

**SZÉN- ÉS NITROGÉNFORGALOM MODELLEZÉSE  
ZÖLDSÉGTERMESZTÉSBN**

62548 sz. OTKA KUTATÁS

ZÁRÓJELENTÉSE

MTA TAKI

Budapest

## TARTALOM

|  |    |
|--|----|
| Zöldségtermesztés és környezet   | 2  |
| A kutatásban alkalmazott módszerek                                     | 3  |
| Kísérleti feltételek, talajok és jelzőnövények                         | 3  |
| Mintavételek és helyszíni mérések                                      | 4  |
| Növényvizsgálatok  | 6  |
| Talajbiológiai vizsgálatok   | 6  |
| Statisztikai elemzés   | 7  |
| Dinamikus szimuláció   | 7  |
| A szimulációs munka menete   | 7  |
| A kutatás főbb eredményei  | 8  |
| A nedvesség- szén és nitrogén forgalmat befolyásoló talajtulajdonságok | 8  |
| Növényi növekedés és nitrogén felvétel                                 | 10 |
| Gyökernövekedés, növényi szénbevitel                                   | 11 |
| Szervesanyag lebomlás és mikrobiológiai aktivitás                      | 12 |
| Nitrogén mineralizáció vizsgálati eredményei                           | 14 |
| Talajrespiráció  | 15 |
| Szimulációs eredmények   | 16 |
| Talaj és növényzet nedvességdinamikája                                 | 16 |
| A nitrát elmozdulása   | 16 |
| Abiotikus stressz vizsgálata szimulációval                             | 18 |
| A kutatás eredményeinek rövid listája                                  | 19 |
| Kutatásunk eredményeinek alkalmazási lehetőségei                       | 19 |

## ZÖLDSÉGTERMESZTÉS ÉS KÖRNYEZET

A zöldségtermesztés – bár jól illeszthető a fenntartható agrárfejlődési törekvésekbe – a területi adottságok (klíma- és talajfeltételek, rendelkezésre álló energia, infrastruktúra és képzett munkaerő, tradíció és tudás) és az ezekkel összhangban lévő termesztett növény genetikai potenciáljának hatékony hasznosítása mellett, a jelentős öntözővíz, szerves- és műtrágya felhasználás miatt, jelentősen terhelheti a környezetet, és a talaj, a talajvíz és a felszíni vizek elszennyeződését okozhatja.

Ezért a természeti adottságoknak, a termőhelyi viszonyoknak, a termesztett növény tápanyag igényének, valamint a környezetvédelem követelményeinek megfelelő növénytáplálás a zöldségtermesztésben is alapvető fontosságú.

A piacépes termés gazdaságos előállításához a zöldségnövények jelentős tápanyagigényének zavartalan kielégítése érdekében a talajban felvehető formában lévő tápanyagoknak folyamatosan nagy koncentrációban kell jelen lenniük. Emiatt a gazdaságos öntözött zöldségtermesztés trágyázási rendszerét az intenzív műtrágyázás és a gyakori istállótrágyázás jellemzi.

A szerves anyagok mennyisége, minősége, a szervesanyag-gazdálkodás színvonala az intenzív öntözéses zöldségtermesztésben a tápanyag-gazdálkodás egyik kulcskérdése, mivel a talaj szervesanyag-tartalmának lényeges szerepe van a növények táplálásában, a talaj szerkezetének javításában, ill. fenntartásában, valamint a tápanyagok kimosódásának csökkentésében, és minden, a szerkezettől függő tulajdonsága befolyásolásában - mint például a vízháztartás, a levegőzöttség és a hőgazdálkodás-.

Az alkalmazott szerves trágyák, a gyökérmaradványok és talajba került egyéb növényi maradványok szervesanyag-tartalma energiaforrásként szolgál a talaj mikroszervezetei számára, melynek lebontása során jelentős mennyiségben keletkeznek szervesetlen tápanyagok

Zöldségtermesztésben a jelentős tápanyagigény és bevitel miatt nagyon fontos, hogy a tápanyagellátás alkalmazkodjék a növény tápanyag-felvételi dinamikájához, összhangban legyen az öntözéssel és a szerves trágyából történő nitrogén mineralizáció dinamikájával is. Ez elsősorban a nagy mennyiségben alkalmazott, bizonyos feltételek között a talaj saját, ill. a talajhoz adott szerves anyagából is nagy mennyiségben ásványosodó, a talaj szilárd fázisán kevésbé adszorbeálódó, a talaj nedvesség-tartalmával áramló nitrát ion vonatkozásában elsődleges jelentőségű. A N-trágyázás időzítéséhez és optimális adagjának kiszámításához feltétlenül szükséges a talajba került szerves anyag dinamikájának minél pontosabb becslése, főleg, ha az öntözés következtében fennáll az a veszély, hogy a nitrát a gyökérszóna alá mosódik le. Másrészt, az alkalmazott trágyának és az ökológiai feltételeknek megfelelően jelentős lehet a gáz alakú nitrogén veszteség is.

A termőtalaj-zöldségnövény rendszer szervesanyag-dinamikájának leírása lehetővé teszi az adott gazdálkodási rendszer különböző módszereinek hatásvizsgálatát és a fenntarthatóság szempontjából legkedvezőbb eljárások kiválasztását.

A szénforgalom, a növény nitrogénfelvétele és a nitrát mozgása a talajban összefüggő folyamatok rendszere, amit a talaj, mint élő és élettelen környezet, és a növény kölcsönhatásai, valamint a külső környezeti tényezők határoznak meg. Kutatásunk e folyamatok vizsgálatára irányult, kísérletes és elméleti módszerek alkalmazásával.

A talajoldatban viszonylag nagy koncentrációban lévő, a gyökérre tömegáramlással mozgó nitrát dinamikáját általában a gyökérszónában, a talajszelvény egészében, vagy adott rétegeiben tanulmányozzák.

A vizsgált talajszelvény mélységétől függetlenül az eredmények értelmezésében nehézségek forrása a gyökér, a talaj mikroorganizmusok és a közvetlen fiziko-kémiai környezet közötti összetett kölcsönhatások figyelembe vétele.

Mivel szén- és nitrogénforgalmat, a szervesanyag-forgalom intenzitását, és a talajoldatban mozgó nitrát mennyiségének és eloszlásának dinamikáját talaj- növény- és időjárási tényezők egyaránt befolyásolják, leírása folyamatorientált rendszermodellek alkalmazásával lehetséges. Ezekben a rendszermodellekben a szervesanyag-forgalom szimulációjára részmodelleket építenek be. A magyar szakirodalomban azonban jelenleg nem található zöldségtermesztésre kidolgozott, víz-, hő- szén- és nitrogén forgalmat valamint növényi biomaszra akkumulációt szimuláló rendszermodell.

Célunk a nagy víz- és nitrogén- és/vagy szerves trágya-mennyiség bevitelével járó zöldségtermesztésben a talaj szén és nitrogénforgalmának leírása, nemcsak a termesztési technika következtében a gyökérszónából kikerülő, a környezetre nézve veszélyt jelentő nitrát mennyiségének becslése, hanem a szénforgalom jellemzése is, a humuszgyarapítás lehetőségeinek figyelembevételével. Ehhez az N- és C-forgalom tényezői kölcsönhatásainak szabadföldi *in situ*, és laboratóriumi méréseken alapuló vizsgálatát végeztük el. Méréseink eredményei a COUP szimulációs modell továbbfejlesztésére alkalmaztuk: a szerves és szervesetlen nitrogén- és szénforgalom leírására alkalmazható összefüggések kiválasztásánál, kezdeti- és határfeltételeinek definiálásánál és a zöldségtermesztés adott módszer-kombinációinak megfelelő paraméterezésénél. Az általunk alkalmazott rendszermodellt alkalmassá kívánjuk tenni arra, hogy alkalmazható legyen

- a termelési és környezeti kockázatok felmérésére
- a kidolgozott variánsok várható hatásainak előrejelzésére
- a szénmérleg becslésére a CO<sub>2</sub> kibocsátás és a C stabilizálódás előrejelzésére
- annak eldöntésére, hogy az ésszerű talajhasználat egyes elemei mikor, hol, milyen módszerek alkalmazását teszik szükségessé

## A KUTATÁSBAN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

Kutatásunkban a szabadföldi mikroparcellás kísérletek és laboratóriumi vizsgálatok, a statisztikai értékelés és a szimulációs technika alkalmazása egyaránt fontos szerepet játszik.

### Kísérleti feltételek, talajok és jelzőnövények

Három, zöldségtermesztésre hagyományosan alkalmazott, egymástól eltérő fizikai féleségű, szervesanyag tartalmú és mikrobiológiai aktivitású talajon (homoktalaj, vályogtalaj és agyagos vályogtalaj) mikroparcellás, öntözött zöldségkísérletet állítottunk be 2006 tavaszán és folytattunk 2009 őszéig a Kecskeméti Főiskola Kertészeti Főiskolai Kar Környezettudományi Intézetének kísérleti tenyészertjében, földbe süllyesztett, 0,6 m átmérőjű, 0,6 m mély liziméter jellegű tenyészederényekben.

A talajok hagyományosan zöldségtermesztő körzetekből származnak: lepelhomok Kecskemétről (S1), humuszos öntéstalaj Dunaszentbenedekről (S2) és réti csernozjom Szentesről (S3). A talajokat több mint 10 évvel a kutatás kezdete előtt töltötték a tenyészederényekbe. Néhány talajfizikai és kémiai tulajdonságukat az 1. táblázatban mutatjuk be.

1. Táblázat: A kísérlet talajainak néhány fizikai és kémiai tulajdonsága

| Talaj | Bd                  | Összporo- | Homok | Agyag | pH <sub>KCl</sub> | TOC                 | TN                  | N <sub>i</sub>      |
|-------|---------------------|-----------|-------|-------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|       | kg dm <sup>-3</sup> | zítás     | %     | %     |                   | mg kg <sup>-1</sup> | mg kg <sup>-1</sup> | mg kg <sup>-1</sup> |
| S1    | 1,43                | 0,45      | 95,01 | 2,62  | 7,83              | 3720                | 473                 | 10,50               |
| S2    | 1,32                | 0,52      | 55,28 | 32,25 | 7,68              | 9825                | 1245                | 21,56               |

A kéttényezős kísérlet kezelése: három talajtípus (homok-, öntés- és csernozjom talaj), és négy trágyaadag: N1: kontroll, N2: N<sub>60</sub>:P<sub>60</sub>:K<sub>120</sub>, N3: N<sub>120</sub>:P<sub>60</sub>:K<sub>120</sub>, és N4: N<sub>180</sub>:P<sub>60</sub>:K<sub>120</sub> kg/ha N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> és K<sub>2</sub>O hatóanyag voltak.. A kísérlet véletlen blokk elrendezésben, hat ismétlésben, összesen 72 liziméterből állt.

