

A talaj szorpcióval kötött foszfortartalmának tanulmányozása adszorpció és többlépéses deszorpció vizsgálatokkal

Tolner László, Fülekgy György

Összefoglaló

A talajba juttatott vízben jól oldható formájú foszfátok jelentős része megkötődik a talaj szilárd fázisán. A kötés különböző mértékben reverzibilis. A reverzibilitás időben is változik. A talaj folyékony és szilárd fázisa közötti megoszlás reverzibilis része egyszerű adszorpció folyamatként kezelhető, a folyamat adszorpció izoterma modellekkel leírható. Az irreverzibilis folyamatok miatt az adszorpció során megismerhető egyensúlyokból számítható adszorpció modell csak korlátozottan használható a deszorpció folyamat leírására is.

Vizsgálataink során a többlépéses deszorpció vizsgálatokkal kapott deszorbeálható Q_0 értékek a kezelés mértékétől függően egyre nagyobb mértékben meghaladják az adszorpció összefüggések 0 egyensúlyi oldatra extrapolált értékeiként kapott Q_0 értékeket. Az eltérés oka a két vizsgálati metodika közötti eltérésekből fakad. A többlépéses deszorpció során olyan foszfor mennyiségek is oldatfázisba jutnak, amelyek eredetileg kötöttebb fázisban voltak. Az eltérések ellenére mindkét adat értékes. Az adszorpcióval meghatározott érték a pillanatnyi foszforszolgáltatás lehetőségéről informál, míg a többlépéses deszorpcióval kapott érték a hosszútávon felszabaduló tartós tápanyag-szolgáltató képességet közelíti. Ez utóbbi fontos akkor is, amikor a talaj foszfortartalmát, mint környezet számára potenciális veszélyforrást vizsgáljuk (eutrofizáció).

Bevezetés

A talajba juttatott vízben jól oldható formájú foszfátok jelentős része megkötődik a talaj szilárd fázisán. Ennek egy része reverzibilis adszorpciót jelent, más része viszont nehezen mobilizálható formában a beépül a talaj szilárd fázisába (Potarski et al., 1999). Mindkét megkötődés függ az oldatban hozzáadott foszfátok koncentrációjától. Az adszorpció megkötődés leírására adszorpció izoterma modelleket használnak. Leggyakrabban a Langmuir és a Freundlich izotermát használják. Különböző talajok, illetve azok különbözőképpen kezelt formáin tapasztalható adszorpció jelenségek összehasonlítására célszerű a lehető legkevesebb paraméterű összefüggést használni. Tolner és Fülekgy (1995) foszfátok talajon való megkötődésére legalkalmasabbnak találták olyan 1/3 kitevőjű adszorpció izoterma alkalmazását, amely az eredetileg adszorpciósan kötött állapotú foszfor mennyiségét (Q) is tartalmazza.

$$P_{\text{adsz.}} = k \cdot c^{1/3} + Q$$

A Q értékét ioncserélő műgyanta segítségével (Fitter and Sutton, 1975, Tolner and Fülekgy, 1987, Duffera and Robarge, 1999), az izotóposan kicserélhető foszfortartalommal E érték (Olsen and

Watanabe 1957, Bache and Williams 1971) - esetleg az Olsen módszer segítségével (Nychas 1982) lehet - az adszorpciós izotermától független mérés vagy mérések során meghatározni.

A Q értékét az adszorpciós görbe 0 egyensúlyi koncentrációra való extrapolációjával is ki lehet számolni (Fitter and Sutton 1975, Rheinheimer et al., 2003, Füleky et al., 2006, Gustafsson et al., 2012). Az így meghatározott Q értékét erősen befolyásolja az, hogy milyen modellt alkalmazunk (Barrow 1978). Mivel a talajon megkötődött mennyiségét az oldatkonzentráció változásából számítjuk ezért mind a független, mind a függő változó ugyanazzal a hibával terhelt. Ez jelentősen befolyásolja a modellillesztés megbízhatóságát (Tellinghausen and Bloster, 2010). Hartikainen (1991) alacsony koncentrációjú foszfátoldatokkal végzett adszorpció esetén lineáris összefüggést kapott. Így a Q számítását lineáris extrapolációval oldotta meg.

A több lépéses deszorpciót szemléltethetjük kumulatív görbe segítségével. Ekkor az adott lépésben és a korábbi lépések során oldatba jutó foszfor mennyiségének összegét ábrázoljuk az egyes lépésekben kialakuló egyensúlyi oldat foszforkonzentrációjának függvényében. Az így nyert pontokra formálisan Langmuir izoterma összefüggés illeszthető (Fried & Shapiro, 1956).

