

TENDENCIÁK A „SÍKFŐKÚT PROJECT” ERDŐ-ÖKOSZISZTÉMA ELEM MOZGÁSAIBAN*

JAKUCS PÁL¹

KOVÁCS MARGIT²—L. MÉSZÁROS ILONA³—B. PAPP LÁSZLÓ³—Cs. SZABÓ
MÁRIA⁴—TÓTH JÁNOS ATTILA¹

(1 = Kossuth L. Tudományegyetem, Ökológiai Tanszék, Debrecen

2 = MTA Botanikai Kutató Intézet, Vácrátót

3 = Kossuth L. Tudományegyetem, Növénytan Tanszék, Debrecen

4 = Eötvös L. Tudományegyetem, Növényrendszertani és Ökológiai Tanszék, Budapest)

I. Bevezetés

A MAB-program egyik alapvető célkitűzése a fontosabb biogén elemek eloszlásának és cirkulációjának vizsgálata a Föld különböző biotopjainak reprezentatív ökoszisztémáiban. A világ élelmezési kérdéseiben döntő szerepet játszó biológiai produkció növelési lehetősége, valamint a környezetvédelem szempontjából fontos dinamikusan funkcionáló ökoszisztéma-stabilitás (organizáció) alapkérdései szorosan összefüggenek az elemmozgási, felhalmozódási folyamatokkal. E problémakör kutatása különösen a fajgazdag, többszintes, autoregulatív (természetes) erdő-ökoszisztémákban igen bonyolult. Nem kétséges, hogy csak az itt feltárt és megismert törvényszerűségek ismeretében lehet megalapozottan segíteni az emberi táplálékszükségleteket szolgáló regulált rendszerek hatékonysági növelésében, valamint az ember számára legkedvezőbb környezet tartós megővésében.

Ma már jól ismert általánosságban, hogy a különböző tápanyagok (elemek, ill. vegyületek) folyamatosan kerülnek be az abiotikus reservoirok-ból a biotikus komponensekbe, majd bizonyos idő múltán valamilyen formában ismét visszajutnak az abiotikus reservoirok-ba. Az elemek bioszférán, ill. ökoszisztémán belüli körforgalmának (nagy- és kiscirkulációk) kvantitatív vizsgálata során a rendszer analízis metodológiájának értelmében számos szerző kompartment modellt állít fel, majd megállapítja az egyes kompartmentekben a kérdéses elem készletét, mennyiségét. Egymást követő időszakokban megmérve a kompartmentekben levő elem mennyiségeket, megfelelő adatok birtokában differenciál egyenletrendszerek állíthatók fel az elemek kompartmentek közötti mozgásának (cirkulációjának) leírására. Ebben az esetben az egyik kompartmentből kilépő mennyiség (output) a másik kompartment inputja.

Az egész, több kompartmentből összetett rendszerre vonatkozóan is vizsgálható az időegység alatt be-, ill. kilépő anyagok mennyisége. Amennyiben a rendszer dinamikus „egyensúlyban” van, úgy az in- és output kb. azonos

* „Síkfőkút Project” No. 70.

mennyiségű vagy az évi produkció növekedésének megfelelően lassan emelkedő tendenciájú. A jelentősen nagyobb input, kisebb output esetén (pozitív mérleg) a rendszerbe jutó anyagok felhalmozódását jelenti, nagyobb output kisebb input mellett (negatív mérleg) pedig anyagveszteséget jelez.

Az ökoszisztéma anyagforgalmi vizsgálatait azonban bonyolítja az, hogy különböző integrációs szinteken (molekula, sejt, szerv, egyed, populáció, cönózis stb.) lezajló folyamatokat kell figyelembe venni, valamint az, hogy ezen folyamatok lezajlási ideje igen különböző. Egyes elemek, mint pl. a N, P, K kulcsfontosságúak a sejtek működésében, mozgásuk az anyagcsere-utakon keresztül azonban gyakran csak másodpercekben mérhető. Ennek ismerete igen fontos a sejt szintű funkció vizsgálatában és megértésében. Könnyen belátható azonban az, hogy egy-egy sejt teljes anyagcsere-folyamatainak megismerése nem elegendő a magasabb integrációs szint (egyed, populáció, biocönózis) funkciójának megismeréséhez. A magasabb integrációs szintekben a folyamatok és interakciók olyan új fajtái lépnek működésbe, ahol a kölcsönhatások tovább bonyolódnak mind a saját szerveződési szinten, mind pedig az alacsonyabb és magasabb szinteken állókkal.

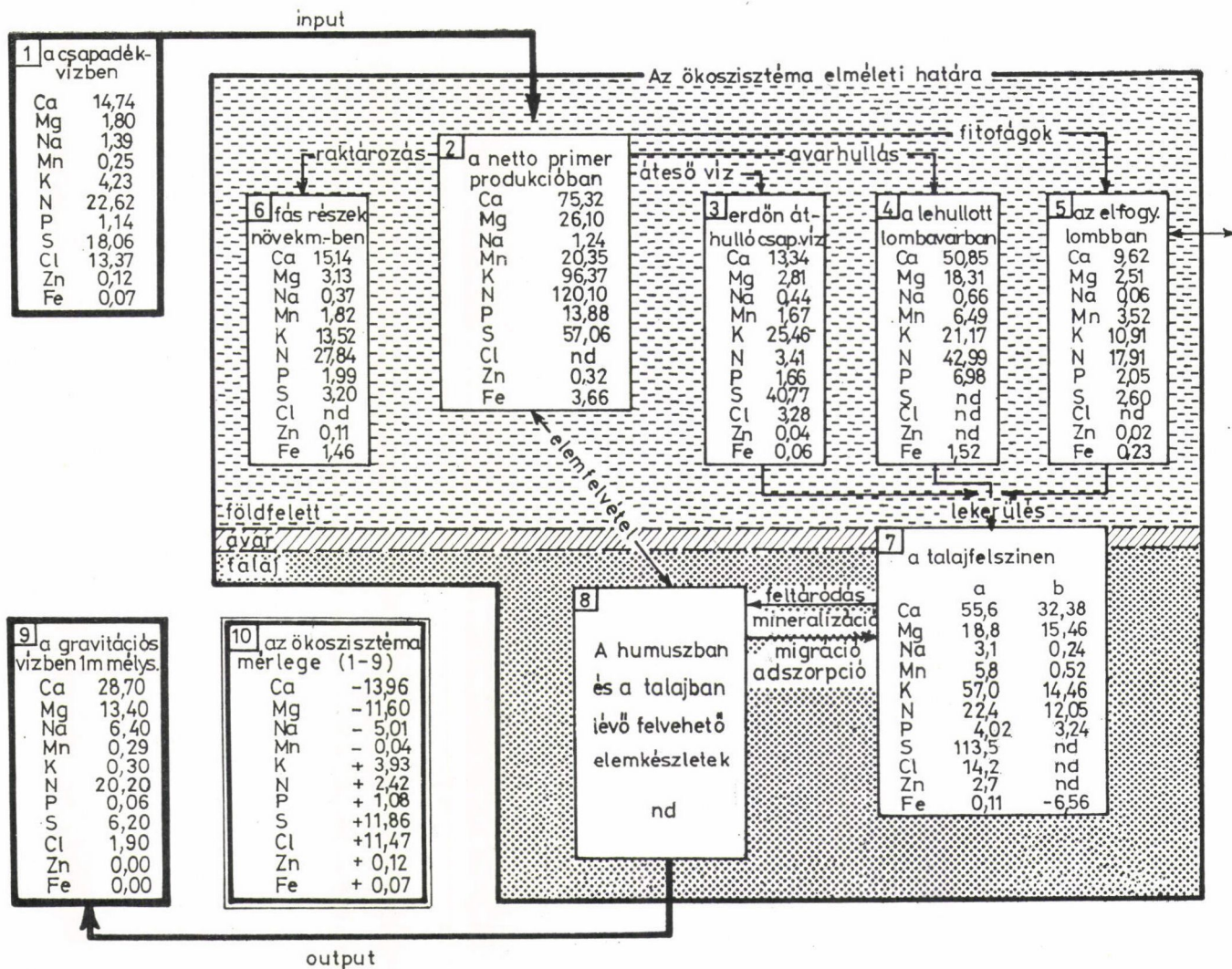
2. Az erdőben analizált elemek és mennyiségük

A MAB-programhoz kapcsolódó elemcirkulációs vizsgálatok 1973 óta folynak a magyarországi reprezentatív tölgyerdei területen, az ún. „Síkfőkút Project” kutatások keretén belül.