Az alaptrágyát Cropcare (10:10:20) retard műtrágya formájában alkalmaztuk, 600 kg/ha adagban (N2., N3 és N4 kezelés), a palántázást megelőzően. A 3-as kezelésben a +60 kg/ha N-, a 4-es kezelésben a 60+60 kg/ha N-hatóanyagot 2 ill. 4 alkalommal, később alkalmaztuk, 34%-os NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> fejtrágyaként. Az N3 kezelésben 2007-ben a nitrogén kezelést kiegészítettük 165 t ha<sup>-1</sup> istállótrágya alkalmazásával. Ez 5 kg középérett istállótrágya bekeverését jelentette az adott tenyészedények felső 10 cm-es talajrétegébe.

A tenyészedényekbe 4-4 öntözőfejet vezetünk be és automatizált csepegtető öntözéssel biztosítottuk a növények vízellátását.

2006-ban 2-2 **paradicsom** jelzőnövényt (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. K-549) neveltünk edényenként. A palántázástól (június 9) a végső betakarításig (szeptember 28) 220 mm öntözővizet alkalmaztunk a természetes csapadék (245 mm) kiegészítésére. 2007-ben edényenként Spirit (SG) rövid tenyészidejű **csemegekukorica** volt a jelzőnövény. 2008-ban Kalorez **fűszerpaprika** volt a jelzőnövény. A Kalorez csípősség nélküli, folytonos-, erőteljes- növekedésű, kiváló örlemény-alapanyag készítésére alkalmas, a *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria* baktériummal szemben ellenálló fajta. 2009-ben „Start” ZKI fajta, 80-100 g db-1 átlagtömegű, fehér, vastaghúsú, cecei típusú **étkezési paprika** volt a jelzőnövény. A csemegekukorica, fűszerpaprika és étkezési paprika kísérletekben 4-4 növényt neveltünk edényenként.

### Mintavételek és helyszíni mérések

A mintavételek és helyszíni mérések rendje, ütemezése a 2. táblázatban látható.

**A meteorológiai adatokat:** a léghőmérséklet, relatív páratartalom és csapadék értékeket a kísérlet helyszínén 2 m magasságba elhelyezett automatikus mérőműszerekkel mértük a kísérlet kezdetétől a befejezéséig (2006-2009). A napi értékeket a 15 percnként detektált adatokból kiszámítottuk.

A légkörből történő száraz és nedves **N-kiülepedést** részben a csapadékvíz, részben pedig a talajfelszín felett néhány cm-re elhelyezett, a talajjal nem érintkező, kevert ágyú ioncserélő gyanta (10 g gyanta, IRN-150 Merck®) nitrát- és ammónium-N tartalma alapján becsültük.

**A liziméterek talajnedvesség-tartalmát,** a talajok csapadékra mutatott benedvesedését, illetve az időjárási feltételekből és a növényi vízfelvételből adódó vízvesztéséget Campbell CS615 típusjelű nedvességmérő szondával követtük. A 30 cm hosszúságú kételektródájú nedvességmérőt a liziméter közepén ültető kanállal kiásott 15-20 cm átmérőjű, közelítőleg henger alakú üregbe - a szonda elektronikát tartalmazó műanyag szondarészt alulra fordítva - helyeztük le. A műanyag szondarészbe rögzített két elektróda ez által a talaj visszatemetése után a talajfelszín alatt - néhány cm-re -, helyezkedett el. Erre azért volt szükség, hogy a csapadék és az öntözővíz akadálytalanul szivároghasson a talajba, valamint a növényi gyökerek fejlődését és vízfelvételét a szondatest ne befolyásolja. Két nedvességmérő szondát telepítettünk: az egyiket szélsőséges vízgazdálkodású homoktalajjal töltött liziméterbe (S1N4), a másikat pedig csernozjom talajjal töltött liziméterbe (S3N4) helyeztük. Az eltemetett CS615-ös szondák a kihelyezéstől kezdve folyamatosan kb. fél perces időközönként mért nedvességértékekből számított órás átlagértékeket tároltak el adatgyűjtőjükbe. A mérőrendszer áramellátását 2008-tól zselés akkumulátor biztosította. A szonda által kijelzett periódusidő és az annak talajnedvesség-tartalom átszámítására gyárilag megadott polinom-függvény a tapasztalatok szerint használható a liziméterek talajának nedvesség intervallumában. Külön kalibrációt ezért nem végeztünk. A mérés helyességét évente 2-4 alkalommal gravimetriás nedvességméréssel ellenőriztük.

2. Táblázat: A kísérletben végzett mintavételek és helyszíni mérések

| Vizsgálat   | Mintavétel   |   |  |  |
|---|--|---|--|--|
|   | 2006   | 2007  | 2008   | 2009   |
| Növény<br>levélfelület,<br>biomassza és N-<br>felhalmozás<br>dinamika | Paradicsom<br>4 időpontban   | Csemegekukorica<br>3 időpontban   | Fűszerpaprika<br>4 időpontban                                      | Étkezési zöldpaprika<br>4 időpontban   |
| gyökérvizsgálat   | 1 időpontban   | -   | 1 időpontban   | 1 időpontban   |
| Cellulózteszt   | 3 periódus   | 3 periódus  | 4 periódus   | 4 periódus   |
| Litter bag<br>(kukoricalevél)   |  | 1 periódus<br>aug 23 - október 17.  |  |  |
| Litter bag<br>Kukorica gyökér   | -  | -   | -  | Betakarítástól<br>palántázásig (2009<br>okt. – 2010 május)                               |
| Mikrobiális<br>biomassza  | 2 időpontban   | 1 időpontban  | 1 időpontban   | 2 időpontban   |
| Talajfelszíni<br>CO <sub>2</sub> fluxus                               | -  | 5 időpontban  | 3 időpontban   | 5 időpontban   |
| In situ N-min<br>(cső- IER)   | -  | 4 periódus  | 4 periódus   | 4 periódus   |
| Labor inkubációs<br>kísérlet<br>NH <sub>4</sub> ; NO <sub>3</sub> -N  | -  | Inkubáció állandó<br>nedvesség és<br>hőmérséklet mellett.<br>6 időpontban | -  | -  |
| IER-bag (csak IER)  | IER-bag  | -   | -  | -  |
| Talaj<br>NH <sub>4</sub> -N; NO <sub>3</sub> -N<br>Összes N           | 2 időpont (jún., okt.)<br>jún: 0-20; 20-40cm<br>okt.: 0-15; 15-30cm;           | 1 időpont<br>Márc.: 0-20cm; 20-<br>40cm                                   | 2 időpont<br>máj.: 0-20; 20-40cm<br>okt.: 0-20; 20-40cm            | 2 időpont<br>Máj.:0-20; 20-40cm<br>Okt.:0-20; 20-40cm                                    |
| Talaj<br>Szerves C  | 2 időpont (jún., okt.)   | 2 időpont (jún., okt.)  | 2 időpont (jún., okt.)   | 2 időpont (jún., okt.)   |
| Talaj<br>nedvességtartalom  | folyamatos   | folyamatos  | folyamatos   | folyamatos   |
| Meteorológiai<br>változók napi<br>értékei                             | folyamatos   | folyamatos  | folyamatos   | folyamatos   |
| Mélybeszivárgás,<br>N-tartalom  |  |   | folyamatos   | folyamatos   |
| Piacos termés<br>jellemzői  | Paradicsom:<br>3 szedésből friss<br>termés (cukor, sav,<br>C-vitamin tartalom) | Csemegekukorica: 1<br>betakarításból termés<br>(cukortartalom)            | Fűszerpaprika: 3<br>szedésből száraz<br>termés, (őrlemény<br>ASTA) | Étkezési zöldpaprika:<br>4 szedésből friss<br>termés (cukor, sav,<br>C-vitamin tartalom) |

### Talajfizikai és kémiai vizsgálatok

A talaj hidrológiai tulajdonságokat a talaj 0-15, 15-30 és 30-50 cm szintjeiből vett bolygatatlan mintákból határoztuk meg (1. táblázat, 1. ábra). A textúrát a szemcseösszetétellel jellemeztük.

A talaj szerves és ásványi nitrogén, valamint szerves szén tartalom vizsgálatát évente, a vegetációs periódus előtt és betakarítás után a 0-20 és 20-40 cm rétegből vett mintákból határoztuk

meg. Az összes nitrogén mennyiséget Kjeldahl módszerrel (MSZ-08-1783-6:1983 szerint), a humuszt MSZ-08-0452:1980 szerint, a NO<sub>3</sub>-N és NH<sub>4</sub>-N tartalmat 1 N KCl kivonás után vízgőz desztillációval határoztuk meg.

**A talajon átszivárgott oldat** mennyisége és N-tartalma becslését 2008 és 2009 években az átfolyós liziméterek csurgalékvíz mintáiból, roncsolás után mért összes N-tartalom alapján végeztük.

A talajban 30 cm alá **lemosódott nitrát** mennyiség becslésére a kísérlet indulásakor a 0-30 cm-es talajrétegből a gyökérbenövés-vizsgálathoz (ingrowth core) vett bolygatatlan minták aljára ioncserélő gyantacsomagot (10 g gyanta per csomag, IRN-150 Merck®) helyeztünk és a mintával együtt a talajokba visszaállítottuk. A vegetációs periódus végén a gyantát a laboratóriumban megtisztítottuk és 1M KCl extrakció után NH<sub>4</sub>-N és NO<sub>3</sub>-N-tartalmát meghatároztuk.

### **Növényvizsgálatok**

A **szén** (biomassza) és **nitrogén felhalmozás** dinamikájának vizsgálatához a földfeletti részt évente négy alkalommal mintáztuk. A növényi szerveket szétválasztottuk, a levélfelületet megmértük, szárítás után a tömeget, N-tartalmat meghatároztuk. A piacos termésekből meghatároztuk az adott zöldség értékeléséhez szükséges jellemzőket nagyság, egyedi terméstömeg, sav és cukortartalom, színezéktartalom (ASTA), N, P, K, Zn-tartalom.). A szabad savtartalmat neutralizációs analízissel, az összcukor tartalmat Schoorl módszerrel, a C-vitamin szintet pedig redoxi titrimetriával határoztuk meg.

