

# FOSZFORFORGALOM JELLEMZÉSE ÉS MODELLEZÉSE KÜLÖNBÖZŐ TALAJOKON REPCE TESZTNÖVÉNNYEL

## ÖSSZEFOGLALÁS

A növény P-ellátásában a talaj raktározó szerepe kiemelkedő fontosságú. A könnyen oldható és a növények számára felvehető  $\text{PO}_4$ -tartalom dinamikájának ismerete – a talajoldat igen alacsony koncentrációja miatt – különleges jelentőséggel bír.

A pályázati munka két, P-forgalmat érintő részből állt. Az egyik a P-forgalom modellezése az általunk használatos determinisztikus időjárás-talaj-növény szimulációs rendszermodell tovább-fejlesztésével, a másik a talaj szerves P-tartalmát felvehető  $\text{PO}_4$ -tá átalakító foszfatáz enzimek működésének jellemzése volt különböző talajokon.

A kutatás keretében végzett modellfejlesztések eredményeként rendszermodellünkben két jellegzetes hazai talajra meghatároztuk a P-forgalom jellemző paramétereit, s a szimulálható növények körét a repcemodell kiépítésével bővítettük. A modellfejlesztő munka eredményeként lehetővé vált a tápanyag (elsősorban N és P)-ellátottságtól függő növényi fejlődés és növekedés, többek között termésmennyiség, olajtartalom és növényi P-felvétel becslésén túl a talajok különböző mélységi rétegében a foszfát-tartalom szimulálása.

A pályázati kutatás másik iránya, a talaj szerves P-tartalmát felvehető  $\text{PO}_4$ -tá átalakító foszfatáz enzimek működésének jellemzése volt különböző talajokon repce rizoszférában. A vizsgált ökológiai rendszert, vagyis a talajt, a foszfatáz-aktivitás különböző eredete, szintjei, és természete (pH-optimum) alapján jellemeztük. Megállapítottuk, hogy a talajokat, a savas és lúgos foszfatáz aktivitás szintje és aránya, meghatározott feltételek esetén megbízhatóan jellemzi. A feltételek jelentősége megnő az eltérő reziduális foszfatáz aktivitású talajok összehasonlításakor, mivel a reziduális foszfatáz aktivitás alacsony szintje, a talajok nagyobb enzim reakcióival jár együtt.

Összefoglalóan elmondhatjuk, hogy

- foszformodellünk a P-forgalom változásait, folyamatait a vizsgált két talajon jól becsülte, hibahatáron belüli értéket adott a növényi foszforfelvételre és a különböző talajrétegek foszfáttartalmára vonatkozóan is. A kutatás ezen eredményei az alap- és alkalmazott kutatáson túl hasznosíthatók a gyakorlatban is: az okszerű növénytáplálás megtervezésében és magvalósításában.
- a foszfatáz aktivitás vizsgálatok eredményeként felvázoltuk a talajok új, biokémiai jellemzési lehetőségét, és megalapoztuk e biokémiai folyamatok P-forgalmi modellbe való beépítését.

## 1. P-FORGALOM JELLEMZÉSE ÉS MODELLEZÉSE A TALAJ-NÖVÉNY RENDSZERBEN

### 1.1 Repcemodell kifejlesztése a 4M talaj-növény-időjárás rendszer-modellhez

A 4M napi léptékű, determinisztikus modell (Fodor et al. 2002, 2008), amely a talaj-növény-időjárás rendszerben működik (1. táblázat). A vetésforgó P-forgalmi modelljéhez szükséges volt a hazai természetben növekvő súlyú őszi káposztarepce modelljének kifejlesztése, hiszen a repce a vetésforgóban gyakran szerepel, s többszörösen bizonyított a N mellett nagy P-igénye is.

#### 1. táblázat: A 4M modell fontosabb bemenő adatai

	Jellemző/Paraméter
Légkör	globálsugárzás, léghőmérséklet, csapadék
Talaj	térfogattömeg, humusztartalom, szabadföldi vízkapacitás, telítési vízvezetőképesség, tápanyagtartalom
Növény	filokron intervallum, bázishőmérséklet, fenofázisok hossza, szem (mag)telítődés potenciális sebessége, elemtartalom

**1.1.1. Modellfuttatásokhoz szükséges adatbázis kialakítása és folyamatos bővítése** újabb kísérletek adataival, inputok és a kalibrálás adatigényének biztosítása.

A munka eredményeként 3 különböző talajon (mészlepedékes csernozjom talaj, karbonátos homoktalaj, barna erdőtalaj) végzett kísérletek adatai alapján kísérleti forgatókönyveket hoztunk létre, melyek a következő adatokat tartalmazzák:

- kísérlet helye, ideje (a napi időjárási adatok)
- talaja, a talajrétegek és jellemzői (térfogattömeg, vízkapacitás értékek, vízvezetőképesség)
- kezdő feltételek talajrétegenként: víztartalom, humusztartalom, pH, NO<sub>3</sub>- és NH<sub>4</sub>-N-tartalom, AL-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>- és AL-K<sub>2</sub>O-tartalom
- agrotechnika: vetés (dátuma, mélysége, tőszáma), trágyázás (módja, dátuma, bedolgozás mélysége, mennyisége, trágya formája), betakarítás (dátuma).

#### 1.1.2. Alap repcemodell kialakítása

A repcenövény fejlődését és növekedését a modellben a vernalizáció és a mag olajtartalmának beillesztésével a következőképpen határoztuk meg:

-Fejlődés:

Az őszi repce fejlődését 6 fenofázisra osztottuk: 1.vetéstől kelésig, 2. őszi fejlődés, 3. áttelelés, 4. tavaszi fejlődés bokrosodástól virágzásig, 5. virágzástól termés kialakulásig, 6. magtelítődéstől érésig. A fejlődést leíró változók a következők: Fejlődési szakaszok jellemző hőmérsékleti határértékei (minimum, alsó és felső optimum, maximum), vernalizáció (kezdet, tartama, határértéke), fillokron intervallum.

-Növekedés:

Ezen belül a tömeggyarapodás, a hossznövekedés, a növényi részek közötti tömeg és tápanyagelosztás, elem- és beltartalom (többek között N-, P-tartalom és mag olajtartalma), a szenescencia szerepel.

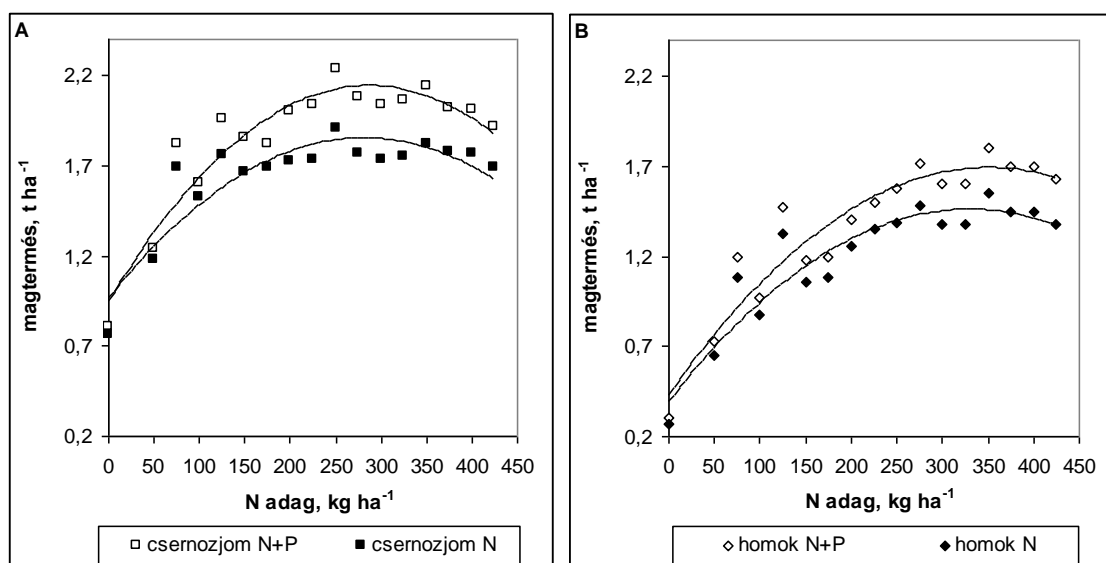
#### 1.1.3. Tápanyag-ellátás hatásának jellemzése és modellezése a repce fejlődésére és növekedésére

A növények, így a repce P-igénye is a fejlődés során változik, általánosságban a vegetatív szervek kifejlődésekor nagy, de jelentős a termésképzés idején is. A foszfor nagymértékben reutilizálódó elem, ezért az élénk anyagcseréjű szervek foszfátszükségletét nemcsak a talajból felvett foszfátok, hanem a csökkent anyagcseréjű szervek foszfátáz katalizálta reakciókban felszabaduló szerves foszfátjai együttesen biztosítják.