Az erdő nettó primer produkciójában évente felhalmozódó bioelemek, továbbá az ökoszisztéma különböző szintjeiben a vízzel mozgó elemek, valamint az avarbomlás során felszabaduló elemek stb. több éven keresztül nyert adatai alapján kíséreljük meg becsülni $\text{kg ha}^{-1} \text{év}^{-1}$ értékekben az elemmozgási tendenciákat. Az erdőben történő teljes elemcirkulációk felvázolására azonban csupán ezen adatok birtokában csak közelítően lehet vállalkozni, tekintettel arra, hogy a bioelemek az ökoszisztéma szubszisztémái és ezek belső trofikus kapcsolatai között a legkülönbözőbb vegyi kötésekbe épülve, a mindenkori funkcionális organizációs hatása alatt állnak, mozgásfolyamataik dinamikus bonyolultsága igen nagyfokú.

Fentiek azonban nem zárják ki annak lehetőségét, hogy a meglévő adataink összevetéséből az ökoszisztéma egyes kompartmentjeinek, ill. az elemmozgások egyes részleteinek vonatkozásában néhány általánosíthatónak látszó trendet ne kíséreljünk meg felvázolni, mind az intraszisztémaciklus, mind az ökoszisztéma elemmérlegének vonatkozásában. Ennek érdekében állítottuk össze az 1. ábrát.

Az 1. ábrán a vastag, összefüggő vonallal bekeretezett rész jelzi az ökoszisztémát, ill. annak „elméleti határát”. Ezen belül, ill. kívül blokkokban



I. ábra. A „Síkfőkút Project” tölgyerdőjének elemmozgási tendenciái. Az egyes blokkok adatai több éves mérések átlagai. Adatok $\text{kg ha}^{-1} \text{év}^{-1}$ -ben. Részletes magyarázat a 2. fejezetben

(kompartmentekben) tüntettük fel az egyes elem mennyiségeket. A blokkokban szereplő elem mennyiségek mérésének és kiszámításának rövid lényegét az alábbiakban ismertetjük. A teljes és részletes ismertetés könyv alakban megjelenés alatt van (JAKUCS ed. 1982—28). A továbbiakban e könyvre nem teszünk irodalmi hivatkozásokat, csak az időközben megjelent idevonatkozó részpublikációkra utalunk.

1. sz. blokk. Az erdő lombkoronája felé nyúló műszertartó tornyon, valamint az erdő melletti fátlan területen elhelyezett 2000—2000 cm² gyűjtőfelületű kádakba hulló csapadék elem tartalma (lásd még SZABÓ 1975, 1977, SZABÓ—CSORTOS 1975). A mintavételek 3 éven keresztül 2—2 hetenként történtek. Az adatok a mindenkori elemkoncentrációk, a lehullott csapadékvíz mennyisége és a gyűjtőfelület nagysága alapján kerültek kg ha⁻¹ átszámításra, a végső adat a 3 vizsgálati év egy évre vonatkozó középértéke. Az adat tartalmazza a szálló porral és egyéb légszennyeződéskből bekerülő elemeket is, amelyek a csapadékkal együtt mosódtak a felfogó edénybe. Ez a blokk az ökoszisztéma elem-inputjának döntő reprezentálója.

2. sz. blokk. A netto primer produkció elem tartalma, ill. az összes felvett elem mennyiség. Az ebben a blokkban szereplő adatok az erdő több éven keresztül vizsgált netto primer produkciójának ismeretében (lásd PAPP B. 1979, KÁRÁSZ 1979, PAPP 1980) kerültek kiszámításra. Az egyes elemek koncentrációanalízisei a fás- és lágyszárú szint domináns növényfajainak különböző frakcióiban (pl. levél, ág, törzs, gyökér, virág, termés stb.) többszörös ismétléssel történtek. A 2. sz. blokk elem mennyiségében benne vannak a 3-, 5- és 6-os blokk értékei is.

3. sz. blokk. Az erdő talajáig lejutó, lombon áteső és törzsön lefolyó csapadékvíz azon elem tartalma, amely a fitomasszából, továbbá a növényekre rakódó porból, ill. egyéb, az erdőben a talajig lejutó anyagokból (pl. heterotróf faeces) származhatott. Kiszámításuk a talajfelszín felett elhelyezett 14 db, egyenként 2000 cm² gyűjtőfelületű csapadékkádakkal, valamint a 14 db törzsre helyezett csapadékfelfogó gyűrűkkel összegyűjtött vízminták elemzésével történt, általában 2—2 hetes ismétlésben és 3 éven át. Az adatok 1 átlagévre vonatkoznak. Nem tartalmazzák az 1. sz. blokkban feltüntetett input mennyiségeket, vagyis a lombon áteső és törzsön lefolyó vízben mért tényleges adatok az 1. és 3. sz. blokkok összegzései lennének! (Lásd SZABÓ 1975, 1977, SZABÓ—CSORTOS 1975.)

4. sz. blokk. Az elhalt növényi részekkel a talajra jutó elem mennyiségek. Az ősszel lehullott lombavár (a két fafaj + két domináns cserje) avarjának elem analízise és az avarprodukció ismeretében hektárterületre számolása. Az értékek kb. 10—20%-kal növelhetők, mert nem tartalmazzák a cserjeszint avarjának kb. 40%-át kitevő egyéb cserjék, valamint az elhalt fásodó részekkel, termésekkel stb. lekerülő frakciók elem tartalmait. Szerepel viszont az értékekben a lágyszárúak föld feletti éves produkciójának elem tartalma (lásd MÉSZÁROS 1979).

5. sz. blokk. A fitofágok által elfogyasztott levelekben levő elem mennyiségek számított értéke. A fák és domináns cserjék levélnövekedés-vizsgálata közben (lásd JAKUCS—VIRÁGH 1975, VIRÁGH 1979) éveken át planimetrálással lemérésre került az a levélfelület-hiány, amelyet a fitofágok elfogyasztottak. A hektáronkénti levélszámok ismeretében került kiszámításra a fitofág rágási százalékos értéke. A blokkban feltüntetett elem mennyiségek a több éven át vizsgált teljes lomblevél produkcióból a szintén többéves átlag rágási százalékos alapján számolt összegeket tüntetik fel.

Itt jegyezzük meg, hogy a kutatási program ideje alatt elemzésre kerültek a terepen, valamint laboratóriumban etetési kísérletekben vizsgált hernyók faecesének, valamint az utolsó stádiumú hernyóknak és báboknak az elem tartalmai, súlyai is. Az egy hektáron levő hernyó-egyedszámok, valamint a faeces, ill. hernyó és báb elem tartalmi analízisek alapján példaként bemutatjuk az 1978-as vizsgálati év adatait. Ebben az évben nagyfokú gradációja volt a *Tortrix viridana* és *Ptilophora sp.*-nek. Az első érték a hernyók fejlődése során termelt faeces, a második érték a bábózás előtti, ill. már bebábózódott fitofágokra vonatkozik (minden számítás itt és a többi frakciónál is szárazsúlyra vonatkozik!). Az adatok kg ha⁻¹ év⁻¹-ben. Ca = 2,01, 0,15; Mg = 1,68, 0,12; Na = 2,09, 0,26; Mn = 0,80, 0,02; K = 4,51, 0,69; N = 9,42, 7,38; Fe = 1,43, 0,05. (SZABÓ L. ined.).

6. sz. blokk. A netto primer produkció évi fásodó növekményében levő elem mennyiségek. Számítása elsősorban az évgyűrű-növekedésekben levő (+ vékony gyökér + egyéves ág stb.) elfásodott anyagok analíziseik alapján történt (lásd PAPP B. 1979).

7. sz. blokk. A talaj felszínére kerülő elemek.

Az a-oszlop az avar-liziméterekben felfogott csapadékvíz havonkénti és több éven át analizált elemmenyiségeknek, a gyűjtőfelület nagysága ($12 \times 538,5 \text{ cm}^2$), valamint a felfogott vízmennyiségeknek az ismeretében került hektárértékű becslésre (lásd Kovács 1980). Az értékek a légköri csapadékkal beérkező (1. sz. blokk), az ökoszisztéma föld feletti részén átesve dúsuló (3. sz. blokk) és a lehullott avarból (4. sz. blokk) átmosott elemeket jelölik és tulajdonképpen a talaj szubszisztém elem-inputját adják meg.

A b-oszlop adatai a nylon-háló zsákos avarbomlási kísérlet során 2 év alatt felszabadult elemmenyiségeknek az összavar-produkció ismeretében hektárra számított értékei (lásd Tóth—Papp B.—Lenkey 1974). Ezek a mennyiségek — hasonlóan a 4. sz. blokk adataihoz, ugyanazon okok miatt — kb. 10–20%-kal még növelhetők lehetnek.

