

SZEMLE

A nyersfoszfát, mint közvetlen P-trágya alkalmazásának feltételei és agronómiai hatása

Feljegyzések szerint a csontlisztet a kínaiak már 2000 évvel ezelőtt használták foszfortrágyaként. Európában a 18. század végén az angolok, majd a 19. század elejétől a németek alkalmazták savanyú talajokon jó eredménnyel. Liebig munkássága eredményeként az 1840-es évektől a csontliszt a szuperfoszfátgyártás alapanyaga lett.

Az 1840-es években a dél-amerikai guanótelepeken is megindult a kitermelés. A guanóból savas feltárással 9–10 %-os vízoldható P-műtrágyát nyertek. A guanótelepek a 19. század végére nagyrészt kimerültek. 1850-ben Németországban létesült az első olyan szuperfoszfát műtrágyagyár, amely már nem csupán csontlisztet, hanem ásványi nyersfoszfátot is alkalmazott alapanyagként. 1903-ban 3,1 millió t (Mt), 1914-ben 6,8 Mt volt a világ nyersfoszfáttermelése. Ezek az adatok 30 % P_2O_5 -tartalommal számolva 1903-ban 0,93 Mt, 1914-ben 2,04 Mt P_2O_5 -termelést takarnak (DORNER, 1925).

Mára többszörösére növekedett a nyersfoszfátok kitermelése. A világ foszfáttermelésének és készleteinek alakulását 1992-ben az 1. táblázatban követhetjük nyomon.

Észak-Amerikában és Afrikában bányásszák az összes mennyiség mintegy 60 %-át, míg a korábbi Szovjetunió és Ázsia termelése közel azonos (14–16 %). A geológiai tartalékok vonatkozásában szintén 50 % körüli az afrikai részesedés, melyet az észak-

1. táblázat

A világ foszfáttermelése és -készletei régióként 1992-ben,
 P_2O_5 millió tonna (LOUIS, 1993)

Régió	Tényleges termelés		Geológiai tartalék ^a
	P_2O_5 Mt	%	P_2O_5 Mt
Európa	0,20	0,5	69,0
Korábbi Szovjetunió	6,73	15,5	3197,7
Észak-Amerika	14,31	33,0	8089,7
Latin-Amerika	1,24	2,9	1121,7
Afrika	11,11	25,6	17648,5
Közel-Kelet	3,31	7,6	4090,5
Ázsia	6,10	14,1	3378,7
Ausztrália és Óceánia	0,35	0,8	711,7
<i>Világ összesen</i>	<i>43,36^b</i>	<i>100</i>	<i>38307,5</i>

Megjegyzés: a: tényleges foszfátásvány-készlet. b: Fő foszfáttermelő országok: Egyesült Államok (33,0 %), korábbi Szovjetunió (15,5 %), Marokkó (14,0 %), Kína (13,1 %), Tunézia (4,4 %), Jordánia (3,2 %), Izrael (2,7 %), Dél-Afrikai Köztársaság (2,7 %), Brazília (2,3 %), Szenegál (1,9 %), Togo (1,8 %), Szíria (0,9 %), Algéria (0,8 %), többi ország (3,7%)

amerikai követ. A jelenlegi termelés volumenét figyelembe véve, a feltárt geológiai tartalékok csaknem 1000 évig elegendőek (1. táblázat).

A foszfát nyersanyagok termeléséről és kereskedelméről SMANI (1992) ad átfogó értékelést (2. táblázat). Látható, hogy termelésük és különösen kereskedelmük megoszlásában az üledékes foszforitok dominanciája valósul meg.

2. táblázat

A világ nyersfoszfát-termelésének és -kereskedelmének megoszlása 1991-ben (SMANI, 1992)

Foszfát nyersanyag	Világtermelés		Világkereskedelem %
	t	%	
Guanó (Karácsony szigetek, Nauru stb.)	662 500	0,5	2,1
Magmás nyersfoszfát (Kola, Sillinjärvi, Phalabora, Araxa stb.)	25 748 000	17,2	7,4
Üledékes nyersfoszfátok (Marokkó, USA, Tunézia, Jordánia, Szenegál, Togo, Izrael, Irak, Szíria, Algéria stb.)	123 201 200	82,3	90,5

Bár a világ mezőgazdasági művelés alatt álló talajainak mintegy 25 %-a közepesen vagy erősen savanyú, a reaktív, lágy nyersfoszfátok közvetlen alkalmazása csupán az összes P-trágya 2–3 %-át teszi ki. A gazdagabb országokban a módosabb farmerek meg tudják fizetni a koncentrált műtrágyákat, melyeknek nagy távolságra való szállítása gazdaságosabb. Anyagi helyzetük savanyú talajaik rendszeres meszezését is lehetővé teszi. Ez volt a helyzet hazánkban is az 1970-es és 80-as években. Ehhez társult még a meszezés állami támogatása is. Mára azonban Magyarországon gyökeresen megváltozott a helyzet. A műtrágyákat világpiacon szerezhetik be a magyar gazdák, a felvásárlási árak viszont roppant nyomottak.

Az 1960-as évektől, az intenzív P-műtrágyázás időszakában, a hazai P-műtrágyaigény kielégítése a talajok tulajdonságaitól függetlenül mind a meszes, mind a savanyú talajokon nagyrészt az orosz Kola nyersfoszfátból gyártott szuperfoszfáttal történt. A 80-as évek második felében, amikor a folyékony műtrágyázási technológia kezdett elterjedni, kis mennyiségű monoammónium-foszfát (MAP) is felhasználásra került. A hazai közvetlen nyersfoszfát-P felhasználás részaránya az összes trágya-P-on belül elenyésző, 1% alatti volt. A savanyító hatású műtrágyák intenzív használata, valamint kismértékben a savas ülepedés következtében a talajok savasodása felgyorsult a 70-es, 80-as években (BUZÁSNÉ et al., 1986). 1980-ban talajaink 43%-a gyengén savanyú, 13%-a pedig erősen savanyú kémhatású volt (VÁRALLYAY et al., 1980). A magyarországi talajok savasodásra való érzékenységének térképét VÁRALLYAY és munkatársai (1993) készítették el. A 90-es évek elejétől lecsökkent a savanyú talajok termékenységét lényegesen befolyásoló meszezés is.

A 90-es években a talajok savasodása, a meszezés hiánya, a szuperfoszfát árának jelentős növekedése hazánkban és a világ számos részén a nyersfoszfát közvetlen alkalmazási lehetőségének intenzívebb kutatására irányította ismét a figyelmet (BÉSÁNNÉ, 1992; CASANOVA, 1995; NÉMETH et al., 1995; SIKORA & GIORDANO, 1995; ZAPATA & AXMANN, 1995; XIONG et al., 1996; CSATHÓ & NÉMETH, 1997; NÉMETH & OSZTOICS, 1997; OSZTOICS et al., 1997, 2000, 2001).

A lágy, reaktív nyersfoszfátok közvetlen alkalmazását – gazdaságos voltak ellenére – néhány országban, így hazánkban is akadályozzák az érvényben lévő jogszabályok, mivel (a magmás apatitoknál esetenként jelentősen nagyobb Cd-koncentrációjuk miatt) humánegészségügyi szempontból felhasználásukat kockázatosnak tartják. Meg kell jegyezni azonban, hogy még fejlett országokban is (USA, Japán, Franciaország, Németország stb.) bizonyos keretek között, avagy korlátozás nélkül felhasználhatók az üledékes nyersfoszfátok.

A nyersfoszfát, mint közvetlen P-trágya hatását befolyásoló tényezők

A nyersfoszfátot, mint közvetlen P-trágyát elsősorban a savanyú és a mérsékelt savanyú kémhatású talajokon ajánlják. Egy adott talajban a nyersfoszfát P-tartalmának oldódása, feltáródása, a növények számára a felvehetősége, agronómiai hatásossága elsősorban a nyersfoszfát fizikai és kémiai sajátosságaitól, továbbá a talaj tulajdonságaitól, a termesztett növény fajtájától és az éghajlattól függ (KHASAWNEH & DOLL, 1978; HAMMOND et al., 1986; BOLAN et al., 1990; CHIEN & MENON, 1995; RAJAN et al., 1996).

A nyersfoszfát

A nyersfoszfát összetétele

A természetes nyersfoszfátok (foszfát kőzetek) geológiai eredete, ásványi, kémiai összetétele és fizikai tulajdonságai igen különbözőek (LEHR & MCCLELLAN, 1972; HAMMOND et al., 1986).

A nyersfoszfátok – eredetüket tekintve – lehetnek magmásak (Kola-félsziget, Dél-Afrika, Brazília, Kanada), metamorfok (USA, Kanada, India, Finnország) és üledékesek (USA, Észak-Afrika, Nyugat-Afrika, Közel-Kelet, Kína, Ausztrália). A *magmás* eredetű nyersfoszfát makrokristályos, esetleg mikrokristályos, nagyobb fajsúlyú (keményebb), kémiai összetétele a fluorapatithoz hasonló, viszonylag kevés járulékos ásványt és meddő kőzetet tartalmaz, és a növények számára nehezebben felvehető. P_2O_5 -tartalma általában 31–37%. A világ P-termelésének 17%-át ez a készlet adja (2. táblázat). A *metamorf* kőzetek geológiai eredetüket, textúrájukat és ásványi összetételüket tekintve átmenetet képeznek a magmás és az üledékes kőzetek között. Az *üledékes* nyersfoszfát túlnyomórészt mikrokristályos (mely kristályok laza aggregátumokat képeznek nagy fajlagos felülettel), kisebb fajsúlyú (lágyabb) és könnyebben felvehető a növények számára. Az üledékes nyersfoszfát kémiai szempontból karbonát fluorapatit (frankolit), melyhez igen sokféle ásvány és vegyület kapcsolódik. P_2O_5 -tartalma átlagosan 27–33%.

A nyersfoszfátok geológiáját, kialakulását, mállását CATHCART (1980), valamint MCCLELLAN és GREMILLION (1980) munkája foglalja össze.

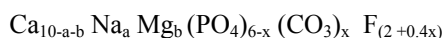
A nyersfoszfátok ásványi összetételük alapján is három csoportra oszthatók. Így megkülönböztetünk Fe-Al-foszfátokat (wavellit, variscit, strengit; Szenegál, Brazília), Ca-Fe-Al-foszfátokat (crandallit és millisit; Florida), és Ca-foszfátokat (az apatitcsoport ásványait) tartalmazó nyersfoszfátokat. Gazdasági szempontból az üledékes apatit-

tartalmú nyersfoszfát a legjelentősebb. Apatittartalmú üledékes nyersfoszfát található Észak-Afrikában, a Közel-Keleten, Ausztráliában és az USA-ban.

Általában a legintenzívebben mállott nyersfoszfátokban Fe-Al-foszfátok, míg a kevésbé mállottakban apatitásványok találhatók (McCLELLAN & GREMILLION, 1980).

Az apatitcsoport ásványainak azonos kristályszerkezetük van. Ezt a szerkezetet a fluorapatit $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2]$ példáján lehet szemléltetni. Az apatit kristályrácsában nagyszámú izomorf helyettesítés mehet végbe, így az apatit kémiai összetétele igen változatos. LEHR és McCLELLAN (1972) nagyszámú apatittartalmú nyersfoszfát vizsgálata alapján megállapították, hogy maga a fluorapatit „tisztán” a nyersfoszfátban ritka, általában valamilyen részlegesen helyettesített formában található. A Ca^{2+} -t többnyire különböző mértékben Mg^{2+} , Na^+ és néha Ba^{2+} , Sr^{2+} , Mn^{2+} , K^+ , U^{4+} , Fe^{2+} , Al^{3+} ; a PO_4^{3-} -t leggyakrabban CO_3^{2-} , kisebb mértékben SO_4^{2-} , SiO_4^{2-} és CrO_4^{2-} helyettesítheti; a F^- -t pedig OH^- és Cl^- . A fluorapatit összetételének, szerkezetének változásával (az izomorf helyettesítéssel) változnak az apatit hexagonális kristályának tengelyei (a , c), és kémiai reaktivitása, oldhatósága (LEHR & McCLELLAN, 1972; LEHR, 1980). A legnagyobb mértékben a $\text{CO}_3^{2-}/\text{PO}_4^{3-}$ csere befolyásolja a kristály szerkezetét, az a tengely hosszát (mely a $\text{CO}_3^{2-}/\text{PO}_4^{3-}$ arány növekedésével csökken), így az apatit fizikai és kémiai stabilitását, reaktivitását, vízdoldhatóságát (CHIEN & BLACK, 1976; CHIEN, 1977; McCLELLAN & GREMILLION, 1980). A maximálisan karbonát-helyettesített frankolit P-tartalma 34% P_2O_5 . Azok a reaktív nyersfoszfátok, amelyek alkalmasak közvetlen P-trágyázásra olyan apatitot tartalmaznak, amelyben ez a helyettesítés jelentős mértékű (LEHR, 1980).

KHASAWNEH és DOLL (1978), valamint LEHR (1980) az üledékes nyersfoszfátokban az apatitot a következő formulával jellemzi:



ahol: $\text{CO}_3^{2-}/\text{PO}_4^{3-} = x/(6-x)$. Az $x/(6-x)$ nem lehet nagyobb, mint 0,3, mivel nagyobb mértékű helyettesítéskor szétszakadna az apatit struktúra.

LEHR és McCLELLAN (1972) tapasztalatai alapján: $a=1,327x/(6-x)$; $b=0,515x/(6-x)$.

A nyersfoszfát P-ásványait főképpen homok és agyag fogja össze szemcsékké. E-mellett kalcit, szeszkvioxidok, rétegszilikátok, Fe-, Al-oxihidroxidok és szerves anyagok is szerepelhetnek kötő-, illetve járulékos anyagként, melyek szintén befolyásolják a nyersfoszfát oldódását.

A nyersfoszfátok szállítása általában 20 % P_2O_5 -tartalom alatt nem gazdaságos. Az európai szabvány minimum 25 % P_2O_5 -tartalmat ír elő.

A nyersfoszfát fizikai és kémiai jellemzői

A P-trágyákat összes P-tartalmukkal és annak oldhatóságával jellemzik. Mivel a nyersfoszfát nem vízdoldható, növényi felvehetőségének, közvetlen alkalmazhatóságának fontos fizikai mutatója a *szemcsemérete* és *fajlagos felülete*. A nyersfoszfát őrölt formában kerül forgalomba. Közvetlen P-trágyaként való alkalmazásakor általánosan elfogadott, hogy 80–90%-a 150 μm alatti szemcseméretű legyen (KHASAWNEH & DOLL, 1978; HAMMOND et al., 1986). Tenyészedény- és szabadföldi kísérletekkel igazolták, hogy 150 μm felett a nyersfoszfát relatív agronómiai hatásossága csökken a részecske méretének növekedésével, 150 μm alatt viszont ennek nincs jelentős hatása. Az (igen szigorú) európai szabvány szerint, a nyersfoszfát 90 %-ának 63 μm alatt, 99%-

ának pedig 125 μm alatt kell lennie. Az ilyen finomra őrölt anyag azonban nehezen kezelhető, így gyakorlati felhasználása során vagy könnyen széteső granulátumként vagy szuszpenziós készítményként alkalmazzák.

A nyersfoszfát fajlagos felülete függ eredetétől és őrlési finomságától. Az összes felület a szemcse nagysága által meghatározott külső felületen kívül a szemcse pórusaiban a talajoldat számára hozzáférhető belső felületeket is magába foglalja. Az üledékes (azaz a lágy, kisebb fajsúlyú, kevésbé tömör) nyersfoszfátok fajlagos összes felülete nagyságrendileg nagyobb a fajlagos külső felületénél.