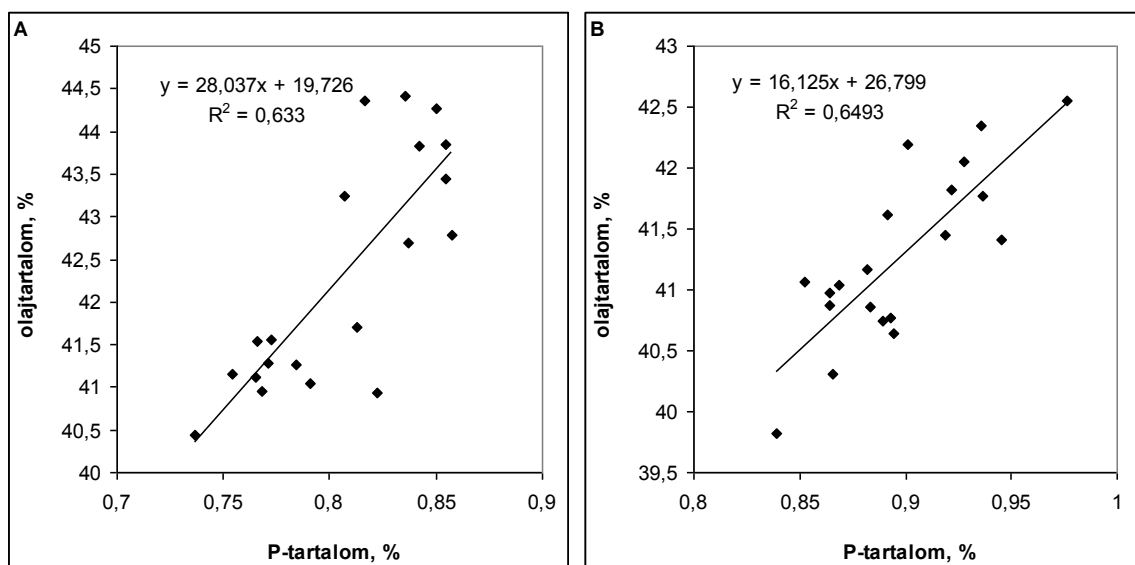
A modellszámítás első lépése a növény fejlődésének és növekedésének becslése az ún. „optimális” feltételek között. A tápanyagellátás a fejlődés és növekedés jelentős meghatározója. A nitrogén, a repce tápanyagai közül elsődleges jelentőségű, ezért vizsgálata a foszfor-hatások jellemzése és modellezése során is kihagyhatatlan volt.

Kísérleti eredményeink alapján meghatároztuk a N és P ellátás változásával a repcetermés mennyiségét (1. ábra), az egyes növényi részek fejlődési állapottól függő nitrogén és foszfortartalmát, arányát. Eredményeink igazolták, hogy a repce növekedését alapvetően meghatározó nitrogén mellett a nitrogén és foszfor együttes hatásának ismerete fontos a termés mennyisége és minősége (P és olajtartalma) szempontjából (2. ábra).

A két tápelem, a nitrogén és foszfor hiányának, többnyire ellentétes hatása volt a növény fejlődésére. A N-hiány általánosságban gyorsította a fejlődést, a P-hiány pedig lassította azt. A repce kora őszi fejlődése során ettől eltérően, mindkét tápelem hiánya, így a P-hiány is lassítja a fejlődést.



1. ábra A repce magtermés alakulása N adagolás mellett, valamint N és P együttes adagolásával mészlepedékes csernozjom (A) és karbonátos homoktalajon (B).



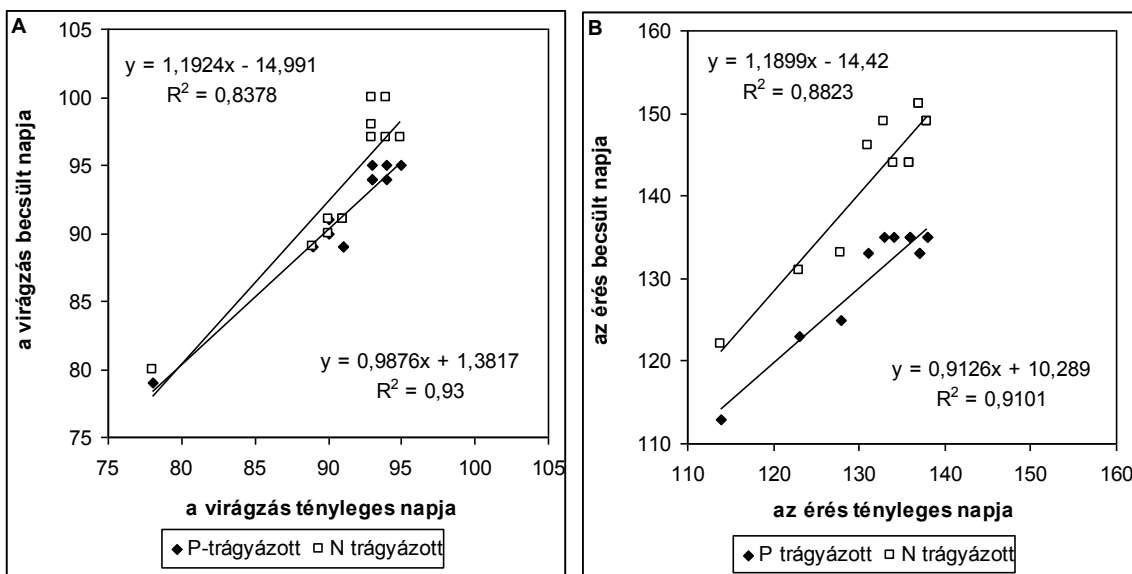
2. ábra A repce olajtartalmának alakulása a mag P-tartalmának függvényében mészlepedékes csernozjomon (A) és karbonátos homoktalajon (B)

### 1.1.4. Repcemodell kalibrálása, validálása

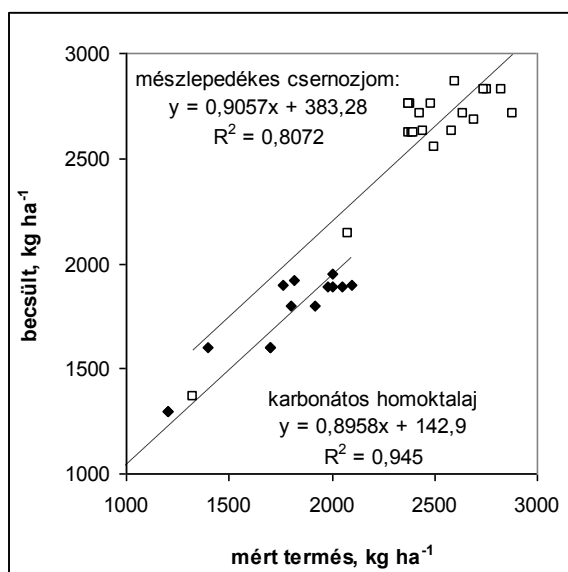
A növény P-felvevő képessége két fő részre bontható: a növény P-igényére és a talaj P-szolgáltató képességére. A modell az első lépésben a növény P-igényét határozza meg a száraanyag gyarapodás és az adott fenofázisban jellemző optimális P-koncentráció alapján.

A növény P-felvételét a talaj P-szolgáltató képessége mellett a talaj nedvességtartalma és gyökérzettel való behálózottsága is befolyásolja. A talaj felvehető P-koncentrációja egy adott értékig nem korlátozza a növényi P-felvételt, ez növényenként eltérő határérték. Ez alatt a növény P-felvevő képessége a talaj felvehető P-tartalmának lineáris függvénye.

