

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze I. rész: Modellfejlesztés

Fodor Nándor, Máthéné-Gáspár Gabriella és Kovács Géza J.

MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet (MTA TAKI)

1. Irodalmi áttekintés, előzmények

1.1. Rendszer-szimuláció

A modellek mindig is fontos szerepet játszottak a tudományos megismerés folyamatában. A folyamatok időbeli és oksági kapcsolatokban való leírása révén megszületett a szimulációs modellezés, mely dinamikus tükrözést ad a valóságról. A rendszer-szimuláció révén összetett rendszereket szimulálunk, mint pl. egy agrár ökoszisztéma, ahol számtalan folyamat megy végbe párhuzamosan. Az egyes folyamatokat leíró tudományos összefüggések egységes és működő modellbe kerülnek. A szimulációs növénytermesztési modellek közvetlen célja az, hogy az igen bonyolult légkör-talaj-növény rendszer folyamatait, beleértve az emberi tevékenységet is, matematikai eszközökkel leírják, és számítógép segítségével szimulálják. A végső cél azonban az, hogy ezen modellek felhasználásával olyan kérdésekre kapjunk választ, amelyeket egyébként csak drága, időigényes esetleg kivitelezhetetlen kísérletek illetve megfigyelések segítségével kaphatnánk meg.

A rendszerszemléletű modellezés Forrester (1961, 1968), Ferrari (1965, 1978), Shannon (1975), Meadow (1972) Witt & Guadriaan (1978) munkáihoz nyúlik vissza. Az elméleti alapvetéstől világméretű ökológiai következtetésekkig jutottak el. A gyakorlati szántóföldi növénytermesztést szolgáló rendszermodellezés az 1980-as években született meg az Amerikai Egyesült Államokban (Ritchie, 1985, Jones & Kiniry, 1986) Európában inkább elméleti megközelítésből, de lényegében ugyanazt a rendszert modellezték. (Seligman & van Keulen, 1981).

1.2. A 4M modell

A 4M modell (Magyar Mezőgazdasági Modellezők Műhelye) megalkotását az tette szükségessé, hogy a hazai alkalmazások feltételrendszere eltért a világban elérhető szimulációs programcsomagok input megfogalmazásaitól. Olyan modellrendszerre volt szükségünk, melyet szabadon fejleszthetünk úgy, ahogy hazánk lehetőségei és szükségégei megkívánják. Az egyik probléma a világszerte elterjedt modellekkel, hogy azok magukon hordozzák a kialakítási helyük sajátosságait, elsősorban a mérési módszerek tekintetében. A gyakorlatban pl. Magyarországon hosszú évtizedek óta alkalmazzuk az ammónium-laktátos kivonó-

szert (AL-módszer) a felvehető foszfor és a kálium kivonására a talajból. A szaktanácsadási rendszerek is erre épülnek (Csathó et al. 2007). Ugyanakkor a világ nagy modellfejlesztői országaiban más módszerekkel határozzák meg a felvehető P és K mennyiségeket, ezért a modellek nem használhatók a hazai adatbázisokon.

A 4M-modell fejlesztéséhez az adott kiváló lehetőséget, hogy a CERES modellezési irány eredeti elindítója Joe T. Ritchie professzor kifejezetten támogatta a kezdeményezésünket. Így nem előről kellett kezdenünk, a CERES modell szolgált kiindulásul. A 4M modell két nyelven, magyarul és angolul készült el, és jellemzőit nemzetközileg is ismertettük. (Fodor et al. 2002). A 4M napi léptékű, determinisztikus (nem sztochasztikus) modell, amely működését (számításait) a légkör-talaj-növény rendszer számszerű jellemzői határozzák meg (1. táblázat). A rendszer fizikai, kémiai és biológiai jellemzőinek megadásán túl a kezdőfeltételeket is szükséges rögzíteni a bemenő adatok között. A modell vázlatos működését az 1. ábrán mutatjuk be. A számításokért felelős modulok (szürke téglalapok az 1. ábrán) az alábbi folyamatokat szimulálják (2. táblázat).

2. Fejlesztések a 4M modellben

2007-ben készült el a 4M modell legújabb generációja (4Mx), melynek fejlesztése során több világviszonylatban is elismert és széles körben használt modell (STICS: Brisson et al., 1998; CropSyst: Stöckle et al., 2003; DSSAT: Jones et al., 2003) tanulmányozása során szerzett tapasztalatainkat is felhasználtuk. Az előző változathoz képest 3 fontos fejlesztést hajtottunk végre.

2.1. A növény fajok/fajták fejlődésének és növekedésének modellezése

A 4Mx bármely növény modellezésére alkalmassá tehető anélkül, hogy a felhasználónak a program forráskódjához hozzá kellene nyúlnia. Ez igen nagy előrelépés a modell felhasználhatósága szempontjából. A nemzetközi viszonylatban is elismert és használt növénytermesztési modellek WOFOST (Boogaard et al., 1998), STICS (Brisson et al., 1998), CERES (Jones and Kiniry, 1986), CropSyst (Stöckle et al., 2003) nem ennyire rugalmasak, felhasználójuk csak a bemenő paraméterek töredékének módosíthatja az értékét, ezért ezen modellek parametrizálása, módosítása, fejlesztése csak szakképzett informatikus segítségével lehetséges.

A 4Mx egy ún. frame-model = keret-modell, amelyben tulajdonképpen 'csak' a kereteket rögzítettek, tudniillik a modellezett folyamatok megléte és sorrendje (pl. a növény esetén: fejlődés, gyarapodás, elosztás, növekedés, elhalás, átépülés), a folyamatokat leíró függvényeket a felhasználó adhatja meg egy kezelő felületen keresztül. Létezik már a 4Mx-hez hasonló keret-modell pl. a CROPGRO (Jones et al., 2003), ahol azonban a függvényeket csak poligonnal közelítő formában lehet megadni, míg a 4Mx-ben analitikus formában. Létezik továbbá egy SIMILE elnevezésű 'vizuális modellfejlesztő környezet'

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

(Muertzfeldt and Massheder, 2003), amely a 4Mx-nél is nagyobb szabadságot ad a felhasználónak illetve fejlesztőnek, hiszen ahogy a nevében is szerepel, a SIMILE fejlesztő környezet, amelyben gyakorlatilag bármilyen modell felépíthető. Ez a modell azonban nem lesz automatikusan egy kidolgozott, jól működő időjárás-talaj-növény modell, hanem csak egy eszköz, melynek használatával illetve parametrizálásával, szakismeret birtokában és nagy munkával készíteni lehet egy szakmai modellt. A 4Mx-szel azt az 'arany középutat' igyekeztünk megtalálni, amelyen a felhasználó kap egy kész, működő modellt a magyarországi szántóföldi kultúrák szimulációjához, de a lehető legnagyobb szabadságot kapja a növények fejlődésének és növekedésének eltérő modellezésére anélkül, hogy komolyabb informatikai ismeretekkel (algoritmustervezés, programírás, adatbázis-kezelés, stb.) rendelkezne.

A 4Mx-ben alkalmazott fejlesztés lényegét az alábbi példán keresztül mutatjuk be. A növénytermesztési modellek központi eleme az az egyenlet, amely a sugárzás hatására megtermelődő anyag mennyiségét adja meg. Ez a modellek többségének esetében az alábbi egyenletet jelenti:

$$[1] \quad M = 2,1 \cdot \text{RAD} \cdot \left(1 - e^{-k \cdot \text{LAI}}\right) \cdot \left(0,0003 \cdot \text{CO}_2 + 0,9079 \cdot S_{\text{víz}} \cdot S_T \cdot S_N\right)$$

M: Előállított anyag tömege [g/növény/d]

RAD: Globálsugárzás [$\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$]

k: Az állomány felépítésétől (állománysűrűség, sortáv) függő paraméter []

LAI: Levélfelület index []

CO_2 : A légköri CO_2 koncentrációja [mg/kg]

S: A víz-, hőmérséklet- és nitrogén-stresszt kifejező függvények

A CERES modellben például, adott növény esetén, a fenti egyenletben kizárólag a CO_2 koncentrációtól való függés volt beállítható a felhasználó által; egyetlen paraméter értéke vagy belső függvény alakja sem módosítható a felhasználó által. Így ezen az egyenleten fajtaspecifikus beállításokat a felhasználó nem végezhet el. A legapróbb fejlesztési, változtatási javaslattal is a modell fejlesztőjét illetve programozóját kell(ene) megkeresni, hiszen egyedül ő fér hozzá a program forráskódjához.

2.2. A tápanyagellátás modellezése

A növények életfeltételeinek az egyik meghatározó csoportja a talajban található tápanyagok mennyisége és felvehetősége. A tápanyagok egy részét a természet a szántóföldről elszállítjuk, ezért pótlásukról gondoskodni kell. A múlt század második felében a szerves trágya-használattal szemben előtérbe kerültek a műtrágyák, különös tekintettel a három un. makro-elem (N, P, K) vonatkozásában. A kivont és visszapótolt elemek mérlege a múlt század különböző időszakokban eltérően alakult (Kovács & Csathó 2006).

A legjelentősebb trágya hatóanyag a nitrogén, mert ebből vesz fel legtöbbet a növény, és ennek hiánya okoz legnagyobb termés kiesést. A talajban és a növényekben lejátszódó nitrogénforgalmat számos növénytermesztési modell szimulálja. Bonyolultsága ellenére elég jól modellezhető, mert ammóniumra és nitrátra bomlik le a talajban, melyek jól mérhetők. A CERES modellből a 4M-be áttemelt rutin (Godwin & Jones 1991) magyarországi tesztelése jó eredményekkel járt, (Kovács et al 1995) ezért ezen a modulon nem változtattunk.

Tápanyag visszapótlás szempontjából a második és harmadik legfontosabb tápanyag a foszfor és a kálium. Ezeket hazánkban a talaj ammónium-laktátban oldható mennyiségeivel az ún. AL-módszerrel jellemezzük. (Egnér et al., 1960; Tham, 1980; Sarkadi, 1986). A legtöbb növénytermesztési modell nem rendelkezik foszfor illetve kálium-modullal, e két tápelem hatását a számítások során elhanyagolják. Mivel a CERES modell is ebbe a csoportba tartozik születésekor a 4M is 'megörökölte' ezt a hiányosságot. A 4Mx modellben ezt a hiányt kezdetben a Jones és munkatársai (1984) által kidolgozott foszfor-modell alkalmazásával pótoltuk.

A Jones-féle modell a talaj-növény rendszert 6 foszforkészletre (pool) osztja: növényi készlet, a növény számára a talajban hozzáférhető készlet, 'szervetlen aktív' és 'szervetlen stabil' készlet valamint két további szerves foszforkészlet: 'friss' és 'stabil'. A folyamatokat ezen készletek közötti átalakulással írja le. Az átalakulás sebessége elsősorban attól függ, hogy a két készlet pillanatnyi aránya mennyire tér el a modellben rögzített egyensúlyi aránytól. Ezen felül az átalakulás sebessége függ még a környezeti feltételektől, úgymint a talaj pillanatnyi nedvességtartalmától és hőmérsékletétől és egy tapasztalati úton meghatározandó szorzótényezőtől. Ezt a foszfor-modellt igen nehéz parametrizálni. Nehéz adatot találni a modellben meghatározott készletek egyensúlyi arányára, és még nehezebb olyan kísérletet találni, amely eredményei alapján a készletek közötti átalakulás sebességét meghatározó szorzó tényezők értéke megállapítható volna. Mivel a magyarországi kísérletekben legtöbbször csak a talaj AL-P₂O₅ illetve összes foszfortartalmára van adat, és megfigyeléseink szerint az AL-P₂O₅ mennyiség nem azonosítható a Jones-féle modell (Jones et al., 1984) egyetlen készletével sem, új, foszforforgalmi modellt dolgoztunk ki. Az alkalmazni kívánt foszfor-modell, a paraméterek megfelelő beállításával elvben bármely más tápelem modellezésére is alkalmassá tehető, ennél fogva a következőkben ezt az általánosított tápelem-forgalmi modellt ismertetjük. A talaj-növény tápelem-forgalmi modellünk kialakításakor elsősorban arra törekedtünk, hogy a fellelhető kísérleti eredmények alapján a modell kalibrálható és validálható lehessen, és a modell elfogadható pontossággal írja le a talaj-növény rendszer tápelem-forgalmát. A modell vázlatos működési elve a 2. ábrán látható.

A tápelem-forgalmi modell napi léptékű és korlátlan számú, tetszőleges vastagságú talajréteget képes kezelni. Mivel minden készlet és folyamat megtalálható minden egyes modellezett talajrétegben, az egyszerűség kedvéért a következő

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

leírás csak egy rétegre és egy napra vonatkozik. A modell a talaj-növény rendszert három tápelem-készletre tagolja:

i. Növényi tápanyagkészlet: A növényben található tápanyagmennyiség. A modell különbséget tesz a növény főbb részei (gyökér, szár, stb.) között tápanyagtartalom illetve tápanyag-koncentráció szempontjából.

ii. Növény által Felvehető tápanyagkészlet: A talajból, elemtől függően, más-más, Magyarországon szabványos oldószerrel kivonható tápelem mennyisége (Kádár 1997) a P és K esetében az AL-módszer (Egnér et al., 1960); A mikroelemek vonatkozásában a MÉM NAK-ban kifejlesztett EDTÁ-s módszer terjedt el a gyakorlatban (MSZ-08-1722/1-1989). A felvehető készleten belül van elkülönítve egy ún. *Friss* tápanyagkészlet, mely a növény számára könnyebben hozzáférhető, mint a *Felvehető* készlet egyéb része. A kijuttatás időpontjában a műtrágya teljes tápanyagtartalma a *Friss* készletbe kerül, a szervestrágya tápanyagtartalma pedig a feltáródás ütemében. (Árendás és Csathó, 2002).

iii. Kötött tápanyagkészlet: Az összes tápanyagkészlet és a felvehető készlet különbsége.

