

<sup>1</sup> Pannon Egyetem, Környezettudományi Intézet

<sup>2</sup> MTA-PE Levegőkémiai Kutatócsoport

<sup>3</sup> Pannon Egyetem, Környezettudományi Intézet

## Apadó foszfátkészletek – az intenzív élelmiszertermelés alkonya?

*A 20. században az emberi népesség robbanásszerű növekedését az úgynevezett zöld forradalom alapozta meg, ami egyebek között a foszfáttartalmú műtrágyák iparszerű és gyorsan növekvő mértékű felhasználásán alapul. A foszfor, mint valamennyi élő szervezet számára nélkülözhetetlen kémiai elem (úgynevezett esszenciális elem), a Földön ugyan nem túl ritka, de foszfort az ipari mértékű felhasználáshoz szükséges koncentrált formában tartalmazó foszfátkőzet-készletek végesek. A környezeti problémák között az emberiség főleg a foszfáttartalmú műtrágyák túlzott használatából származó hatásokat (például az eutrofizációt) ismeri, ami éppenséggel azt a nézetet erősíti a köztudatban, hogy a foszforból túl sok van a környezetben. A foszfor túlzott felhasználása tény, ennek azonban van egy másik, jóval kevésbé ismert, kritikusa oldala is. E tanulmányban a foszfátkészletek kimerüléséből adódó kockázatokra hívjuk fel a figyelmet, ami az emberiség élelmiszerellátását és így létét is fenyegető, akár már ebben az évszázadban is súlyos ellátási zavarokat eredményező nyersanyaghiányt okozhat. Ennek elhárítására e globális környezeti probléma felismerésére, tudatosítására a társadalom minden szintjén aktív cselekvésre lenne mielőbb szükség.*

### A foszfor mint az élet nélkülözhetetlen eleme

**A** foszfor valamennyi élő szervezet számára nélkülözhetetlen kémiai elem, az emberi szervezetben a kalcium után a legnagyobb mennyiségben fordul elő. Egy átlagos felnőtt szervezete körülbelül 700 g foszfort tartalmaz, aminek túlnyomó része (több, mint 85 százalék) a csontokban és a fogakban található apatit formájában. Egyetlen élő sejt sem nélkülözheti a foszfort, hiszen a sejtmembránt foszfolipidek alkotják, az energiaszállítás pedig a sejtekben adenzin-trifoszfát (ATP) molekulák segítségével valósul meg. Sem a fehérje-, sem a szénhidrát-polimerek nem állnak össze foszfor nélkül. Foszfodiészter-kötések révén kapcsolódnak össze a mononukleotid egységek, létrehozva ezzel a DNS és az RNS hosszú láncait, melyek tárolják és másolják a genetikai információt. Állati szervezetekben a foszfor nélkülözhetetlen az izomösszehúzódáshoz, ingerületátvitelhez, és még számos más létfontosságú folyamatban vesz részt. Növények esetében a foszfor a növekedés, gyökérfejlődés és a generatív fejlődés (magképződés, termés kialakulása) energiaszükségletét biztosítja. Nélkülözhetetlensége ellenére hiánya

a szervezetben mégis igen ritka, aminek az az oka, hogy számos élelmiszer nagy mennyiségben tartalmazza. Különösen jelentős a nagy fehérjetartalmú ételek foszfortartalma: a húsok, a halak, a tojás és a tejtermékek a leggazdagabbak foszforban. De nagy mennyiségben jelen van számos más élelmiszerben is, például a gabonafélékben, és egyre több késztermékhez is hozzáadják. Normális esetben a napi étkezésünk bőven fedezi a szükségletet ( felnőtteknek napi 700 mg, kamaszoknak és terhes, illetve szoptató anyáknak 1250 mg, gyermekeknek 500 mg).