Valódi deszorpciós izotermát úgy kaphatunk, ha az oldatba jutó mennyiséggel csökkentett talajfoszfor-mennyiséget ábrázoljuk az egyensúlyi oldat foszfor koncentrációjának függvényében (Tolner et al., 1996, Füleky et al., 2006).

$$Q - \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{S} = k * c_n^{\frac{1}{3}}$$

Ha előzőleg adszorpciót végeztünk, és az adszorbeálódott mennyiség visszanyerésére többlépéses deszorpciót végzünk, akkor a deszorpció egyes lépéseit jellemző pontok rendre az adszorpciós izoterma felett helyezkednek el. Ennek Kafkai és munkatársai (1967) szerint az az oka, hogy az adszorpció során a talajra kerülő foszformennyiség egy része erősebben kötött állapotba kerül, így nem vesz részt az egyensúlyi állapot kialakításában. Ez a távolság az adszorpciós és deszorpciós görbék között elhanyagolhatóvá válik, ha a két folyamat között csak 12 óra telik el, illetve, ha ez az időtartam nem haladja meg az öt napot (Muljadi et al, 1966). Barrow és Shaw (1975) vitatják azt, hogy a deszorpciós lépések során nem kerülhet további számottevő mennyiségű foszfor erősebben kötött állapotba. A megkötődés mértéke függ a folyamat időtartamától, és már akkor is jelentős lehet, ha az adszorpció és a deszorpció között két nap telik el. A több lépéses deszorpció modellezésére Freundlich izoterma összefüggések olyan kombinációját használták, amely figyelembe veszi a szorpciónál lassabban lejátszódó megkötődés folyamatát is.

Okajima és munkatársai (1983) a deszorpció reverzibilitását, az adszorpció és deszorpció folyamatok hiszterizisét vizsgálták. A talaj foszfortartalmának csökkenését az egyensúlyi koncentráció logaritmusának függvényében ábrázolták. Közelítőleg egyeneseket kaptak, amelyek meredeksége jellemző volt a folyamat reverzibilitására.

Anyag és módszer

A modell kipróbálásához szükséges foszforszorpciós kísérletet Orosházáról származó Mélyben szolonyeces csernozjom talaj szántott rétegéből vett mintával végeztük. A talaj vizes pH-ja 7.1, kalcium-

karbonát-tartalma 1,7%, humusztartalma 3,7%. Fizikai félesége vályog. Foszfortartalma Olsen szerint 8,2 mg.kg⁻¹, izotópos E értéke 17,2 mg.kg⁻¹. A talajmintát különböző (0, 40, 80, 160, és 320 µg.g⁻¹ P) foszforkezelést követően szobahőmérsékleten hét hónapig nedvesen (szántóföldi vízkapacitáson) érleltük.

Az érlelt talajmintákat különböző mennyiségű kálium-dihidrogén-foszfáttal készített oldatokkal (0, 40, 80, 160 és 320 µg.g⁻¹ P) 1:10 arányú vizes szuszpenzióban 24 órás rázatással egyensúlyba hoztuk. A talajt a vizes fázistól centrifugálással választottuk el. Az oldatkonzentrációk alapján értékeltük az adszorpciót. A centrifugálással elválasztott talajmintákon többlépéses deszorpciós vizsgálatokat végeztünk.

A deszorpciós vizsgálat során a talajmintához 1:10 arányban desztillált vizet adtunk, majd 24 órás rázatással egyensúlyba hoztuk. A talajt a vizes fázistól szintén centrifugálással választottuk el. A folyamatot a talajmintákkal 19-szer megismételtük.

A kísérlet felépítése az 1. táblázatban látható.

1. táblázat. Az adszorpciós, majd az azt követő deszorpciós kísérlet felépítése

Előzetes P kezelés, 7 hónap érlelés	0 µg/g	40 µg/g	80 µg/g	160 µg/g	320 µg/g
Friss P adszorpció	0 µg/g	0 µg/g	0 µg/g	0 µg/g	0 µg/g
	40 µg/g	40 µg/g	40 µg/g	40 µg/g	40 µg/g
	80 µg/g	80 µg/g	80 µg/g	80 µg/g	80 µg/g
	160 µg/g	160 µg/g	160 µg/g	160 µg/g	160 µg/g
	320 µg/g	320 µg/g	320 µg/g	320 µg/g	320 µg/g

