toxic heavy metals becoming water soluble in acidic forest soils decrease the intake capacity of root-systems of trees primarily through the destruction of mikorrhiza-fungi. This, in the end, causes the trees to die in a state of water and nutrient circulation stress. The paper offers a new complex ecological diagram showing such ways of tree-dying which are not caused by natural effects (natural catastrophies and aging). The bold line indicates the proved indirect path of death of sessile oaks in consequence of air pollution.



A légköri eredetű savasodás hatása a természetes élővilágra. A légköri szennyező anyagok – így a savasodást okozók is –, az élő szervezetekre, ill. ezek populációira, társulásaira közvetlenül, vagy áttételesen hatnak. Közvetlen hatásról akkor beszélünk, ha a légszennyező anyagok (pl. SO_2 , NO_x , O_3 -molekulák) bejutva az élő szervezetekbe, olyan kémiai folyamatokat indítanak el, amelyek toxikus hatásúak, vagy ion-kicserélő mechanizmusuk révén megzavarják a sejtek normális működését. A közvetlen hatások nagy része ún. „gyökpatológiai jelenség”, azaz olyan molekuláris folyamatok, amelyekben az autooxidáció során szervesen szabadgyök-reakciók indulnak meg. Az áttételes vagy közvetett hatásnál a szennyező anyag először valamelyik másik külső nagy tényező-csoportban (pl. víz, talaj) indít el olyan változás-folyamatokat, amelyek azután az élő szervezetek tűrőképességi tartományára már közvetlenül és ténylegesen jelentenek változtató hatást. Amíg a közvetlen hatás jelei hamar és könnyebben észrevehetőek, az áttételes hatások – bonyolultságuk és akkumulációs jellegük miatt –, csak részletes ökológiai vizsgálatokkal tárhatóak fel és bizonyíthatók. A közlemény magyarországi példákat mutat be mindkét típusú károsításokból és az élővilág ezekre adott válaszreakcióiból (indikátorság). Részletesen tárgyalja a magyarországi kocsánytalan tölgy pusztulása terén végzett vizsgálatokkal nyert eredményeket. Ezekben bizonyítja, hogy az elsavanyodó erdőtalajokban vízdékonnyá váló alumínium és más toxikus nehézfémek elsődlegesen a mikorrhiza-gombák pusztításán keresztül csökkentik a fák felszívó gyökérrendszerét, ami miatt végül a fa víz- és tápanyag-cirkulációs stressz-állapotba kerülve elpusztul. Egy új, komplex ökológiai diagramon be-

mutatja a fák nem elemi kár, vagy természetes öregedéssel történő elhalási útjait, vastag vonallal jelezve a diagramon a kocsánytalan tölgyek légszennyeződéssel eredő elhalásának bizonyított áttételes útját.

×

Bevezetés. A bioszférában az élőszervezetek faji változatossága és egyed-száma igen nagy. Közösségekbe — populációkba és társulásokba rendeződve — hosszú idő alatt adaptálódási folyamat eredményeként élnek együtt élőhelyük (környékük) ténylegesen ható biotikus és abiotikus tényezőivel. A közösségek tűrőképességi tartománya és a ható tényezők között a biológiai evolúció során létrejött szabályozottság biztosította és biztosítja ma is az ún. „ökológiai stabilitást”, amely lehetővé teszi az ember számára is egészséges életfeltételeinek fennmaradását Földünkön.

A ható faktorokban történő olyan változások, amelyek túllépik az élő egyedek, ill. közösségeik tolerancia-határait, eltolódásokat okoznak az adott élőlény-környezeti rendszer mennyiségi és minőségi viszonyaiban. Emiatt a korábbi idők ökológiai értelemben vett „stabil” élőközösségei „labilissá”, sérülékennyé válnak. A közösségek „kompartimentjei” közötti strukturális és funkcionális kapcsolatokban „törések”, „hiányok” lépnek fel, egyes populációk egyedszáma robbanásszerűen növekszik, mások elpusztulnak. Ha a ténylegesen ható faktorok változása gyors, és nagyságrendje túllépi a tűrőképességi küszöböt, az élőszervezetekben és közösségeikben védekezési mechanizmusok lépnek fel, de tartóssá váló és erős hatás esetén már ez sem tudja biztosítani a szervezet, ill. a közösség önszabályozó- és vezérlő képességét.