Az egyes készletek között az alábbi folyamatok kerültek modellezésre:

1A és 1B, Növényi tápanyagfelvétel: A növény által előállított szárazanyag genetikailag meghatározott tápanyagtartalma a fejlődés során változik. Ennek megfelelően változik a növény tápanyagigénye is. A *Felvehető* és *Friss* készletek mennyiségének valamint a nedvességtartalom és hőmérséklet függvényében a talaj adott mennyiségű tápanyag szolgáltatására képes. A növény igénye és a talaj által szolgáltatott mennyiség közül a kisebb lesz a növény tényleges tápanyagfelvétele. Amennyiben az igény nagyobb, mint a szolgáltatott mennyiség tápanyag-hiánystressz lép fel, amely kihat a növény fejlődésére és növekedésére.

$$[2] \text{ NovSzuk} = \max((\text{NovOKonc} - \text{NovKonc}) \cdot \text{NovTom} + \text{UjTom} \cdot \text{NovOKonc}, 0)$$

$$[3] \text{ TalSzolg} = (\text{TSzAL} \cdot \max(\text{Tfel} - \text{Tfriss} - 10, 0) + \text{TSztr} \cdot \text{Tfriss}) \cdot \text{Ft} \cdot \text{Fn}$$

$$[4] \text{ Ft} = \max(\min(\text{TalHom}/2, 1), 0)$$

$$[5] \text{ Fn} = \min(2 \cdot \text{TalNedv}/\text{VKsz}, 1)$$

NovSzuk: A növényzet tápanyagszükséglete [kg/ha]
 TalSzolg: A talaj által szolgáltatott tápanyag [kg/ha]
 Ft: A talaj tápanyag-szolgáltatásának hőmérsékletfüggése []
 Fn: A talaj tápanyag-szolgáltatásának nedvességfüggése []
 NovOKonc: Optimális tápanyag-koncentráció a növényben []
 NovKonc: Pillanatnyi tápanyag-koncentráció a növényben []
 NovTom: A növényzet pillanatnyi tömege [kg/ha]
 UjTom: A növényzet adott napon termelődő tömege [kg/ha]
 Tfel: A talaj *Felvehető* tápanyagkészlete [mg/kg]
 TSzAL: A felvehető készlet tápanyag-szolgáltató képességét kifejező eh. []
 Tfriss: A talaj *Friss* tápanyagkészlete [mg/kg]
 TSztr: A friss készlet tápanyag-szolgáltató képességét kifejező együttható []
 TalHom: A talaj hőmérséklete [°C]
 TalNedv: A talaj nedvességtartalma [cm³/cm³]
 VKsz: A talaj szabadföldi vízkapacitása [cm³/cm³]
 max és min: Maximum illetve minimum függvény

2. Friss tápanyag 'öregedése': A trágyával talajba jutó tápanyag, amely a növény számára könnyebben hozzáférhető, mint a felvehető készlet egyéb része, fokozatosan 'előregszik', és a trágyázás óta eltelt idővel arányosan, a kijuttatott mennyiség egyre nagyobb hányada válik a *Felvehető* készlet részévé.

$$[6] \quad Tör = Fö \cdot Tfriss$$

Tör: Előregedő *Friss* tápanyag mennyisége [kg/ha]
 Fö: Előregedés ütemét megadó empirikus együttható []
 Tfriss: A talaj *Friss* tápanyagkészlete [kg/ha]

3. Megkötődés illetve Feltáródás: A *Felvehető* tápanyagkészlet és a *Kötött* tápanyagkészlet közötti anyagforgalom iránya illetve sebessége a két készlet mennyiségének arányától, valamint a talaj hőmérsékletétől és nedvességtartalmától függ. A tápanyag megkötődik illetve feltáródik attól függően, hogy a két készlet egyensúlyi arányához képest melyik készlet van túlsúlyban.

$$[7] \quad \text{ForgFK} = F_s \cdot (T_{fel} - T_{köt} / \text{EgyAr}) \cdot F_t \cdot F_n$$

$$[8] \quad F_t = \exp(0,115 \cdot \text{TalHom} - 2,88)$$

$$[9] \quad F_n = \min(\text{TalNedv} / \text{VKsz}, 1)$$

ForgFK: A *Felvehető* és *Kötött* készletek közötti anyagforgalom [kg/ha]
 Ft: Az anyagforgalom sebességének hőmérsékletfüggése []
 Fn: Az anyagforgalom sebességének nedvességfüggése []
 Fs: Talajtól függő empirikus együttható []
 Tfel: A talaj *Felvehető* tápanyagkészlete [mg/kg]
 Tköt: A talaj *Kötött* tápanyagkészlete [mg/kg]

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

EgyAr: A *Felvehető* és *Kötött* tápanyagkészletek egyensúlyi aránya []
TalHom: A talaj hőmérséklete [°C]
TalNedv: A talaj nedvességtartalma [cm³/cm³]
VKsz: A talaj szabadföldi vízkapacitása [cm³/cm³]
min: Minimum függvény

4. Tápanyag kimosódása a növényből: A tápanyag kimosódásának mennyiségét a csapadék mennyiségétől és a növény pillanatnyi tápanyagtartalmától tettük függővé.

$$[10] \quad Kki = Fk \cdot \max(\text{NovKonc} - \text{NovMiKonc}, 0) \cdot \text{Csap}$$

Kki: Növényzetből kimosódó tápanyag mennyisége [kg/ha]
Fk: A kimosódás ütemét megadó empirikus együttható [kg/ha/mm]
NovKonc: Pillanatnyi tápanyag-koncentráció a növényben []
NovMiKonc: Minimális tápanyag-koncentráció a növényben []
Csap: Csapadék mennyisége [mm]
max: Maximum függvény

A modell működéséhez az alábbi, tápanyag-specifikus bemenő adatokat kell biztosítani:

- I. A talaj *Felvehető* (AL, EDTA, stb. oldható) és *Kötött* tápanyagkészletének egyensúlyi aránya. Meghatározható közvetlen méréssel vagy egy trágyázási utóhatás kísérlet eredményeit felhasználva, iterációs úton (trial and error method; Merriam-Webster dictionary, 2002).
- II. A talaj *Felvehető* és *Kötött* tápanyagkészlete közötti anyagforgalom sebességét meghatározó empirikus együttható. Közvetlenül nem, kizárólag iterációs úton határozható meg például egy trágyázási utóhatás kísérlet eredményeit felhasználva.
- III. A talajszelvény elkülöníteni kívánt rétegeinek (pl. genetikai szintjeinek) tápanyagtartalma, mint kezdőfeltétel (Pl. AL-K₂O, Mg_{KCl}, EDTA-Mn, stb.) Közvetlen méréssel meghatározható adat.
- IV. A trágyázás jellemzői: trágya típusa, tápanyagtartalma, bedolgozás mélysége és a kijuttatás időpontja. Egyszerű agrotechnikai adatok, melyek megtalálhatók a kísérlet dokumentációjában vagy a gazdálkodási naplóban.
- V. A növény tápanyag értékének alakulása a növény eltérő fejlődési fázisaiban. Közvetlen méréssel meghatározható adat. A fő tápelemekre vonatkozóan a szakirodalom is jó közelítést tesz lehetővé.
- VI. A tápanyag-kimosódás ütemét megadó empirikus együttható. Értéke sokéves növénytermesztési illetve trágyázási kísérlet talajvizsgálataiból, növényi és időjárási adatokhoz való illesztéssel, iterációs módszerrel határozható meg.

Elkészítettük az előzőekben ismertetett modell számítógépen futtatható változatát és egy foszfor-utóhatás kísérlet (Kádár et al., 1984) valamint egy kálium-utóhatás kísérlet (Csathó, 2002) adatait felhasználva foszforra és káliumra kalibráltuk (3-4. ábra). A kalibrálás során a szántott réteg évente megmért $AL-P_2O_5$ illetve $AL-K_2O$ értékeit hasonlítottuk a modell által számított értékekhez. Összehasonlítottuk továbbá a növény által felvett foszfor és kálium mért és szimulált értékeit is (5-6. ábra). Egyéb mezo- és mikro-tápelemekre, megfelelő adatbázis hiányában, csak annyira tudtuk parametrizálni a modellt, hogy realisztikusan működjön, azaz számításai ne kerüljenek ellentmondásba a kisszámú szakirodalmi adattal. A modell validálását, foszforra és káliumra, az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisának (Csathó 2003a; Csathó 2003b; Csathó 2005a; Csathó 2005b) segítségével végeztük el. Megvizsgáltuk, hogy a foszforral illetve káliummal egyre gyengébben ellátott talajokon a szabadföldi kísérletekben tapasztalt és modell által számított relatív termések hogyan viszonyulnak egymáshoz (7-8. ábra). Relatív termés alatt a foszforhiányos (NK) illetve káliumhiányos (NP) és a harmonikus (NPK) ellátottságú kezelésekben tapasztalt termések arányát értjük.

A modellezési munkát ti. azt, hogy a modell a lehető legpontosabban visszaadja a szántóföldi kísérletekben megfigyelt változók mért értékeit két dolog is nehezítette:

1. Mivel a kísérleteket nem modellezési szempontok alapján állították be jó néhány kulcsfontosságú mérési adat hiányzott, amelyek a modell pontos működéséhez elengedhetetlenek. Hiányzott például a mért globálsugárzás, amely a napi biomassza-gyarapodás és evapotranszpiráció kiszámításához nélkülözhetetlen. Ahhoz, hogy a modellt egyáltalán használni tudjuk a hiányzó bemenő adatokat becslőeljárások segítségével határoztuk meg (Fodor és Rajkai, 2005; Fodor, 2006). A becslések alkalmazásával természetesen a modellel szemben támasztott elvárásainkban is alább kellett adnunk, hiszen köztudott, hogy bármely modell számításai legfeljebb annyira lehetnek pontosak, amennyire a bemenő adatai pontosak.
2. A mérési eredmények, amelyekhez a kalibrálás során a modell eredményeit igyekszünk igazítani, sokszor nem egyértelműek, szórásuk igen nagy is lehet. Nagyhorcsöki trágyázási utóhatás kísérletekben, a trágyázás után 10 hónappal, az alkalmazott dózis nagyságától függően, az ugyanabból a kezelésből vett talajminták legnagyobb mért $AL-P_2O_5$ illetve $AL-K_2O$ tartalma a legkisebb mért érték 1,7 - 36,7 szerese illetve 1,3 - 4,8 szerese volt (Kádár, 2002). Debreceni kisparcellás kísérletekben az ismétlések között a megfigyelt növényi jellemzők (termés, biomassza, szemtömeg stb.) 5-10 %-os eltérését tapasztalták (Huzsvai, 2000).

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

A fentiekben ismertetett tények ismeretében illetve azok következményeként csak azt vizsgáltuk, hogy a modell eredményei hosszú távon és átlagban visszaadják-e a kísérletekben tapasztalt trendeket.

A foszfor modell hosszútávon jól követte a kalibrációs adatbázisból származó talaj AL-P és a növény által kumuláltan felvett foszfor mért értékeinek trendjét (3. és 5. ábra). Kálium esetében a modell teljesítménye nem volt ennyire meggyőző. A modell a szimulációs időszak első felében jócskán felülbecsülte a növényi káliumfelvételt, míg az időszak második felében inkább alulbecsülte, különösen a nagy dózisu kezeléseknél. A kísérletvezető (Csathó, 2007) szóbeli közlését az időjárás adatok elemzése is igazolta: a kísérlet első harmadában extrém száraz időszakok fordultak elő a tenyészidőszakban, amelyek miatt a kísérlet beállításakor várt kálium-utóhatások is elmaradtak: 1991: 27 mm/55 nap; 1992: 24 mm/75 nap; 1993: 16 mm/70 nap; 1994-ben pedig a teljes tenyészidőszakban mindössze 100 mm eső esett. A modellezési eredmények ismeretében (4. és 6. ábra) szükségesnek látszik a növényi káliumfelvétel modellezésnek továbbfejlesztése extrém száraz időszakokra. Az, hogy a nagyadagú kezeléseknél a modell hajlamos alulbecsülni a káliumfelvételt nem meglepő, hiszen a luxusfelvétel jelenségét a modell (egyenlőre) nem veszi figyelembe. Ez a hiányosság automatikusan ki is jelöli a modellfejlesztés egy további lehetséges lépését.

A 4Mx validációja során a modell az egyre rosszabb P- illetve K-ellátottságból származó termés kiesést mindkét tápelemre elfogadhatóan szimulálta, hiszen a számított termés kiesések minden esetben az elmúlt évtizedek szabadföldi kísérleteinek eredményei alapján megállapított tartományban maradtak (7-8. ábra).

A mikroelemekre nézve a fentiekhez hasonlóan három készletet állítottunk be: növényi, a felvehető és a nehezen oldható készleteket. Helyi kísérletekhez a bemenő adatokat helyi mérésekből származtatjuk. Ellentétben a makroelemekkel, melyek esetében néhány éves intenzív használat ki lehet méríteni a talajokat, a mikrotápelemnél sok évtizedes intenzív használat sem elég a kimerítéshez. Általában a szelvény egészében hasonló a mikrotápelemek koncentrációja, ezért a növények gyökerei az teljes gyökérszóna tud szolgáltatni. A készletek közötti átalakulási sebességekre nincsenek megbízható adatok, mert sok évtizedes megfigyelések kellenének hozzá.