A növény általi **szénbevitelt** talajba a gyökérzet szárazanyag-tartalma alapján becsültük, figyelembe véve a napi átlagos C-depozícióra vonatkozó irodalmi adatokat. A gyökérzetet a palántázáskor a 0-30 cm talajszintből vett és 0,5 mm lyukbőségű szitaszövetben az eredeti helyére visszahelyezett bolygatatlan mintákból nyertük („ingrowth core”) amelyeket az utolsó termés szedésekor a talajból eltávolítottunk, a gyökereket kinyertük és tömegüket és az összes gyökérhosszt megmértük. A gyökérhossz, átlagos gyökérsugár és levélfelület meghatározását képanalízissel végeztük (Delta-T Image Analysis System).

### **Talajbiológiai vizsgálatok**

A **mikrobiális biomassza C és N-tartalmát** kloroform fumigációs extrakcióval határoztuk meg, a 0-15 cm talajrétegből. Apollo 9000, Teledyne Teckmar analizátort használtunk az összes szén (TOC) és összes N (TN) meghatározására a 0.5M K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> kivonat szűrletéből. A mikrobiális biomassza C (MBC) és a mikrobiális biomassza N (MBN) becslésekhez a fumigált és nem fumigált minták különbségét elosztottuk a  $k_{EC}=0.45$  (Joergensen, 1996) és  $k_{EN}=0.54$  (Joergensen and Muller, 1996) faktorokkal. Az MBC és MBN tartalmat 2007-től csak a kontroll (N1) és a szerves trágyás (N3) kezelésben vizsgáltuk.

A **talaj biológiai aktivitását** (1) **cellulóztesztek** lebomlása alapján becsültük. 2,50 g tiszta cellulóz szűrőpapír (Macherey-Nagel 813) 6x6 cm-es darabját 1 mm lyukbőségű szitaszövetben 5-8 cm mélyen a talajba helyeztük. Az egymást követő mintavételek alkalmával új tesztekkel helyeztünk le. A részben lebomlott tesztek a laboratóriumban megtisztítottuk, 105 °C-on megszárazítottuk és a maradék cellulóz tömegét megmértük.

A cellulózlebontás sebességi állandójának számítása az  $A = A_0 \cdot e^{-k \cdot t}$  összefüggés alapján történt, ahol k: sebességi állandó (1/nap) A<sub>0</sub>: kiindulási cellulóz mennyisége (2.50 g), A: maradék, nem lebontott cellulóz mennyisége (g), t: expozíciós idő (nap).

(2) **Kukorica gyökér** lebomlását vizsgáltuk a betakarítástól a következő évi palántázásig tartó időszakban, (5g tesztenként) a 10-05 cm talajrétegben. Tavasszal két alkalommal mintáztuk. A cellulóz tesztnél leírt módszert alkalmaztuk, de meghatároztuk a N lebomlás paramétereit is.

(3) **Kukorica levél** tesztek (2g per teszt) 2007-ben közvetlenül a kukorica betakarítása után helyeztünk a talajba. A cellulóz tesztnél leírt módszert alkalmaztuk.

Kísérleti talajainkban a **N-mineralizációt** *in situ* és laboratóriumi feltételek (állandó hőmérséklet és nedvesség tartalom) között is vizsgáltuk. Helyszíni vizsgálatokban 30 cm magas, 5 cm átmérőjű

aljukon élezett peremű műanyag csövekkel bolygatatlan talajmintát vettünk a felső 30 cm-es talajból, tetejére és aljára ioncserélő gyantacsomagot erősítettünk, majd a talajba visszahelyeztük. A vizsgálat 105 napos időtartama alatt 5 alkalommal vettünk mintát úgy, hogy 2-2- ismétlésből a talajt és a gyantát eltávolítottuk,  $\text{NH}_4\text{-N}$  és  $\text{NO}_3\text{-N}$  tartalmukat meghatároztuk.

Ezzel párhuzamosan az **N mineralizációt** laboratóriumi inkubációs kísérletben is vizsgáltuk. A liziméterekből vett talajminták nedvességtartalmát szabadföldi vízkapacitás értékre beállítva - állandó hőmérsékleten ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) - vizsgáltuk a nitrogéntartalom változását, 139 napon keresztül, összesen 6 időpontban történő mintavétellel és elemzéssel.

Helyszíni **talajrespiráció** mérés a vegetációs időszak alatt, 2007-2009-ben összesen 13 alkalommal történt. A méréseket napközben 11 óra és 12 óra között végeztük, a talaj  $\text{CO}_2$  fluxust a kiindulási és 30 perc elteltével kapott  $\text{CO}_2$  koncentráció különbségéből számítottuk ki. A talajfelszínbe sülyesztett kamrákból  $10\text{ cm}^3$  gázmintát vettünk előzetesen vákuumozott csövekbe, és laboratóriumba szállítás után gázkromatográfal mértük a  $\text{CO}_2$  mennyiségét.

### **Statisztikai elemzés**

Mérési adatainkat kéttényezős varianciaanalízissel teljes faktoriális elrendezés szerint értékeltük. Az egyik tényező a talaj volt (homok, vályog és agyagos vályog), a másik tényező pedig a 4 eltérő trágyázási szint. Egytényezős varianciaanalíziseket végeztünk egy- egy hatás teljes adatpopuláción belüli kimutatására.

### **Dinamikus szimuláció**

A CoupModell (Jansson and Karlberg, 2003) alkalmazásával hajtottuk végre a szimulációkat. A CoupModell egy a talaj-növény-légkör rendszer szimulációjára alkalmas kapcsolt hő- és anyagforgalmi modell mezőgazdasági területek és erdők víz, hő, szén és nitrogén forgalmát szimulálja a talaj-növény-atmoszféra rendszerben. Szimulációs kimenetei a vizsgált rendszer folyamat- és állapotváltozóinak napi értékei.

#### **A szimulációs munka menete**

- A klíma adatsorok (napi hőmérséklet, páratartalom, szélesebesség, csapadék, globálsugárzás adatokból) összeállítása és bevitele bináris fájllokba, azaz a talaj hő- és vízforgalom szimulációjához szükséges hajtóváltozó-készlet előállítás.
- A homok, vályog és agyagos vályog fizikai féleségű talajszelvények talajfizikai-vízgazdálkodási (részben mért, részben pedotranszfer függvényekkel becsült) paraméter készletének összeállítása és az ezek alapján definiált rétegek paramétereivel a talaj adatbázisok kialakítása, adott szituációk paraméterezése.
- A növények növekedési és N-felvételi dinamikájának megfelelő összefüggések kiválasztása és ezek paraméterezése.
- A talaj hő- és nedvességdinamikájának szimulációja, a talajszelvényben definiált rétegek nedvesség tartalmának, hőmérsékletének, a felszíni beszivárgásnak, a rétegek közötti nedvesség- és hőforgalomnak, stb. napi értékeit, azaz a nitrogénforgalom és termés szimulációs modell hajtóváltozóit tartalmazó fájllok előállítás.
- A szervesanyag-forgalom összefüggéseinek felparaméterezése
- A talaj nitrogénforgalmának és a növény növekedésének szimulációja különböző N-műtrágyázási szinteken.

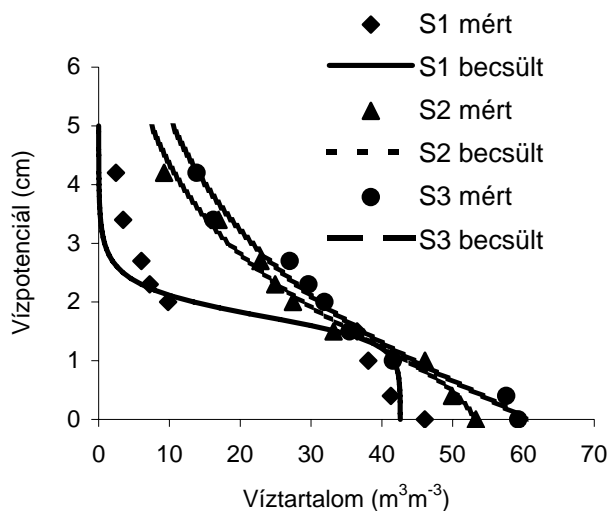
A szükséges adatkészletek összeállításánál, valamint az összefüggések kiválasztásánál és felparaméterezésénél a szabadföldi kísérletek mérési eredményeit hasznosítottuk.