Az emberiség exponenciális mértékben gyorsuló műszaki-technikai-kémiai tevékenysége — amelyeket az ember általában a saját életfeltételeinek gyors javítása érdekében végez — igen sok olyan hatással jár, amely korábban nem létezett a bioszférában (veszélyes hulladékok, víz-, levegő- talajszennyezés stb.). Ezen felgyorsuló, antropogén eredetű folyamatok közé tartozik a levegőbe jutó „szennyező” anyagok mértékének megnövekedése és a növekedési ütem folyamatosává válása. Közülük kerülnek ki a fosszilis tüzelőanyagok égetéséből származó és a környezet savasodásában döntő szerephez jutó kén- és nitrogén-oxidok is. A levegőbe jutó többi szennyező anyag (főleg szerves eredetű molekulák) száma a többszázat is meghaladja. Utóbbiaknál azonban igen kevés még az ismeretanyag lebomlási idejükről, katalitikus, színergetikus és akkumulációs képességeikről, főleg pedig az élőszervezetekre gyakorolt tényleges hatásaikról. Amikor a levegőszennyeződésről beszélünk, külön hangsúlyozni kell, hogy az élőkre gyakorolt „káros” hatásokat mindig az összes légszennyező anyaggal együtt lenne kívánatos értékelni!

A levegőbe jutó kén- és nitrogén-oxidok, ill. az ezekből keletkező vegyületek, szabadgyök-formák az élőszervezetekkel, azok populációival és társulásaival vagy közvetlenül a levegővel történő érintkezés útján kerülnek kapcsolatba (száraz, ill. nedves ülepedés a földfelszín feletti részekre), vagy áttételesen, valamely más közegen (víz, talaj) átjutva fejthetik ki hatásukat. A savasodásnak az élőszervezetekre gyakorolt hatásairól megjelent nemzetközi irodalom könyvtárnyi nagyságrendű. Emiatt részletes idézésüktől el kell tekintenünk. Inkább arra törekedtünk, hogy példáinkat magyarországi, köztölt, vagy még nem publikált konkrét kutatási eredmények alapján, legfrisebb tudásunk szerint állítsuk össze.

1. A közvetlen (direkt) hatás

Közvetlen hatásról akkor beszélünk, ha a légszennyező anyagok (pl. kén-dioxid-molekulák) bejutva az élőszervezetbe, olyan kémiai folyamatokat indítanak el, amelyek toxikus hatásúak, vagy ion-kicsérélő mechanizmusuk révén megzavarják a sejtek normális működését. A növényi asszimiláló szervek (levelek) közvetlen károsodását számos olyan kísérlettel igazolták, ahol általában rövid életű, vagy fiatal növényeket zárt kamrákba tettek ki szennyezett levegő hatásának. Így pl. bizonyították azt is, hogy a levegő SO_2 koncentrációjának növekedése a klorofill destrukciója révén gátolja a fotoszintézis folyamatát, károsítja a levelek szöveti állományát, kedvezőtlenül hat a szállító szövetrendszerre és gátolja a virágpor-képződését.

Az SO_2 tartalmú gáz a növények leveleinek légzőnyílásán jut be a szervezetbe és ott a sejtközötti járatokban lévő víztartalmú közegben — az adott pH és egyéb abiotikus viszonyoktól függően — szulfittá, hidrogén-szulfittá vagy kénessavvá alakul. A sejtfalat, majd a sejtmembránokat megbontva eljuthat a klorofill-molekulák központjába is és ott pl. a Mg-ionokat a H-ionokra lecserélheti, megváltoztatva ezzel annak szerkezetét és működését. Aktivizálhatja a klorofilláz enzimet is, amely tovább bontja a klorofill molekulát. Gátolva a karboxiláz-enzimeket, az elsődleges CO_2 -fixáción keresztül közvetlenül is gyengítheti a fotoszintézis erősségét (hatékonyságát).

A legújabb irodalmi adatok azt hangsúlyozzák, hogy a kén-dioxid közvetlen hatásában a legveszélyesebb molekuláris folyamat az, hogy az autooxidáció során szervesetlen szabadgyök-reakciók indulnak meg. Ezek folytán különböző aktív oxigén-formák, mint hidrogén-peroxid, szerves peroxidok, szuperoxid-gyök, szingulett oxigén, hidroxil-gyök és más, a szervezetre potenciálisan szintén igen veszélyes termékek keletkeznek. E termékek pl. oxidálhatják a membránok telítetlen zsírsavait; az így kialakuló membrán-átjárhatóság igen sok élettani funkció szabályozását gyengíti. Emiatt módosulnak olyan folyamatok, mint a légzés, a víz- és ionösszetétel, a fotoszintetikus szabályozottság. Mai kifejezéssel élve tehát az SO_2 mérgező hatása — legalábbis nagyrészt — „gyökpatológiai jelenség” (Pólya, 1979; Shimazaki et al. 1980; Tanaka és Sugahara, 1980; Lizada és Yang, 1981; Schlee és Koch, 1982; Matkovics és Szöllösy, 1976).

