

DEBRECENI EGYETEM

**KERPÉLY KÁLMÁN NÖVÉNYTERMESZTÉSI ÉS KERTÉSZETI
TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA**

Doktori iskola vezető:

Prof. Dr. Holb Imre

egyetemi tanár, az MTA doktora

Témavezető:

Prof. Dr. Kakuszi-Széles Adrienn

egyetemi tanár

**NITROGÉN STABILIZÁTOR ÉS LOMBTRÁGYA KEZELÉSEK
HATÁSAINAK VIZSGÁLATA KUKORICÁBAN (ZEA MAYS L.)**

Készítette:

Gila-Rácz Dalma Emese

doktorjelölt

NITROGÉN STABILIZÁTOR ÉS LOMBTRÁGYA KEZELÉSEK HATÁSAINAK VIZSGÁLATA KUKORICÁBAN (*ZEAMAYS L.*)

Az értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzésre érdekében a növénytermesztési és
kertészeti tudományok tudományágában

Írta: **Gila-Rácz Dalma Emese okleveles növényorvos**

Készült a Debreceni Egyetem Kerpely Kálmán Doktori Iskolája Növénytermesztési és
kertészeti tudományok doktori programja keretében

Témavezető: **Prof. Dr. Kakuszi-Széles Adrienn**

Az értekezés bírálói:

Dr.

Dr.

Dr.

A doktori bíráló bizottság:

elnök: Dr.

tagok: Dr.

Dr.

Dr.

Dr.

Az értekezés védésének időpontja: 20..

Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS	5
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	8
2.1. A növényi stressz	8
2.2. Jelentősebb abiotikus stressztényezők a kukoricatermesztésben	9
2.3. Biotikus stressztényezők a kukoricatermesztésben	12
2.4. A kukorica tápanyagellátása	14
2.4.1. A nitrogén utánpótlás jelentősége	16
2.4.2. A kukorica lombtrágyázása	17
2.5. Nitrogén veszteségek a talajban	18
2.5.1. Nitrát kimosódás	19
2.6. Nitrifikációs inhibitorok a mezőgazdaságban	20
2.6.1. A nitrapyrin hatásmechanizmusa	22
2.6.2. A nitrapyrin alkalmazási stratégiai kukoricában	22
2.6.3. A nitrapyrin hatékonyságát befolyásoló tényezők	23
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	27
3.1. A szabadföldi kísérletek beállítása	27
3.2. A kísérleti évek klimatikus jellemzése	30
3.3. A használt nitrapyrin készítmény és kijuttatása	33
3.4. A használt lombtrágya készítmények és kijuttatásuk	34
3.5. A talaj nitráttartalmának meghatározása	35
3.6. A relatív klorofilltartalom meghatározása	35
3.7. A gyökértömeg meghatározása	36
3.8. A szárvastagság meghatározása	37
3.9. A termés mennyiségi és beltartalmi paramétereinek meghatározása	38
3.10. A kukorica mesterséges fertőzése	38
3.11. A levélszövetek fiziológiai vizsgálata	39
3.11.1. Elemtartalom meghatározás	39
3.11.2. A fotoszintetikus pigmentek mennyiségi meghatározása	40
3.11.3. Szuperoxid-dizmutáz aktivitás meghatározása	40
3.11.4. A prolin tartalom meghatározása	40
3.11.5. A malondialdehid tartalom meghatározása	41

3.12. A talajinkubációs kísérlet leírása	41
3.13. Statisztikai vizsgálatok	42
4. EREDMÉNYEK	43
4.1. A talaj nitrát-tartalmának mérési eredményei 2019-ben	43
4.2. A talaj nitrát-tartalmának mérési eredményei 2020-ban	44
4.3. A talaj nitrát-tartalmának mérési eredményei 2021-ben	46
4.4. A relatív klorofill tartalom mérési eredményei a kísérleti években	47
4.5. A gyökértömeg és szárvastagság mérési eredményei a kísérleti években	48
4.6. A termés mennyiségi és beltartalmi paramétereinek mérési eredményei a kísérleti években	49
4.7. A mesterséges fertőzés eredményei	52
4.8. A kukoricalevelek elemtartalmának eredményei a kísérleti években	54
4.9. A fotoszintetikus pigment tartalom, a szuperoxid-dizmutáz aktivitás, a prolin -és malondialdehid tartalom eredményei	57
4.10. A nitrapyrin és a talajhőmérséklet-változás összefüggésének vizsgálata	60
4.11. A nitrapyrin kijuttatásának időzítésére irányuló szabadföldi vizsgálat	63
5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK	66
6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	70
7. GYAKORLATBAN ALKALMAZHATÓ EREDMÉNYEK	72
8. ÖSSZEFOGLALÁS	74
9. SUMMARY	80
10. FELHASZNÁLT IRODALOM	85
11. MELLÉKLETEK	105
12. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN	108
13. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	109
14. NYILATKOZATOK	113

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

A globális klímaváltozás következtében egyre nagyobb figyelem irányul a növények stressztűrését vizsgáló kutatásokra. A szántóföldi növények a szélsőséges időjárási körülményeknek való fokozottabb kitettségük miatt az általános kondíció javítását célzó vizsgálatok között nagy hangsúlyt kapnak a tápanyagellátással, valamint a kijuttatott tápanyagok hasznosításának növelésével kapcsolatos kutatások, ugyanis a növények megfelelő kondícióját elsősorban optimális és kielégítő tápanyagutánpótlással tudjuk biztosítani és javítani (du Jardin, 2015; Elias és mtsai., 2019; Kundu és mtsai. 2022).

A lombtrágyázás a növények kondícióját javító, a tápanyagellátást kiegészítő technológia, melyet eleinte a kertészeti kultúrákban, hiánybetegségek kezelése céljából alkalmaztak (Fernández és Eichert, 2009), azonban a termések növelése iránti egyre nagyobb igény, a hidrometeorológiai tényezők szélsősége, a hőstressz, a talajok kedvezőtlen adottságai és csekély mikroelem tartalma következtében napjainkban a szántóföldi növények körében való használata is elterjedt az általános kondíció megőrzése, javítása céljából (Brankov et al., 2020). Lombtrágya kezelést követő vizsgálatok eredményei nem csak a hiánybetegségek rövid időn belüli gyógyulását, de a növényre gyakorolt stressz hatásának csökkenését is igazolták (Fernández és Eichert, 2009), ugyanis a lombkezelés olyan alapvető fiziológiai folyamatokra is pozitívan hathat, mint a fotoszintézis és légzés (Fageira et al., 2009).

A növények fejlődésében meghatározó szereppel bíró nitrogén (N) jelentőségéről megannyi szakirodalom született a közelmúltban (Búzás, 1983; Jia és von Wirén, 2020; Plett et al., 2020; Folina et al., 2021; Louarn et al., 2021). Habár a talaj szerves N tartalma rendszerint elegendő, a növények számára közvetlenül hasznosítható, szerves N-formák (ammóniumion, nitrácion) mennyisége elenyésző, illetve elérhetőségük a talajban viszonylag rövid időn belül, jelentős mértékben változhat (Cameron and Haynes, 1986). Éppen ezért a növények számára felvehető N-formákról gondoskodnunk kell szerves- vagy műtrágyázás pótlásán keresztül (Rodgers, 2008). A N műtrágyák szerepe ma már alapvető, alkalmazásuk a növénytermesztésben régtől fogva bevett rendszeres agrotechnikai gyakorlat szerte a világon (Bocz, 1976, Berzsenyi, 2009; Tao et al, 2018), azonban számos kutatás hívta fel arra a figyelmet, hogy a különféle N eredetű veszteségek következtében a N műtrágyák hasznosulása nem kielégítő (Omara et al., 2019, Dimpka et al., 2020).

A talajban lévő ásványi N csökkenéséhez leginkább az ammónia párolgása, a denitrifikáció, a nitrátionok kimosódása, illetve az erózió folyamatai járulnak hozzá (Búzás, 1983, Cantarella, 2007; Wang et al., 2020; Xu et al., 2020). Ahogy azt már korábbi vizsgálatok alapján megállapították, a N veszteségek jelentős része a nitrátionok kimosódásának következménye (Cameron et al., 2013; Zhang et al., 2017), amely azon túl, hogy esetenként hirtelen, nagy mennyiségű N veszteséget eredményez a talajban, a felszín alatti vizek szennyezésével környezeti és humánegészségügyi problémákhoz is vezet (Ju et al., 2006; Mandic et al., 2015; Zhou et al., 2016; Huang et al., 2017; Dimpka et al., 2020). A kukorica N trágyázása gyakran megosztva, két-, illetve több részletben történik, amely a N veszteség csökkentése és a növény tápanyagfelvétel dinamikájának szempontjából is kedvezőbb (Timmons és Cruse, 1990). Kukoricában a N kijuttatásának optimális időzítésére irányuló vizsgálatokat széles körben végeztek a termésmennyiség vonatkozásában, azonban eltérő eredmények születtek. Míg Davies és munkatársai (2020) az osztott N kijuttatás termésnövelő hatásáról számoltak be, addig mások (Sawyer et al., 2016; Adeyemi et al., 2020) hangsúlyozták, hogy az osztott kezelés hatékonysága nem minden talajon és évszázadban garantált, ugyanis a tenyészidőszakon belül kijuttatott N önmagában nem növeli a hozamot, hacsak a talaj N-ben szegényes és erre a növény reagálni tud, mindemellett a fejtrágyázás többlet műveleti költséggel is jár (Tóth, 2002). A fenti okokból kifolyólag az elképzelés, hogy a N trágyázás hatékonyságát szükséges tovább növelni, nem céltalan, ugyanis a klímaváltozás okozta magasabb napi hőmérséklet, a gyakoribb aszályok, a ritkuló, de intenzívebb csapadékok mind olyan kedvezőtlen időjárási körülmények, amelyek még nagyobb N veszteséghez vezetnek (Congreves et al., 2016). A N veszteségek csökkentésére irányuló törekvések éppen ezért mindinkább sürgető feladat a mezőgazdaság számára.

Az inhibitorok, azaz a különféle gátlást, lassítást előidéző anyagok alkalmazása a mezőgazdaságban koránt sem számít újszerű technológiának. A N veszteség problémájára megoldást ígérnek a nitrifikációs inhibitorok, melyek az ammónia-oxidáló baktériumok nitrifikációjának lassításával késleltetik az ammóniumionok nitrit, majd nitrátionokká történő átalakulását, így csökkentik a nitrátion talajvíz irányába történő kimosódását, ezáltal pedig növelik a N műtrágyázás hatékonyságát (Futó et al., 2016; Zhong-Qing et al., 2020). A nitrifikációs inhibitorok közül a nitrapyrin az elmúlt 40 évben Amerikában és Kínában a leginkább alkalmazott hatóanyag (Huber et al. 1982; Azhar et al., 1989; Keerthisinghe et al., 1993), melynek termésnövelő, a N hasznosítását növelő és környezetvédelmi hatásairól megannyi szakirodalom íródott (Papp, 2014; Gilsanz et al.,

2016; Thapa et al., 2016; Liu et al., 2017). Ezzel ellentétben hazánkban a nitrapyrin csak a közelmúltban vált elérhetővé, így az alkalmazásával kapcsolatos tapasztalatok, szakirodalmak és kutatások mennyisége korlátozott.

A várható klimatikus tendenciák alapján a globális éghajlatváltozás hatására a növénytermesztésben a legnagyobb nehézséget a talajok szegényes tápanyag-szolgáltató képessége, illetve a mobilis tápelemek jelentős kimosódása révén a tápanyagok hatékony felvétele, hasznosítása okozza, ezzel a növények hiánybetegségeit és kondícióromlását eredményezve (Nagy et al., 2011). Így, a N hasznosítást növelő nitrapyrin, valamint az egyéb tápelemek hasznosítását segítő lombtrágyás kezelések hatásainak vizsgálata napjainkban meghatározó alapját képezik az agrárkutatásoknak. A kukorica sokirányú hasznosíthatóságának köszönhetően termesztése nem csak Magyarországon, hanem világviszonylatban is meghatározó gazdasági jelentőséggel bír (Ranum et al., 2014), így a kukoricában végzett vizsgálatok eredményei rendkívül jól hasznosíthatóak.

Kutatómunkámhoz célul tűztem ki a nitrapyrin, illetve lombtrágya kezelések hatásainak tanulmányozását a kukorica fiziológiai, illetve a termés mennyiségi és beltartalmi paramétereinek vizsgálatain keresztül. Mivel a nitrapyrin hazai alkalmazásával kapcsolatos eredményeket bemutató átfogó, tudományos kutatás még nem született, illetve a jövőben egyre indokoltabb lesz a lombtrágya kezelések általános mezőgazdasági gyakorlatba való bevonása, kutatómunkám ezen jövőbeni stratégiákban rejlő potenciál alaposabb megismerésére szolgálhat.

*Kutatómunkám célkitűzései között szerepelt a nitrapyrin hatóanyagtartalmú nitrifikációs inhibitor hazai területeken történő alkalmazása és növényfiziológiai hatásainak vizsgálata. A nitrapyrin hatását főleg olyan növényfiziológiai paraméterek megfigyelésén keresztül követtem nyomon, melyek összefüggést mutatnak a nitrogénellátottsággal, így többek között vizsgáltam a kukorica relatív klorofill tartalmát, a levélszövetek nitrogén tartalmát, a biomassza gyarapodás mértékét, a csőhossz és csővastagság alakulását és a termés beltartalmi jellemzőit. Célkitűzésem volt továbbá a nitrapyrin-kezelés optimális időzítésének (vetés előtt, illetve vetés után) meghatározása, valamint a nitrapyrin és lombtrágya kezelések együttes hatásainak vizsgálata a kukorica abiotikus stresszválaszainak fiziológiai jellemzésén és az általános fiziológiai állapotával összefüggő paraméterek vizsgálatán keresztül. Mindezeket túl célkitűzésem volt a kukoricát támadó két kórokozó, az *Aspergillus flavus* és a *Fusarium verticillioides* gombákkal szembeni ellenállóképesség megfigyelése a nitrapyrin és lombtrágya kezelések függvényében.*

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A növényi stressz

A növények helyhez kötöttségéből adódóan számos kedvezőtlen környezeti hatásnak vannak kitéve, amely egy stresszelt élettani állapotot eredményez. A stresszt, mint fogalmat először Selye János, endokrinológus alkalmazta az élő szervezetek élettani válaszreakciók leírására, a stresszor fogalmát pedig a környezeti hatásokra vonatkozóan írta le (Selye, 1936). Szigeti (1998) az élő szervezetekre gyakorolt stresszorokat több osztályba sorolta: abiotikus (élettelen környezeti tényezők), biotikus (kártévők, kórokozók, gyomnövények), antropogén (emberi tevékenységhez kapcsolódó) és természetes környezeti eredetű. A stressz leírásáról leginkább szintén Szigeti (1998) megfogalmazása terjedt el, miszerint a stressz az a fiziológiai állapot, amelyben a növények növekedése, fejlődése és szaporodása a fokozott környezeti terhelés miatt a genomban meghatározott lehetőségek alatt marad. A stressz tehát egy túlterheléses állapot, amelyben a növény a kezdeti destabilizációját követően a normalizálódási szakaszon át az ellenállóság fokozódását eredményezi, azonban a tűréshatár túllépésekor tartós károsodás, pusztulás következik be (Larcher, 1987).

A növények stresszreakciójaként létrejövő oxidatív stressz általános jelenség, mely során a reaktív oxigén formák (az oxigénnel reakcióképesebb oxigénfajták; ROS) szaporodnak fel és károsítanak olyan létfontosságú, a sejt normális működése szempontjából nélkülözhetetlen makromolekulákat, mint a lipidek, fehérjék és nukleinsavak (Eltner, 1982; Yasar et al., 2006; Mittler, 2002). Növényfiziológiai szempontból a lipid peroxidáció során felszabaduló toxikus bomlástermékek — elsősorban malondialdehid (MDA) — és a sejtmembrán károsodás okozta sejtkárosodás a legmeghatározóbb (Farmer és Mueller, 2013). A stressz hatására túlzott mértékben felszaporodott reaktív oxigénformák ráadásul kulcsfontosságú fotoszintetikus anyagokkal is reagálhatnak, amelyek a klorofill degradációját eredményezik (Noein és Soleymani, 2021). Az ilyen kedvezőtlen körülmények enyhítésére és kivédésére a növényekben egy komplex antioxidáns rendszer épült ki, amely enzimatis aktivitás analitikus mérésével lehetővé teszi a környezeti változások hatásainak nyomon követését (Kusvuran et al., 2016). A növényi sejtekben felhalmozódott reaktív oxigénformák elleni első védelmi vonalat a leghatékonyabb intracelluláris antioxidánsok, a fém-tartalmú szuperoxid-dizmutáz (SOD) enzimek jelentik, amelyek a szuperoxid gyököket

semlegesítik hidrogén-peroxiddá, ezzel mérsékelve a stressz káros hatásait (Bueno et al., 1995; Alscher, 2002; Mittler, 2002; Ahmadi et al., 2010; Goud és Kachole, 2012). A prolin, mint stressz aminosav felhalmozódása a különböző stresszhatásokra adott válaszok során szintén széles körben ismert jelenség. A prolin növényekben betöltött szerepéről azóta már számos kutatás igazolta, hogy elsősorban olyan kedvezőtlen körülmények, mint a szárazság és magas sótartalom (ozmotikus stressz) hatására szintetizálódik (Claussen et al., 2006). Ezen stressz indikátorok analitikus mérése segíti a növényeket ért abiotikus stressz hatásokra adott válaszreakció alaposabb megértését, illetve a különböző technológiai megoldások integrálásán keresztül lehetőséget nyújt a növények bizonyos stresszorokkal szembeni ellenállóság növeléséhez. A globális klímaváltozás hatására az abiotikus tényezők (pl. hőmérséklet, csapadék, napsugárzás) szélsőségesse válása miatt a növényeket károsító hatások, valamint az ezek reakciójaként létrejövő növényi stresszválaszok vizsgálata napjainkban az egyik leginkább kutatott terület, melyet a világszerte egyre növekvő számú publikációk igazolnak (Southworth et al., 2000; Li et al., 2011; Cairns et al., 2013; Xu et al., 2016; Arora et al., 2019;).

2.2. Jelentősebb abiotikus stressztényezők a kukoricatermesztésben

Hazánk vetésterületeinek legnagyobb részét a kukorica foglalja el, szerepe a hazai mezőgazdaságban meghatározó (Nagy, 2021). Nagy termelési volumene miatt felhasználása sokrétű, elsősorban takarmánynövény, azonban az élelmiszer-, energia- és fermentációs ipar is széles körben hasznosítja (Ranum et al., 2014). A hazai kukoricatermesztés intenzív fejlődése az 1980-as években indult a növekvő műtrágyázás, a beltenyésztéses hibridek, a korszerű növényvédelem és a műszaki gépesítési feltételek elterjedésével párhuzamosan, amelyek több, mint kétszeresére növelték a hazai termésátlagokat (Bocz és Nagy, 2003). Az elmúlt tíz évben azonban erőteljes ingadozás tapasztalható a hektáronkénti terméshozamban, amelynek hátterében elsősorban a vegetációs időszak szélsőséges, kedvezőtlen időjárási körülményei állnak (KSH, 2019). Mivel a kukoricatermesztés sikerességét az éghajlat erősen meghatározza (Pepó et al., 2006), fontos a kukorica fejlődését kedvezőtlenül befolyásoló időjárási tényezők hatásainak, és az ezekre adott növényi válaszreakció mélyebb tanulmányozása.

Az éghajlatváltozás előrejelzéseit ismerve az emelkedő hőmérséklet okozta problémák megjelenésére kell számítanunk. A hőstressz szélsőségesen meleg periódusok eredményeként jön létre, amelyek káros hatásai a termések csökkenését és minőségi

romlását eredményezik (Kothari és Lachowiec, 2021). A kukorica reprodukív fázisában, a virágzás idejében kialakuló hőstressz, illetve, ha ehhez alacsony páratartalom is párosul, különösen veszélyes a termésmennyiség szempontjából (Wheeler et al., 2000), ugyanis a 35°C feletti léghőmérséklet jelentősen rontja a pollen, mint a legszárazabb növényi rész életképességét (Fonseca és Westage, 2005; Jones et al., 1984).