### A foszfor előfordulása és körforgása

A foszfor mint kémiai elem nem túl ritka a Földön, a litoszférában a 11. helyet foglalja el (1180 ppm). A szárazföldi biomassza nagy részét kitevő fák építőköveiből, a cellulózból, hemicellulózból és ligninből hiányzik, így átlagos gyakorisága a biomasszában 0,025 százalék (Smil, 2000). A talajban lévő foszfor természetes úton a kalcium-foszfát tartalmú ásványok fizikai és kémiai mállásából származik, elsősorban a fluorapatitból ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ). Évente körülbelül 13 millió tonna foszfor válik ily módon hozzáférhetővé a talajban (Emsley, 2000). A talajból a foszfor a talajszemcsékhez kötött formában erózió útján csapadékkal nagyrészt kimosódik a környező folyóvizekbe, ahonnan végül a tengerekbe és az óceánokba kerül, ahol oldhatatlan kalcium-foszfát tartalmú üledék formájában halmozódik fel. Az óceáni aljzatban később nagy nyomáson üledékes kőzeté formálódik (Föllmi, 1996). A foszfortartalmú kőzet a lemeztektonikai mozgásoknak köszönhetően 10–100 millió év alatt lassan kiemelkedik az óceánokból, új szárazföldet képezve, ami a mállás révén zárja a globális ciklust (Schlesinger, 1991).

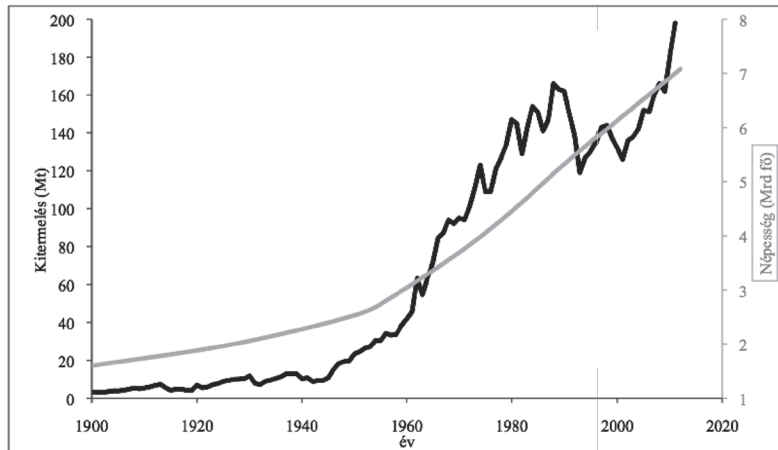
A talajba került és ott mobilizálható foszfor a talajból a gyökérszinten keresztül a növényekbe, majd a táplálékláncon keresztül az állatok (és az emberek) szervezetébe kerül, ahonnan a vizelettel és ürülékkel távozik, illetve az élő szervezetek pusztulása után a bomlási folyamatok révén ismét a talajba jut. Hasonlóképpen a foszfor a folyókban, tavakban és az óceánokban élő szervezetek között a tápláléklánc mentén néhány hét leforgása alatt megfordul. E két ciklusban részt vevő foszfor mennyisége a nitrogén, a fény, illetve a víz mellett a legfontosabb meghatározó tényezője az élő szervezetek biomassza-termelésének (Liu és mtsai, 2008).

A foszfor globális körforgása (úgynevezett biogeokémiai ciklusa) a Földön egyike a leglassabb körfolyamatoknak a biogén elemek között. Ennek oka, hogy a foszfátvegyületek vízben igen rosszul oldódnak, és a szén, nitrogén vagy kén esetétől eltérően a foszfor körforgásában a légköri folyamatok gyakorlatilag alig vesznek részt. Az utóbbi elemek esetében, amelyek körforgásában a légkör sokkal nagyobb szerephez jut, az emberi tevékenység hatása gyorsabban észlelhető globális szinten (például a  $\text{CO}_2$  és  $\text{N}_2\text{O}$  növekvő koncentrációjában). A foszforral kapcsolatban közvetlenül észlelhető környezeti problémák inkább regionálisak (például az eutrofizáció), ezért napjainkig a foszforkészletek kimerüléséhez köthető globális környezeti problémák viszonylag kevés tudományos, és még kevesebb médiafigyelmet kaptak. A foszforral összefüggő globális probléma nem szerepel a legismertebb és a média figyelmét is felkeltő globális környezeti kihívások között annak ellenére, hogy a foszforhoz (pontosabban annak hiányához) kötődik az emberiség jövőjét érintő legsúlyosabb fenyegetés (Smil, 2000).