Itt jegyezzük meg, hogy a légszennyező anyagok másik nagy csoportja (nitrogén-oxidok) nemcsak közvetlenül gyökpatológiát elindító anyagok, hanem elsősorban felelősek a légköri ózon felszaporodásában, amely hatását szintén az előbbiekhöz hasonló gyökreakciókon keresztül fejti ki. Sőt az újabb kutatások szerint az SO_2 és az O_3 hatása egymással szinergizmusban jelentkezik, így gyorsítja a savhatást (Domergues és Louquet, 1980).

A gyökreakciók káros hatásai ellen a szervezet védekezik. A védekezésben elsősorban a mikrotápelemekben (Fe, Mn, Cu, Zn) gazdag kismolekulájú ún. antioxidáns vegyületek (egy részük vitamin), és más komplex anyagok jelentősek. A mikrotápelemhiány vagy azoknak éppen a savhatás miatti csökkenése a gyökreakciót elindító anyag (pl. SO_2) mérgező hatását fokozza.

A savasodás közvetlen hatása a természetben elsősorban ipari gócekban, városi körzetekben és szűkebb környékükön jelentkezik feltűnőbben.

A közvetlen hatás legismertebb indikátor-szervezetei a zúzmófajok. Már több mint 100 éve megfigyelték és leírták azt, hogy a széntüzelésű lakások füstgázai egyes zúzmófajokat károsítják vagy elpusztítják. Laboratóriumi kísérletekkel is igazolták, hogy e károsodások mind alak-, ill. színváltozásban, mind élettani, biokémiai és sejttani vonatkozásban is kimutathatók.

Az 1950-es évek körül elkészítették a világ több országában a nagyvárosok, ipari centrumok, sőt országrészek ún. zúzmótérképeit, korrelációt találva a levegő SO_2 -koncentrációjának nagysága és a zúzmókárosodás között.

Hazai nagyvárosainkban, ipari centrumaink és hőerőműveink körzetében is kialakultak a zúzmósvatagok, pl. a Gagarin Hőerőmű körzetében teljesen eltűntek egyes zúzmó-populációk (Kovács et al., 1985).

Hangsúlyozni kell azonban azt is, hogy a sok zúzmófaj között található SO_2 -re rezisztens, vagy kevésbé érzékenyek is. Így az is előfordulhat, hogy a többi zúzmófaj eltűnésének zónájában egy-egy rezisztens faj populációi elfoglalják azok helyeit, és sűrű borítású állományokat alkothatnak erősen szennyezett levegőjű területen is.

Miután az élőszervezeteknek az SO_2 -vel szembeni érzékenysége fajilag is eltérő, az egyedfejlődés stádiumaitól függően is változik, a természetben vizsgálatuk igen nehéz. Az bizonyos, hogy pl. a lombhullató, mérsékeltövi erdők fáinál, az évenkénti lombhullás miatt e károk kisebb mértékűek, mint pl. az örökzöld, többéves lombu fenyőféléknél. A tavasszal kihajtó új lomblevél ugyanis „tisztá lappal” fogadhatja az azévi savasító hatásokat. A nyugat-európai fenyőkárosodásokban bizonyára jelentősebb szerepe van a direkt károsító útnak. E helyen csak utalunk arra, hogy a levelekre rakódó szilárd ülepedés (por, korom stb.) egyrésze a savas, nedves vagy száraz ülepedések közvetlen hatását csökkentheti.

Hazai megfigyelések szerint nem, vagy alig mutat közvetlen károsodást a levegő SO_2 -hatására pl. a burgonya, hagyma, zab stb. Eléggé tűri a fagyat, nyír, tölgyek, nyárok, platán, ezüsfenyő, örökzöldek. Igen érzékenyek viszont a közvetlen kén-dioxid szennyeződésre a vörösfenyő, jegegyfenyő, lucfenyő, a bükk, gyertyán, hárs, termesztett növényeink közül pedig a lóhere, árpa, búza stb.