Hazánkban KRÁMER (1962) az általa vizsgált üledékes hiperfoszfát és ciklonfoszfát fajlagos összes felületét ($42\text{--}50\text{ m}^2\text{g}^{-1}$) egy nagyságrenddel nagyobbra találta a magmás eredetű Kola nyersfoszfáténál ($2\text{--}5\text{ m}^2\text{g}^{-1}$). Mérései szerint őrléssel a magmás eredetű Kola nyersfoszfát fajlagos összes felülete háromszorosára, az üledékes nyersfoszfátoké pedig mintegy 20 %-kal növelhető.

A nyersfoszfátok közvetlen alkalmazhatóságának, agronómiai hatékonyságának további fontos feltétele a nyersfoszfát reaktivitása. Az üledékes nyersfoszfát *kémiai reaktivitását* az apatit ásványaiban végbement $\text{CO}_3^{2-}/\text{PO}_4^{3-}$ izomorf helyettesítés mértéke határozza meg. Elméletileg a nyersfoszfát reaktivitása az apatitstruktúra aktuális termodinamikai stabilitásával jellemezhető (HAMMOND et al., 1986). Mérésére röntgen-diffrakciós módszer, infravörös spektroszkópia, elemanalízis, kémiai extrakciós módszer, kinetikai módszer szolgál. A gyakorlatban általában a nyersfoszfát kémiai reaktivitását a *különböző oldószerekben történő oldhatósága* alapján mérik (KHASAWNEH & DOLL, 1978; CHIEN, 1993). Általában semleges ammónium-citrátot (USA, Ausztrália), 2%-os citromsavat (Brazília) és 2%-os hangyasavat (Európa) használnak oldószerként.

LEHR (1980) a világ ismertebb lelőhelyein bányászott nyersfoszfátok citrátban való oldékonyságáról közöl átfogó adatokat. Általános összefüggésként megállapította, hogy a magmás eredetű nyersfoszfátok (pl. a Kola nyersfoszfát) természetes oldékonysága igen csekély. Az üledékes, közöttük is az ún. „lágy” foszfátok viszont több esetben kitűnő oldékonyságukkal tűnnek ki.

Hazánkban KRÁMER (1963) és BÉSÁNNÉ (1992) vizsgálták a nyersfoszfátok oldhatósági viszonyait. KRÁMER a fent említett üledékes eredetű hiperfoszfát és ciklonfoszfát, valamint magmás eredetű Kola nyersfoszfát oldhatóságát vizsgálta 2 %-os citrom-, ill. hangyasavban és Komplexon III-ban. A nyersfoszfátok fajlagos összes felületével összhangban az üledékes nyersfoszfátok oldhatósága volt a nagyobb, viszont az ún. szabad kalcitartalomnak megfelelően az oldhatóság erősen függött az oldószer:anyag aránytól. BÉSÁNNÉ (1992) az észak-karolinai nyersfoszfát összes P-tartalmának 0,3 %-át találta vízben oldhatónak, 36,8 %-át citromsav-oldhatónak. Az Arad nyersfoszfát P-tartalmának szintén 0,3 %-a volt vízoldható, 67,7 %-a pedig citromsav-oldható.

A nyersfoszfátok különböző oldószerekben történő oldódásuk alapján mért reaktivitásának megítélésénél, összehasonlításánál azonban több probléma merül fel. Az egyik az, hogy a különböző oldószerrel különböző eredményeket adnak, mivel nem azonos mértékben oldják a különböző P-ásványokat. A citromsav például több fluorapatitot és kevesebb frankolitot old, mint a hangyasav (RAJAN et al., 1992; CHIEN, 1993; WATKINSON, 1994a). Ha azonos oldószert alkalmaznak a nyersfoszfátok kémiai reaktivitásának összehasonlításánál, az oldott P-mennyiség a nyersfoszfát egységnyi tömegére, valamint az egységnyi tömegű nyersfoszfát összes P-tartalmára is vonatkoztatható.

Ha az oldott foszfort az összes P %-ában fejezzük ki, a gyenge minőségű nyersfoszfát oldhatósága a többi nyersfoszfáthoz viszonyítva irreálisan nagy értékeket mutat. Így tehát, ha nagyon különböző minőségű nyersfoszfátok oldhatóságát hasonlítjuk össze, célszerűbb az oldott P-t a nyersfoszfát %-ában megadni (HAMMOND et al., 1986).

A harmadik probléma, hogy a nyersfoszfátok felosztása az oldószerekben történő oldhatóság alapján reaktívra és nem reaktívra önkényes és a világon nem egységes. Új-Zélandon például ezt a határt a 2 %-os citromsav-oldható P alapján ítélik meg, 30% P_2O_5 -tartalomnál, a nyersfoszfát tömegére vonatkoztatva. Európában pedig a 2%-os hangyasav-oldható P alapján, 55 %-nál adják meg a határt, az egységnyi nyersfoszfát-tömeg összes P_2O_5 -tartalmára vonatkoztatva.

A nyersfoszfát különböző oldószerekben mért oldhatóságának összehasonlításakor CARO és HILL (1956) adatai azt mutatták, hogy a lucerna termése három savanyú talajon jobban korrelált a 2%-os citromsavban mért oldhatósággal, mint a semleges ammónium-citrátban mért értékkel. CHIEN és HAMMOND (1978) hétféle nyersfoszfát oldhatósági adatát hasonlította össze tenyészedényben termesztett guineai fű és szabadföldön termesztett bab termésével, ugyanazon talajtípuson. Az agrokémiai adatokkal a 2%-os hangyasavban és a 3 pH-jú ammónium-citrátban oldott P mennyisége jobban korrelált, mint a semleges ammónium-citrátban és a 2%-os citromsavban oldott mennyiség. MACKAY és munkatársai (1984a) ötféle nyersfoszfát hét különböző oldószerben mért oldhatóságát hasonlították össze tenyészedényben nevelt fehér here és élő angolperje termésével. A nyersfoszfátok agronómiai hatékonyságának mérésére a 2 %-os hangyasav bizonyult a legjobbnak, a leggyengébbnek a 2 %-os citromsav, a semleges ammónium-citrát és a lúgos ammónium-citrát.

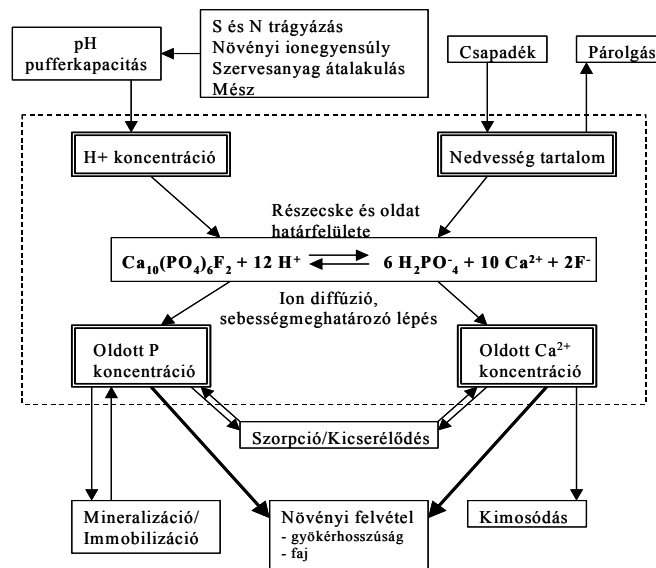
A talajtani és környezeti tényezők hatása

A növények a foszfort a talajból zömmel foszfátion formájában veszik fel. Ha a P-trágyát vízben nem oldódó nyersfoszfát formájában adjuk a talajhoz, a nyersfoszfátnak először fel kell táródnia (oldódnia) a talajban ahhoz, hogy foszfátionokat szolgáltatson.

A nyersfoszfát foszfátkomponensének, a fluorapatitnak a nedves talajban történő oldódását, és az oldódásban alapvető szerepet játszó faktorokat a 1. ábra mutatja.

Az egyenletből a tömeghatás törvénye alapján látható, hogy a nyersfoszfát oldódását a talajban alapvetően a *talaj pH-ja, a talajoldat P-koncentrációja és a talaj kicserélhető Ca-tartalma* határozza meg. Az alacsony pH (< 6), a kis oldható P-tartalom és kicserélhető Ca-mennyiség kedvezően befolyásolja a nyersfoszfát oldódását, így közvetlen alkalmazhatóságát (KHASAWNEH & DOLL, 1978; WILSON & ELLIS, 1984; HAMMOND et al., 1986; ROBINSON & SYERS, 1990; WRIGHT et al., 1992; CHIEN & MENON, 1995; RAJAN et al., 1996).

A nyersfoszfát nedves talajban történő oldódásakor a nyersfoszfátszemcsék felületén egy vékony folyadékrétegben a foszforra nézve telített oldat képződik. (Ez a P-koncentráció azonban igen alacsony, 10^{-4} M nagyságrendű). A nyersfoszfát további oldódása ebben a folyadékrétegben, a már oldódott ionoknak a folyadékrétegből történő *diffúziójától* függ. KIRK és NYE (1986a,b) megállapították, hogy a nyersfoszfát oldódásának sebesség meghatározó lépése nem maga a felületi oldódási reakció, hanem az oldódott termékek (Ca-, foszfátionok) diffúziója a nyersfoszfátrészecskék felületéről. Ha a foszfátionok megkötődnek a talaj szorpciós felületein, csökken a P-koncentráció az



1. ábra

A nyersfoszfát oldódását befolyásoló tényezők (HEDLEY et al., 1995)

oldódó nyersfoszfátrészecske körül, ami a nyersfoszfát további oldódását segíti (KIRK & NYE, 1986b; KANABO & GILKES, 1987). A talaj P-szorpciós kapacitásának növekedése tehát kedvező magára a nyersfoszfát oldódására, de a nyersfoszfát agronómiai hatékonyságára csak akkor, ha az így megkötött foszfor valóban felvehető a növények számára is (HAMMOND et al., 1986).

Kedvezően hat a nyersfoszfát oldódására a talaj nagy *kationcsere kapacitása* (és ennek telítetlensége), valamint az átlagosnál nagyobb *humusztartalma* is. A talajban bizonyos szerves anyagok hidrolízise után néhány szerves funkciós csoport, vagy citrát- és oxalátanion a Ca-ionokkal kelátkomplexet képez, így csökkenti a talajoldat Ca^{2+} aktivitását, és elősegíti a nyersfoszfát oldódását (CHIEN, 1979).

A talajban a P-átalakulási folyamatokban jelentős szerepet játszó környezeti tényezők (*talajnedvesség-tartalom, hőmérséklet*) hatását is vizsgálták a nyersfoszfátok oldatba kerülésére. Mint említettük, a nyersfoszfát oldódásának sebesség meghatározó lépése az oldódott termékek (Ca-, foszfátionok) diffúziója a nyersfoszfátrészecskék felületéről (KIRK & NYE, 1986a,b). A talaj nedvességtartalmának növekedése növeli az ionok effektív diffúziós koefficiensét (NYE, 1979). Így a csapadék, a talaj nedvességtartalmának növekedése elősegíti a nyersfoszfát oldódását (KHASAWNEH & DOLL, 1978; HAMMOND et al., 1986; KANABO & GILKES, 1988; ANDERSON & SALE, 1993; WATKINSON, 1994b; SIKORA & GIORDANO, 1995).

Ugyanakkor a hőmérséklet emelkedésének hatására a nyersfoszfát feltáródása a talajban számottevően nem változik (CHIEN et al., 1980; RAJAN et al., 1996). Ez valószínűleg azzal magyarázható, hogy az aktuálisan mért vízzoldható P-tartalom minden esetben két ellentétes folyamat eredménye. Az egyik folyamatban a nyersfoszfát oldódása során P jut a talajoldatba, míg a másik folyamatban ennek a foszfornek egy része megkötődik a talajban. Irodalmi adatok szerint mind a két folyamat hőmérsékletfüggő, a

reakciók sebessége a hőmérséklettel nő. BARROW és SHAW (1975), valamint SMITH és munkatársai (1977) vizsgálatai szerint a P oldódásának és megkötődésének hőmérséklet függése Arrhénius-típusú összefüggéssel írható le. A két ellentétes folyamat eredője okozza, hogy egy adott időpontban a nyersfoszfáttal trágyázott talaj vízzeloldható P-tartalmára a hőmérséklet változásának nincs jelentős hatása.

A növény szerepe a nyersfoszfát hasznosulásában

Foszformozgás a gyökérfelületre. – A gyökér közvetlen környezetében lévő P-mennyiség mellett a gyökérre történő P-mozgás sebessége is meghatározó tényező a növény megfelelő ütemű P-ellátásában. A növény aktív szerepének nagy jelentősége van a gyökérre történő P-mozgás sebességének növelésében (P-elvonás), a transzporttávolságok csökkentésében (gyökérnövekedés) és a P feltáródásában (fiziko-kémiai hatás).

A talajban a foszfor gyökérre történő transzportjában a diffúzió a meghatározó folyamat. Ha a P-felvétel sebessége meghaladja a diffúzió sebességét, a gyökér–talaj határfelületen a P-koncentráció lecsökken és a gyökér körül hiányzóna jön létre, koncentrációminimummal a gyökérfelületen. A gyökérkörnyezetben a koncentrációgradiens nagysága elsősorban a foszfor mozgékonyaságától függ, ez pedig a talaj adszorpciós tulajdonságainak, a talajoldat P-koncentrációjának és a talaj nedvességállapotának függvénye (VÉGH & FÜLEKY, 1994).

A koncentrációeloszlást azonban nemcsak a talaj transzportjellemzői, hanem a növény P-felvételi sebessége, a gyökér sugara, ill. a gyökérszőrök hossza és a felvételi folyamat időtartama is jelentősen befolyásolják. Minél nagyobb a P-felvétel sebessége a P-diffúzió sebességéhez képest, annál jobban lecsökken a gyökérfelületen a P-koncentráció a felvételi folyamat során. Egyes növények szélesebb hiányzónája a hosszabb gyökérszőrök következménye. A folyamatidő növekedésével – a tápanyag mozgékonyaságától függő mértékben – a koncentrációprofilok ellaposodhatnak.

Minél kisebb a foszfor diffúzió sebessége a talajban, annál kisebb sugarú az a gyökérkeret körülvevő talajhenger, amelynek P-tartalma a gyökérkeret a felvételi periódusban elérheti. A diffúzió sebessége által behatároltnál távolabbi talajrészek P-tartalma a gyökér hossz- és sugárirányú növekedésével (ez utóbbi egyik formája a gyökérszőrképződés) lesz csak elérhető a növény számára (VÉGH et al., 1990).

Kevésbé termékeny, kis tápanyagtartalmú talajokban a gyökérfelület – azaz a talaj minél nagyobb felületével érintkező aktív felvevő felület – nagysága és növekedési sebessége alapvetően meghatározó a növény P-igényének kielégítésében. A szakirodalomból ismert, hogy az intenzívebb begyökerezés (nagyobb gyökérsűrűség) javítja a foszfor hasznosulását. Ez összhangban van az előzőekben vázoltakkal: a sűrűbb gyökérzet nagyobb mennyiségű talajt ér el és merít ki, ugyanakkor a foszfor lassú diffúziója következtében az egyes gyökerek körüli koncentrációprofilok nem kerülnek átfedésbe, a gyökerek nem vonnak el egymás elől foszfort.

A gyökérműködés élettani igényeinek és a heterogén talajkörnyezet ingereinek megfelelően egyazon növény különböző gyökerei körül a koncentrációprofilok jelentősen eltérhetnek egymástól.