Futásokat végeztünk a talajok kimerülésének tesztelésére a mikrotápanyagok vonatkozásában. A réz szántóföldi gazdálkodás mellett a rézzel viszonylag gyengébben ellátott területeken is, mint például a csernozjomokon (ahol csak 2 mg.kg^{-1} Cu van a határkoncentráció felett) 600-700 évig elegendő a talajok felvehető réztartalma, ha nullára állítottuk a nehezen oldható Cu feltárodási rátáját, és nem számoltunk az NPK trágyázással bevitt Cu mennyiségével sem. Ha az utóbbiakat is számba vettük, akkor kb. 1400 évig nem kell rézhiánnyal számolni egy átlagos csernozjom területen (0,00003-es éves feltárodási ráta mellett). A

modellfutások szerint a talajok kimerülése mikroelemek vonatkozásában hosszú távon nem fenyegeti a szántóföldjeinket, leszámítva egyes különleges eseteket. pl. a helytelen trágyázás okozta antagonizmusok hatásait. A mikroelemek vonatkozásában inkább a mikroelemek káros felhalmozódásában lesz jelentősége a szimulációnak.

3. Fejlesztés további irányai

A szimulációs modellezés nem lehet jobb, ha a mérési technika nem fejlődik. Sok mindent nem tudunk mérni vagy nem megfelelő pontossággal tudunk csak mérni. Ilyen a növényi növekedés mérése (vagyis a szárazanyag produkció napi vagy legalább heti léptékben a terepen, nem destruktív mérésekkel). Hasonlóan kevés adattal rendelkezünk a napsugárzás, a lokális csapadék, a talajszelvény vízforgalmának, nitrát-bemosódási dinamikájának lokális értékei tekintetében. Ezt a hiányt modellezési szempontból megtervezett kísérletekkel lehet pótolni. A precíziós gazdálkodás igényével párhuzamosan kell fejleszteni a vízmozgás horizontális elemeinek modellezését a lejtős területeken, a kisebb nagyobb terepi horpadásokban, foltokban lejátszódó térbeli folyamatok szimulációját.

Összefoglalás

A szimulációs növénytermesztési modellek közvetlen célja az, hogy az igen bonyolult légkör-talaj-növény rendszer folyamatait, beleértve az emberi tevékenységet is, matematikai eszközökkel leírják, és számítógép segítségével szimulálják. A végső cél azonban az, hogy ezen modellek felhasználásával olyan kérdésekre kapjunk választ, amelyeket egyébként csak drága, időigényes esetleg kivitelezhetetlen kísérletek illetve megfigyelések segítségével kaphatnánk meg. A magyar fejlesztésű 4M modell megalkotását az tette szükségessé, hogy a hazai alkalmazások feltételrendszere eltér a világban elérhető szimulációs programcsomagokban alkalmazott megoldásoktól. Mivel a legtöbb növénytermesztési modell, így a 4M kifejlesztéséhez is használt CERES modell sem rendelkezik foszfor illetve kálium-modullal, születésekor a 4M is 'megörökölte' ezt a hiányosságot. Neves hazai és külföldi szakemberek eredményeire támaszkodva, elkészítettük a 4M modell tápanyagmodulját, amit utóhatás- és tartamkísérletek adatait felhasználva foszforra és káliumra kalibráltuk és validáltunk. A paraméterek megfelelő beállításával, a tápelem-modul bármely más tápelem modellezésére is alkalmassá tehető. A mikroelemek modellezése szintén három készlettel történt. A modellfutások szerint a talajok kimerülése mikroelemek vonatkozásában hosszú távon sem fenyeget a magyarországi szántóföldeken.

Kulcsszavak: modell, tápelemforgalom, szimuláció, 4M-programcsomag

Irodalom

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

- Árendás, T., Csathó, P. 2002. Comparison of the effect of equivalent nutrients given in the form of farmyard manure or fertilizers in Hungarian long-term field trials. *Commun. in Soil Sci. and Plant Anal.*, 30: 2861-2878.
- Boogaard, H. L., van Diepen, C. A., Rötter, R.P., Cabrera, J. M. C. A., van Laar, H. H.: "User's Guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model and WOFOST Control Center 1.5"; DLO-Winand Staring Centre / Wageningen (1998)
- Brisson, N., and 17 others: "STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and maize"; *Agronomie*, 18 (1998), 311-346.
- Csathó, P. 2002. The residual effect of K fertilization in a Hungarian corn monoculture long-term field trial, 1990-1999. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 33: 3105-3119.
- Csathó, P. 2003. Kukorica P hatásokat befolyásoló tényezők vizsgálata az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán. *Szemle. Agrokémia és Talajtan*, 52. 455-472.
- Csathó, P. 2003. Őszi búza P-hatásokat befolyásoló tényezők vizsgálata az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán. *Növénytermelés*, 52: 679-701.
- Csathó, P. 2005. Kukorica K hatásokat befolyásoló tényezők vizsgálata az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán. *Szemle. Növénytermelés*, 54: 447-465.
- Csathó, P. 2005. Őszi búza K hatásokat befolyásoló tényezők vizsgálata az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán. *Szemle. Növénytermelés*, 54: 197-213.
- Csathó, P., Árendás, T., Fodor, N. és Németh, T. 2007. A legelterjedtebb hazai trágyázási szaktanácsadási rendszerek tesztelése szabadföldi kísérletekben. *Szemle. Agrokémia és Talajtan*, 56: 173-190.
- Egnér, H., Riehm, H. und Domingo, W. R. 1960: Untersuchungen über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung de Nährstoffzustandes der Böden. II. K. *LantbrHögsk. Ann.* 26. 199-215.
- Ferrari, Th. J., 1965. Prüfung mit und ohne Eingriff. In: *Aktuelle Probleme des landwirtschaftliche Versuchswesens. Landwirtschaftliche-Chemischen Bundesversuchsanstalt, Linz, Veröffentlichungen* 6: 25-32.
- Ferrari Th.J., 1978. *Elements of system-dynamics simulation*, Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Fodor N., Máthéné-Gáspár G., Pokovai K., Kovács G.J. 2002: 4M - software package for modelling cropping systems. *European J. of Agr.* Vol 18/3-4 pp 389-393.
- Fodor N., Rajkai K., 2005. Számítógépes program a talajok fizikai és vízgazdálkodási jellemzőinek egyéb talajjellemzőkből történő számítására (TALAJTANonc 1.0). *Agrokémia és Talajtan* 54.25-40.

- Fodor, N. 2006. Estimating global radiation using the meteorological input data of crop models. *Időjárás* 110:175-182.
- Forrester, J. W., 1961. *Industrial dynamics*. Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, Mass. U.S.A.
- Forrester, J. W., 1968. *Principles of systems*. Wright-Allen Press, Cambridge, Mass. U.S.A.
- Goudriaan, J., 1973. Dispersion in simulation models of population growth and salt movement in the soil. *Neth J. Agric. Sci* 21: 269-281.
- Huzsvai L. 2000. A talaj és környezeti kölcsönhatások értékelésének módszerei. Doktori értekezés, DE. Agrártudományi Centrum, 95. o.
- Jones, C.A., C.V. Cole, A.N. Sharpley, and J.R. Williams. 1984 A simplified soil and plant phosphorus model: I. Documentation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:800-805.
- Jones, C.A., Kiniry, J.R.: "CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development"; Texas A&M University Press / Texas (1986)
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., Ritchie, J. T. 2003. "DSSAT Cropping System Model"; *European Journal of Agronomy*, 18 (2003), 235-265.
- Kádár, I., Csathó, P. és Sarkadi, J. 1984. A szuperfoszfát tartamhatásának vizsgálata őszi búza monokultúrában. *Talajvizsgálati és szemterméseredmények. I. Agrokémia és Talajtan*, 33. 375-390.
- Kádár I. 1997: A növénytaplálás alapelvei és módszerei, MTA TAKI, Budapest
- Kádár, I. 2002. A növénytaplálás alapelvei és módszerei. 126. o. MTA TAKI, Budapest ISBN 963 400 874 7
- Kovács G. J., Németh T., Ritchie, J. T., (1995) Testing Simulation Models for the Assessment of Crop Production and Nitrate Leaching in Hungary, *Agricultural Systems* 49. 385-397.
- Kovács, G.J., Csathó, P. (Szerk) 2006. *Mérlegszámítások 1991-2003*
- Lakanen, E. - Erviö, R. (1971): A comparison of eight extractants for the determination of plant available micronutrients in soil. *Acta Agr. Fenn.* 123:223-232.
- Meadow, D. L. et al., 1972. *The limits to growth*. Universe Books, New York, U.S.A.
- MSZ-08-1722/1-1989: *Talajvizsgálatok. Talajkivonatok készítése*. MSZH.
- Muetzfeldt, R. and Massheder, J. 2003. The Simile visual modelling environment, *European Journal of Agronomy*, 18 (3).345-358
- Ritchie, J.T., 1981. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere. *Plant and Soil* 58, 81-96.
- Ritchie, J. T., 1985. A user-oriented model of the soil water balance in wheat. In; *Wheat Growth and Modeling*, Eds.: Day, W. & Atkin, R. K. NATO ASI Series. New York: Plenum Publishing Corp.

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

- Sarkadi J. 1986. Az AL-oldható foszfor és kálium meghatározásának pontossága, illetve megbízhatósága. *Agrokémia és Talajtan* 35: 249-254.
- Seligman H.G. & van Keulen H. 1981: PAPRAN: a simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. pp. 192-221. In: *Simulation of nitrogen behavior of Soil-Plant Systems*, ed. M.J. Frissel & J.A. van Veen. Wageningen, Netherlands: PUDOC.
- Shannon, R. E., 1975. *Systems simulation: the art and science*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Stöckle, C. O., Donatelli, M., Nelson, R.: "CropSyst a cropping system simulation model"; *European Journal of Agronomy*, 18 (2003), 289-307.
- Wit, C. T. de & Goudriaan, J., 1978. *Simulation of ecological processes*. Pudoc. Wageningen. The Netherlands.

Köszönetnyilvánítás:

A publikáció a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj valamint a T046983 OTKA program támogatásával készült.

	Jellemző/Paraméter ^a
Légkör ^b	globálsugárzás, léghőmérséklet, csapadék
Talaj ^c	térfogattömeg, humusztartalom, szabadföldi vízkapacitás, telítési vízvezetőképesség
Növény ^d	filokron intervallum, bázishőmérséklet, fenofázisok hossza, szentelítődés potenciális sebessége

1. táblázat: A 4M modell által igényelt fontosabb bemenő adatok

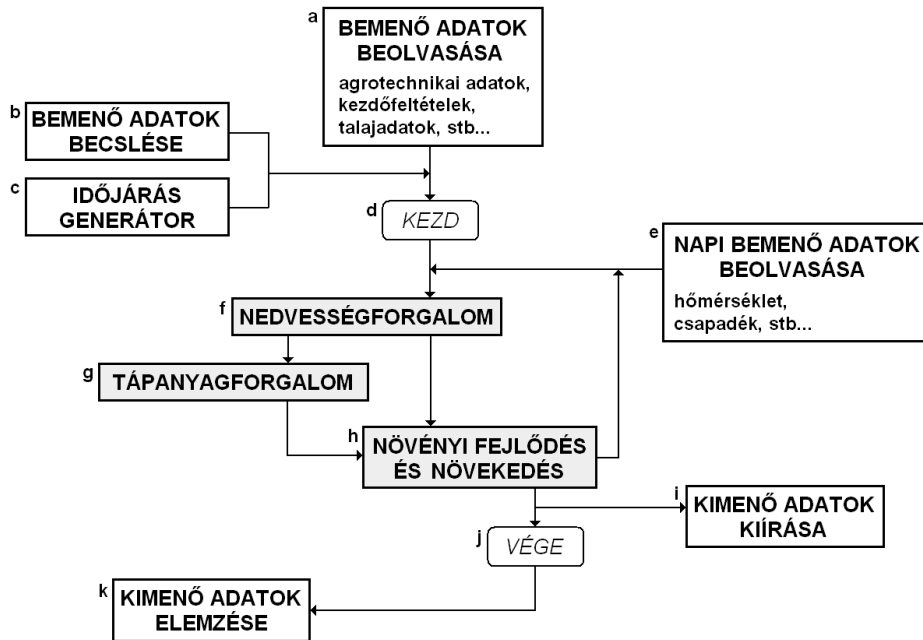
Table 1.: Some of the more important input data of 4M model
(a) parameter, (b) atmosphere, (c) soil, (d) plant

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

Nedvességforgalom^a	Tápanyagforgalom^b	Növényi fejlődés és növekedés^c
Talajpárolgás	NO ₃ mozgása a talajban	Fenológia
Növényi párologtatás	Mineralizáció	Asszimiláció
Felszíni vízlefolyás	Immobilizáció	Asszimiláták elosztása
Víz talajba illetve mélybe szivárgása	Nitrifikáció	Gyökér- és levélfelület növekedés
	Denitrifikáció	Termés
	Növényi N-felvétel	

2. táblázat: 4M modell előző változata által szimulált folyamatok

Table 2.: Simulated processes in the previous version of 4M model
(a) water balance, (b) nutrient turnover, (c) plant development and growth