Külső jelei szerint a növények levelein a kén-dioxid károsodás akut, vagy krónikus lehet. Akút hatásnál a károsodott részek (levelek) szélein és az ereket között fehér-csontszínű, néhány fajnál barnás elváltozások lépnek fel. A krónikus mérgezést jelzi, hogy nem az egész levél, hanem pl. csak a sejtek egy része károsodott, a szín a sárgától a barnás-vörösön át a fehérig változhat. A közvetlen hatás miatt a fák struktúrájában elváltozások léphetnek fel, a fa produkciója is csökken (Bauch, 1983; Schütt, 1982; Wentzel, 1983; Materna és Jančarik, 1982). Tartós behatás esetén az alacsonyabb koncentráció is káros lehet s létrehozhatja a szulfát-toxicitás révén a növény pusztulását.

2. A közvetett (áttételes) hatás

Általánosságban közvetett vagy áttételes hatásról akkor beszélünk, ha a hatóképes külső faktor (jelen esetben pl. a levegő kén-dioxid- és nitrogén-oxid többlete) először valamelyik másik külső tényezőcsoportban (pl. víz, talaj) indít el olyan változás-folyamatokat, amelyek azután az élő szervezetek тұrőképességi tartományára már közvetlenül és ténylegesen jelentenek változtató-hatást.

A közvetett hatások közös jellemzői közül kiemeljük azt, hogy — rendszerint nehezebben ismerhetők fel, mert a jobban megfigyelhető élőközösségek — többnyire a tápláléklánc zavarain keresztül — időben csak később indikálják,

— jelentős szerep jut bennük az akkumulációknak és a közvetlenül érintett közeg toleráló-pufferoló képességének,

— a hatáskapcsolódások először (az esetek többségében) a szabad szemmel nem látható mikroorganizmus populációk károsításával indulnak, zavart okozva a táplálékhálózatokban, elemcirkulációkban, a versengés (kompetíció) szabályozottságában, stb.

— gyakran jelen van egyidejűleg a közvetlen károsítás is, amely a közvetett hatás felismerését eltakarhatja, vagy megnehezíti,

— bizonyításuk bonyolult ökológiai kutatásokat igényel, amelyeknek ki kell terjedniük az adott terület abiotikus és biotikus hatóképes faktoraik feltárására, a hatásfolyamatok és az élőközösségek tér-időbeni védekezési képességeinek megismerésére is.

A vizeken keresztül történő közvetett hatásról csak rövid említést teszünk, mert a magyarországi vizeink többségére gyakorolt savasító hatás eltér a sokat emlegetett és idézett észak-európai és kanadai vizeken kimutatott hatásoktól. Ennek okát vizeink viszonylag magas sótartalmában, ezen belül is a karbonát, ill. hidrogén-karbonát tartalmában kereshetjük. Ez okozza ugyanis azt, hogy hazai vizeink nem savanyodnak el úgy mint a skandináv tavak, s pufferkapacitásuk olyan mértékű, hogy az esetek többségében az elkövetkezendő időben sem kell számolni a kizárólag a pH csökkenéséből levezethető vízi élőszervezetek károsodásával.