8. sz. blokk. A talajban (beleértve az avar alatt levő humuszos szintet is) levő elemek. Ezeknek mennyiségi nagyságrendje hektárra vonatkoztatva csak olyan durva hibával lenne becsülhető, amely túllépi az elfogadhatóság határát. A talaj felvehető elemkészleteinek az élő- és élettelen ökológiai tényezők komplex hatásmechanizmusában időben és térben is állandóan változó értéke van. A feltáródás, adszorpció, mineralizáció, humuszosodás, kimosódás és visszakerülés stb. folyamatainak időbeni együttes nyomonkövetése, hektárra vonatkoztatva — ma még metodikailag is megoldhatatlan. Kétségtelen viszont, hogy a talajban végbemenő említett folyamatok zavartalan és szabályozott végbemenése biztosítja döntően az ökoszisztéma szervesanyag-produkciójának évenkénti megismétlődési lehetőségét.

9. sz. blokk. A 0–100 cm mély monolitos oszlopliziméterek (3 db, 7500 cm^2 gyűjtőfelület) alapján felfogott, a gravitációs vízben levő elemmenyiségek. 4 év, havonként elemzett mintáinak éves átlaga, hektárterületre átszámolva (lásd Kovács 1980). Az erdő talaja tömött szerkezetű agyagbemosódásos barna erdőtalaj (talajszelvény-analízisét lásd Kovács 1978), ahol a talajvíz migrációjának egyensúlyi állapota kb. 100–120 cm mélységben van. Az erdő felvevő gyökérszónája 0–50 cm között dominál, a 100 cm-es mélységben felfogott vízzel távozó elemek tehát felfelé már nem vagy csak elhanyagolhatóan kis mértékben mozoghatnak. Így a 9. sz. blokkban feltüntetett elemmenyiségek felfoghatók, mint az ökoszisztémából már irreverzibilisen kilépő output értékek.

10. sz. blokk. Számított érték. Az 1. sz. input mennyiségek és a 9. sz. blokk output mennyiségeinek különbségei. Az értékek az ökoszisztéma elemmérlegének mutatói.

Nem rajzoltuk fel az ábrára a talaj elemmérlegének mutatóit, amely lényegében a 7. sz. blokk a oszlopának és a 9. sz. blokk értékeinek különbsége alapján számítható.

3 A kémiai elemzések módszerei

3.1. A vízminták (1., 3., 7a., 9. sz. blokkok) analízisei

A kémiai meghatározásokhoz a vízmintákat Mn 640 d típusú szűrőpapíron szűrtük meg, s a feldolgozásig sötétben, hűtőszekrényben tároltuk. A minták elemkoncentrációjának meghatározása havonként történt, minden mintavételi helyről. Mivel a mintavétel a talajig jutó csapadékok esetében hetente, ill. kéthetente történt (a mindenkor csapadéknak megfelelően), az egy hónapi vízmintákat mennyiségük arányában összekevertük és a kevert mintákat analizáltuk.

A kationok meghatározása UNICAM SP 1900 típusú atomabszorpciós spektrofotométeren történt. A nitrogén-, foszfor-formák, valamint a $\text{SO}_4\text{-S}$ meghatározását FELFÖLDY (1972) módszerkönyve szerint végeztük. A klorid-ion mérése OP-CL-7112-D típusú klorid-szelektív elektróddal, Radelkis OP-203 típusú ionkoncentráció- és pH-mérővel történt.

3.2. A szilárd (növényi, állati stb.) minták analízise (2., 4., 6., 7b. sz. blokkok)

A légszáraz mintákat laboratóriumban daráltuk, a fás mintákat pedig aprítással, majd darálással homogenizáltuk. A gyökér mintákról a talajrészeket erős vízsugárral mostuk le. Lényeges volt a minták előkészítése során, hogy a fás komponensek aprítását, darálását, ill.

homogenizálását a mintavétel után még friss állapotban elvégeztük. A szárítás alatt ugyanis a xylenben és a phloemben az oldat a vágási felület közelében a vízvesztés miatt fokozatosan betöményedik, ami a tápelemek inhomogén eloszlását eredményezheti.

A homogenizált, 85 °C-on súlyállandóságig szárított mintákban a K, Ca, Mg, Fe, Mn, Na koncentrációját 500 °C-on végzett hamvasztás és 1 : 1 : 8 arányú HCl : HNO₃ : H₂O savkeverékkel való feltárás után (VARJÚ 1972) UNICAM SP 1900 típusú atomabszorpciós spektrofotométeren mértük. Az össz-nitrogén koncentrációját Kjeldahl módszere szerint, az össz-foszforét pedig molibdénkék módszerrel, redukálószerűl aszkorbinsavat alkalmazva, határoztuk meg.

4. Az intraszisztém ciklusok elemmozgási tendenciái

Az ökoszisztémában bent levő, vagy bejutó elemek a rendszeren belül körforgalomban vesznek részt a „felvehető tápanyag” → „a szerves anyag” → „az ásványos humusztalaj” komponensek között, kialakítva ezzel egy rendszeren belüli ciklust (intrasystem cycle).

Az intraszisztém ciklusban az egyik kritikus pont a bioelemek transzfere az „organikus” és a „felvehető tápanyag” komponensek között. A bioelemek visszakerülése a talajba — pontosabban a felvehető tápanyagblokkba — két fő úton megy végbe: az avarhullással és annak lebomlásával, ill. a csapadékvízzel. Szemben az avarbomlási folyamattal a csapadékvízzel érkező egyes elemek közvetlenül és gyorsabban bejuthatnak a talaj felvehető tápanyagkészletébe. Ezzel az elemeknek egy gyorsabb reciklizációja jöhet létre, míg az avarhullás során egy hosszabb, komplex biológiai dekompozíciós folyamat eredményeképpen válnak csak ismét felvehetővé az ásványi anyagok.

Adataink alapján (1. ábra) az évi elemfelvételnek (2. sz. blokk) elyben azonosnak kell lenni a raktározás (6. sz. blokk) és a talajra lekerülés (visszakerülés = 3., 4., 5. sz. blokkok) értékeivel. Azon elemek vonatkozásában, ahol minden blokkban vannak mért adataink (Ca, Mg, Na, Mn, K, N, P, Fe) összességében az elemfelvétel blokkja 13,5%-kal nagyobb összelemmennyiségeket mutat, mint a raktározás és a lekerülések összege (357, ill. 309 kg ha⁻¹ év⁻¹). A különbség a nem elemzett cserjék avarjában, a — metodikailag nagyon nehezen vizsgálható — hajszálgöyökér-produkcióban, a vegetációs periódus ideje alatti elemkoncentráció-értékek migrációjában, a még nem eléggé ismert heterotróf in- és output mennyiségekben, továbbá a mikroorganizmusok nem kontrolált tevékenységében kereshető. Természetesen számolni kell minden intraszisztém elemciklusnál az input- és output elem-mennyiségekkel is. Inputként elsősorban a csapadékvízzel való bekerülést, a nitrogén esetében a talaj felső rétegében való megkötődést, a talajvízzel történő esetleges felfelé áramlást, ill. a talaj raktározott készleteiből történő elemfeltáródást kell megjelölni (lásd még 5. fejezet).

Ha azonban nem összességében, hanem külön-külön értékeljük az 1. ábra egyes elemeinek blokkok közötti mennyiségi alakulását és kapcsolódását, az intraszisztém elemciklusok alábbi fontosabb tendenciáit figyelhetjük meg.

Ismételten hangsúlyozzuk, hogy az adatok mindenütt 3–5 év méréseinek átlagértékei. Az egyes években az abiotikus és biotikus tényezők változékonyságának hatására minden elemnél jelentkeztek \pm eltérések. A szórás nagysága 5–15% között adódott.

4.1. Kalcium

A légköri csapadékkal az erdőbe érkező kalcium a vizsgált kationok között a legnagyobb mennyiségű. A lombon átesve, ill. a törzsön lefolyva a Ca-tartalom kb. kétszeresére dúsul. A csapadékvízzel az avarfelszínig összesen évi 28 kg ha⁻¹ Ca jut le. A magas kalciumértékek elsősorban azzal lehetnek összefüggésben, hogy a légköri csapadékban oldódó és a levelekre, ágakra ráhulló, majd onnan lemosott légköri porszennyeződésnek is magas a Ca-tartalmuk. A mintaterülettől az uralkodó széliránnyal (N, NW, NE) megegyezően viszonylag nagyobb, összefüggő mészkőterületek vannak, ezek bányáiból és cementműveiből, valamint a meszes talajok szélérozóiójából könnyen kerülhet a légköri porba az általunk is észlelt Ca-mennyiség, annak ellenére, hogy a vizsgált erdő és közvetlen környéke (kb. 5–10 km-es körben) lényegében zárt vegetációval fedett.