Az abiotikus stresszorok közül meghatározó faktor a csapadék mennyisége is. A kukoricatermesztés legnagyobb kockázati meteorológiai tényező a vízhiány, illetve a kukorica kiemelkedően érzékeny a vízellátás alakulására is (Pepó et al., 2006). Csajbók és mtsai. (2014) hangsúlyozták, hogy a száraz körülmények között a kukorica rendkívül hatékonyan hasznosítja a vizet, míg a talaj kedvező vízellátottsága csökkentette a vízhasznosítás hatékonyságát. A szélsőséges hőmérsékletingadozás és a rapszodikussá vált csapadékhozam miatt a talajművelésben elsődleges szemponttá vált a vízmegőrzés, amelynek megvalósítási lehetőségeit Rátonyi és mtsai. (2018) is széleskörben vizsgálták hazánkban. Megerősítették, hogy a talajművelés redukálása már önmagában kedvező a talajnedvesség megőrzése szempontjából, illetve a szántásos talajművelés elhagyása még inkább segít a talajok kiszáradásának megelőzésében. A csapadékhiány leginkább a két kritikus hónapban, júliusban és augusztusban okozhat problémát, amikor a kukorica nagy termőképességét leginkább képes realizálni (Bocz, 1992). A magyarországi csapadékeloszlást tekintve a júliusi és augusztusi hónapok átlagos csapadék mennyisége országosan mindössze 50-90 mm közötti (OMSZ), amely messze nem éri el a kukorica vízszükségletét (100-100 mm) (Bocz, 1992), ráadásul Magyarországon ez az év legmelegebb időszaka, amikor a legnagyobb a potenciális evapotranszpiráció és a talaj nedvességtartalma a kritikus szint alá csökken (Nagy, 2021). Ennél fogva hazánkban az aszály, mint a kukorica legjelentősebb terméslimitáló tényezője tekinthető a legnagyobb problémának és jelent kihívást a kukoricatermesztőknek. Nem véletlen, hogy a termesztett hibridekkel szemben támasztott elsőszámú követelmény a szárazságtűrés, ugyanis a szárazság a növényben kedvezőtlen fiziológiai változásokat okoz. Kutasy és Csajbók (2014) vízstressz esetén a kukorica csökkent sztóma konduktanciája következtében az asszimilációs paraméterek kedvezőtlen alakulását állapították meg. A víz hiánya a növények talajon keresztüli tápelemfelvételét is jelentősen hátráltatja. Köztudott, hogy a tápanyagfelvétel előfeltétele a nedvesség, hiszen a tápelemeket a növények csakis oldott formában veszik fel a talajból, éppen ezért a tápelem hiányok elsősorban száraz évjáratokban észlelhetők (Elek és Kádár, 1980).

A már felsorolt időjárási jelenségeken túl egyre több a súlyos pusztításokat okozó jégkár is, melyek eseteként jelentős gazdasági károkat okoznak a kukorica terméskiesésével. A jégverés több módon is negatívan befolyásolja a kukorica élettani folyamatait. Elsőként, a levéllemezek szaggatásával, olykor elvesztésével a fotoszintetikus terület jelentős csökkenésével a termésmennyiség meglehetősen alulmarad a vártnál (Dungan, 1934; Jenkins, 1941; Hanway, 1969; Klein és Shapiro, 2011). A vegetáció során a különböző időszakokban fellépő jégverések alkalmával a fejlődő kukoricák erőteljes károkat szenvedhetnek el. A növények kezdeti fejlődésében fellépő jégverés a kis növényeket gyakran a talajfelszínre veri, így a növényállomány ritkulásával a további növényvédelmi problémák fokozott megjelenése veszélyezteti a kukorica egészségét. Fejlettebb állományok esetében a jégverés a kukorica szárát is felsérti, amely az asszimilátumok mozgását akadályozza (Dungan, 1934), illetve a gyengült szár az erősebb szellőkések következtében el is törhet. A jég és szél által okozott sebzések utat nyitnak a károsítók és patogén kórokozók fertőzésének, melyek a gyengült állományban gazdasági jelentőségű károkat is okozhatnak (Robertson et al., 2011). A jégverés a megtermékenyítési folyamatban is komoly zavarokat indukálhat a címer és a bajuszszálak tönkretételén keresztül, míg a későbbiekben a fellépő jégviharok a kifejlett szemek minőségében tesz kárt, súlyos esetekben pedig teljes csővesztést is okozhat (Dungan, 1934).

A tápanyagellátás és a kedvezőtlen időjárási körülményekkel szembeni tolerancia kapcsolatát széles körben tanulmányozták. Az éghajlatváltozás eredményeként fellépő gyakori aszályok komoly stresszt indukálnak a növényekben, azonban a kapcsolódó kutatások egyértelműen bizonyítják, hogy szakszerű tápanyagellátással a növényeinket kedvezőtlen klimatikus adottságok mellett is van esélyünk eredményesen termesztetni. Kádár (2016), Debreczeni (1973), Bergman (1979), Cserhádi és Kosutány (1887), Szalóki (1988), Ruzsányi (1975), Kádár (1982), Bocz (1985) kutatásaiban mind egyezett az a vélemény, hogy a szárazság egy bizonyos szintig még ellensúlyozható is egy jól kivitelezett táplálással. Ezt Csajbók és mtsai. (2014) kukoricában végzett vizsgálatai is igazolják, miszerint megfelelő tápanyagellátással javult a kukorica vízhasznosítása. Az abiotikus stresszhatásokat vizsgálva egyre több kutatás igazolja, hogy a növények fejlődését a tápanyaghiány jelentősen korlátozza (Noreen et al., 2018). Így, a hiánybetegségek kezelésének, hatásainak tanulmányozását célzó vizsgálatokra nagyobb figyelmet szükséges fordítani, mivel a megfelelő, kiegyensúlyozott tápanyagellátás

hatékonyan támogatja a kukorica toleranciáját a káros abiotikus stresszhatásokkal szemben (Lawlor et al., 2004).

2.3. Biotikus stressztényezők a kukoricatermesztésben

A globális mértékű klímaváltozás a magyarországi kukoricatermesztés helyzetét is számos kihívás elé állítja, hiszen a jelenség következményeként olyan kártevők, kórokozók, gyomnövények megjelenésére, illetve fokozott károsítására kell számítani, amelyek a hatékony, időben történő védekezés elmaradása esetében rövid időn belül tizedelik a kukoricatermés mennyiségét. A kukorica legnagyobb odafigyelést igénylő növényvédelmi problémái az éghajlatváltozás következményeként jelentkeztek. Magyarországon a klímaváltozás hatásai az amerikai kukoricabogár (*Diabrotica virgifera virgifera*) megjelenésével már 1995-ben tapasztalható volt, amely alapjaiban számolta fel az addig monokultúrára épült hazai kukoricatermesztést (Keszthelyi, 2018). A mediterrán régiókból származó, korábban a Kárpát-medencében áttelelni képtelen gyapottokbagolylepke (*Helivocarpa armigera*) első hazai, jelentős kártételéről 1993-ban számoltak be (Keszthelyi et al., 2013). E két faj megjelenése és agresszív kártétele a kétezres években a két legsúlyosabb növényvédelmi probléma volt. A rendszertelen esőzések, hosszabb csapadékmentes időszakok a gyomszabályozásban is változásokat eredményeztek. A csapadékhiány következtében a preemergens gyomirtási technológia ma már egyre visszaszorulóban van, amelyet a korai posztemergens kezelések váltanak fel. A kukorica gyomokkal szembeni kompetíciós képessége az elegendő csapadék hiányában gyengült, így napjainkban az agresszív egyéves kakaslábfű (*Echinochloa crus-galli*), a vadvadkő (*Panicum miliaceum*), a selyemmályva (*Abutilon theophrasti*), valamint az évelő fenyércirok (*Sorghum halepense*), tarackbúza (*Elymus repens*), mezei acat (*Cirsium arvense*), aprószulák (*Convolvulus arvensis*) gyomszabályozása igényel nagyobb odafigyelést. A kórtani viszonyokat elemezve szintén nagyobb figyelem terelődött az éghajlatváltozás következményeként egyre nagyobb károsításokat végző kukoricapatogén kórokozókra. Habár a kukorica golyvásüszög (*Ustilago maydis*) fertőzés elsősorban a rovarkártevők tevékenységének révén, sebzések útján jön létre, a fertőzések súlyossága egyértelmű összefüggést mutat az extrém meleg periódusok fellépésével (Keszthelyi, 2018).

A kukorica egészsége kapcsán azonban külön figyelmet érdemelnek a mikotoxinokat termelő patogén gombák. A *Fusarium* fajok (pl. *Fusarium verticillioides*, *Fusarium*

graminearum, *Fusarium culmorum*), illetve az *Aspergillus* penészgombák (pl. *Aspergillus flavus*) fertőzése jelentős gazdasági veszteséget okoznak, hiszen a gombák toxintermelése miatt a kukorica takarmányozási és étkezési célra történő felhasználása egyaránt tilos (Garcia et al., 2012; Battilani et al., 2016). A mikotoxinokkal szennyezett szemestermény állati takarmányozásra, illetve humántáplálkozásra kizárólag az Európai Unió által megszabott határértékek betartásával engedélyezett. A kukoricafuzáriózis nemzetközi szinten az egyik legjelentősebb kórtani probléma (Fischl, 1995), amely a fuzárium penészgombák által termelt toxinok (DON, zearalenon, fumonizin, stb.) szervezetbe kerülése súlyos állat- és humánegészségügyi kockázatot jelent (Keszthelyi, 2018). A *F. verticillioides* gomba okozta csőpenészedés és szárrothadás, valamint a gomba által termelt fumonizinek (a leggyakoribbak és toxikológiai szempontból a legfontosabbak: B₁, B₂, F₃) egészségkárosító hatása már régóta közismert a kukorica növényvédelmében és az egyik legveszélyesebb szántóföldi kórokozónak számít (Schulthess et al., 2002; Rosa Junior et al., 2019). Az utóbbi időben fokozott figyelem irányult a leginkább karcinogén fumonizin B₁ mikotoxint is termelő gomba fertőzésére, ugyanis klímaváltozás következményeként az időjárás melegedése és a száraz periódusok gyakorisága a fertőzés térnyerésének kedvez (Gelderblom et al., 1988; Marasas et al., 2001). A *F. verticillioides* fertőzés leginkább a virágzáskörül fellépő, szárazabb időjárási körülmények között lép fel, szemben a kukoricát szintén gyakran károsító, mérsékelt hőmérsékletű, nedves körülményeket kedvelő *F. graminearum* patogén gombával. Számos kutatás igazolja, hogy a fertőzés létrejöttéhez leginkább a kukoricamoly és a gyapottok-bagolylepke hernyókártételei (Alma et al., 2005), illetve a sebzett növényi részbe felferődő vízcseppek járulnak hozzá a fertőző konídiumok terjesztésével (Munkvold és Desjardins, 1997). A fertőzött kukoricacsövek egyértelmű tünettel, a cső csúcsi részén kialakuló fehéres-rózsaszínes penészgyep megjelenésével jelzi a penészgomba jelenlétét (Wang et al., 2014).

A klímaváltozás hatásait jól tükrözi, hogy a korábban csak raktári kórokozóként számontartott *Aspergillus flavus*, a kukorica aszpergillusos csőrothadásáért felelős gomba egyre súlyosabb növényvédelmi problémákat okoz, ugyanis a penészgomba kifejezetten a száraz, aszályra jellemző klimatikus feltételek mellett képes szaporodni (Abbas et al., 2006, 2012; Guo et al., 2016; Maisello et al., 2019). A kórokozó által termelt aflatoxinok a legfontosabb másodlagos metabolitok, melyek közül az egészségre leginkább káros az aflatoxin B₁ (Henry et al., 1999; Marchese et al., 2018). A fertőzés leginkább rovarsebzések útján (kukoricamoly, kukoricabogár, gyapottok-bagolylepke)

jön létre, kórképe pedig könnyen felismerhető: a fertőzött szemek felületén olívaöld penészgyep képződik (Thathana et al., 2017).

2.4. A kukorica tápanyagellátása

A kukorica gyors növekedésű, intenzív tápanyagellátást igényel, nitrogén (N)- és kálium (K) szükséglete magas, foszfor (P) igénye közepes. Legnagyobb mennyiségben a N-t igényli. 1 tonna terméshez megközelítőleg 25 kg N hatóanyag szükséges (Széles, 2021). A N-trágyázás nagy odafigyelést igényel, ugyanis a termés mennyiségét leginkább a N ellátás határozza meg (Bocz, 1976). A kukorica N felvétele a kezdeti fejlődés időszakában még lassú, azonban intenzív felvétel indul meg a kukorica 6-7 leveles állapotában és a szemtelítődéskor (Debreczeniné és Szlovák, 1985). A N optimális mennyiségű biztosítása szinergizmus útján segíti más mikrotápelemek felvételét (Fageria, 2001), túlzott mennyiségű kijuttatása azonban számos növényegészségügyi és talajszennyezési kockázattal jár. A szükségesnél nagyobb N termésdepressziót, tápelemfelvételi zavarokat (Pusztai, 1980), a laza szövetszerkezet következtében megdőlést, növényvédelmi problémákat és a talajban káros nitrátfelhalmozódást eredményez (Széles, 2021). A rendszeres N-trágyázás ellenére a gyakorlatban sűrűn találkozhatunk a N hiánytüneteivel. Mivel a tápelem elsődleges szerepe a növény fejlődésében, növekedésében van, így hiányakor a tünetek már korán, könnyen felismerhetőkké válnak. A gátolt klorofill szintézis következtében a növények sárgászöld, majd sárgás elszíneződését eredményezi. Mivel a N a növényben mobilis, hiányát először mindig az idősebb, alsó levelek sárgulása, súlyos esetben teljes elhalása jelzi (Bergman, 1979). A kielégítetlen N ellátás visszamaradott fejlődést és lassabb szárazanyag felhalmozást okoz (Debreczeniné és Szlovák, 1985).

A kukorica P-igénye közepes, 1 tonna szemterméshez 13 kg P_2O_5 hatóanyag szükséges (Széles, 2021). A P felvétele a kukorica 3-6 leveles állapotában a legintenzívebb (Tisdale és Nelson, 1966). A többi tápelemmel ellentétben szinte az összes biokémiai folyamatban kulcsfontosságú szereppel bír (Füleky és Sárdi, 2014; Széles, 2021). A kijuttatott P kedvezően befolyásolja a szárazanyagtermelést és a gyökérképződést (Tisdale és Nelson, 1966), de fontos szerepe van a betegségellenállóság kialakításában és a termésképzésben is (Búzás, 1983). P-hiánnyal viszonylag ritkán találkozunk kukoricában, hiánytünete leggyakrabban a kezdeti fejlődés során, hűvös és

száraz tavaszokon a gyenge P felvétel miatt jelentkezik a levelek antociánosodásával, amely az időjárás melegedésével megszűnik (Elek és Kádár, 1980).

A K-igényes kukorica 1 tonna szemterméshez 22 kg K_2O hatóanyag szükséges (Széles, 2021), felvétele a címerhányáskor maximalizálódik (Menyhért, 1985). A K növényélettanban betöltött szerepe rendkívül sokoldalú. Részt vesz a szénhidrátok képződésében és elszállításában, a generatív szervek fejlődésében, a fehérjeszintézisben, a fotoszintézis aktivizálásában, továbbá növeli a sejtfalak áteresztőképességét. A vízháztartás-, légzőnyílás-működés szabályozásán keresztül hatékonyan enyhíti a szárazság okozta stresszt (Búzás, 1983; Loch és Nosticzius, 1983). Előremutató hiányjele lehet a száraz, meleg időjárási körülmények között a növények idő előtti kókadása, lankadása, a levelek visszahajlása, csüngése, turgorvesztése. Tipikus hiánytünet az idős levélszélek perzseltsége, mely sárgulással, barnulással jelentkezik (Bergman, 1979).

A további tápelemek sorából a sikeres kukoricatermesztéshez a kalcium (Ca), magnézium (Mg), cink (Zn) és réz (Cu) utánpótlása is hozzájárul. Ezek közül a Zn hiányára a kukorica fokozott érzékenységgel reagál, súlyos hiányállapot esetében jelentős terméseszkökenést okoz (Gupta et al., 2008). A Zn elsődleges szerepe a fehérje-anyagcserében, illetve az auxin termelésében van, így hiányállapotkor a kukorica növekedésgátlása figyelhető meg. Fiatal levelei kisebbek, keskenyebbek maradnak, melyek általános klorózisa is megfigyelhető, azonban a középér és az oldalerek zöld színűek maradnak (Nagy és Kovács, 2005). Zn hiányt okozhat a magas P-ellátottság következtében kialakuló P és Zn közti ionantagonizmus is (Kádár, 2016).

A növények kondícióját, így a biotikus és abiotikus stresszhatásokkal szembeni toleranciát nagyban meghatározó tápanyagellátás szerepét számos korábbi kutatás alátámasztotta (Mengel és Kirkby, 2004; Kumar et al., 2018). Habár egyre nagyobb számú publikáció jelenik meg a betegségellenállás és a megfelelő tápanyagellátás szoros kapcsolatáról, a növényeket támadó betegségek ellen önmagában tápanyag utánpótlással természetesen nem lehet védekezni, azonban az integrált növényvédelem szerves részét képezi a betegségek prevenciójában és kezelésében is (Reuveni és Reuveni, 1998; Singh és Gohain, 2017).

2.4.1.A nitrogén utánpótlás jelentősége

A kukorica N szükséglete minden más ásványi elem közül a legmagasabb (Menyhért, 1985; Forde és Clarkson, 1999; Pepó et al., 2000; Pepó, 2001; Pakurár et al., 2004; Nagy és Sárvári, 2005), termésnövelő hatásuk már régóta ismert. A hozamnövekedés kb. 30-50%-a a kijuttatott N hatásának tulajdonítható, így agrotechnikai szerepe meghatározó (Tao et al, 2018). A talaj szerves N tartalma 0,02-0,4% közötti, amelynek jelentős része (95-98%), a növények által nem hasznosítható, szerves kötésben van jelen. A N az ásványosodás, a talajban lévő mikroszervezetek által végzett folyamat révén során mobilizálódik, amely rendkívül lényeges a növények tápanyagellátása szempontjából, hiszen ennek során a szerves kötésben lévő N szerves, felvehető, ammónium ion (NH_4^+) és nitrátion (NO_3^-) formákká alakul (Loch, 1999). Talán kevésbé ismert, de ásványi N formák hiányában a növények az aminosavak felvételére is képesek a talajból (Näsholm et al., 2009). Ezek lényegében a szerves nitrogén bomlásából származó, felszabaduló intermedierek, amelyek további degradációjával ammónium keletkezik. A növények által felvehető, a talajban lévő aminosavak tudományos felfedezése csak a múlt század elejére tehető (Hutchinson és Miller, 1911), így a N felvételben betöltött aminosav pontos szerepéről, funkciójáról még rendelkezünk kielégítő információval, ezért ezen kérdések tisztázására napjainkban is intenzíven folynak kutatások.

A N pótlása legtöbbször műtrágyázás útján valósul meg, így közvetlenül a növények számára felvehető, szerves formákat juttatunk a talajba. Mindazonáltal a N folyamatos, nagy adagú kijuttatása környezetterheléssel is jár (pl. talajdegradáció, talajsavanyodás és az üvegházhatású gázok kibocsátása) (Rochette et al. 2008, Zaman et al. 2009, Osman 2013). Az intenzív termesztéstechnológiában a N-műtrágyák kijuttatása osztott kezelést igényel a N veszteség és az ezen keresztül bekövetkező környezetterhelő folyamatok redukálása céljából. A N a természetben állandó körforgásban létezik, amelynek egyes folyamatai a talajt N-ben gazdagítják, míg más folyamatok hatására jelentősen csökkentik azt (Loch, 1999). Így, a kijuttatott N-műtrágyák hatékonysága közel sem teljes. Becslések szerint alig több, mint 53-57%-a képes csak hasznosulni (Syswerda et al, 2012), ezért a veszteségek csökkentésére irányuló törekvés sürgető feladat a mezőgazdaság számára.

2.4.2. *A kukorica lombtrágyázása*

Boussingault, az agrokémia egyik megalapozója behatóan foglalkozott a növények gyökerén kívüli tápanyagfelvétellel. Megállapította, hogy a leveleken keresztül a gyökérzethez hasonlóan ugyanúgy képesek bejutni a tápanyagok (Pecznik, 1976). A két szerv közötti funkciómegosztás nem kizárólagos, hiszen a gyökérsejtek is képesek a széndioxid felvételére, amelyet aztán a növény hasznosít a fotoszintézis során, illetve a levélzet is képes a víz és ásványi anyagok felvételére, amelyek a növény szervezetébe épülnek (Pecznik, 1976; Martinka et al., 2014). A tápanyagok hatékonyabb hasznosítása révén a levéltrágyázás termésnövelő hatása is ismert (Ogbomo és Eghrevba, 2009; Provez et al., 2009; Rerkasem et al., 2015). Mindenekelőtt azonban fontos hangsúlyozni, hogy a növények elsősorban a gyökérzeten keresztül tudják folyamatosan felvenni a növekedésükhöz és fejlődésükhöz szükséges makrotápanyagokat. Kedvezőtlen körülmények fennállásakor előfordulhat, hogy gondoskodnunk kell a levélen keresztüli makroelem utánpótlásról is (Fernández és Eichert, 2009). A lombtrágyázás tehát nem helyettesíti, csak kiegészíti a gyökéren keresztüli tápanyagfelvételt (Ferencz, 1976), így a levéltrágyázás a növények számára nem csak hogy egy biztonságosabb, de energetikailag is kedvezőbb tápanyagutánpótlási technológiát jelent (Fernández és Eichert, 2009).