### Az emberi tevékenység hatása a foszfor körforgására

Az emberiség a foszfor fent leírt természetes és lényegében egyensúlyi körforgásába drámai módon avatkozott be a második világháborút követően. Ekkor kezdődött meg a fosz-

fáttartalmú kőzetek nagymértékű ipari kitermelése, amely 2010-ben 178 millió, 2011-ben pedig már 191 millió tonna foszfort szabadított fel a kőzetekből (Rhodes, 2013) (1. ábra).



1. ábra. A világ foszfátkőzet-kitermelésének (fekete vonal,  $P_2O_5$  egyenértékben), illetve népességszámának (szürke vonal) alakulása napjainkig.

Emlékezzünk rá, hogy a természetes mállással évente csak mintegy 13 millió tonna „új” foszfor válik felvehetővé a talajban, amihez képest hatalmas és egyre növekvő mennyiségről van szó. A kitermelt mennyiség 80 százalékát a műtrágyagyártás használja fel, kisebb részben az acél-, műanyag- és félvezetőgyártás, valamint a vegyipar (növényvédőszer, vízlágyítók) és az élelmiszeripar. A felhasználás növekedése a világ élelmiszertermelésének növekedésével arányos. A talajok jellemző foszfortartalma hektáronként 500 és 2500 kg közötti, legnagyobb része azonban a növények számára nem hozzáférhető oldhatatlan formában van jelen. Ennél fogva a világ – egyébként gyorsan pusztuló – termőtalajainak jelentős része foszfáthiányos, ezeken a területeken intenzív mezőgazdasági tevékenység

nem folytatható számottevő mennyiségű foszfáttartalmú műtrágya folyamatos kijuttatása nélkül (2. ábra), már csak azért sem, mert az intenzív művelésbe vont termőtalajok évente mintegy 100 kg foszfort veszítenek.

Az élelmiszertermelés során a foszfor hasznosulásának mértéke csekély, a felhasznált műtrágyával kijuttatott foszfor kevesebb, mint 20 százaléka kerül a megtermelt élelmiszerekbe. Tekintettel arra, hogy az intenzív nagyüzemi mezőgazdasági művelés során megtermelt növényeket a



2. ábra. A műtrágyázás, illetve annak hiányának hatását demonstráló kísérleti parcellák (bal oldali tábla: tápanyag hozzáadás nélkül; jobb oldali tábla: foszfát és mésztápanyag hozzáadás mellett) (Forrás: Wikipedia)

területről közvetlen fogyasztás vagy feldolgozás céljából elszállítják, a bennük felhalmozódó foszfor sem kerül vissza a talajba, hanem a kibocsátott szennyvízben felhígul és a felszíni vizekbe kerül, ahol egy kritikus terhelési szint fölött az algák tömeges elszaporodásával járó jelenséget okozhat. A folyók által a tengerbe szállított foszfor mennyiségét évente 10–20 (Beusen és mtsai, 2005; Meybeck, 1982) millió tonnára becsülik. A problémát tovább súlyosbítja, hogy egy tanulmány szerint a világon évente megtermelt mintegy 4 milliárd tonna élelmiszerből 2 milliárd (!) tonna a hulladékba kerül. A mértéktelen hulladéktermelés következtében még több foszfor kerül ki a körforgásból és halmozódik fel a lerakókban. Az alapvető különbség az így keletkező foszfortartalmú üledékek és hulladékok, valamint a foszfáttartalmú kőzetek között az, hogy míg az utóbbiak jellemző foszfortartalma 13–15 tömegszázalék, addig az üledékekben legfeljebb csak ennek ezredrésze, aminek újbóli kinyeréséhez óriási energia- és technológiai befektetés lenne szükséges.