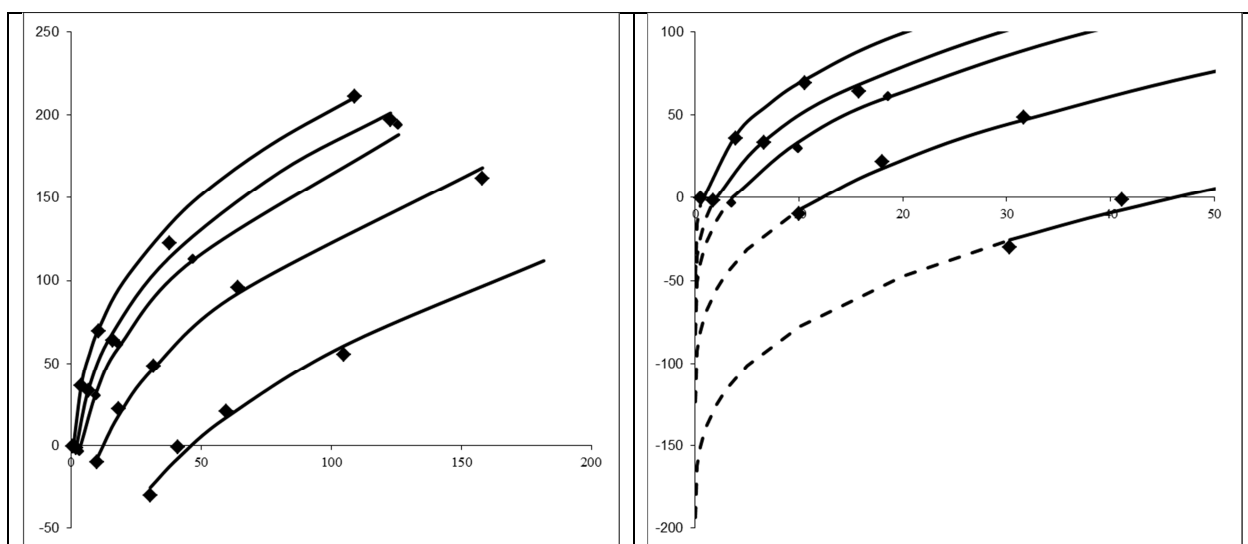
Az egyensúlyi oldatok foszfortartalmát Murphy and Riley (1962) módszerrel határoztuk meg.

Az eredmények és értékelésük

Munkánk során kétféleképpen közelítjük meg méréssel számítással a talajon a korábbi kezelés hatására kialakult szorpciós kötésben levő foszfor mennyiségét. Az egyik a friss kezelésekkel felvett adszorpciós összefüggések 0 egyensúlyi oldatra extrapolált értékei (adsz.Q₀), a másik a többlépéses deszorpciós vizsgálatok során kapott deszorbeálható Q₀ (desz.Q₀) értékek.

Adszorpciós vizsgálatok

Az adszorpciós vizsgálat során a különböző korábbi P kezelések (0, 40, 80, 160, 320 µg/g) hatására létrejött eltérő mennyiségű kötött foszfort tartalmazó talajokon különböző koncentrációjú kiindulási oldatok segítségével adszorpciós izotermákat veszünk fel. Az adszorpciós izotermák a korábbi kezeléstől függően különböző egyensúlyi koncentráció értékeknél metszik az x tengelyt (1. ábra, bal oldal).



1. ábra. Adszorpciós izotermák (bal oldal). Az adszorpciós izotermák kezdeti szakasza (jobb oldal) és extrapolálása (szaggatott vonal)

0 egyensúlyi koncentrációra extrapolálva megkapjuk az adszorbeált állapotban levő foszfor mennyiségét (1. ábra, jobb oldal). Az extrapolációval kapott y tengelymetszetek (adsz.Q₀) értékek jelentősen függnék az extrapoláláskor alkalmazott modellfüggvénytől. Korábbi munkánk során nagyszámú különböző talaj vizsgálatával az 1/3 kitevőjű Freundlich izotermát találtuk a legkedvezőbbnek (Tolner and Füleky 1995).