A rendkívüli aszályok a talajok egyre komolyabb mértékű kiszáradásához vezetnek, ami maga után vonja a tápanyagok gyökéren keresztüli nehézkesebb, energiaigényesebb felvételét. Ráadásul, a legtöbb talajban a nehezen hozzáférhető ásványi anyagok felvételét olyan tényezők korlátozzák, mint a kedvezőtlen pH érték, a kimosódás vagy az erózió (Rengel, 2015), amelyek eredményeként a tápanyaghiány és az így kialakuló hiánybetegség világméretű problémává nőtte ki magát (Fageria et al., 2008). A levélen keresztüli tápanyag utánpótlás melletti érv, hogy a csapadékviszonyoktól kevésbé függ, szemben a talajon keresztüli tápanyagfelvétellel, amikor a tápelemek felvehetőségének előfeltétele a jó oldhatóság, az elegendő víz. A hazai csapadékeloszlási viszonyok gyakran indokolttá teszik a levéltrágyázást, különösen, ha egy növény nagy tápanyagigényű fejlődési szakasza egy szárazabb periódussal esik egybe (Ferencz, 1976).

Kutatások bizonyítják, hogy a levéltrágyázás a talajok szegényes mikroelemtartalmát is jól kompenzálja (Barbosa et al., 2013; Tejada et al., 2018), ugyanis a talajtrágyák hasznosulása számos talajtani tényező (pl. talajhőmérséklet, pH, nedvesség) függvénye (Li et al., 2009a), valamint a tápanyagok elérhetősége a kimosódás és mikrobiális

tevékenységek révén csökken (Lynch és Clair, 2004; Araújo et al., 2015). A levéltrágya készítményeket ezért többnyire mikroelemekkel dúsítják, melyek segítségével a hiányállapot gyorsan és hatékonyan gyógyítható (White és Broadley, 2009; Fernandez és Brown, 2013).

A szántóföldi növények köréből eleinte a nagy levélfelülettel bíró, így burgonya és cukorrépa levéltrágyázása terjedt el, mára azonban szinte minden kultúrnövényben vannak adatok és eredmények a levéltrágyázás alkalmazásáról (Pecznik, 1976). Levéltrágyázásra a kukorica is kiválóan alkalmas akkor, ha már kellő lombfelülettel rendelkezik a levélzetre juttatott tápanyagok hatékony felvételéhez. A lombtrágyák hatásait széles körben vizsgálták kukoricában is. A kezelések termésnövelő és minőségjavító hatását számos kutató igazolta (Barel és Black, 1979; Giskin et al., 1984; Jakab et al., 2016). A Zn hiányára fokozott érzékenységgel reagáló kukorica Zn-tartalmú levéltrágyával történő kezeléseket pozitív hatásait szintén alátámasztották. Ivanov és mtsai. (2019) a Zn-tartalmú levéltrágyázás a termés mennyiségi és beltartalmi paramétereit kedvezően befolyásoló hatásáról számoltak be, míg Ali és mtsai. (2008a), Mousavi (2011), Yosefi és mtsai. (2011) a Zn hatására javuló fotoszintetikus rátát, klorofill szintézist, N- metabolizmust, illetve a biotikus és abiotikus stressz hatásokkal szembeni jobb ellenállást állapítottak meg.

2.5. Nitrogén veszteségek a talajban

A talajban lévő N csökkenésének számos oka lehet, többek között a kimosódás, erózió, gázalakú elillanás, illetve a denitrifikáció. Ismert jelenség a nitrátion kimosódása a talajból, hiszen a nitrátion kémiai sajátosságaiból adódóan jól oldódó sókat képez, így a talajvíz mozgásával könnyedén a talaj mélyebb rétegeibe mosódhat. Ezt a jelenséget okozza az is, hogy a nitrátion negatív töltése miatt nem képes a szintén negatív töltésű talajkolloidok felületén adszorbeálódni. További veszteségek léphetnek fel az ammónia gáz alakban történő elillanásának hatására, különösen olyan esetekben, amikor a karbamid műtrágyákat a talajba történő bedolgozás nélkül juttatják ki. Felmérések alapján a karbamidnak 15-20%-a is képes az elillanásra. Így, karbamid típusú műtrágya kijuttatását követően azt mihamarabb szükséges bedolgozni a talajba a karbamid hidrolíziséből származó ammónium gázok elillanásának mérséklése érdekében. A karbamid párolgása lúgos kémhatású talajokban és magas hőmérséklet esetében a legjelentősebb (Búzás, 1983).

A denitrifikáció a talajban lejátszódó, szintén N veszteséget eredményező folyamat, amely anaerob körülmények között végbemenő nitrát redukciót jelent. A folyamat során az ezért felelős szervezetek a nitrátot először nitritté, majd ammóniává alakítják, melyet követően a N gázok formájában távozik a légkörbe (Búzás, 1983). Míg az asszimilatív denitrifikáció a talajban lévő baktériumok a nitrátredukció során a saját fehérjéit és N-tartalmú szerves anyagaikat építik fel, a disszimilatív denitrifikáció esetében az anaerob baktériumok a nitrátiont fogják hasznosítani elektron akzeptorként, így a folyamat során N gázok (N_2O , NO, N_2) keletkeznek, amelyek a légkörbe távoznak (Fülek és Sárdi, 2014). Az így jelentkező N veszteségen túl a denitrifikáció folyamán képződő nitrogén- és dinitrogén-oxidok (N, N_2O) üvegházhatású gázok lévén hozzájárulnak a globális felmelegedés folyamatához (Futó et al., 2016). Habár a N veszteségének kisebb része származtatható a N_2O emissziójából, a globális felmelegedés problémának előtérbe kerülésével a N_2O kibocsátása még nagyobb figyelmet kapott, hiszen a CO_2 -hoz képest közel 300-szor nagyobb hőtárolási kapacitással bír (Myhre et al., 2013; EPA, 2014). Az antropogén eredetű N_2O kibocsátásához becsülhetően 58%-ban járul hozzá a mezőgazdasági szektor (Solomon et al., 2007), ezért a veszteségek csökkentésére irányuló törekvések meghatározóak mezőgazdaság számára.

A N veszteségének csökkentésére irányuló egyik stratégia, hogy a N-műtrágyákat a növények N-igényes időszakához igazodva kell kijuttatni (Meisinger and Delgado, 2002). Ez azonban igen nagy kihívást jelent, hiszen ezt megannyi tényező befolyásolja. A talaj és N kölcsönhatás komplexitása következtében a talajba juttatott N műtrágya sorsát nehéz nyomon követni a változó klimatikus viszonyok, talajtani adottságok és termesztéstechnológiai feltételek mellett (McLellan et al., 2018).

2.5.1. Nitrát kimosódás

A nitrát-nitrogén ($\text{NO}_3\text{-N}$) a növények számára könnyen felvehető, hasznosítható szervesetlen N forma (Fülek és Sárdi, 2014). Az ion mozgékonyaságából adódóan az erózió, felszíni elfolyások és a kimosódás következtében számottevő veszteséget okozhat a talajban (Németh, 1996). Liziméteres kísérletekben a nitrátion a talaj mélyebb rétegeibe történő kimosódását jól lehet követni, így a pontos mennyiségeket is ezek segítségével lehet megállapítani (Búzás, 1983). Vizsgálatok szerint a N veszteséget legmeghatározóbb részben a nitrátion kimosódása adja (Cameron et al., 2013; Zhang et al., 2017), amely esetenként nem csak komoly N veszteséget idéz elő, hanem hozzájárul a hasznos kationok

(kálium, kalcium, magnézium) kimosódásához is, hiszen a negatív töltésű nitrácion mindig pozitív töltésű kationokhoz kötődik, amelyek mennyisége és felvétele a növények számára csökken (Futó et al., 2016). A nitrácion mobilitását tekintve a kimosódásból adódó veszteség a nagy áteresztőképességű, laza szerkezetű homoktalajokban a legmeghatározóbb (Piccini et al., 2016; Hess et al., 2020). Fontos hangsúlyozni, hogy a veszteséget a túlzott N-trágyázás nem kompenzálja, sőt, jelentősen növeli a nitrát szennyezést (Broadbent és Carlton, 1978). A nagy mennyiségű nitrát mélyebb rétegekbe történő lemosódása súlyosan károsítja az ivóvíz minőségét, így az azt elfogyasztó emberek egészségét is veszélyezteti (Mandic et al., 2015; Zhou et al., 2016). A nitrátszennyezés csökkentése ezen túl amiatt is kívánatos, mert a vízi ökoszisztémák eutrofizációjához is jelentősen hozzájárul (Baron et al., 2013), amelynek problémája világszerte növekszik. A felszín alatti vizek nitrátszennyezésére érzékeny területek hazánk szántóföldjeinek jelentős részét teszik ki, így a trágyakezelést és felhasználást ezen nitrátérzékeny területek esetében hazai jogszabályok korlátozzák (Futó et al., 2016). A mezőgazdasági gyakorlatban külön odafigyelést igényelnek azon kultúrnövények, amelyek N igénye magas. A kukorica N ellátása során az Egyesült Államok nyugati részein 100-200 kg/ha N-hatóanyagot juttatnak ki évente, míg Kínában gyakran ennek két-, illetve háromszorosát is (Vitousek et al., 2009). Egyes vizsgálatok szerint még a N optimális mennyiségének kijuttatása esetében is, a N körülbelül 15-65%-a a nitrát gyökérszónából való kimosódása miatt elvész (Randall és Mulla, 2001; Basso et al., 2016). A fentiekben leírtak alapján tehát a N veszteség csökkentésére irányuló törekvések globális jelentőséggel bírnak.

2.6. Nitrifikációs inhibitorok a mezőgazdaságban

Az inhibitorok, azaz a különféle gátlást, lassítást előidéző anyagok alkalmazása a mezőgazdaságban koránt sem számít újszerű technológiának, melyek alapvető célja a N veszteség mérséklése. Az inhibitorok többsége specifikusan egy-egy folyamatra hatóan járulnak hozzá ahhoz, hogy a N átalakulása, bomlása lassuljon, illetve a stabil, növények számára közvetlenül felvehető N formák elérhetőségét hosszú időn keresztül biztosítsa. Ennek eredményeként a növények intenzív N felvételének időszakában kellő mennyiségben áll rendelkezésre felvehető N forma, így elkerülhetők a hiánybetegségek, valamint hozzájárulunk a növények maximális termésprodukcijához (Futó et al., 2016).

Az inhibitorok egyik csoportja az ammónia elillanását mérsékli ureáz enzimgátló anyagokkal, melyek hatékonyan lassítják a karbamid hidrolízisét (bomlását) úgy, hogy a bontóenzimek működésében zavart keltenek (Meisinger et al. 1980; Wolt, 2000; Cantarella et al. 2008; Yang et al., 2016). Ismert ureázgátló az NBPT (*n*-butil-tiofoszfotriamid), mely jelentősen csökkenti az ammónia veszteséget. Watson és mtsai. (2008) ezt megerősítették, ugyanis egy laboratóriumi kísérlet során az ammónia veszteséget 38,7%-kal csökkentették a karbamidból, amikor annak felületét az ureáz enzimgátlóval vonták be.

Az inhibitorok másik csoportját képező nitrifikációs inhibitorok specifikusan a nitrifikáló baktériumok tevékenységében okoznak zavart (Gu et al., 2008; Lehtovirta-Morley et al., 2013), lassítva ezzel az ammónium-oxidációját, ami végsősoron a nitrátion talajvíz irányába történő kimosódását mérséklék (Powell és Prosser, 1986). Nitrifikációs inhibitor hatóanyagai közé sorolható a diciándiamid (DCD), a 3,4-dimietil-priazol-foszfát (DMPP), azonban a gyakorlatban a legszélesebb körben alkalmazott, így nemzetközileg a leginkább elterjedt nitrifikációs inhibitor a nitrapyrin (2-klór-6-(triklórmetil) - piridin) (Di és Cameron, 2007; Cui et al., 2011). A nitrapyrin vizsgálata a globális klímacélok elérésének segítségével az elmúlt években számos kutatás alapjául szolgált, ugyanis alkalmazásukkal a nitrát kimosódás mérséklésén túl a N₂O üvegházhatású gáz kibocsátása is jelentősen csökkenthető (Futó et al., 2016; Gilsanz et al., 2016; Thapa et al., 2016; Thomas et al., 2017; Monge-Muñoz et al., 2021). Némely kutatásban ez a csökkenés elérte a 43-70 %-ot is (Bronson és Moiser, 1993). A nitrifikációs inhibitorok hatékonyságát nagyszámú irodalom részletezi a környezetvédelmi és agronómiai előnyét műtrágyával vagy szerves trágyával való kijuttatásuk esetén (Meisinger et al., 1980; Wolt, 2000). Az inhibitorok alkalmazásának tehát kettős célja van: a N hasznosítás javításán keresztül magasabb termés hozamok elérése kisebb környezeti terhelés mellett (Papp, 2014).

Érdekes kérdést vet fel, hogy az ureáz- és nitrifikációs inhibitorok önmagukban való használata, illetve a két inhibitor kombinálása között milyen hatékonyságbeli különbségek tapasztalhatók. Feltételezhető, hogy együttes alkalmazásuk még hatékonyabban csökkentenék a NH₃ és N₂O kibocsátást. A kérdés megválaszolásául már születtek erre irányuló vizsgálatok, amelyben az NBPT és a DCD együttesen a N₂O emissziót 46,8%-kal, az NH₃ elillanását pedig 8-15%-kal mérsékelte (Ding et al., 2011; Li et al., 2014). Más vizsgálatokban, a NBPT és a DMP kombinálásával a N₂O emissziója 64%-kal csökkent (Li et al., 2009b).

2.6.1. A nitrapyrin hatásmechanizmusa

A nitrapyrin a N-veszteség csökkentésére szolgáló nitrifikációs inhibitor már 1974-ben bejegyzett hatóanyagnak számított az Amerikai Egyesült Államokban (Dittmar et al., 2009), melyet napjainkban a leginkább alkalmazott inhibitorként tartanak számon. Az inhibitor alkalmazásának célja, hogy a stabilabb, a környezetet kevésbé terhelő ammónium-ionok (NH_4^+) minél hosszabb ideig álljanak rendelkezésre a növények számára, amely úgy érhető el, ha a nitrapyrin az ammónia nitritté, majd nitráttá történő átalakulásába, azaz a nitrifikáció folyamatába avatkozik be (Tisdale és Nelson, 1966; Antoniou et al., 1990). Az ammónia nitritté való oxidálásában a *Nitrosomonas* fajok, köztük is javarészt a *Nitrosomonas europaea*, illetve a *Nitrospira birensis*, *Nitrosococcus nitrosus*, *Nitrosolobus multiformis*, valamint a *Nitrosovibrio tenuis* baktériumok aktivizálódnak (Szabó, 1986), míg a nitrit további oxidációjáért leginkább a *Nitrobacter* baktériumok felelnek (Szabó, 1986; Powell et al., 1986; Zsigrai, 2006; Szabó, 2008). A nitrifikáció folyamata egy meleg és nedves talajban természetesen körülbelül 2-4 hét alatt megy végbe (Ali et al., 2008b), azaz, a kevésbé mobil ammónium-ionok viszonylag rövid idő alatt oxidálódnak nitritté, majd nitráttá, ezzel pedig gyakran megelőzve a növények tápanyagfelvételét. A nitrapyrin az ammónium-ionok átalakulásáért felelős, szelektíven az ammónia-oxidáló *Nitrosomonas* baktériumok élettevékenységét lassítja (Ali et al., 2008b), azaz lényegében már a nitrifikáció első lépésénél fejt ki hatását azáltal, hogy a réz tartalmú ammónia-monoxigenáz (AMO) enzim szubsztrát-kötőhelyéhez képes kapcsolódni, ezzel gátolva az ammónium-ionok további oxidációját. A nitrapyrin lebomlását követően a *Nitrosomonas*ok regenerálódnak és újra megkezdik a nitrifikáció folyamatát. Így, a nitrapyrin működésének köszönhetően a nitrifikáció elnyújtásával az ammónium-ionok hosszabb időn keresztül elérhetőek maradnak a termesztett növények számára (Vanelli és Hopper, 1992; Fisk et al., 2015; Degenhardt et al., 2016), amely a N hatékonyabb hasznosítását, végül pedig magasabb terméshozamot eredményez (Wolt, 2004; Martins et al., 2017; Ren et al., 2017).

2.6.2. A nitrapyrin alkalmazási stratégiai kukoricában

A N veszteség csökkentésére szolgáló nitrapyrin alkalmazását a nagy N igénnyel (min. 100 kg/ha kijuttatott N) bíró növények termesztéstechnológiájába érdemes integrálni, hiszen minél nagyobb adagban történik a N kijuttatása, annál inkább

érvényesül a nitrapyrin hatása (Futó et al., 2016). A nitrapyrin hatékonyságát a N nagy adagú utánpótlását igénylő kukoricában is vizsgálták. Alapvető igazság, hogy a N hasznosulása akkor növelhető, amikor a növény azt a leginkább igényli. Ismerve a kukorica N-felvétel dinamikáját, elmondható, hogy a kezdeti időszakban a tápanyagfelvétel még lassú (Panison et al., 2019), azaz a csírázás időszaka alatt a felvett N mennyiség általában elenyésző, hiszen ekkor a növény a szemben lévő tartalék fehérjéket mobilizálva kezdi meg fejlődését. Ebben az időszakban a N felvételt a gyökérkapacitás határozza meg, amelynek támogatására minimális N mindenképpen szükséges. Fokozottabb N felvétel a kukorica 6-7 leveles állapotában indul meg, amikor a növekedés felgyorsul. Az intenzív növekedés a V6-V18 stádiumig terjedő időszakra tehető, mely során a szár folyamatosan növekszik (English et al., 2017). A kukorica tápanyagfelvételi dinamikájára alapozva az intenzív termesztést gyakorló gazdaságokban a szükséges N-műtrágya kisebb részét vetéskor, java részét pedig az intenzív fejlődési stádiumokhoz igazodva juttatják ki annak érdekében, hogy a N hasznosulása maximális legyen. Ehhez képest a nitrapyrin kijuttatását célszerű a vetést megelőzően időzíteni, majd a hatóanyagot talajba dolgozni, ellenben alacsony hatékonyság várható (Degenhardt et al., 2016; Futó et al., 2016; Vetsch et al., 2017). A talajba dolgozott nitrapyrin hatékonysága biztonságosabb szemben az állománykezeléssel, ahol a hatóanyag kitett az időjárás szélsőségeinek. Állománykezelés esetében két héten belül 10-15 mm csapadék szükséges ahhoz, hogy a hatóanyag kellő mélységig a talajba jusson (Futó et al., 2016).

2.6.3. A nitrapyrin hatékonyságát befolyásoló tényezők

A nitrapyrinnel kapcsolatos szakirodalmi ismeretek áttekintése alapján kijelenthető, hogy megannyi tényező befolyásolja a hatóanyag nitrifikációra gyakorolt gátlását, amely mechanizmus pontosabb megértésére további kutatások szükségesek.

A N-veszteség csökkentését célzó nitrapyrin hatóanyag a talajba juttatva fejti ki hatását, ennél fogva működését a talaj olyan jellemzői, mint a fizikai féleség, a pH, a hőmérséklet, a nedvességtartalom és a szervesanyag tartalom jelentősen meghatározhatják. Éppen ezért a nitrapyrinnel kapcsolatos kutatások jelentős része összpontosít a talajtulajdonágok közti differenciák és a nitrapyrin működésének kapcsolatára.

A talaj szervesanyagtartalma és a nitrapyrin közötti kapcsolatáról szinte egyöntetű eredmények és megállapítások születtek. Elmondható, hogy a talaj szervesanyag

készletének növekedése a nitrapyrin csökkent hatékonyságát eredményezheti (Chancy és Kamprath, 1987). Wolt (2000) szintén hangsúlyozza, hogy folyadékokban a nitrapyrin inhibíciója erősödik, szemben a talajközeggel, ahol a nitrapyrin a humuszanyagokhoz kötődik, így csökken annak biológiai hozzáférhetősége, ezáltal pedig a hatóanyag inhibíciója gyengül. Hasonló következtetésekre jutottak Zhang és mtsai. (2020) is, miszerint a szervesanyagban szegényes talajokban csökkent a nitrapyrin adszorpciós képessége. Mindazonáltal fontos hangsúlyozni, hogy az alacsonyabb szervesanyag tartalom hátrányosan is hat a nitrapyrin nitrifikáció szabályozására, ugyanis Redemann és mtsai. (1964), valamint Briggs (1975) egy alacsonyabb szervesanyag tartalmú talajból a nitrapyrin nagyobb mértékű kiürülésére hívták fel a figyelmet.