A modell kalibrálását, az időjárási feltételek figyelembe vételével és a terméshozam mennyisége alapján a Nagyhörcsökön, mészlepedékes csernozjom talajon végzett repcekísérlet 2004-es évi adatai alapján végeztük, a trágyaadagok N150 kg/ha, a P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 kg/ha, a K<sub>2</sub>O 200 K/ha volt (3. ábra).



3. ábra. A virágzás (A) és az érés kezdetének (B) mért és becsült idejének összefüggése repcénél N adagolás mellett, valamint N és P együttes adagolásával



4. ábra A mért és becsült magtermés összefüggése a két kísérleti talajon (mészlepedékes csernozjom, karbonátos homoktalaj)

A kalibrálás eredményességét a mért és becsült értékek összefüggésének szorossága, illetve a lineáris b értékének 1-hez közelítő értéke jelzi (3. és 4. ábra). Az ezt követő validálás két hely és talaj (Nagyhörcsök, mészlepedékes csernozjom és Örbottyán, karbonátos homoktalaj) két-két évjázatának adatai alapján történt.

A mért és a modellel becsült növényi értékek összefüggése a főbb mutatókra a következő volt: fejlődésre  $R^2 = 0,83-0,93$ ; magtermésre:  $R^2 = 0,80-0,94$ ; biomasszára:  $R^2 = 0,69-0,74$ ; a mag foszfortartalmára:  $R^2 = 0,72-0,77$ ; olajtartalomra:  $R^2 = 0,7-0,75$ . A kalibráció eredményeként becsült értékek a párosított t-próba ( $\alpha=0.05$ ) alapján nem különböztek szignifikánsan a mért értékektől.

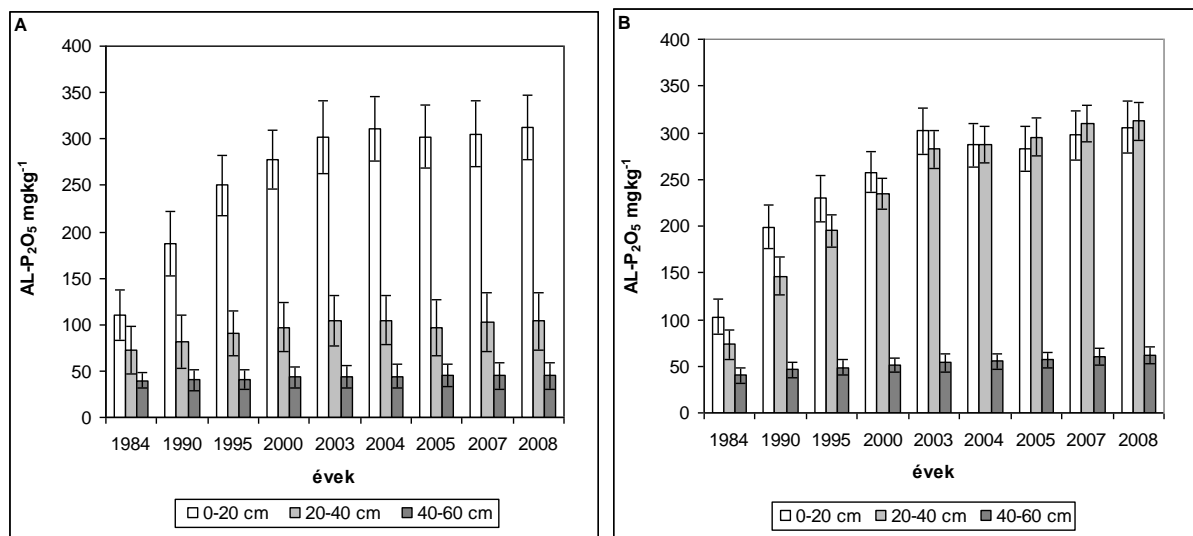
## 1.2. P-modul továbbfejlesztése és parametrizálása két talajra, kalibrálás és validálás

A talaj-növény-rendszer modell P-forgalmi részének kifejlesztését előző OTKA pályázatok (OTKA T029217, OTKA T032768) keretében indítottuk el mészlepedékes csernozjom talajon (Fodor et al. 2002, 2008). Jelen pályázat keretében két talajon (mészlepedékes csernozjom és karbonátos homoktalaj), több műtrágyaszint és négy növényfaj (őszi búza, kukorica, tavaszi árpa, őszi repce) hosszútávú (24 éves) hatásait kívántuk becsülni a növények P-felvételére és a két talaj több mélységi rétegének (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm) AL- $P_2O_5$ -tartalmára.

### 1.2.1. Talajok foszfáttartalom változása rendszeres P-adagolás hatására

A P-forgalom hosszútávú jellemzésében két tartamkísérlet eredményeire támaszkodtunk. 1984-2008 között trágyázási tartamkísérletet végeztünk a mészlepedékes csernozjom talajon Nagyhörcsökön (NH), és karbonátos homoktalajon Örbottyánban (ÖB). A két talajnak hasonló a  $pH_{H_2O}$  -értéke (Nagyhörcsökön 8,1 és Örbottyánban 7,8) és  $CaCO_3$ -tartalma (9,5 % ill. és 8,7 %), erősen különböző viszont a talajok humusztartalma (2,95% ill. 0,87%), és agyagtartalma (20-24 %, és 4-5%). A P-trágya éves adagja  $100 \text{ kg ha}^{-1} P_2O_5$  volt.

Mindkét talaj felső talajrétegének AL-oldható foszfáttartalma szignifikánsan, a kezdeti érték több, mint négyszeresére emelkedett a kísérlet 24 éve alatt. A talaj AL-  $P_2O_5$  – tartalma telítődési függvény szerint az idő előre haladtával csökkenő mértékben nőtt, a foszfátakkumuláció különbözött a talajok és talajrétegek szerint (5. ábra).



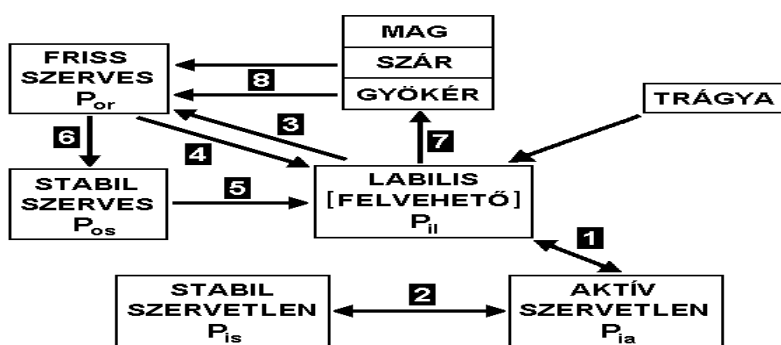
5. ábra A mészlepedékes csernozjom (A) és a karbonátos homoktalaj (B) AL- $P_2O_5$ -tartalmának változása a kísérlet 24 éve alatt a talajok felső 3 szintjében (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm).

A rendszeres, évenként kijuttatott P-trágya hatására mindkét talajt jelentős foszfát-akkumuláció jellemezte. Az AL-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> akkumulációs ráta a legfelső, 0-20 cm-es talajrétegben az idő előrehaladtával 15 mgkg<sup>-1</sup>év<sup>-1</sup>-es szintről 0-ra csökkent a kísérleti évek alatt mindkét talajon.

Az átlagos AL-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> akkumulációs ráta a 0-20, 20-40 és 40-60 cm-es talajrétegekben a csernozjom talajban 8,5, 1,7, 0,2 míg a homoktalajban 8,4, 9,9, 1,3 mgkg<sup>-1</sup>év<sup>-1</sup> volt. A talajok a legfelső, 0-20 cm-es rétege azonos foszfát-akkumulációt mutatott. A vizsgált két talaj jellegzetes különbségét a második, 20-40 cm-es talajréteg foszfáttartalom akkumulációja jelezte (4. ábra).