## **A KUTATÁS FŐBB EREDMÉNYEI**

### **A nedvesség- szén és nitrogén forgalmat befolyásoló talajtulajdonságok**

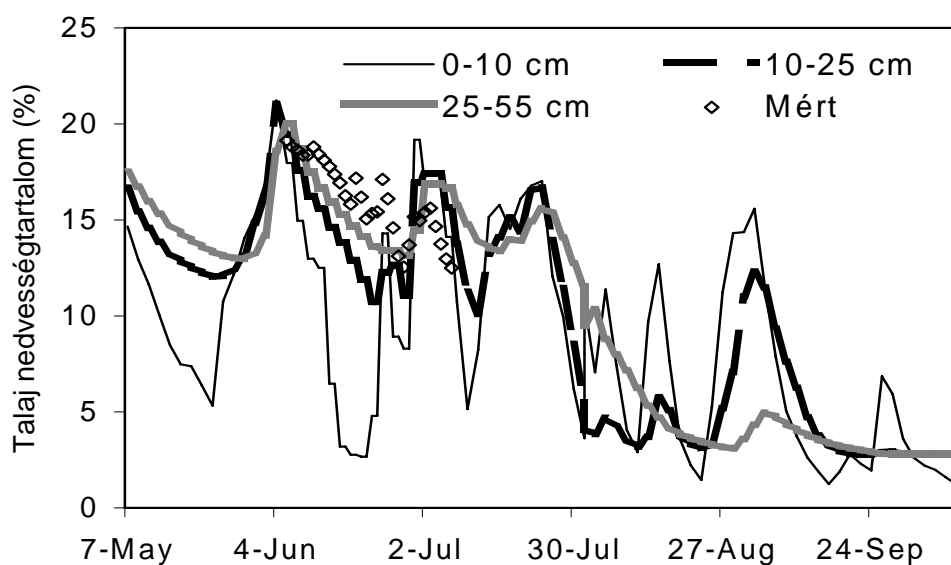


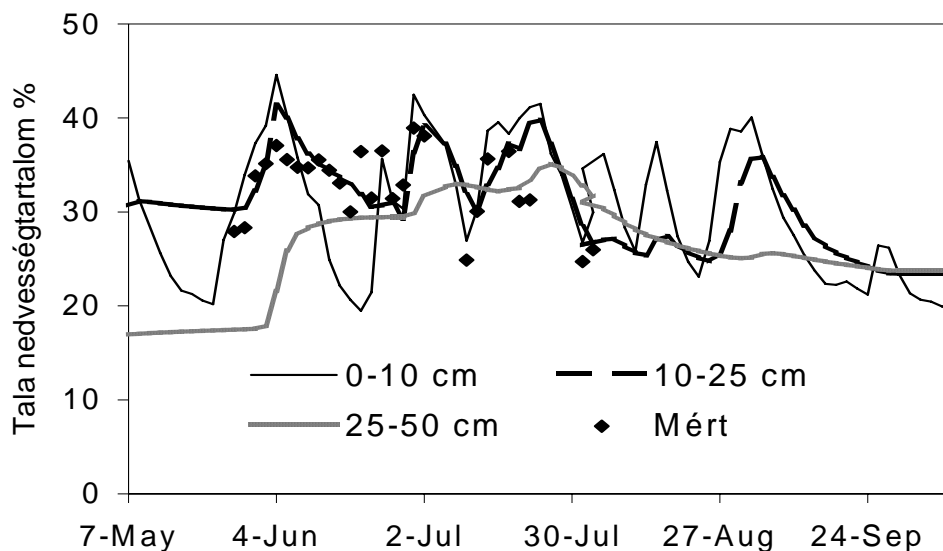
Elvégeztük az évjárat-hatásokért legnagyobb mértékben felelős időjárási tényezők összehasonlító analízisét. Összeállítottuk a talaj víz- és hőforgalmának szimulációjához szükséges meteorológiai adatkészletet, megállapítottuk az egyes talajtípusok szelvényének rétegeiben a víz- és hőforgalmat meghatározó talajfizikai tulajdonságok jellemző értékeit. Mért vízretenciós adatok és az illesztett Van Genuchten összefüggések láthatók az 1. Ábrán.



1. ábra: A kísérleti talajok vízretenciós görbéi

Folyamatosan detektált talajnedvesség értékeket használtunk fel a vízforgalom modell kalibrációjához (2.ábra).





2. ábra: Szimulált és mért nedvességtartalom az S1N4 kezelésben (fent) és az S3N4 kezelésben (lent)

Méréseink alapján meghatároztuk a légkörből kiülepedett nitrogén mennyiségét, ami átlagosan  $2,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NH}_4\text{-N}$  és  $1,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$ , összesen  $3,6 \text{ kg ha}^{-1}$  nitrogén volt a vegetációs periódusban.

A 2006-ban, szezon előtt mért, kiindulási szerves és ásványi nitrogén tartalom szignifikáns különbséget ( $p < 0.001$ ) mutatott a talajtípusok között (legkisebb az S1, legnagyobb a S3 talajban), talajtípuson belül azonban azonos volt. Ugyancsak különbözött egymástól ( $p < 0,05$ ) a 0-20 és a 20-40 cm-es rétegek szerves és ásványi N-tartama. Ez a különbség végig megmaradt.

A paradicsom és a csemegekukorica betakarításakor nem mutattunk ki a N-kezelések hatására létrejövő szignifikáns különbségeket a talaj N-tartalmában. 2009-re azonban a szerves trágyázás hatására jelentősen megváltozott a talajok összes N- és nitrát N-tartalma (3. táblázat). Ugyanakkor nem mutatkozott hatása az  $\text{NH}_4\text{-N}$ -tartalomra, azonban a talaj  $\text{NO}_3\text{-N}$  tartalmát a kísérlet végére (2009. október) jelentősen megnövelte a felső 20 cm-ben minden talajban a többi kezeléshez mérten mintegy 3-szorosra.

3. táblázat: A nitrogén kezelés hatása a feltalaj (0-20 cm) összes (szerves + ásványi) nitrogén tartamára a kísérlet indításától a befejezésig

| N kezelés     | Összes N ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) |      |      | Összes N ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) |     |      |      |
|---------------|----------------------------------|------|------|----------------------------------|-----|------|------|
|               | S1                               | S2   | S3   | N4                               | S1  | S2   | S3   |
| FYM nélkül*   |                                  |      |      | 2008. október                    | 440 | 1150 | 1726 |
| 2006. június  | 473                              | 1245 | 1787 | 2009. május                      | 347 | 1177 | 1550 |
| 2006. október | 419                              | 1129 | 1611 | 2009. október                    | 457 | 1138 | 1518 |
| 2007. március | 368                              | 1093 | 1588 | N3                               |     |      |      |
| 2008. május   | 423                              | 1148 | 1626 | 2008. október                    | 675 | 1455 | 2188 |
| 2009. május   | 356                              | 1098 | 1585 | 2009. május                      | 554 | 1493 | 1712 |
| 2009. október | 402                              | 1055 | 1436 | 2009. október                    | 819 | 1657 | 2294 |

\*N1, N2, és N4 kezelések együtt

A szerves trágyázás a talajok szerves széntartalmát is növelte (4. táblázat).

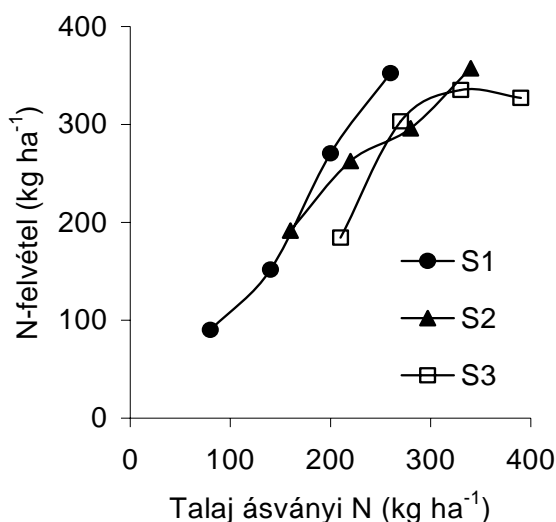
4. táblázat: A szerves- (N3) és műtrágyázás (N4) hatása a feltalaj (0-20 cm) szerves széntartalmára.

|               |    | Szerves C % |      |      |      |
|---------------|----|-------------|------|------|------|
|               |    | S1          | S2   | S3   |      |
| 2006. június  | N3 |             | 0,27 | 0,81 | 1,35 |
|               | N4 |             | 0,22 | 0,83 | 1,38 |
| 2007. március | N3 |             | 0,35 | 0,85 | 1,43 |
|               | N4 |             | 0,26 | 0,88 | 1,49 |
| 2008. május   | N3 |             | 0,45 | 0,95 | 1,52 |
|               | N4 |             | 0,41 | 0,92 | 1,42 |
| 2009. május   | N3 |             | 0,59 | 1,12 | 1,52 |
|               | N4 |             | 0,36 | 1,00 | 1,39 |

### Növényi növekedés és nitrogén felvétel

Leírtuk a termesztett zöldségnövények növekedés dinamikáját, biomassza akkumulációját és megoszlását, nitrogén felvételi dinamikáját, felvételi hatékonyságát, és megállapítottuk a szimulációs modell futtatásához szükséges allokációs összefüggéseket és paramétereiket.

A paradicsom termékek 64-178 t.ha<sup>-1</sup> közöttiek voltak a homokon (S1), 87-233 t.ha<sup>-1</sup> a vályogtalajon (S2) és 129-241 t.ha<sup>-1</sup> az agyagos vályog talajon (S3), szignifikánsan függve a talajtípustól (p< 0.001) és a nitrogén trágyázástól (p< 0.01). Ez a termés mennyiség irodalmi adatok szerint megfelel az általában a szabadföldi termesztésben nyerteknek. A hajtás N-koncentrációja 1.4 – 4.4 %, a gyümölcse 1,3-2,7 % közötti volt. A terméssel kivont N az N1 kezelésben volt a legkisebb (91 kg ha<sup>-1</sup>), míg az N4 szinten mindhárom talajból 350 kg ha<sup>-1</sup> N körüli volt a kivonás (3. ábra).



3. ábra: A paradicsom termés N-kivonása

5. táblázat: N-trágyázási hatékonyság

|                    | Trágyázási hatékonyság % |       |        |
|--------------------|--------------------------|-------|--------|
|                    | S1                       | S2    | S3     |
| <b>Paradicsom</b>  |                          |       |        |
| N2                 | 2.3                      | 95.3  | 100.00 |
| N3                 | 3.5                      | 51.8  | 49.56  |
| N4                 | 4.7                      | 38.9  | 50.85  |
| <b>Kukorica</b>    |                          |       |        |
| N2                 | 12.0                     | 85.7  | 100.0  |
| N3                 | 5.2                      | 47.2  | 59.8   |
| N4                 | 39.7                     | 78.7  | 78.0   |
| <b>Fűszerpapr.</b> |                          |       |        |
| N2                 | 28.3                     | 100.0 | 74.3   |
| N3                 | 42.3                     | 66.4  | 58.5   |
| N4                 | 30.4                     | 39.0  | 36.0   |

A maximális levélfelület az első termés-betakarítás idejére alakult ki, és a vegetációs periódus végére jelentősen lecsökkent a paradicsom, fűszerpaprika és étkezési paprika növényeknél. (A kukoricát eltávolítottuk az egyetlen szedés után). Szignifikáns összefüggést tapasztaltunk (p<0,05) a maximális levélfelület nagysága és a talajtípus, valamint a N szint között. A növényeket

összehasonlítva a legnagyobb levélfelület indexeket (LAI) a paradicsomnál mértük (a paprikák mintegy 3-szorosát), a maximális értékeket az S+N4 kezelésben érte el. Ennek az értéknek kb. fele volt a S1N4 kezelés max. LAI értéke, míg az S2 talaj minden kezelésében a LAI kb. egyharmada volt. A paprikák a LAI maximum értékeit a szerves trágyázott N3 kezelésekben mutatták, a fűszerpaprika az S2 talajban, az étkezési paprika az S3 talajban.