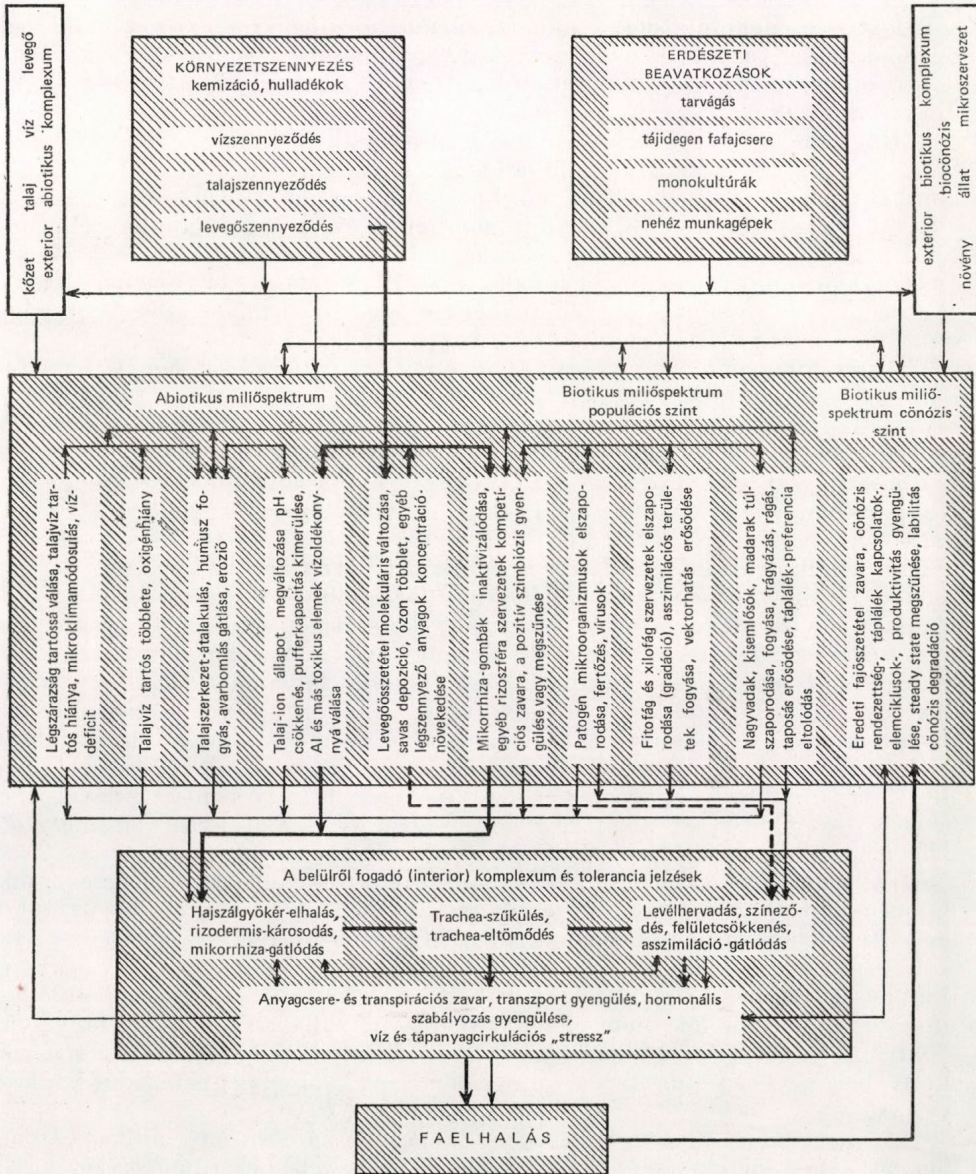
A talajon keresztül történő közvetett hatást elsősorban a természetes növénytakaró (pl. erdők) példáján mutatjuk be. A kérdés összetettsége miatt röviden ismertetnünk kell az erdők talajában bekövetkező kémiai változásokat.

A levegőbe jutó kén- és nitrogén-oxidok, nagy távolságokra is eljutva, bekerülhetnek az erdőkre. Ott vagy a leveleken, törzseken, vagy az avaron deponálódnak először. Innen lemosódva, ill. az avaron átmosódva kerülnek be a talaj felső rétegeibe, ahol az erdő növényeinek víz- és táplálékfelszívása történik (Jakucs et al., 1981). A Déli-Mátrában 1965-ben folyt, majd 1984-ben megismételt vizsgálatok azt mutatják, hogy az elmúlt 20 év alatt a fák leveleit érő közvetlen savhatás miatt csökkent a fák leveinek pufferolási képessége is. A levelekben kevesbedő alkálifém, és alkáli-földfém koncentráció miatt a lehulló levél (avar) pufferképessége is csökkent s így a közvetlen talajfelszínre jutó csapadék pH-ja akár 1 értékkel alacsonyabbá vált (Kovács, 1985).

Az avaron át a talajba jutó és a korábbi időknél nagyobb koncentrációjú szennyezőanyagok a talajok kialakult ion-egyensúlyát megbontják, a savgyökök reakcióinak hatására hidrogénion koncentrációjuk növekszik, vagyis maguk a talajok is mérhető módon savanyodnak. Az utóbbi évtizedekben folyamatosan, vagy lökésszerűen plusz savhatásnak kitett talajok egy részében ezen akkumulálódó hatásfolyamat révén megváltozott az ion-egyensúly, gátlódott és gyengült a talaj pufferkapacitása.