### 1.2.2. Talajok P-forgalmi paraméterei

A foszforforgalmat egyik oldalról a talaj foszfor-készletei közötti arányok, átalakulások, egyensúlyi állapotok, másik oldalról a növényi foszforigények vezérik (Jones et al. 1998, Fodor et al. 2008, 2012). Az általunk kifejlesztett modellben oldhatóságuk szerinti csoportosításban ún. foszforkészleteket különböztettünk meg (6. ábra)



6. ábra Az alkalmazott modell P-készletei, az átalakulás és felvétel irányai

Vizsgált talajainkban karakterisztikusan különbözött két talajjellemző, az agyag- és a humusztartalom. Ezek a tulajdonságok a foszfor készletek (poolok) dinamikus egyensúlyát alakító specifikus paraméterek értékeit is meghatározzák. Az értékek kialakításának két jellemző módját alkalmaztuk: 1. számítás a kísérlet adatai alapján (pl. az oldható és a stabil P-készlet aránya), 2. iterációs közelítés (pl. oldható és stabil poolok maximális átalakulási üteme).

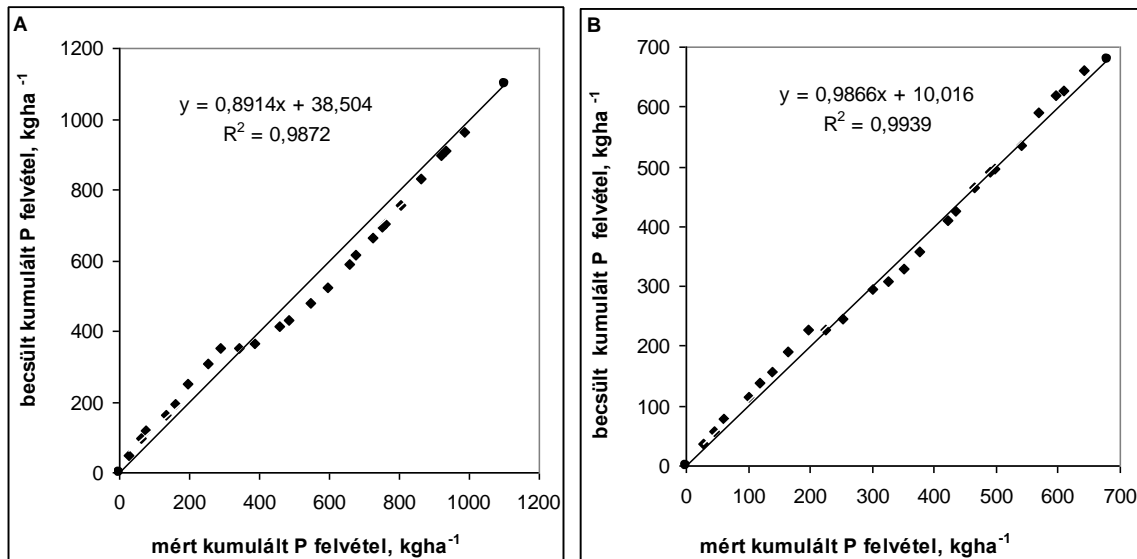
Az alábbiakban (2. táblázat) csak a két talaj eltérő értékekkel jellemezhető paramétereit tüntettük fel, az egyezőket nem. Meg kell továbbá jegyeznünk, hogy a P-forgalmi paramétereken túl alkalmazott modellünkben a talajok rétegzettségét is finomítottuk (a kimeneti eredményként megadott 20 cm-es rétegek a felszínhez közel több, 3-5 cm-es rétegre oszlanak).

2. táblázat A vizsgált talajok (mészlepedékes csernozjom, karbonátos homoktalaj) P-forgalmi paramétereinek eltérő értékei

Paraméter	Értékek	
	mészlepedékes csernozjom	karbonátos homok
Oldható és a Stabil P-pool-ok maximális P transzformációs rátája (kg ha <sup>-1</sup> nap <sup>-1</sup> )	0,00055	0,0001
Egyensúlyi arány az Oldható pool /Stabil pool ( )	1/8	1/4
P feltáródás üteme az Oldható pool-ból (kg ha <sup>-1</sup> nap <sup>-1</sup> )	0,0008	0,0012
P lemosódás üteme (kg ha <sup>-1</sup> nap <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> )	0,003	0,010

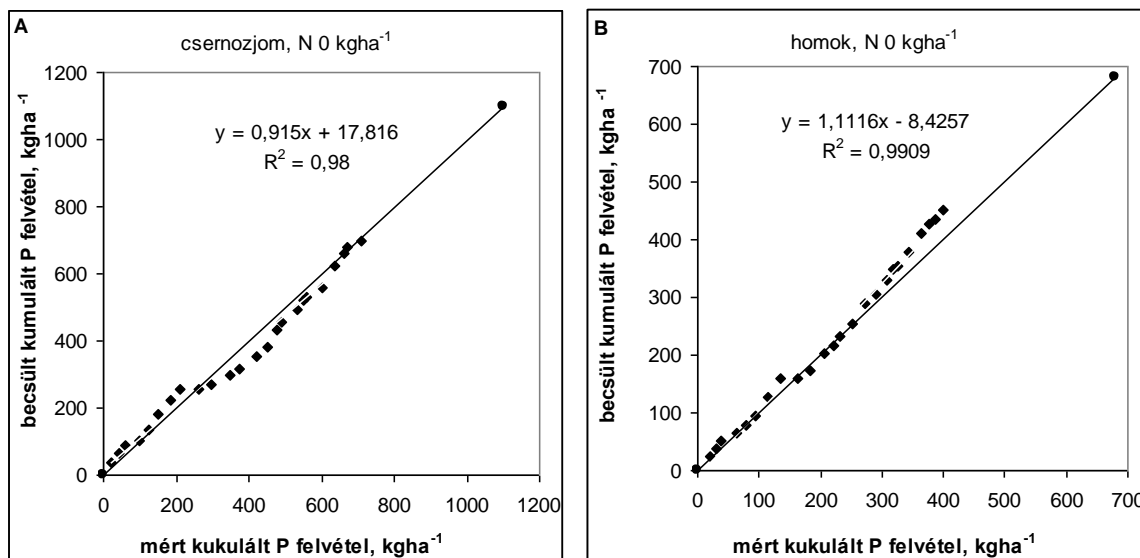
### 1.2.3. P-forgalmi modul kalibrálása és validációja

A P-forgalmi modul kalibrálását és validálását mészlepedékes csernozjom és karbonátos homoktalajra végeztük el 24 éves trágyázási tartamkísérletben. A kísérleti vetésforgóban szereplő növények a következők voltak: kukorica, őszi búza, tavaszi árpa és őszi repce. A foszforforgalmat egyik oldalról a talaj foszfor-készletei közötti arányok, átalakulások, egyensúlyi állapotok, másik oldalról a növényi foszforigények vezérik. A kísérletben a kontrollal együtt 4 N-szint szerepelt, 0, 150, 300 és 450 kg/ha. A kalibráláshoz a termésmaximumot nyújtó N-kezeléseket választottuk ki. Ez a csernozjom talajon a 150 kg/ha-os, a homoktalajon a 300 kg/ha-os N-kezelés volt. A kalibrálás eredményét a 24 év alatti kumulált növényi foszfor-felvételre a 7. ábra mutatja.



7. ábra A növények által felvett kumulált P mért és becsült értékeinek összefüggése a kalibrálás eredményeként a mészlepedékes csernozjom talajon (A) és a karbonátos homoktalajon (B).

Általánosságban a P-modul jól szimulálta a növényi foszfor-felvételt (7. ábra), azonban a homoktalajon az időszak végéhez közeledve a N nélküli (N=0kg/ha) és a 150 kg/ha-os N adagnál felülbecsülte a növények P-felvételét (8. ábra).