A zöldség növények nitrogén hasznosítási hatékonyságának vizsgálata szorosan összefügg a talaj N-forrásainak hasznosításával, ill. trágyázás-öntözés alkalmazások gazdaságossági és környezetvédelmi vonatkozásaival. Az N-hasznosítás fontos összetevője az N-felvételi hatékonyság, azaz az egységnyi gyökérhosszra vonatkoztatott N-kivonás. A paradicsom, csemegekukorica és fűszerpaprika trágya-N-hasznosításának %-ban kifejezett értékeit a 5. táblázatban, N-felvételi hatékonyságát a 6. táblázatban hasonlítottuk össze. Mind a paradicsom, mind a csemegekukorica trágyahasznosítása az agyagos vályog talajban (S3) volt a legnagyobb, míg a fűszerpaprikáé – a hagyományos termesztési helyének megfelelő – vályog öntéstalajban (S2) érte el maximumát.

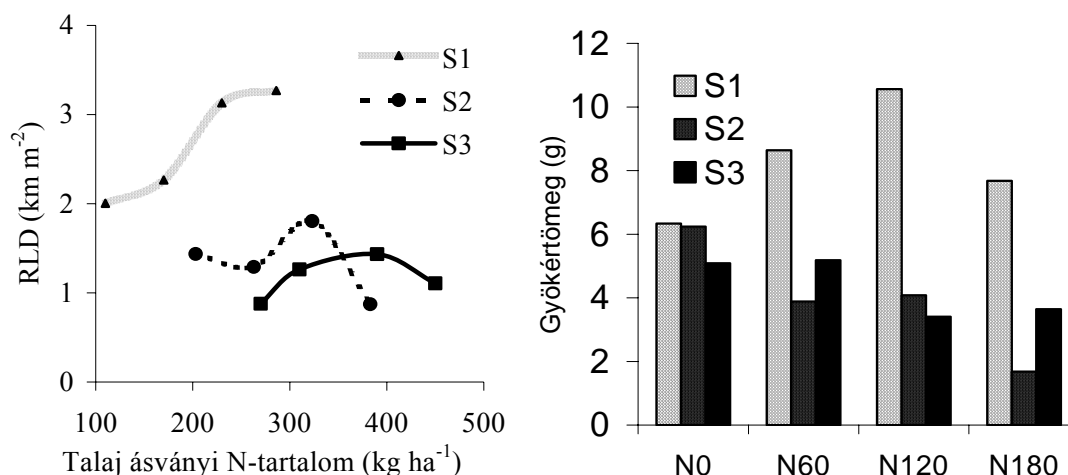
A piacos termékek jellemzőit és a beltartalmi értékeket a már megjelent cikkeinkben részletesen tárgyaljuk.

5. Táblázat: N-trágyázás hatása a paradicsom és fűszerpaprika N-felvételi hatékonyságára

|    | N-felvételi hatékonyság (g m <sup>-1</sup> ) |      |      |               |     |     |
|----|--|------|------|---------------|-----|-----|
|    | Paradicsom                                   |      |      | Fűszerpaprika |     |     |
|    | S1   | S2   | S3   | S1            | S2  | S3  |
| N1 | 212  | 405  | 986  | 152           | 331 | 502 |
| N2 | 440  | 810  | 957  | 316           | 402 | 336 |
| N3 | 399  | 662  | 1021 | 317           | 604 | 436 |
| N4 | 378  | 1854 | 1517 | 225           | 333 | 385 |

## Gyökérnövekedés, növényi szénbevitel

Igen kevés, a nitrogénkezelésnek és talaj textúrának a zöldség növények gyökérnövekedésére és gyökérzetük eloszlására gyakorolt hatásaival kapcsolatos adat áll rendelkezésre a nemzetközi szakirodalomban. Vizsgálatuk pedig nagy jelentőségű mind a nitrogén felvételi és hasznosítási hatékonyság, mind pedig a talajba történő növényi C-depozíció becslése szempontjából. Kutatásunk keretében lefolytatott gyökérvizsgálataink eredményeit az előzőekben említett számításokon kívül a szimulációs munkában hasznosítottuk.



4. ábra: A paradicsom gyökérsűrűsége (RLD= egységnyi talajfelszínre vonatkoztatott gyökérhossz,  $\text{km m}^{-2}$ ) a talajban (bal) és az N-kezelés hatása légszáraz gyökértömegére a 0-30 cm talajrétegben

A növények finomszálú gyökérszettel sűrűn beszórták a homoktalajt (S1), de sokkal rövidebb gyökerekből álló gyökérrendszert fejlesztettek az agyagos vályogtalajban (4. ábra). Ez nem meglepő, mivel a homokon a gyökérzet fokozott növekedéssel képes csak a gyorsan lefelé mozgó nitrát elérésére, és növekedése nem ütközik nagy talajjelenállásba. Az agyagos vályogtalajban a vízmozgás jóval lassúbb, és nagyobb mennyiségű a helyileg ásványosodó N mennyisége is, így a nitrogén felvehetősége csak lassan csökken a gyökérkörnyezetben és így nincs szükség a fokozott kompenzációs gyökérnövekedésre. A 4. ábrán csak a paradicsom gyökérparaméterei láthatók, de a többi zöldségnövény gyökérzete is hasonlóan reagált a kezelésekre. A gyökérhossz és a gyökér száraz tömeg is minden növényenél szignifikáns összefüggésben volt a N-trágyázással ( $p < 0.001$ , és legalább  $p < 0.05$ ). A N-trágyázásra a növény csökkentett gyökérhossz növekedéssel reagált az S1 talaj kivételével, ahol a trágyázás minden szintjén a további N adagolás növelte a gyökérhosszt. A fűszerpaprika gyökérhossza és a nitrogénkezelés között a homoktalajban exponenciális, az öntéstalajban (S2) lineáris, és a csernozjom talajban (S3) telítési görbét leíró összefüggéseket állapítottunk meg (ezek a szimulációnál hasznosíthatók). A gyökérzet száraz tömege az S1 talajban szintén exponenciális összefüggésben van a N-kezeléssel, míg a másik két talajban különböző meredekségű lineáris összefüggés illeszthető.

A paradicsom gyökér szárazanyaggal a talajba történő szén input  $75 - 280 \text{ g m}^{-2}$  szoros összefüggésben a N trágyázással ( $p < 0.001$ ) és a talajtípussal ( $p < 0.05$ ). Ennek alapján  $30 - 200 \text{ mg kg}^{-1}$  szerves szénmennyiség bevitelét valószínűsítjük a betakarítás után a talajban maradó gyökérmaradványokkal. A fűszerpaprika és étkezési paprika esetében hasonló mennyiséget feltételezünk, mivel a száraz gyökértömegek közel azonosak. Figyelembe kell venni azonban, hogy a tenyészidő alatt igen nagy mennyiségű szerves szén kerül a gyökérzetből a talajba a gyökéraktivitás során, különböző szerves vegyületek leadásával, valamint a teljes életciklus során folyamatosan végbemenő gyökérpusztulás révén. Ennek mennyisége a napi asszimilált szénmennyiség 30-50 százaléka is lehet. Valószínűsíthető, hogy pl. a paradicsom nagyobb biomassza akkumulációja esetén ez az érték nagyobb, mint a paprika kisebb biomassza akkumulációjakor, de ezt nem vizsgáltuk. Ha volt is ilyen különbség, a talaj szerves széntartalmában nem jelent meg.

### **Szervesanyag lebomlás és mikrobiológiai aktivitás**

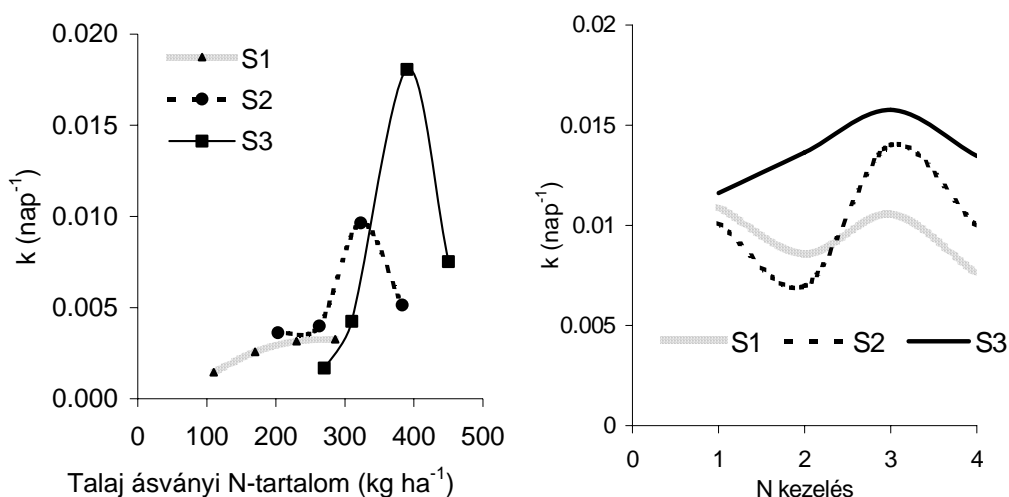
A cellulózlebontásra 2006-ban sem a talaj, sem a N-kezelés hatása nem volt szignifikáns, de a talaj hatása mind a három időszakban marginálisan szignifikáns volt a maradék cellulóztömeg alapján (a sebességi állandók alapján viszont nem). A N-kezelés 2007. első periódusában, továbbá 2009. első két periódusában volt szignifikáns a cellulózbontásra. Az eredmények alapján egyértelműen látszik, hogy az istállótrágyával kezelt liziméterekben volt a leggyorsabb a cellulóz lebomlása, és ezután a nagyobb műtrágyaadagú kezelés következett és végül a kontroll és a kisebb műtrágya adagú kezelések között soha nem kaptunk szignifikáns eltérést. Az első periódusban (2006) a cellulózbontás sebessége a csernozjom és öntés talajban szignifikánsan nagyobb volt, mint a homoktalajban, de a csernozjom és öntés talaj között nem volt szignifikáns különbség. A második periódusban egyik talaj cellulózbontása sem tért el szignifikánsan a másiktól. A harmadik időszakban a homoktalajban mért cellulózbontás sebessége csak az öntés talajtól különbözött szignifikánsan. A három időszak átlagában pedig a homoktalaj cellulózbontása szignifikánsan kisebb volt, a csernozjom és az öntés talajhoz képest is.

Egyes esetekben nagyon nagy volt a szórás az azonos kezelésű liziméterek között, és időnként egy liziméteren belül a 2 párhuzamos között is. A nagy szórásértékek feltehetően elfedtek bizonyos kezeléshatásokat. A nagy szórásértékek két okra vezethetők vissza. Az egyik a nedvességállapotban megmutatkozó különbségek akár liziméteren belül, akár liziméterek között. A másik a

cellulóztesztek helyzete a talajban. Amennyiben a cellulózteszt gyökérzettel sűrűbben átszótt helyen van, a lebomlás gyorsabb lehet, mint a gyökerektől távol.