A fizikai talajféleség szintén befolyásolhatja a nitrapyrin működését. A nagy-pórusméretű és áteresztőképességű, laza szerkezetű és alacsony vízmegtartó képességekkel bíró homoktalajban szignifikáns a N-veszteséget okozó nitrátkimosódás (Piccini et al., 2016; Hess et al., 2020; Rácz és Radócz, 2020a), amely indokoltá teszi a nitrapyrin alkalmazását. Gu és mtsai. (2013) szintén megállapították, hogy a nitrapyrin alkalmazásával a homoktalajokban jelentkező N veszteség jóval hatékonyabban mérsékelhető, mint az agyagos talajokban. Mindazonáltal a szervesanyagtartalomban szegényes homoktalajban a nitrapyrin kevésbé marad meg, ezért mások szerint a nitrapyrin hatékonyabban kontrollálja a nitrifikációt a magasabb, mintsem az alacsony agyagtartalmú talajokban (Bundy és Bremner, 1973).

A nitrapyrin hatékonyságát különböző éghajlati adottságok között is vizsgálták, amelyek eredményei alapján egyértelmű következtetés nem vonható le. A forró időjárási körülmények, így a magas hőmérsékletű talajokban alkalmazott nitrapyrin hatékonyságát vizsgáló kutatások eredményei eltérőek. Némely kutatásban a nitrapyrin nagyobb fokú hatékonyságát igazolták szemiárid és forró időjárási körülmények között, ahol a N-gázok vesztesége alapvetően jóval jelentősebb (Dawar et al., 2021), míg máshol egyértelműen megállapították, hogy a nitrapyrin a mérsékelt égövi területeken működik kellő hatékonysággal (Touchton és Boswell, 1980). Utóbbit igazolják azok a kutatások is, amelyekben a nitrapyrin felezési idejének jelentős rövidülését tapasztalták magas hőmérsékletű, szubtrópusi talajokban (Touchton et al. 1979; Rhaki et al., 2019). Ali és mtsai. (2008b) szintén kiemelték, hogy a nitrapyrin nitrifikáció gátlása magas, 35°C talajhőmérsékleten már nem hatékony. Fisk és mtsai. (2015) azonban hangsúlyozták, hogy a hatóanyag még 40°C is hatékonyan késleltette az ammónium-ionok oxidációját.

Ezek alapján az világossá vált, hogy a talajhőmérséklet azon fontos talajtényezők egyike, amely jelentősen befolyásolja a nitrápyrin hatékonyságát.

Fontos azonban annak felismerése is, hogy a talajjellemzők nem csak a hatóanyag viselkedését, hanem a talajban élő nitrifikáló baktériumok tevékenységét is befolyásolják, ezen keresztül pedig a nitrápyrin hatékonyságát. Mivel a nitrápyrin szelektíven a *Nitrosomonas* baktériumok enzimátikus tevékenységét zavarják, a nitrápyrin inhibíciójának mértékét a baktériumok aktivitása, élettevékenysége, populációja is meghatározza, amelyet a környezeti tényezők – így a talajtulajdonságok is – nagyban meghatároznak. Közismert, hogy a baktériumok növekedése egyenesen arányos a hőmérséklet változásával. Meglepő tény, de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ is kimutatható gyenge nitrifikációs tevékenység (Malhi et al., 1982), azonban a *Nitrosomonas* baktériumok aktivitása $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ között a legintenzívebb (Watson et al., 1981; Taylor et al., 2019). Azaz, a nitrápyrin kijuttatásának időzítése a nitrifikáló baktériumok növekedési állapotához viszonyítva befolyásolhatja a hatékonyságot (Wolt, 2000). Kutatások alapján a nitrifikációt gátló inhibitorok hatékonysága a talaj hőmérséklet emelkedésével általában csökken (Slangen és Kerkhoff, 1984), mégis, a nitrápyrin hatékonysága különösen azokon a területeken látszik, ahol a kijuttatott N-adagok magasak (Wolt, 2004) és a talaj hőmérséklete $25\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ között volt (Ali et al., 2008b, Chen et al., 2010).

A hőmérséklet emelkedésén túl a talaj kémhatásának növekedése szintén a nitrifikáció gyorsaságának, azaz a nitrifikáló baktériumok fokozott aktivitásának kedvez (DeForest és Otuya, 2020). Touchton és mtsai. (1979) a két paraméter emelkedésekor a nitrápyrin degradációját állapította meg. Később Wolt (2000) is alátámasztotta, hogy a nitrápyrin hatásának csökkenését tapasztalta a pH érték növekedésekor.

A klímaváltozás egyik következménye, hogy időjárásunk szárazabbá válik, csapadék csak időszakosan érkezik. Egy száraz periódust követően az érkező csapadék hatására nem csak a növények tápanyagfelvétele növekszik robbanásszerűen, de a talaj mikroorganizmusai is rendkívül gyorsan aktiválódnak, gyorsítva ezzel a nitrifikáció sebességét (Phillips et al., 2015). A N veszteség és csapadék viszonyát tekintve az egyértelmű, hogy az intenzív esőzések növelik a nitrát-ionok kimosódását a gyökérzónából (Hess et al., 2020), azonban a veszteség a rendszeresen öntözött területeken is jelentős lehet, amire a nitrápyrin alkalmazása megoldást nyújthat.

Néhány tanulmány szerint a nitrifikációs inhibitorok még hatékonyabbak lehetnek akkor, ha mind alacsony, mind pedig a magas víztartalom következtében a nitrifikáló baktériumok aktivitása korlátozódik (Keeney, 1986), azonban Wolt (2000) kutatásában a

nitrapyrin csökkent hatékonyságát állapította meg, amikor a talaj nedvességtartalma növekedett. Ez azzal a ténnyel magyarázható, hogy a Nitrosomonasok növekedése alapvetően vízhez kötött, így a kellően nedves, de nem vízzel borított és meleg talajban a nitrifikációs ráta is szignifikánsan növekszik (Norton és Ouyang, 2019).

A fentiek alapján elmondható, hogy a nitrapyrin mechanizmusát és hatékonyságát számos talajtani, meteorológiai és mikrobiológiai paraméter együttese befolyásolja, amelyek közötti komplex kölcsönhatások eredményezik a nitrapyrin alkalmazásának eredményességét, esetenként sikertelenséget. Összegezvén a leírtakat az egyértelművé vált, hogy a nitrifikációs inhibitor használata elsősorban a különböző időjárási, talajtani, vagy helytelen agrotechnikai tényezők következtében a nagyobb fokú N-veszteségnek kitett területeken jövedelmező és hatékony. Habár a nitrapyrin bomlása a meleg hőmérsékletű talajban gyorsul, nem kizárt, hogy éppen a talajban lévő baktériumok fokozott aktivitásából fakadóan a nitrapyrin és baktériumok közötti találkozás esélye, így a rájuk kifejtett inhibíció mértéke is nagyobb. Ezen megállapítás igazolására további vizsgálatok szükségesek, csak úgy, mint a nitrapyrin kijuttatásának optimális időzítésének meghatározására. Ugyanis, a N-veszteség jelentős csökkenését a nitrapyrin őszi és tavaszi kijuttatásakor is megállapították (Degenhardt et al., 2016). Kukoricában a nitrapyrin vetés előtt történő kijuttatás is hatékonynak bizonyult (Gupta et al., 2020), amikor a talajhőmérséklet már elérte a 10°C-ot. Mindazonáltal a kukorica N-szükséglete meglehetősen alacsony a kezdeti időszakban, így feltételezhető, hogy a később, állományba kijuttatott nitrapyrin a növény N-felvétel dinamikáját követve, a talajhőmérséklet emelkedése ellenére is hatékonyabb lehet.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. A szabadföldi kísérletek beállítása

A kísérleti helyszínek pontos adatait az 1. táblázat mutatja. A kísérletek helyszíneit a terület tulajdonában álló szervezeti név, illetve a kísérleti beállítás évszámának rövidítéseivel jelöltük. A szabadföldi kísérletek csoportosítását a vizsgálatok célkitűzése szerint a 2. táblázat mutatja.

1. táblázat: A szabadföldi kísérletek helyszínei

Kísérlet		
AG-19	Év:	2019
	Helyszín:	Agrárgazdaság Kft. (Debrecen-Józsa)
	Földrajzi szélesség és hosszúság:	47° 34' 44.6" É; 21° 32' 37" K
HD-19	Év:	2019
	Helyszín:	Hajdúhadházi Bocskai Mg. Kft. (Bocskai kert)
	Földrajzi szélesség és hosszúság:	47° 37' 56.8" É; 21° 39' 27.4" K
BK-20	Év:	2020
	Helyszín:	Debreceni Egyetem MÉK Bemutatókert (Debrecen)
	Földrajzi szélesség és hosszúság:	47° 33' 6.8" É; 21° 36' 4.3" K
KF-20	Év:	2020
	Helyszín:	Kurucz Farm Kft. (Ebes)
	Földrajzi szélesség és hosszúság:	47° 27' 20" É; 21° 28' 8.6" K
AG-21	Év:	2021
	Helyszín:	Agrárgazdaság Kft. (Debrecen)
	Földrajzi szélesség és hosszúság:	47° 33' 14.7" É; 21° 35' 14.7" K
BK-21	Év:	2021
	Helyszín:	Debreceni Egyetem MÉK Bemutatókert (Debrecen)
	Földrajzi szélesség és hosszúság:	47° 33' 8.9" É; 21° 35' 58.7" K
KF-21	Év:	2021
	Helyszín:	Kurucz Farm Kft. (Debrecen)
	Földrajzi szélesség és hosszúság:	47° 29' 46.2" É; 21° 34' 52.8" K

A betűkből és számokból álló kódok a terület tulajdonában álló vállalat nevének a rövidítését (betűk) és a kísérlet beállításának évszámának rövidítését (számok) jelölik.

2. táblázat: A szabadföldi kísérletek csoportosítása a vizsgálatok célkitűzése szerint

Célkitűzések	Kísérletek
1. Nitrápyrin és lombrágya kezelések együttes hatásának vizsgálata	AG-19, BK-20, KF-20, AG-21, BK-21, KF-21
– Specifikus kórokozókkal szembeni ellenállóság vizsgálata	BK-20
– Abiotikus stresszválaszok fiziológiai jellemzése	BK-21
2. A nitrápyrin-kezelés optimális időzítésének meghatározása	BK-20, BK-21
3. A nitrápyrin hatékonyságának vizsgálata homoktalajon	HD-19

A kísérletek beállítását megelőzően minden kísérleti helyszínen talajmintavételezés történt. A talajmintákat a terület heterogenitásának figyelembevételével, a táblán belül „W” alakot követve, a talajfelszíntől számított 0-30 cm-es rétegből vettük. A talajminták előkészítését és feldolgozását a HL-LAB Környezetvédelmi és Talajvizsgáló laboratóriuma (Debrecen) végezte. A kísérletek helyszínek talajjellemzőit a 3. táblázat mutatja.

3. táblázat: A kísérleti helyszínek talaj adottságai

Paraméterek	AG-19	AG-21	BK-20	BK-21	HD-19	KF-20	KF-21
pH (KCl)	6,59	7,45	6,63	7,50	7,16	5,45	6,25
Arany-féle kötöttségi szám KA	42	38	38	44	26	46	43
Talajtípus	V	V	V	AV	H	AV	AV
Vízben oldható összes só (m/m%)	0,02	0,08	0,04	0,02	0,02	0,07	0,03
CaCO ₃ (m/m%)	0,17	5,7	0,995	14,93	0,1	< 0,1	< 0,1
Humusz (m/m%)	1,95	1,6	2,91	1,99	0,7	2,2	2,5
KCl-oldható NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ - N (mg/kg)	11,2	> 50	2,16	2,78	16,2	37	17
Mg (KCl oldható)	142	144	n.a.	699,80	n.a.	270	266
S (KCl)	1,2	2,1	n.a.	1,15	n.a.	2,8	2,2
AL-oldható K ₂ O (mg/kg)	186	213	310	162,48	182	405	349
Na (NH ₄ -laktát)	21,3	40	n.a.	47,11	n.a.	34	22
AL-oldható P ₂ O ₅ (mg/kg)	225	272	481	256,02	207	371	464
Cu (KCl-EDTA)	1,7	0,8	n.a.	1,43	n.a.	5,1	3,3
Mg (KCl-EDTA)	31	26	n.a.	26,63	n.a.	210	191
Zn (KCl-EDTA)	< 7,0	0,6	n.a.	0,85	n.a.	7,9	9,4

V: vályog; AV: agyagos vályog; H: homok

A 2019-2021. évjáratokban végzett különböző területen beállított kísérletek főbb agrotechnikai adatait (a vetést megelőzően kijuttatott trágyaféleségek, a termesztett kukorica hibrid neve, vetésének ideje és a kísérletben alkalmazott kezelések időpontja) a 4. táblázat mutatja.

4. táblázat: A kísérletek agrotechnikai jellemzői

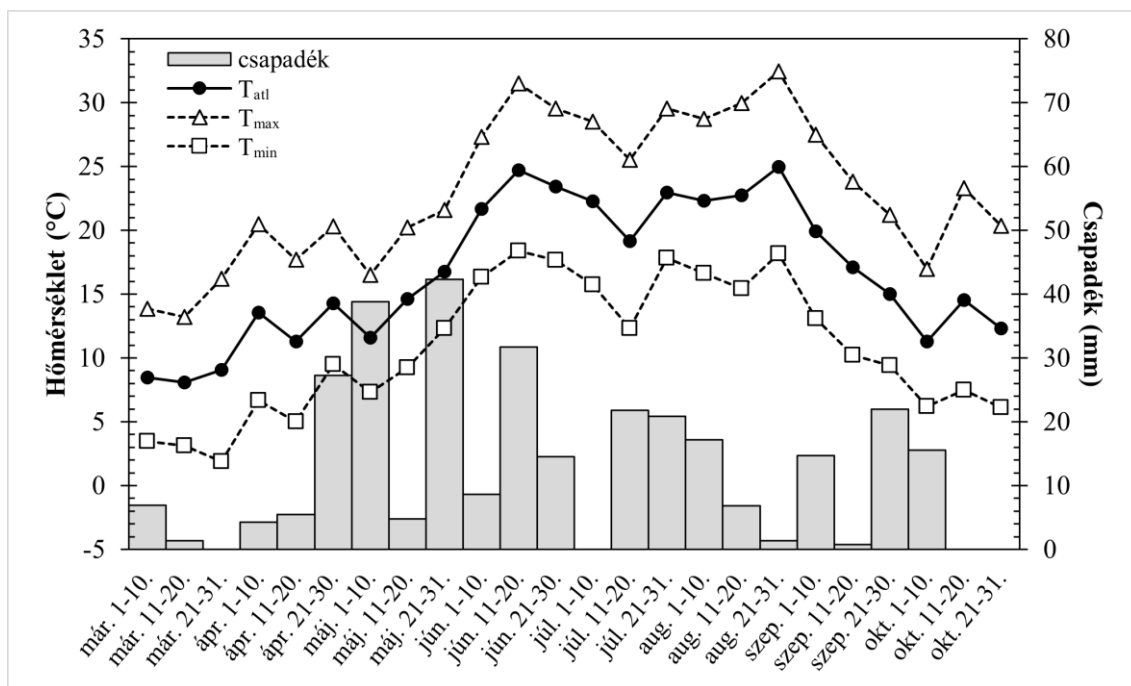
Kísérletek	Tápanyag-gazdálkodás	Hibrid	Vetés ideje	Kezelések	Kezelések időpontja
AG-19	karbamid (46% N) műtrágya	Maxima, Marton Genetics, FAO 580	2019. 04. 19.	nitrapyrin (Np)	április 10. (vetés előtt)
				lombtrágya (Lt)	június 6.(V7)
HD-19	NPK 10-26-26	Koregráf, Marton Genetics, FAO 430	2019. 04. 23.	nitrapyrin (Np)	május 25.(V8)
	folyékony ammónia				
BK-20	szerves trágya (25 kg/ha)	Armagnac, Kite Zrt., FAO 490	2020. 04. 22.	nitrapyrin (Np)	április 21. (vetés előtt)
				nitrapyrin (Np ⁺)	június 13. (V10)
				lombtrágya (Lt)	június 29.(V12)
KF-20	MAS 27% műtrágya	P9903, Pioneer, FAO 390	2020. 04. 09.	nitrapyrin (Np)	április 8. (vetés előtt)
				lombtrágya (Lt)	június 29.(VN)
BK-21	pétisó (27% N)	Armagnac, Kite Zrt., FAO 490	2021. 04. 27.	nitrapyrin (Np)	április 26. (vetés előtt)
				nitrapyrin (Np ⁺)	június 10.(V10)
				lombtrágya (Lt)	június 23.(V12)
AG-21	karbamid (46% N) műtrágya	Maxima, Marton Genetics, FAO 580	2021. 04. 28.	nitrapyrin (Np)	április 27.(vetés előtt)
				lombtrágya (Lt)	június 22.(V12)
KF-21	karbamid (46% N) műtrágya	P9903, Pioneer, FAO 390	2021. 04. 27.	nitrapyrin (Np)	április 27.(vetés előtt)
				lombtrágya (Lt)	július 18.(VT)

A kezelések időpontjánál a pontos dátumok mellett a kukorica adott fenológiai státusza szerepel. V8=8 leveles állapot; V10=10 leveles állapot; V12=12 leveles állapot; VN=utolsó levél megjelenése; VT=hímvirágzás

3.2. A kísérleti évek klimatikus jellemzése

A 2019-es év időjárása a vegetációs időszakban

A 2019-es év hőmérsékleti szempontból kiemelkedően melegnek számított, ugyanis a májusi hónap kivételével sorban rekordmelegeket lehetett mérni. A vegetáció kezdetekor, a tavasz enyhébbnek bizonyult, ugyanis márciusban 2,9 °C-kal, áprilisban pedig 1,3 °C-kal volt melegebb a 30 éves átlaghőmérséklethez képest (1991-2020; OMSZ). A csapadékmennyiség eloszlása ebben az időszakban egyenetlennek bizonyult. Márciusban átlagosan 22 mm-el, áprilisban pedig 8 mm-el kevesebb csapadék hullott, amely a kukoricavetések lassú, vontatott kelését eredményezte. Májusban a hőmérséklet még mindig enyhe maradt, azonban kiugróan sok, átlagosan 93 mm csapadék érkezett viszonylag egyenletes eloszlásban, mely 34 mm-el haladta meg a 30 éves átlagot. A júniusi hónapban az átlaghőmérséklet 9,5°C-kal haladta meg a 30 éves átlagot, amely a kukorica intenzív fejlődésének kedvezett, és habár a havi csapadékmennyiség 12 mm-el kevesebb volt a 30 éves átlagnál, ennek eloszlását szélsőségesség jellemezte. Ezt követte a mérsékelt hőmérsékletű, kevesebb csapadékot hozó július (0,2 °C-kal volt melegebb és 5 mm-el kevesebb csapadék esett a 30 éves átlaghoz képest), majd a még szárazabb augusztus, amely hónapban 23 mm-el kevesebb csapadék hullott, ráadásul a hőmérséklet is tartósan magas volt. A vegetáció végén, szeptemberben szintén csekély mennyiségű csapadék érkezett, átlagosan 9 mm-el kevesebb a 30 éves átlaghoz képest (OMSZ, 2019). Az évjárat a kukoricatermesztés szempontjából összességében átlagosnak tekinthető, habár mind a hőmérsékletváltozást, mind a csapadékeloszlást is egyenetlenség jellemezte. A 2019. év klimatikus jellemzését az 1. ábra mutatja.