A lombon áteső és a törzsön lefolyó vizekben a kalcium dúsulásainak maximumai a nyár végi—ősz elejei időszakban jelentkeztek, minimumai a vegetációs periódust megelőző időkben.

Az avar-liziméterek adatai szerint az avar atmoszárával a humuszos talajszint közvetlen felszínére érkező csapadékvíz Ca-mennyisége még kb. ugyanannyival növekszik, mint amennyi az avar felszínéig lejut (7a blokk mínusz 1 + +3 blokk). Az avarbomlásos kísérlet során a Ca-felszabadulás évi mennyisége (7b. blokk) a csak az avar atmoszárával nyert értéknél kevéssel adódott magasabbnak. Mindezek arra engednek következtetni, hogy a talaj-szubszisztém Ca-inputja nem érheti el a primer produkcióban levő évi kalciumfelvétel (2. sz. blokk) mennyiségét. A hiányt valószínűleg a talajban levő és a szervesanyagok és agyagfrakciók által hosszú idők alatt megkötött Ca-feltáródás pótolja az ökoszisztéma élő komponensei részére. Miután azonban az 1 m mélységben mért gravitációs vízzel is jelentős Ca-mennyiség távozik a talajból, a felvett és távozó mennyiségek egyértelműen jelzik azt a tendenciát, hogy a talaj (és az ökoszisztéma) Ca-mérlege negatív jellegű. Ennek következményeire az ökoszisztéma elemmérlegének ismertetésénél még visszatérünk.

4.2. Magnézium

Ennek a kationnak az intraszisztém ciklusa igen hasonló a kalciumhoz, de abszolút mennyiségei kg ha⁻¹ év⁻¹ értékekben jóval alacsonyabbak. A nettó primer produkcióban levő felvett elemmentiségeknél kb. 12%-a rak-

tározódik a növények fásodó részeiben, a többi az avarral lehull, ill. az erdőn áteső vízzel mosódik vissza a talajra. Az avaron áthulló csapadék a Mg-t — nagyobb oldékonysága miatt — a Ca-nál gyorsabban mossa ki, az avarbomlás során is hasonló ütemű az elem felszabadulása (az ősszel lehullt lombavar Mg-vesztesége különösen a lehullás utáni hónapokban gyors). Miután azonban a talajban a gravitációs vízzel évente igen jelentős mennyiségű Mg kerül ki az ökoszisztémából, az intraszisztém ciklus zavartalan menetéhez a talajban és a humuszban tárolt készletek „fogyasztásának” kell bekövetkezni. Az intraszisztém elemmérleg tehát — hasonlóan a Ca-hoz — itt is negatív a talaj szubszisztém számára.

4.3. Nátrium

Közel azonos mennyiség érkezik a csapadék inputtal, mint amennyi a nettó primer produkcióba évenként felvevődik. A lombon áteső és a törzsön lefolyó vízben csak kevéssel növekszik a talajig lejutó víz Na-tartalma, az avaron átjutó vízben azonban már megindul a vízben oldott Na-ionok mennyiségi növekedése. Ez a növekedés a talajban lefelé haladva — összefüggésben a talaj adszorbeált Na-tartalmával — az alsóbb talajszintekben még tovább emelkedik és az 1 m mélységben, a gravitációs vízzel az input nátrium 4–5-szörös mennyisége távozik a rendszerből. Amíg tehát a Na intraszisztém ciklusa az input pótlódás miatt zavartalanul végbemehet, addig ez a mozgékony elem már a talaj szubszisztém számára negatív mérleget mutat. Miután a nátriumot az élőlények nem halmozzák fel szerves formában, a talaj ion-háztartásában pedig nincs, ami kikapcsolná és benn tarthatná, könnyen távozik az output vízzel. Végül soron így a talajból történő jelentős kimosódása miatt az ökoszisztéma mérlegében a Na is a lassan fogyó elemek közé tartozik.

4.4. Mangán

Az ökoszisztéma egyes kompartmentjei között évenként jelentős Mn-mennyiségek mozognak. A felvett Mn legnagyobb része a zöld levelekben kerül az ökoszisztéma élő részébe és az elhalt autotróf, ill. heterotróf komponensekkel hullik vissza a talajfelszínre. Viszonylag kevés az élő részekből való kimosódás, jelentős azonban az elhalt avart átmosó csapadékvízben mért mennyiség. A nettó primer produkcióval felvett Mn-mennyiségek közel egyharmada hiányzik a visszakerülés és raktározás mért blokkjaiból. Ezen mennyiségek valószínűleg az évente többször is kicserélődő hajszálygökérzetben, az elemzésbe nem vont cserjeavaran, ill. a heterotróf és dekomponáló szervezetekben található meg. Erre utal az is, hogy pl. az avarbomlási kísérletekben a Mn mennyisége a baktériumszám növekedésével párhuzamosan nőtt. A mikroorganizmusok ugyanis képesek az oldható formában levő Mn^{2+} ionokat old-

hatatlan Mn^{4+} vegyületekké alakítani. A gravitációs vízzel csak igen kis mennyiségű mangán távozik az ökoszisztémából, tekintve azonban, hogy még ennél is kevesebb érkezik az input csapadékkal, az ökoszisztéma mérlegében ez az elem is negatív tendenciájú.

4.5. Kálium

Az ökoszisztéma élő részeinek igen könnyen kimosódó eleme. A csapadékvíz lombon átjutó és törzsön lefolyó mennyiségében az összes elem közül a K dúsul fel legnagyobb mértékben. A lombavar bomlása során is hirtelen lecsökkenhet az abszolút K-mennyiség már a lehullást követő év márciusáig, függetlenül a levélszövet bomlási sebességétől. A talajra jutva annak szervesanyag és agyagtartalma jól adszorbeálja, így az erős fixálás miatt a talaj mélyebb rétegeibe már csak igen kis mennyiségben jut le. Az input—output ökoszisztéma-mérlegben pozitív elemnek tekinthető, az input csapadék K-mennyiségének a gravitációs víz outputjával távozó mennyiség csupán 7%-a.

Az intraszisztém mozgásokban a nettó primer produkcióban felvett káliummennyiség 14%-a raktározódik a fásodó részekben, 26,4% mosódik ki a lombon áthulló és törzsön lefolyó vízzel, 22(–30)% a lombavarral kerül a talajra és kb. 12% a fitofágok faeceseivel és elhalt testével. A mérleg hiányzó kb. 20%-a a mangánál említett komponensekben kereshető.

4.6. Nitrogén

A tápanyagforgalomban igen fontos nitrogén mennyisége a nettó primer produkcióban, az elemek között a legmagasabb. Az évi N-felvételből 23,3% raktározódik a fásodó növényi részekben, 35,8% (40%) a lombavarral hull le a talajra, 15% a fitofág szervezetek fogyasztási láncába kerül és csak 2,8% mosódik le a csapadékvízzel.

Az input csapadékvízben évenként átlagban 22,62 kg N került be egy hektárnyi erdőállományba és ebből 1,60 kg volt nitrát-nitrogén. A légköri nitrogén magas N-tartalma a levegő fokozódó mértékű elszennyeződésének jelzője (pl. műtrágyázás, ipari légköri szennyeződés stb.). Az 1970-es évek előtt magyarországi átlagban a légköri csapadék N-tartalma még csak 14,6 kg ha⁻¹ év⁻¹ volt (KOZÁK 1971).

A lombon áteső és a törzsön lefolyó vízben a nitrogéntartalom növekedése elég kismértékű. A vizsgálati években többször előfordult, hogy egyes hónapokban egynél kisebb dúsulási tényezők is jelentkeztek, ami a légköri csapadék N-koncentrációjának csökkenését jelzi a növényzetten átjutó vízben (lásd CARLISLE et al. 1966, NIHLGARD 1970 stb.). Összefügghet ez azzal, hogy a növény a levélre került csapadékból nitrogénvegyületeket (elsősorban nitrátokat) vehet fel.