### A világ foszforkészletei és -felhasználása

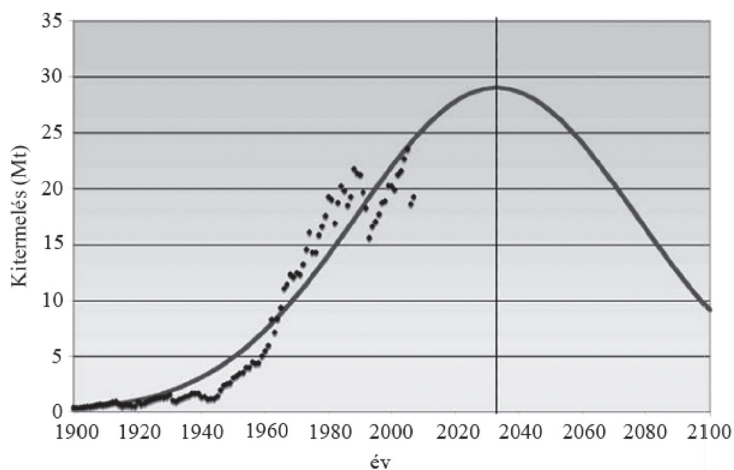
A foszfor pótolhatatlanságát, a kitermelés tempóját és az intenzív mezőgazdaság növekvő foszfátigényét figyelembe véve több, mint aggasztó, hogy az emberiség példátlanul gyors ütemben meríti ki a rendelkezésre álló „koncentrált” foszfátkészleteket. A Föld teljes foszfátkőzet-készleteit 2010-ben még mindössze 16 milliárd tonnára becsülték, majd 2011 januárjában az USA Geológiai Szolgálat a becsült értéket váratlanul 65 milliárd, majd 71 milliárd tonnára emelte. Koncentrált lelőhelyek azonban csak néhány helyen fordulnak elő a Földön. Az összes ismert készlet túlnyomó része mindössze öt országban található, a legnagyobb telep Nyugat-Szahara és Marokkó (77 százalék), ezt követi Kína, Jordánia, Dél-Afrika és az USA. A jelenleg kitermelt foszfátkőzet 67 százaléka három országból származik: Kína (35 százalék), USA (17 százalék), és Nyugat-Szahara (Marokkó) (15 százalék) (Soil Association, 2010\*). Az előrejelzések szerint 2100-ban Marokkó az akkor még rendelkezésre álló foszfátkészlet 90 százalékát fogja birtokolni, ami komoly geopolitikai kockázatot jelent. A becsült készlet – közzgazdászok többsége által elfogadott számítási módszert alkalmazva – a jelenlegi kitermelési ütemmel számolva még 370 évre lenne elegendő. Eltekintve attól a nem mellékes etikai problémától, hogy mit (nem) hagyunk majd örökül az akkor élő leszármazottainknak, ez a számítási mód túlzott optimizmust sugall. Az egyik, hogy a világ népességének további gyarapodása – az előrejelzések szerint 2050-re 9 milliárd ember él majd a Földön – miatt megnövekedni fog. Egyszerűen kiszámítható, hogy a kitermelés évenkénti mindössze 1 százalékos növekedése esetén a „teljes” kimerülés ideje 156 évre rövidülne, évi 3 százalékos növekedés esetén pedig már csak 85 év lenne. Ne felejtjük el, hogy a foszfátkitermelés 2010 és 2011 között több, mint 7 százalékkal nőtt! Allen Bartlet szállóigévé vált klaszszikus mondása kíváncsok ide: „Az emberiség legnagyobb fogyatékosága, hogy nem fogja fel az exponenciális függvény természetét.” De a helyzet valójában még ennél is sokkal aggasztóbb.