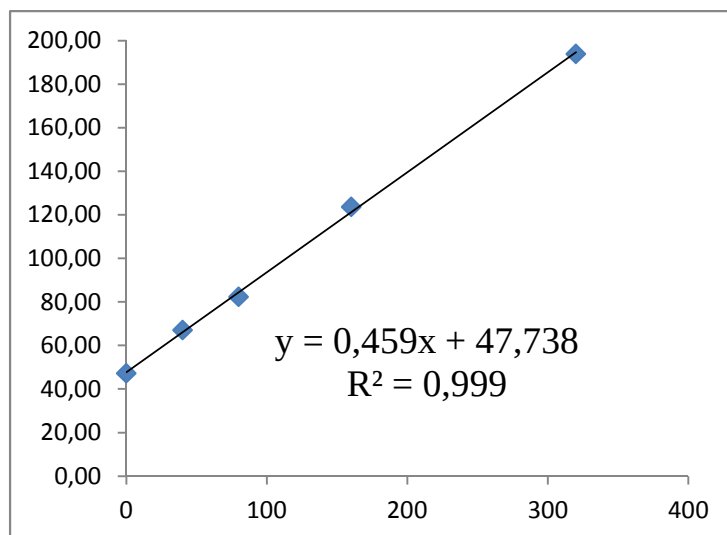
$$y = k \cdot c^{1/3} + Q_0$$

A függvény illesztésekor megkapott Q₀ érték az c=0 értékhez tartozó extrapolált y tengelymetszet (adsz.Q₀) (Füleky and Tolner 2006). Mind az 5 mérésre elvégezve a regresszió-számítást nagyon hasonló k értékeket kaptunk (47, 49, 57, 52, 62). A Q₀ értékek összehasonlíthatósága érdekében célszerűnek látszott korábbi kezeléstől független közös k értéket használni a modellekben, hogy az eltérések csak a Q₀ értékekben jelentkezzenek. Ez nem okozott jelentős hibát, mivel a közös illesztés összesített szórása 1,7-nek adódott illetve a mért és számított értékek közötti összefüggés meredeksége 0,9983, valamint a determinációs koefficiens R²=0,9967. A közös k érték 53,98-nak adódott. Az adszorpcióval meghatározott adsz.Q₀ értékek az 2. táblázatban találhatók.

2. táblázat. Az adszorpcióval meghatározott adsz.Q₀ értékek (µg/g P)

Korábbi kezelés P	0	40	80	160	320
Adsz.Q ₀	47,3	67,1	82,3	123,7	193,8

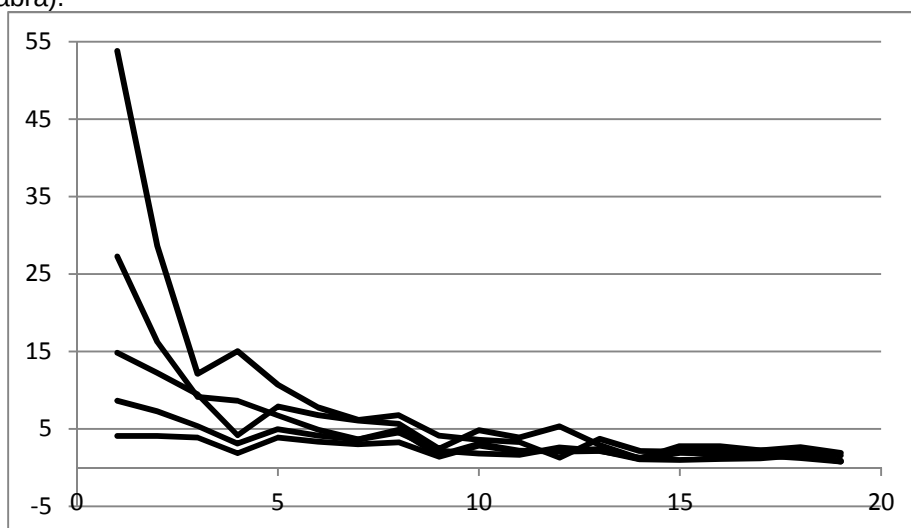
Az adszorpcióval meghatározott Q₀ értékek (adsz.Q₀) szoros lineáris összefüggést mutattak a korábbi foszforkezelések értékeivel (2. ábra).



2. ábra. Az adszorpcióval meghatározott Q_0 értékek ((adsz. Q_0) (y tengely) összefüggése a korábbi foszforkezelésekkel (x tengely) ($\mu\text{g/g P}$)

Deszorpciós vizsgálatok

A különböző korábbi P kezelések (0, 40, 80, 160, 320 $\mu\text{g/g}$) hatására létrejött eltérő mennyiségű kötött foszfort tartalmazó talajokat újabb (0, 40, 80, 160, 320 $\mu\text{g/g}$ adagú) kezelésnek megfelelő koncentrációjú oldatokkal hoztuk egyensúlyba. Ez a korábbi kezelések függvényében eltérő friss foszforkezeléseket eredményezett. Az így kialakult 25-féle eltérő korábbi és friss foszforkezelést kapott minták szorpció állapotban levő foszfortartalmát többlépéses egyensúlyi deszorpcióval vizsgáltuk (Tolner et al., 1996). A deszorpciós vizsgálatok eredményeképpen csökkenő egyensúlyi koncentrációjú oldatsorozatot kaptunk (3. ábra).