Az elsavanyodó talajban lévő olyan elemek, amelyek addig az élőlények tolerancia-tartományaira közömbösek voltak, hirtelen vízben oldódóvá és ezzel felszívhatóvá váltak. Az Al és egyes nehézfémek (Fe, Mn) kationjai részben toxikusak egyes élőkre, részben a talaj abszorpciós egyensúlyában a kémhatást maguk is tovább befolyásolhatják (Ulrich et al., 1979; Ulrich, 1983). Közben a kation-kicserélődési folyamatban fontos tápelemek, pl. a Ca, Mg, K eltűnnek a gravitációs vízzel a talaj gyökérfelszívó zónájából (Jakucs et al., 1981). A talajsavanyodás igen bonyolult kémiai reakcióinak változatos útjait most nem ismertetve azt hangsúlyozzuk, hogy az ilyen

- A jelenlegi erdei faelhalások döntő hatáskapcsolat-rendszere
- - - A légszennyezés direkte útja
- Egyéb hatáskapcsolatok, amelyek helytől-időtől függően a fapuszulás segítőjévé, esetenként elsődleges okozójává is válhatnak



1. ábra: Erdei fák elhalásának ökológiai értelmezhetősége a hatóképesnek minősíthető milliospektrum (károsítás) és a fogadóképesnek minősíthető toleranciaspektrum (károsodás) kapcsolatában (Jakucs, 1985)

típusú gyors változásokat a talajban élő populációk igen nehezen tudják tolerálni, az adaptációs mechanizmusuk sem tudja követni a hirtelen átalakulásokat.

A savanyodás, a toxikussá váló nehézfémek és Al-vegyületek hatására sok fontos és dekompozíciót, mineralizációt végző mikroszervezet elpusztul, de inaktívvá válnak a víz- és tápanyagfelvételben egyes szervezeteknél döntő mikorrhiza-gomba kapcsolatok is (*Blaschke*, 1981; *Hüttermann*, 1983; *Vogelmann* 1982).

Hogy ez a levegő kén- és nitrogén-oxidjaiból kiinduló talajátalakító hatás hazánkban is kezd akkumulálódva felerősödni, jelzik pl. a mikorrhiza-gombák termőtestjeinek eltűnései. Igen sok tájunkon eltűnt vagy megritkult pl. a rókagomba, a trombitagomba, vagy a tinórúgomba. Hasonló tendenciát jeleznek Európa más országaiból is (*Winterhoff* és *Krieglsteiner*, 1984). De a mikorrhiza-gomba fonalak inaktívvá válását jelzik azok a magasabbrendű növények is, amelyek anyagcseréjéhez és vízfelvételehez ezen gombák hifa-fonalaival való szimbiotikus kapcsolat hozzátartozik.

Az élővilág evolúciója során több erdőalkotó fánk esetében is létrejött a fa-gomba szimbiózis. A kocsánytalan tölgyünk (*Quercus petraea*) pl. tipikusan olyan fa, amelynél a szimbiota-gombák fonalai — különösen száraz időperiódusokban — szorosan összekapcsolódnak a fák hajszálgöyökérszövetével, három-négyszeresére növelve ezzel a víz- és tápanyagfelszívó rendszert. Napjainkban a felgyorsulóvá váló talajsavanyodás összetett jellegű közvetett hatása miatt nemcsak a fák felszívó hajszálgöyökérszövege károsodik közvetlenül, hanem a mikorrhiza-kapcsolatok is gátolt állapotba kerülnek.

A gátolt víz- és tápanyagfelvételű fa egyik védekező-toleráló mechanizmusa a vízszállító járatok (tracheák) keresztmetszetének szűkítése, különböző gélszerű tömőanyagokkal. E szűkítés fiziológiásan ugyanaz a jelenség, mint az őszi lombhullás idején történő folyamat. Csakhogy a védekezés már tavasszal és nyáron történik, amikor a levelek asszimilációs, transzpirációs tevékenysége a legerősebb lenne. A hatás drasztikusan jelentkezhet a fa hirtelen elszáradásában, vagy a levélhez el nem jutó fontos makro-és mikroelemek szállításának elakadása miatt a levélszínéződésben és a fa stresszállapotba kerülésében. Vizsgálatokkal alátámasztott véleményünk szerint (*Papp* és *Papp*, 1984; *Mészáros*, 1984; *Jakucs* és *Tóth*, 1984) a hazánkban hirtelen fellépő kocsánytalan-tölgy elhalásban és más fajoknál is fellépő károsodásokban egyre erősödöbben ez a közvetett (áttételes) hatás tekinthető az elsődleges oknak (*Jakucs*, 1984; 1985).