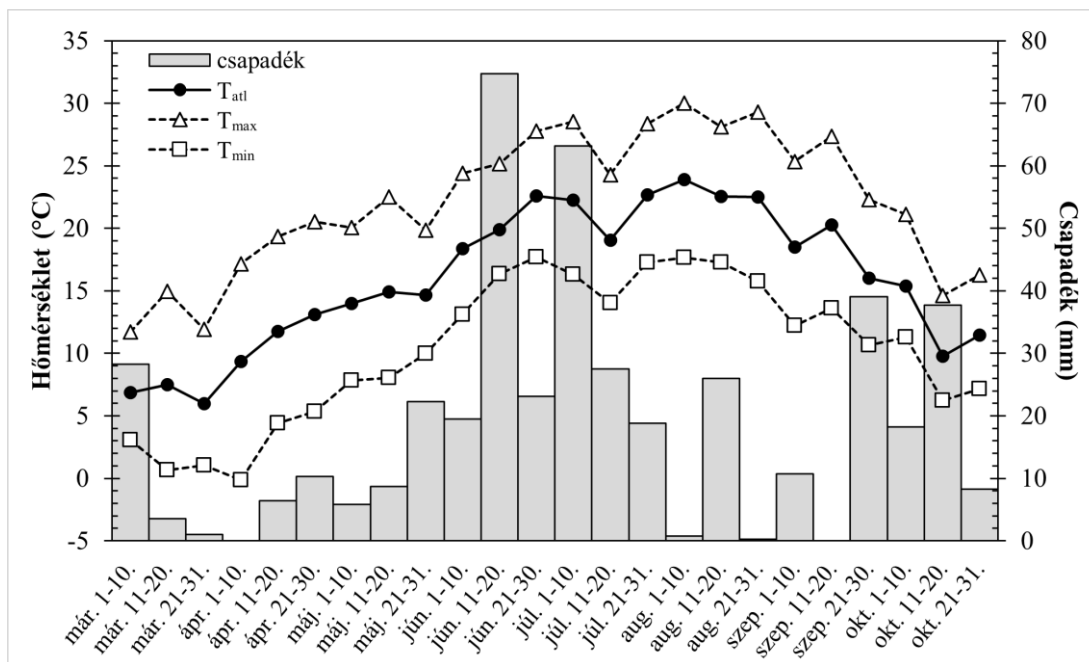
1. ábra: A 2019-es év klimatikus jellemzői (OMSZ, debreceni mérőállomás)

Az ábra az adott hónaptól függően 10-11 napos időszakok csapadék- és hőmérsékleti adatait tartalmazza. Csapadék: lehullott csapadékösszeg; T_{atl}: átlagos napi átlag-hőmérséklet; T_{max}: átlagos napi maximum-hőmérséklet; T_{min}: átlagos napi minimum-hőmérséklet.

A 2020-as év időjárása a vegetációs időszakban

2020 vegetációs időszakát elsősorban a csapadék rendkívül egyenetlen eloszlása jellemezte. A kukorica kezdeti fejlődését az áprilisban és májusban is uralkodó aszály jelentősen hátráltatta, ugyanis a két hónap alatt mindössze 54 mm csapadék érkezett, amely 50 mm-el kevesebb a 30 éves átlagtól (1991-2020; OMSZ). A júniusra érkező kisebb csapadékok ellenére a növényállomány még visszamaradott volt, robbanásszerű fejlődése csak a június közepében érkező, sorozatos csapadékok hatására indult meg (júniusban átlagosan 50 mm-el, júliusban átlagosan 62 mm-el több csapadék hullott), így a címerhányás fenofázisában járó kukorica terméshozamát a bőséges csapadékok hatékonyan támogatták. A kiadós esőzéseket követően az augusztus már meleg és szárazabb volt (21 mm-el kevesebb csapadék a 30 éves átlaghoz képest), ami kedvezett az állományok szemképződéséhez. Összeségében a nyár az átlagosnál melegebb, de jóval csapadékosabbnak bizonyult. Szeptember első napján kisebb, 13,5 mm csapadék érkezett, melyet követően száraz időjárás volt jellemző, csak a hónap végén érkeztek kisebb

csapadékok (OMSZ, 2020). A 2020-as év a kukoricatermesztés szempontjából csapadékosnak tekinthető. Az évjárat klimatikus jellemzését a 2. ábra mutatja.



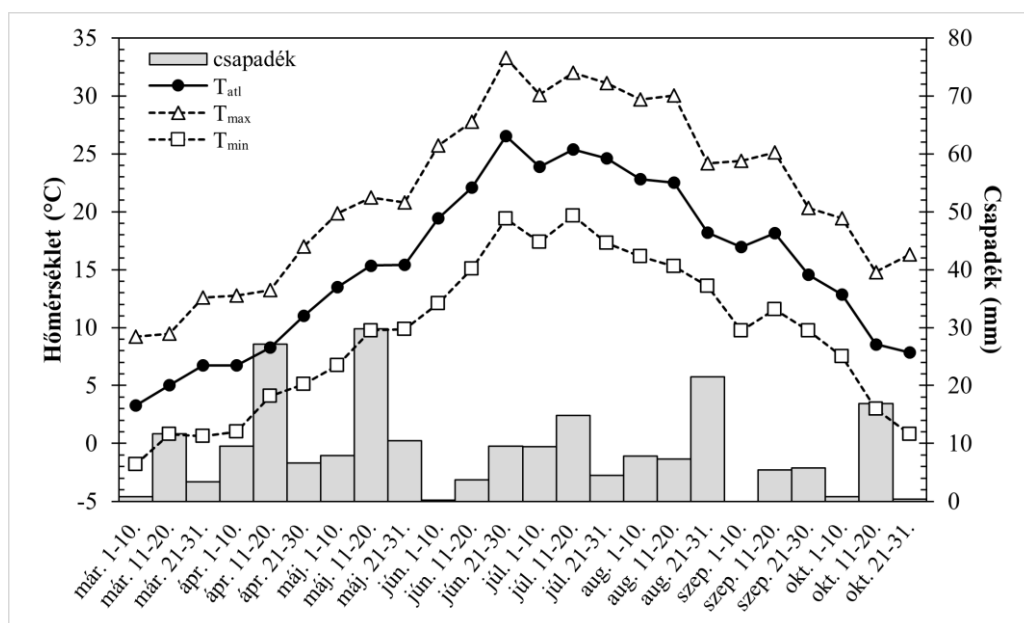
2. ábra: A 2020-as év klimatikus jellemzői (OMSZ, debreceni mérőállomás)

Az ábra az adott hónaptól függően 10-11 napos időszakok csapadék- és hőmérsékleti adatait tartalmazza. Csapadék: lehullott csapadékösszeg; T_{atl}: átlagos napi átlag-hőmérséklet; T_{max}: átlagos napi maximum-hőmérséklet; T_{min}: átlagos napi minimum-hőmérséklet.

A 2021-es év időjárása a vegetációs időszakban

2021 tavasza összességében csapadékos volt. Áprilisban a 30 éves átlaghoz képest (1991-2020; OMSZ) az átlag csapadékmennyiség mindössze 2 mm-el maradt alul, májusban pedig 11 mm-el, de ez is elegendő volt ahhoz, hogy a talajok átnedvesedjenek. A kukorica vetése nem csak emiatt, hanem a hőmérséklet szokatlanul lassú emelkedése (átlaghőmérséklet áprilisban: 9,5 °C; májusban: 15,4 °C) és a gyakori tavaszi fagykarak következtében is késtek. A sorozatos esőzések és a bőséges csapadék hatására a talajok felszínközeli hőmérséklete sokáig nem emelkedett a 10 °C-os küszöbérték fölé, ezért a legtöbb helyen késve, április legvégén kezdték meg a vetési munkákat. Májusban a hűvös, csapadékos időjárás miatt a növények fejlődése igen lassan, vontatottan haladt. Június elején maradt a hasonlóan hűvös időjárás, azonban a hónap második felében jelentősen emelkedett a hőmérséklet, ami a kukorica fejlődésének is kedvezett (2,9 °C-al volt melegebb a 30 éves átlaghoz képest), azonban az esőzések hirtelen elmaradásával a hónap rendkívül száraznak bizonyult, ugyanis a 30 éves átlaghoz képest 54 mm-el kevesebb csapadék hullott. A júniusi aszály júliusban is folytatódott, rendkívül magas hőmérsékleti

értékekkel párosulva, amikor a kukoricának már jelentős nedvességre lett volna szüksége. Júliusban a sokéves átlaghoz (48 mm) képest 19 mm-el kevesebb csapadék érkezett, amely ebben a kritikus hónapban koránt sem elégítette ki a kukorica vízigényét. Az ország nagy részén aszálykárosult növényekkel találkozhattunk, hiszen tavasz óta jelentős vízhiány lépett fel mindenhol. Sok helyen a növénymagasság jóval alulmaradt az átlagnál, az állomány sok helyen teljesen elszáradt. Augusztus eleje továbbra is rendkívül száraz és meleg volt, azonban a hónapban további kisebb-nagyobb csapadék érkezett, így a 30 éves átlaghoz (48 mm) képest összesen átlagosan mindössze 37 mm csapadék érkezett. A szeptember rendkívül száraz és szinte csapadékmentes volt, ugyanis a 30 éves átlaghoz képest 36 mm-el kevesebb eső érkezett, így már a hónap első felére a kukoricaállomány nagy része betakarításra került (OMSZ, 2021). A 2021. év a kukoricatermesztés szempontjából száraznak tekinthető. Az évjárat klimatikus jellemzését a 3. ábra mutatja.



3.ábra: A 2021-es év klimatikus jellemző (OMSZ, debreceni mérőállomás)

Az ábra az adott hónaptól függően 10-11 napos időszakok csapadék- és hőmérsékleti adatait tartalmazza. Csapadék: lehullott csapadékösszeg; T_{atl}: átlagos napi átlag-hőmérséklet; T_{max}: átlagos napi maximum-hőmérséklet; T_{min}: átlagos napi minimum-hőmérséklet.

3.3. A használt nitrápyrin készítmény és kijuttatása

Tekintve, hogy az inhibitorok alkalmazása rendkívül költséges, így az ureáz- és nitrifikációs inhibitorok együttes alkalmazása jelenleg nem elterjedt, illetve a két technológia együttes hatásának vizsgálata rendkívül összetett, bonyolult biokémiai folyamatok megértését, azok egymásra hatásának tisztánlátását, hosszas tanulmányozását követeli, ezért jelen dolgozatomban többek között a kissé jobban elterjedt, nitrápyrin

hatóanyagtartalmú nitrifikációs inhibitor hatékonyságát vizsgáltam. A kísérleteink során alkalmazott nitrogén stabilizátor készítmény (nitrapyrin, N Lock, Corteva Agriscience, Wilmington, USA) kijuttatása a gyártó által ajánlott dózisban (1,7 l/ha; 300 l/ha vízmennyiség) történt. A vetés előtt kipermetezett hatóanyagot azonnal a talaj 6-8 cm-es rétegébe is bedolgoztuk, míg a vetést követő, állományban történő permetezését az időjárási előrejelzésekre alapozva időzítettük, azaz a kipermetezést követően csapadékra számítottunk. Ilyen kísérletek egyike volt a HD-19 kísérlet is, ahol a nitrapyrin kijuttatása a kukorica posztemergens gyomirtásával egy menetben történt 2019. május 25-én, és ahol a hatóanyag talajba jutását a május 28-án érkező 3 mm., május 29-én pedig 27 mm csapadék segítette (KSH, 2019a; KSH, 2019b). A BK-20 és BK-21 kísérletekben nitrapyrin kezelések a vetést követően is történtek, ahol 2020-ban a kijuttatást követő két héten belül 45 mm (OMSZ, 2020), míg 2021-ben a pár órán belül érkező 4 mm, illetve két héten belül további 12 mm csapadék segítette a hatóanyag talajba jutását (OMSZ, 2021).

3. 4. A használt lombtrágya készítmény és kijuttatása

A kísérletekben felhasznált lombtrágya készítmény (Zsendítő, Hed-Land Hungária Kft.) tápelem összetételét az 5. táblázat mutatja. A lombtrágyázás során számos tényezőt vettünk figyelembe. A kezelést igyekeztünk a reggeli-délelőtti napszakokban, erős napsütéstől mentes, borús időben időzíteni, illetve a kipermetezett tápanyagok hatékony abszorpciójának érdekében a levéltrágyázást csak az elegendő lombozattal rendelkező kukoricában végeztük (min. 8 leveles fejlettségi állapot). A kezelést a gyártó által ajánlott maximális dózisban (10 l) és lémenységgel (300 l) juttattuk ki.

5. táblázat: A kísérletek során alkalmazott lombtrágya tápelem összetétele

Tápanyagok	Lombtrágya (g ha ⁻¹)
Összes nitrogén (N) ^a	800
Foszfor-pentoxid (P ₂ O ₅)	700
Kálium-oxid (K ₂ O)	700
Kén-trioxid (SO ₃)	700
Bór (B) ^b	1,27
Réz (Cu) ^b	1,62
Vas (Fe) ^b	2,84
Mangán (Mn) ^b	2,65
Cink (Zn) ^b	0,38

^a — urea nitrogén; ^b — EDTA fémion-kelát komplex

3.5. A talaj nitráttartalmának meghatározása

A nitrapyrin kezelés hatékonyságát a kezelt és kezeletlen talaj 0-30 cm-es mélységében mérhető nitrát-tartalmának meghatározásán keresztül követtük nyomon, amelyek összehasonlítása közvetett információkat szolgáltat a nitrifikációs tevékenységről is. A talajmintákat a terület heterogenitásának figyelembevételével, „W” alakot követve vettük. A talajmintavételezést az időjárási körülményekhez alkalmazkodva igyekeztünk 2-3 hetente végezni. Az intenzív esőzések, illetve az elnyúló aszályok a talaj kedvezőtlen állapotát eredményezték a talajmintavételezésre. A talajmintákat a nitrapyrinnel nem kezelt (Kt, Lt), valamint a nitrapyrinnel kezelt (Np, Np + Lt) területekből vettük. Ez azzal magyarázható, hogy a lombtrágyás kezelés önmagában nem befolyásolja jelentősen a talaj nitrát-tartalmának változását, ugyanis a levélfelületről lecsöpögő, illetve a talajfelszínre közvetlenül jutó és a talajba csordogáló folyadék mennyisége elhanyagolható. Ezt támasztja alá az tény is, hogy a lombtrágyázás a tápanyagutánpótlás kiegészítésére szolgáló stratégia, amely során közvetlenül a föld feletti növényi szervekhez juttatjuk a tápanyagokat (Bindraban et al., 2015). A technológia hatékonyságának és a kijuttatott lombtrágya minimális veszteségének egyik feltétele, hogy elegendő levélfelülettel rendelkezzen a növényállomány (Ling és Silberbush, 2002). Ezt a feltételt a lombtrágyás kezelések időzítésekor minden esetben figyelembe vettük. A nitrát-tartalom meghatározását nitrátelektrodával (Nitrat 2000, Stelzner, Németország), a gyártó által javasolt lépések szerint végeztük (1. melléklet).

3.6. A relatív klorofilltartalom meghatározása

A kukorica levelek relatív klorofill tartalmának meghatározását minden esetben a lombtrágyázást követő, min. egy héttel végeztük annak érdekében, hogy a kijuttatott tápanyagok a mérés idejére hasznosuljanak. A méréseket a kukorica csöközeli, kifejtett levelén végeztük, levelenként pedig 5 mérés átlagát vettük alapul (kezelésenként 20 db növény). A mérésekhez SPAD-502 Plus készüléket (Konica-Minolta, Japan) használtunk, mely eszköz előnyei, hogy a gyors, egyszerű, illetve a levéllemez károsítása nélkül képes információt nyújtani a klorofill relatív mennyiségéről, a növény egyik legfontosabb fiziológiai mutatójáról. Az eszköz a levélben lévő klorofill molekulák abszorbanciáját méri két, a klorofill által elnyelt vörös (650 nm), valamint a klorofillon áthaladó infravörös (940 nm) hullámhossz tartományban, majd ezen fény intenzitások arányából,

kb. 1-2 mp alatt kalkulálja a 0-100-ig terjedő SPAD indexet (Xiong et al., 2015). Maga a mérés rendkívül egyszerű, a készülék csipető formájú mérőfejét a levéllemezre szükséges helyezni.



4. ábra: A kukorica relatív klorofilltartalmának mérése a Konica-Minolta SPAD-502 Plus készülékével

3.7. A gyökértömeg meghatározása

A biomassa gyarapodás vizsgálatokor a gyökértömeg is meghatározásra került. Mivel a lombtrágya kezelés feltehetőleg kevésbé befolyásolja a növények gyökérnövekedését, a gyökérmintákat egyrészt a nitrapyrinnel nem kezelt (Kt, Lt), másrészt pedig a nitrapyrinnel kezelt (Np, Np+Lt) állományokból vettük. A gyökerek különböző méretükből adódó torzító hatás elkerüléséül a mintavétel során egységesen a talaj felszínétől számított 30 cm³, egységnyi talajtérfogatú, véletlenszerűen kiválasztott, kezelésként 10 db növény gyökértömegét vettünk alapul. A mintavételt követően a gyökereket a talajmaradványoktól megtisztítottuk, majd tömegállandóságig 60 °C-on szárítószekrényben szárítottuk és az így kapott tiszta és száraz gyökérminták tömegét mértük. A biomassa gyarapodás vizsgálatára irányulóan a gyökértömeg és a szárvastagság meghatározása egyidőben történt, melyet alapvetően egységesen minden területen a szemtelítődés időszakához igazodóan időzítettünk. Ezt tulajdonképpen arra a

tényre alapoztuk, hogy a szemtelítődést követően a kukorica vízfelhasználása csökken, tehát az ezt megelőző időszakban már kialakult a kukorica végleges biomassza tömege.



5. ábra: A gyökértömeg mérésének előkészületei

3.8. A szárvastagság meghatározása

A biomassza gyarapodás mutatójaként a szárvastagságot is meghatároztuk, melyhez tolómérőt alkalmaztunk. A növények szár átmérőjét a gyökérminták (*lsd. 3.7. fejezet*) és nitráttartalom meghatározáshoz (*lsd. 3.5. fejezet*) hasonlóan a nitrapyrinnel nem kezelt (Kt, Lt) és a nitrapyrinnel kezelt (Np, Np + Lt) állományokban mértük. A mérések során egységesen a talajfelszíntől számított alsó három nódusz feletti szár átmérőjét mértük meg, majd ezek átlagát vettük alapul (kezelésenként 20 db., véletlenszerűen kiválasztott növény).

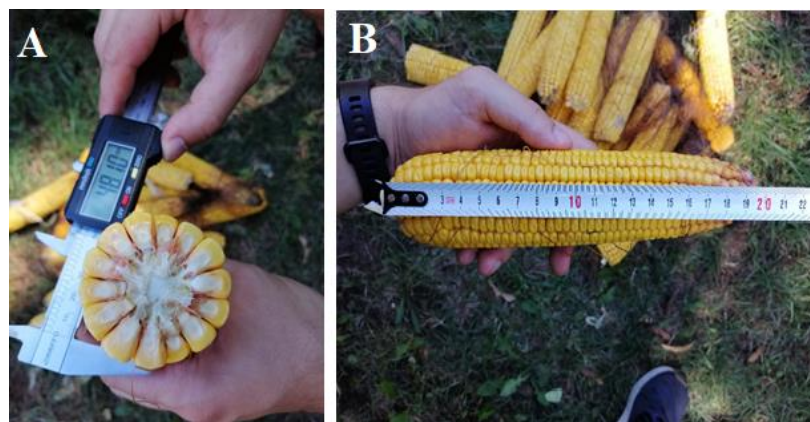


6. ábra: A szárvastagság mérése tolómérő segítségével

3.9. A termés mennyiségi és beltartalmi paramétereinek meghatározása

A termés mennyiségi vizsgálatait során az ezerszemtömeg, a kukoricacső hossza és átmérője is meghatározásra kerültek a csuhélevelek eltávolítását követően (kezelésenként 20 db., véletlenszerűen kiválasztott növény). A kukoricacső átmérőjét a mérőszalaggal mért kukoricacső hosszának felénél, tolómérő segítségével határoztuk meg.

A termés beltartalmi paramétereinek meghatározásához, egy mérés során, kezelésenként 20 db kukorica csőről származó szemtermés 500 g tömegű homogén keverékét vizsgáltuk. A szem fehérje, olaj és keményítő tartalmaz Infratech 1241 Grain Analyzer (FOSS, Hilleroed, Dánia) műszer segítségével mértük.