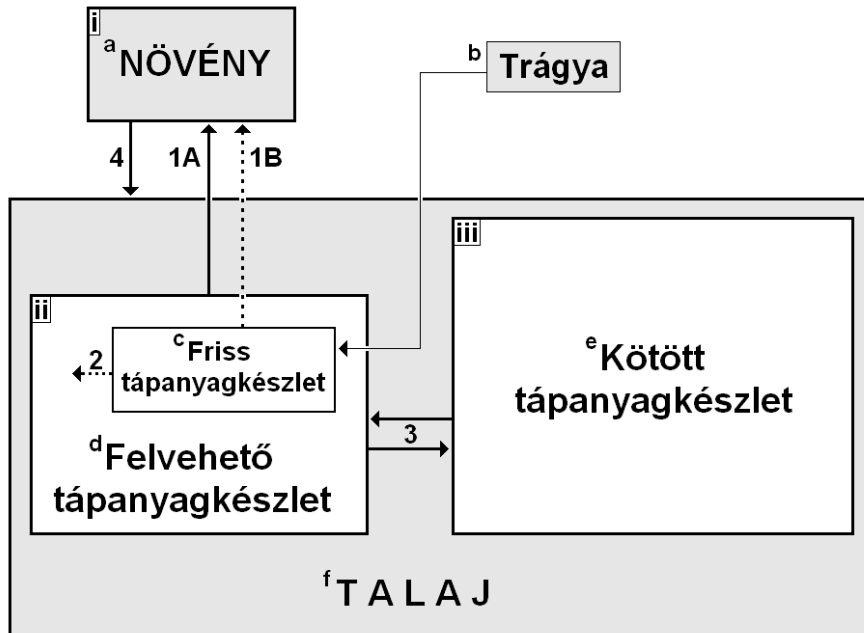


1. ábra: A 4M modell egyszerűsített folyamatábrája

Figure 1.: Simplified flow chart of the 4M model

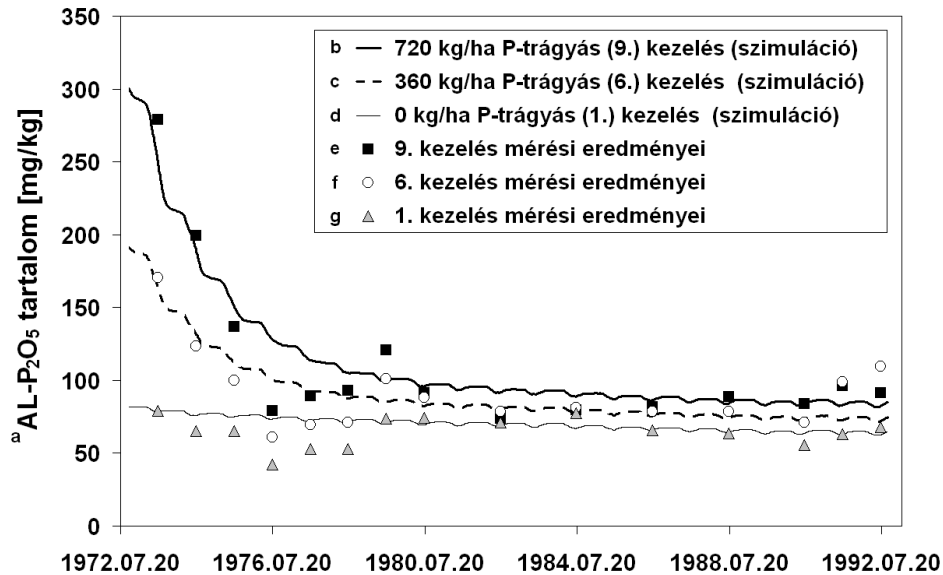
(a) read input data, (b) estimate input data, (c) weather generator, (d) start, (e) read daily (weather) input data, (f) water balance, (g) nutrient turnover, (h) plant development and growth, (i) write output data, (j) end, (k) analyse output data

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze



2. ábra: A 4Mx tápelem-forgalmi moduljának vázlatos működési elve

Figure 2.: Schematic mechanism of the nutrient turnover module of the 4Mx model
 (a) plant, (b) fertiliser, (c) fresh nutriment pool, (d) extractable nutriment pool, (e) stabile/non-extractable nutriment pool

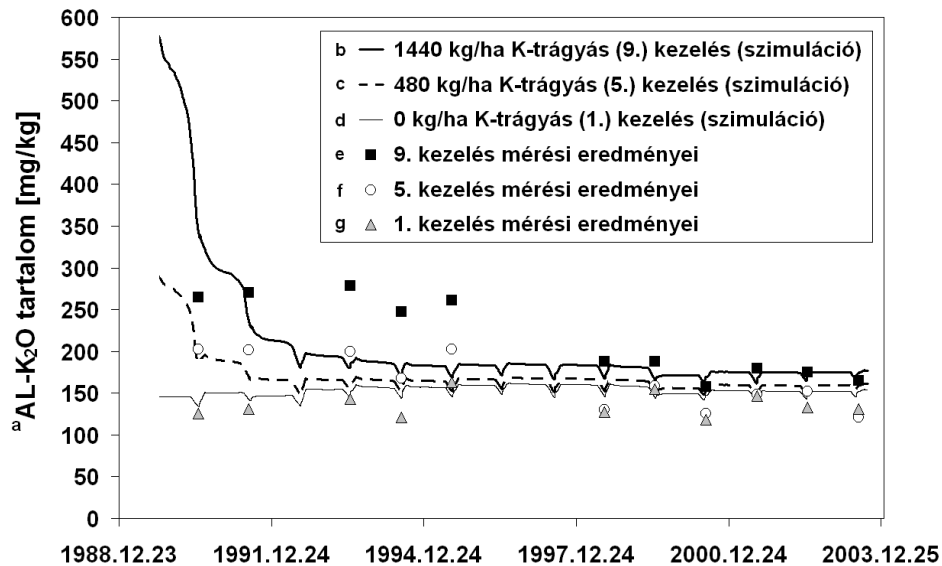


3. ábra: Foszfor-utóhatáskísérlet mért és szimulált eredményei, Nagyhörcsök (1972-1992): a talaj felső 25 cm-ének foszfortartalma

Figure 3.: Observed and simulated results of a phosphorus after-effect experiment, Nagyhörcsök (1972-1992): P content of the upper 25 cm of the soil profile

(a) AL-P₂O₅ content [mg/kg], (b) simulated result of treatment #9, dose: 720 kg/ha P fertiliser, (c) simulated result of treatment #6, dose: 360 kg/ha P fertiliser, (d) simulated result of the control treatment, dose: 0 kg/ha P fertiliser, (e) observed result of treatment #9, (f) observed result of treatment #6, (g) observed result of the control treatment

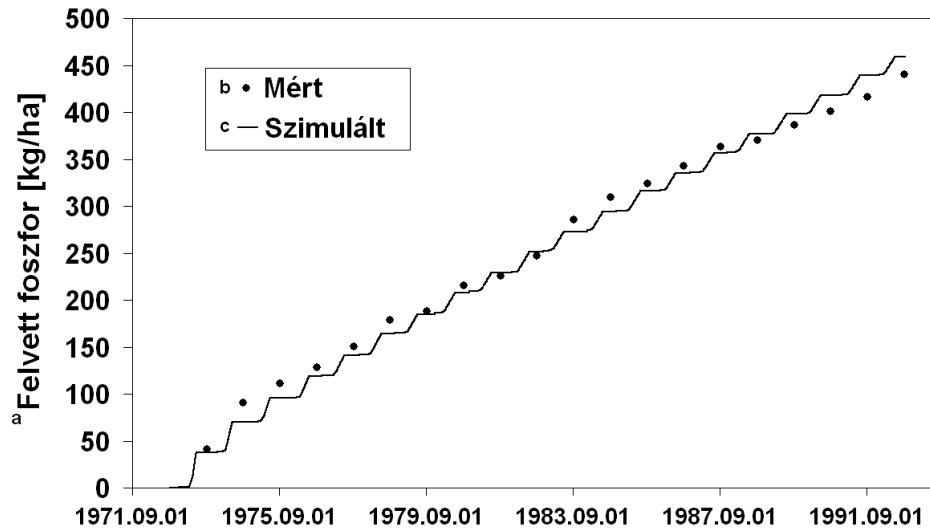
A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze



4. ábra: Kálium-utóhatáskísérlet mért és szimulált eredményei, Nagyhörcsök (1989-2003): a talaj felső 25 cm-ének káliumtartalma

Figure 4.: Observed and simulated results of a potassium after-effect experiment, Nagyhörcsök (1989-2003): K content of the upper 25 cm of the soil profile

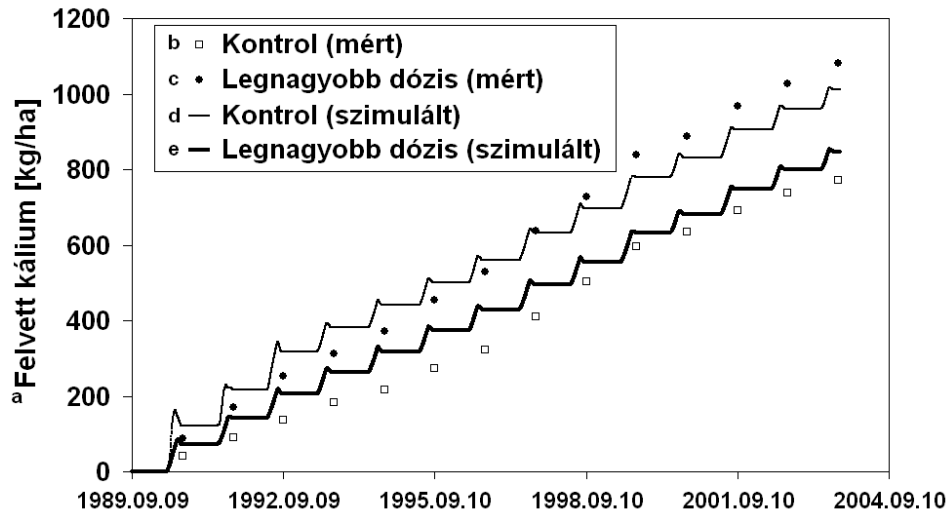
(a) AL-K₂O content [mg/kg], (b) simulated result of treatment #9, dose: 1440 kg/ha K fertiliser, (c) simulated result of treatment #5, dose: 480 kg/ha K fertiliser, (d) simulated result of the control treatment, dose: 0 kg/ha K fertiliser, (e) observed result of treatment #9, (f) observed result of treatment #6, (g) observed result of the control treatment



5. ábra: Foszfor-utóhatáskísérlet mért és szimulált eredményei, Nagyhörcsök (1972-1992): a termesztett növények által felvett foszfor kumulált mennyisége. A kontroll és a legnagyobb adagú kezelés között ne volt jelentős eltérés; a 21 év után 27 kg/ha eltérés volt az összesen felvett foszfor mennyiségében.

Figure 5.: Observed and simulated results of a phosphorus after-effect experiment, Nagyhörcsök (1972-1992): cumulative plant phosphorus uptake. There was no significant between the control and the treatment with the highest P fertiliser dose; the difference was only 27 kg/ha after 21 years
 (a) Phosphorus uptake [kg/ha], (b) observed, (c) simulated

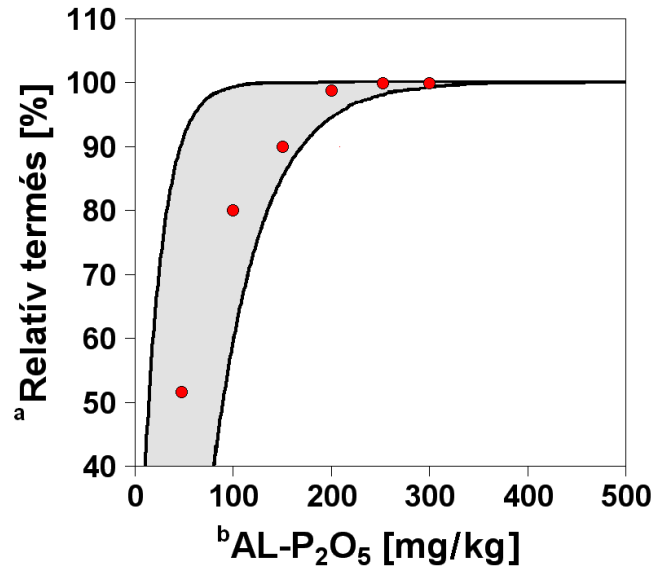
A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze



6. ábra: Kálium-utóhatáskísérlet mért és szimulált eredményei, Nagyhorcsök (1990-2003): a termesztett növények által felvett kálium kumulált mennyisége. A legnagyobb adagú kezelés 1440 kg/ha kálium hatóanyagot kapott 1989 őszén.

Figure 6.: Observed and simulated results of a potassium after-effect experiment, Nagyhorcsök (1990-2003): cumulative plant potassium uptake. The treatment with the highest fertiliser dose got 1440 kg/ha K fertiliser at the autumn of 1989.