A cellulóz lebontás sebességét nagymértékben befolyásolta a talajtípus és a nitrogén trágyázás (4. ábra, 2006-os adatok). A homok (S1) talajban a sebesség kicsi volt a többi talajhoz képest. A legnagyobb sebességet a 120 kg ha<sup>-1</sup> N-kezelésben mutattuk ki, amit nagymértékű csökkenés követett a S2 és S3 talajok nagyobb N-szintjén.

A kukorica levél (C:N= 41) lebontási sebessége szignifikáns összefüggésben volt a talaj N-kezelésével. Sebessége jelentősen meghaladta az ugyanakkor, ugyanott mért cellulóz lebontási sebességét minden kezelésben (4. ábra, 2007-es adatok).



4. ábra: A N-trágyázás és talaj textúra hatása a cellulóz (2006, bal) és a kukorica levél lebontására

A kukorica levél lebomlási sebessége a homoktalajban is többszöröse volt a cellulóz lebomlás sebességének, azonban az S3N3 kezelésben  $k$  értéke kisebb volt, mint a cellulóz lebomlásé. A kukorica gyökér, melynek CN aránya (25) egyébként a talaj nyers szervesanyagáéval megegyezik, a cellulózteszt lebomlási sebességéhez hasonló sebességet produkált.

A szervesanyag lebontás sebessége a vegetációs ciklus végére általában csökkent. 2006-ban a betakarításkor meghatározott  $k$  értékek a homok- és vályogtalajban mintegy ötödére csökkentek. Az agyagos vályogtalajban (S3) a dekompozíció kb. fele sebességgel folyt az utolsó két hónapban. Valószínű, hogy ennek oka az volt, hogy a felvehető nitrogénszint a növényi kivonás következtében lecsökkent, emellett a hőmérséklet is kedvezőtlenül alakult az utolsó időszakban.

A 2006. júniusában vett talajmintákban a **mikrobiális biomassza C (MBC)** mennyisége az S2 és S3 talajban több mint háromszorosa volt az S1 talajban mértnek ( $p < 0.05$ ). A kiindulási értékek kicsik voltak: a TOC 1,1-1,7 %-a a 0-20 cm-es talajrétegben. Betakarításkor az S1 talajban az MBC 2-41 %-kal nőtt a N-trágyázott kezelésekben, míg az S2 talajban 33-53 %-kal, az S3 talajban 12-55 %-kal csökkent a kezdeti értékeihez képest. A homok és a másik két talaj MBC értékei az N1, N2 és N3 szinteken különböztek ( $p < 0.05$ ).

A mikrobiális biomassza N (MBN) értékei 1,4-1,8 közöttiek voltak a kísérlet kezdetén. Betakarításkor 16-90 %-os növekedést detektáltunk az S1 talajban, míg 8-17 % csökkenést (S2) és 10-35 % csökkenést az S3 talajokban.

2007-től kezdve csak a kontroll és a szervestrágyázott kezelésben mértük az MBC és MBN mennyiségét. A következő évre már jelentős különbségeket okozott a szervestrágyázás: az MBC mennyisége minden talajon nőtt és a két N-kezelés közötti különbség többszörösére változott. Az MBN mennyisége a homok kivételével nőtt a talajokon, az öntéstalaj kivételével.

#### 6. Táblázat: Az N trágyázás hatása a mikrobiális biomassza C és N mennyiségére

| MBC  |        |        |        | MBN  |       |       |       |
|------|--------|--------|--------|------|-------|-------|-------|
| N1   |        |        | N1     |      |       |       |       |
| S1   | S2     | S3     | S1     | S2   | S3    |       |       |
| 2006 | 34,96  | 145,88 | 199,41 | 2006 | 6,39  | 19,62 | 20,01 |
| 2007 | 32,71  | 99,21  | 72,39  | 2007 | 8,0   | 11,6  | 7,2   |
| 2008 | 49,93  | 151,06 | 109,77 | 2008 | 7,12  | 26,99 | 21,29 |
| 2009 | 22,90  | 109,0  | 86,9   | 2009 | 5,3   | 25,6  | 14,6  |
| N3   |        |        | N3     |      |       |       |       |
| S1   | S2     | S3     | S1     | S2   | S3    |       |       |
| 2006 | 49,24  | 166,95 | 191,66 | 2006 | 9,07  | 22,62 | 23,44 |
| 2007 | 73,67  | 120,15 | 114,29 | 2007 | 19,6  | 16,7  | 14,4  |
| 2008 | 142,74 | 226,93 | 206,28 | 2008 | 14,39 | 27,05 | 49,99 |
| 2009 | 387,5  | 400,2  | 541,1  | 2009 | 74,2  | 75,4  | 85,4  |

### Nitrogén mineralizáció vizsgálati eredményei

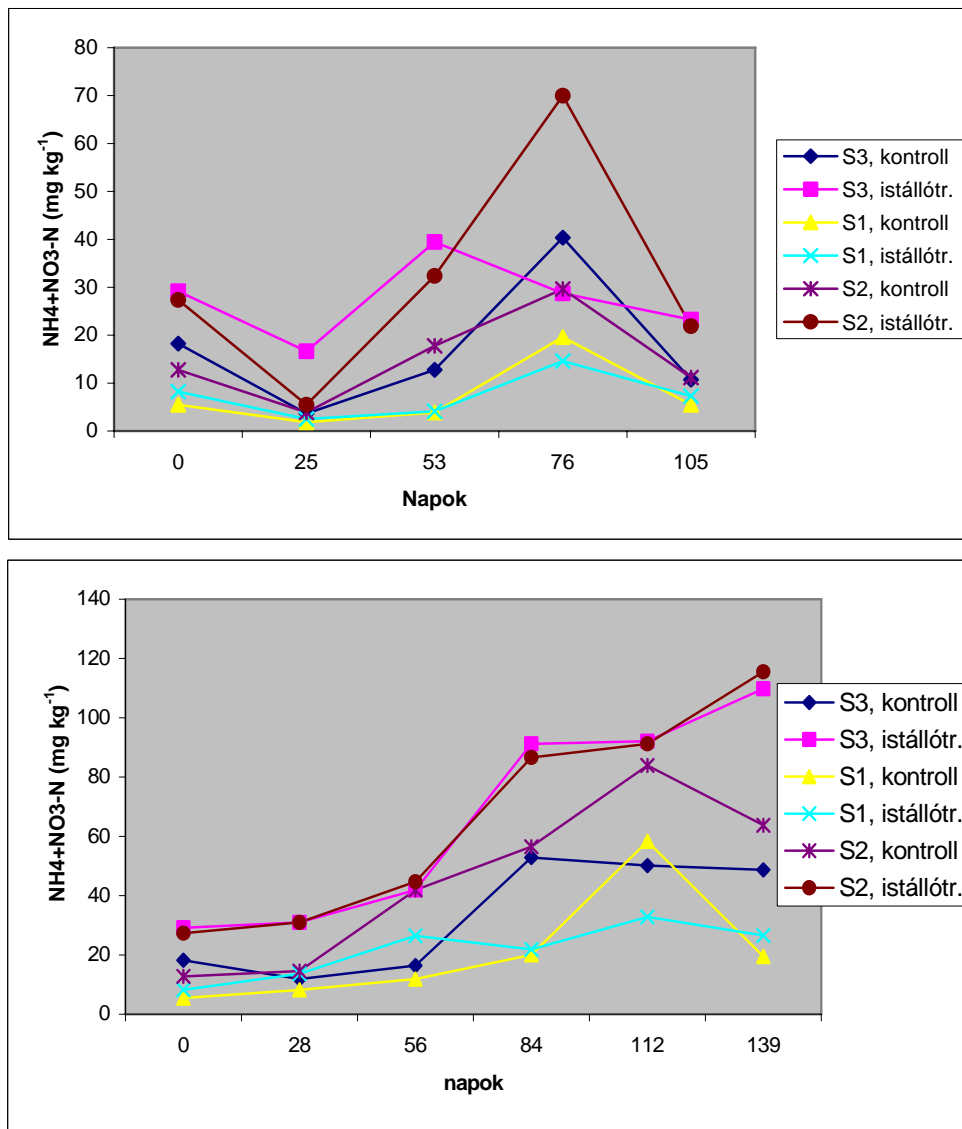
A laboratóriumi inkubáció során a nettó ammonifikáció ( $\text{NH}_4\text{-N}$  változása) a legtöbb esetben szignifikánsan változott a talajtípus szerint. Az istállótrágya kezelés hatása csak a 28. napon mutatkozott meg, akkor is csak marginálisan szignifikáns hatásról beszélhetünk ( $p=0.076$ ). Az ammónium változása a talajban egy kezdeti gyors csökkenés után emelkedést mutat, majd a 84. nap után az S2 és S3 talajban lecsökken. Ezzel szemben a homoktalajban az  $\text{NH}_4\text{-N}$ -tartalom mind a kontroll, mind az istállótrágyával kezelt talajokon a 112. napon hirtelen emelkedik majd ismét lecsökken. A csernozjom és a trágyázott öntés talaj  $\text{NH}_4\text{-N}$  tartalma a 84. nap után fokozatosan csökken.

A nitrát változását a talajtípus és a kezelés is szignifikánsan befolyásolta ( $p < 0.05$ ).

A nettó nitrifikáció ( $\text{NO}_3\text{-N}$  változása) egy viszonylag szabályos telítési jellegű görbét ad, kivéve az S2 és S3 talajok istállótrágyával kezelt változatait, amelyek még az utolsó, 139. napon is emelkedő tendenciát mutatnak. Ez a két kezelés végig egymással párhuzamosan fut. Ugyanakkor az S2 talaj kontrollja nagyobb mértékű nitrifikációt mutat, mint az S3 kontrollja. A homoktalajban a legkisebb mértékű a nitrát felhalmozódása, még a vályogtalaj és az agyagos vályogtalaj kontrollja is meghaladja az istállótrágyával kezelt homoktalaj nitrát-tartalmát.