Talaj és gyökérzet kölcsönhatásai a nyersfoszfátok feltáródásában. – Az 1. ábrán látható összefüggés alapján a nyersfoszfát feltáródását egyrészt a protonszolgáltatás, másrészt az oldódási termékek, azaz a Ca- és foszfátionok elvonása segíti elő.

A gyökérzet, talajkörnyezetével kölcsönhatásban, ahhoz folyamatosan alkalmazkodva, markáns kémiai változásokat hoz létre a rizoszférában. Bizonyos növények gyökerei inkább, másoké kevésbé képesek a kémiai feltárára, ami bekövetkezhet a rizoszféra mikroorganizmusokon keresztül, de közvetlenül a talaj pH-jára gyakorolt hatással is, szelektív tápanyagfelvétellel, vagy szerves sav kibocsátással (MARSCHNER, 1997). Megjegyzendő, hogy minél kiterjedtebb a gyökérzet, annál nagyobb tömegű talaj, ill. talajba kevert nyersfoszfát P-tartalmának felvehetőségét képes a növény befolyásolni. P-hiány esetén igen jelentős lehet a gyökérkörnyezeti kémiai feltáródásból származó felvehető P-mennyiség.

A rizoszféra pH-ja 2–3 egységgel is különbözhet a környező talaj pH-jától (GAHOONIA & NIELSEN, 1992; HINSINGER & GILKES, 1997; RÖMHELD, 1986). A növények közötti, a gyökérkörnyezeti pH megváltoztatásában megnyilvánuló genotípus különbségek a kation-/anionfelvételi arány különbségeken alapulnak (FÖHSE et al., 1991). Több szerző kimutatta, hogy a gyökér protonkibocsátása révén a hajdina, repce és egyes pillangósok számára a nyersfoszfátok P-tartalma felvehetővé vált (BEKELE et al., 1983; HINSINGER & GILKES, 1995, 1996, 1997). A talaj nitráttartalmát kisebb mértékben hasznosító N_2 -kötő növények több kationt vesznek fel a gyökérkörnyezetből mint aniont, minthogy N-igényük egy részét a gyökér sejtjeibe lépő töltés nélküli N_2 fedezi. A kation-/anionfelvételi arány és az egységnyi asszimilált nitrogénre jutó protonkibocsátás nagy, és ezáltal jelentősen nő a nyersfoszfát, mint P-forrás jelentősége a növény táplálásában, ahogy ezt lucerna kísérleteiben AGUILAR & VAN DIEST (1981) igazolták. DE SWART & VAN DIEST (1987) kimutatták, hogy P-szegény talajban, ahol a gümőképződés igen kismértékű, starter P-trágyázással a gümőképződés, a N_2 -kötés, a rizoszféra savanyodás és ezáltal a nyersfoszfát-hasznosítás növelhető. Protonkibocsátást és ezáltal a gyökérkörnyezet pH-jának csökkentését írták le P-hiányban (pl. repce esetén: GRINSTED et al., 1982; HEDLEY et al., 1982; HINSINGER & GILKES, 1997), Zn-hiányban (pl. gyapot esetén CAKMAK & MARSCHNER, 1990), Fe-hiányban (RÖMHELD, 1986).

A gyökér protonkibocsátásának a gyökérkörnyezetben a foszfor koncentráció-profiljára gyakorolt hatását tanulmányozva megállapították, hogy a koncentrációgradiens nagyságát és a hiányzóna kiterjedését a proton és a foszfát diffúziós együtthatójának aránya szabja meg, ami sajátos talajtulajdonságok függvénye. Modellvizsgálatok szerint az apatitból történő P-feltárára a gyökérkörnyezet pH-változása, a gyökerek protonkibocsátása és az apatitszemcsék felületnagysága van a legnagyobb hatással. A feltárádott foszfor növény által felvett mennyisége nagymértékben függ a gyökérsűrűségtől. Minél kisebb a talaj P-pufferkapacitása, annál nagyobb a gyökér P-felvételének hatása a feltárádásra (GRINSTED et al., 1982; HEDLEY et al., 1982).

A nyersfoszfátok P-tartalmának felvehetősége a gyökér szerves sav – citromsav, almasav- és oxálsav-, ill. fumársav-kibocsátásával is nő (pl. repce, csillagfűrt, lucerna, csicseriborsó, földimogyoró). Mivel a Ca-ion a transpirációs áramban kerül a gyökérfelszínre, majd apoplazmában mozog a szélélébe, és mivel transzportja az endodermiszen keresztül annak differenciálódása után már akadályozott, a már érett gyökérszegmensek körül nagymértékben felhalmozódhat és akadályozhatja a nyersfoszfát-feltárádást a rizoszférában. A P-hiányos repce és fehér csillagfűrt gyökérkörnyezetében Ca-citrát formájában megkötődik, ezáltal fokozódik a nyersfoszfát feltárádása (HOFFLAND et al., 1989a,b; GARDNER et al., 1982; DINKELAKER et al., 1989). A fehér csillagfűrt proteoid gyökérzete által a környezetébe kibocsátott szerves savak és redukáló anyagok P-, Mn-

és Fe-felvételre gyakorolt hatását vizsgálva megállapították, hogy a proteoid gyökérzet nem elsősorban mint megnövelt felvevő felület, hanem mint megnövelt kiválasztó felület fokozza jelentősen a vizsgált tápanyagok felvehetőségét (GARDNER et al., 1982).

Az arbuszkuláris mikorrhiza-gombák szerepe a nyersfoszfát P-tartalmának hasznosításában

A növények gyökerének felületén és a gyökérkörnyezetben élő mikroorganizmusok a növények táplálkozását a tápanyagok felvételére, a gyökerek növekedésére és morfológiájára, tápanyagfelvételi mechanizmusára, élettani folyamataira gyakorolt direkt és indirekt hatásuk révén képesek befolyásolni.

A legelterjedtebb és egyben legősibb mikorrhiza típus az arbuszkuláris mikorrhiza (AM= Arbuscular Mycorrhiza). A mikorrhizált növények számára jobb talajkihasználást tesz lehetővé mind a tápanyag-, mind a vízfelvétel szempontjából (CLARK & ZETO, 2000). Az AM-gombákkal fertőzött növények gyökerén található micéliumok (extraradikális micélium) behálózzák a talajt és a növényi hajszálgyökereknél is vékonyabb, 1–5–12 μm átmérőjű AM-gomba hifák, a növény számára hozzá nem férhető tápanyagforrások feltárására is alkalmasak (ABBOTT & ROBSON, 1985). A gazdanövény gyökerének egy centiméterére eső hifák hosszúsága elérheti az 1–10 m-t, ugyanakkor egy gramm talajra vonatkoztatott mennyisége 1–20 m. Az AM-gomba hifák tápanyagfelvételi aktivitása fajoként eltérő lehet (JAKOBSEN et al., 1992) és a gazdanövény gyökerétől távolodva mérséklődik. Az externális hifák tápanyagtranszportjából kifolyólag a nettó tápanyagfelvétel a talajból a mikorrhizált növényekben nagyobb, mint a nem mikorrhizáltakban (MARSCHNER, 1997).

A mikorrhizás növények tápanyagfelvétele, a gazdanövény és gombapartner viszonya számos tényező függvénye: a talaj pH-ja, tápanyag-ellátottsága, szervesanyag-tartalma, sókoncentrációja, a talajművelés módja, a növény- és AMF- (Arbuscular Mycorrhizal Fungi) faj egyaránt befolyásolja a mikorrhizációra adott növényi választ. A mikorrhiza függő növényekben egy genetikailag meghatározott, de a talaj P-ellátásától függő szabályozó mechanizmus működik. A növények hosszabb és rövidebb távon számukra optimális szinten tartják a gyökérükben a fertőzöttség szintjét, a gombának juttatott fotoasszimilátumok mennyiségének szabályozásával (POSTA, 1997). Ezzel szemben az arbuszkuláris mikorrhiza gomba a növény P-ellátását tudja kontrollálni. A különböző növény családok fajainak mikorrhiza függősége gyakran korrelál a gazdanövény hajszálgyökereinek morfológiájával; a hosszú és nagy mennyiségű hajszálgyökereket képező gazdanövények mikorrhiza-gombától való függése kisebb, mint a kevés és rövid gyökerű növényfajoké. A dúsabb gyökérzettel rendelkező fűfélék, melyek hatékonyabbak a foszfor felvételében, kevésbé vannak ráutalva a gombapartner jelenlétére, mint pl. a pillangós növények (ISOBE & TSUBOKI, 1998).

Az ásványi anyagok közül az AM-gomba leginkább a foszfor mobilis foszfátok formájában történő felvételét és növénybe történő szállítását segíti elő (COOPER & TINKER, 1978; THOMPSON, 1996; MARSCHNER, 1997). A nem mikorrhizás növényekhez viszonyítva az AM-gomba kétszer–háromszor több foszfor felvételét teszi lehetővé (TINKER et al., 1992). Savas és alkalikus foszfatázai révén a növények számára nem vagy csak nehezen felvehető, immobilis foszfátokat is feltárja (BOLAN et al., 1987) és elősegíti a szerves foszfátok (fitát, nukleinsavak) hasznosítását (JAYACHANDRAN et al., 1992;

TARAFDAR & MARSCHNER, 1994). A többlet foszfort az AM-gomba hifák polifoszfát granulátumok formájában raktározzák (SMITH & GIANINAZZI-PEARSON, 1988), amely mono vagy polimer formában adódhat át a gazdanövénynek. A talajok magas könnyen felvehető P-tartalma gátolhatja mind az AM-gomba gyökérekolonizációját, mind a foszforral antagonista elemek (pl. Zn) felvételét. Ha a talaj P-tartalma magas, a növénynek a gomba jelenlétére kevésbé van szüksége, a gomba gyökérekolonizációjának mértéke csökken. Ezzel szemben nagyon alacsony P-koncentráció esetén felbomlik a szimbióta partnerek közti kölcsönös tápanyagcserén alapuló egyensúly. A gomba kedvezőtlenül hat a növény növekedésére (BETHLENFALVAY et al., 1982), s patogénekhez hasonló módon viselkedhet.

A könnyen oldódó P-források és a lassan mobilizálódó nyersfoszfátok AM-gombák gyökérekolonizációjára gyakorolt hatása eltérő. A foszfor felvehetősége jórészt a talajok kémhatásától függ: savanyú talajokban a felvehető foszfor mennyisége limitált, ezekben a talajokban a termesztett növények növekedése lassú és kisebb biomassza-termelést eredményez. A savanyú talajokban P-trágyaként használt nyersfoszfátok feltáródása lassú és fokozatosan történik, amelynek kedvező hatása lehet a mikorrhizációra. Az irodalmi adatok szerint nyersfoszfátok alkalmazása nem gátolja az arbuszkuláris mikorrhiza gombák gyökérekolonizációját (RYAN et al., 1994), sporulációt (SAIF, 1986) és az AMF fertőzés okozta pozitív növényi választ (MENDOZA & PAGANI, 1997). Tenyészedény- és szabadföldi kísérletekben bizonyították, hogy az AM-gomba oltás növeli a gazdanövények nyersfoszfát P-forrás hasznosítását, a mikorrhizás növények P-tartalma magasabb, mint a nem mikorrhizásaké (MANJUNATH et al., 1989; GUISSOU et al., 1999). ALLOUSH és CLARK (2001) tenyészedény-kísérletben savanyú talajon (pH = 4,7) 500 mg kg⁻¹ mennyiségű szíriai nyersfoszfát- (P₂O₅ = 28 %) kezelés mellett vizsgálta a P-kezelés és mikorrhiza oltás hatását kukorica tesztnövény biomassza-termelésére és elemtartalmára. A *Glomus clarum* AM-gomba inokulummal történő oltás növelte a P-kezelés hatékonyságát. A mikorrhizás növények biomassza-termelése és P-tartalma szignifikánsan nagyobb volt, mint a nem mikorrhizás, de nyersfoszfáttal kezelt növényeké. A mikorrhiza-gombával történő oltás a savanyú talajokban általában a növények számára limitált mennyiségben jelenlévő más ásványi elemek (pl. Ca, Mg, K) felvételét is növelte a gazdanövényben. A mikorrhizás növények kétszer-háromszor több kalciumot, magnéziumot, cinket és bórt tartalmaztak, mint a nem mikorrhizásak. A mikorrhiza-gombával történő oltás csökkentette a savanyú talajokban feldúsuló, sokszor toxikus mennyiségű Al-, Mn- és Fe-felvételt. A nyersfoszfátkezelés hatására más irodalmi forrásokhoz (VANLAUWE et al., 2000) hasonlóan az AMF gyökérekolonizációs mutatók értéke emelkedett. A nyersfoszfát P-forrás hasznosítását az AM-gombák valószínűleg nem a nyersfoszfátok szolubilizációjának elősegítése révén növelik, hanem az extraradikális hifák a lassan oldódó foszfátionok felvételét és a hasznosítható talajtérfigatát növelik a gazdanövény számára (SANDERS & TINKER, 1971; GIANINAZZI-PEARSON et al., 1981). Terméketlen és savanyú talajú trópusi országokban a nyersfoszfát P-forrás és különböző AMF inokulumokkal történő oltás együttes alkalmazása „vonzó” megoldás lehet a nyersfoszfátrágyázás hatékonyságának növelése érdekében (SIEVERDING, 1991). Az AM-gombák gazdanövény P-felvételében megnyilvánuló direkt hatása mellett nem szabad figyelmen kívül hagyni a rizoszféra mikroorganizmus közösségére gyakorolt indirekt hatást sem. A mikorrhizás növények gyökérkörnyezetében élő foszformobilizáló mikroorganizmusok, baktériumok és gombák

(*Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas* spp., *Agrobacterium* spp., *Bacillus circulans*, *Bacillus megaterium*, *Aspergillus niger*, *Penicillium funiculosum*) száma nagyobb, mint a nem mikorrhizás növények rizoszférájában (AZCÓN-AGUILAR & BAREA, 1992). Sok esetben a baktérium oltóanyagok kedvező hatását – különösen tápanyagszegény talajokban – az immobilis foszfátok mineralizációjára vezetik vissza.

A nyersfoszfát oldódásának, feltáródásának mérése a talajban

A nyersfoszfát oldódásának kinetikája és modellezése

A nyersfoszfát feltáródásának megértéséhez elengedhetetlenül szükséges oldódási kinetikájának tanulmányozása. A nyersfoszfát oldódási mértékének meghatározására számtalan módszert fejlesztettek ki, kinetikájáról ezzel szemben csak kevés irodalmi adatot találunk. CHIEN és munkatársai (1980) a módosított Elovich-egyenletet találták legalkalmasabbnak három nyersfoszfátfeleség oldódási kinetikájának leírására. A vizsgálatot háromféle talajon végezték. A hőmérsékletnek nem volt szignifikáns hatása a nyersfoszfát oldódására.

MACKAY és munkatársai (1986) a Sechura nyersfoszfát oldódását hat talajon vizsgálva a módosított Mitscherlich-egyenletet alkalmazták az oldódás leírására. Míg az egyenlet aszimptota tényezője talajonként jelentősen változott, addig a görbületi együttható független volt a talajtípustól.

Szabadföldi körülmények között az oldódás kinetikáját kvantitatíve írja le KIRK és NYE (1986a,b) modellje – mely sokkal komplexebb, és magában foglalja az egyedi talajtulajdonságokat is, szemben az egyszerűbb Watkinson modellel (WATKINSON, 1994b,c), mely minden talaj és helyspecifikus tulajdonságot egy aránykonstansba foglal. Mindkét modell azt tekinti alapul, hogy a nyersfoszfát oldódásának mértékét az oldódott nyersfoszfáttermékek diffúziója szabályozza. Míg Kirk és Nye modellje minden ionra nézve tartalmaz egy csatolt ellendiffúziós folyamatot, addig Watkinson modellje azt feltételezi, hogy az oldódás limitáló tényezője a Ca-foszfát diffúziója.