3. ábra. A deszorpció lépéseinek függvényében csökkenő egyensúlyi koncentrációjú oldatsorozatok a korábban 80 $\mu\text{g/g}$ kezelést kapott talajmintákon. A görbék felülről lefelé a 320, 160, 80, 40, 0 $\mu\text{g/g}$ friss kezelést kaptak. A pontokat az összetartozás szemléltetése érdekében kötöttük össze.

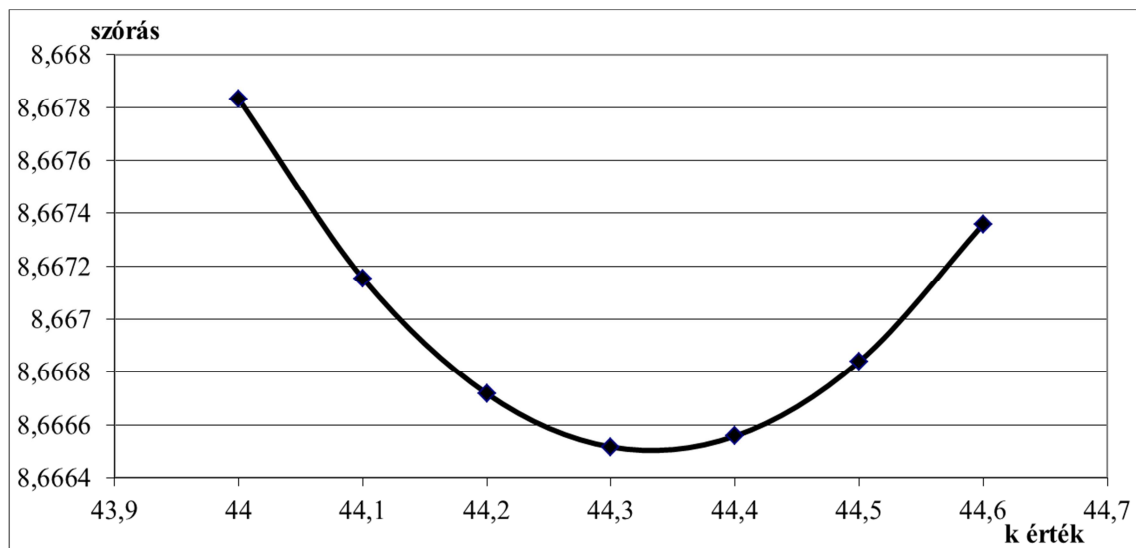
Korábbi munkánk (Tolner et al., 1996) során bemutattuk, hogy az eredetileg adszorbeált állapotban levő Q mennyiségből levonjuk az adott lépést megelőző korábbi lépésekben eltávolított foszfor mennyiségek összegét, akkor ez a mennyiség ugyanúgy függ az adott egyensúlyi koncentrációtól, mint az adszorpció leírásánál.

$$Q - \frac{\sum_{i=1}^n c_i}{S} = k \cdot c^{1/3}$$

S értéke a hígítás. Értéke megfelelően megválasztott mértékegységek esetén 1.

$$Q - \sum_{i=1}^n c_i = k \cdot c^{1/3} \quad \text{átrendezve:} \quad Q = k \cdot c^{1/3} + \sum_{i=1}^n c_i$$

Ismert k esetén az aktuális és a korábbi lépések koncentrációiból Q kiszámítható. A modell szerint megfelelően megválasztott k esetén az egymást követő deszorpciók lépések mindegyikében ugyanazt a Q értéket kell kapnunk. Ha jó a modell és a Q értékek mégis eltérnek, akkor eltéréseknek két oka lehet. Az egyik a nem megfelelő k érték megválasztása a másik a mérési hibák. Megfelelő k értéknek azt választjuk, ahol a 19 lépésben kiszámított Q értékek szórása a legkisebb. Ugyanúgy, mint az adszorpciók extrapoláció számításakor úgy tekintjük, hogy k azonos az azonos korábbi kezelést, de különböző friss kezelést kapott minták esetében. Ezért az azonos korábbi kezelést kapott és 5 féle friss kezelést kapott mintákra kapott $5 \cdot 19$ Q értékre kapott közös értékének minimumát határoztuk meg a k értékének függvényében. Az így számított szórás a k függvényében egy minimumot mutató görbével ábrázolható (4. ábra).



4. ábra. A korábban 80 µg/g kezelést kapott minta Q_i értékeinek együttes szórása a k függvényében.

Az ábráról leolvasható, hogy ebben az esetben az optimális k érték 44,3. A többi kezelésre is a számításokat elvégezve az eredmények 3. táblázatban láthatók.