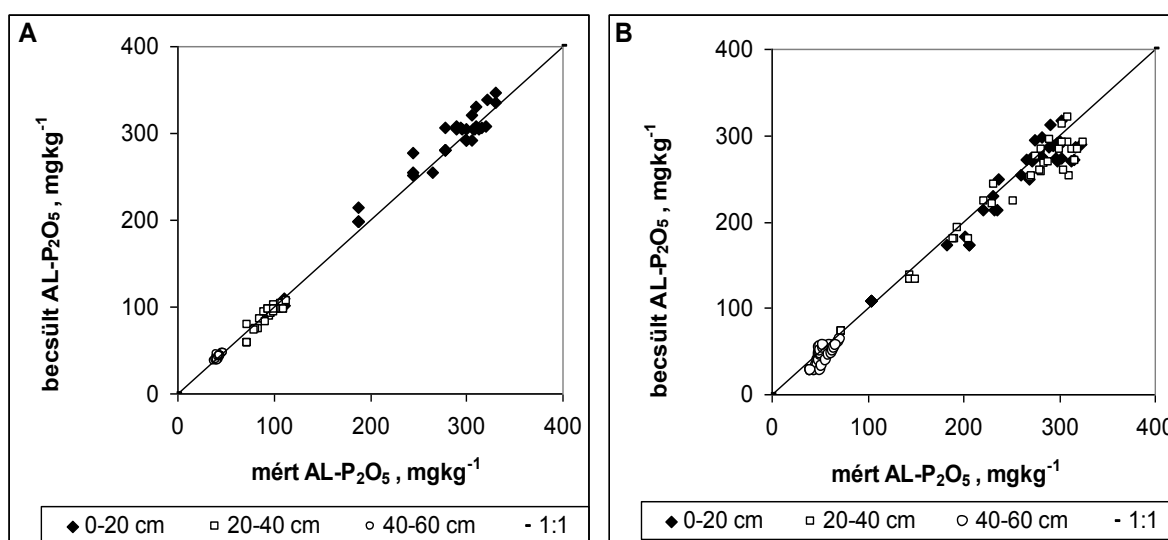
8. ábra A növények által felvett kumulált P mért és becsült értékeinek összefüggése a validálás során a N trágyázatlan (0 kg ha<sup>-1</sup> N) kontroll kezelésben a mészlepedékes csernozjom talajon (A) és a karbonátos homoktalajon (B).

A validálás során a talajok mért és becsült AL-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-tartalmára vonatkozóan a 0-20 cm-es rétegben R<sup>2</sup> = 0,925-0,968; a 20-40 cm-es rétegben R<sup>2</sup> = 0,836-0,96, a 40-60 cm-es rétegben R<sup>2</sup> = 0,618-0,635 értékeket kaptunk (3. táblázat és 9. ábra). Szimulációs eredményeink tehát igen jók a 0-20 és 20-40 cm-es talajrétegekre vonatkozóan, míg a 40-60 cm-es talajréteg AL-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-tartalmának becsült értékei a felsőbb rétegeknél jóval alacsonyabb korrelációt jeleznek. Ennek oka az, hogy ebben a talajrétegben a kísérlet 24 éve alatt a csernozjom talajon egyáltalán nem mértünk foszfáttartalom növekedést, és a karbonátos homoktalajon is nagyon alacsony szintű foszfát-akkumuláció volt (4. ábra).

**3. táblázat.** A két talaj (mészlepedékes csernozjom, NH és karbonátos homoktalaj, ÖB) három felszíni rétegében mért és becsült AL-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-tartalmak közti lineáris összefüggés paraméterei

N P K adag kg ha <sup>-1</sup> év <sup>-1</sup>	talajréteg cm	mészlepedékes csernozjom, NH		karbonátos homoktalaj, ÖB	
		Meredekség (b) mg kg <sup>-1</sup> év <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>	Meredekség(b) mg kg <sup>-1</sup> év <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>
0,100,200	0-20	1.04	0.9758	1.03	0.9696
	20-40	1.21	0.9512	1.01	0.9970
	40-60	1.09	0.9464	1.09	0.9452
150,100,200	0-20	1.01	0.9857	0.96	0.9679
	20-40	1.04	0.9067	0.90	0.9960
	40-60	1.26	0.9053	0.84	0.8089
300,100,200	0-20	1.07	0.9828	0.98	0.9655
	20-40	1.20	0.8177	0.93	0.9934
	40-60	1.00	0.8237	1.13	0.9720
450,100,200	0-20	0.96	0.9850	0.80	0.9904
	20-40	1.08	0.8833	0.83	0.9898
	40-60	1.00	0.6359	1.20	0.9025

A vizsgált talajok három rétegére a szimuláció eredményét a 9. ábrán mutatjuk be.



**9. ábra** A szimuláció eredménye: a mészlepedékes csernozjom (A) és a karbonátos homoktalaj (B) AL-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tartalma a 0-20cm, 20-40 cm és 40-60 cm-es talajrétegekben az eltérést jelző 1:1 vonallal.



**Összefoglalóan: Foszfomodellünk a 24 éves tartamkísérlet P-forgalmi változásait, folyamatait mindkét talajon jól becsülte, hibahatáron belüli értéket adott a növényi foszforfelvételre és a talajrétegek foszfáttartalmára vonatkozóan is.**

*A becslési pontatlanságok a következő okokkal magyarázhatók:*

-Mérési hiányosságok. Kevés ellenőrzési pontunk volt a korai, feltöltési szakaszra vonatkozóan (4-5 évente), és viszonylag kevés az AL-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-meghatározások hibahatára (10%) miatt.

-Számítástechnikai egyszerűsítések: A talajok P-forgalmat szabályozó egyes talaj-paraméterei az idő folyamán módosulnak, mi azonban a folyamatokat a 24 év alatt végig azonos, átlagos értékekkel szimuláltuk.

-A modell egyéb hiányosságai, így pl. modellünk nem becsli jól a humusztartalom változását, melynek hatása elsősorban a homoktalajon (8. ábra) mutatkozott meg.

## 2. TALAJOK JELLEMZÉSE FOSZFATÁZ AKTIVITÁSUK ALAPJÁN

A növények a talaj változatos formában megtalálható szerves és szervetlen foszforvegyületei közül csupán a talajoldatban igen kis koncentrációban jelenlevő foszfát-ionok felvételére képesek. A szerves foszformolekulák felvehetővé alakításában meghatározó a foszfátáz-enzimek szerepe. A foszfátáz olyan hidroláz, mely észterkötések bontásával szervetlen foszfátot hasít le. Amikor foszfátázzal beszélünk, többnyire a nem-specifikus foszfomonoészterázról értjük alatta, vagyis olyan foszfátázt, mely foszfát-monoésztereket hidrolizál. Bár a foszfomonoészteráz szubsztrátjai a talaj szerves foszfátjainak csak kis hányadát adják (egyszerű foszfát-észterek: glicerofoszfátok, nukleinsavak, vagy a talaj szerves monoészterre bomló vegyületei), azonban a folyamatos átalakulás révén szerepük mégis jelentős.

A téma keretében jellemezni kívántuk három, Magyarországon jelentős területi részarányú rendelkező talaj - a mészlepedékes csernozjom, a karbonátos homoktalaj, és a barna erdőtalaj - foszfomonoészter hidrolizáló aktivitását (azaz a továbbiakban foszfátáz aktivitását). Meghatároztuk a vizsgált talajok, mint ökológiai rendszerek foszfátáz aktivitásának pH-optimumát, vagy optimumait (savas és lúgos foszfátázok), továbbá a legvalószínűbb víz-, hőmérsékleti és tápanyag feltételek közötti amplitúdóját, a lúgos és savas foszfátáz aktivitás arányát. A talajok biokémiai jellemzéséhez vizsgáltuk a fiziko-kémiai jellemzőkkel párhuzamosan változó értékeket.

A talajfoszfátázok aktivitását az ökológiai hatások nagymértékben - a megkötő kolloidok mennyiségének és minőségének megfelelően- befolyásolják. A legismertebb tényezők közé tartoznak: a talaj víztartalma, szervesanyag-tartalma, hőmérséklete, levegőzöttsége vagy a talajréteg mélysége, az oldható tápanyagtartalom (nitrogén- és foszfortartalom és végül a talajszennyezés hatásai. Jellemezni kívántuk vizsgált talajainknál a feltételek változásaiból eredő enzim-aktivitás különbségeket, összehasonlítani a foszfátáz aktivitások amplitúdóját az egyes talajokon, s megismerni a reziduális foszfátáz aktivitás szerepét és súlyát.

A talaj enzimek, így a foszfátázok forrásai a mikroorganizmusok, a növényi gyökerek és a talajban élő állatok. A talaj-foszfátázok jelentős hányada extracelluláris formában kolloidok (agyag- és szerves) felületén adszorbeáltan található. A mikroorganizmusok savas és lúgos foszfátázokat is termelnek, ugyanakkor a növényi gyökerek csak savasat választanak ki. Törekvésünk volt a repce gyökér által kiválasztott foszfátáz enzimek aktivitásának közvetlen (a gyökérminta felszínén) és a rizoszférában (azaz a gyökérkörnyezetben) hatását megismerni.