SINCLAIR és munkatársai (1993) a gyorsan, ill. lassan oldhatóvá váló P-trágyáknak a talaj felvehető P-tartalmára gyakorolt hatásának magyarázatára egy kétösszetevőjű elsőrendű kinetikus modellt vezettek be. A modell az aktuálisan alkalmazott trágyából származó foszforral és a fel nem tárolt trágyamaradványokkal is számol a felvehető P-tartalom meghatározásánál.

Általánosan elmondható, hogy a modellek együtthatói és paraméterei érzékenyek a klíma- és talajtulajdonság-változásokra (HEDLEY & BOLAN, 1997).

A talaj P-ellátottságának jellemzésére alkalmazott módszerek

A talajok P-ellátó képessége jellemezhető extraktív módszerekkel, valamint a talaj P-szorpciós kapacitásának meghatározásával (HEDLEY et al., 1995).

A talajvizsgálatokkal szemben napjainkban támasztott követelmények: legyen alkalmas egyszerre több elem meghatározására; eltérő tulajdonságú talajokon is használható, jól reprodukálható legyen; a vizsgálat által kimutatott tápelemszint és a tényleges trágyahatás között valós kapcsolat álljon fenn (JONES, 1997). A talajvizsgálatok eredményének alkalmazhatósága a talaj P-állapotának előrejelzésére, a kivont P és a növény

növekedési paramétereinek (termésmennyiség, termés %, P-felvétel, P-koncentráció) korreláltatásával becsülhető. Ahogy azt BOLLAND és munkatársai (1988) megfogalmazták: minden talajvizsgálati módszer egyformán eredményes a termésbecslésben, ha az egyes módszerek által kimutatott P-mennyiség és a termésmennyiség között külön összefüggést állapítunk meg minden egyes eltérő műtrágyaféleség (és azok kombinációi), az egyes növényfajok és az egyes évek esetében.

Hazánkban az ammónium-laktát kivonószert alkalmazó AL-módszer bizonyult célszerűnek, és vált hivatalos módszerre a talajok könnyen oldható P- és K-tartalmának meghatározására. A 80-as években THAMMNÉ (1980), valamint SARKADI és munkatársai (1984) kidolgozták az AL-P korrekciós modelljét, ahol módosító tényezőként a talaj fizikai féleségét, kémhatás- és mészállapotát, ill. humusztartalmát vették figyelembe.

A talaj növények számára felvehető P-tartalmának becslése nyersfoszfát alkalmazása esetén nehéz feladat, mivel azok a talajvizsgálati módszerek, melyeket a vízzoldható P- trágyák alkalmazásakor fejlesztettek ki és kalibráltak, gyakorta nem adnak pontos becslést a talaj felvehető P-állapotáról (CORNFORTH et al., 1983; KUMAR et al., 1992; BOLLAND, 1993; MENON & CHIEN, 1995). A nyersfoszfáttal trágyázott talajok esetében az ideális vizsgálati módszernek egyaránt tükröznie kellene a talaj nyersfoszfátrágyázás előtti P-állapotát, valamint a talajban lévő, fel nem tárodott nyersfoszfát P (reziduális P, mely egy vagy több év alatt oldódhat, ezáltal a növények számára potenciálisan felvehetővé válhat) mennyiségét (SAGGAR et al., 1992a).

A konvencionális talajvizsgálati módszerek során alkalmazott gyenge elektrolitok és alkalikus kivonószerek – mivel nem képesek oldani a nyersfoszfátok alkalmazása után a talajban maradt és oldatba nem ment olyan trágyamaradványokat, melyek aztán a tenyészidőszak alatti feltáródásukkal hozzájárulnak a növények P-ellátáshoz – alulbecsülik; a savas kivonószerek, melyek alacsony pH-juk következtében elsősorban az apatitot oldják – azon nyersfoszfát-maradványok oldásával, melyek valószínűleg a tenyészidőszak alatt nem alakulnak át felvehető formába – túlbecsülik a nyersfoszfátokkal kezelt talajok növények által felvehető P-tartalmát (PERROTT et al., 1993; RAJAN et al., 1996). A nyersfoszfát oldódásának mérése tehát, az oldatlan nyersfoszfátfrakció, valamint a reakciótermékek direkt mérésének nehézségei miatt csak indirekt módon lehetséges.

Az alkalmazható módszerek egyike például a *szervetlen foszfát frakcionálás*: CHANG és JACKSON (1957) eljárása, vagy annak későbbi módosításai. A fluorid-oldható I. frakció a gyengén kötött foszfort, a II. frakció az Al-, Ca- és Mg-foszfátok egy részét, a III. frakció a Fe-foszfátokat, a IV. frakció a nehezen oldható Ca-foszfátokat mutatja ki. Az Al-P és Fe-P frakciók mennyiségének a kontrollhoz viszonyított növekedését a nyersfoszfát reakciótermékeként magyarázzák, a Ca-P frakcióban tapasztalt növekedést pedig a fel nem tárodott nyersfoszfátnak tulajdonítják (KHASAWNEH & DOLL, 1978).

Az *Olsen-féle* bikarbonátos módszer (OLSEN et al., 1954) és módosításainak (pl. COLWELL, 1963) alkalmazása világszerte elterjedt. Mivel az apatit nem oldódik NaOH-ban vagy NaHCO₃-ban, az Olsen-féle bikarbonát-oldat alkalmazásával nem jelezhető előre a még fel nem tárodott, régebben alkalmazott nyersfoszfátból, vagy a frissen alkalmazott nyersfoszfátból potenciálisan kioldható foszfor mennyisége. Az oldószernek (nagy OH⁻ koncentrációja (pH 8,5) és HCO₃⁻-tartalma miatt) nagy a pufferkapacitása. Ennek következtében az oldószer oldja az Al- és Fe-oxihidroxidokhoz kötött foszfort. A rendszerben a Ca-koncentráció csökkenése (CaCO₃ válik ki) viszont elősegíti a Ca-foszfáton vagy a kalciton szorbeált P oldódását (KUMAR et al., 1991; SAGGAR et al.,

1992a). Vizsgálatok szerint az ezen oldószer által kimutatott foszfor szoros összefüggést mutatott a nyersfoszfát reakciótermékeivel, a Fe- és Al-foszfátokkal. A talaj jelentősebb mennyiségű nyersfoszfáttartalma esetén, a módszer az adott terméseredmény eléréséhez szükséges felvehető P-tartalmat alulbecsülte, összehasonlítva a vízzel oldható műtrágyák alkalmazása során kimutatotttal (CORNFORTH et al., 1983; RAJAN et al., 1991; PERROTT et al., 1993). Ugyanakkor a crandallit és millisit típusú (Fe-P és Al-P) nyersfoszfátok alkalmazását követően túlbecsülte a talaj felvehető P-tartalmát, amely az oldószer oldási mechanizmusára vezethető vissza (BOLLAND et al., 1994). Tehát a különböző P-trágyaféleség alkalmazásakor más-más kalibráció szükséges a módszerhez.

A *Bray-1 módszer* (BRAY & KURTZ, 1945) az OLSEN-féle oldószernél több foszfort képes oldani, mivel a korábban talajba juttatott és visszamaradt nyersfoszfátot és a reakciótermékeket is egyaránt jelzi. E megállapítás különösen érvényes reaktív nyersfoszfáttal trágyázott erősen savanyú, alacsony pufferkapacitású talajokon. A kimutatott P-mennyiség összefüggést mutat a nyersfoszfát reaktivitásával (CHIEN, 1978; CHIEN & HAMMOND, 1978; CORNFORTH et al., 1983; RAJAN et al., 1996). E kivonószert főképpen az Al-P, kisebb mértékben a Ca-P frakció P-tartalmát oldja (az oldószemben lévő fluoridionok komplexet képezhetnek az Al-ionokkal, továbbá csapadékot a Ca-ionokkal, mely folyamat kedvez a dikalcium-foszfát oldódásának (SAGGAR et al., 1992a)), s szoros összefüggés áll fenn a módszer által kimutatott könnyen oldható P-tartalom és a növényi felvétel között (CHIEN, 1978; KHASAWNEH & DOLL, 1978). Magas P-szorpciójú talajokon, a kivonószert pH-ját emelve, csökkent annak Ca-P oldó képessége. Ez még kifejezettebb volt szűk talaj:oldószer arány esetén. Az oldószer savanyú, nagy P-szorpciójú talajok esetén tapasztalt extrakciós képességének csökkenése azzal magyarázható, hogy az extrakció alatt már oldódott foszfor, a vas-oxidokon újra szorbeálódik (SAGGAR et al., 1992a).

Az eltérő talajtípusok által okozott problémákra az oldószerként vizet, illetve 0,01 M CaCl_2 -t alkalmazó módszerek megoldást kínáltak, mivel e módszerek hatékonyságát nem befolyásolják a különböző talajtulajdonságok. A desztillált vizet alkalmazó módszer kidolgozása VAN DER PAAUW (1971) és SISINGH (1971) nevéhez kötődik. Vizsgálataik szerint a talaj vízzel oldható foszfáttartalma és a növény P-hatásai között erős korreláció volt tapasztalható. Az oldószerként desztillált vizet alkalmazó módszerek analitikai nehézségein túl, az általuk kimutatott P-mennyiségek meglehetősen alacsonyak (MACKAY et al., 1984; PERROTT et al., 1993; HEDLEY & BOLAN, 1997).

A 0,01 M CaCl_2 -ot alkalmazó és a fent említett módszerekkel kimutatott P-tartalom között jó kapcsolatot találtak (HOUBA et al., 1986; JÁSZBERÉNYI et al., 1994; VAN ERP et al., 1998). Ennél az oldószernél is analitikai nehézségeket okoz, hogy nagyon alacsony értékeket kapunk. FOTYMA és munkatársai (1996) lengyelországi talajok esetében úgy találták, hogy a CaCl_2 -P csupán az AL-P (EGNER et al., 1960) értékek tizedét érte el.

A növényi gyökök P-felvételével analóg elven működik az *ioncserélő gyantás* és a *Fe-oxidokkal impregnált papíros* módszer: a talajoldatban levő foszfort kötik meg, elősegítve újabb P-mennyiségeknek a talajoldatba jutását, majd megkötődését felületükön. Az extrakciók mechanizmusát PERROTT és munkatársai (1993) írták le. A módszerek változatos talajtípusokra és műtrágyázási háttérrel (így nyersfoszfát használata esetén) is alkalmazhatók (MENON et al., 1988).

A talaj felvehető P-tartalmának becslésére az ioncserélő gyanta alkalmazása először AMER és munkatársai (1955) nevéhez köthető. A gyanta által a talajból kivont foszfor

mennyisége jól korrelált a növény P-felvételével (DALAL, 1985). SAGGAR és munkatársai (1990) kidolgoztak egy gyanta membránt alkalmazó módszert, mely sokkal egyszerűbb és kevésbé időigényes. Az *anioncserélő gyanta membrán (AERM)*, magas kicserélési kapacitásával a kicserélhető foszfát tekintélyes mennyiségét megkötheti. A gyanta ionfelvételét, illetve az ionok visszanyerését befolyásolja: a gyanta típusa, hogy kationcserélő gyantával együttesen alkalmazzák-e vagy sem, a vizsgált ion koncentrációja, a rázatási idő, a talaj:oldószer aránya (FÜLEKY et al., 1980; SOMASIRI & EDWARDS, 1992; RAJAN et al., 1996). SAGGAR és munkatársai (1992a,b) úgy találták, hogy a kation- és anioncserélő gyantát együttesen alkalmazó módszer (AER/CER) az Olsen módszernél jobban becsüli a növények számára felvehető P-tartalmat mind az oldékony monokalcium-foszfáttal, mind a nyersfoszfáttal kezelt talajok esetében, úgy tenyészedény-, mint szabadföldi kísérletben. További előnye a módszernek, hogy egyéb tápelemek – fő kationok és anionok, valamint nyomelemek – mennyisége is meghatározható ugyanaból a kioldásból.

A *Fe-oxidral impregnált papírt alkalmazó módszer (P_i)* (HAMMOND et al., 1985) esetében az ionok a Fe-oxid-réteg felületén szorpcióval kötődnek meg. A kimutatott P-mennyiség a talaj szilárd fázisából való mobilizálódás és a papírba való diffundálódás függvénye. Előnye, hogy rendkívül keveset old a növény számára kevésbé felvehető Al-P, Fe-P vagy Ca-P frakciókból, s a talaj tulajdonságai kevésbé befolyásolják (KUMAR et al., 1992). MENON és munkatársai (1988, 1990) vizsgálataiban a P_i módszer által kivont foszfor mennyisége jól korrelált a kukorica P-felvételével, s jobb korrelációt mutatott a termésmennyiséggel, mint az Olsen módszerrel kimutatott P-mennyiség. Összehasonlítva más módszerekkel, KUMAR és munkatársai (1992) a P_i módszert találták a talajtulajdonságokra legkevésbé érzékenynek.

E két utóbbi módszer vizsgálata nyersfoszfát alkalmazása esetén eddig főképpen üvegházi körülmények között, tenyészedény-kísérletekben történt. Szaktanácsadásban való alkalmazásukhoz további szabadföldi kísérletek szükségesek.

Nyersfoszfátok alkalmazása esetén is felhasználható P-vizsgálati módszer az *izotóposan kicserélhető foszfáttartalom* vizsgálata. A talajok izotóposan kicserélhető foszfát-tartalma a talaj felületén és a talajoldatban levő foszfát azon mennyisége, mely könnyen kicserélhető az oldathoz adott ^{32}P -vel jelzett ortofoszfáttal. A talaj összes foszfát-tartalmának az a része, mely ^{32}P izotóppal könnyen kicserélhető, a növények számára felvehető foszfátot reprezentálhatja a talajban. Az irodalom szerint a kimutatott mennyiséget leginkább a ^{32}P izotópcsere ideje és a talajhoz a vizsgálat során hozzáadott inaktív P mennyisége (hordozó) befolyásolja (OSZTOICSNÉ & VARRÓ, 1986a). Az izotópcsere az első néhány órában gyors folyamat, de a reakció hetekig folytatódik, ezért az izotópcsere idejét mindig a talaj sajátosságainak megfelelően kell megválasztani (OSZTOICSNÉ & VARRÓ, 1986b). Rutin módszerként való bevezetését gátolják azok a biztonsági előírások, melyeket az izotópokkal történő vizsgálatok megkövetelnek, és a magas beruházási költségek (RAJAN et al., 1996).

A talaj *kicserélhető Ca-tartalmában bekövetkező változás* mérésével következtetni lehet a nyersfoszfát oldódásának mértékére (KHASAWNEH & DOLL, 1978). Megjegyzendő, hogy ez a módszer nem alkalmazható tenyészedény- vagy szabadföldi kísérletben, ahol a felszabadult Ca a növényi felvétel vagy a kilúgzódás által elmozdulhat (RAJAN et al., 1996).

A *reziduális nyersfoszfát mennyiségének* becslésére PERROTT és WISE (1995) (cit. HEDLEY & BOLAN, 1997) fejlesztett ki egy olyan módszert, mely a trágyázási háttértől függetlenül képes meghatározni a talajban található nyersfoszfát-maradványok mennyiségét, majd a nyersfoszfát-maradványok várható oldódását modellel becsülik.