Az egyszerűsített számítási módszer ugyanis nem veszi figyelembe a nem megújuló nyersanyagkészletek kimerülésének időbeli menetét. M. King Hubbert, a Shell Olaj Kutatólaboratórium geofizikusa 1956-ban megalkotta az olajkitermelés-csúcs elméletét, aminek lényege, hogy kezdetben a könnyen hozzáférhető készletek kiaknázásával a kitermelés eleinte gyorsan növekszik, majd ezen források kimerülésével az újabb, rosszabb minőségű, nehezen hozzáférhető további készletek kitermelése már csak egyre

\* <http://www.soilassociation.org/LinkClick.aspx?fileticket=eeGPQJORrkw%3d&tabid=1326;> 2013.01.08-i megtekintés.

növekvő fajlagos energia- és erőforrás befektetéssel lehetséges, egyre lassuló ütemben. A kőolaj esetében az 1930-as évek előtt kitermelt könnyűolaj energiahatékonysági rátája (az előállított késztermék energiataralma a kitermelés, szállítás és feldolgozás összes energiaszükségletéhez viszonyítva) még 100 körül volt, jelenleg az Északi-tengeri olaj esetében ez az érték már csak 10–20, a jövő energiahordozójának kikiáltott olajhomok esetében pedig már csak 3! Mindeközben a nyersanyag iránti igény egyre növekszik, mígnem eljön az az idő, amikor a kitermelés üteme már nem lesz képes a felhasználási igényeket kielégíteni, függetlenül attól, hogy még jelentős potenciális készletek állnak rendelkezésre. Ez az úgynevezett (olaj)csúcs, ami után a kitermelés üteme már elkerülhetetlenül csökken és egyre növekvő mértékű hiányt okoz.

A GPRI (Global Phosphorus Research Initiative) nemzetközi kutatócsoportokból álló szervezet, amely a jövőbeli ételmiszer-előállításához szükséges globális foszfor ellátás biztonság kérdéseinek komplex kutatását koordinálja. A szervezet még a 2010 előtti készletbecslésekre alapozva a foszforkitermelés csúcsát 2033-ra jósolta (3. ábra).



3. ábra. A foszfátkészletek kitermelési üteme (pontosor), valamint a Hubbert-féle kitermelés csúcs modelljével illesztett és előrejelzett kitermelés üteme (folytonos fekete vonal) ( $\text{Mt P}_2\text{O}_5/\text{év}$  egységben), 18 milliárd tonna összes kitermelhető készletet feltételezve (Cordell és mtsai, 2009).

A jelenlegi, lényegesen nagyobb feltételezett készleteket alapul véve a csúcs még továbbra is ebben az évszázadban eljön (2070 körül). Mindenesetre tény, hogy a kiváló minőségű foszfátlelőhelyek (mint például a Nauru szigeti guanótelepek) már lényegében kimerültek, a rendelkezésre álló foszfátérc átlagos foszfortartalma az 1970-es évekbeli 15 százalékról 1996-ra 13 százalék alá csökkent. Ez nem tűnik nagymértékű csökkenésnek, ugyanakkor azt jelzi, hogy a könnyen hozzáférhető, nagy foszfortartalmú, mintegy 9 milliárd tonnára becsülhető kiváló minőségű foszfátkészletek már kimerülőfélben vannak, és fennmaradó lényegesen nagyobb készletek már jóval gyengébb minőségűek és egyre nehezebben termelhetők ki. A foszfortartalom csökkenésével ugyanis exponenciálisan nő a kitermeléshez és feldolgozáshoz szükséges energia mennyisége és az infrastruktúra költsége. A foszforcsúcs elérésekor a kitermelés visszaesik, emelkednek az árak és elkerülhetetlenül nő a nemzetközi feszültség (Campbell, 1997). Ilyesmire – igaz, vélhetően spekulációs okokból – már akadt példa: 2008-ban, a gazdasági válság kirobbanásakor a foszfor világpiaci ára kevesebb, mint 14 hónap leforgása alatt 700 százalékkal növeke-