A talajfoszfátáz aktivitás méréseket a vonatkozó módszertani leírás szerint (Öhlinger, 1996) p-nitrofenil-foszfát alkalmazásával, 1 g friss talajmintán 1 órás inkubáció (37 °C-on) alkalmazásával, 410 nm-en történő spektrofotométeres méréssel állapítottunk meg.

## 2.1. A foszfatáz aktivitás összetevőinek és amplitúdójának vizsgálata

### 2.1.1. Foszfatáz-aktivitás alakulása különböző talajokon

A téma keretében három, Magyarországon jelentős területi részarányal rendelkező talaj: a mészlepedékes csernozjom, a karbonátos homoktalaj, és a barna erdőtalaj foszfo-monoészter hirolizáló aktivitását (azaz a továbbiakban foszfatáz aktivitását) jellemeztük. A foszfatáz-aktivitás, az előbb ismertetettek értelmében egy, a környezeti hatásokra érzékenyen reagáló mutató. Biokémiai jellemzőként való felhasználáshoz meg kellett ismernünk a „sztenderd” feltételek közti értékeit, és meg kellett határozni a legvalószínűbb eltérések okait, nagyságát a különböző talajokon.

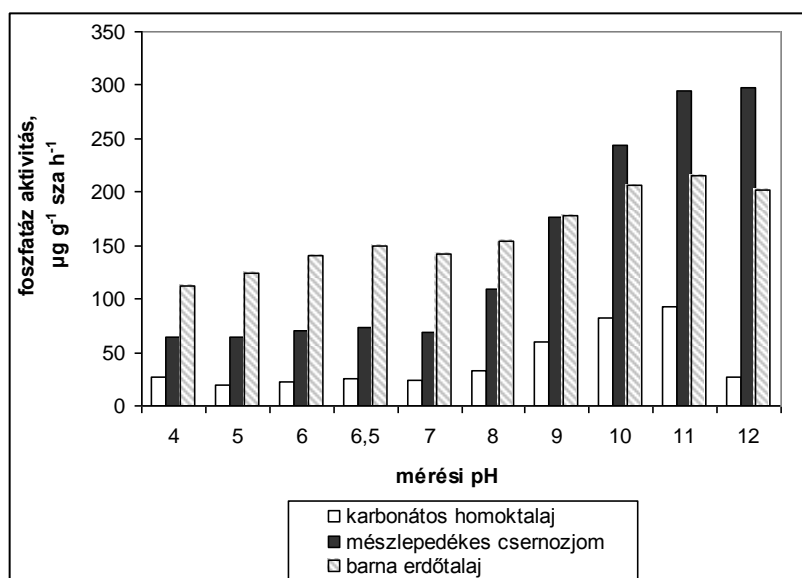
Az enzimaktivitás-mérésekkel párhuzamosan valamennyi talajmintának meghatároztuk a főbb fiziko-kémiai jellemzőit, meghatároztuk a „Tyurin-féle” humusztartalmat, a vizes pH-értéket, a KCl-oldható  $\text{NO}_3\text{-N}$ -tartalmat. Királyvizet követően az „összes foszfortartalmat”, ammónium-laktátos oldást követően pedig, az „AL-oldható foszfáttartalmat, ( $\text{AL-P}_2\text{O}_5$ ) és nedvességtartalmat (105 °C-on, gravimetriásan).

#### 2.1.1.1. Mérési pH-érték hatása a foszfatáz aktivitásra

Az enzimek nemzetközi katalógusa pH-optimumuk alapján a savas (E.C. 3132) és a lúgos foszfatázokat (E.C. 3131) különbözteti meg. A talajokban mindkét foszfatáz-féleség megtalálható. Egyes esetekben élesen szétválnak, külön csúcsot adva a pH-függvényében, máskor nem jellemző rájuk egy diszkrét pH-optimum.

A talaj foszfatázaktivitás pH optimumának megállapításához a mérési pH-értéket 4 és 12 között változtatva, összesen 10 különböző pH-értéken végeztünk méréseket, melyeket a vonatkozó módszertani leírás szerint (Tabatabai és Bremner, 1969. Öhlinger, 1996) p-nitrofenil-foszfát alkalmazásával, 1 g friss talajmintán 1 órás inkubáció (37°C-on) alkalmazásával, 410 nm-en történő spektrofotométeres méréssel állapítottunk meg.

Mind a három vizsgált talajféleségre (mészlepedékes csernozjom, karbonátos homoktalaj és barna erdőtalaj) az alkalmazott módszerleírásnak (Tabatabai és Bremner, 1969; Öhlinger, 1996) megfelelő értékeket kaptunk. E szerint a növénymentes talajokban a savas foszfatáz-aktivitások maximum-értékét 6.5 pH-értéken, míg a lúgos foszfatázét 11 pH-értéken mértük (10. ábra).



10. ábra A vizsgált talajok (karbonátos homoktalaj, mészlepedékes csernozjom, barna erdőtalaj) foszfatáz-aktivitásának változása a mérési pH változtatásával

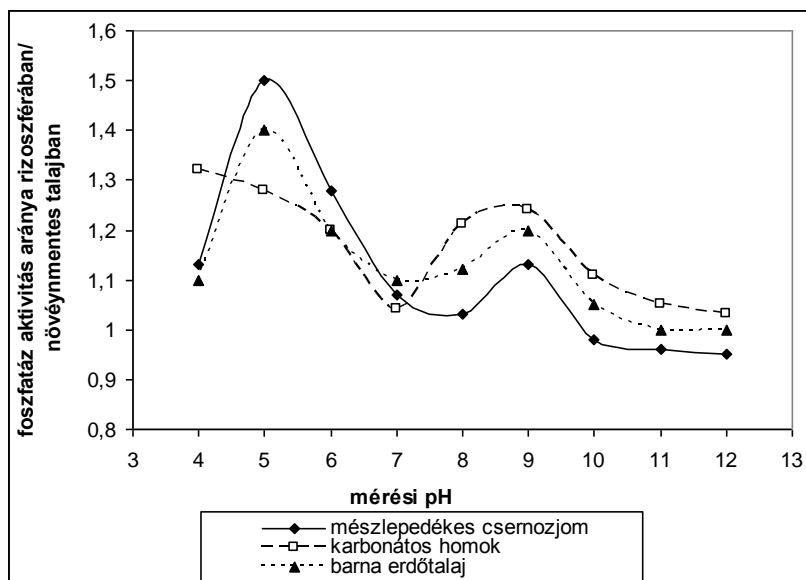
### 2.1.1.2. Foszfátáz-aktivitás alakulása a növénymentes talajban és repce rizoszférában

A talaj enzimek, így a foszfátázok forrásai a mikroorganizmusok, a növényi gyökerek és a talajban élő állatok. A talaj-foszfátázok jelentős hányada extracelluláris formában kolloidok (agyag- és szerves) felületén adszorbeáltan található. A mikroorganizmusok savas és lúgos foszfátázokat is termelnek, ugyanakkor a növényi gyökerek csak savasat választanak ki.

A vizsgálatokhoz a kisparcellás kísérleteknél parcellákon belül 1–1 m-es sávon növénymentes állapotot biztosítottunk. A talajmintákat parcellánként 4–4 ismétlésben a növény sorából, a gyökérrzel át szőtt talajból (rizoszféra), és a növénymentes sávból (talajtest) vettük. A tenyészedényes kísérletekben a mintákat természetesen növény nélküli és növényt tartalmazó edények biztosították. A mintavétel után a mintákat hűtve szállítottuk és az enzimaktivitás mérésig hűtve (+4°C-on) tároltuk.

A rizoszféra növelte a foszfátázaktivitást, még hozzá nemcsak a savas foszfátázét, hanem a lúgosét is mindhárom vizsgált talajon (mészlepedékes csernozjom, karbonátos homoktalaj, barna erdőtalaj) (11. ábra).

Az ábrán a rizoszféra és a növénymentes talaj foszfátáz aktivitásának arányát mutatjuk be. Jellemző, hogy az arány szinte valamennyi mérés esetén nagyobb volt 1-nél. A lúgos foszfátázok aktivitásának növekedése vélhetően a gyökér egyéb exudátumaival, és a gyökérkörnyezet mikrobatevékenységet stimuláló hatásával magyarázhatók.