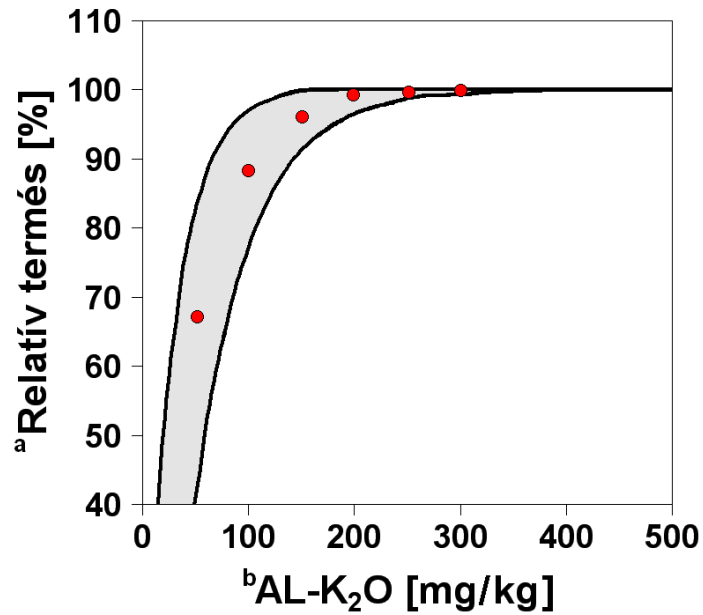
(a) Potassium uptake [kg/ha], (b) control (observed), (c) highest fertiliser dose (observed), (d) control (simulated), (e) highest fertiliser dose (simulated)



7. ábra: Az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletekben tapasztalt (szürke terület) és a 4Mx által szimulált, foszfor-hiányból fakadó, relatív terméseredményben (NK/NPK) kifejezett terméskiesések a talaj AL-P₂O₅ tartalmának függvényében

Figure 7.: Relative crop failure (NK/NPK) due to phosphorus stress observed in the Hungarian field experiments between 1960 and 2000 (grey area) and simulated with 4Mx as a function of the soil AL-P₂O₅ content (a) Relative yield [%], (b) soil AL-P₂O₅ content [mg/kg]

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze



8. ábra: Az 1960 és 2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletekben tapasztalt (szürke terület) és a 4Mx által szimulált, kálium-hiányból fakadó, relatív terméseredményben (NP/NPK) kifejezett terméskiesések a talaj AL-K₂O tartalmának függvényében

Figure 8.: Relative crop failure (NP/NPK) due to potassium stress observed in the Hungarian field experiments between 1960 and 2000 (grey area) and simulated with 4Mx as a function of the soil AL-K₂O content
(a) Relative yield [%], (b) soil AL-K₂O content [mg/kg]

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze II. rész: Adatkiszolgálás és alkalmazások

Fodor Nándor, Máthéné-Gáspár Gabriella és Kovács Géza J.

MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet (MTA TAKI)

Hasonló című cikkünk I. részében bemutattuk a 4M-modell fejlesztését különös tekintettel a tápanyagellátásra. A szántóföldi ökológiai rendszer szimulációjának fő nehézsége, hogy kevés az adat, főként az azonos téridő vonatkozásban elvégzett sokirányú mérési adat. A növények tápanyagfelvételét az agrokémikusok vizsgálják, a talaj vízgazdálkodását és az időjárási elemek változásait azonban mások és más helyen ill. időpontokban rögzítik. A jövőben a különböző monitoring rendszerek összekapcsolása segíthet, a műlra és főként regionális léptékben már mérni nem tudunk. Ugyanakkor hazánk óriási szellemi és anyagi erőfeszítést tett a talaj és a mezőgazdasági termelés tudományos megismerése terén. A különböző diszciplínák óriási adatbázisokat hoztak létre, ha ezek nem is voltak egymással összehangoltak. Az adatbázisok egy része a rendszerváltással elveszett, más része térképeken és egyéb adathordozókon, közleményekben és íróasztal fiókokban még ma is megtalálhatók.

Az OTKA T046983 sz. kutatási projektje keretében adatgyűjtést végeztünk a szimulációs modellezés adattal való kiszolgálása érdekében.

A 4M-modellt - kalibrálás és validálás után - különféle gyakorlati problémák megoldására is felhasználtuk, melyekből e cikk keretében bemutatunk néhányat.

1. A 4M modell adatellátása, adatbázisok

A 4M-modell input igényét *mérésekkel* vagy *becslésekkel* lehet biztosítani. Az input igény *részben paramétereiből, részben induló értékeiből* áll. A *paraméterek* a modell függvényeit szabályozzák: ezen keresztül pl. a növények fejlődését, növekedését, víz és tápanyagforgalmát, a talaj hőmérsékletét, nedvesség- és tápanyagforgalmát írják le. Az *induló értékek* a futás kezdeti pillanatában mérhető változók, főképpen olyan talajtulajdonságok, mint a nedvességtartalom, tápanyagok koncentrációi, melyek a készletek kiinduló nagyságát adják meg. A paraméterek és induló értékek a helyszínen gyakran nem mérhetőek, pl. egy növény genetikai paraméterei vagy egy sokéves történelmi számítógépes futás kezdeti talajállapota. Ilyen esetekre készítettünk *adatbázisokat*, melyek segítenek becslésekkel közelíteni a változók valós értékeiket. Az adatbázisokat valamilyen kezelői felületen pl. digitalizált térképek formájában vagy kereshető táblázatokban tettük elérhetővé a modell felhasználók számára. Az adatokon túl *speciális módszereket* is alkalmazunk a hiányzó mérések minél jobb becsléséhez, pl. a kezdeti nedvességtartalmat megbízhatóan becsülni tudjuk, ha néhány évvel

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

korábban indítjuk a futást, hogy az előfuttatás alatt legalább egyszer biztosan meghaladja a talajszelvény nedvességtartalma a szántóföldi vízkapacitást.

A 4M-modell függvényeinek paramétereit könnyen, (programozási ismeretek nélkül is) rugalmasan lehet változtatni az input rendszeren keresztül arra az esetre, ha a felhasználó rendelkezik a megfelelő adatokkal. Beállíthatja a különböző (földrajzi, biológiai, termesztési) feltételeknek legjobban megfelelő paraméter kombinációt. Ugyanakkor a 4M-programcsomag felkínál egy *alap paraméter készletet*, mivel a legtöbb esetben az alkalmazónak nincsenek minden érintett területre (pl. a növények genetikai, vagy a talaj vízgazdálkodási paramétereit, időjárásforgatókönyvek) kiterjedő információi.

Pontszerű alkalmazásokban (egy parcella vagy tábla esetében) feltehető, hogy a felhasználó rendelkezik a legtöbb szükséges input adattal. Regionális modellezéshez az adatbázisaink nyújtanak segítséget közelítő input adatok kitöltéséhez.

1.1. Időjárás adatbázis

Országos időjárás adatbázist építettünk fel, mely tartalmazza azokat az adatsorokat, melyek a 4M modell futásához szükségesek: napi maximum és minimum hőmérsékleti, napi csapadék és globálsugárzás. Forrásul az OMSz napi jelentéseknek a könyvtárakban elérhető adatai szolgáltak, mivel a regionális futtatásokhoz szükséges hivatalos országos adatbázis – sok nyugati országgal szemben hazánkban nem ingyenes – sőt beszerzése egy OTKA téma számára pénzügyileg elérhetetlen. Az adatbázisunk tartalmaz 169 magyar település területéről átlagosan 20 éves adatsort. Véges kapacitásunk miatt az adatfeldolgozás és minőségi ellenőrzés csak mindig az eddig már használt adathalmazokra terjedt ki. Ezért vannak komplett adatsorok, és hiányosak is. Az *1. táblázatban* közöljük az adatbázisból a komplett adatsorok jegyzékét 33 magyarországi megfigyelő állomásról. A globál-sugárzást, amely a termésképzéshez fontos adat, korábban kevés helyen mérték. Ezért vagy a helyileg megfigyelt napfényes órák számából vagy az általunk kifejlesztett és publikált módszerrel nyertük. (Fodor 2006).

1.2. Időjárás forgatókönyvek előállítása

A megfigyelt adatok mellett használunk speciális célból előállított forgatókönyveket, pl. a klímaváltozással kapcsolatos tanulmányokhoz. Utóbbiakhoz a globális cirkulációs modellek eredményeinek leskálázása révén szerzünk hosszú távú előrejelzési adatokat magyarországi régiókra. (Kovács és Fodor 2005A, Nagy és mts 1999, Kovács és Dunkel 1998)

Többféle időjárás generátorral és a megfigyelt adatsorok többféle módosításával is dolgozunk. Használjuk a *Wantuchné (2002)* által készített generátort, sőt a szerzővel együtt annak továbbfejlesztésén dolgozunk. Készítettünk egy u.n. évszak-kombinátort. Utóbbinak az a lényege, hogy nagy mennyiségű valós időjárás menetet gyűjtöttünk össze a négy évszakra nézve a hazai Euró-régiókra. Ezeket felosztottuk száraz-meleg, száraz-hideg, nedves-meleg és nedves-hideg

csoportokra, illetve átlag-közeli évszakok csoportjára. Ezekből kombinálunk éveket véletlenszerűen vagy valamilyen kritérium alapján vigyázva arra, hogy az éves összegek és átlagok ne lépjenek át bizonyos határokat. Ebben a megközelítésben kevesebb a mesterséges elem, mint az időjárás generátorokban, de kevésbé rugalmasan alakítható. Végül a hosszú távú előrejelzésekhez a meteorológus szakmában „referencia évek”-nek számító hazai évtizedes léptékű időszak megfigyelési adatait módosítjuk az éghajlatváltozási trendeknek megfelelően akár helyileg, akár a régiókat összehasonlító futásokban.

1.3. Növényfajok tápanyag-felvételi paraméterei

A faj és fajta szortiment kiszélesítése érdekében adatbázist építettünk fel a különböző szántóföldi kultúrák tápanyag-tartalmi változásairól a fejlődés folyamán az ellátottság függvényében. Saját és mások kísérleteiből származó adataikat gyűjtöttük össze, amelyekben különböző tápanyagellátottság mellett egy-egy évjáratban legalább 4-5 időpontban vettek mintát. Ezek szolgáltak az elemek optimum koncentrációinak meghatározására, valamint a stresszet kiváltó koncentráció küszöbök számításához. Ahol volt elég hazai adat, azokat részesítettük előnyben, hogy minél inkább szolgáljuk a hazai alkalmazhatóságot. Kiemelkedő *Lásztity (2003, 2006)* Sebestyén és mtsi (1982), Kádár (1991) munkássága a tápanyagok – köztük a mikroelemek – növényi felvételével, a felvétel dinamikájával kapcsolatos adatok előállításában. A 2. táblázatban bemutatjuk a növényi tápanyagtartalmi adatbázis tartalmát.

Hat termesztett növényfaj (őszi búza, őszi árpa, tritikále, köles, őszi rozs és cirok) esetében gazdag magyar vizsgálati anyag van a további mikroelemek (Ba, Be, Bi, Sn, Pb, Sr, Te, Ti, As, Cr, Hg, Se, Sb, V, Cd, Al, Mo) fenofázisonkénti koncentrációjáról. Őszi búzáról, ezeken kívül a S, Ni, Co, Li elemek felvételi dinamikája is szerepel az adatbázisban. A nem esszenciális mikroelemeket az eredeti tervtől eltérően szerepeltetjük az adatbázisban, mert lehetőséget akarunk teremteni a káros elem-felhalmozódások növényi felvételének illetve a talajbéli bemosódások modellezésére is.

1.4. Térségi adatbázis a talajok makro-, mezo- és mikro-tápelemeire

A talaj összetétele tükrözi a tápelemek cirkulációjának hosszú távú eredményét. A pozitív tápanyagmérleg növeli, a negatív csökkenti a talaj tápanyagkészletét. A felvehető tápanyag koncentrációk dinamikusan változnak, míg a nehezen oldható frakcióké csak lassan. A könnyen és nehezen oldható frakciók az adott klímán az adott talajtípusra, termőhelyre jellemző egyensúlyi állapot irányába alakulnak át egymásba. Az átalakulás sebessége is függ a klímától és a talajtípustól valamint attól, hogy a készletek pillanatnyi aránya mennyire messze van az egyensúlyi állapottól. A makro tápelemekészletek az intenzív termesztés és a trágyázás következtében tág határok között váltakoznak. A mikroelemek felvétele csekély, az egész szelvényt tekintve csak sok évtizedes léptékben léphetik

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

át lefelé a küszöb értékeket. A mikroelemek tekintetében a szennyeződés általi felhalmozódás jelentősebb probléma lehet, mint a hiány. (Kádár 1993)

A regionális adatbázist kézenfekvően térképek segítségével lehet leginkább kezelni. Az adatgyűjtésben és a felhasználásban is ebbe az irányba mentünk el. Három forrást dolgoztunk fel.

Az első forrás az 1980-as években készült első országos agrokémiai felvételezés eredményéből eredt (*Elek és Patócs 1984*). A térképes feldolgozás a felvehető tápelemeket ellátottsági kategóriákba osztva ábrázolta az ország területén. Az ellátottsági kategóriákat a MÉM NAK (1978) u.n. kék könyvének a II. része tartalmazza. A nyomtatott formában, de kicsiny példányszámban megjelent térképek a makro tápelemek közül a foszfor és kálium, a mezoelemek közül a mangán és az esszenciális mikroelemek közül a réz és a cink. A mezo- és mikroelemek térképlapjain kívül digitalizáltuk még ugyanezen felmérésből a talaj humusztartalmára, mésztartalmára, a pH-ra és az Arany-féle kötöttségi számra vonatkozó országos térképeket. Utóbbiaknak jelentősége, hogy az ellátottsági kategóriákat ezeknek alapján határozták meg, ezért a 4M-programcsomag képes a térképlapok kombinációjából tényleges koncentráció tartományokat visszaolvasni. Ezek közül itt a Zn, a Mg ellátottság, valamint a mésztartalom és a kötöttség térképlapjait mutatjuk be. (*1. - 4. ábra*) A digitalizálás módszertanában a TAKI Térinformatikai csoportja volt segítségünkre (*Pásztor és mtsi 2002*). A rendszerbe való beépítése tette lehetővé

A második forrás egy MÉM NAK országos felmérés, mely szintén a mezo- és mikro-tápelemekkel foglalkozott a nagyobb kiterjedésű hazai talajtípusok jellemző szelvényeire építve az ország 1200 pontján 6000 talajmintán. (*Boldis 1988, Patócs 1991*) Az adatbázis talajtípusonként tartalmazza vas, mangán, zink, réz, bór, molibdén, kobalt, alumínium, szelén, króm, nikkel, higany, ólom és kadmium elemek koncentrációját két oldószerben: 0,5M HNO₃-ban és a hazai mikroelem meghatározásokhoz általánosan használt un. EDTÁ-s kivonat öse a Lakanen-Erviö-féle kivonat (*MSZ-08-1722/1-1989*) A mintavételek pontszerűen, talajfúróval történtek 30 cm-es rétegenként 90 cm mélységig. A laboratóriumi méréseket a MÉM NAÁ TVG laboratóriumok ICP készülékein végezték. A 14 mikroelem adatai közül közöljük a hat mikrotápanyag (Cu, Zn, Mn, B, Mo, Fe) átlagos koncentrációit és szórásait 10 kiemelt hazai talajtípusra vonatkozólag (*3.- 8. táblázat*). Ezek az adatok ilyen formában most jelentek meg először. A Cd-tartalom ugyanebből az adatbázisból megjelent (*Csathó 1994*). Mivel a megadott talajtípusokat a programcsomagunk területileg tudja kezelni, ezért regionális számításokhoz a digitális térképekhez hasonló módon tudja kezelni.