A laboratóriumi inkubációs kísérlettel párhuzamosan, számos közös de eltérő vonást is tapasztaltunk az in situ N mineralizáció vizsgálata során. Az ammonifikációt csak a talajtípus befolyásolta, a kezelés nem. Az ammónium változása a laboratóriumi inkubációhoz hasonló módon egy kezdeti gyors csökkenés után növekedést, majd a 76. nap után gyors csökkenést mutatott. Viszont azzal ellentétben a különböző minták  $\text{NH}_4\text{-N}$  tartalma sokkal inkább azonos értéktartományban változott, ami a külső környezeti tényezők erős befolyásoló szerepére utal.

A nitrifikáció alapvetően másként alakult szabadföldi körülmények között, mint laboratóriumi inkubáció során, nincs szabályos telítési görbe, ehelyett értékei össze-vissza ugrálnak, és a nitrát felhalmozódás mértéke is jóval a laboratóriumi inkubáció során mért értékek alatt maradt, majd a vizsgálat végére, a 105. napon mindegyiknél lecsökken. Meg kell azonban jegyezni, hogy az S2 és S3 talaj istállótrágyával kezelt kezeléseiben a két párhuzamosan vizsgált liziméterben a nitrát-N értéke óriási szórást mutatott, aminek feltehetőleg az eltérő nedvességviszonyok lehettek az okai. illetve mérési hiba miatt negatív eredmények is kijöttek, vagyis 30 perc elteltével kevesebb  $\text{CO}_2$ -t mértünk, mint a kiindulási.



5. Ábra: A nitrogén mineralizáció menete a különböző talajokban a kísérlet helyszínén (fent) és laboratóriumi kísérletben (lent).

## Talajrespiráció

A legkisebb mért CO<sub>2</sub> emisszió 0, a legnagyobb mért érték pedig 2369 mg CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> volt, amit 2009. június 10-én az egyik szerves trágyával kezelt homoktalajban detektáltunk. Ez azt jelenti, hogy a mért CO<sub>2</sub> kibocsátás értékek 3 nagyságrendnyi különbséget mutattak a vegetációs időszakon belül, nappali mérésnél.

Nyár végén és ősszel (2007.aug.23; 2008.szept.30; 2009.okt.15.) általában kisebb CO<sub>2</sub> emissziót mértünk, valószínűleg az alacsonyabb hőmérséklet és a kisebb gyökéraktivitás miatt.

Az elvégzett kéttényezős variáncianalízis alapján a talaj tényező hatása 10 alkalommal egyértelmű szignifikáns hatást mutatott, 1 alkalommal megközelítőleg szignifikáns hatás (p=0.07) mutatkozott. A talajrespirációs aktivitás általában a S1 < S3 < S2 sorrend szerint változott, habár 2 időpontban a homoktalajban volt a legnagyobb a respiráció (2008.06.17. és 2009.06.10-én).

A nitrogénkezelések 10 esetben szignifikáns különbségeket okoztak, 3 esetben nem. A kezelések hatásai nem különültek el teljesen mértékben, de többnyire a következő sorrend szerint alakultak: N1 < N2 < N4 < N3. (Az 1-es kezelés volt a kontroll, ami nem kapott N trágyázást, a 3-as pedig az istállótrágyával kezelt volt). A különbségek az időnkénti nagy szórás miatt elmosódtak.



Ez azzal magyarázható, hogy a mért talajrespiráció a talaj mikrobiális légzés és a gyökérlégzés összegéből tevődik ki. A műtrágya adag növelésével és a szerves trágyával a több tápanyag miatt több lesz a gyökér, ezért a gyökérlégzés által termelt CO<sub>2</sub> is megnövekszik. Ráadásul a szerves trágyával kezelt talajból jelentős a trágya anyag bomlásából származó CO<sub>2</sub> is. A szerves trágya által előidézett CO<sub>2</sub> növekmény legjobban a 2009. június 10-i mérésnél mutatkozott meg.

## Szimulációs eredmények

### Talaj és növényzet nedvességdinamikája

A homok, vályog és agyagos vályog talajszelvényekben a nedvességdinamika nagyon különböző, elsősorban a kiindulási víztartalom, a víztartó képesség, a makropórus és talajszövet vízvezető képesség, a preferenciális vízmozgások tekintetében.

A különböző növények alatt különbözik a felszíni vízbeszivárgás, ill. a vízelnyelés. Az evapotranszspiráció ami a levélfelület növekedési dinamikájával szoros összefüggésben van, kölcsönhatásban a gyökérzet vízfelvételének mélységi és időbeni eloszlásával a nedvességdinamika növények közötti igen nagy különbségeinek egyik forrása.

A homok és agyagos vályog talajszelvények paradicsom állomány alatti vízforgalmát jellemző szimulációs eredményeket a 7. táblázatban foglaltuk össze.

7. táblázat: Szimulált vízbevitel és vízkivonás a homoktalaj (S1) és az agyagos vályogtalaj (S3) nitrogén kezeléseiben. N-kezelések: N1=0 kg N ha<sup>-1</sup>, N4=180 kg N ha<sup>-1</sup>

| Vízmenyiség (mm)         | S1  |     | S3  |     |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                          | N1  | N4  | N1  | N4  |
| Infiltráció              | 466 | 457 | 456 | 445 |
| Talaj evaporáció         | 201 | 167 | 150 | 134 |
| Mélybeszivárgás          | 99  | 53  | <1  | <1  |
| Össz evapotranszspiráció | 434 | 499 | 489 | 516 |

Ha az evapotranszspiráció meghaladja a vízbevitelt, a növény a gyökérzet számára elérhető rétegek felvehető vízkészletét veszi fel, azt csökkenti. A homok (S1) trágyázatlan (N1) kezelésének kivételével minden kezelésben ez a helyzet 2006-ban a paradicsom növénynél.

A homok és vályogtalaj esetében különbözik az egyes rétegek kiindulási víztelítettsége, víztartó képessége, vízvezető képessége, a makropórus vízvezetés (preferenciális vízmozgás, bypass), stb. A gyökérszóna alá leszivárgó víz a kapilláris vízemelés folytán meghatározott mélységből még visszanyerhető a növény számára, ez azonban a homokon igen kicsi.

Mindezek befolyásolják a mélybeszivárgást, azaz, a homokszelvényen átszivárgó víz mennyisége jóval nagyobb, mint az agyagos vályogszelvényen átszivárgó víz, valamint a növények hatására is kimutatható különbség. Ezen felül észlelhető az előző évi csapadékmennyiség hatása is, elsősorban az S3 talaj esetében, ahol a vízvisszatartás jóval nagyobb.

### A nitrát elmozdulása

A nitrát felhalmozódás mértéke és a felhalmozódási front elmozdulási sebessége a talaj vízháztartásának függvénye, és így elsősorban a talaj vízgazdálkodását meghatározó fizikai

tulajdonságai, ill. a vízbevitel határozzák meg. A homogén homokszelvényben az anyagforgalom gyorsabb, a víz és nitrát gyorsan mozog hamar a gyökérszóna alá. A paradicsom által fel nem vett nitrát-N az októberi mintavétel idejére már a gyökérszóna alsó harmadába, sőt a gyökérszóna alá is lemosódhatott. A műtrágyázás időrendje szerencsére nem tette lehetővé a nagymértékű kimosódási N-veszteséget az S1 talajból, ahol a modellel három víz átszivárgási csúcsot állapítottunk meg a szelvény (60 cm) alá. Azonban a talajoldat NO<sub>3</sub> koncentrációja ezek idejében alacsony volt. A kezdeti gyökérfejlődés időszakában a lassan feltáródó műtrágyából még kevés nitrát oldódott a talajoldatba, később a mási két átszivárgási periódus idején pedig a gyökérsűrűség már elég nagy volt ahhoz, hogy a nagy sebességgel lefelé mozgó nitrátot a gyökerek felvegyék.

Az agyagos talajban a mélybe szivárgó talajoldat mennyisége és N-koncentrációja kicsi a lefelé történő elmozdulás sebességét (homokhoz képest csökkentő), ill. a kapilláris vízemelést (a homokhoz képest növelő) meghatározó talajfizikai tulajdonságok, és a növényi víz- és N-felvétel összhatása (szinkronizáció és szinlokaliszáció) következtében. Itt a felhalmozódott nitrát lefelé történő mozgása lassú volt.

Mind az S1, mind az S3 talajok vízellátása kielégítő volt a növények számára, mivel a talaj nedvességtartalma sosem csökkent a pF:4,2-nek megfelelő érték alá, ami a homokban 2,5, az agyagos vályogban 15.8 % volt (2. ábra). Sőt, a talaj nedvességtartalma a tenyésztő legnagyobb részében a szabadföldi vízkapacitás érték körüli volt. Jó egyezést sikerült elérni a 10-40 cm talajrétegben mért és szimulált talajnedvesség értékek között (2. ábra).

A szimulált és mért termésmennyiség, maximum leaf area index (LAI<sub>max</sub>) és nitrogén felvétel került bemutatásra a 8. táblázatban.

A szimulált és mért termés szinte azonosak az S3N4 kezelés kivételével, ahol a modell túlbecsülte a termést. Ebben a kezelésben a szimulált N felvétel szintén túlbecsült. A LAI értékét a modell a mért értékhez viszonyítva alábecsülte. A különbségek a termés, N-felvétel és LAI<sub>max</sub> mért és becsült értékei között mutatják, hogy a gyökérkörnyezetbe lezajló folyamatok modellezése nem hibátlan. Az S3 talaj nagyobb szerves N-tartalma (1. táblázat) alapján feltételezhetjük, hogy a nitrogén felvehetőséget kontrolláló folyamatokban a mikrobiológiai folyamatok részvétele nagy volt, amit viszont nem sikerült kielégítően szimulálni. A többi kezelésben LAI<sub>max</sub> szimulált értékei jól egyeztek a mért értékekkel, és ez többé-kevésbé érvényes a nitrogén felvételre is.

Az ásványi nitrogéntartalma különbözött a talajokban, de az első két évben nem különbözött egymástól a N-kezelésekben. Ez a tendencia jól kimutatható volt a szimulációs eredményekben, ahol az ásványi nitrogén mennyisége a különböző N-kezelésekre csaknem azonos volt, bár a 30-50 cm-es étegben kisebb, mint a mért értékek. A paradicsom termesztés hatására a 0-20 20-40 cm-es és talajréteg N-tartalma közötti különbségek elmosódtak, és az összes N-tartalom szignifikáns (10 %-os) csökkenését mutattuk ki az S3 talajban, minden N kezelésben. Ezek az adatok szintén alátámasztják a szerves és szervesetlen készletek közötti nitrogén transzport pontos modellezésének fontosságát, ha a cél a nitrát dinamika vizsgálata a talajszelvényben.