**11. ábra** A rizoszféra és a növénymentes talaj foszfátázaktivitásának aránya a mérési pH-érték változtatásával az őrbottyáni karbonátos homoktalajon és a mészlepedékes csernozjom talajon

A növényi gyökér savas foszfátázot termel, s ennek logikus következménye volt mindkét a rizoszféra talajában a savas és lúgos foszfátáz aktivitás pH-optimumának csökkenése a növénymentes talajon mért értékekhez viszonyítva: 6,5-ről 5-re illetve 11-ről 10-re.

A rizoszférában a növény nélküli talajtesthez viszonyítottan nőtt a foszfátáz aktivitás, még hozzá nemcsak a savas foszfátázé, hanem a lúgosé is mindhárom talajon (mészlepedékes csernozjom, karbonátos homoktalaj, barna erdőtalaj). A növényi gyökér foszfátáz-aktivitást növelő hatása két csúcsot jelzett: pH 5-nél és pH 9-nél (11. ábra).

### **2.1.1.3. A talajminta tárolásának hatása a foszfatáz aktivitásra**

Vizsgáltuk a talajmintázás idejétől az enzimaktivitás meghatározásáig eltelt idő (minta tárolása) hatását annak legfontosabb feltételeivel, a talaj nedvességtartalmának és a hőmérsékletnek a változásával.

A foszfatáz-aktivitás pozitív összefüggése a talaj nedvességtartalmával, valamint az enzimreakciók hőmérsékletfüggése általánosan ismert tény. Sztenderd feltétel a talajtanban inkubációs vizsgálatoknál alkalmazott víztartalom és hőmérséklet lehet az alap, azaz a talajok szántóföldi vízkapacitásának megfelelő víztartalom 80-90%-a, illetve a 20-25°C lehet.

A talajminta tárolásának hatását annak foszfatáz aktivitására három talajféleség mintáin vizsgáltuk, mészlepedékes csernozjomtalajon (Nagyhörcsök), karbonátos homoktalajon (Órbottyán), és barna erdőtalajon (Gyöngyösoroszi). Kiegészítésként felhasználtuk a korábban lignitbánya meddőhányókon gyűjtött adatainkat is.

A tárolás ideje 0,5, 1, 2 és 6 hónap volt. A késő ősszel begyűjtött, VK körüli nedvességtartalmú talajmintákat (különböző humusztartalmú karbonátos homoktalaj és mészlepedékes csernozjom talaj) hűtve 4°C-on, míg leszáritott (25-30°C-on) talajmintákat szobahőmérsékleten 20-25°C-on tároltuk az összehasonlító vizsgálatokig. A kezdeti értékeket a friss talajminták (meghatározás a mintavétel követő 1-3 nap) foszfatázaktivitása adta.

-Nedvesen, 4°C-on tárolt minta foszfatázaktivitása a tárolás kezdetén különböző mértékű, nem szignifikáns enzimaktivitás növekedést (0,2-2,2%), majd a tárolás végén eltérő aktivitás csökkenést mutatott (1,8-9,4%). A nagyobb növekedés a magasabb humusz- és agyagtartalmú talajnál, míg a nagyobb csökkenés az alacsonyabb agyag- és humusztartalmú talajoknál következett be. Az enzimaktivitás 2 hónapon belül egyik talajmintában se változott megbízhatóan, 6 hónap elteltével a homoktalaj mintákban megbízható (4,1-9,4%), a csernozjom talajban tendenciaszerű (1,8-2,4%) csökkenés mutatkozott.

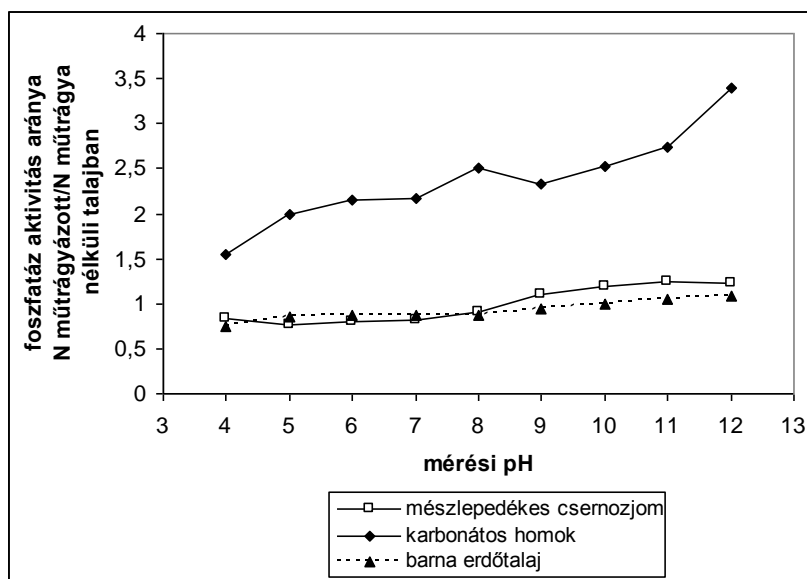
-Száras tárolásnál az enzimaktivitás az adott időpontokban gyakorlatilag nem változott, bár tendenciaszerű csökkenés kimutatható volt. A szárítás (25-30 °C-on) ezzel szemben jelentős enzimaktivitás csökkenéssel járt. Mind a magas kötöttség, mind a magas humusztartalom konzerváló hatása érvényesült. A homoktalajon 14,2-16,8%-kal, a csernozjom talajon pedig 6,5-7,2 %-kal csökkent az enzimaktivitás.

-Meddőhányó különböző korú, agyag- és szervesanyag-tartalmú részeit vizsgálva megállapítottuk, hogy az újonnan kialakított meddőhányó felszínén a foszfatáz-aktivitás a gyakorlatilag 0-tól a környező talajok aktivitásának mintegy 5-8%-ig emelkedett, a talajfejlődési folyamat előrehaladtával (10-15 év alatt) a meddőhányók foszfatáz aktivitása a környező talajok értékének 15-20%-ára nőtt. Az aktivitás megőrzésében elsődleges szerepet a szervesanyag-tartalom mutatott.

Megállapítottuk, hogy a tárolás hatására bekövetkezett foszfatáz aktivitás változások nagysága a talajok humusz- és agyagtartalmától függenek, minden esetben a kevesebb exoenzim kötőhellyel rendelkező homoktalajon (reziduális enzim-aktivitás), bizonyultak a legnagyobbak. Mivel a homoktalajon a talaj jóval kisebb mennyiségű enzimkonzerváló struktúrái gyorsan telítődnek enzimmel, az újonnan képződő enzimek eloxidálódnak, metabolizálódnak.

### **2.1.1.4. Tápanyagellátás hatása a foszfatáz aktivitásra**

A talaj könnyen oldható N- és AL-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-tartalmának hatását vizsgáltuk a talajok foszfatáz aktivitására. Megállapítottuk, hogy a trágyázás hatása a mészlepedékes csernozjom és a barna erdőtalajon jóval kisebb, mint a karbonátos homoktalajon (12. ábra).



12. ábra A vizsgált talajok foszfatáz aktivitásának változása a N trágyázás hatására

A N- trágyázás a homoktalajon megbízhatóan növelte mind a savas, mind a lúgos foszfatáz aktivitását, a talajban domináns lúgos foszfatáz aktivitását nagyobb mértékben változtatta meg, mint a savas foszfatáz aktivitását. Megállapítottuk azt is, hogy a változás ismét a homoktalajon volt megbízható mértékű.

Eredményeink alapján a trágyázott talajok foszfatáz paraméterei a kötöttebb és humuszos talajokon alig változnak, a homoktalajon viszont, amelyen a reziduális foszfatáz szerepe előzőeknél jóval kisebb, jelentős változások következnek be. A karbonátos homoktalaj foszfatáz paraméterei hasonlókká válnak a mészlepedékes csernozjom talajéhoz. Azaz a lúgos foszfatázaktivitás erős dominanciája mellett a csernozjoméhoz hasonló szintre nő a homoktalaj foszfatáz aktivitása. Mindez egyértelműen jelzi a homoktalajok nagyobb kitétségét és mutatja a reziduális aktivitás jelentőségét.