A harmadik forrás az Állami Földtani Intézet közlése, mely a nehezen oldható mikroelemek területi eloszlását írja le. A vízgyűjtők kifolyásánál a folyóhordalékban megkötött mikroelemek koncentrációját mérték. Az Interneten is közzétett térképek a Magyarország geokémiai atlaszának részét képezik (<http://www.mafi.hu/microsites/geokem/Popul1.html>) Ezek vízgyűjtő léptékben

mutatják be a réz és cink tápelemek és hat további nem esszenciális mikroelem felszíni koncentrációját. Ezt az adatot csak vízgyűjtő vagy annál durvább léptékben lehet az induló értékek becsléséhez igénybe venni. A térképeket az MTA TAKI térinformatikai részlegében (Pásztor et al. 2006) digitalizálták. A 4M programcsomag rendszerén belül vízgyűjtő szinten megállapítható az összes és a felvehető tápanyagok aránya, mely regionális feldolgozásokhoz kiindulást jelenthet a sokéves távlatú szimulációkhoz.

2. A 4M modell gyakorlati alkalmazásai

2.1. A 4M modell komplex ökológiai problémák mezőgazdasági hatásainak előrejelzésében tölt be hiánypótló szerepet. Tanulmányokat végeztünk a klímaváltozás várható következményeiről Magyarország szántóföldjein a következő félszázadra nézve (Kovács és Dunkel 1998). A magyarországi Eurórégiókban megvizsgáltuk, hogy a klímaváltozás milyen várható hatásokkal jár majd a következő évszázadban (Kovács és Fodor 2005B). Előrejelzést publikáltunk a 4M-modell használatával a termés mennyiségek előrejelzésére, a vegetációs időszakok és a stresszes időszakok hosszának várható változására. A búza termésében inkább pozitív hatás, a kukorica termésében szeszélyesen megjelenő negatív hatás várható. A vegetációs időszak megnyúlik és a stresszes időszakok száma és hossza nyáron várhatóan növekszik.

A 4M-modell olyan környezetvédelmi problémák vizsgálatára is alkalmas, mint a talaj fagyos időszakainak, a szervesanyagok N-mineralizációs időszakainak, intenzitásának, a nitrát-bemosódás mértékének, sebességének a becslésére is. Az alábbiakban egy még nem publikált kutatási projektünket mutatjuk be, melyet az intézetünk az FVM megbízásából végzett 2006-2007 folyamán.

2.2. Tanulmány a hígtrágya kihelyezés Európai Unió szabályozásának megalapozására (FVM projekt összefoglalása)

A hígtrágyázással kapcsolatos jogszabályok alkotóira jelenleg kettős nyomás nehezedik az Európai Unió irányából. Egyfelől a jelenleg 4 hónapos tárolókapacitásra berendezkedett magyar gazdaságokat 6 hónapos tárolást is lehetővé tevő létesítmények kialakítására igyekeznek rászorítani; másfelől a hígtrágyázási tilalmi időszak meghosszabbítását is igyekeznek előírni. A talajvizek nitráttelhelése szempontjából a nitrátérzékeny területek hígtrágyázása különösen fontos környezetvédelmi hangsúllyal bír. Az Európai Unió szigorítások indokoltságát a 4M modell szimulációs eredményire támaszkodva vizsgáltuk meg két kérdésre keresve a választ:

I. Lehetséges-e meghosszabbítani a hígtrágyázási tilalmi időszakot Magyarországon tekintettel az időjárás, a talajtani viszonyra illetve a termelő hígtrágya mennyiségekre és a növénytermesztés szerkezetére?

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

II. Elégséges-e a 4 havi hígtrágya tároló kapacitás Magyarországon tekintettel az időjárás, a talajtani viszonyra illetve a termelő hígtrágya mennyiségekre és a növénytermesztés szerkezetére?

A modellel a Magyarországon jellemzően előforduló időjárás, talajtani és agrotechnikai körülményeket szimuláltunk. Megyei trágyázási- és termésadatok, valamint országos talajtani és időjárás adatbázis segítségével szimuláltuk a növények napi nitrogén felvételét, a mineralizációt, a nitrát kimosódást a gyökérezónából, a denitrifikáció mennyiségét és a volatilizációs veszteségeket. A nitrogén mérlegek becsléséhez a szimulációs futásokat megyénként végeztük el. A megyei terméseredményeket 1971 és 1996 közötti időszakra a megyei statisztikai hivataloktól és a KSH országos kiadványaiból gyűjtöttük be. Ez az időszak magában foglalja a műtrágyázás fellendülésének, a stabil és intenzív szakaszának, valamint a rendszerváltás utáni hanyatlásnak az időszakait is. A bemosódás és a légköri veszteségek becslése előtt a modell paramétereit a vizsgált 26 év terméseredményeire kalibráltuk. Két fő szántóföldi növényre (búza, kukorica) optimalizáltuk a modellt. Minden megyére két, egyenként 26 éves szimulációt végeztünk: egy búzával és egy kukoricával kezdődő vetésciklust. Így minden évben, minden megyében mindkét növény tápanyagforgalmát szimuláltuk, majd a két vetésciklusban kapott értékek átlagait használtuk a megyei N-forgalom elemeinek kiszámításához, amelyek közül csak kettőt mutatunk be (2-3. ábra). Olyan forgatókönyveket is megvizsgáltunk, melyekben kiegészítő másodvetéseket alkalmaztunk, hogy a korán lekerülő búza utáni nitrogénbemosódásokat enyhítsük.

Miután a modellt hozzáigazítottuk a valós termés illetve agrotechnikai adatokhoz, megvizsgáltuk, hogy a talajba hígtrágyával juttatott nitrogénből (legfeljebb 170 kg/ha/év N) nitrát-N formájában mennyi hagyja el a gyökérezónát és válik potenciális talajvíz-szennyező forrássá. Olyan forgatókönyveket vizsgáltunk, amelyben:

- VII. két egymást követő hígtrágyázás között sohasem telik el 4 hónapnál több idő,
- VIII. egy hígtrágya-kezeléssel a maximálisan megengedett 170 kg/ha N jut a talajra,
- IX. egy területre/parcellára egy évben csak egyszer történik hígtrágya kijuttatás
- X. a legkorábbi hígtrágyázás dátuma február 20, a legkésőbbié november 15.

Minden itt ismertetett forgatókönyvet megvizsgáltunk több, igen eltérő talajfésülésen is. A Magyarországon mezőgazdasági művelésbe vont talajok túlnyomó többségének homoktartalma nem több mint 80%, agyagtartalma pedig kisebb mint 45%. Ezen határokon belül 17 darab eltérő mechanikai összetételű talajszelvényt vontunk be a vizsgálatba.

A szimulációs eredmények alapján a felvetett két kérdésre az alábbi válaszokat tudtuk adni:

- I. A hígtrágya-kijuttatás tilalmi időszakának kiterjesztése mezőgazdasági szempontból nem indokolt, bár egyéb szempontokat figyelembe véve lehetséges. A bemutatott forgatókönyvek alkalmazása esetén, a tilalmi időszak legalább 3 héttel megnyújtható. A másodvetésű növényekkel csökkenthető volt a szelvényből való nitrát-kimosódás.
- II. Magyarországon, figyelembe véve az időjárás, a talajtani viszonyokat illetve a termelő hígtrágya mennyiségét és a növénytermesztés szerkezetét, a 4 havi hígtrágya tároló kapacitás elégséges.

2.3. Regionális előrejelzések a klímaváltozás hatására bekövetkező változásokra a nitrát bemosódás és denitrifikáció mértékében

Indokolatlanul magas N műtrágya adagok komoly környezetvédelmi problémákat okozhatnak. A növények által fel nem vett nitrát a talajba szivárgó vízzel fokozatosan egyre mélyebbre mosódik egyre nagyobb veszélyt jelentve az ivóvízkészletekre. Szimulációs eredményeink alapján, a 1970-es és 80-as évek túlzó műtrágyázási szokásainak köszönhetően, hazánk középső részén éppen a mostani években éri a talajvizet egy nagyobb nitrát 'hullám', mely a talajokban fokozatosan húzódik lefelé (2. ábra). A nitrát-bemosódással együtt a denitrifikáció mértékét is megvizsgáltuk. Bizonyos talajokon a túlzott N-trágyázás denitrifikációs veszteséget okozhat melynek során üvegház hatású NOx gázok távoznak a talajból a légkörbe. A szimulációs eredmények kimutatták, hogy mely területek veszélyeztetettek a denitrifikáció szempontjából (3. ábra).

A Hamburgi Meteorológiai Intézet klímaváltozási forgatókönyveit felhasználva azt is meg tudtuk becsülni, hogy hazánk nitrát-bemosódási és denitrifikációs mintázata várhatóan hogyan változik majd a jövőben (4-5. ábra)

Összefoglalás

A 4M-tápanyagmodell adatellátásával és gyakorlati alkalmazásaival foglalkozunk e cikk keretében. A modell futásához napi időjárás, növényi valamint talajtani adatok szükségesek. Országos és regionális időjárás adatbázist építettünk fel 169 magyarországi megfigyelőhely átlagosan 20 éves napi maximum és minimum hőmérséklet, csapadék és sugárzás adataiból. Ezen belül 33 helyre készítettük el a minőségileg ellenőrzött, a 4M-ben futás-kész adatsorokat. Az előrejelzésekhez a globális klímamodellekből leskálázott változások alapján időjárás generátorok segítségével nyertünk forgatókönyveket. Összeállítottuk a 4M modell bemenő növényi paraméterek adatbázisát hat természetű növényfajra és 17 mikroelemre fenofázisonként. A nem-esszenciális mikroelemek nem szerepeltek a tervekben; felvételüket az indokolja, hogy a környezeti kockázatok miatt a modellezés feltehetően ebbe az irányba fejlődik majd. Térségi adat-

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

bázist építettünk fel a talajok makro-, mezo- és mikro-tápelemeire, ez 14 elemet érint.

A 4M modell alkalmazásai között foglalkoztunk a klímaváltozás várható hosszú távú következményeivel a magyarországi Eurórégiókban. A búza termésében inkább pozitív hatás, a kukorica termésében szeszélyesen megjelenő negatív hatás várható. A vegetációs időszak megnyúlik és a stresszes időszakok száma és hossza nyáron várhatóan növekszik. Az EU hígtrágya kihelyezési szabvány vitában a modellezési tanulmányok arra a következtetésre vezettek, hogy elegendő a kötelező 4 havi tároló kapacitás, és nem szükséges a tilalmi időszak növelése, ha gabona után másodvetést alkalmazunk a hígtrágyázott területeken. Térképes területi adatokat közlünk a nitrát bemosódás és denitrifikáció mértékében várható regionális változásokra a klímaváltozás hatására.

Kulcsszavak: modell, adatbázis, 4M-programcsomag

Honlap: <http://www.freewebs.com/4m-modell>

Irodalom

- Boldis O. 1988: Magyarországi talajok toxikus nehézfém-tartalma. MTESZ, 1988.V.). Budapest, előadás anyaga.
- Elek, É., Patócs I. 1984: A magyarországi I. talajvizsgálati ciklus eredményeinek értékelése. MÉM-NAK. Budapest.
- Fodor, N. 2006. Estimating global radiation using the meteorological input data of crop models. Időjárás 110:175-182.
- Kádár I. 1991: A talajok és növények nehézfém-tartalmának vizsgálata. Környezet és Természetvédelmi Kutatások. KTM-MTA TAKI, Budapest.
- Kádár I. 1993: Talajaink mikroelem ellátottságának környezeti összefüggései. MTA Agrártud. Oszt.Tájékozt.(1992) 102-106. Akadémiai Kiadó
- Kovács G. J., Dunkel Z. 1998: A klímaváltozás várható következményei Magyarország szántóföldjein a következő félszázadban. In: Dunkel Z. (Szerk.): Az éghajlatváltozás és következményei. (Meteorológiai Tudományos Napok'97) OMSZ, Budapest. pp. 181-193.)
- Kovács, G.J., Fodor, N. 2005A. Szimulációs eljárások alkalmazása a tápanyaggazdálkodásban. In: Kovács Géza J. és Csathó Péter (Szerk.): A magyar mezőgazdaság elemforgalma 1901 és 2003 között. MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet, Budapest. ISBN 963 219 372 5
- Kovács G.J., Fodor N. 2005B: A klímaváltozás tápanyagforgalomra gyakorolt hatásának becslése In: Kovács Géza J. és Csathó Péter (Szerk.): A magyar mezőgazdaság elemforgalma 1901 és 2003 között. MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet, Budapest. ISBN 963 219 372 5
- Lásztity B. 2003: A nem esszenciális elemek forgalma hazai gabonafélékben. MTA TAKI, Budapest.