A mellékelt komplex ökológiai diagramon (*1. ábra*) a magyarországi tölgypusztulás példáján összefoglaltuk mindazokat a lehetséges kapcsolódási utakat, amelyek a fák, nem elemi kárként (pl. villámcsapás, tűz, fagy, víz-elöntés, szélöntés stb.) jelentkező, vagy nem az elöregedéssel és a versengés miatt bekövetkező (ún. természetes) elhalását, vagy megbetegedését okozhatják.

A diagramon egyesítettük a hatóképesnek minősíthető milióspektrum elemeit a fák fogadóképesnek minősíthető toleranciaspektruma összekapcsolásában. A diagram alapján adott hely beteg, vagy pusztuló fája (erdője) esetében kijelölhetők hipotézisként azok az elsődlegesnek feltételezett hatáskapcsolat-lehetőségek, amelyek kritikus pontjainak ellenőrző, méréses kutatáson alapuló vizsgálatával bizonyítható a döntő hatás-fogadás kapcsolat útja. Ennek biztos ismeretében már megtervezhető a védekezési stratégia is.

A diagramon vastagabb vonallal jelöltük azt az elsődleges kapcsolat-rendszert amely a nagymértékű hazai elhalások, levegőszennyeződésből

eredő áttételes vonalát jelzi. A kritikus pontokat vizsgálatokkal is alátámasztva kijelenthető, hogy Magyarországon jelenleg a fapusztulásban a kén- és nitrogén-oxidok levegőben történő koncentráció-növekedéséből kiindul és a talajon keresztüli áttételes hatás sokkal nagyobb mértékű és elsődlegesebb, mint pl. a levegőn keresztül a fát érő direkt savasító hatás (szaggyalult vonal), vagy pl. a patogén szervezetek közvetlen károsítása. Az ökológiai diagram elvileg a világ bármely részén lényegében használható és kisebb változtatással bármely élőlény pusztulási útjának kijelölésére is alkalmas.

A fák pusztulása miatt módosul az erdő egykori stabil rövidhullámú sugárzási mérlege, albedója, sugárzási-, valamint csapadékvíz-intercepciója. Az erdő belsejébe a korábbinál lényegesen több sugárzás jut be. Különösen a száradási gócekban a meleg napokon mikroklímatikusan meleg (hő-) szigetek lépnek fel, éjszaka viszont innen erősebb a kisugárzás. E mozaikosság befolyásolja az egész állományklimát (*Nagy és Justyák, 1985*).

Végeredményben a megindult károsodás az egész társulás strukturális és anyagcseréltatási szervezettségét megbontja úgy, hogy a továbbiakban már ez is elindít olyan folyamatokat, amelyek az erdő továbbfokozódó értékcsökkenését fogják jelenteni.

Összefoglaló megjegyzés: A légszennyeződésből eredő savasodásnak a természetes élővilágra gyakorolt hatásait (különösen a soktényezős reakciók eredményeként jelentkező áttételes hatásokat), Magyarországon hazai kutatásokkal és a védekezés módjának helyi sajátágaival lehet csak megoldani. Külföldi példák és kutatási eredmények e téren alig adaptálhatók, ezért ezek ismerete (tanulmányozása) szükséges ugyan, de nem elsődleges. A Kárpát-medence sajátos adottságaiból következik, hogy mind az abiotikus és biotikus hatóképes tényezők, mind az e hatásokat fogadó életközösségek másként fognak viselkedni, mint a világ többi pontján.

Igen fontosnak ítéljük az e téren valóban kívánatos interdiszciplináris kutatási együttműködést, ahol koncentrált mintaterületeken teljes vertikumban lehet a légszennyeződésből eredő savanyodásnak az élővilágra gyakorolt degradációját — hosszútávú kutatási program keretében — mind a meteorológiai mind az ökológiai, valamint más tudományágak módszereivel összekapcsoltan, közösen vizsgálni.