### 2.1.2. Gyökér foszfatáz aktivitás vizsgálatok

A növények foszforszükségletüket a talaj könnyen oldható foszfátkészletéből fedezik. A növényi gyökerek jelentős mennyiségben termelik a szerves foszfátok átalakításához szükséges foszfatáz enzimeket. Az enzimtermelés azonban csak közvetlenül a gyökérkörnyezetben mutatható ki.

A gyökér foszfatáz aktivitás vizsgálatokat két, növényfajnál, a repcénél, mely pályázatunk tesztnövénye volt, és a hazai növénytermesztés egyik meghatározó növényfajánál, a kukoricánál végeztük. Mivel a növények fejlődése során változik P-felvételük intenzitása, ezért a mindkét növényfajnál biztosan meghatározható fejlődési állapotot, a virágzás kezdetének időpontját választottuk ki mintázásra. A mintákat gyűjtésüktől kezdve a mérésig végig hűtve tároltuk (4°C), a méréseket a mintavételt követően 12-24 órán belül elvégeztük.

A gyökérfelszíni foszfomonoeszteráz-aktivitást Johnson és munkatársai (1999) módszere alapján határoztuk meg, p-nitrophenol (pNP) mérésével, szubsztrátként p-nitrofenil foszfátot (p-NPP) alkalmazva. A gyökérátmérőtől függően 100 mg (Gyökér1 átmérő<1mm) vagy 200 mg (Gyökér2 átmérő=1–2 mm) friss gyökérmintát mértünk be és a 10 ml pufferoldathoz 0,1 ml p-NPP oldatot (4 mM) adtunk. A mérési pH-t (5,5) saját korábbi, nyárfagyökéren végzett pH-optimumgörbénk alapján állítottuk be. Az inkubálást 37°C-os vízfürdőben való rázatással végeztük. A p-nitrophenol (pNP) értékét fotometriásan 410 nm-en határoztuk meg. Az értékeket 1 g száraz gyökértömegre és 1 órára vonatkoztatva adtuk meg.

Mivel a méréseket nem átlagmintákon végeztük, hanem 100 ill. 200 mg-os gyökérdarabokon, ezért szükséges volt a gyökérvastagság (átmérő), valamint a gyökér nedvességtartalmának hatását is vizsgálnunk.

Megállapítottuk, hogy a két növényfaj gyökereinek nedvességtartalma különböző (a kukorica gyökéré átlagosan 90,4%, a repce gyökéré pedig 83,2 %), a hajszálgyökerek nagyobb nedvességtartalmúak, mint a vastagabb gyökerek, azonban az átlagos különbség többnyire nem megbízható.

Kimutattuk, hogy a hajszálgyökerek nagyobb foszfatáz aktivitásúak, mint a vastagabb gyökérrészek (bár különbségük nem minden esetben szignifikáns) ( $d < 1\text{ mm}$ : repcénél 247,3,  $d=1-2\text{ mm}$  232,4  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{ s}\cdot\text{h}^{-1}$ ), továbbá azt is, hogy a gyökér nedvességtartalma a gyökér foszfatáz-aktivitásával pozitív összefüggést mutat.

Mivel a vizsgálatok szerint a gyökér foszfatáz aktivitását mind a gyökérvastagság, mind annak nedvességtartalom különbsége megváltoztathatja, ezért azt a módszertani megoldást választottuk, hogy a belső ismétlések helyett időgörbét alkalmaztunk (0.5, 1, 1.5 és 2 órás aktivitás). Az 1 órás értékeket linearizálás után 1 g száraz gyökérré számítottuk ki pNP-ben.

A repcegyökér foszfatáz aktivitását eltérő tápanyag szinteken (N és P) vizsgálva megállapítottuk, hogy a növények jobb nitrogén és foszfátfelvételi lehetősége a foszfatáz aktivitást másodfokú polinommal közelíthető összefüggés szerint, növelte. Eredményeink alapján tehát talajainkon a foszforadagolás (a legnagyobb adag (200 kg/ha  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) kivételével, különösen N-adagolással együttesen alkalmazva, a gyökérfoszfatáz aktivitást inkább serkenti, mint gátolja.

## 2.2. Talajok jellemzése a savas és lúgos foszfatáz aktivitás alapján

A sztenderd kísérleti feltételek között az alábbi eredményeket kaptuk (4. táblázat). Repcekísérletek talajainak összegzett vizsgálata alapján megállapítottuk, hogy a talajt, számos fizikai-kémiai paramétere mellett, jellemzi a savas és lúgos foszfatáz aktivitás szintje és aránya is.

A mészlepedékes csernozjom, karbonátos homoktalaj és barna erdőtalaj táblázati sorrendjében a talajok pH-értéke (vizes): 8,1, 7,8, 6,8, míg humusztartalma: 2,9 %, 0,8%, 3,1% volt. A lúgos és savas foszfatáz-aktivitás aránya a talajok pH-értékét, míg az aktivitások szintje a humusztartalmát követi.

4. táblázat A vizsgált talajok savas és lúgos foszfatáz aktivitása és aránya a 0-20 cm-es rétegben

Talajok enzimaktivitásának jellemzői	Enzimaktivitás értékei az egyes talajokban		
	Mészlepedékes csernozjomtalaj	Karbonátos homoktalaj	Barna erdőtalaj
Savas foszfatáz-aktivitás, $\mu\text{g pNP} / \text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$	52,8	25,2	150,0
Lúgos foszfatáz-aktivitás, $\mu\text{g pNP} / \text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$	294,0	92,2	216,0
Foszfatáz aktivitás összesen, $\mu\text{g pNP} / \text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$	346,8	117,4	366,0
Lúgos foszfatáz-aktivitás és savas foszfatáz aktivitás aránya	5,57	3,66	1,44

Összegezve az eredményeket, megállapítottuk, hogy a foszfatáz aktivitás változásának amplitúdója a kevés enzimkonzerváló struktúrával rendelkező homoktalajon jóval nagyobb, mint a magasabb agyag- és humusztartalmú csernozjom, vagy barna erdőtalajon. Ennek megfelelően a kötöttebb és humuszos talajok foszfatáz- paraméterei akár a tárolás, akár a trágyázás hatására jóval kevésbé változnak, mint a

homoktalajon. Utóbbi talaj, amelyen a reziduális foszfatáz szerepe előzőeknél jóval kisebb, jelentős változások következnek be.

**Megállapítottuk, hogy a talajokat, a savas és lúgos foszfatáz aktivitás szintje és aránya, meghatározott feltételek esetén megbízhatóan jellemzi. A feltételek jelentősége megnő az eltérő reziduális foszfatáz aktivitású talajok összehasonlításakor, mivel a reziduális foszfatáz aktivitás alacsony szintje, a talajokat a változásokra érzékenyebbé, s enzim aktivitásuk jellemzőiben változékonyabbá teszi.**

#### **HIVATKOZOTT IRODALOM**

Fodor N, Máthéné-Gáspár G, Pokovai K, Kovács GJ. 2002. 4M - software package for modelling cropping systems. *European J. Agr.*, **18**. 389-393.

Fodor N., Máthéné G.G., Kovács G. J. 2008. A 4M tápanyagmodell a növényi tápanyagellátás tudományos megalapozására. (4M nutrient model to provide a scientific basis for plant nutrient supplies) *Agrokémia és Talajtan*, **57** (1): 79-96.

Johnson, D., Leak, J. R. & Lee, J. A. 1999. The effects of quantity and duration of simulated pollutant nitrogen deposition on root-surface phosphatase activities in calcareous and acid grasslands: a bioassay approach. *New Phytologist*. **141**. 433–442.

Jones, C. A., Cole, C. V., Sharpley, A. N., Williams, J. R. 1984. A simplified soil and plant phosphorus model: I. Documentation. *Soil Science Society of America Journal* 48, 800–805.

Öhlinger R.. 1996. Phosphomonoesterase Activity with the Substrate Phenylphosphate In: Shinner, F.- Öhlinger, R. – Kandeler, E. E. – Margesin, R. (eds.), *Methods in Soil Biology*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany. 210-217.

Tabatabai, M. A., Bremner, J. M. 1969. Use of p-nitrophenylphosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology & Biochemistry*, **1**. 301-307.