7. ábra: A: A kukoricacső vastagságának mérése; B: A kukoricacső hosszának mérése

3.10. A kukorica mesterséges fertőzése

A kukorica kórokozókkal szembeni ellenállóság vizsgálatához a kukoricacső *Aspergillus flavus* NVK 20 (NCAIM F.00048) és *Fusarium verticillioides* MRC 826 (NCAIM F.00935) penészgombák tiszta tenyészeivel történő mesterséges fertőzését végeztük el. A gomba törzseket a Mezőgazdasági és Ipari Mikroorganizmusok Nemzeti Gyűjteménye [NCAIM] (Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet, Budapest) biztosította. Az inokulumok elkészítéséhez a törzseket burgonya dextróz agar (PDA) táptalajra (Beever és Bollard, 1970; Merck Millipore, Németország) oltottuk le, majd leoltást követően a tenyészeteket 7 napon át inkubáltuk 25 °C-on (*F. verticillioides*), illetve 37 °C-on (*A. flavus*) (CLN 240 laboratóriumi inkubátor, Pol-Eko-Apparatura, Lengyelország). A frissen tenyésztett telepekről a konídiumokat steril vízben szuszpendáltuk, majd steril Miracloth szöveten (Merck Millipore, Németország) keresztül szűrtük. A spóraszuszpenziók sejtszámát

hematocitóméterrel (Bürker-kamra) határoztuk meg. A csőfuzáriózist okozó *F. verticillioides* patogénnel 2020. július 31-én, a kukorica címerhányásakor, míg az *A. flavus* gombával az intenzív rovarkártételek időszakában, augusztus 18-án fertőztük meg a kukoricacsöveket. A fertőzéseket kizárólag egészséges, tünetmentes csöveken végeztük. A fertőzések során mindkét kórokozó esetében steril fecskendőket használva (Chirana T. Injecta, Szlovákia) 1 ml spóraszuszpenziót (5×10^6 spóraszám) injektáltunk a cső csúcsi részén keresztül a bajuszcsatornába. Mivel mindkét kórokozó potenciális kockázatot jelent az emberi egészségre és a környezetre, a mesterséges fertőzést rendkívül körültekintően és elővigyázatosan, jól illeszkedő, N95 arcmaszk, védőszemüveg, védőruházat és kesztyű viselésével végeztük. Mindkét fertőzéshez steril tűket használtunk. A fertőzött kukoricacsöveket ezután 7 napig vízálló műanyag zacskóval fedtük le, ezzel a gombás fertőzés számára kedvező, a cső körül kialakuló párás mikroklímát teremtve. A 7. napot követően a szellőzés érdekében a műanyag zacskókat papírtasakokra cseréltük, melyeket csak a kukorica betakarításakor, 2020. szeptember 15-én vettünk le (Zuber et al., 1978). A fertőzés mértékét az egyes kezelések függvényében (Kt, Np, Lt, Np + Lt) százalékban (%) értékeltük, amelyet a kukoricacsövön lévő, szemmel látható fertőzés jeleit mutató szemek számából határoztunk meg.

3.11. A levélszövetek fiziológiai vizsgálata

A levélszövetek fiziológiai vizsgálataihoz a kukorica teljesen kifejlett, fiatal leveleit használtuk fel. A levélszövetek tápelemtartalmának meghatározásához a levélmintákat a lombtrágya kezelést követően, míg a többi paraméter (fotoszintetikus pigment tartalom, szuperoxid-dizmutáz aktivitás, prolin tartalom, malondialdehid tartalom) meghatározásához a kukorica R1 (virágzás kezdete) fenofázisában vettük. A mintavételezés során a friss szövetmintákat folyékony nitrogén segítségével azonnal lefagyasztottuk, majd további felhasználásig $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on tároltuk.

3.11.1. Elemtartalom meghatározás

A levelek mintavételezését az elemtartalom meghatározások esetében mindig a lombtrágya-kezelések után 1-1,5 héttel időzítettük, ezzel biztosítva, hogy a kijuttatott tápanyagok a mintavételezés időpontjára hasznosuljanak. A mintavételezés a levéllemez

egészből történt. A levélminták elemtartalmának meghatározását a HL-LAB Környezetvédelmi és Talajvizsgáló Laboratóriuma (Debrecen) végezte.

3.11.2. A fotoszintetikus pigmentek mennyiségi meghatározása

A levélminták klorofill *a*, klorofill *b*, illetve karotinoid tartalmának mennyiségi meghatározását Moran és Porath (1980) eljárása alapján végeztük. A mérésekhez a kukorica teljesen kifejlett, fiatal leveleiből származó friss szövetmintákat a feldolgozásig folyékony nitrogénben tároltuk, majd a minták 50 mg tömegű részleteit oldottunk fel 5 ml N,N-dimetilformamidban (4 °C, 72 óra). Az így kapott kivonatok abszorbanciáját spektrofotometriásan határoztuk meg 470 nm, 647 nm és 664 nm hullámhosszon (Nicolet Evolution 300 UV-vis spektrométer; Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) Az eredmények analízisekor Wellburn (1990) módszertanát követtük.

3.11.3. Szuperoxid-dizmutáz aktivitás meghatározása

A szuperoxid-dizmutáz (SOD) aktivitását Giannopolitis és Ries (1977), illetve Beyer és Fridovich (1987) módszereit adaptálva határoztuk meg. A szövetminták 400 mg tömegű részleteit 4 ml NaPO₄-pufferben (50 mM, pH 7,8) homogenizáltuk, amely összetételében továbbá 1 mM fenilmetánszulfonil-fluoridot (PMSF), 0,1 mM EDTA-t és 1 w/v% polivinil-pirrolidont (PVP) is tartalmazott. Centrifugálást (10000 g, 4 °C, 15 perc) követően a felülúszókból származó kivonatok SOD aktivitását 70 µM nitroblue tetrazolium (NBT) eloxidálása révén spektrofotometriásan követtük nyomon, 560 nm hullámhosszon mértük (Nicolet Evolution 300 UV-Vis Spektrométer).

3.11.4. A prolin tartalom meghatározása

A szövetmintákat folyékony nitrogénben morzsoltuk, majd azok 300 mg tömegű részleteit 600 µl etanolban (70 v/v%) homogenizáltuk (Hummel et al., 2010). Centrifugálást (10000 g, 4 °C, 15 perc) követően a felülúszó 500 µl-ét 500 µl ninhidrin oldattal (1 w/v%; 60 w/v% ecetsavban), és 500 µl 20 v/v% etanollal elegyítettük. A reakcióelegyeket 95 °C-on inkubáltuk (20 perc), majd az abszorbancia értékeket centrifugálást követően (12000 g, 4 °C, 1 perc) 520 nm hullámhosszon detektáltuk

(Nicolet Evolution 300 UV-Vis spektrométer). A prolintartalmakat standard görbe segítségével határoztuk meg (Carillo és Gibon 2011).

3.11.5. A malondialdehid tartalom meghatározása

A szövetmintákat folyékony nitrogénben morzsoltuk, majd azok 100 mg tömegű részleteit 0,25 w/v% tiobarbitursav (TBA) és 10 w/v % triklór-ecetsav (TCA) 1 ml térfogatú elegyében homogenizáltuk. Centrifugálást (10000 g, 4 °C, 15 perc) követően 200 µl felülúszóhoz 800 µl reagenst mértünk, melynek összetétele 0,5 w/v % TBA és 20 w/v % TCA volt. A reakcióelegyeket rázóinkubátorba (Thermo-Shaker, Bioshan TS-100) helyeztük (95 °C, 30 perc), majd ezt követően jégágyon hűtöttük. Az MDA tartalom meghatározásához a minták abszorbanciáját 532 nm és 600 nm hullámhosszon detektáltuk (Heath és Packer 1968).

3.12. A talajinkubációs kísérlet leírása

A nitrapyrin kezelés hatékonyságát különböző hőmérsékletű talajminták nitrát-tartalom változásán keresztül, laboratóriumi körülmények között is nyomon követtük. A talaj tulajdonságok különbözőségéből adódóan a torzító hatások kiküszöbölése érdekében a talajmintákat azonos helyről, a DE MÉK Bemutatókertjéből vettük, majd 200 g talajmennyiségeket helyeztünk el 300 ml-es műanyagedényekben, amelyek mintákhoz a nitrifikációs tevékenység aktivizálása érdekében 12 mg ammónium-szulfátot, majd a talajminták egy részéhez 1 ml nitrapyrin oldatot (300 mg ml⁻¹) adtunk (Powell és Prosser, 1986). Ezt követően a mintákat 10, 15, 20 és 25 °C hőmérsékleten inkubáltuk 3 héten keresztül (CLN 240 laboratóriumi inkubátor, Pol-Eko-Apparatura, Lengyelország) úgy, hogy azok nedvességtartalmát igyekeztünk 55-65%-os szinten tartani. A talaj nitráttartalmat hetente egyszer (kezelésenként 3 edényt), nitrátion-szelektív elektróda segítségével (Nitrat 2000, Stelzner, Németország) határoztuk meg a gyártó által ajánlott lépéseknek megfelelően.

3.13. Statisztikai vizsgálatok

A statisztikai elemzéseket az R programnyelv (v4.1.1; R Core Team 2021) és az „agricolae” R csomag (v1.3-5; De Mendiburu 2021) használatával végeztük. A mintaátlagok összehasonlítására Student-féle t -próbát, valamint Duncan-féle többszörös tartományteszttel kiegészített egytényezős varianciaanalízist (ANOVA) végeztünk 5%-os szignifikanciaszinten ($p < 0,05$).

4. EREDMÉNYEK

4.1. A talaj nitrát-tartalmának mérési eredményei 2019-ben

A nitrapyrin hatékonyságának vizsgálatához a talaj nitrát-tartalmának változását is nyomon követtük, melynek eredményeit a 6. táblázat szemlélteti.

6. táblázat: A talaj nitrát-tartalom változásának mérési eredményei 2019-ben

Idő (hét) [#]	AG-19		HD-19	
	Kt	Np	Kt	Np
3.	6,68 ± 1,02	10 ± 1,19*	14,3 ± 3,10	6,61 ± 1,09*
7.	6,74 ± 1,31	9,08 ± 0,91*	0,91 ± 0,10	2,88 ± 1,65*
10.	10,34 ± 0,31	10,21 ± 0,57	0,98 ± 0,21	1,39 ± 0,21

A táblázat kezelésenként 6 független talajminta nitráttartalmának (mg ml⁻¹) átlagát és szórását tartalmazza. [#] - A nitrapyrin kijuttatásától számított eltelt hetek száma; * - Szignifikáns különbség a kezeletlen talajok nitráttartalmához képest (Student-féle t-teszt; p < 0,05). Kt: kezeletlen; Np: nitrapyrin (vetés előtt).

2019-ben két helyszínen végeztünk méréseket (AG-19, HD-19), melyek talajtani adottságaikban jelentősen különböztek egymástól, hiszen míg az AG-19 helyszín talajának fizikai félesége vályog, a HD-19 helyszín talajának homok (lsd.: 3.1. fejezet, 3. táblázat). Kutatók vizsgálatai alapján elméletben a nitrapyrin kezelés hatására eleinte alacsonyabb nitrát tartalom várható a talajban, hiszen a hatóanyag az ammónium-ion átalakulását késlelteti (Vanelli és Hooper, 1992), azonban a nitrát tartalom pillanatnyi mennyiségét a mintavétel időpontjában megannyi tényező, így a talajtani adottságok és meteorológiai körülmények is befolyásolják (lsd.: 2.6.3. fejezet). A fent leírtak alapján tehát adott esetben az alacsonyabb és magasabb talaj nitráttartalom is igazolhatja a nitrapyrin hatékonyságát.

Eredményeink alapján a nitrapyrin kezelés mindkét helyszínen egészen a kezelést követő második hónapig szignifikáns különbséget eredményezett a kezeletlen (Kt) és a nitrapyrinnel kezelt (Np) talajok nitrát tartalma között, ugyanakkor a nitrát tartalom változása a két területen változó dinamikát mutatott. Az AG-19 területen a kezelést követő két hónapig a kezeletlen (Kt) talaj nitrát tartalma szignifikánsan alacsonyabb volt a nitrapyrinnel kezelt (Np) talajhoz képest. Ez feltehetőleg a kezelést követő időszakban lehulló nagyobb mennyiségű csapadékkal magyarázható, amely következtében a kezeletlen talajban (Kt) az intenzívebb nitrifikációs tevékenység során létrejövő nagy mennyiségű nitrát-ion a csapadék hatására a talaj mélyebb rétegébe mosódhatott, ezzel

pedig jelentősen alacsonyabb nitrát tartalmat eredményezve a mintavétel időpontjára. Ezzel szemben a nitrapyrinnel kezelt (Np) talajban az ammónium-ionok nitrifikációja késleltetve indulhatott meg, így a kimosódott nitrát mennyisége is csökkent, amely megmagyarázza a mintavétel időpontjában mérhető magasabb nitrát tartalmat.

A HD-19 területen a kezelést követő egy hónapig az AG-19-hez képest eleinte magasabb, majd alacsonyabb nitrát tartalmat mértünk a nitrapyrines kezelés hatására. Az alacsonyabb nitrát tartalom minden bizonnyal a nitrifikációs tevékenység hatékony gátlásával magyarázható, de az alacsonyabb nitrát tartalmat ezen túlmenően a nagy mennyiségű csapadék hatására a homokos talajból történő nitrapyrin intenzívebb kimosódása is eredményezheti, amelyre Bundy és Bremmer (1973) is felhívta a figyelmet. A nitrapyrin hatékonyságát továbbá az is igazolja, hogy a kezelést követő második hónapban a kezeletlen (Kp) talajból kimosódott nitrát és így a N veszteség rendkívül nagy (szinte nem is maradt felvehető nitrát a talajban), szemben a nitrapyrinnel kezelt talajban (Np), amely hatására a második hónapban több N forrás állt rendelkezésre a növények számára. Piccini és mtsai (2016), valamint Hess és mtsai (2020) kutatási eredményei szintén igazolják, hogy a nitrát veszteség mértéke a homoktalajokban a legmarkánsabb.

Mindkét területre jellemző, hogy az idő múlásával a nitrapyrin kezelés hatására jelentkező különbség fokozatosan csökkent, így a 10. héten már nem állapítottunk meg jelentős eltérést a kezeletlen (Kt) és kezelt (Np) talajminta nitrát-tartalma között. Összességében a két helyszínen igazolható a nitrapyrin hatékonysága, amely nagy valószínűséggel a kezelést követő csapadékos időjárásnak köszönhető. Ezt korábbi, a nitrapyrin vizsgálatával foglalkozó kutatások is igazolják, miszerint egy csapadékkal jól ellátott, öntözött területen a nitrapyrin fokozott hatékonysága várható (Ren et al, 2017; Ren et al., 2020).

4.2. A talaj nitrát-tartalmának mérési eredményei 2020-ban

2020-ban a nitrapyrin kezelés hatékonyságát a talaj nitrát-tartalom változásának függvényében szintén két helyszínen (BK-20, KF-20) vizsgáltuk, melynek eredményeit a 7. táblázat mutatja. A BK-20 és BK-21 kísérletekben a nitrapyrin kései kijuttatására (Np⁺) is sor került, melynek eredményeit 4.11. fejezetben mutatom be.

7. táblázat: A talajnitrát-tartalom változásának mérési eredményei 2020-ban

Idő (hét) [#]	BK-20			KF-20	
	Kt	Np	Np ⁺	Kt	Np
1-2.	80 ± 1,0	80 ± 1,0	-	14 ± 4,01	16 ± 8,04
3-4.	69 ± 1,7	74 ± 2,5	-	128 ± 15,71	46 ± 6,65*
5-6.	68 ± 3,0	79 ± 5,6*	-	200 ± 39,66	117 ± 29,28*
7-8.	23 ± 2,6	29 ± 1,0*	58,3 ± 9,0*	-	-
9-10.	14 ± 1,5	11 ± 3,0	9,3 ± 1,5	63 ± 24,43	21 ± 4,35*
11-12.	-	-	-	-	-
12-13.	-	-	-	-	-
14-15.	10 ± 1,5	10 ± 1,0	9,3 ± 0,5	37 ± 13,74	14 ± 8,32

A táblázat kezelésenként 6 független talajminta nitráttartalmának (mg ml⁻¹) átlagát és szórását tartalmazza. [#]– A nitrátpyrim kijuttatásától számított eltelt hetek száma; *– Szignifikáns különbség a kezeletlen talajok nitráttartalmához képest (Student-féle *t*-teszt; *p* < 0,05). Kt: kezeletlen; Np: nitrátpyrim (vetés előtt); Np⁺: nitrátpyrim (vetés után).

A BK-20 helyszínén a nitrátpyrim kijuttatását követően csak az 5. héten tapasztaltunk statisztikailag is igazolható, de kis mértékű különbséget a kezeletlen (Kt) és a nitrátpyrimmel kezelt (Np) talaj nitrát-tartalma között, amely különbség még a 8. héten is mérhető volt, azonban ez a differencia az idő múlásával mérséklődött és a 10. hétre megszűnt. Megfigyelhető, hogy a nitrátpyrimmel kezelt (Np) talajban egészen a 10. heti mérésig több nitrátmennyiség állt rendelkezésre, amelynek hangsúlyozása azért is fontos, mert a kijuttatást követő időszak (főleg a vegetáció első fele) meglehetősen csapadékos volt. Azaz, a nitrátpyrimmel kezelt talajban mérhető (Np) magasabb nitráttartalomra valószínűleg a rendszeres csapadék hatására jelentkező, a kezeletlen talajból (Kt) fokozott mértékben kimosódott nitráttartalom adhat magyarázatot. Eredményeink Singh és Nelson (2019) közleményében leírtakkal, miszerint csapadékos időszakban, amikor a nitrát nagy mennyiségű kimosódása várható, a nitrifikációs inhibitorok alkalmazásával több N-formát biztosíthatunk a növények számára. A KF-20 kísérlet helyszínén a nitrátpyrimmel kezelt talaj nitrát-tartalma egészen a kukorica vetésétől számított 10. hétig szignifikánsan alacsonyabb volt a kezeletlen talajhoz képest, mely differencia az idő múlásával egyre csökkent és a 14. hétre megszűnt. Habár a két helyszínen azonos klimatikus adottságok uralkodtak, a nitrátpyrim kezelés a KF-20 helyszínén bizonyult hatékonyabbnak, amely a kezelt (Np) és kezeletlen (Kt) talaj közötti nitrát-tartalomban mért nagyobb differenciák és a hosszabb hatástartam is alátámasztanak. Ezáltal valószínűsíthető, hogy a nitráttartalmat a klimatikus adottságokon túl a talajok N-tartalma is jelentősen befolyásolhatja, ugyanis fontos különbség a két helyszín között, hogy míg a BK-20 tápanyagutánpótlását szerves trágyával, addig a KF-20 helyszínén műtrágyával végezték.

A témában íródott szakirodalom hiányából adódóan ezen felvetés tisztázásához további vizsgálatok szükségesek, azonban Wolt (2000) magyarázatul szolgálhat eredményeinkre, miszerint a szerves trágyázott talajban a nitrápyrin hatékonysága csökkenhet a nagyobb mennyiségű humuszanyaghoz való erősebb adszorpciója miatt.

4.3. A talaj nitrát-tartalmának mérési eredményei 2021-ben

2021-ben három helyszínen (BK-21, KF-21, AG-21) vizsgáltuk a nitrápyrin hatékonyságát a talaj nitrát-tartalom változásának függvényében, melynek eredményeit a 8. táblázat szemlélteti. A BK-20 és BK-21 kísérletekben a nitrápyrin kései kijuttatására (Np^+) is sor került, melynek eredményeit 4.11. fejezetben mutatom be.

8. táblázat: A talaj nitrát-tartalom változásának mérési eredményei 2021-ben

Idő (hét) [#]	BK-21			KF-21		AG-21	
	Kt	Np	Np^+	Kt	Np	Kt	Np
1-2	296 ± 1,00	298 ± 1,00	-	34 ± 1,52	34 ± 1,52	176 ± 2,64	176 ± 2,54
3-4	145 ± 11,6	301 ± 62,14*	-	62 ± 4,35	75 ± 2,51*	154 ± 14,84	253 ± 8,73*
5-6	106 ± 6,00	150 ± 79,87*	-	68 ± 13,52	48 ± 13,74*	61 ± 14,46	82 ± 16,44
7-8	154 ± 48,23	275 ± 38,88*	-	31 ± 6,08	52 ± 7,37*	177 ± 34,96	161 ± 25,23
9-10	415 ± 35,30	433 ± 37,00	273 ± 31,50	84 ± 15,50	96 ± 10,06	49 ± 8,00	38 ± 9,07*
11-12	265 ± 28,61	267 ± 53,00	118 ± 8,62	-	-	-	-
12-13	52 ± 3,60	55 ± 13,74	53 ± 13,45	-	-	-	-

A táblázat kezelésenként 6 független talajminta nitráttartalmának (mg ml^{-1}) átlagát és szórását tartalmazza. [#] - A nitrápyrin kijuttatásától számított eltelt hetek száma; * - Szignifikáns különbség a kezeletlen talajok nitráttartalmához képest (Student-féle *t*-teszt; $p < 0,05$). Kt: kezeletlen; Np: nitrápyrin (vetés előtt); Np^+ : nitrápyrin (vetés után).