A lombavar bomlási folyamatában is megfigyelhető volt az avar N-tartalmának csökkenő, ill. emelkedő fluktuációja. A bomló avar N-tartalmának csökkenése főleg a téli-tél végi hónapokban jelentkezett, ami összefügghet a fagyás, ill. olvadás következtében történő avar szöveti fellazulásával és a kimosódási folyamat erősödésével (hasonló jelenségről számolt be ANDERSON 1973, GOSZ—LIKENS—BORMAN 1973 stb. is). A bomló avar N-tartalmi növekedése pedig a külső hatásokon (csapadék input, faeces, friss növényi törmelék, stb.) kívül elsősorban a mikroorganizmusok N-tevékenységéhez (nitrifikáció, ammonifikáció, N-fixálás stb.) kapcsolható.

A vizsgált erdő agyagbemosódásos barna erdőtalajában a nitrogén legnagyobb része szerves kötésű N-formában van jelen. Ennek mennyisége a 0–20 cm-es talajszintben 1,8 tonna ha^{-1} -ra becsülhető. Az ammónia általában a felső talajszintben megkötődik, mint kation adszorbeálódik és gyorsan felvevődhet. A NO_3-N is jól felvehető az autotrófok részére, ez a N-forma azonban a gravitációs vízben is könnyen mozog lefelé a talajban és távozhat az ökoszisztémából. A nitrát-nitrogén gravitációs vízben való dúsulása összefüggésben lehet a Ca és Mg mobilizációjával is. Jelentős mennyisége és a talajvíz növekvő nitrát-tartalma miatt e jelenség környezetvédelmi szempontból is figyelemre méltó.

A terepen és a laboratóriumban végzett vizsgálatok alapján a mineralizációs dinamika intenzitása a legnagyobb az április—május—június (utóbbiban volt mérhető a maximum is), valamint az őszi lombohullással párhuzamos szeptember—október—november hónapokban (lásd KOVÁCS 1978).

Az időben és térben igen bonyolult nitrogén intraszisztém- és ökoszisztém-mozgások az ökoszisztéma élő részének N-szükségletét bőven fedezni tudják. 5 év vizsgálati eredményeinek átlagában megállapítható, hogy az input-output mérleg az összes N-re pozitív az ökoszisztéma számára. Vagyis az erdő abszolút N-tartalma növekszik, aminek oka elsősorban a csapadékvízzel érkező megnövekedett N-input, valamint a talajban folyamatosan történő N-megkötés.

Az avarbomlással és a csapadékkal a talajra jutó N-mennyiség jelentős eltérést mutat az avarliziméteren átjutó vízben mért mennyiségekkel szemben. Ez azzal magyarázható, hogy az avarliziméterekben a mikrobiális lebomlás kevésbé volt intenzív, mint a közvetlenül a talaj felszínére kihelyezett nylon-háló zsákos vizsgálatoknál, mivel az avarliziméterekben kisebb az avar nedvességtartalma és a talajból történő N-felvétel lehetősége sem áll fenn.

4.7. Foszfor

A primer nettó produkció foszfor tartalmának kb. 14%-a a fásodó növényekben raktározódva az intraszisztém ciklus stagnáló része lesz. A talajra való visszakerülésben a legnagyobb mennyiség (50%) a lehulló lombavarral

mozog, de jelentős a fitofág úton való visszakerülés is. A levegőszennyeződésből eredő foszfor az input csapadékkal kb. 1 kg mennyiségben jut évente egy hektár erdőfelületre. A csapadékvíz lombon áthaladása során ez a mennyiség kb. másfélszeres értékkel növekszik. Hasonlóan a nitrogénhez, a lombon áteső vízben is lehetett néhány alkalommal koncentrációcsökkenést mérni, ez ennél az elemnél is jelzi az autotrófokba föld felett, levélen át történő beépülés lehetőségét. Amíg a biocönózison áthaladó csapadékvíz P-koncentrációinak maximumai májusban (fitofág gradáció) és novemberben (az elhaló, még fán levő levélből történő kimosás) jelentkeztek, az avarbomlás során az első tél utáni koratavaszi időszakokban volt jelentősebb a foszfortartalom-csökkenés. A humuszos talajfelszínen a foszfor legnagyobb része adszorbeálódik és szinte elhanyagolható az a mennyiség, ami a gravitációs vízzel kikerül az ökoszisztémából. A foszfor mérleg tehát az ökoszisztéma számára pozitív.

4.8. Kén

A kén viszonylag nagy mennyiségben van jelen az input csapadékvízben. Ennek oka az utóbbi idők növekvő levegőszennyeződése. A lombon áteső vízhez az erdő lombkoronája tekintélyes mennyiségű ként „adott”, ami elsősorban a zöld levelekből történő kimosásból keletkezhetett. Az ősszel lehullott lomblevél S-tartalmára és az avarbomlás során történő S-felszabadulásra nincsenek adataink, az avarliziméterben mért kénmennyiség azonban igen nagy mennyiségű. A talajra kerülő kénnek kb. 90–95%-t a talaj szervesanyagai és agyagtartalma visszatartja, a gravitációs víz kénkoncentrációja az alsóbb talajszintek felé már alig csökken. Az output vízzel az input csapadékban érkező S-mennyiségeknek csak kb. egyharmada távozik, vagyis az ökoszisztéma évente jelentős kénmennyiségekkel gyarapszik.

4.9. Klór

A klór-ion jelentős része a csapadékkal kerül az ökoszisztémába, a föld felett élő részek és az avar atmoszféra csak kevésbé gyarapszik a talajra jutó mennyiség. Miután a nettó primer termelésben és az avarban nem történt meg a Cl-ion mennyiségi mérése, az intraszisztém ciklusát nem lehet hozzávetőlegesen sem elemezni. A gravitációs víz liziméteres vizsgálataiban kimutatták, hogy a klorid a talaj felső szintjében jól adszorbeálódik és a talajfelszínre csapadékvízzel érkező mennyiségnek csak mintegy 10–15%-a távozik az output vízzel. A klór-ion mérleg tehát a talaj szubszisztém, de az egész ökoszisztéma számára is pozitív.

4.10. Vas

A primer produkcióba felvett vasmennyiségnek közel fele raktározódik a fásodó részekbe, másik fele az avarral lehull a talajra. Igen kevés a csapadékvízzel való bekerülés és a növényzeten áthulló vízben való dúsulás. Érdekes viszont, hogy a lombavarbomlási kísérlet során az avar Fe-koncentrációja egy kezdeti csökkenés után többszörösére emelkedett. A vas az erdő talajában — rendszerint felvehetetlen formában — jelentős mennyiségben van jelen. A nagy mikrobiális aktivitás és a talaj savasabb pH-értéke segítheti a talajból az avarszintbe történő Fe-diffúzió végbemenését. A vas egy része a növényi szövetekben vízdoldékony fehérjékkel olyan komplexeket képezhet, ami könnyen kimosódhat (GILBERT 1957), feltehető tehát, hogy a kezdeti koncentrációcsökkenést viszont az ilyen vegyületek kimosódása okozhatta. Az intraszisztém mozgásokból kikerülő vas, amelynek mennyisége a gravitációs vízben 1 m mélységben már nem mérhető, főleg a talaj 50—80 cm-es mélységében csapódik ki vasborsók alakjában.

4.11. Az intraszisztém ciklusok időbeni alakulása

Összegezőként megállapítható, hogy az ökoszisztémán belüli elemmozgások — tekintve, hogy a humuszban és a talajban is nagy mennyiségű raktározott készletek vannak felhalmozva — az erdő tápanyagigényét jelenleg még zavartalanul biztosítani tudják. A lombavarból történő elemfelszabadulás maximumai, a növények számára fontos tápelemek esetében, a téli—tavaszi időszakokra esnek. Így a növények a lombfakadás megindulásakor jelentős tápelemmennyiségekhez juthatnak, ami jól kiegészíti az őszi lombhullási időszak idején a növényi testbe visszavándorolt rezerv tápanyagok mennyiségét. Lombfakadás után a talaj tápanyagai elsősorban a csapadékból és a föld feletti részekből történő ki- és lemosásból nyernek jelentősebb tápanyag-utánpótlást. A bomló lombavar ebben az időszakban egyes elemekre (pl. nitrogén) már maga is „fogyasztóként” léphet fel. A fitofágok gradációjakor, elsősorban a nagy mennyiségű faecesszel a talajra kerülő elemek egy része — elsősorban a mobilis kationok (pl. K) — valószínűleg igen hamar ismét felvevődik (tehát az elem egy vegetációs periódus alatt többször is cirkulálhat!). Ez biztosíthatja, hogy az erdő asszimiláló felületében a fitofágok rágása miatt bekövetkező viszonylag nagy mértékű károsodási hiány, a gyorsan képződő új hajtások révén igen hamar pótlódik. Megfigyeléseink szerint azonban egy erdő ilyen típusú autoregulációja csak akkor következik be, ha az állomány az adott környezetében tartósan egyensúlyi helyzetben van, vagyis elsősorban a még természetes vagy természeteshez közelálló erdők esetében.