- Lásztity B. 2006: Az ásványi tápelemek felhalmozása gabonafélékben. MTA TAKI, Budapest.
- MÉM NAK 1978 („Kék könyv”) Műtrágyázási irányelvek és üzemi számítási módszerek II. rész: mező- és mikrotápanyagok, Budapest.
- MSZ-08-1722/1-1989: Talajvizsgálatok. Talajkivonatok készítése. MSZH.
- Nagy J., Huzsvai L., Mika J., Dobi I., Fodor N., Kovács G.J. 1999. A Method to Link General Circulation Model to Weather Generator and Crop Models for Long Term Decisions, MODSS'99 Conference, Brisbane, Australia 1-6 August, 1999.
- Patócs I. 1991: A mikroelemek talajkémiai összefüggéseinek feltárása. Yárójelentés MÉM NAK Budapest.
- Pásztor L., J. Szabó, Zs. Bakacsi, 2002, 'GIS processing of large scale soil maps in Hungary', *Agrokémia és Talajtan*, Vol. 51, No. 1-2, 273-282.
- Pásztor L, Szabó J, Bakacsi Zs, László P, Dombos M, 2006. Large-scale soil maps improved by digital soil mapping and GIS-based soil status assessment, *Agrokémia és Talajtan*, 55, 2006; 79-88
- Sebestyén E., Baranyi F., Boldis O. 1982: Az őszi búza szervesanyagtermelése és tápanyagforgalma. MÉM NAK Budapest
- Wantuchné Dobi I. 2002: Napi Meteorológiai Idősorok Többdimenziós Sztochasztikus Modelljezése, PhD értekezés. ELTE, TTK, Budapest.

Köszönetnyilvánítás:

A publikáció a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj valamint a T046983 sz. OTKA program támogatásával készült.

Érkezett:

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

Helység	Évek, tól-ig	Évek száma
Baja	1970-1999	30
Balassagyarmat	1970-1996	27
Békéscsaba	1970-2001	32
Bp-Pestlőrinc	1968-1987	20
Cegléd	1970-1996	23
Debrecen	1970-2003	34
Gödöllő	1981-1992	12
Gyöngyös	1970-1999	30
Győr	1970-2004	35
Hajdúböszörmény	1976-1999	24
Karcag	1967-2003	32
Kecskemét	1970-2004	35
Keszthely	1970-1998	29
Kisvárd	1970-2000	31
Kompolt	1967-1994	28
Martonvásár	1970-1992	23
Mezőhegyes	1970-1999	30
Miskolc	1970-2004	35
Mosonmagyaróvár	1970-2001	32
Nagyhörcsök	1967-2005	39
Nagykanizsa	1970-2004	35
Nyíregyháza	1970-2001	31
Örbottyán	1975-2005	31
Paks	1981-2004	24
Pápa	1970-2000	31
Pécs	1970-2002	33
Siófok	1970-2004	35
Szarvas	1975-1996	22
Szeged	1961-1999	39
Szentgotthárd	1970-2004	35
Szolnok	1970-2003	34
Szombathely	1970-2001	32
Túrkeve	1967-2000	34

1. táblázat: 4M adatbázis tartalomjegyzék komplett napi időjárás adatsorainkról:
maximum és minimum hőmérséklet, csapadék és globálsugárzás

	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
Őszi búza	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Kukorica	x	x	x	x			x	x	x	x
Napraforgó	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Tavaszi árpa	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Őszi árpa	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Triticale	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Köles						x	x	x	x	x
Őszi rozs	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Cirok		x	x			x	x	x	x	x
Zab	x	x	x	x	x		x	x	x	x

2. táblázat: 4M adatbázis tartalomjegyzék növényi tápanyag-felhalmozódás és stressz parametrizálásához

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

Rétegmélység ^b		0 - 30 cm		30 - 60 cm		60 - 90 cm		Szelvényátlag ^c	
Talajtípus ^a		HNO ₃ ^e	L.E. ^f	HNO ₃	L.E.	HNO ₃	L.E.	HNO ₃	L.E.
Oldószeres ^d									
Humuszos homokok	Á ^e	7,26	5,82	4,18	3,34	2,39	1,74	4,61	3,63
	S ^f	13,23	11,57	7,34	6,43	2,73	1,79	9,05	7,85
Agyagbemosódásos barna erdőtalajok	Á	5,17	2,75	3,68	2,23	3,26	1,79	4,04	2,26
	S	10,65	1,47	1,68	1,17	1,96	1,26	6,36	1,36
Csernozjom barna erdőtalajok	Á	5,28	4,03	3,98	3,03	3,47	2,40	4,24	3,15
	S	2,89	2,16	2,47	1,66	2,68	1,59	2,77	1,93
Mészlepedékes csernozjomok	Á	4,58	3,81	3,18	2,72	2,15	2,04	3,30	2,86
	S	2,14	1,68	2,25	1,40	2,65	1,45	2,55	1,68
Réti csernozjomok	Á	6,41	5,41	5,01	4,11	4,06	3,10	5,16	4,21
	S	4,35	3,16	4,03	2,94	7,82	4,55	5,73	3,74
Réti talajok	Á	12,76	9,92	11,26	8,95	7,49	5,26	10,50	8,04
	S	19,82	15,32	17,23	15,10	8,84	5,64	16,10	12,95
Öntés réti talajok	Á	9,35	7,02	8,77	6,44	6,74	4,93	8,29	6,13
	S	5,13	3,55	5,67	3,82	4,96	3,56	5,36	3,74
Humuszos meszes homokok	Á	9,77	7,85	5,27	4,31	2,68	1,99	5,91	4,72
	S	16,80	14,77	9,38	8,28	3,35	2,20	11,55	10,06
Tipikus mészlepedékes csernozjomok	Á	4,42	3,73	2,95	2,62	1,95	1,97	3,11	2,77
	S	2,17	1,73	2,18	1,37	2,69	1,51	2,56	1,70
Mélyben sós réti csernozjomok	Á	4,32	4,83	3,18	3,62	1,83	2,49	3,11	3,65
	S	2,38	2,10	3,07	2,44	2,09	1,60	2,84	2,36

3. táblázat Magyarországi talajok oldható Cu-tartalma (mg/kg)
 Á=átlag, S=szórás HNO₃= 0,5 n HNO₃, L.E.=Lakanen-Erviö kivonat

Rétegmélység ^b		0 - 30 cm		30 - 60 cm		60 - 90 cm		Szelvényátlag ^c	
Talajtípus ^a		HNO ₃ ^e	L.E. ^f	HNO ₃	L.E.	HNO ₃	L.E.	HNO ₃	L.E.
Oldószeres ^d									
Humuszos homokok	Á ^e	4,01	2,64	2,28	1,36	1,82	0,98	2,70	1,66
	S ^f	3,37	2,73	1,34	0,77	1,24	0,52	2,39	1,81
Agyagbemosódásos barna erdőtalajok	Á	5,31	1,79	4,86	1,09	5,12	0,89	5,10	1,26
	S	2,51	1,01	2,67	0,70	3,24	0,91	2,82	0,96
Csernozjom barna erdőtalajok	Á	5,22	2,16	3,82	1,34	3,44	1,19	4,16	1,56
	S	2,32	0,91	2,02	0,58	2,85	2,22	2,53	1,03
Mészlepedékes csernozjomok	Á	5,32	2,63	3,27	1,54	2,60	1,03	3,73	1,73
	S	3,33	2,54	2,48	1,30	2,76	0,52	3,09	1,79
Réti csernozjomok	Á	6,85	2,67	5,59	1,91	4,21	1,19	5,55	1,92
	S	3,48	2,04	3,49	2,00	2,75	1,11	3,42	1,87
Réti talajok	Á	13,79	4,76	11,55	3,02	8,04	1,65	11,13	3,14
	S	30,28	16,31	21,28	10,27	6,26	2,79	21,73	11,28
Öntés réti talajok	Á	12,04	4,47	9,90	2,50	7,51	1,48	9,82	2,82
	S	10,03	6,64	8,45	2,81	5,70	1,17	8,42	4,38
Humuszos meszes homokok	Á	4,62	2,94	2,36	1,27	1,70	0,84	2,89	1,68
	S	3,96	3,42	1,42	0,94	1,23	0,52	2,80	2,24
Tipikus mészlepedékes csernozjomok	Á	5,16	2,71	2,95	1,53	2,29	1,00	3,47	1,75
	S	3,43	2,68	2,26	1,35	2,63	0,40	3,06	1,88
Mélyben sós réti csernozjomok	Á	5,62	1,99	3,68	1,43	3,05	1,12	4,12	1,51
	S	2,61	0,90	3,14	0,53	2,96	0,45	3,22	0,77

4. táblázat Magyarországi talajok oldható Zn-tartalma (mg/kg)
 Á=átlag, S=szórás HNO₃= 0,5 n HNO₃, L.E.=Lakanen-Erviö kivonat

Rétegmélység ^b		0 - 30 cm		30 - 60 cm		60 - 90 cm		Szelvényátlag ^c		
Talajtípus ^a		HNO ₃ ^e L.E. ^f		HNO ₃ L.E.		HNO ₃ L.E.		HNO ₃ L.E.		
Oldószeres ^d		Á ^e	117	127	98	117	86	101	100	115
Humuszos homokok		S ^f	47	61	44	68	39	65	45	65
Agyagbemosódásos barna erdőtalajok		Á	184	224	109	166	100	139	131	176
		S	75	122	43	99	52	92	67	111
Csernozjom barna erdőtalajok		Á	207	284	151	217	137	169	165	223
		S	60	131	54	128	66	133	67	138
Mészlepedékes csernozjomok		Á	221	251	163	169	136	116	173	179
		S	54	115	43	110	37	80	57	117
Réti csernozjomok		Á	272	410	197	331	156	196	208	312
		S	72	141	66	159	51	133	80	169
Réti talajok		Á	183	209	174	215	182	217	180	214
		S	89	149	115	154	118	155	108	152
Öntés réti talajok		Á	210	235	180	212	160	200	183	215
		S	86	148	111	138	98	149	166	145
Humuszos meszes homokok		Á	125	123	110	103	101	87	112	104
		S	46	55	49	55	40	40	46	52
Tipikus mészlepedékes csernozjomok		Á	212	230	158	147	135	150	168	175
		S	48	98	39	86	37	68	53	99
Mélyben sós réti csernozjomok		Á	193	233	129	186	109	129	144	183
		S	49	128	32	137	21	105	52	136

5. táblázat Magyarországi talajok oldható Mn-tartalma (mg/kg)
 Á=átlag, S=szórás HNO₃= 0,5 n HNO₃, L.E.=Lakanen-Erviö kivonat

Rétegmélység ^b		0 - 30 cm		30 - 60 cm		60 - 90 cm		Szelvényátlag ^c		
Talajtípus ^a		HNO ₃ ^e L.E. ^f		HNO ₃ L.E.		HNO ₃ L.E.		HNO ₃ L.E.		
Oldószeres ^d		Á ^e	1,37	0,76	1,20	0,65	0,95	0,51	1,17	0,64
Humuszos homokok		S ^f	1,71	0,91	1,10	0,64	0,73	0,45	1,25	0,70
Agyagbemosódásos barna erdőtalajok		Á	1,51	0,26	1,56	0,22	1,60	0,20	1,56	0,23
		S	1,24	0,39	0,98	0,32	1,02	0,29	1,08	0,34
Csernozjom barna erdőtalajok		Á	2,50	0,77	2,06	0,55	1,77	0,40	2,11	0,57
		S	1,47	0,64	1,28	0,45	1,18	0,29	1,33	0,50
Mészlepedékes csernozjomok		Á	3,28	1,33	2,69	1,03	1,84	0,70	2,60	1,02
		S	1,57	0,83	1,32	0,72	1,18	0,60	1,48	0,75
Réti csernozjomok		Á	4,45	1,82	4,19	1,67	3,72	1,53	4,12	1,67
		S	2,13	1,13	1,96	1,10	2,18	1,48	2,11	1,25
Réti talajok		Á	4,32	1,38	3,96	1,28	3,32	1,18	3,87	1,28
		S	2,49	1,45	2,59	1,61	2,35	1,41	2,50	1,49
Öntés réti talajok		Á	3,80	1,10	3,39	0,91	2,63	0,75	3,27	0,92
		S	1,85	1,08	1,73	0,91	1,55	0,84	1,77	0,96
Humuszos meszes homokok		Á	1,57	0,75	1,53	0,71	1,15	0,53	1,42	0,66
		S	1,62	0,88	1,27	0,78	0,84	0,57	1,28	0,75
Tipikus mészlepedékes csernozjomok		Á	3,29	1,33	2,63	0,97	1,72	0,64	2,55	0,98
		S	1,54	0,81	1,28	0,66	1,17	0,50	1,48	0,72
Mélyben sós réti csernozjomok		Á	4,38	2,13	2,95	1,38	2,13	1,33	3,15	1,61
		S	1,08	0,78	1,52	0,84	1,43	0,80	1,70	0,92

6. táblázat Magyarországi talajok oldható B-tartalma (mg/kg)
 Á=átlag, S=szórás HNO₃= 0,5 n HNO₃, L.E.=Lakanen-Erviö kivonat