3. táblázat. A k értékek a korábbi kezelések függvényében és a Q értékek a korábbi és a friss kezelések függvényében (µg/g).

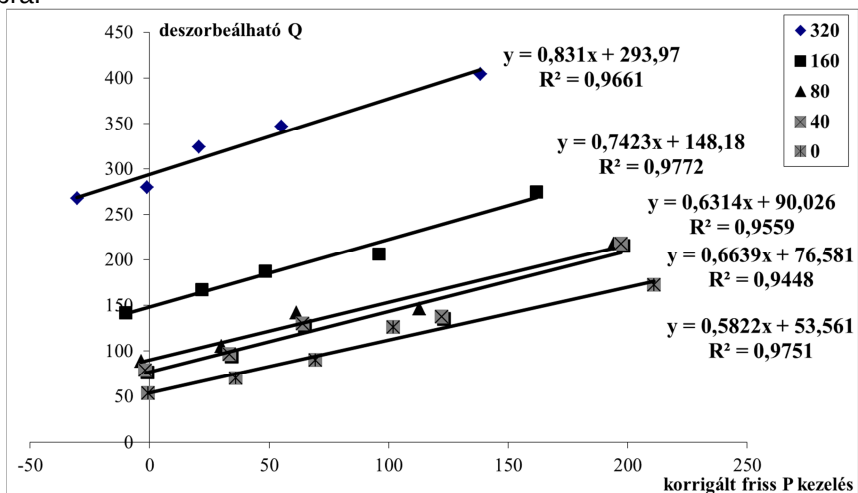
Korábbi P kezelés	0	40	80	160	320
k	37	44	44,3	56	81
Friss P					
0	53,19	69,69	90,09	126,02	172,23
40	78,42	96,20	129,40	137,31	217,37
80	88,45	105,00	141,96	146,37	217,78
160	141,54	166,97	187,46	206,24	274,80
320	267,68	279,72	323,60	346,80	403,95

Ahhoz, hogy megvizsgálhassuk, hogy ezek a Q értékek hogyan függnek a friss kezelések értékétől, pontosítanunk kell ez utóbbiak értékét. A friss kezelések úgy keletkeztek, hogy a különböző korábban kezelést kapott mintákra a friss kezeléseknek megfelelő kiindulási koncentrációjú (0, 40, 80, 160, 320 µg/g talajra számolva) oldatot töltöttünk. Az egyensúly beálltával az egyensúlyi oldatot eltávolítottuk a belekerült, illetve benne maradt foszfortartalommal együtt. Ezek képezték az adszorpciós vizsgálatok egyensúlyi oldatait. Az egyensúlyi oldattal eltávolított foszfortartalmat figyelembe véve kiszámítottuk a friss kezelések értékeit (4. táblázat).

4. táblázat. A korrigált friss kezelések értékei.

Hozzáadott friss P	Korábbi P kezelés				
	0	40	80	160	320
0	-0,53	36,10	69,42	102,10	211,02
40	-1,70	33,35	64,20	122,27	197,27
80	-3,52	30,10	61,39	112,91	194,16
160	-9,97	21,96	48,34	95,89	161,89
320	-30,29	-1,09	20,58	55,26	138,33

A többlépéses deszorpcióval mért, számított Q értékek korrigált friss kezelések értékeitől való függését mutatja az 5. ábra.

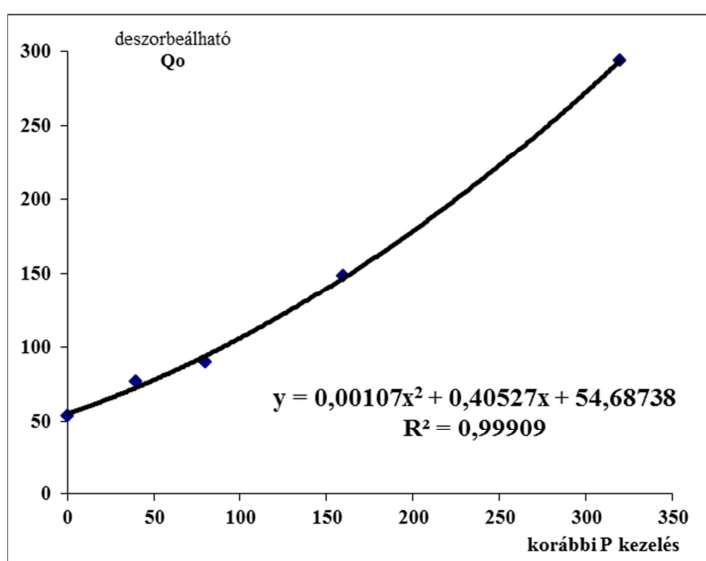


5. ábra. A korrigált friss kezelések és többlépéses deszorpcióval mért, számított Q értékek összefüggése.