Hazánkban FÜLEKY (1976a,b) az OMTK-kísérletek korai szakaszában, a kísérletso-rozat 4. évében vett talajminták könnyen oldható P-tartalmát vizsgálta a világon elter-jedt főbb módszereket alkalmazva. Az ország tíz helyéről származó talajmintákon az AL-, DL-, CAL-, Bray I, Olsen, módosított Olsen, a CaCl_2 -es módszer, és a Chang–Jackson-féle P-frakcionálási módszereket hasonlította össze. A szerző közvetlen kioldá-sos módszerrel vizsgálta a különböző összetételű, koncentrációjú és pH-jú oldatok hatására a szervesen foszfátfrakciók mennyiségében bekövetkezett változásokat.

CSATHÓ és MAGYAR (1999), valamint NÉMETH és munkatársai (2001) hazai talajon, 5 éves szabadszíri kiserletben az azonos hatóanyag-mennyiségekben adott szuperfoszfát-P és nyersfoszfát-P hatását és növényi felvételt tanulmányozták. A kísér-letben nyolc eltérő, a könnyen oldható P-tartalom meghatározására világszerte használt módszer összehasonlítását is elvégezték. A legszorosabb összefüggést a P_i -P és AERM-P, a vízdoldható P és P_i -P, valamint az Olsen és a Bray I módszerek között találták. A hazai talajvizsgálatokban hivatalosan alkalmazott AL-módszer (EGNER et al., 1960) túl-becsülte, az Olsen-módszer pedig alulértékelt a nyersfoszfát formájában kiadott fosz-fornak a növények általi felvehetőségét (INDIATI et al., 2001).

A nyersfoszfát agronómiai hatékonysága

A nyersfoszfátok közvetlen alkalmazásának célja a növények P-táplálása, így agro-nómiai hatékonyságuk annak függvénye, hogy P-tartalmukat milyen mértékben képes a növény felvenni, ill. hasznosítani. A P-felvétel a nyersfoszfát feltáródását, a felvehető P gyökreire történő mozgását és a növény élettani folyamatait szabályozó kölcsönhatások eredménye. A terméshozamban kifejezhető hasznosítás pedig nemcsak a növény örök-lődő élettani P-hasznosítási hatékonyságának, hanem a nyersfoszfát egyéb anyagainak a talajkörnyezetre és a növény anyagcseréjére gyakorolt esetleges hatásainak is függvé-nye. A nyersfoszfát agronómiai hatékonysága tehát egyaránt függ a nyersfoszfát és a talajkörnyezet tulajdonságaitól, valamint a növény tápanyagfelvételi sajátosságaitól.

A nyersfoszfátok agronómiai hatékonyságának becslése

Amikor a nyersfoszfátot, mint közvetlen alkalmazású P-trágyát, agronómiai hatása szempontjából minősítik, általában egy standard, általánosan használt, vízdoldható P-trá-gya – szuperfoszfát (SSP), vagy hármasszuperfoszfát (TSP) – hatásához viszonyítják.

Konvencionális becslések. – Az irodalomban különböző becslési módszerekkel és elnevezéssel találkozunk (relatív agronómiai hatékonyság, RAE; relatív hatékonyság, RE; relatív terméshozam, RY; ill. relatív hozamnövekmény, RYI).

A minősítés alapjaként szolgáló paraméter értelemszerűen lehet a terméshozam vagy a növény által kivont foszfor mennyisége. Az adott P-trágya-adagra vonatkozó agro-nómiai hatékonyság legegyszerűbben a terméshozamok, ill. a hozamnövekmények ará-nyából (relatív terméshozam = RY, ill. relatív hozamnövekmény = RYI) számítható ki:

$$RY = (Y_{PR} - Y_{SP}) \cdot 100 \quad (1)$$

$$RYI\% = \frac{(Y_{PR} - Y_0)}{(Y_{SP} - Y_0)} \cdot 100 \quad (2)$$

ahol: RY = relatív terméshozam; RYI = relatív terméshozam növekménye; Y_{PR} = terméshozam nyersfoszfátkezelésnél; Y_{SP} = terméshozam szuperfoszfát-kezelésnél; Y_0 = terméshozam P-trágyázás nélkül.

Ha az összehasonlítani kívánt P-trágyák hatásgörbéinek menetére jellemző regressziós koefficiensek arányát számítjuk ki, az így becsült RYI érték független az alkalmazott trágyaadagtól, ezáltal az agronómiai hatékonyságot általánosabb értelemben tükrözi, mint az egyszerű relatív terméshozam, vagy relatív terméshozam növekmény (CHIEN et al., 1990; MENON & CHIEN, 1990).

Elsősorban gazdaságossági számításokban használják az ún. helyettesítési arányt, vagy szubsztitúciós értéket (SR vagy SV) amely az alkalmazni kívánt műtrágyákat azon az alapon viszonyítja egymáshoz, hogy egyiket vagy másikat adott terméshozam eléréséhez milyen mennyiségben kell alkalmazni. Ebben az esetben a kívánt terméshez szükséges vízzoldható P-trágya-adagot elosztják az ugyanakkora termés létrehozásához szükséges nyersfoszfát mennyiségével. Az eredményül kapott viszonzszám alapján eldönthető, hogy adott termesztési feltételek mellett érdemes-e használni valamilyen nyersfoszfátot, vagy jobban megéri a magasabb egységárú vízzoldható P-trágya alkalmazása.

Az ún. „látszólagos P-trágya hasznosítási együttható (AUC %: apparent utilization coefficient)” a különböző trágyakezelésekben nőtt növények P-felvételét hasonlítja össze:

$$AUC\% = \frac{(TP_{PR} - TP_S)}{P_r} \cdot 100 \quad (3)$$

ahol: TP_{PR} = növényi P-felvétel a vizsgált nyersfoszfátkezelésben; TP_S = növényi P-felvétel a standard (pl. szuperfoszfát) P-kezelésben; P_r = P-adag.

Izotópos becslések.– Mivel a terméshozam, ill. a növény által kivont foszfor mennyisége szoros összefüggésben van a felvehető foszfor mennyiségével, az agronómiai hatás a nyersfoszfát P-tartalmának feltáródását, a növény számára felvehetővé válását kvantifikáló talajtesztek alapján is becsülhető. Például izotópos vizsgálatokban ^{32}P -jelzéssel, az izotóp hígítási elv alapján számolt ún. A- vagy L-érték alapján becsülhető a nyersfoszfát hatékonysága a növény P-ellátásában (relatív műtrágya hatékonyság = Rff; KATO et al., 1995):

$$Rff = \frac{(L_F - L_0)}{P} \quad (4)$$

ahol: L_F = L-érték a P-trágyázott talajban; L_0 = L-érték a P-trágyázatlan talajban; P = P-trágya adag

Ismeretes, hogy a ^{32}P -jelzett P-forrás P-tartalmának felvehetősége a következő összefüggés alapján határozható meg:

$$PdfF\% = \frac{SA_{növ}}{SA_F} \cdot 100 \quad (5)$$

ahol: Pdf F % = a jelölt forrásból származó P (P derived from fertilizer); $SA_{növ}$ = specifikus aktivitás a növényben (dps v. dpm ^{32}P /mg P); SA_F = specifikus aktivitás a ^{32}P -jelzett P-forrásban.

Feltételezve, hogy a növény hatékonyan tükrözi a talaj P-állapotát, ha a rendszerben nincs jelen nyersfoszfát:

$$SA_{növ} = SA_F \quad (6)$$

Ha a rendszerben jelen van nyersfoszfát:

$$PdfF\% = \frac{SA_{növ+PR}}{SA_F} \cdot 100 \quad (7)$$

Az (5) és (6) összefüggés alapján:

$$PdfF\% = \frac{SA_{növ+PR}}{SA_{növ-PR}} \cdot 100 \quad (8)$$

Az izotóphígítási elv alapján kiszámítható a nyersfoszfátból származó növényi P-felvétel (Pdf RP, phosphorus derived from rock phosphate):

$$PdfRP\% = \left(1 - \frac{SA_{növ+PR}}{SA_{növ-PR}} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

A standard P-trágyából, ill. a vizsgálandó nyersfoszfátból származó növényi P-felvétel összehasonlításával becsülhető az adott nyersfoszfát izotóphígításos módszerrel meghatározott relatív hatékonysága (RAID):

$$RAID = \frac{PdfRP\%}{PdfSSP\%} \cdot 100 \quad (10)$$

ahol: Pdf RP% és Pdf SSP% a nyersfoszfátból, ill. a referencia P-trágyából származó, a (9) összefüggés alapján meghatározott növényi P-tartalom.

A nyersfoszfátok agronómiai hatékonyságának vizsgálati lehetőségei, tapasztalatai

A nyersfoszfátok, mint P-trágyák agronómiai hatékonysága azzal a képességükkel fejezhető ki, ahogy a növényi felvételhez a foszfort szolgáltatják. A nyersfoszfát minőségének tehát nem csupán a talajban való oldódása, hanem P-tartalmának növényi felvehetősége a végső mérőszáma. Így a tenyészedényes vagy szabadföldi összehasonlító növénykísérletek elengedhetetlenek.

Mindkét módszernek vannak előnyei és hátrányai. A tenyészedény-kísérlet nagy előnye relatív olcsósága, és az, hogy egyes paraméterek állandóan tartása mellett, mások változtatásának hatása vizsgálható. A különböző nyersfoszfátok minőségének összehasonlítására, a laboratóriumi oldhatósági tesztek ellenőrzésére széles körben alkalmaznak tenyészedény-kísérleteket (CHIEN & HAMMOND, 1978; KUČEY & BOLE, 1984; MACKAY et al., 1984b; RAJAN et al., 1992). Alkalmazható továbbá a megfelelő növény kiválasztására, azonos talajon a leghatékonyabb nyersfoszfátfeleség, adott nyersfoszfát esetén a talaj kiválasztására (KRÁMER & LAMBERGER, 1965; ANDERSON et al., 1985; HAYNES, 1992).

Tanulmányozhatók a nyersfoszfát-P oldhatóságát, felvehetőségét meghatározó kölcsönhatások, a nyersfoszfát–talaj–növény rendszerben végbemenő gyökér-indukált folyamatok (HINSINGER & GILKES, 1996, 1997; ZOYSA et al., 1998, 1999). A növény–nyersfoszfát kölcsönhatások talaj nélkül, mesterséges közeggel töltött tenyészedényekben is vizsgálhatók (HOFFLAND, 1992; BERTRAND et al., 1999; FENG & XIONG, 2002).

A talaj savanyúsága, mészállapota, a kicserélhető kalcium mennyisége és dinamikája, a Ca-források és megkötők aránya és hatásuk a nyersfoszfátok feltáródására (pl. humáthatás), a gyökérműködés szerepe és jelentősége a nyersfoszfát Ca-tartalmának alakulásában fontos tényezők a nyersfoszfátok P-tartalma feltáródásának, így agronómiai hatékonyságának (KIRK, 1999; NÉMETH et al., 2002; SIDLAUSKAS et al., 2002).

OSZTOICS és munkatársai (1997, 2001) tenyészedény-kísérletben vizsgálták az üledékes, lágy algériai nyersfoszfát és a szuperfoszfát hatékonyságát három jellegzetes hazai (Kompolt, Szentgyörgyvölgy, Nagykorpád), valamint egy-egy szlovákiai, romániai és algériai savanyú talajon. Az azonos hatóanyag-tartalmú adagok (50–100–400 mg P_2O_5 kg^{-1}) mellett a nyersfoszfát nagyobb adagjai is szerepeltek a kísérletben. A jelzőnövény tavaszi árpa és vörös here volt. A gyengén savanyú talajokon (Kompolt, Algéria) minden P-műtrágya-adagnál a szuperfoszfátnak jobb hatása volt a tavaszi árpa szemtermésére és a vörös here szárazanyaghozamára, mint a nyersfoszfátnak. A közepesen savanyú szentgyörgyvölgyi pseudoglejes barna erdőtalajon a nyersfoszfáttal és szuperfoszfáttal bejuttatott azonos P-adagok a tavaszi árpánál hasonló szemtermést adtak. A vörös here esetén viszont a szuperfoszfát kedvezőbb hatása volt kimutatható. Az erősen savanyú szlovákiai tipikus podzol talajon a tavaszi árpa jelzőnövény esetén kismértékben a szuperfoszfát, a vörös here jelzőnövény esetén viszont a nyersfoszfát volt a hatásosabb P-trágya. A szélsőségesen savanyú romániai podzol talajon mind a tavaszi árpa, mind a vörös here termésére a nyersfoszfátkezelések hatásosabbak voltak a szuperfoszfátnál. A szélsőségesen savanyú nagykorpádi kovárványos barna erdőtalajon viszont csak a tavaszi árpa jelzőnövénnyel kaptak hasonló eredményt, a vörös here termését sem a szuperfoszfát, sem a nyersfoszfát nem növelte a kontrollmintához viszonyítva. Ezen a talajon valószínű, hogy a talaj savanyúsága mellett, a talaj egyéb tulajdonságai sem kedvezőek a vörös here termesztésére.

OSZTOICSNÉ és munkatársai (2000) a közepesen savanyú pseudoglejes és gyengén savanyú csernozjom barna erdőtalajon az azonos P-hatóanyag tartalmú (ásványi sav oldható 100, 200, 400 mg P_2O_5 kg^{-1}) szuperfoszfát és nyersfoszfát (Algéria) hatékonyságát repce jelzőnövénnyel is összehasonlították tenyészedény-kísérletben. Eredményeik a korábban tapasztaltakhoz hasonlóak voltak. Az inkubáció hatását vizsgálva azt tapasztalták, hogy a hat hónapos inkubáció mindkét talajon mindkét P-formánál szignifikánsan csökkentette a repce szárazanyaghozamát. Megállapították, hogy az adott körülmények között a szuperfoszfát és a nyersfoszfát hatékonysága elsősorban a talaj tulajdonságainak, a növény fajtájának és részben az alkalmazott P-trágya mennyiségének volt a függvénye.

Azonban, minthogy tenyészedényben és szabadföldön a növény növekedési feltételei nagymértékben különböznek, a tenyészedény-kísérletek eredményeit nem lehet abszolút mértékben kiterjeszteni szabadföldi körülményekre. Például a tenyészedény-kísérletben a növények tápelem- (és károselem-) koncentrációja rendszerint magasabb – azonos adagok hatására –, mint szabadföldi kísérletben (PAGE & CHANG, 1978). Sok esetben a tenyészedény- és szabadföldi kísérleti módszereket egyaránt alkalmazzák a vizsgálandó folyamatok, kölcsönhatások részletes, több szempontot figyelembe vevő tanulmányozására. Néhány kutatásban azonos talajon, azonos növényvel, azonos nyersfoszfátsorral végezték a tenyészedény- és szabadföldi kísérletet. Az eredmények azt mutatták, hogy amelyik nyersfoszfátfeleség a legjobbnak bizonyult a tenyészedény-kísérletben, az bizonyult a legjobbnak a szabadföldön is (RAJAN et al., 1996). CHIEN &

HAMMOND (1978) szintén azonos nyersfoszfátsort hasonlított össze tenyészedeny- és szabadföldi kísérletben, de különböző talajon, különböző növényekkel. A nyersfoszfátok hatékonyságának sorrendje hasonló volt mindkét kísérleti módszernél. ENGELSTAD és munkatársai (1974) azonos talajon, azonos növényrel hatféle nyersfoszfát hatását vizsgálták. A nyersfoszfátok hatékonysági rangsora szintén csaknem azonos volt a tenyészedeny- és a szabadföldi kísérletben. SISWORO és munkatársai (2002) tenyészedeny-kísérletében a nyersfoszfát alkalmazása nem növelte a termést, míg szabadföldi kísérletében nagyadagú nyersfoszfátkezelésben a hegyi rizs és szója termése elérte a hármas szuperfoszfát-kezelésnek megfelelő terméshozamot.