5. Az ökoszisztéma elemmérelege, következtetések

A természetes erdők esetében az atmoszférikus (meteorológiai) input a csapadékvízben és a hóban oldott ásványi anyagokból, valamint a levegő természetes és emberi tevékenység hatására bekerülő szennyező gázaiból, továbbá a porból és egyéb szélhordta részecskékből tevődik össze. Mérsékeltövi lombhullató erdők esetében a levegőben levő anyagok jelentősebb része (a CO₂ kivételével) a csapadékvízzel kapcsolódva jut be az ökoszisztémába. Ezeknek a mennyisége jó közelítéssel meghatározható a hidrológiai és csapadékkémiai paraméterek ismeretében (LIKENS —BORMAN 1972). Atmoszférikus inputnak lehet tekinteni a nitrogén talajfelszíni és talajbani nitrogénkötő baktériumok által történő fixálását is. Az atmoszférikus output a szilárd részecskék szél általi elhordásából és a gázdifúzióból adódik (bár érvényesül a konvekciós hatás is). Ez az output a természetes erdők esetében általában kis mértékű, ide sorolható a denitrifikációs úton felszabaduló N is.

A geológiai input a természetes erdők stabilitása esetén általában lassú is kismértékű. Jelentősebb lehet a geológiai output, amely a talaj mélyebb rétegeibe lefolyó gravitációs víz ásványianyag tartalmából adódik.

Az elemek biológiai input és outputja többnyire még a konzumens szervezetek migrációjából és egyéb tevékenységéből tevődik össze, a természetes mérsékeltövi erdőkben nagyságrendjük kicsi.

A „Síkfőkút Project” elemvizsgálatai során nyert adatokat vizsgálva igen érdekes és gondolatokat ébresztő tendenciákat figyelhetünk meg akkor is, ha nem az ökoszisztémán belüli (intraszisztém) kompartmentek egymás közötti elemmennyiségi alakulásait vizsgáljuk, hanem olyan mérleget készítünk, ahol csak az ökoszisztémába évenként bekerülő (input) és az ökoszisztémából évente kikerülő (output) elemmennyiségeket vetjük egybe (lásd 1. ábra 1-es és 9-es blokkja, ill. a 10-es blokk).

Első látásra is feltűnő, hogy a kalcium, magnézium nátrium és mangán, valamint a NO₃-ban határozottan negatív (az ökoszisztémából fogyó), a K, P, S, Cl, valamint az összes N-ben pedig pozitív (az ökoszisztémában gyarapodó) tendenciájú az elemméreleg. Hasonló tendenciájú ökoszisztéma elemméreleget észleltek pl. MAYER (1972), ULRICH —MAYER (1973) Közép-Németországban, de a világ számos más területén is (lásd LIKENS et al. 1977). Az ökoszisztéma input-output elemmérelegének ez az alakulása az alábbi néhány általánosítható megállapítás feltételezését teszi lehetővé.

5.1. A talajsavanyodás problémája

A talajtani kutatásokból ismert, hogy a fokozódó műtrágyázással (+ öntözéssel) meggyorsul a Ca-, Mg- stb. kationok mobilizálása és a lefelé áramló gravitációs vízzel a felsőbb talajszintekből történő kimosódása. A Ca és Mg

kilúgását a talajba kerülő NO_3^- , továbbá a szabad SO_4^{2-} , mint kísérő anionok még fokozzák. A folyamat a talaj fokozatos elsavanyodását okozza (KLAUSING 1956, STEFANOVITS 1977, MAYER—ULRICH 1977 stb.).

A mezőgazdasági talajoknál a műtrágyázás és egyéb emberi hatások (kemikáliák) miatt végbemenő általános és világméretű talajsavanyodási folyamatokkal analógnak tekinthetjük a síkfőkúti vizsgált „természetes” erdőben a Ca- és Mg-kationok terén tapasztalt kimosódási tendenciát, amely végső soron az ökoszisztéma Ca-, Mg- negatív mérlegében jelentkezett. Az erdőbe a környező agrárterületek fokozódó mértékű intenzív műtrágyázásaiból bőven kerülhet be a csapadékvízzel pl. nitrogén, de a légszennyeződésemből kén is („savas esők”). Ezek önmagukban is fokozzák a talaj elsavanyodását (ULRICH 1972, RAPP 1973, OLSCHOWY et al. 1974, KÜHN—WELLER 1977, ULRICH et al. 1978, ODEN in RAMADE 1977 p.: 58—59 stb.).

A savanyodó közegben az oldhatatlan karbonátokban és egyéb kötéseken jelenlevő Ca- és Mg-kationok a talaj felső rétegében, a víz és a jelenlevő CO_2 hatására, elsősorban oldható Ca-, ill. Mg-hidrokarbonátok formájában, de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, ill. $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ stb. formájában is a gravitációs vízzel az ökoszisztémából könnyen kimosódnak és a mélyebb talajrétegekbe (esetleg a talajvízbe) kerülhetnek. A mélyebb rétegekben a Ca- és Mg-bikarbonátok visszaalakulhatnak Mg- és Ca-karbonátokká (mészlencsék, mészlepedékek, dolomitszemcsék stb.), ekkor azonban a biológiai körforgalomból már hosszú időre (esetleg véglegesen) kivonódtak. A síkfőkúti erdő 1—1,5 m-es talajmélységeiben jól megfigyelhetők ezek a kialakult kemény, „meszes” rétegek, ill. csomók.

A vizsgált erdő pH-viszonyai — különösen a talaj felső szintjeiben — savanyú (pH 4,1—4,8) kémhatást mutatnak. Ezt a talajsavanyúságot az erdőben acidofil növényfajoknak (*Luzula nemorosa*, *Hieracium* sp.-ek *Veronica officinalis*, *Deschampsia flexuosa* stb.) kellene jelezni. E fajok jelenléte az erdőben azonban jelenleg még legfeljebb csak véletlenszerű. A nagy dominanciájú és konstans növények ma még egyértelműen a semlegeshez közelálló pH-jú, inkább neutrális talajt jeleznek (lásd PAPP—JAKUCS 1976: a fitocönológiai táblázat fajainak R-számai).

A ténylegesen mért talajsavanyúság és az „acidofil” növényfajok hiányzásának egybekapcsolódása arra a feltételezésre enged következtetni, hogy a talajsavanyodási (Ca-Mg negatív mérleg kialakulási) folyamat nem régen gyorsult fel a területen. Az időpont valószínűleg összekapcsolható a műtrágyázás és a levegőszennyeződés általános fokozódásával (kb. 1965—1970 óta).

Várható ettől a kismértékű, de tendenciájában egyértelműen elindult talajsavanyodási folyamattól, hogy az erdő aljnövényzete — rövid időn belül — fajainak átcserélődésével is jelezni fogja az ökoszisztéma Ca-Mg negatív mérlegének jelentkezését.

5.2. Az ökoszisztéma pozitív nitrogénmérlegének következményei

Az ökoszisztéma legfőbb növényi tápanyagainak (N, P, K) „mérlege” egyértelműen pozitív (lásd 4.5—4.7 fejezetek). Becsléseink szerint különösen a nitrogén-formák évről évre növekvő gyarapodása jellemzi az erdő felsőbb talajszintjének elemösszetételét. Az input N-többletet az ökoszisztémának az autotróf produkcióba, ill. a humuszba való bekerüléssel kellene tolerálni.

A vizsgált erdő fő fitomassza-mennyiségét adó fái azonban az elmúlt években gyorsuló ütemben haltak el (az 1972-ben számolt 816 db ha⁻¹ fának 1980-ra kb. 15—16%-a elhalt). A fák fokozódó elhalása valószínűleg az erdő „öregebbé” válásával együtt járó kompetíciós okok miatti „felritkulás” lehet. A megmaradó fáknál egyedenként mérhető az évi produkció lassú növekedése, de hektárviszonylatban jelenleg nem lehet a fás növények produkció-növekedését kimutatni. Így nem látszik reálisnak az, hogy az erdő gyarapodó fitomasszája tárolná az ökoszisztémába bekerülő N-többletet, sőt az elhalt, földre került fák fitomasszájának bomlása még további N-növelő hatást is jelenthet.