A BK-21 helyszínén a nitrápyrin hatékonyságát igazolta, hogy a kezelést követő 8. hétig jelentősen magasabb nitrát-tartalmat mértünk a kezelt (Np) talajokban, mint a kezeletlenekben (Kt). A KF-21 kísérleti helyszínen szintén a kezelést követő 8. hétig tapasztaltunk jelentős különbséget a nitrát-tartalomban, azonban a nitrápyrin hatására hol magasabb, hol pedig alacsonyabb értékeket mértük a kezeletlen talajban mért eredményekhez képest. Az AG-21 helyszínén mindössze a 3., illetve a 10. héten volt a nitrát-tartalomban jelentős különbség. Összességében elmondható, hogy a nitrápyrin kezelés hatékonysága elsősorban a BK-21 és KF-21 területeken igazolható, hiszen mindkét területen a kijuttatástól számított 7. hétig jelentős differencia volt a kezelt (Np) és kezeletlen (Kt) talaj nitrát-tartalma között, amely minden bizonnyal a vegetáció időszakának első felét jellemző gyakori csapadéknak is köszönhető, míg az AG-21 helyszínén a nitrát-tartalom közötti jelentős különbséget egyedül a nitrápyrin kezelést

követő 5. héten tapasztaltunk. Eerre lehetséges magyarázatul Bundy és Bremmer (1973) nitrapyrinnel foglalkozó kutatási eredménye szolgálhat, amelyben a különböző fizikai féleségre hívta fel a figyelmet, miszerint a nitrapyrin csökkent hatékonysága tapasztalható az alacsonyabb agyagtartalmú talajokban a hatóanyag nagyobb mértékű kiürülése miatt. Kísérletünkben a BK-21 és KF-21 területeken agyagos vályog, azaz kolloidokban gazdagabb, addig az AG-21 területén vályogtalaj, azaz alacsonyabb agyagtartalmú talaj uralkodott, így kutatási eredményeink megegyezik Bundy és Bremmer (1973) eredményeivel.

4.4. A relatív klorofill tartalom mérési eredményei a kísérleti években

A nitrapyrin és lombtrágya kezelések hatékonyságát a kukorica levelek relatív klorofill tartalmának mérésén keresztül is nyomon követtük, melynek eredményeit a 9. táblázat mutatja.

9. táblázat: A relatív klorofill tartalom változása a kezelések függvényében

Év	Kísérletek	Kt	Np	Lt	Np+Lt	Np ⁺
2019	AG-19	55,93 ± 5,07 ^a	61,35 ± 3,52 ^b	62,62 ± 3,07 ^{bc}	64,52 ± 3,34 ^c	-
	HD-19	47,14 ± 11,29 ^a	72,74 ± 16,51 ^b	-	-	-
2020	BK-20	42,19 ± 3,35 ^a	48,19 ± 3,78 ^b	41,79 ± 4,31 ^a	52,63 ± 5,40 ^b	53,72 ± 3,28 ^c
	KF-20	61,91 ± 3,66 ^a	63,41 ± 4,17 ^a	62,71 ± 2,63 ^a	66,97 ± 4,98 ^b	-
2021	AG-21	47,21 ± 4,35 ^a	51,03 ± 3,96 ^b	46,91 ± 4,94 ^a	48,75 ± 2,13 ^{ab}	-
	BK-21	41,38 ± 3,71 ^a	49,59 ± 3,81 ^b	39,81 ± 3,85 ^a	48,69 ± 3,98 ^b	45,99 ± 5,05 ^{ab}
	KF-21	47,97 ± 3,63 ^a	51,07 ± 4,29 ^b	49,89 ± 4,12 ^{ab}	55,22 ± 3,49 ^c	-

A táblázat kezelésként 20 független levélminta SPAD-értékének átlagát és szórását tartalmazza. A különböző kisbetűk (a, b, c) a kezelések közötti szignifikáns eltérést jelölik egy adott kísérletben (egytényezős ANOVA és Duncan-féle post hoc teszt; $p < 0,05$). Kt: kezeletlen; Np: nitrapyrin (vetés előtt); Lt: lombtrágya; Np + Lt: nitrapyrin (vetés előtt) + lombtrágya; Np⁺: nitrapyrin (vetés után).

A kísérleti helyszínek közül a HD-19 területén lombtrágyás kezelést nem végeztünk. Eredményeink alapján a nitrapyrin kezelés (Np) hatására a kísérletek mindegyikében növekedett a levelek relatív klorofill tartalma a kezeletlen (Kt) állományokhoz képest, mely várakozásainknak megfelelően alakult, hiszen közzismert, hogy a N a klorofill molekula része (Bassi et al., 2018), így a N-ellátottság szoros összefüggést mutat a klorofill tartalommal (Singh és Nelson, 2019). Mivel a nitrapyrin célja a növények számára hozzáférhető N-formák hosszabb távon történő biztosítása, a nitrapyrin hatására

növekvő SPAD-értékeket a növények kedvezőbb N-ellátottsága magyarázhatja. Megállapításunkat számos korábbi kutatás is alátámasztja, miszerint a nitrapyrin hatására a kedvezőbb N-ellátottság növeli a levelek klorofill tartalmát és a fotoszintézis intenzitását, ezzel növelve a SPAD-értékeket is (Sowinski és Głab, 2018; Nozari et al., 2020; Dawar et al., 2021). 2020-ban, egyedül a KF-20 kísérletben tapasztalt kismértékű klorofill tartalom növekedésének hátterében a klimatikus adottságok állhatnak, ugyanis különösen a vegetáció első felében csapadékhiány uralkodott (*lsd. 3.1.3. fejezet, 2020*), amely következtében a növények talajon keresztüli N-felvétele nehézkesebbé válhatott. A csapadékelátottság és a SPAD értékek közti összefüggésekre Ványiné Széles (2010) is felhívta arra a figyelmet, hogy szárazabb időszakokban a SPAD értékek csökkenése tapasztalható.

A lombtrágya kezelés (Lt) az AG-19 (2019) kísérlet kivételével önmagában nem befolyásolta érdemben a levelek relatív klorofill tartalmát. Ez egybevág Ling és Silberbush (2002) következtetésével, miszerint a lombtrágyázás elsősorban a hiánybetegségek kezelésére szolgáló, a tápanyagutánpótlásnak csupán egy kiegészítő eleme, mely a gyökéren keresztül felvett makroelemek – így a N pótlására nem alkalmas.

Az elmúlt 3 év eredményei alapján arra következtethetünk, hogy a levélszövetek nagyobb relatív klorofill tartalmát elsősorban a nitrapyrint tartalmazó kezelések eredményezik, mely értékei a lombtrágyás kezeléssel való kiegészítés hatására adott esetben további jelentős növekedést eredményeztek. Ez minden bizonnyal a nitrapyrin és a N-t is tartalmazó lombtrágya együttes kezeléséből adódó, a növény számára még kedvezőbb N-ellátottsági körülményekkel magyarázható.

4.5. A gyökértömeg és szárvastagság mérési eredményei a kísérleti években

Annak érdekében, hogy a nitrapyrin hatását a kukorica biomassza produkciójára megvizsgáljuk, a kezeletlen (Kt) és nitrapyrinnel kezelt (Np) állományok gyökértömegét és szárvastagságát is meghatároztuk, melynek eredményei a 10. táblázatban látható.

10. táblázat: A gyökértömeg és szárvastagság változása a nitrapyrin kezelés következtében

Év	Kísérlet	Gyökértömeg (g)			Szárvastagság (mm)		
		Kt	Np	Np ⁺	Kt	Np	Np ⁺
2019	AG-19	20,14 ± 7,64 ^a	27,91 ± 8,61 ^b	-	23,71 ± 2,41 ^a	27,19 ± 2,51 ^b	-
	HD-19	23,58 ± 6,08 ^a	31,02 ± 7,18 ^b	-	19,56 ± 1,40 ^a	23,18 ± 1,38 ^b	-
2020	KF-20	33,80 ± 8,53 ^a	39,10 ± 6,98 ^a	-	25,99 ± 2,22 ^a	27,76 ± 1,18 ^b	-
	BK-20	14,72 ± 5,63 ^a	28,06 ± 6,68 ^b	45,30 ± 8,13 ^c	17,65 ± 1,39 ^a	20,67 ± 1,18 ^b	23,27 ± 1,22 ^c
2021	AG-21	25,67 ± 3,06 ^a	32,39 ± 4,53 ^b	-	19,91 ± 1,30 ^a	22,47 ± 1,57 ^b	-
	BK-21	11,85 ± 2,26 ^a	21,67 ± 2,10 ^b	18,94 ± 1,83 ^b	17,87 ± 1,54 ^a	21,43 ± 1,20 ^b	21,16 ± 0,63 ^b
	KF-21	31,80 ± 3,70 ^a	39,60 ± 2,70 ^b	-	17,47 ± 2,28 ^a	23,60 ± 1,24 ^b	-

A táblázat kezelésenként 20 független mérés átlagát és szórását tartalmazza. A különböző kisbetűk (a, b, c) a kezelések közötti szignifikáns eltérést jelölik egy adott kísérletben (egytényezős ANOVA és Duncan-féle post hoc teszt; $p < 0,05$). Kt: kezeletlen; Np: nitrapyrin (vetés előtt); Np⁺: nitrapyrin (vetés után).

Eredményeim alapján elmondható, hogy egyedül a KF-20 kísérletet kivételével a nitrapyrin kezelés (Np) szignifikáns mértékben növelte a gyökértömeget és a szárvastagságot. Ez alapján arra következtethetünk, hogy a nitrapyrin hatására jelentősen több N állt rendelkezésre a talajban a növény számára, amely a nagyobb biomassza gyarapodásban nyilvánult meg. Megállapításunk egyezést mutat Cambui és mtsai. (2011) közleményével, melyben hangsúlyozták, hogy a biomassza növekedést elsősorban a növény számára elérhető N forrás mennyisége határozza meg. A nitrapyrin és a biomassza gyarapodás közötti pozitív korrelációt korábbi kutatásokban is alátámasztották (Ren et al., 2017; Zhou et al., 2017; Cai et al., 2018; Dawar et al.; 2021), mely leginkább a biomassza termelés alapjául szolgáló, a kedvezőbb N-felvétel következtében megnövekedett nettó asszimilációs felülettel magyarázható (Cai és mtsai (2018)). A nitrapyrin hatékonyságát 2020-ban, egyedül a KF-20 kísérletben nem tudtuk statisztikailag igazolni, mely összhangban van a 4.4. fejezetben leírtakkal, miszerint a vegetáció első felében uralkodó csapadékhiány következtében valószínű, hogy a növények a kritikus időszakokban nem jutottak elegendő N-hez, amely megmagyarázza a biomassza növekedés elmaradását a kezeletlen (Kt) állományokhoz képest.

4.6. A termés mennyiségi és beltartalmi paramétereinek mérési eredményei a kísérleti években

A kísérleti években az egyes kezelések függvényében az ezerszemtömeg, csőhossz és csővastagság, illetve a termés beltartalmi paraméterek változását a 11. és 12. táblázatok mutatják.

11. táblázat: A termés mennyiségi paramétereinek változása a kezelések következtében

Paraméter	Kezelés	2019. év		2020. év		2021. év		
		AG-19	HB-19	KF-20	BK-20	AG-21	BK-21	KF-21
Ezerszemtömeg (g)	Kt	266,82 ± 8,07 ^a	284,81 ± 5,86	404,91 ± 5,74 ^a	370,46 ± 38,5 ^b	214,1 ± 7,81 ^a	346 ± 32,56 ^a	292 ± 8,48 ^a
	Np	273,94 ± 3,47 ^{ab}	309,37 ± 10,64 [*]	426,80 ± 7,24 ^c	419,28 ± 26,34 ^c	237,4 ± 6,99 ^b	475 ± 18,28 ^c	337 ± 7,80 ^c
	Lt	281,15 ± 5,75 ^{bc}	n.a.	412,60 ± 5,97 ^b	335,42 ± 29,88 ^a	216,8 ± 10,30 ^a	398 ± 20,40 ^b	311 ± 8,79 ^b
	Np + Lt	287,27 ± 5,62 ^c	n.a.	433,40 ± 6,46 ^d	398,62 ± 38,29 ^{bc}	238,6 ± 7,69 ^b	404 ± 25,95 ^b	238 ± 14,41 ^c
	Np ⁺	n.a.	n.a.	n.a.	415,11 ± 26,00 ^c	n.a.	391 ± 22,84 ^b	n.a.
Csőhossz (mm)	Kt	197,25 ± 17,02 ^a	188,8 ± 1,78	190 ± 3,25 ^a	191,3 ± 2,36 ^a	198,7 ± 1,57 ^a	152,2 ± 1,15 ^a	173,1 ± 1,15 ^a
	Np	214,85 ± 15,32 ^b	207,3 ± 0,83 [*]	212,2 ± 1,42 ^{bc}	196,4 ± 0,83 ^{ab}	219,7 ± 0,82 ^b	221,2 ± 1,38 ^d	234,6 ± 1,13 ^c
	Lt	208,55 ± 17,20 ^b	n.a.	198,4 ± 1,43 ^{ab}	196,1 ± 1,65 ^{ab}	207,9 ± 0,5 ^a	188,3 ± 2,17 ^b	200,0 ± 1,19 ^b
	Np + Lt	217,40 ± 16,21 ^b	n.a.	220,0 ± 0,74 ^c	210,9 ± 1,65 ^{bc}	219,5 ± 0,90 ^b	221,8 ± 1,19 ^d	226,3 ± 0,81 ^c
	Np ⁺	n.a.	n.a.	n.a.	219,0 ± 0,86 ^c	n.a.	207,8 ± 1,08 ^c	n.a.
Csővastagság (mm)	Kt	42,38 ± 2,10 ^a	43,62 ± 1,51	46,96 ± 4,44 ^a	48,55 ± 2,94 ^b	43,95 ± 2,35 ^a	42,92 ± 5,11 ^a	44,20 ± 1,93 ^a
	Np	45,10 ± 3,48 ^b	48,95 ± 2,11 [*]	49,12 ± 1,63 ^{ab}	49,13 ± 2,16 ^b	48,63 ± 1,76 ^b	49,71 ± 2,40 ^c	53,20 ± 1,23 ^{bc}
	Lt	44,40 ± 1,84 ^b	n.a.	48,41 ± 1,52 ^a	46,54 ± 1,71 ^a	46,94 ± 1,36 ^a	45,85 ± 3,65 ^b	52,11 ± 2,89 ^b
	Np + Lt	46,45 ± 3,33 ^b	n.a.	51,27 ± 0,57 ^b	49,49 ± 2,16 ^b	48,07 ± 1,45 ^b	50,89 ± 1,80 ^c	53,80 ± 1,62 ^c
	Np ⁺	n.a.	n.a.	n.a.	51,65 ± 1,66 ^c	n.a.	48,30 ± 2,71 ^{bc}	n.a.

A táblázat kezelésenként 20 független mérés átlagát és szórását tartalmazza. A különböző kisbetűk (a, b, c, d) a kezelések közötti szignifikáns eltérést jelölik egy adott kísérletben (egytényezős ANOVA és Duncan-féle post hoc teszt; $p < 0,05$); * - Szignifikáns különbség a nitrapyrinnel nem kezelt növényállományhoz képest (Student-féle t-teszt; $p < 0,05$). Kt: kezeletlen; Np: nitrapyrin (vetés előtt); Lt: lombtrágya; Np + Lt: nitrapyrin (vetés előtt) + lombtrágya; Np⁺: nitrapyrin (vetés után).

12. táblázat: A termés beltartalmi paramétereinek változása a kezelések következtében

Paraméter	Kezelések	2019. év		2020. év		2021. év		
		AG-19	HB-19	KF-20	BK-20	AG-21	BK-21	KF-21
Fehérjetartalom (%)	Kt	11,0	6,6	5,8	5,6	12,0	8,7	9,2
	Np	12,0	7,1	6,9	5,6	12,4	9,1	9,8
	Lt	11,4	-	6,5	5,3	12,4	8,9	9,6
	Np + Lt	11,7	-	6,7	5,7	12,3	9,3	9,5
	Np ⁺	-	-	-	6,1	-	8,8	-
Keményítőtartalom (%)	Kt	63,7	66,9	63,0	64,1	30,4	53,7	47,5
	Np	63,7	66,8	63,3	64,2	22,6	53,8	49,4
	Lt	63,3	-	63,0	63,7	25,2	54,7	48,1
	Np + Lt	64,7	-	63,3	64,4	30,6	54,2	51,4
	Np ⁺	-	-	-	64,1	-	54,4	-
Olajtartalom (%)	Kt	3,8	4,0	2,9	2,85	6,3	4,6	3,8
	Np	4,0	4,0	3,0	3,17	7,0	4,6	4,2
	Lt	4,2	-	3,5	3,3	7,1	4,3	4,3
	Np + Lt	4,0	-	3,3	2,99	6,8	4,5	4,1
	Np ⁺	-	-	-	3,1	-	4,4	-

A táblázat kezelésként 3 független mérés átlagát tartalmazza. Kt: kezeletlen; Np: nitrápyrin (vetés előtt); Lt: lombtrágya; Np + Lt: nitrápyrin (vetés előtt) + lombtrágya; Np⁺: nitrápyrin (vetés után).

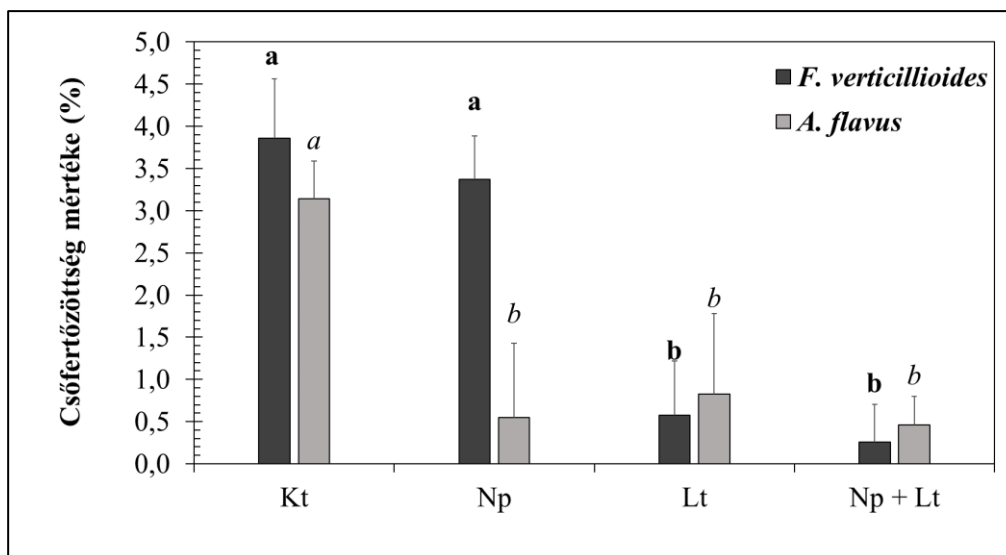
Az ezerszemtömeg, csőhossz és csővastagság paraméterek változását tekintve elmondható, hogy a kezeletlen (Kt) állományokhoz képest az önmagában kijuttatott nitrápyrin (Np), lombtrágya (Lt), illetve a kombinált kezelés (Np + Lt) hatására is szignifikáns növekedést tapasztaltunk (ez alól egyedüli kivétel a BK-20 kísérlet, ahol a lombtrágyás kezelés hatására a csővastagság érdekes módon alulmaradt). Habár a három kezelés (Np, Lt, Np + Lt) hatékonysága között nem minden esetben állapítottunk meg jelentős differenciát, összességében kijelenthető, hogy elsősorban a nitrápyrines (Np) kezelés következtében tapasztaltunk növekedést, amely a lombtrágyával történő kiegészítő kezelés (Np + Lt) hatására adott esetben további növekedést eredményezett. Ezek alapján arra következtethetünk, hogy a termés mennyiségi paraméterek javulását leginkább a nitrápyrint tartalmazó kezelések idézték elő (Np, Np + Lt). Ez egybevág Ren és mtsai. (2017) által leírtakkal, miszerint a nitrápyrin hatására az ezerszemtömeg jelentős növekedését tapasztalták. A nitrápyrin termésmenvelő hatását a közelmúltban megjelenő közlemények (Dawar et al, 2021; Woodward et al., 2021) is igazolták, melynek háttérben szintén a nitrápyrin kezelés hatására a talaj kedvezőbb N-felvételi adottsága állhat, amely a növények magasabb terméspotenciálját eredményezi. Schlüter és mtsai.

(2012) közleményükben szintén felhívták a figyelmet arra, hogy a termésmennyiség alakulását leginkább a talajban elérhető N mennyisége határozza meg.