dett (50 \$/tonnáról 400 \$/tonnára), minek következtében a világ 40 országában éhséglá-  
zadások törtek ki (Lewis, 2008\*). Az áremelkedésben szerepet játszhatott a kőolaj árának  
emelkedésével előtérbe kerülő bioüzemanyag-termelés megnövekedett műtrágyaigénye  
is (Soil Association, 2010).

Egyértelmű, hogy a foszfátközetek kitermelése hasonló lefutású görbét fog követni,  
mint a kőolajé és más nem megújuló nyersanyagoké. A legfontosabb különbség azonban  
a kőolaj és foszfor között az, hogy míg a kőolaj (részben) helyettesíthető más energiahor-  
dozókkal (megújuló – vagy inkább alternatív – energiaforrások, atomenergia stb.), illetve  
a belőle készült termékek (tűzelőanyagok, kenőolajok, műanyagok) vegyipari eljárá-  
sokkal más energiahordozókból (kőszén, földgáz) is előállíthatók, addig a foszfor földi  
körülmények között nem szintetizálható. A foszfor pedig, mint esszenciális kémiai elem,  
egyetlen élő sejt számára sem nélkülözhető, és nem helyettesíthető (Cordell és mtsai,  
2009). Ha nem áll rendelkezésre a mezőgazdasági termelés számára szükséges formában  
és elegendő mennyiségben, akkor annak egyenes következménye a csökkenő termésaho-  
zam, korábban soha nem látott mértékű élelmiszerhiány és tömeges éhínség. A globális  
környezeti problémák között a média mélyen hallgat a foszfátkészletek kimerülésének  
lehetőségéről és annak várható következményeiről, pedig vélhetően ez lesz a nem túl  
távoli jövőben – nem kizárt, hogy még ebben az évszázadban – az emberiséget fenyegető  
legnagyobb katasztrófa. Annak ellenére, hogy foszfátkészletek kimerülésének lehetősége  
a globális környezeti problémák között méltatlanul kevés figyelmet kap, egyes országok  
kormányai korántsem maradnak tétlenek. Az Egyesült Államok 2004-ben beszüntette a  
foszfor exportját, Kína 2008 óta 135 százalékos vámot vet ki az exportált foszforra. Saj-  
nos Európának egyáltalán nincsenek foszfátkészletei, így teljes mértékben kiszolgáltatott  
az importnak. A nyilvánvaló kiszolgáltatottság ellenére – más környezeti problémákkal  
ellentétben – nincsenek kormányzati szintű tárgyalások, és nem születnek nemzetközi  
egyezmények a foszforellátás biztonságának kérdésében.

### Remények és lehetőségek

A fosszilis energiahordozókkal ellentétben, amelyek felhasználásuk során megsemmi-  
sülnek, a foszfor mint kémiai elem, megőrződik, és – legalábbis elméletben – újra kon-  
centrálható és felhasználható. Ennek ellenére jelenleg a modern társadalmak rendkívül  
pazarlóan bánnak a Föld véges koncentrált foszfátkészleteivel. A mezőgazdaságban fel-  
használt foszfor jelentős hányada a talajerózióval és a csapadékvízzel együtt szétoszlik  
a környezetben; az élelmiszerekben található foszfor a szennyvízben vagy hulladéklera-  
kókban végzi, jelenleg a visszanyert mennyiség aránya minimális. Radikális szemlélet-  
váltásra lenne szükség ahhoz, hogy a kijutatott foszforral felelősen bánjunk, hogy a jövő  
generációk élelmiszerellátása biztonságosan megoldható legyen.