A nitrogén gyarapodás helye tehát csak a humuszos felső talajszint lehet. Bizonyítani látszik ezt az, hogy az erdő lágyszárú növényzetében az utóbbi években megjelentek és erősen szaporodnak az ún. „nitrofiták” növényfajok (*Geranium robertianum*, *Galeopsis pubescens*, *Galium aparine*, *Impatiens parviflora*, *Lapsana communis* stb.). A nagy vitalitású nitrofiták-lágyszárúak az erdő természetes lágyszárú növényzetének stabilitásmegbontását okozhatják, ami az eredeti génkészlet csökkenésével járó folyamatot fog eredményezni.

A mezőgazdasági műtrágyázás ugrásszerű felgyorsulásának, ill. az ipari eredetű N-levegőszennyeződés növekedésének kedvezőtlen hatásából tehát még a „zavarástól mentes” természetközeli állapotban levő ökoszisztémák sem tudnak mentesülni.

5.3. Új gondolatok a légköri CO₂ dúsulási folyamathoz

A világ ökológusait foglalkoztató gondok között kitüntetett helye van az atmoszféra széndioxid növekedésével bekövetkező bioszféraváltozások előrejelzésének. Az utóbbi 20 évben könyvtárnyi publikáció foglalkozik a széndioxid-problémával. 1979-ben a Scientific Committee on Problem of the Environment/International Council of Scientific Unions (BOLIN et al. 1979), valamint a The National Research Council, Climate Research Board (Nat. Acad. of. Sc., Washington) tekintette át a felgyülemlett ismeretanyagot, 1980-ban — többek között — az Experimentia-folyóiratban jelent meg interdiszciplináris tanulmány a CO₂-probléma legújabb értékeléséről (BACH et al. 1980).

A tanulmányok egybehangzóan jelzik, hogy az ipari forradalmak óta megindult atmoszferikus CO₂-koncentráció növekedés napjainkban kezd ex-

ponenciálisan emelkedő mértéket ölteni s ez a növekedési ütem 2000-ig előreláthatóan már nem lesz megállítható. A fosszilis tüzelőanyagok (kőszén, kőolaj, földgáz stb.) fokozódó égetéséből, a világ hatalmas — főleg trópusi — erdőterületeinek gyors ütemű megsemmisítéséből, valamint a humusznak az agrotechnika és erózió által történő fokozódó megbontásából évente a számítások és becslések átlagában 8–9 Gt szén kerül az atmoszférába. Ez az atmoszféra széndioxid-koncentrációjának évi 4–5 ppm-el való növekedését jelentené. A levegő CO₂-koncentrációjának ilyen ütemű növekedése számos, komplexen jelentkező globális hatás okozója lenne, így pl. a világ légkörének felmelegedése és csapadékosabbá válása („üvegházklíma”), a sarki jégtakaró gyors olvadása és az óceánok jelentős mértékű vízszintemelkedése, a hirtelen megváltozott ökológiai viszonyokhoz nehezebben alkalmazkodni tudó élőlények tömeges pusztulása stb.

Ugyanakkor azonban a Föld számos pontján folyamatosan működő műszeres mérőállomások (Hawaii, Északi-sark, Szamoa, Alaszka, Skandinávia stb.) egybevágóan a számítotttnál sokkal kisebb mértékű — bár szintén exponenciális tendenciájú — atmoszferikus CO₂-gyarapodást regisztráltak (kb. 1,5 ppm év⁻¹). A számított és mért szén különbségének hollétéről (mennyisége 4–5 Gt év⁻¹) számos hipotézis született, a valóság az, hogy ez az *eltűnt szén* („lost carbon”) *egyike a bioszféra máig is megoldatlan legnagyobb kérdéseinek* (BOLIN 1970, OLSON 1970, BAES et al. 1976, WOODWELL et al. 1978, STUIVER 1978, SIEGENTHALTER—OESCHGER 1978, BACH et al. 1980. stb.).

Az „eltűnt” szén elnyelő helyei között első helyen említik az óceánok C-felvevő kapacitásának növekedését. Ma azonban ez még nem bizonyított kellőképpen és miután a szárazföldi biota (biomassza) sem építi be, ill. nyeli el a számítások szerinti CO₂-többletet, általános az a vélemény, hogy a felesleget valamilyen még ismeretlen nyelőnek vagy elnyelőknak kell kiegyensúlyozni (lásd idézett cikkek).

Nem kívánunk e helyen a széndioxid-probléma bonyolult kérdéseibe mélyebben belemerülni, úgy véljük azonban, hogy egy eddig kellően figyelemre nem méltatott jelenséget tudunk felvetni, amely hozzájárulhat az atmoszferikus CO₂-többlet forráselnyelési problémájának megismeréséhez.

Az 5.1. fejezetben, a talajsavanyodás problémakörénél már vázoltuk azt a folyamatot, hogy elsősorban napjaink megnövekedett műtrágyázásának és a kemikáliák fokozott használatának, valamint a növekvő levegőszennyeződésnek hatására felgyorsult a Ca és Mg ionok mélyebb talajrétegekbe mosódása és ott a kis- és nagy-cirkulációs folyamatokból való kikerülése, stagnálóvá válása. E folyamat világszerte ismert, mégsem fordult kellő figyelem eddig arra, hogy a talajba mosódó Ca- és Mg-ionokkal igen nagy mennyiségű szénatom is kivonódik a cirkulációs folyamatokból. Ezek a C-atomok végső soron a légkör CO₂-készletéből jutnak az ökoszisztémák talajfelszíni részeibe, ahol a mikroorganizmusok hatására feldúsulnak és különböző ioncserélődési folya-

matok révén kapcsolódhatnak a Ca- és Mg-ionokhoz. A lefelé áramlás többnyire hidrokarbonát formájában történik és vagy a talajvíz (ill. mélyebb vizek) hidrokarbonát tartalmát növelik, vagy a talajkolloidokban stagnálnak, vagy karbonátokká alakulnak vissza. Bár a bikarbonátok karbonátokká való alakulásánál ismét szabadul fel CO_2 , elképzelhető, hogy ezek is fixálódhatnak a szilikátok megbontásában és más talajkémiai folyamatokban.

Ma még nincsenek kellő méréseink a fentiekre, de *felvethető, hogy az atmoszféra hiányzó CO_2 -többletét nemcsak az óceánokban, hanem a szárazföldi talajokban felgyorsuló mészkő-dolomit-stb. képződési formákban is keresni lehet.* Úgy véljük, hogy a vizsgált síkfőkúti erdő-ökoszisztémára kimutatott Ca-, Mg-negatív elemméreleg — ha itt kis dimenziójú is — általánosítható a szárazföldi agrár-ipari és természetes ökoszisztémák nagy részére is, és a fenti hipotézis felvetését indokolja, ill. alátámasztani is látszik azt.

6. Összefoglalás

A magyarországi MAB-programon belül vizsgált lombhullató erdő-ökoszisztéma („Síkfőkút Project”) néhány elemének kis- és nagycirkulációs alakulásait több éves, összekapcsolt elemzésekkel nyomon követve, összességében úgy tűnik, hogy az erdő elemmérelege nem egyértelműen mutatja azt a stabilitást, ami „természetes” állapotú ökoszisztémában várható lett volna. Véleményünk szerint az ökoszisztéma elemmérelegeiben jelentkező olyan jelek, mint a legfontosabb tápelemek (N, P, K, S stb.) pozitív, ill. egyes kationok (Ca, Mg, Na stb.) negatív mérlege — ha kis mértékben és csak tendenciájukban is — végső soron napjaink fokozódó környezetszennyeződésének és a kemikáliák növekvő felhasználásának a bioszféra egyensúlyt megzavaró hatására mutathatnak rá.

IRODALOM

- ANDERSON, J. M.: The breakdown and decomposition of sweet chesnut (*Castanea sativa* Mill.) and beech (*Fagus silvatica* L.) leaf litter in two deciduous woodland soil. II. Changes in the carbon, hydrogen, nitrogen and polyphenol content. — *Oecologia* **12**, 275—288 (1973).
- BACH, W.—BRÖHL, H.—FISCHBACH, U.—GOUDRIAAN, J.—HUMPICKE, U.—KOHLEMAIER, G. H.—KRATZ, G.—LOUWERSE, W.—MARCHETTI, C.—NIEHAUS, F.—OESCHGER, H.—ROTTY, R. M.—SCHÜNCK, W.—SIEGENTHALER, U.—KEULEN, H. van.—LAAR, H. H. van.: The carbon dioxide problem. An interdisciplinary survey. — *Experientia*, **36**, 767—890 (1980).
- BAES, C. F.—GOELLER, H. E.—OLSON, J. S.—ROTTY, R. M.: The global carbondioxid problem. — Publ. Oak Ridge Nat. Lab. Environm. Sc. Div., No. 937, ORNL — 5194, Springfield, Virginia (1976).
- BOLIN, B. The carbon cycle. — *Scient. Amer.* **223**, 125—145 (1970).
- BOLIN, B.—DEGENS, E. T.—KEMPE, S.—KETNER, P. (eds.): SCOPE 13 „The global carbon cycle” — Wiley, New York (1979).
- CARLISLE, A.—BROWN, A. H. F.—WHITE, E. J.: The organic matter and nutrient elements in the precipitation beneath a sessile oak (*Quercus petraea*) canopy. — *J. Ecol.* **54**, 87—98 (1966).