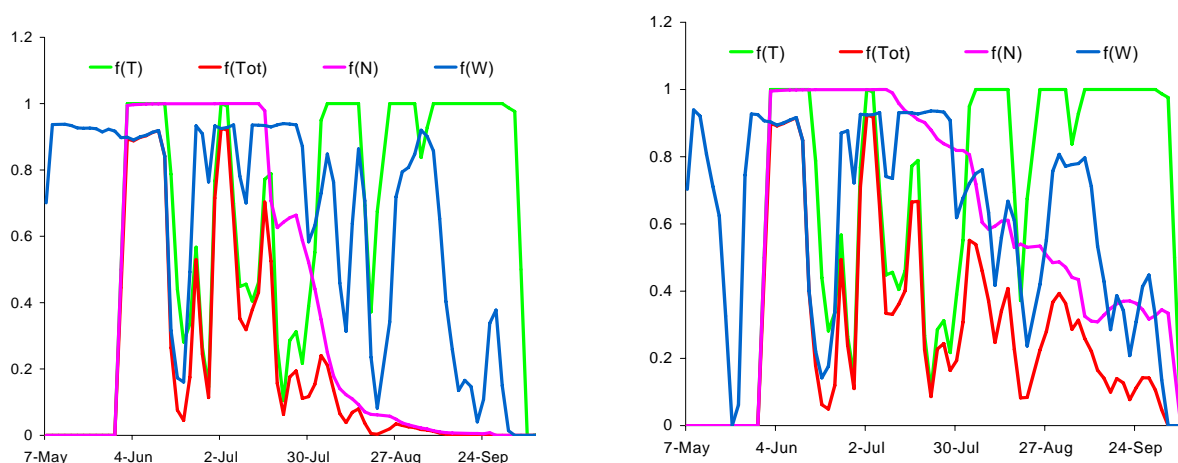
8. táblázat: Mért és szimulált (Szim.) növényi paraméterek a homok- (S1) és agyagos vályog (S3) talajban. N-kezelések: 1=0 kg N ha<sup>-1</sup>, 2=60 kg N ha<sup>-1</sup>, 3=120 kg N ha<sup>-1</sup> 4=180 kg N ha<sup>-1</sup>

| Parameter                   | N1   |       | N2   |       | N3   |       | N4   |       |
|-----------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
|                             | Mért | Szim. | Mért | Szim. | Mért | Szim. | Mért | Szim. |
| S1                          |      |       |      |       |      |       |      |       |
| Termés (g m <sup>-2</sup> ) | 317  | 325   | 626  | 625   | 716  | 731   | 885  | 885   |
| N (g m <sup>-2</sup> )      | 9,0  | 10,7  | 15,2 | 18,0  | 27   | 22,5  | 35   | 21,5  |
| LAI <sub>max</sub>          | 0,98 | 1,1   | 2,5  | 3,1   | 3,31 | 3,35  | 3,4  | 3,2   |

| S3                          |     |     |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| Termés (g m <sup>-2</sup> ) | 538 | 529 | 898  | 897  | 1018 | 1004 | 1297 | 1350 |
| N (g m <sup>-2</sup> )      | 18  | 23  | 33,5 | 38,2 | 30   | 43   | 33   | 53   |
| LAI <sub>max</sub>          | 2,2 | 2,5 | 2,6  | 2,5  | 2,9  | 2,8  | 5,3  | 4,5  |

### Abiotikus stressz vizsgálata szimulációval

A dinamikus talaj-növény-időjárás rendszer folyamatosan változik. A növény érzékenysége is változik a fejlődés során és így az abiotikus tényezők hatásai is változnak az időben. A hőmérsékletben hirtelen bekövetkezett hirtelen változások (melegedés), az időszakos vízhiány és a fokozatosan kialakuló nitrogén hiány korlátozza a fotoszintézist. A napi átlagos hőmérséklet többször meghaladta a 25 Co-ot júniusban és júliusban akadályozva a növekedést. A június 22-én megkezdett öntözés jelentősen javította a paradicsom vízellátását. A homoktalajban a felvehető nitrogéntartalom kimerülése korlátozta a növekedést augusztus közepétől. A végső N-mérleg szerint a növény a teljes nitrogen input (légköri N-kiülepedés, N-trágya és a talaj kiindulási ásványi N-tartalma) 118 %-át vonta ki a homok talajból, míg az agyagos vályog talajból csak 77 %-át.



6. ábra: A hőmérséklet, vízellátottság és N-ellátottság hatásvégvények és kombinált hatásuk a paradicsom növekedésére homok- (S1) és agyagos vályogtalaj (S3) 120 kg ha<sup>-1</sup> N (N3) kezelésében.

A N-hiányt a növényi szervek közötti, a levelekből a termésbe történő transzlokáció intenzifikálásával kompenzálta a paradicsom növény, ami az S3 talajhoz képest nagyobb mértékű levélszáradásban és levélmaradvány (litter) képzésben tükröződött. Az S1 talajban a kisebb növekedési sebességgel és kisebb levélfelülettel bíró növények kevesebb vizet transzspiráltak és így még a kedvezőtlen vízháztartási tulajdonságokkal bíró homoktalajban is kielégítő vízellátottságon növekedhettek. Ezzel szemben jó N-ellátottságon a nagyobb transzspirációs sebesség időszakonként vízhiány stresszt okozott az S3 talajon, bár a gyökérszóna felvehető vízkészlete nem merült ki teljesen.

A N-mérleg szempontjából a N-mineralizáció szerepét nem lehet túlbecsülni. A CoupModell által szimulált mikrobiológiai folyamatokat is a talajhőmérséklet és a nedvességtartalom befolyásolja. Az öntözött és trágyázott rendszerekben a szerves formából ásványosodó nitrogén mennyisége jelentősen hozzájárult a paradicsom nitrogénellátásához még a homoktalajban is, amint ez a végső N-mérlegből is kiderül.

A hőmérsékletben hirtelen bekövetkezett változások (melegedés), az időszakonkénti vízhiány és a fokozatosan kialakuló nitrogén hiány stressz és hatásai számszerűsítését a trágyázott és öntözött paradicsom fotoszintetikus hatásfüggvényének becslésével végeztük el. A rendszer érzékenysége a növény fejlődése késői szakaszában csökkent.

Adott rendszerben felvehető hatásfüggvények dinamikájának vizsgálatával lehetővé válik a rendszer paramétereinek menetközben való javítása (pl. automatikus öntözés, fejtrágyázás, mulcsozás, árnyékolás, stb.). Ezáltal az abiotikus stressznek a termésre és annak aminőségére gyakorolt kedvezőtlen hatásai minimalizálása környezetbarát módon válik lehetővé.

## A KUTATÁS EREDMÉNYEINEK RÖVID LISTÁJA

Három, zöldségtermesztésre hagyományosan alkalmas, egymástól eltérő textúrájú, szervesanyag tartalmú és mikrobiológiai aktivitású talajon (homoktalaj, vályog és agyagos vályogtalaj) mikroparcellás, öntözéses zöldség vetésgörög kísérletet állítottunk be (paradicsom, csemegekukorica, fűszerpaprika és étkezési paprika) a Kecskeméti Főiskola Kertészeti Főiskolai Kar Környezettudományi Intézete kísérleti telepén.

Összeállítottuk a talajok víz- és hőforgalmának szimulációjához szükséges meteorológiai adatkészletet, megállapítottuk az egyes talajtípusok szelvényének rétegeiben a víz- és hőforgalmat meghatározó talajfizikai tulajdonságok jellemző értékeit. Folyamatos talajnedvesség- mérések eredményeit használtuk fel a víz- és hőforgalom modell kalibrációjához.

Mérések és becslés alapján meghatároztuk a légkörből kiülepedett nitrogén mennyiséget.

Meghatároztuk a mineralizálható N-eloszlást. A parcellákba installált kisméretű, bolygatatlan talajoszlopokban *in situ* vizsgáltuk a N mineralizációt és nitrát kimosódást. Ugyanott különböző mélységekbe lehelyezett szerves maradványok, valamint cellulózesztek felhasználásával tanulmányoztuk adott C:N arányú szerves anyagok lebomlását és a mikrobiológiai aktivitást. Meghatároztuk a mikrobiális kötött nitrogén és szén frakciók mennyiségét és a N-trágyázás erre gyakorolt hatását. Megvizsgáltuk a N-trágyázás hatását a rendszer CO<sub>2</sub> kibocsátására a különböző talajokban.

Leírtuk a termesztett zöldségnövények növekedés dinamikáját, biomassza akkumulációját és megoszlását, nitrogén felvételi dinamikáját, és megállapítottuk a szimulációs modell futtatásához szükséges allokációs összefüggéseket és paramétereiket.

Becsültük a különböző növények gyökérzetével bevitt szerves C-mennyiséget a különböző talajtípusok N-kezeléseiben.

Laboratóriumi inkubációs (termosztátos) kísérletekben is vizsgáltuk az összes és ásványi nitrogén mennyiségének dinamikáját a kísérleti talajokban a kritikus szélső paraméter értékek meghatározása céljából.

Dinamikus szimulációval a CoupModell alkalmazásával, mérési eredményeink felhasználásával tanulmányoztuk a N-trágyázás- növény – talaj kölcsönhatásokat a nitrát kimosódásra.

Leírtuk (számszerűsítettük) a legfontosabb abiotikus stressz feltételeket és hatásdinamikájukat a növényi növekedésre szabadföldi mérési adataink felhasználásával.

Eredményeinket eddig 15 közleményben foglaltuk össze,

### Kutatásunk eredményeinek alkalmazási lehetőségei

1. A modellfejlesztés heurisztikus jellege segíti a szén- és nitrogénforgalom átfogó megértését;

2. A különböző sebességgel átalakuló szervesanyag-készletek definiálása, szén és nitrogén tartalmuk és kölcsönhatásaik leírása (számszerűsítése) elősegíti a növény számára felvehető ásványi N mennyiségi és eloszlási dinamikájának becslését a gyökérszónában;
3. Ezáltal, a növény felvételi dinamikájának ismeretében, a talaj nitrogén forrásainak felhasználási hatékonysága nő;
4. Összehangolható a szerves- és műtrágya alkalmazása a növény igényével az adott termesztési és ökológiai feltételeknek megfelelően;
5. Csökkenthető, ill. elkerülhető a környezet terhelése.
6. A modell felhasználható az oktatásban és a tanácsadásban.