Hazai irodalomban is található nyersfoszfáttal beállított szabadföldi kísérlet. Így SARKADI (1960) az ország 16 helyén szabadföldi kísérletet állított be különböző P-trágyákkal, köztük nyersfoszfáttal is. Annak ellenére, hogy az izraeli durva őrlésű nyersfoszfát P-adagja mintegy másfélszerese volt a szemcsés szuperfoszfáténak, terménővelő hatása csupán a tizede volt a szuperfoszfáténak a savanyú talajokon. SIK (1964) három, savanyú talajokon beállított szabadföldi kísérletben négy éven keresztül vizsgálta a különböző nyersfoszfátok és a szuperfoszfát hatását. A Franciaországból importált hiperfoszfát kedvezőbb volt a szuperfoszfátnál, míg az izraeli ciklonfoszfát azzal azonos hatást mutatott. Meg kell azonban jegyeznünk, hogy a hiperfoszfátban kijuttatott foszfor mennyisége 20–70%-kal, a ciklonfoszfátban adotté 80–140%-kal magasabb volt, mint a szuperfoszfátban kijuttatott P-hatóanyag mennyisége.

MÁRTONFFY és PEKÁRY (1978) a hiperfoszfát és szuperfoszfát hatását hasonlította össze három, savanyú kémhatású, kötött talajon. Mindkét P-forma adagja $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ volt. Mindhárom kísérletben a hiperfoszfát a szuperfoszfáttal azonos hatásúnak bizonyult. Az őszi búza terméstöbblete $0,6\text{--}1,4 \text{ t ha}^{-1}$, a tavaszi árpáé $0,3 \text{ t ha}^{-1}$ volt.

TATÁR és MÁRTON (1982) azonos P_2O_5 -mennyiségeket juttatott ki szabadföldi mikroparcellás kísérletben savanyú homok és savanyú réti talajon ($\text{pH}(\text{KCl}) = 6,1$, ill. $6,8$). A vizsgált P-formák foszforsav, kingiszeppi nyersfoszfát, algériai nyersfoszfát és szuperfoszfát voltak. A kísérletek 4 évig folytak. Mind a két nyersfoszfát hatása a kukorica szemtermés növekedésében nyilvánult meg. A kukorica levél P% ugyanakkor azonosnak mutatkozott az NK- (P-kontroll) kezelésével.

CSATHÓ és MAGYAR (1999), valamint NÉMETH és munkatársai (2001) egy gyengén, ill. egy közepesen savanyú hazai talajon, 5 éves szabadföldi kisparcellás kísérletben az azonos hatóanyag-mennyiségekben adott szuperfoszfát-P és az algériai nyersfoszfát-P hatását tanulmányozták a talaj könnyen oldható P-tartalmára, a termésmennyiségre és a növény P-felvételére. A kísérlet felépítése lehetővé tette a $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ előretrágyázás és az évenkénti $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ -trágyázás hatásának összehasonlítását is. A két P-forma, ill. a két P-trágyázási rendszer eredményeképpen kapott P-hatásokban különbség nem volt kimutatható.

A növénykísérleteknek a talajvizsgálatokhoz viszonyított nagyobb költsége, munkáigénye és hosszadalmas volta miatt az agronómiai hatékonyság vizsgálatára széles körben alkalmaznak különféle talajvizsgálatokat is (ld. fentebb), ám ezek eredményeinek verifikálását, a módszerek kalibrálását tenyészedenyes és/vagy szabadföldi növénykísérletekkel végzik el (FOTYMA et al., 2002; KATO et al., 1995; MAHISARAKUL et al., 2002; McLAUGHLIN, 2002a,b; NÉMETH et al., 2002; SISWORO et al., 2002; ZAHARAN & SHARIFUDDIN, 2002).

Kutatások folynak a nyersfoszfát P-tartalma oldhatóságának növelésére, így a nyersfoszfátok szélesebb körű közvetlen alkalmazási lehetőségének, agronómiai hatékonyságának javítására. Ebből a célból BANGAR és munkatársai (1985), YANG és munkatársai (1994), ZAHARAH & BAH (1997) biológiai módszereket alkalmaztak. Hazánkban KREYBIG (1949) szabadföldi kísérletben olyan nyersfoszfátot használt, melyet korábban istállótrágyával érlelt. A nyersfoszfát hatása elérte, sőt helyenként felül is múlta a szuperfoszfát hatását. Ezen eredmények igazolására BALLÁNÉ és SARKADI (1951) Gafszafoszfátot (foszforit) és Kola-foszfátot (apatit) istállótrágyával keverték, és az egyik részét vízzel, a másik részét trágyalével öntözve érelték. A laboratóriumi vizsgálatok azt mutatták, hogy míg a vízzel érlelt mintáknak 87–88 %-a, addig a trágyalével érlelt mintáknak csak 36–38 %-a maradt oldhatatlan.

Az oldhatóság növelésére különböző adalékok hozzáadásával is kísérleteznek, pl. ammónium–zeolittal (BARBARICK et al., 1990), elemi kénnel (RAJAN, 1981; FRIESEN et al., 1987; LONGANATHAN et al., 1994) vagy ureával (CHIEN et al., 1987a). Vízoldható műtrágyával való keverést (HAGIN & KATZ, 1985; CHIEN et al., 1987b; MENON & CHIEN, 1990), valamint részleges savazást (a feltáráskor a sztöchiometriailag szükségesnél kevesebb kénsavat vagy foszforsavat) is alkalmaznak (MOKWUNYE & CHIEN, 1980; HAMMOND et al., 1986; MACKAY & WEWALA, 1990; BÉSÁNNÉ, 1992; BOLLAND et al., 1992; KATO et al., 1995). A zeolit a Ca^{2+} – NH_4^+ -ioncserével segíti a nyersfoszfát oldódását, míg a különböző adalékok a savanyúbb közeg kialakításával. A vízoldható szuperfoszfát keverése a nyersfoszfáttal kettős célt szolgál: egyrészt növelik a műtrágya P-koncentrációját, másrészt a nyersfoszfát feltárására a talajé mellett a szuperfoszfát aktív H^+ -ion koncentrációját is felhasználják (PÉTERFALVI et al., 1988). (A granulátatlan szuperfoszfát általában 5–7 %, a granulált 3–5 % szabad savtartalommal rendelkezik.)

A különböző nyersfoszfátok agronómiai hatékonyságát részben gazdasági, részben környezetvédelmi okokból, világszerte kutatják. A kutatás céljának megfelelően agronómiai, agrokémiai, biológiai (élettani, biokémiai) módszereket alkalmaznak, szabadföldi, (talajban és mesterséges közegben lefolytatott) tenyészedényes, valamint laboratóriumi kísérletekben a nyersfoszfátok agronómiai hatékonysága, ill. a talaj–növény–nyersfoszfát rendszerben meghatározó kölcsönhatások tanulmányozására.

A kísérleti eredmények alapján a lassabban feltáródó nyersfoszfátok közvetlen alkalmazását a hosszabb élekciklusú, évelő növények, míg a savval részlegesen feltárt, gyorsabban oldódó nyersfoszfáttermékek alkalmazását egyéves növények alá ajánlják.

A munkát a T 038046 és F 29908 sz. OTKA-pályázatok keretén belül végeztük.

Irodalom

- ABBOTT, L. K. & ROBSON, A. D., 1985. Formation of external hyphae in soil by four species of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.* **99**, 245–255.
- AGUILAR, S. & VAN DIEST, A., 1981. Rock phosphate mobilization induced by the alkaline uptake pattern of legumes utilizing symbiotically fixed nitrogen. *Plant and Soil*. **61**, 27–42.
- ALLOUSH, G. A. & CLARK, R. B., 2001. Maize response to phosphate rock and arbuscular mycorrhizal fungi in acidic soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **32**, 231–254.
- AMER, F. et al., 1955. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and ^{32}P -equilibration. *Plant and Soil*. **6**, 391–408.

- ANDERSON, D. L., KUSSOW, W. R. & COREY, R. B., 1985. Phosphate rock dissolution in soil. Indications from plant growth studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**. 918–925.
- ANDERSON, G. C. & SALE, P. W. G., 1993. Application of the Kirk and Nye phosphate rock dissolution model. *Fert. Res.* **35**. 61–66.
- AZCÓN-AGUILAR, C. & BAREA, J. M., 1992. Interactions between mycorrhizal fungi and other rhizosphere microorganisms. In: *Mycorrhizal Functioning: An Integrative Plant-Fungal Process*. (Ed.: ALLEN, M. I.) 163–198. Chapman Hall. New York.
- BALLÁNÉ KORNIS H. & SARKADI J., 1951. Foszforittal és apatittal érlelt istállótrágyák laboratóriumi vizsgálata. *Agrokémia és Talajtan.* **1**. 471–477.
- BANGAR, K. C., YADAV, K. S. & MISHRA, M. M., 1985. Transformation of rock phosphate during composting and the effect of humic acid. *Plant and Soil.* **85**. 259–266.
- BARBARICK, K. A., LAI, I. M. & EBERL, D. D., 1990. Exchange fertilizer (phosphate rocks plus ammonium-zeolite) effects on sorghum-Sudangrass. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **54**. 911–915.
- BARROW, N. J. & SHAW, T. C., 1975. The slow reactions between soil and anions. 2. Effect of time and temperature on the decrease in phosphate concentration in the soil solution. *Soil Sci.* **119**. 167–177.
- BEKELE, T. et al., 1983. An evaluation of plant-borne factors promoting the solubilization of alkaline rock phosphates. *Plant and Soil.* **75**. 361–378.
- BERTRAND, I. et al., 1999. Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic phosphated calcite and goethite. *Plant and Soil.* **211**. 111–119.
- BÉSAN J.-NÉ, 1992. Nyersfoszfát bázisú műtrágyák szerepe a gazdaságos műtrágyázásban. *Agrofórum 1992/1. Különszám.* 41–43.
- BETHLENFALVAY, G. J., BROWN, M. S. & PACOVSKY, R. S., 1982. Parasitic and mutualistic associations between a mycorrhizal fungus and soybean: Development of the host plant. *Phytopathol.* **72**. 889–893.
- BOLAN, N. S., ROBSON, A. D. & BARROW, N. J., 1987. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhiza on the availability of iron phosphates to plants. *Plant and Soil.* **99**. 401–410.
- BOLAN, N. S., WHITE, R. E. & HEDLEY, M. J., 1990. A review of the actual and potential use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. *Aust. J. Agric. Res.* **30**. 297–313.
- BOLLAND, M. D. A., 1993. Summary of research on soil testing for rock phosphate fertilizers in Western Australia. *Fertilizer Res.* **35**. 83–91.
- BOLLAND, M. D. A., GILKES, R. J. & ALLEN, D. G., 1988. The residual value of superphosphate and rock phosphate for lateritic soils and its evaluation using three soil phosphate test. *Fert. Res.* **15**. 253–280.
- BOLLAND, M. D. A., KUMAR, V. & GILKES R. J., 1994. A comparison of five soil phosphorus tests for crop species for soil previously fertilized with superphosphate and rock phosphate. *Fert. Res.* **37**. 125–132.
- BOLLAND, M. D. A. et al., 1992. Agronomic effectiveness of partially acidulated rock phosphate and fused calcium-magnesium phosphate compared with superphosphate. *Fert. Res.* **32**. 169–193.
- BRAY, R. H. & KURTZ, L. T., 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* **59**. 39–45.
- BUZÁS I.-NÉ, CSERNÁTONY CS.-NÉ & HERCZEG A., 1986. A magyarországi talajok pH csökkenése. *Agrokémia és Talajtan.* **35**. 63–71.
- CAKMAK, I. & MARSCHNER, H., 1990. Decrease in nitrate uptake and increase in proton release in zinc deficient cotton, sunflower and buckwheat plants. *Plant and Soil.* **129**. 261–268.
- CARO, J. H. & HILL, W. L., 1956. Characteristics and fertilizer value of phosphate rock from different fields. *J. Agric. Food Chem.* **4**. 684–687.

- CASANOVA, E. F., 1995. Agronomic evaluation of fertilizers with special reference to natural and modified phosphate rock. *Fertilizer Res.* **41**, 211–218.
- CATHCART, J. B., 1980. The phosphate industry of the United States. In: *The Role of Phosphorus in Agriculture*. (Eds.: KHASAWNEH, F. E., SAMPLE, E. C. & KAMPRATH, E. J.) 19–41. Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI.
- CHANG, S. C. & JACKSON, M. L., 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* **84**, 133–144.
- CHIEN, S. H., 1977. Dissolution rates of phosphate rocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **41**, 656–657.
- CHIEN, S. H., 1978. Interpretation of Bray I-extractable phosphorus from acid soil treated with phosphate rocks. *Soil Sci.* **126**, 34–39.
- CHIEN, S. H., 1979. Dissolution of phosphate rock in acid soils as influenced by nitrogen and potassium fertilizers. *Soil Sci.* **127**, 371–375.
- CHIEN, S. H., 1993. Solubility assessment for fertilizer containing phosphate rock. *Fert. Res.* **35**, 93–99.
- CHIEN, S. H. & BLACK, C. A., 1976. Free energy of formation of carbonate apatites in some phosphate rocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **40**, 234–239.
- CHIEN, S. H. & HAMMOND, L. L., 1978. A comparison of various laboratory methods for predicting the agronomic potential of phosphate rocks for direct application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **42**, 935–939.
- CHIEN, S. H. & MENON, R. G., 1995. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. *Fert. Res.* **41**, 227–234.
- CHIEN, S. H., CLAYTON, W. R. & MCCLELLAN, G. H., 1980. Kinetics of dissolution of phosphate rocks in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**, 260–264.
- CHIEN, S. H., SALE, P. W. G. & FRIESEN, D. K., 1990. A discussion of the methods for comparing the relative effectiveness of phosphate fertilizers varying in solubility. *Fert. Res.* **24**, 149–157.
- CHIEN, S. H. et al., 1987a. Greenhouse evaluation of phosphorus availability from compacted phosphate rocks with urea or with urea and triple superphosphate. *Fert. Res.* **14**, 245–256.
- CHIEN, S. H. et al., 1987b. Effects of combinations of triple superphosphate and reactive phosphate rocks on yield and phosphorus uptake by corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **51**, 1656–1658.
- CLARK, R. B. & ZETO, S. K., 2000. Mineral acquisition by Arbuscular Mycorrhizal plants. *J. Plant Nutr.* **23**, 867–902.
- COLWELL, J. D., 1963. The estimation of phosphorus fertilizer requirement in southern New South Wales by soil analysis. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.* **3**, 190–197.
- COOPER, K. M. & TINKER, P. B., 1978. Translocation and transfer of nutrients in vesicular-arbuscular mycorrhizas. II. Uptake and translocation of phosphorus, zinc and sulphur. *New Phytol.* **81**, 43–52.
- CORNFORTH, I. S., SMITH, G. S. & FOX, R. L., 1983. Phosphate extractability and availability to plants in phosphate rock-treated soils. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*. **11**, 243–246.
- CSATHÓ P. & MAGYAR M., 1999. A reaktív algériai nyersfoszfát alkalmazásának agronómiai és környezeti vonatkozásai. In: XIII. Országos Környezetvédelmi Konferencia és Szakkiállítás. (Szerk.: ELEK GY. & VÉCSI B.) 121–131. MTESz. Siófok.
- CSATHÓ, P. & NÉMETH, T., 1997. The direct and residual effect of different P-sources in Hungarian field trials. In: *Proc. 11th World Fertilizer Congress*. (Eds.: CLEEMPUT von, O. et al.) 101–108. Ghent, Belgium.
- DALAL, R. C., 1985. Comparative prediction of yield response and phosphorus uptake from soil using anion- and cation-anion-exchange resins. *Soil Sci.* **139**, 227–231.
- DE SWART, P. H. & VAN DIEST, A., 1987. The rock-phosphate solubilizing capacity of *Pueraria javanica* as affected by soil pH, superphosphate priming effect and symbiotic N₂ fixation. *Plant and Soil*. **100**, 135–147.