IRODALOM

- Bauch, J.*, 1983: Biological alterations in the stem and root of fir and spruce due to pollution influence., In Ulrich, B., Pankrath, J. (eds.): *Effect of accumulation of air pollutants in forest ecosystem*. D. Reidel Publ. Co., 377–386.
- Blaschke, H.*, 1981: Veränderungen bei der Feinwurzelentwicklung in Weisstannenbeständen, *Forstwiss. Cbl.*, 100, 190–195.
- Domergues, M. J. et Louquet, Ph.*, 1980: La pollution atmosphérique par l'ozone et les végétaux, *Année Biologique*, 19, 289–330.
- Hüttermann, A.*, 1983: Immissionschäden im Bereich der Wurzeln von Waldbaumen. In: *Immissionsbelastungen in Waldökosystemen*, Erw. Neuaufl., LÖLF, Nordrhein-Westfalen, 26–31.
- Jakucs P.*, 1984: A kocsánytalan tölgyek pusztulásának ökológiai magyarázata. *Az Erdő*, 33, 342–345.
- Jakucs P.*, 1985: Az erősödő savasodás hatása a természetes élővilágra. *Magyar Tudomány*, 30, 731–741.
- Jakucs P., Kovács M., Mészáros L. I., Papp B. L., Szabó Cs. M. and Tóth J. A.*, 1981: Trends in element circulations in the forest ecosystem of the „Síkfőkút Project”. In Stefanovits, P. (ed.): *MAB, Survey of 10 years activity in Hungary*. MTA, KESZ, Budapest, 15–48.
- Jakucs P. és Tóth J. A.*, 1984: A szijács tracheáinak eltömődése a megbetegedő kocsánytalan tölgyeknél. *Az Erdő*, 33, 348–350.

- Kovács M., 1985: A fák leveleinek pufferképesség-változása a savas ülepedés hatására. Kézirat.
- Kovács M., Podani J., Tuba Z. és Turcsányi G., 1985: A környezetszennyezés biológiai indikátorai. Mezőg. Kiadó, Budapest. Kézirat.
- Lizada, M. C. C. and Yang, S. F., 1981: Sulfite-induced lipid peroxidation. *Lipids*, 15, 189–194.
- Materna, J., Jančarik, V., 1982: Nové a méně známe příznaky poškození lesních dřevin. *Lešnická práce*, 163–167.
- Matkovic B. és Szöllösy-Varga I., 1976: A molekuláris oxigénből keletkező gyökök. *A Biol. Akt. Probl.*, Akad. Kiadó, Budapest, 7, 203–268.
- Mészáros L. I., 1984: A talaj, a gyökér és a levél összehasonlító kémiai elemzése. *Az Erdő*, 33, 367–369.
- Papp B. L. és Papp M., 1984: Összehasonlító vizsgálatok egészséges és pusztuló kocsánytalan tölgyek gyökérzetén. *Az Erdő*, 33, 245–247.
- Pólya L., 1979: Szabadgyök reakciók a szervezetben. In Haraszty Á. (szerk.): *Növényismeret és élettan*. Tankönyvkiadó, Budapest, 487–491.
- Schlee, D. und Koch, M., 1982: SO₂ Toxicität als Folge einer Sauerstofftoxicität. *Biol. Rundschau*, 20, 231–232.
- Schütt, P., 1982: Das Krankheitsbild verschiedene Baumarten, gleiche Symptomen. In: *Der deutsche Wald stirbt. Bild d. Wissenschaft*, 12, 86–101.
- Shimazaki, K., Sakaki, T., Kondo, N. and Sugahara, K., 1980: Active oxygen participation in chlorophyll destruction and lipid peroxidation in SO₂-fumigated leaves. *Plant and Cell Physiol.*, 21, 1193–1204.
- Tanaka, K. and Sugahara, K., 1980: Role of superoxide dismutase in defense against SO₂ toxicity and an increase in superoxide dismutase activity with SO₂ fumigation. *Plant and Cell Physiol.*, 21, 601–611.
- Ulrich, B., 1983: Gefahren für das Waldökosystem durch saure Niederschläge. In: *Immissionsbelastung von Waldökosystemen*, LÖLF, Nordrhein-Westfalen, 9–25.
- Ulrich, B., Mayer, R. und Khanna, P. K., 1979: Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen im Waldökosystemen im Solling. *Schrift. Forstl. Fak. Univ. Göttingen*, 58, 1–191.
- Vogelmann, H. W., 1982: Catastrophe on Camels Hump. *Nat. Hist.*, 91, 8–14.
- Wentzel, K. F., 1983: Höhenzuwachs-Analysen zur Diagnose von Immissionswirkungen. *Allg. Forstszchrift.*, 342.
- Winterhoff, W. und Kriegsteiner, G. J., 1984: Gefährdete Pilze in Baden-Württemberg. *Beih. zu den Veröffentl. f. Naturschutz u. Landschaftspflege in Bad.-Würtbg.* Karlsruhe, 40, 1–120.