Az egyenesek és a mellettük feltüntetett egyenletek felülről lefelé 320, 160, 80, 40, 0 $\mu\text{g/g}$ kezelésekre vonatkoznak. Az egyenletek alatt feltüntetett determinációs koefficiensek (R^2) mutatják a szoros illeszkedést. Az egyenesek meredeksége a növekvő korábbi kezeléseknél növekvő értékű. Ez azt mutatja, hogy a foszforral jobban telített talajon a frissen adott foszfor nagyobb aránya marad szorbeált (reverzibilis) fázisban.

Az egyenesek y tengelyt metsző pontjai a 0 korrigált friss kezelésre számított Q_0 értékek. Ezek jellemzők az adott korábbi kezelésű mintában a deszorbeálható állapotú foszfor mennyiségére ($\mu\text{g/g}$). A Q_0 értékek a 5. ábrán levő egyenesek egyenleteinek konstans értékei. Ugyanezek láthatók a 5. táblázatban is.

A deszorbeálható Q_0 értékeket (5. táblázat) a korábbi P kezelés függvényében ábrázolva másodfokú polinommal leírható összefüggést kapunk (6. ábra).



6. ábra. A deszorbeálható Q_0 értékek a korábbi P kezelés függvényében ($\mu\text{g/g}$).

Kétféleképpen vizsgáltuk azt, hogy a korábbi kezelés során adott mennyiségekhez (P.kez.) képest milyen arányban sikerült visszanyerni (desz. Q_0) foszfort. Az egyik esetben a kezelés hatására létrejött deszorbeálható Q_0 többletet viszonyítottuk a kezelés értékéhez. Például a 320 $\mu\text{g/g}$ korábbi kezelés esetén $(294,0-53,6)/320 = 75\%$. Ezek a visszanyerési % értékek (5. táblázat, visszanyerési % oszlop) a 320 $\mu\text{g/g}$ korábbi kezelésre kapott 75% értéken kívül a kisebb értékű kezeléseknél 46-59 % között ingadoztak.

5. táblázat. A deszorbeálható Q_0 értékek és a korábbi P kezelés összefüggései ($\mu\text{g/g}$).

P.kez.	desz. Q_0	visszanyerés %	dQ/dP
320	294,0	75	1,09
160	148,2	59	0,75
80	90,0	46	0,58
40	76,6	58	0,49
0	53,6		0,41

A másik esetben a kezelés növekmény hatására létrejövő deszorbeálható Q_0 növekmény értékét vizsgáltuk. Ez a 6. ábrán látható trendfüggvény deriváltja (dQ/dP).

$$dQ/dP = 0,00107 \cdot x + 0,40527$$

Az egyes kezelés értékekre a deriváltat kiszámolva azt kapjuk, hogy a visszanyerési százalék 41-109 % között a kezelés szintjével növekvő értéket mutat (5. táblázat dQ/dP oszlop)

Munkánk során kétféleképpen közelítettük meg méréssel számítással a talajon a korábbi kezelés hatására kialakult szorpciós kötésben levő foszfor mennyiségét. Az egyik a friss kezelésekkel felvett adszorpciós összefüggések 0 egyensúlyi oldatra extrapolált értékei (adsz. Q_0), a másik a többlépéses deszorpciós vizsgálatok során kapott deszorbeálható Q_0 (desz. Q_0) értékek (6. táblázat).

6. táblázat. Az adszorpciós és többlépéses deszorpciós vizsgálatokkal kapott Q_0 értékek ($\mu\text{g/g}$).

P.kez.	adsz. Q_0	desz. Q_0
0	47,3	53,6
40	67,1	76,6
80	82,3	90,0
160	123,7	148,2
320	193,8	294,0

Látható, hogy a többlépéses deszorpciós vizsgálatok során kapott deszorbeálható Q_0 értékek a kezelés mértékétől függően egyre nagyobb mértékben meghaladják az adszorpciós összefüggések 0 egyensúlyi oldatra extrapolált értékeiként kapott Q_0 értékeket.