- DINKELAKER, B., RÖMHELD, V. & MARSCHNER, H., 1989. Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus* L.). *Plant Cell. Environ.* **12**. 285–292.
- DÖRNER B., 1925. A kereskedelmi trágyák történelme, gyártása és használata. Athenaeum. Budapest.
- EGNER, H., RIEHM, H. & DOMINGO, W. R., 1960. Untersuchungen über die Chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Boden. II. Chemische Extraktionsmethoden zu Phosphor- und Kaliumbestimmung. *K. Landw. Hogsk. Annl.* **26**. 199–215.
- ENGELSTAD, O. P., JUGSUNDA, A. & DE DATTA, S. K., 1974. Response by flooded rice to phosphate rocks varying in citrate solubility. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **38**. 524–529.
- FENG, G. & XIONG, L., 2002. Exploring plant factors for increasing phosphorus utilization from rock phosphates and native phosphates in acidic soils. In: *Assessment of Soil Phosphorus Status and Management of Phosphatic Fertilisers to Optimise Crop Production*. 211–233. IAEA–TEDOC-1272.
- FOTYMA, M., GOSEK, S. & BORECZEK, B., 2002. Evaluation of soil and fertilizer-derived phosphorus availability, particularly from rock phosphate, by biological and chemical methods. In: *Assessment of Soil Phosphorus Status and Management of Phosphatic Fertilisers to Optimise Crop Production*. 434–439. IAEA–TEDOC-1272.
- FOTYMA, M., GOSEK, S. & SZEWCZYK, M., 1996. Preliminary experience with calcium chloride method in Poland. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **27**. 1387–1401.
- FÖHSE, D., CLAASSEN, N. & JUNGK, A., 1991. Phosphorus efficiency of plants. II. Significance of root radius, root hairs and cation–anion balance for phosphorus influx in seven plant species. *Plant and Soil*. **132**. 261–272.
- FRIESEN, D. K., SALE, P. W. G. & BLAIR, G. J., 1987. Long-term greenhouse evaluation of partially acidulated phosphate rock fertilizers. II: Effect of cocranulation with elemental S on availability of P from two phosphate rocks. *Fert. Res.* **13**. 45–54.
- FÜLEKY GY., 1976a. A talaj könnyen oldható P-tartalmának meghatározására használt kivonószerek vizsgálata. I. Az AL-, DL-, CAL-, Bray I-, NaHCO_3 -os, $\text{NaHCO}_3+\text{NH}_4\text{F}$ -os és CaCl_2 -os kivonószerek vizsgálata közvetlen kioldással. *Agrokémia és Talajtan*. **25**. 271–283.
- FÜLEKY GY., 1976b. A talaj könnyen oldható P-tartalmának meghatározására használt kivonószerek vizsgálata. II. Az AL-, DL-, CAL-, Bray I-, NaHCO_3 -os, $\text{NaHCO}_3+\text{NH}_4\text{F}$ -os és CaCl_2 -os kivonószerekkel oldott P és a szerves foszfátfrakciók korrelációja. *Agrokémia és Talajtan*. **25**. 284–295.
- FÜLEKY GY., TOLNER L. & DÖMSÖDI J., 1980. A talaj foszforszolgáltatása kinetikájának mérése anioncserélő műgyantával. *Agrokémia és Talajtan*. **29**. 273–279.
- GAHOONIA, T. S. & NIELSEN, N. E., 1992. Control of pH at the soil–root interface. *Plant and Soil*. **140**. 49–54.
- GARDNER, W. K., PARBERRY, D. G. & BARBER, D. A., 1982. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. I. Some characteristics of the soil/root interface. *Plant and Soil*. **68**. 19–32.
- GIANINAZZI-PEARSON, V. et al., 1981. Source of additional phosphorus absorbed from soil by vesicular-arbuscular mycorrhizal soybeans. *Physiol. Vg.* **16**. 33–34.
- GRINSTEAD, M. J. et al., 1982. Plant induced changes in the rhizosphere of rape. I. pH change and the increase in P concentration in the soil solution. *New Phytol.* **91**. 19–29.
- GUISSOU, T. et al., 1999. Rock phosphate and vesicular-arbuscular mycorrhiza effects on growth and mineral nutrition of *Zizyphus mauritiana* Lam. in an alkaline soil. *Ann. Sci. For.* **55**. 925–931.
- HAGIN, J. & KATZ, S., 1985. Effectiveness of partially acidulated phosphate rock as a P source to plants in calcareous soils. *Fert. Res.* **8**. 117–128.
- HAMMOND, L. L., CHIEN, S. H. & MOKWUNYE, A. U., 1986. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. *Adv. Agron.* **40**. 89–140.

- HAMMOND, L. L., MENON, R. G. & SISSINGH, H. A., 1985. Determination of plant available phosphorus by the P_i soil test. *Agron. Absts.* 173.
- HAYNES, R. J., 1992. Relative ability of a range of crop species to use phosphate rock and monocalcium phosphate as P sources when grown in soils. *J. Sci. Food Agric.* **74**, 1–7.
- HEDLEY, M. J. & BOLAN, N. S., 1997. Developments in some aspects of reactive phosphate rock research and use in New Zealand. *Australian J. Experimental Agriculture*, **37**, 861–884.
- HEDLEY, M. J., NYE, P. H. & WHITE, R. E., 1982. Plant induced changes in the rhizosphere of rape. II. Origin of the pH change. *New Phytol.* **91**, 31–44.
- HEDLEY, M. J. et al., 1995. Phosphorus fertility management in agroecosystems. In: *Phosphorus in the Global Environment*. (Ed.: TISSEN, H.) 59–62. Scope, John Wiley & Sons, Ltd. New York.
- HINSINGER, P. & GILKES, R. J., 1995. Root-induced dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of lupins grown in alkaline soil. *Aust. J. Agric. Res.* **33**, 477–489.
- HINSINGER, P. & GILKES, R. J., 1996. Root-induced mobilisation of phosphate from phosphate rock and alumina-sorbed phosphate by the roots of ryegrass and clover as related to rhizosphere pH. *Eur. J. Soil Sci.* **47**, 533–544.
- HINSINGER, P. & GILKES, R. J., 1997. Dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of five plant species grown in an acid, P-fixing mineral substrate. *Geoderma*, **75**, 231–239.
- HOFFLAND, E., 1992. Quantitative evaluation of the role of organic acid exudation in the mobilisation of rock phosphate by rape. *Plant and Soil*, **140**, 279–289.
- HOFFLAND, E., FINDENEGG, G. R. & NELEMANS, J. A., 1989a. Solubilization of rock phosphate by rape I. Evaluation of the role of the nutrient uptake pattern. *Plant and Soil*, **113**, 155–160.
- HOFFLAND, E., FINDENEGG, G. R. & NELEMANS, J. A., 1989b. Solubilization of rock phosphate by rape. II. Local root exudation of organic acids as response to P-starvation. *Plant and Soil*, **113**, 161–165.
- HOUBA, V. J. G. et al., 1986. Comparison of soil extractions by 0.01 M $CaCl_2$, by EUF and by some conventional extraction procedures. *Plant and Soil*, **96**, 433–477.
- INDIATI, R. et al., 2001. Effect of time, fertilizer phosphorus sources and fertilization systems on phosphorus extractability of two soils from Hungary. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **33**, 545–560.
- ISOBE, K. & TSUBOKI, Y., 1998. The relationship between growth promotion by arbuscular mycorrhizal fungi and root morphology and phosphorus absorption in gramineous and leguminous crops. *Japan. J. Crop Sci.* **67**, 347–352.
- JAKOBSEN, I., ABBOTT, L. K. & ROBSON, A. D., 1992. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. I. Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots. *New Phytol.* **120**, 371–380.
- JAYACHANDRAN, K., SCHWAB, A. P. & HETRICK, B. A. D., 1992. Mineralization of organic phosphorus by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* **24**, 897–903.
- JÁSZBERÉNYI, I., LOCH, J. & SARKADI, J., 1994. Experiences of 0.01 M calcium-chloride extraction as soil testing procedure in Hungary. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **25**, 1771–1777.
- JONES, J. B. JR., 1997. Soil test methods; past, present and future use of soil extractants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **29**, 1543–1552.
- KANABO, I. A. K. & GILKES, R. J., 1987. The influence of the addition of goethite to soil on the dissolution of North Carolina phosphate rock. *Aust. J. Soil Res.* **25**, 313–322.
- KANABO, I. A. K. & GILKES, R. J., 1988. The effects of moisture regime and incubation time on the dissolution of North Carolina phosphate rock in soil. *Aust. J. Soil Res.* **25**, 153–164.
- KATO, N., ZAPATA, F. & AXMANN, H., 1995. Evaluation of the agronomic effectiveness of natural and partially acidulated phosphate rocks in several soils using ^{32}P isotopic dilution techniques. *Fert. Res.* **41**, 235–242.
- KHASAWNEH, F. E. & DOLL, E. C., 1978. The use of phosphate rock for direct application. *Adv. Agron.* **30**, 159–206.

- KIRK, G. J. D., 1999. A model of phosphate solubilization by organic anion excretion by plant roots. *Eur. J. Soil Sci.* **50**. 369–378.
- KIRK, G. J. D. & NYE, P. H., 1986a. A simple model for predicting the rates of dissolution of sparingly soluble calcium phosphates in soil. I. The basic model. *J. Soil Sci.* **37**. 529–540.
- KIRK, G. J. D. & NYE, P. H., 1986b. A simple model for predicting the rates of dissolution of sparingly soluble calcium phosphates in soil. II. Applications of the model. *J. Soil Sci.* **37**. 541–553.
- KRÁMER M., 1962. Adatok az északafrikai (Hyper) és izráeli (Cyklon) foszfátok műtrágyahatásáról. I. Az oldhatóság laboratóriumi vizsgálata. *Agrokémia és Talajtan.* **11**. 345–354.
- KRÁMER M., 1963. Adatok az északafrikai (Hyper) és izráeli (Cyklon) foszfátok műtrágyahatásáról. II. Szemcsefinomság és fajlagos felület vizsgálata. *Agrokémia és Talajtan.* **12**. 275–283.
- KRÁMER M. & LAMBERGER I., 1965. Hazai adatok a nyersfoszfátok érvényesüléséről. *MTA Agrártud. Oszt. Közlem.* 119–124.
- KREYBIG L., 1949. Az istállótrágya foszforsavas erjesztése. *Agrártudomány.* **1**. 609–617.
- KUCEY, R. & BOLE, J., 1984. Availability of phosphorus from 17 rock phosphates in moderately and weakly acidic soils as determined by ^{32}P dilution, E value, and total P uptake methods. *Soil Sci.* **138**. 180–188.
- KUMAR, V., GILKES, R. J. & BOLLAND, M. D. A., 1991. Residual phosphate fertilizer compounds in soils: Their influence on soil tests for available phosphate. *Fertilizer Res.* **30**. 31–38.
- KUMAR, V., GILKES, R. J. & BOLLAND, M. D. A., 1992. A comparison of seven soil P tests for plant species with different external P requirements grown on soils containing rock phosphate and superphosphate residues. *Fert. Res.* **33**. 35–45.
- LEHR, J. R., 1980. Phosphate raw materials and fertilizers: Part I. A look ahead. In: *The Role of Phosphorus in Agriculture* (Eds.: KHASAWNEH, F. E., SAMPLE, E. C. & KAMPRATH, E. J.) 81–120. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI.
- LEHR, J. R. & MCCLELLAN, G. H., 1972. A revised laboratory reactivity scale for evaluating phosphate rocks for direct application. *Bull. Y43., Nat. Fert. Develop. Center. TVA.*
- LOGANATHAN, P., HEDLEY, M. J. & BRETHERTON, M. R., 1994. The agronomic value of co-granulated Christmas island grade C phosphate rock and elemental sulphur. *Fert. Res.* **39**. 22–237.
- LOUIS, P. L., 1993. Availability of fertilizer raw materials. *The Fertility Society Proc.* No. 336. Peterborough, England.
- MACKAY, A. D., SYERS, J. K. & GREGG, P. E. H., 1984. Ability of chemical extraction procedures to assess the agronomic effectiveness of phosphate rock materials. *New Zealand J. Agric. Res.* **27**. 219–230.
- MACKAY, A. D. & WEWALA, G. S., 1990. Evaluation of partially acidulated phosphate fertilizers and reactive phosphate rocks for hill pastures. *Fert. Res.* **21**. 149–156.
- MACKAY, A. D. et al., 1984. A comparison of 3 soil testing procedures for estimating the plant availability of phosphorus in soils receiving either superphosphate or phosphate rock. *New Zealand J. Agric. Res.* **27**. 231–245.
- MACKAY, A. D. et al., 1986. A simple model to describe the dissolution of phosphate rock in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **50**. 291–296.
- MAHISARAKUL, J. et al., 2002. Field assessment of the relative agronomic effectiveness of phosphate rock materials in soybean–maize crop rotation using ^{32}P isotope techniques. In: *Assessment of Soil Phosphorus Status and Management of Phosphatic Fertilisers to Optimise Crop Production*. 437–449. IAEA–TEDOC-1272.
- MANJUNATH, A., HUE, N. V. & HABTE, M., 1989. Response of *Leucaena leucephala* to vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization and rock phosphate fertilization in an Oxisol. *Plant and Soil.* **114**. 127–133.
- MARSCHNER, H., 1997. The soil–root interface (rhizosphere) in relation to mineral nutrition. In: *Mineral Nutrition of Higher Plants*. (Ed.: MARSCHNER, H.) 537–596. Acad. Press. London.