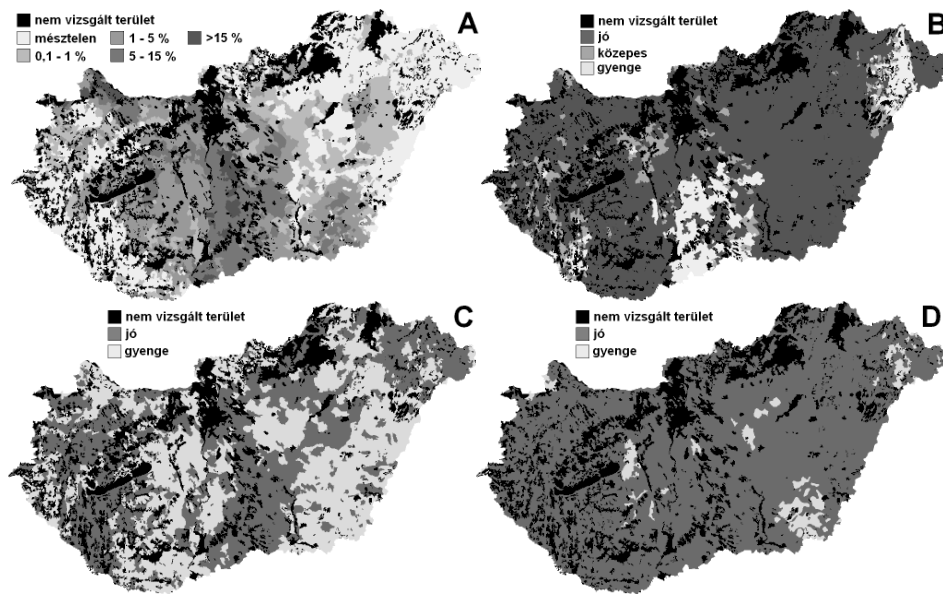
A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

Rétegmélység ^b		0 - 30 cm		30 - 60 cm		60 - 90 cm		Szelvényátlag ^c	
Talajtípus ^a		HNO ₃ ^e	L.E. ^f	HNO ₃	L.E.	HNO ₃	L.E.	HNO ₃	L.E.
Oldószeres ^d									
Humuszos homokok	Á ^e	0,120	0,050	0,150	0,060	0,170	0,080	0,147	0,063
	S ^f	0,073	0,052	0,074	0,051	0,097	0,063	0,085	0,056
Agyagbemosódásos barna erdőtalajok	Á	0,070	0,060	0,110	0,100	0,120	0,120	0,100	0,093
	S	0,047	0,067	0,057	0,091	0,070	0,107	0,063	0,012
Csernozjom barna erdőtalajok	Á	0,140	0,050	0,150	0,060	0,200	0,090	0,163	0,067
	S	0,088	0,063	0,074	0,099	0,121	0,142	0,099	0,107
Mészlepedékes csernozjomok	Á	0,140	0,030	0,160	0,050	0,170	0,080	0,157	0,053
	S	0,075	0,053	0,073	0,061	0,076	0,067	0,076	0,064
Réti csernozjomok	Á	0,120	0,040	0,140	0,040	0,160	0,070	0,140	0,050
	S	0,078	0,050	0,087	0,058	0,089	0,111	0,086	0,079
Réti talajok	Á	0,130	0,110	0,140	0,100	0,140	0,090	0,137	0,100
	S	0,240	0,105	0,215	0,103	0,197	0,101	0,217	0,103
Öntés réti talajok	Á	0,120	0,090	0,110	0,090	0,140	0,090	0,123	0,090
	S	0,094	0,093	0,088	0,090	0,110	0,100	0,098	0,094
Humuszos meszes homokok	Á	0,130	0,060	0,150	0,060	0,180	0,080	0,153	0,067
	S	0,082	0,052	0,072	0,052	0,088	0,064	0,082	0,057
Tipikus mészlepedékes csernozjomok	Á	0,150	0,030	0,160	0,060	0,160	0,090	0,157	0,060
	S	0,077	0,049	0,076	0,063	0,078	0,067	0,077	0,064
Mélyben sós réti csernozjomok	Á	0,160	0,040	0,220	0,020	0,220	0,050	0,200	0,037
	S	0,094	0,075	0,036	0,036	0,065	0,061	0,076	0,059

7. táblázat Magyarországi talajok oldható Mo-tartalma (mg/kg)
 Á=átlag, S=szórás HNO₃= 0,5 n HNO₃, L.E.=Lakanen-Erviö kivonat

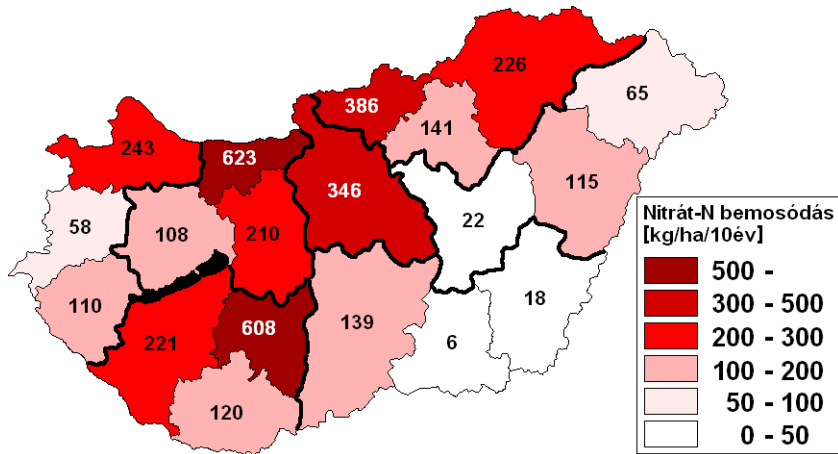
Rétegmélység ^b		0 - 30 cm		30 - 60 cm		60 - 90 cm		Szelvényátlag ^c	
Talajtípus ^a		HNO ₃ ^e	L.E. ^f	HNO ₃	L.E.	HNO ₃	L.E.	HNO ₃	L.E.
Oldószeres ^d									
Humuszos homokok	Á ^e	224	107	249	124	280	127	251	119
	S ^f	134	60	214	153	262	165	210	134
Agyagbemosódásos barna erdőtalajok	Á	789	190	845	156	869	156	834	167
	S	436	88	473	84	525	139	479	108
Csernozjom barna erdőtalajok	Á	475	154	487	187	523	177	495	173
	S	384	76	429	159	502	171	438	141
Mészlepedékes csernozjomok	Á	273	107	236	143	220	204	243	151
	S	228	60	246	123	306	194	262	142
Réti csernozjomok	Á	516	151	504	154	405	121	475	142
	S	421	143	441	219	393	108	421	164
Réti talajok	Á	1280	418	1162	320	986	260	1143	333
	S	852	519	803	282	775	294	817	385
Öntés réti talajok	Á	1196	322	1148	310	916	222	1087	285
	S	1034	285	450	316	853	183	949	270
Humuszos meszes homokok	Á	196	97	210	129	219	142	208	123
	S	100	54	206	197	266	212	201	170
Tipikus mészlepedékes csernozjomok	Á	238	103	199	149	188	220	208	157
	S	201	61	214	130	289	202	238	151
Mélyben sós réti csernozjomok	Á	473	167	525	220	433	185	477	191
	S	585	135	697	185	577	99	645	151

8. táblázat Magyarországi talajok oldható Fe-tartalma (mg/kg)
 Á=átlag, S=szórás HNO₃= 0,5 n HNO₃, L.E.=Lakanen-Erviö kivonat

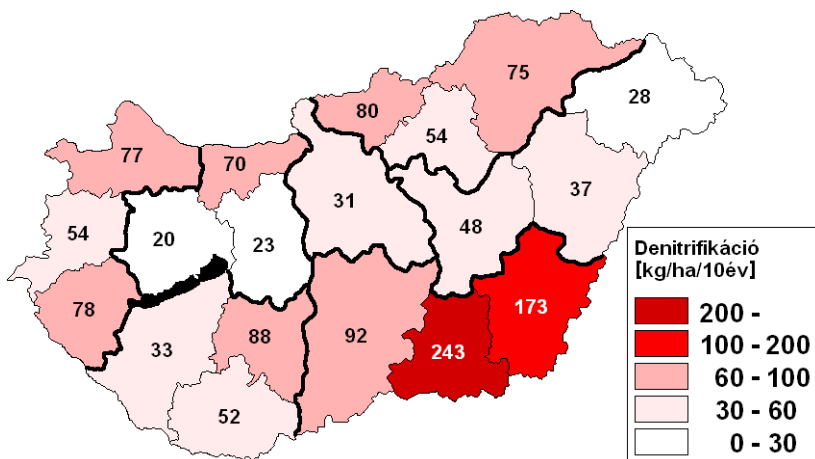


1. ábra: Magyarország mészállapot (A), Mg-ellátottság (B), Zn-ellátottság (C), Cu-ellátottság térképe (D)

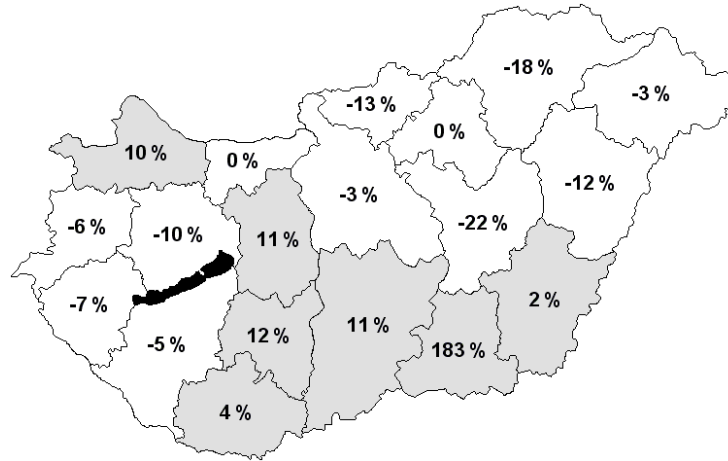
A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze



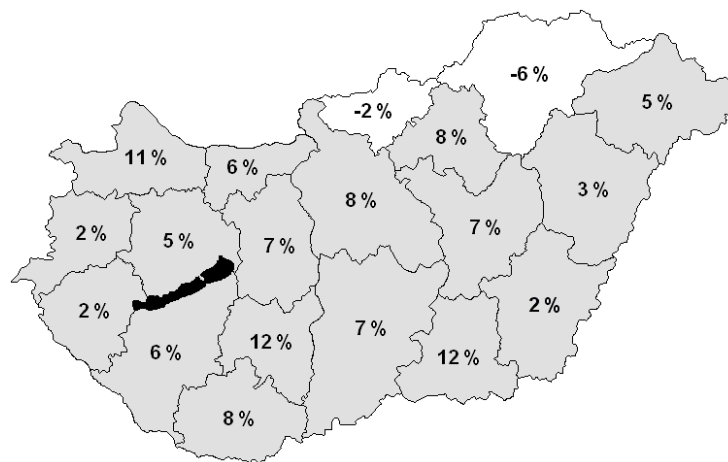
2. ábra: A talaj gyökérszónáját (1,5 m) elhagyó szennyező nitrát-N becslt mennyisége Magyarország eurorégióiban, illetve megyéiben, 1971–1996



3. ábra: Becslt denitrifikációs N-veszteség a talajból Magyarország eurorégióiban, illetve megyéiben, 1971–1996



4. ábra: Az 1971-1996-os időszakhoz képest várható átlagos változások a nitrát-bemosódás mértékében a 21. század középső évtizedeiben. A számok a jelenlegi állapothoz képesti változást mutatják. (szimulációs eredmény)



5. ábra: Az 1971-1996-os időszakhoz képest várható átlagos változások a denitrifikáció mértékében a 21. század középső évtizedeiben. A számok a jelenlegi állapothoz képesti változást mutatják. (szimulációs eredmény)

A 4M-tápanyagmodell, a hazai szántóföldi tápanyagellátás eszköze

Table 1. 4M database index of complete daily meteorological datasets: maximum and minimum temperature, precipitation and global radiation

Table 2. Database index for parameterization of nutrient accumulation and stress in plants

Table 3. Extractable Cu content of the Hungarian soils (mg/kg)
(a) soil type, (b) depth, (c) profile average, (d) solvent, (e) average, (f) st. dev.

Table 4. Extractable Zn content of the Hungarian soils (mg/kg)
(a) soil type, (b) depth, (c) profile average, (d) solvent, (e) average, (f) st. dev.

Table 5. Extractable Mn content of the Hungarian soils (mg/kg)
(a) soil type, (b) depth, (c) profile average, (d) solvent, (e) average, (f) st. dev.

Table 6. Extractable B content of the Hungarian soils (mg/kg)
(a) soil type, (b) depth, (c) profile average, (d) solvent, (e) average, (f) st. dev.

Table 7. Extractable Mo content of the Hungarian soils (mg/kg)
(a) soil type, (b) depth, (c) profile average, (d) solvent, (e) average, (f) st. dev.

Table 8. Extractable Fe content of the Hungarian soils (mg/kg)
(a) soil type, (b) depth, (c) profile average, (d) solvent, (e) average, (f) st. dev.

Figure 1. CaCO₃ status (A), Mg state of supply (B) , Zn state of supply (C) , Cu state of supply (D) map of Hungary

Figure 2. Estimated nitrate-N leaching from the root zone in the counties of Hungary, 1971-1996

Figure 3. Estimated NO_x loss from the soil in the counties of Hungary, 1971-1996

Figure 4. Predicted changes in nitrate-N leaching in the counties of Hungary for the middle of the 21th century. Numbers show the rate of change compared to the present values. (simulation result)

Figure 5: Predicted changes in denitrification in the counties of Hungary for the middle of the 21th century. Numbers show the rate of change compared to the present values. (simulation result)