- FELFÖLDY, L.: Biológiai vízminősítés. — Mscr. (1972).
- GILBERT, F. A.: Mineral nutrition and the balance of life. — Univ. Oklahoma Press Norman (1957).
- GOSZ, J. R.—LIKENS, G. E.—BORMANN, F. H. Nutrient release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest, New Hampshire. — *Ecol. Monogr.* **43**, 173—191 (1972).
- JAKUCS, P. (ed.): Ecology of an oak forest in Hungary. — Results of „Síkfőkút Project” I. Structure, primary production and mineral cycling. — Akadémiai Kiadó, Budapest (in press). (1982).
- KÁRÁSZ, I.: Produktívizsgálatok a síkfőkúti cseres-tölgyes erdő cserjeszintjében I. (Shrub layer production investigations in the Quercus petraea—Qu. cerris ecosystem of the Síkfőkút research area I). — *Acta Acad. Paed. Agriensis. N. S.* **15**, 467—477 (1979).
- KLAUSING, O.: Untersuchungen über den Mineralumsatz in Buchenwäldern auf Granit und Diorit. — *Forstwiss. Cbl.* **75**, 18—32 (1956).
- KOVÁCS, M. Stickstoffverhältnisse im Boden des Eichen-Zerreichen-Waldökosystems. — *Oecol. Plant. (Paris)* **13**, 75—82 (1978).
- KOVÁCS, M. Untersuchung des Nährstofftransports in Boden des Eichen-Zerreichenwaldes. — *Acta Bot. Hung.* **26**, 91—99 (1980).
- KOZÁK, M.—MÉSZÁROS, E.: Magyarországi csapadékvizek kémiai összetétele és mezőgazdasági jelentősége. — *Agrokémia és Talajtan* **20**, 329—352 (1971).
- KÜHN, H.—WELLER, H.: 6 jährige Untersuchungen über Schwefelzufuhr durch Niederschläge und Schwefelverluste durch Auswaschung (in Lysimetern). — *Z. Pflanzenernährg. u. Bkde.* **140**, 431—440 (1977).
- LIKENS, G. E.—BORMANN, F. H.: Nutrient cycling in ecosystems. — In Weins, J. A. (ed.): Ecosystem structure and function. Oregon St. Univ. Press Corvallis p. 25—67 (1972).
- LIKENS, G. E.—BORMANN, F. H.—PIERCE, R. S.—EATON, I. S.—JOHNSON, N. M.: Biogeochemistry of a forested ecosystem. — Springer, New York—Heidelberg—Berlin (1977).
- MAYEY, R. Bioelementflüsse im Wurzelraum saurer Waldböden. Messung und Ergebnisse. — *Mitteilgn. Deutsch. Bodenkundl. Gesellsch.* **16**, 136—145 (1972).
- MAYER, R.—ULRICH, B.: Acidity of precipitation as influenced by the filtering of atmospheric sulphur and nitrogen compounds, its role in the element balance and effect on soil water. — *Air and Soil Pollution* **7**, 409—416 (1977).
- MÉSZÁROS, L. I.: Die Elementgehalte der krautigen Vegetation des Quercetum petraeae-cerris-Waldes von Síkfőkút. — *Acta Bot. Hung.* **25**, 89—106 (1979).
- NIHLGARD, B.: Precipitation, its chemical composition and effect on soil water in a beech and a spruce forest in South Sweden. — *Oikos* **21**, 208—217 (1970).
- OLSCHOWY, G.—BÜRGER, K.—ZWISNER, E.—WEBER, D. Auswertung von Untersuchungen und Forschungsergebnissen zur Belastung der Landschaft und ihres Naturhaushaltes — *Schriftenr. f. Landschaftspflege u. Naturschutz* **10**, 1—119 (1974).
- OLSON, J. S.: Carbon cycles and temperate woodlands. — in: Reichle, D. E. (ed.): Analysis of temperate forest ecosystems. Springer, Berlin p. 226—241 (1970).
- PAPP, M.: Fitomassza és produktívizsgálatok a síkfőkúti cseres-tölgyes erdő légyszárú szintjében (Phytomass and production investigations of the herbaceous layer in an oak forest near Síkfőkút in 1974—1975). — *Botanikai Közl.* **67**, (1980).
- PAPP, B. L.: Die Nettoproduktion der Bäume eines Quercetum petraeae-cerris-Waldes auf der Probefläche von Síkfőkút (Nord Ungarns). — *Acta Bot. Hung.* **25**, 111—123 (1979).
- PAPP, M.—JAKUCS, P. Phytozoologische Charakterisierung des Quercetum petraeae-cerris-Waldes des Forschungsgebiets „Síkfőkút Project” und seiner Umgebung. — *Acta Biol. Debrecina* **13**, 109—119 (1976).
- RAMADE, F. Écotoxicologie. — Masson, Paris—New York—Barcelona—Milan (1977).
- RAPP, M. Le cycle biogéochimique du soufre dans un forêt du Quercus ilex L. de sud de la France. — *Oecol. Plant.* **3**, 325—334 (1973).
- SIEGENTHALER, U.—OESCHGER, H. Predicting future atmospheric carbon dioxide levels. — *Science* **199**, 388—395 (1978).
- STEFANOVITS, P. (ed.) Talajvédelem, környezetvédelem. — Mezőgazdasági Kiadó, Budapest (1977).
- STUVIER, M.: Atmospheric carbon dioxide and carbon reservoir changes. — *Science* **199**, 253—258 (1978).
- SZABÓ, M.: Net precipitation in a Hungarian oak forest ecosystem. — *Acta Bot. Hung.* **21**, 151—165 (1975).
- SZABÓ, M.: Nutrient content of throughfall and stemflow water in an oak forest (Quercetum petraeae-cerris) ecosystem. — *Acta Agr. Hung.* **26**, 241—258 (1977).

- SZABÓ, M.—CSORTOS, Cs.: A study of the nutrient content of canopy throughfall in an oak forest (*Quercetum petraeae-cerris*) measured for one year. — *Acta Bot. Hung.* **21**, 419—432 (1975).
- TÓTH, J. A.—PAPP, B. L.—LENKEY, B.: Litter decomposition in an oak forest ecosystem (*Quercetum petraeae-cerris*) of northern Hungary studied in the framework of „Sík-főkút Project”. — In: *Biodegradation et Humification. Rapport du 1^{er} Colloque Internat.* Nancy, p. 41—59 (1974).
- ULRICH, B.: Die Filterfunktion von Böden. — In: STEUBING, L.—KUNZE, G.—JÄGER, J. (eds.): *Belastung und Belastbarkeit von Ökosystemen*, Giessen, p. 169—174 (1972).
- ULRICH, B.—MAYER, R.: Systemanalyse des Bioelement-Haushaltes von Wald-Ökosystemen. In: Ellenberg, H. (ed.): *Ökosystemforschung*, Springer, Berlin—Heidelberg—New York p. 165—174 (1973).
- ULRICH, B.—MAYER, R.—KHANNA, P. K.—PRENZEL, J.: Ausfilterung von Schwefelverbindungen aus der Luft durch einen Buchenbestand. — *Z. Pflanzenernährg. Bkde.* **141**, 329—335 (1978).
- VARJÚ, M.: A növényi anyagok hamvasztásának néhány módszertani kérdése. — *Agrokémia és Talajtan* **21**, 139—150 (1972).
- VIRÁGH, K.: Wachstumsanalyse der Sonnen- und Schattenblätter von *Quercus cerris* und *Quercus petraea* (1973—1975). — *Acta Bot. Hung.* **25**, 143—164 (1979).
- WOODWELL, G. M.—WHITTAKER, R. H.—REINERS, W. A.—LIKENS, G. E.—DELWICHE, C. C.—BOTKIN, D. E.: The biota and the world carbon budget. — *Science* **199**, 141—146 (1978).