Konklúzió

Vizsgálataink során a többlépéses deszorpciós vizsgálatokkal kapott deszorbeálható Q_0 értékek a kezelés mértékétől függően egyre nagyobb mértékben meghaladják az adszorpciós összefüggések 0 egyensúlyi oldatra extrapolált értékeiként kapott Q_0 értékeket. Az eltérés oka a két vizsgálati metodika közötti eltérésekből fakad. A többlépéses deszorpció során olyan foszfor mennyiségek is oldatfázisba jutnak, amelyek eredetileg kötöttebb fázisban voltak. Az eltérések ellenére mindkét adat értékes. Az adszorpcióval meghatározott érték a pillanatnyi foszforszolgáltatás lehetőségéről informál, míg a többlépéses deszorpcióval kapott érték a hosszútávon felszabaduló tartós tápanyag-szolgáltató képességet közelíti. Ez utóbbi fontos akkor is, amikor a talaj foszfortartalmát, mint környezet számára potenciális veszélyforrást vizsgáljuk (eutrofizáció).

Irodalom

- Bache, B. W., and E. G. Williams. 1971. A phosphate sorption index for soils. J. Soil Sci. 22:289-301.
- Barrow, N.J. 1978. The description of phosphate adsorption curves. J. Soil Sci. 29:447-462.
- Barrow, N. J. & Shaw, T. C., 1975. The slow reactions between soil and anions: 5. Effect of period of prior contact on the desorption of phosphate from soils. Soil Sci. **119**. 312-320.
- Duffera M - Robarge WP. (1999): Soil characteristics and management effects on phosphorus sorption by highland plateau soils of Ethiopia. SOIL SCI SOC AM J **63** (5): 1455-1462.

- Fitter, A.H., and C.D. Sutton. 1975. The use of the Freundlich isotherm for soil phosphate sorption data. *J. Soil Sci.* **26**:241-246.
- Fried, M. & Shapiro, R. E. 1956. Phosphate supply pattern of various soils. *Soil Sci. Soc. Proc.* **20**. 471-475.
- Fülekgy Gy. - Tolner L. (2006): Determination of the phosphate content originally adsorbed on the soil by fitting an adsorption isotherm model. *Applied Ecology and Environmental Research*, **4** (2): 39-45.
- Fülekgy Gy. - Tolner L. - Wahdan A. (2006): Effect of acidification on recovery of fertilizer phosphorus with three water extraction methods. *Cereal Research Communications*, **34**. 183-186.
- Gustafsson J.P. - Mwamila L.B. - Kergoat K. (2012): The pH dependence of phosphate sorption and desorption in Swedish agricultural soils. *Geoderma* **189-190**: 304-311
- Hartikainen, H. (1991): Potential mobility of accumulated phosphorus in soil as estimated by the indices of Q/I plots and by extractant. – *Soil Sci.* **152**: 204-209.
- Kafkafi, U., Posner, A. M. és Quirk, J. P., 1967. Desorption of phosphate from kaolinite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **31**. 348-353.
- Muljadi, D., Posner, A. M. & Quirk, J. P., 1966. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboehmite: I. The isotherms and the effect of pH on adsorption. *J. Soil Sci.* **17**. 212-229.
- Murphy, J. & Riley, J. P. 1962: A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.* **27**. 31-34.
- Nychas, A.E. 1982. Phosphate sorption by Greek alkaline soils evaluated with a modified Freundlich equation. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **145**:593-599.
- Okajima, H., Kubota, H. & Sakuma. T. 1983. Hysteresis in the phosphorus sorption and desorption processes of soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* **29**. 271-283.
- Olsen, S.R., and F.S. Watanabe. 1957. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **21**:144-149.
- Potarzycki J. - Gaj R. - Schung E. (2004): Phosphorous adsorption in soils after 20 years (cattle slurry) and mineral (NPK) fertilization. *Landbauforschung Völkenrode* **54**: 13-20.
- Rheinheimer DS. - Anghinoni I. - Conte E.(2003): Phosphorus sorption in soil in relation to the initial content and soil management. *Revista Brasileira de Ciencia Solo* **27** (1): 41-49.
- Tellinghuisen J. - Bolster C.H. (2010): Least-Squares Analysis of Phosphorus Soil Sorption Data with Weighting from Variance Function Estimation: A Statistical Case for the Freundlich Isotherm. *Environmental Science & Technology* **44** (13): 5029-5034.
- Tolner L. & Fulekgy Gy. 1987. Availability of soil phosphorus by anion exchange resin. *Bull. Univ. Agric. Sci. Gödöllő* **1**. 121-132.
- Tolner L. - Fülekgy Gy. (1995): Determination of the Originally Adsorbed Soil Phosphorus by Modified Freundlich Isotherm. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **26**. 1213-1231.
- Tolner L. - Wahdan A. - Fülekgy Gy. (1996): A talajban adszorbeálódott foszfáttartalom többlepéses deszorpciójának modellezése. Modelling of the Multistep Desorption of the Phosphate Content Adsorbed by the Soil. *Agrokémia s Talajtan* **45**. 295-306.