### Néhány lehetőség a foszfátfelhasználás és -vesztés csökkentésére (a teljesség igénye nélkül)

Az 1950-es és 1980-as évek között a mezőgazdasági talajok többségét szükségtelenül  
túltrágyázták, a mezőgazdasági talajok tápanyagellátásának további mérséklésében  
jelentős technológiai fejlesztési lehetőségek vannak.

\* [http://business.timesonline.co.uk/tol/business/industry\\_sectors/natural\\_resources/article4193017.ece](http://business.timesonline.co.uk/tol/business/industry_sectors/natural_resources/article4193017.ece);  
letöltve: 2008. 06. 23.

A növénynemesítés révén olyan haszonnövények nemesíthetők, amelyek gyökérzetük révén hatékonyabban képesek a talajból a foszfor felvételére.

A mezőgazdasági területekről a talajlefordítás megfelelő művelési technikákkal, illetve üledékcspadással jelentős mértékben mérsékelhető, a lehordott talaj a táblák szélére telepített növényzettel csapdázható. A talajok foszforvesztése ezáltal akár 37–89 százalékkal is csökkenthető.

Az élelmiszer-előállítás, -feldolgozás, -kereskedelem területén a hulladékképződés minimálisan 30–40 százalékkal is csökkenthető. Ezt a folyamatot egyebek között a feldolgozóipar technológiai fejlesztésével lehetne megvalósítani.

A kommunális szennyvízbe csak az Európai Unióban naponta több, mint 2000 tonna foszfor kerül. Megfelelő többlépcsős szennyvíztisztító technológiák alkalmazásával ennek 70–90 százaléka a szennyvízzel leválasztható, ami megfelelő kezelést követően a termőföldekre juttatható, feltéve, ha a közegészségügyi és a toxikus anyagok feloldulásából adódó problémák kiküszöbölhetők.

Egy átlagos felnőtt a vizelettel évente 0,75 kg foszfort ürít. Ez a foszformennyiség 250 kg szemes termés megtermeléséhez lenne elegendő, mégis, a fejlett országokban jelenleg jelentősen felhígítva a szennyvízbe kerül. A vizelet elkülönített és hígítás nélküli gyűjtésével, majd kezelés utáni felhasználásával a foszfor a talajokba visszajuttatható.

Fenti megoldások széles körben történő alkalmazásához a foszforfelhasználás csökkentésében megnyilvánuló hatékonyságuk ellenére számos nehézséget kell leküzdeni és jelentős beruházásokat kell végrehajtani, mégpedig úgy, hogy visszanyert foszfor előállításának költsége messze meghaladja a foszfátműtrágyák piaci árát. Ezen költségigényes eljárások mellett léteznek olyan költségtakarékos megoldások is, amelyekkel legalábbis helyi szinten mérsékelhető a foszfát műtrágya alkalmazása.

Egyrészt: az organikus gazdálkodás során istállótrágya, mezőgazdasági melléktermékek és zöld hulladékok trágyaként történő felhasználásával a természeti körforgáshoz hasonlóan foszfor juttatható vissza a termőtalajba. A módszer alkalmazása ráadásul serkenti a talajlakó mikroorganizmusok működését, amelyek közvetítésével a talajban található oldhatatlan foszforvegyületek a növények számára felvehető formává alakulnak át. Az organikus gazdálkodásban foszforpótlásra csak természetes foszfáttartalmú kőzetörlemény használható (a szuperfoszfát használata nem megengedett), amelynek alkalmazása 5–7 évenként egyszer elegendő.

Másrészt a táplálkozási szokások változtatása is egyszerű, ámde kevesek által követett módszer: a vegetáriánus étrend biztosítása évente személyenként 0,6 kg foszfort igényel, míg a húst is tartalmazó étrendhez 1,6 kg foszforra van szükség.