- MÁRTONFFY T. & PEKÁRY K., 1978. Az egyedi és összetett műtrágyák, valamint a hyperfoszfát tápanyag-hatásának összehasonlítása az Egységes Országos Műtrágyázási Tartamkísérletek keretében. *Növénytermelés*. **27**. 247–254.
- MCCLELLAN, G. H. & GREMILLION, L. R., 1980. Evaluation of phosphate raw materials. In: *The Role of Phosphorus in Agriculture*. (Eds.: KHASAWNEH, F. E., SAMPLE, E. C. & KAMPRATH, E. J.) 42–80. ASA–CSSA–SSSA. Madison, WI.
- MCLAUGHLIN, M. J., 2002a. The Australian reactive phosphate rock project – aims, experimental approach and site characteristics. In: *Assessment of Soil Phosphorus Status and Management of Phosphatic Fertilisers to Optimise Crop Production*. 304–317. IAEA–TEDOC-1272.
- MCLAUGHLIN, M. J., 2002b. Measuring P availability in soils fertilized with water-soluble P-fertilizers using ^{32}P methodologies. In: *Assessment of Soil Phosphorus Status and Management of Phosphatic Fertilisers to Optimise Crop Production*. 331–341. IAEA–TEDOC-1272.
- MENDOZA, R. E. & PAGANI, E. A., 1997. Influence of phosphorus nutrition on mycorrhizal growth response and morphology of mycorrhizae in *Lotus tenuis*. *J. Plant Nutr.* **20**. 625–639.
- MENON, R. G. & CHIEN, S. H., 1990. Phosphorus availability to maize from partially acidulated phosphate rocks and phosphate rocks compacted with triple superphosphate. *Plant and Soil*. **127**. 123–128.
- MENON, R. G. & CHIEN, S. H., 1995. Soil testing for available phosphorus in soils where phosphate rock-based fertilisers are used. *Fert. Res.* **41**. 179–187.
- MENON, R. G., CHIEN, S. H. & HAMMOND, L. L., 1990. Development and evaluation of the Pi soil test for plant-available phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **21**. 1131–1150.
- MENON, R. G., HAMMOND, L. L. & SISSINGH, H. A., 1988. Determination of plant available phosphorus by the iron hydroxide-impregnated filter paper soil test. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **52**. 110–115.
- MOKWUNYE, A. U. & CHIEN, S. H., 1980. Reactions of partially acidulated phosphate rock with soils from the tropics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44**. 477–482.
- NÉMETH, T. & OSZTOICS, E., 1997. Effect of different phosphorus fertilizer sources on red clover in a pot experiment with six acidic soils. In: *Fertilization for Sustainable Plant Production and Soil Fertility. Proc. 11th Int. World Fertilizer Congress CIEC* (Eds.: VAN CLEEMPUT, O. et al.) 419–427. Gent, Belgium.
- NÉMETH, T., OSZTOICS, E. & BACZÓ, GY., 1995. Effect of different P-sources on spring barley in a pot experiment with six acid soils. In: *Soil Fertility and Fertilizer Management. Proc. 9th Int. Symp. CIEC* (Eds.: WELTE, E. et al.) 99–106. Kusadasi, Turkey.
- NÉMETH, T. et al., 2001. Long-term field evaluation of phosphate rock and superphosphate use strategies in acid soils of Hungary: Two comparative field trials. *Nutrient Cyclings in Agro-Ecosystems*. **59**. (In print)
- NÉMETH, T. et al., 2002. Long term field evaluation of phosphate rock and superphosphate in acid soils of Hungary: incubation and pot experiments. In: *Assessment of Soil Phosphorus Status and Management of Phosphatic Fertilisers to Optimise Crop Production*. 450–467. IAEA–TEDOC-1272.
- NYE, P. H., 1979. Diffusion of ions and uncharged solutes in soils and soil clays. *Adv. Agron.* **31**. 225–272.
- OLSEN, S. R. et al., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. US Dept. Agric. Circular No. 939. Washington, D. C.
- OSZTOICS A.-NÉ & VARRÓ T., 1986a. A talaj izotóposan kicserélhető foszfortartalmának meghatározása. *Agrokémia és Talajtan*. **35**. 255–273.
- OSZTOICS A.-NÉ & VARRÓ T., 1986b. Foszfor izotópcseré kinetikája talajokon. *Agrokémia és Talajtan*. **35**. 277–291.
- OSZTOICS A.-NÉ, CSATHÓ P. & NÉMETH T., 1997. Az algériai nyersfoszfát és a szuperfoszfát hatásának vizsgálata. I. A foszfortrágyák összehasonlító vizsgálata a tavaszi árpa termésére és

- foszfortartalmára tenyészedény-kísérletben különböző talajokon. *Agrokémia és Talajtan*. **46**. 289–310.
- OSZTOICS A.-NÉ, RADIMSZKY L. & NÉMETH T., 2000. Szuperfoszfát és nyersfoszfát hatása két hazai talaj víz- és AL-oldható P-tartalmára inkubációs kísérletben. *Agrokémia és Talajtan*. **49**. 107–126.
- OSZTOICS A.-NÉ et al., 2001. Az algériai nyersfoszfát és a szuperfoszfát hatásának vizsgálata. II. A foszfortrágyák hatása a vöröshere termésére és foszfortartalmára tenyészedény-kísérletben. *Agrokémia és Talajtan*. **50**. 247–266.
- PERROTT, K. W., SAGGAR, S. & MENON, R. G., 1993. Evaluation of soil phosphate status where phosphate rock based fertilizers have been used. *Fertilizer Res.* **35**. 67–82.
- PÉTERFALVI A., DEBRECENI B. & BÉSÁN J.-NÉ, 1988. Nyersfoszfáttartalmú szuperfoszfátok. *Agrokémia és Talajtan*. **36-37**. 313–322.
- PAGE, A. L. & CHANG, A. C., 1978. Trace elements impact on plants during cropland disposal of sewage sludges. In: *Effect of Heavy Metal Pollution on Plants*. Vol. 1. *Effect of Trace Metals on Plant Function*. (Ed.: LEPP, N. W.) 77–109. *Applied Sci. Publ.* London–New Jersey.
- POSTA K., 1997. Az endomikorrhiza szerepe a környezeti stresszhatások kivédésében. *Agrokémia és Talajtan*. **46**. 359–370.
- RAJAN, S. S. S., 1981. Use of low grade phosphate rocks as biosuper fertilizers. *Fertilizer Res.* **2**. 199–210.
- RAJAN, S. S. S., WATKINSON, J. H. & SINCLAIR, A. G., 1996. Phosphate rocks for direct application to soils. *Adv. Agron.* **57**. 77–159.
- RAJAN, S. S. S. et al., 1991. Influence of pH, time and rate of application on phosphate rock dissolution and availability to pastures. II. Soil chemical studies. *Fert. Res.* **28**. 95–101.
- RAJAN, S. S. S. et al., 1992. Extractable phosphorus to predict agronomic effectiveness of ground and unground phosphate rocks. *Fert. Res.* **32**. 291–302.
- ROBINSON, J. S. & SYERS, J. K., 1990. A critical evaluation of the factors influencing the dissolution of gafsa phosphate rock. *J. Soil Sci.* **41**. 597–605.
- RÖMHELD, V., 1986. pH-Veränderungen in der Rhizosphäre verschiedener Kulturpflanzenarten in Abhängigkeit vom Nährstoffangebot. *Potash Rev.* **55**. 1–8.
- RYAN, M. H., CHILVERS, G. A. & DUMARESQ, D. C., 1994. Colonisation of wheat by VA-mycorrhizal fungi was found to be higher on a farm managed in an organic manner than on a conventional neighbour. *Plant and Soil* **160**. 33–40.
- SAGGAR, S., HEDLEY, M. J. & WHITE, R. E., 1990. A simplified resin membrane technique for extracting phosphorus from soil. *Fertilizer Res.* **24**. 173–180.
- SAGGAR, S., HEDLEY, M. J. & WHITE, R. E., 1992a. Development and evaluation of an improved soil test for phosphorus: 1. The influence of phosphorus fertilizer solubility and soil properties on the extractability of soil P. *Fertilizer Res.* **33**. 81–91.
- SAGGAR, S. et al., 1992b. Development and evaluation of an improved soil test for phosphorus: 2. Comparison of Olsen and mixed cation–anion exchange resin tests for predicting the yield of ryegrass grown in pots. *Fertilizer Res.* **33**. 135–144.
- SAIF, S. R., 1986. Vesicular-arbuscular mycorrhizae in tropical forage species as influenced by season, soil texture, fertilizers, host species and ecotypes. *Angew. Botanik*. **60**. 125–139.
- SANDERS, F. E. & TINKER, P. B., 1971. Mechanism of absorption of phosphate from soil by *Endogone mycorrhizas*. *Nature*. **233**. 278–279.
- SARKADI J., 1960. Kísérletek különféle foszfátműtrágyákkal. *Növénytermelés*. **9**. 159–167.
- SARKADI, J., THAMM, B. & PUSZTAI, A., 1984. Possibility of the application of AL-P-values corrected by some soil characteristics for the estimation of the P-availability in soils. In: *CIEC 9th World Fertilizer Congress. Proc.* Vol. 2. 319–323. Goeltze Druck. Göttingen.
- SIDLAUSKAS, G., MASAUŠKAS, S. & EZERINSKAS, V., 2002. Liming effect on P availability from Maardu phosphate rock. In: *Assessment of Soil Phosphorus Status and Management of Phosphatic Fertilisers to Optimise Crop Production*. 440–450. IAEA–TEDOC-1272.

- SIEVERDING, E., 1991. Manipulation of indigenous VAM fungi through agronomic practices. In: Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza Management in Tropical Agrosystems. (Ed.: SIEVERDING, E.) 117–185. Eschborn.
- SIK, K., 1964. Vergleichende Dauerversuche mit feingranulierten Rohphosphaten auf drei Bodentypen in Ungarn. *Agrokémia és Talajtan*. **13**. Suppl. 139–146.
- SIKORA, F. J. & GIORDANO, P. M., 1995. Future directions for agricultural phosphorus research. *Fertilizer Res.* **41**. 167–178.
- SINCLAIR, A. G. et al., 1993. Agronomy modelling and economics of reactive phosphate rocks as slow-release phosphate fertilizers for grasslands. *Fertilizer Res.* **36**. 229–238.
- SISSINGH, H. A., 1971. Analytical technique of the Pw method, used for the assessment of the phosphate status of arable soils in the Netherlands. *Plant and Soil*. **34**. 483–486.
- SISWORO, E. L. et al., 2002. Direct use of phosphate rock to improve crop production in Indonesia. In: Assessment of Soil Phosphorus Status and Management of Phosphatic Fertilisers to Optimise Crop Production. 275–293. IAEA-TEDOC-1272.
- SMANI, M. S., 1992. Elimination du cadmium de l'acide phosphorique. In: Proc. 4th Int. IMPHOS Conference: Phosphorus, Life and Environment. 483–498. Ghent, Belgium.
- SMITH, A. N., POSNER, A. M. & QUIRK, J. P., 1977. A model describing the kinetics of dissolution of hydroxyapatite. *J. Colloid Interface Sci.* **62**. 475–494.
- SMITH, S. E. & GIANINAZZI-PEARSON, V., 1988. Physiological interactions between symbionts in vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Biol.* **39**. 221–244.
- SOMASIRI, L. L. W. & EDWARDS, A. C., 1992. An ion exchange resin method for nutrient extraction of agricultural advisory soil samples. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **23**. 645–657.
- TARAFDAR, J. C. & MARSCHNER, H., 1994. Phosphatase activity in the rhizosphere and hyposphere of VA mycorrhizal wheat supplied with inorganic and organic phosphorus. *Soil. Biol. Biochem.* **26**. 387–395.
- TATÁR L.-NÉ & MÁRTON Á., 1982. Különböző foszfortrágyák hatása a talaj foszfortartalmára és a kukoricánövény foszforfrakcióira. III. Terméseredmények, foszforhatások. *Agrokémia és Talajtan*. **31**. 29–36.
- THAMM F.-NÉ, 1980. Az AL-P értékek korrigálása néhány talajtulajdonság figyelembevételével. *Agrokémia és Talajtan*. **29**. 473–496.
- THOMPSON, J. P., 1996. Correction of dual phosphorus and zinc deficiencies of linseed (*Linum usitatissimum* L.) with cultures of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biol. Biochem.* **28**. 941–951.
- TINKER, P. B., JONES, M. D. & DURALL, D. M., 1992. A functional comparison of ecto- and endomycorrhizas. In: Mycorrhizas in Ecosystems (Eds.: READ, D. J. et al.) 303–310. CAB International. Wallingford. UK.
- VAN DER PAAUW, F., 1971. An effective water extraction method for the determination of plant-available soil phosphorus. *Plant and Soil*. **34**. 467–481.
- VAN ERP, P. J., HOUBA, V. J. G. & VAN BEUSICHEM, M. L., 1998. One hundredth molar calcium chloride extraction procedure. Part I: A review of soil chemical, analytical, and plant nutritional aspects. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **29**. 1603–1623.
- VANLAUWE, B. et al., 2000. Utilization of rock phosphate by crops on a representative toposequence in the Northern Guinea savanna zone of Nigeria: response by *Mucuna pruriens*, *Lablab purpureus* and maize. *Soil Biol. Biochem.* **32**. 2063–2077.
- VÁRALLYAY GY. et al., 1980. Magyarország termőhelyi adottságait meghatározó talajtani tényezők 1: 100 000 méretarányú térképe. *Agrokémia és Talajtan*. **29**. 35–76.
- VÁRALLYAY, GY. et al., 1993. Map of the susceptibility of soils to acidification in Hungary. *Agrokémia és Talajtan*. **42**. 35–42.
- VÉGH, K. R. & FÜLEKY, Gy., 1994. Phosphate transport to roots in soils with different moisture content and texture. In: Proc. ESA 3rd Congress (Eds.: BORIN, B. & SATTIN, M.) 550–551. Padova-Abano.

- VÉGH, K. R., FÜLEKY, G. & VARRÓ, T., 1990. Phosphorus diffusion to barley roots as influenced by moisture and phosphorus content of soils. In: Plant Nutrition – Physiology and Applications. (Ed.: VAN BEUSICHEM, M. L.) 147–151. Kluwer. Wageningen.
- WATKINSON, J. H., 1994a. A test for phosphate rock reactivity in which solubility and size are combined in a dissolution rate function. *Fert. Res.* **39**. 205–215.
- WATKINSON, J. H., 1994b. Modelling the dissolution rate of reactive phosphate rock in New Zealand pastoral soils. *Aust. J. Soil Res.* **32**. 739–753.
- WATKINSON, J. H., 1994c. Dissolution rate of phosphate rock particles having a wide range of sizes. *Aust. J. Soil Res.* **32**. 1009–1014.
- WILSON, M. A. & ELLIS, B. G., 1984. Influence of calcium solution activity and surface area on the solubility of selected rock phosphates. *Soil Sci.* **138**. 354–359.
- WRIGHT, R. J., BALIGAR, V. C. & BELESKY, D. P., 1992. Dissolution of North Carolina phosphate rock in soils of the Appalachian region. *Soil Sci.* **153**. 25–36.
- XIONG, L. M., ZHOU, Z. G. & LU, R. K., 1996. Enhanced plant growth by uniform placement of superphosphate with rock phosphate in acidic soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **27**. 2837–2850.
- YANG, X. et al., 1994. Effects of organic manure on solubility and mobility of different phosphate fertilizers in two paddy soils. *Fert. Res.* **38**. 233–238.
- ZAHARAH, A. R. & BAH, A. R., 1997. Effect of green manures on P solubilization and uptake from phosphate rocks. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. **48**. 247–255.
- ZAHARAH, A. R. & SHARIFUDDIN, H. A. H., 2002. Phosphorus availability in acid tropical soil amended with phosphate rocks. In: Assessment of Soil Phosphorus Status and Management of Phosphatic Fertilisers to Optimise Crop Production. 294–303. IAEA-TEDOC-1272.
- ZAPATA, F. & AXMANN, H., 1995. ³²P isotopic techniques for evaluating the agronomic effectiveness of rock phosphate materials. *Fertilizer Res.* **41**. 189–195.
- ZOYSA, A. K. N., LOGANATHAN, P. & HEDLEY, M. J., 1998. Phosphate rock dissolution and transformation in the rhizosphere of tea (*Camellia sinensis* L.) compared with other species. *Eur. J. Soil Sci.* **49**. 477–486.
- ZOYSA, A. K. N., LOGANATHAN, P. & HEDLEY, M. J., 1999. Phosphorus utilisation efficiency and depletion of phosphate fractions in the rhizosphere of three tea (*Camellia sinensis* L.) clones. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **53**. 189–201.

Érkezett: 2002. augusztus 30.

OSZTOICS ERZSÉBET, MAGYAR MARIANNA,
RAJKAINÉ VÉGH KRISZTINA, CSILLAG JULIANNA,
TAKÁCS TÜNDE és CSATHÓ PÉTER

MTA Talajtani és Agrokémiai
Kutatóintézete, Budapest

Postai cím: OSZTOICS ERZSÉBET, MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézete, 1022 Budapest, Herman Ottó út 15. E-mail: zsoka@rissac.hu