Sajnos a foszfátkészletek kimerülése mellett az élelmiszertermelést a termőtalaj, víz és az energiahordozók (elsősorban a kőolaj) rendelkezésre állása is kritikusan befolyásolja. E tényezők kölcsönhatása miatt vélelmezhetően sokkal hamarabb lépnek majd fel súlyos élelmiszerellátási zavarok, amint az az egyes erőforrások korlátaiból önmagában következne. Az energiatermelési célú mezőgazdasági tevékenység további bővülése is komoly kockázatot jelent a jövő élelmezésbiztonsága szempontjából, nem utolsósorban a foszfátkészletek véges voltából adódóan.

### Záró gondolatok

A foszfor mint az élő szervezetek számára nélkülözhetetlen esszenciális elem körforgásával kapcsolatban elsősorban a felszíni vizek eutrofizálódásával foglalkozik a tudomány, és a tájékozottabb közvélemény is legfeljebb a foszfátműtrágyák túlzott alkalmazásának regionális, helyenként súlyos következményekkel járó hatásait ismeri. A koncentrált foszfátkészletek kimerüléséről, illetve a foszfátkitermelés és -ellátás már akár néhány

évtized múlva várható súlyos zavarairól a médiában, de a tudományban is meglepően kevés szó esik. Mindez több, mint furcsa annak tükrében, hogy az intenzív mezőgazdasági termelés fenntartásához és az emberiség élelmiszertermeléséhez „nélkülözhetetlen és pótolhatatlan elem” szükséges mennyiségben történő biztosításának nincs más ismert alternatívája. Fontos lenne, hogy a foszfor biológiai jelentőségével és forrásainak végeségével tisztában legyünk, és törekedjünk e kritikus elem felhasználásának csökkentésére, megőrzésére és visszanyerésére. Ha ez nem történik meg, az emberiség aligha kerülheti el Thomas Malthus népesedésre vonatkozó jóslatának beteljesülését.

### Köszönetnyilvánítás

A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú *Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program* című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

### Irodalomjegyzék

- Beusen, A. H. W., Dekkers, A. L. M., Bouwman, A. F., Ludwig, W. és Harrison, J. (2005): Estimation of global river transport of sediments and associated particulate C, N, and P. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**. 4. sz. doi:10.1029/2005GB002453.
- Campbell, C. J. (1997): Better understanding urged for rapidly depleting reserves. *Oil & Gas Journal*, **95**. 14. sz. 51–54.
- Cordell, D., Drangert, J. O. és White, S. (2009): The Story of Phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, **19**. 2. sz. 292–305.
- Föllmi, K. B. (1996): The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits. *Earth Science Reviews*, **40**. sz. 1–2. sz. 55–124.
- Emsley, J. (2000): *The Shocking History of Phosphorus: A Biography of the Devil's Element*. Pan Macmillan Limited, London.
- Lewis, L. (2008): *Scientists warn of lack of vital phosphorus as biofuels raise demand*. The Times.
- Liu, Y., Villalba, G., Ayres, R. U. és Schroder, H. (2008): Global Phosphorus flows and Environmental Impacts from a Consumption Perspective. *Journal of Industrial Ecology*, **12**. 2. sz. 229–247.
- Meybeck, M. (1982): Carbon, nitrogen and phosphorous transport by world rivers. *Am. J. Sci.*, **282**. sz. 401–450.
- Schlesinger, W. H. (1991): An analysis of global change. In: Schlesinger, W. H. (szerk.): *Biogeochemistry*. Academic Press, San Diego.
- Soil Association (2010): *A rock and a hard place. Peak phosphorus and the threat to our food security*. Soil Association.
- Smil, V. (2000): Phosphorus in the Environment: Natural Flows and Human Interferences. *Annu. Rev. Energy Environ.*, **25**. sz. 53–58.
- Rhodes, C. J. (2013): Peak phosphorus – peak food? The need to close the phosphorus cycle. *Science Progress*, **96**. 2. sz. 109–152.