A termés beltartalmi értékeinek vonatkozásában összességében kismértékű változást tapasztaltunk a kezelések hatására. Megállapítható, hogy a fehérjetartalom a legtöbb esetben elsősorban a nitrápyrin (Np), illetve a kombinált (Np + Lt) kezelés következtében emelkedett. Singh és Nelson (2019), Nozari és mtsai. (2020), illetve Goos és Johnson (1999) a nitrápyrin kezelés következtében szintén a fehérjetartalom növekedését tapasztalták. Erre magyarázatul szolgálhat az a tény, miszerint a fehérjeszintézisben a N alapvető fontosságú, így a nitrápyrin kezelés hatására a talajban kialakuló, kedvezőbb N-felvételi körülmények a növények javuló N-hasznosíthatóságát, illetve a fehérjetartalom növekedését eredményezhették. Ezt erősíti Széles és mtsai. (2019) kutatása is, mely során az emelkedett N-trágyázás hatására magasabb fehérjetartalmat mértek a kukoricatermésben. Egy korábbi, a lombtrágya kezelések hatékonyságának vizsgálatával foglalkozó kutatásunk során a kezelések hatására a keményítőtartalom növekedését tapasztaltuk (Rácz és Radócz, 2020b), azonban jelen eredményeink alapján sem a keményítő-, sem az olajtartalom változását illetően nem lehet egyértelmű következtetéseket levonni. Eredményeinket Getmanec és Kljavzo (1981) megállapítása támasztja alá, miszerint a két paraméter növekedéséhez leginkább a megfelelő P és K ellátottság járul hozzá. Mindazonáltal figyelemre méltó, hogy sok esetben mindhárom kezelés (Np, Lt, Np + Lt) hatására ezen beltartalmi paraméterekben növekedést tapasztaltunk.

4.7. A mesterséges fertőzés eredményei

A kukorica specifikus kórokozóival (*Aspergillus flavus*: Af; *Fusarium verticillioides*: Fv) történő mesterséges fertőzéssel szembeni tolerancia változását a nitrápyrin (Np), lombtrágya (Lt) és kombinált kezelések (Np + Lt) függvényében is nyomon követtük. A fertőzések mértékét az egyes kezelések hatására a 7. ábra szemlélteti.



8. ábra: Az *A. flavus* és *F. verticillioidea* patogének által okozott csőfertőzőség mértéke az egyes kezelések függvényében.

A táblázat kezelésként 10 független mérés átlagát és szórását tartalmazza. A különböző kisbetűk (a, b) a kezelések közötti szignifikáns eltérést jelölik (egytényezős ANOVA és Duncan-féle post hoc teszt; $p < 0,05$). Kt: kezeletlen; Np: nitrapyrin (vetés előtt); Lt: lombtrágya; Np + Lt: nitrapyrin (vetés előtt) + lombtrágya.

Eredményeink alapján mindkét kórokozóval történő mesterséges fertőzés esetében a legnagyobb mértékű csőfertőzést a kezeletlen állományban (Kt) tapasztaltuk (F_v : $3,86 \pm 0,70\%$; A_f : $3,14 \pm 0,45\%$), míg a csőfertőzés jeleit legkevésbé a nitrapyrinnel és lombtrágyával is kezelt (Np + Lt) kukoricában állapítottuk meg (F_v : $0,26 \pm 0,45\%$; A_f : $0,46 \pm 0,33\%$). Fontos azonban hangsúlyozni, hogy nem volt jelentős különbség a kombinált kezelésű (Np + Lt) és a csak lombtrágyával (Lt) kezelt állományokban megfigyelt fertőzési tünetek között, illetve a *F. verticillioidea* fertőzés hasonló mértékű csőfertőzőtséget eredményezett a nitrapyrinnel kezelt (Np) és a kezeletlen (Kt) állományokban egyaránt. Feltételezéseink szerint utóbbira magyarázatul szolgálhat a nitrapyrin kezelés következtében a növények magasabb N-ellátottsága, mely megegyezik Reid és mtsai. (2001) közleményével, miszerint a növények fokozott N tartalma súlyosbítja a fertőzések intenzitását. Eredményeinket összegezve kijelenthető, hogy a szegényes tápanyagellátottságú növények alacsonyabb toleranciát mutattak a kórokozók okozta csőfertőzéssel szemben, amely megerősíti azt a tényt, hogy az optimális tápanyagellátás a betegségek súlyosságának mérséklésében kulcsfontosságú szerepet játszik (Dordas, 2008; Gupta et al., 2017).

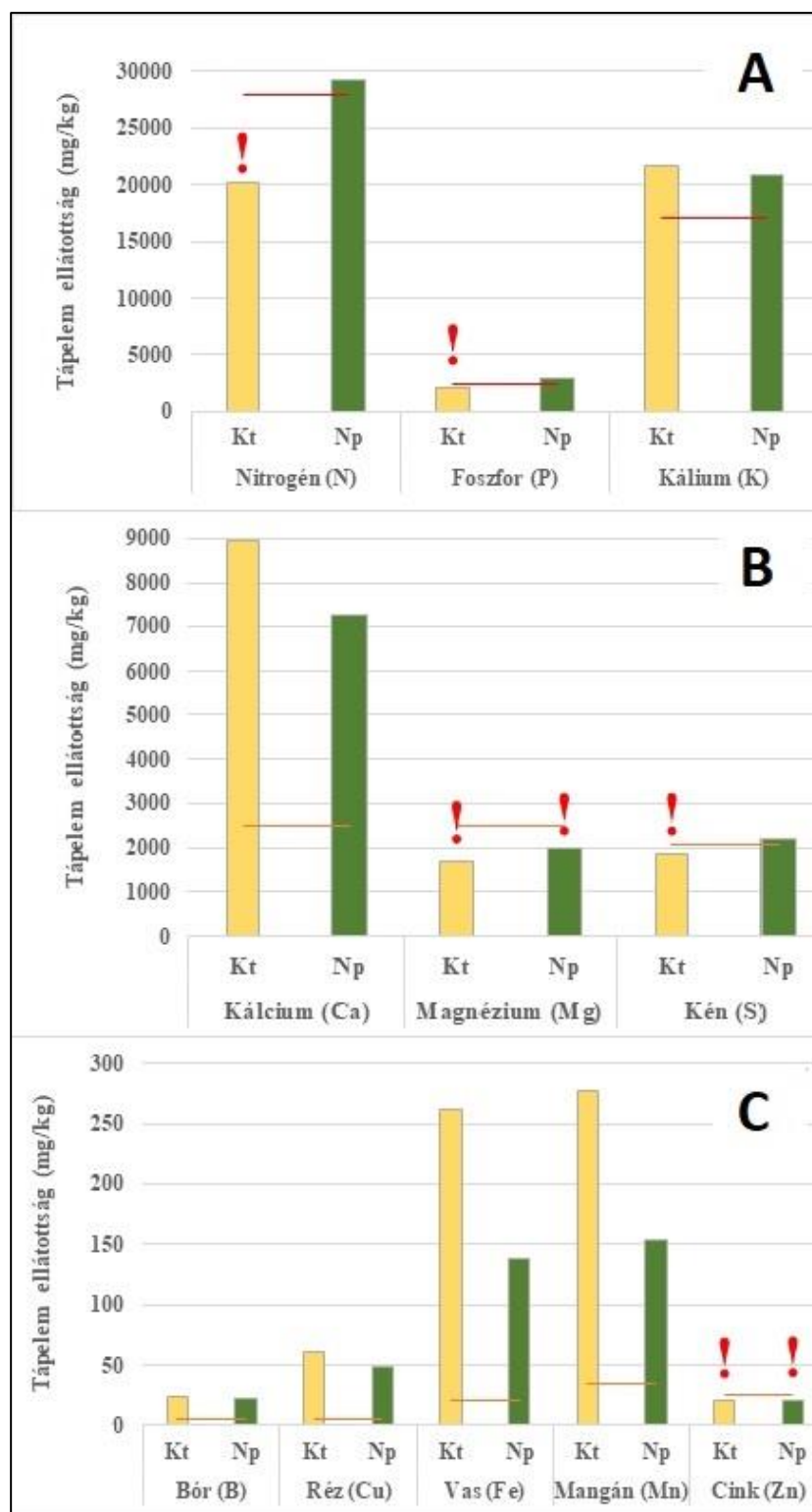
4.8. A kukoricalevelek elemtartalmának eredményei a kísérleti években

Eredményeink alapján számos esetben a kritikus ellátottsági szint alatti tápelemtartalmat állapítottuk meg a levélszövetekben, melyek értékei a kezelések (Np, Lt, Np + Lt) következtében sem javultak jelentősen. A nitrapyrin (Np) hatására ugyanis kedvezőbb N ellátottságra, míg a lombtrágya (Lt) kezelés esetében más tápelemek tartalmának jelentős növekedésére számítottunk. Mégis a kezelések hatására egyedül a HD-19 kísérletben tapasztaltuk a N, P, Mg és K tápelemek növekedését, melyre magyarázatul szolgálhat a kísérleti helyszínen lévő homoktalaj. A laza szerkezetű talajban ugyanis kevésbé maradnak meg a tápelemek, így az ilyen talajokon termesztett növények kiegészítő tápanyagnövelő kezeléseinek még nagyobb szerepük van. A nitrapyrin hatékonyságát a homoktalajban a kezelt (Np) és kezeletlen (Kt) állomány közötti szembetűnő különbség is igazolta, ugyanis a kezeletlen (Kt) növényállomány a N-hiány tipikus és súlyos tüneteit mutatta (idősebb levelek sárgulása, kloróza, a növekedés alulmaradása), szemben a nitrapyrint tartalmazó területek növényeivel (9. ábra).



9. ábra: Homok talajon (HD-19) a nitrapyrin kezelés hatása szembetűnő volt: a kezeletlen állomány a nitrogénhiány súlyos tüneteit mutatja (balra), míg a nitrapyrrinnel kezelt állomány egészséges, a nitrogénhiány tüneteit nem mutatja (jobbra).

A HD-19 területen beállított kísérlet során a nitrapyrinnel kezelt és a kezeletlen területek között a növényfiziológiai állapotra utaló szembetűnő különbséget a kezelést követően a levélszövetek tápelemtartalmának meghatározásával is alátámasztottuk. Eredményeink alapján látszik, hogy a nitrapyrin kezelés hatására a N tartalom jóval nagyobb volt a kezeletlen állományokban mért eredményhez képest, ezzel pedig megelőzve a N hiányára utaló súlyos tünetek kialakulását. Érdekes megfigyelésünk volt továbbá, hogy a nitrapyrin kezelés következtében nem csak a N, hanem kismértékben a P, Mg és S ellátottság is javult. Magyarázatul szolgálhat, hogy a nitrapyrin kezelés hatására valószínűleg kedvezőbb N-ellátottsági körülmények alakulhattak ki a talajban, így a növények több N forráshoz jutottak, és amely hatására ezen további tápelemek javuló felvételét eredményezhette a növényekben. Ezt a jelenséget magyarázhatja az a tény, hogy a tápelemek között pozitív szinergizmus kölcsönhatás áll fent. Köztudott, hogy a klorofill molekula központi eleme a Mg, így fontossága teljesen egyértelmű, hiszen kellő klorofill hiányában a növény nem volna képes megfelelő intenzitással fotoszintetizálni (Bergman, 1979), míg a N szintén szintén fontos szerepet tölt be a fotoszintézisben a klorofill molekuláris szerkezete miatt. Ez indokolja, hogy egy N-hiányos állapot minden bizonnyal maga után vonja a Mg hiányállapotot is, és fordítva, azaz, a N és a Mg között fennálló szinergizmus következtében a N-ellátottság növekedésével megállapítható a javuló Mg felvétel. A S esetében szintén régóta alátámasztott tény, hogy számos fontos fiziológiai folyamat elősegítésében vesz részt, kiemelten a S-tartalmú aminosavak, azaz a fehérjeszintézisben is. Élettani szerepe így sok hasonlóságot mutat a N-nel, ugyanis mind a két tápelem a fehérje-anyagcserében, azaz a növény egészséges, intenzív növekedésében játszik szerepet (Búzás, 1983). Ez is indokolja azt, hogy korábbi szakirodalmi feljegyzésben hasonlóságot fedeztek fel a N- és a S-hiányos növények tünetei között, mindazonáltal az is ismert, hogy a N túlzott adagolása mellett kénhiány jelentkezhet (Búzás, 1983; Füleký és Sárdi, 2014). A javuló N-ellátottság hatására a magasabb P tartalmat hasonlóképpen, a N és P között fennálló szinergizmussal magyarázható. Azaz, mind a Mg, S és P tápelemek növekedése valószínűleg a nitrapyrin kezelés következtében kialakuló kedvezőbb N-ellátottságnak az eredménye (10. ábra).



10. ábra: A kukorica levelek tápelemtartalma a nitrapyrin kezelést követően 2019-ben (HD-19).

A piros vízszintes vonal növényfiziológiai szempontból a kritikus határértéket jelöli (Elek és Kádár, 1980). A piros felkiáltójel a hiányállapotot jelölik az adott tápelem és kezelés esetében. Kt: kezeletlen; Np: nitrapyrin

A teljes adatsort a kukorica tápelemtartalmának változásáról a kísérleti években a 2., valamint a 3. *mellékletek* mutatják. A kapott eredmények alapján elmondható, hogy a makrotápelemek hiányállapota a tápanyagutánpótlás ellenére igen gyakori probléma. Különösen alacsony N, P, K és S tápelemtartalmakat tapasztaltunk 2021-ben a beállított kísérletek mindegyikében. Ennek hátterében nagy valószínűséggel az adott évjárat kedvezőtlen klimatikus adottságai állhatnak (3.2. *fejezet*), amikor is a vegetáció jelentős részét csapadékhiány jellemezte, amely a talajon keresztüli tápelemfelvételt jelentősen akadályozhatta. A szárazság okozta csökkent levélszöveti tápelemtartalmat korábban más kutatások is megerősítették (Cramer et al., 2009; Waraich et al., 2011; Ge et al., 2012). Fontos kiemelni a kukorica érzékenysége szempontjából a Mg és Zn ellátottságot is (Gupta et al., 2008; Mengutay et al., 2013), melyek hiánya szintén több esetben is előfordult és a kezelések hatására sem szűnt meg. Erre magyarázatul szolgálhat, hogy a kijuttatott lombtrágya készítmény általános tápelem összetételű volt, amely Mg-ot egyáltalán nem (3.4. *fejezet*, 5. *táblázat*), továbbá Zn-et csak nyomokban tartalmazott (38 mg l^{-1}). Következésképpen azt nem tudni, hogy a hiánybetegség kialakulása megelőzhető lett volna ezen tápelemek elegendő mennyiségét tartalmazó lombtrágya kijuttatását követően. Ugyanakkor érdemes rávilágítani arra is, hogy a levélanalízis eredménye kizárólag egy egyszeri levélmintázásból adódó, a növények aktuális állapotát jelző állapot, amely a tápelemek felvehetőségét javító körülmények hatására változhat. Eredményeink a rejtett hiánybetegségek feltárását szolgáló levélanalízisek fontosságára is felhívják a figyelmet, mivel a hiányállapotot jelző tünetek az esetek döntő többségében nem voltak szemmel láthatóak.

4.9. A fotoszintetikus pigment tartalom, a szuperoxid-dizmutáz aktivitás, a prolin - és malondialdehid tartalom eredményei

A levélfiziológiai vizsgálatok során a levélszövetek klorofill-*a*, klorofill-*b*, karotinoid pigmentek tartalmát, az MDA koncentrációját, a SOD aktivitását és a prolin tartalmát határoztuk meg a BK-21 kísérletben. A vizsgálatok eredményeit a 13. táblázat foglalja össze.

13. táblázat: A levélfiziológiai vizsgálatok eredményei

Paraméter	Kt	Np	Lt	Np + Lt
Klorofill <i>a</i> (mg kg ⁻¹ nyers tömeg)	18,5 ± 1,0 ^a	19,9 ± 0,7 ^b	19,7 ± 0,3 ^b	21,2 ± 0,2 ^c
Klorofill <i>b</i> (mg g ⁻¹ nyers tömeg)	4,8 ± 0,2 ^a	5,4 ± 0,7 ^a	5,2 ± 0,6 ^a	6,7 ± 0,7 ^b
Karotinoid (mg g ⁻¹ nyers tömeg)	13,2 ± 0,7 ^a	12,8 ± 0,4 ^a	13,9 ± 0,5 ^{ab}	14,8 ± 0,8 ^b
MDA koncentráció (nmol g ⁻¹ nyers tömeg)	154,8 ± 11,2 ^b	121,4 ± 16,6 ^a	113,5 ± 14,6 ^a	105,1 ± 12,2 ^a
SOD aktivitás (U g ⁻¹ nyers tömeg)	0,2 ± 0,0 ^d	0,2 ± 0,0 ^c	0,1 ± 0,0 ^b	0,1 ± 0,0 ^a
Prolin tartalom (μ ml ⁻¹)	291,0 ± 32,7 ^c	219,8 ± 11,9 ^{ab}	240,0 ± 14,4 ^b	195,0 ± 20,1 ^a

A táblázat kezelésenként 5 független mérés átlagát és szórását tartalmazza a BK-21 kísérlet területéről. A különböző kisbetűk (a, b, c) a kezelések közötti szignifikáns eltérést jelölik (egytényezős ANOVA és Duncan-féle post hoc teszt; $p < 0,05$). Kt: kezeletlen; Np: nitrapyrin (vetés előtt); Lt: lombtrágya; Np + Lt: nitrapyrin (vetés előtt) + lombtrágya.

Számos korábbi kutatás igazolta a levélszövetek csökkent klorofill tartalmát N-hiányállapot esetében, hiszen a N-ellátottság szoros korrelációt mutat a fotoszintetikus aktivitással (Carter és Knapp, 2001; Zhang és Shangguan, 2011). Eredményeink ezen megállapításokkal mutatnak egyezést, ugyanis mindhárom kezelés (Np, Lt, Np + Lt) hatására a klorofill-*a* és *b* pigmentek növekedését figyeltük meg, amely elsősorban a kedvezőbb N-ellátottsággal magyarázható. A legmagasabb klorofill-*a* és *b* tartalmat a kombinált kezelésű (Np + Lt) állományokban mértük, amely arra enged következtetni, hogy mind a nitrapyrin hatására kialakuló kedvezőbb N-felvételi körülmények, mind pedig a lombtrágya kezeléssel kijuttatott N a növények magasabb N-ellátását eredményezték. Habár Peng és mtsai. (2021) a N ellátottság javulásával párhuzamosan a karotinoid növekedéséről is beszámolt, eredményeink alapján jelentős növekedést elsősorban a kombinált kezelés (Np + Lt) eredményezett, amely szintén a növény számára legkedvezőbb N-ellátottsággal magyarázható.

Az MDA-koncentráció meghatározása a telítetlen zsírsavakban található foszfolipidek peroxidációjának eredményeként jelezheti a sejtmembránok szabad gyökök okozta károsodását stresszhelyzetben (Jain et al., 2001; Abdul Jaleel et al., 2007). Jelen kutatásban a kezeletlen (Kt) állományhoz képest mindhárom kezelés (Np, Lt, Np + Lt) hatására jelentősen alacsonyabb MDA koncentrációt állapítottunk meg a levélszövetekben, azaz a lipid peroxidáció mértékét is jelentősen mérsékeltek. A nitrapyrin valószínűleg a kukorica kedvezőbb N-felvételi körülményeihez járult hozzá, ennek következtében pedig a kezeletlen növényekben (Kt) a szegényesebb N-ellátottság oxidatív stresszt eredményezett, amely az emelkedett MDA koncentrációjában nyilvánult meg. A kapott eredményeink Li és mtsai. (2021) közelmúltbeli megállapítását erősítették meg, miszerint az alacsony N-ellátottság az oldható fehérje bomlásához és az MDA-

koncentráció növekedéséhez is vezet, melyek a növényekben kialakult bonyolult, védekezésre szolgáló enzimrendszer működését károsíthatja, továbbá gyorsítja a levélöregedést. Ahogyan Jiang és mtsai. (2005) közleményéből is kiderül, a kijuttatott N mennyisége lassítja a lipid peroxidáció sebességét. A kapott eredményeket egy, a nitrapyrin hatékonyságát vizsgáló tanulmány is alátámasztja, amelyben a kezelés jótékony hatását figyelték meg a belvíz okozta antioxidáns rendszer károsodás mérséklésében, mely alacsonyabb MDA koncentrációt eredményezett (Ren et al., 2020). Eredményeink alapján a N-t is tartalmazó lombtrágyázás szintén jelentős szerepet játszott az abiotikus stressz enyhítésben, sőt, az adatokból kiderül, hogy a lombtrágyázás a nitrapyrin kezeléshez képest még nagyobb hatással volt a MDA-koncentráció csökkenésére, mivel a két legalacsonyabb értékeket az önmagában lombtrágyával kezelt (Lt), valamint a kombinált kezelésű (Np + Lt) állományokban kaptuk. Hasonló eredményeket figyeltek meg a lombtrágyás kezelés hatására árpában (Abdelaal et al., 2018) és rizsben, vízhiány okozta stressz alatt (Gautam et al., 2016).

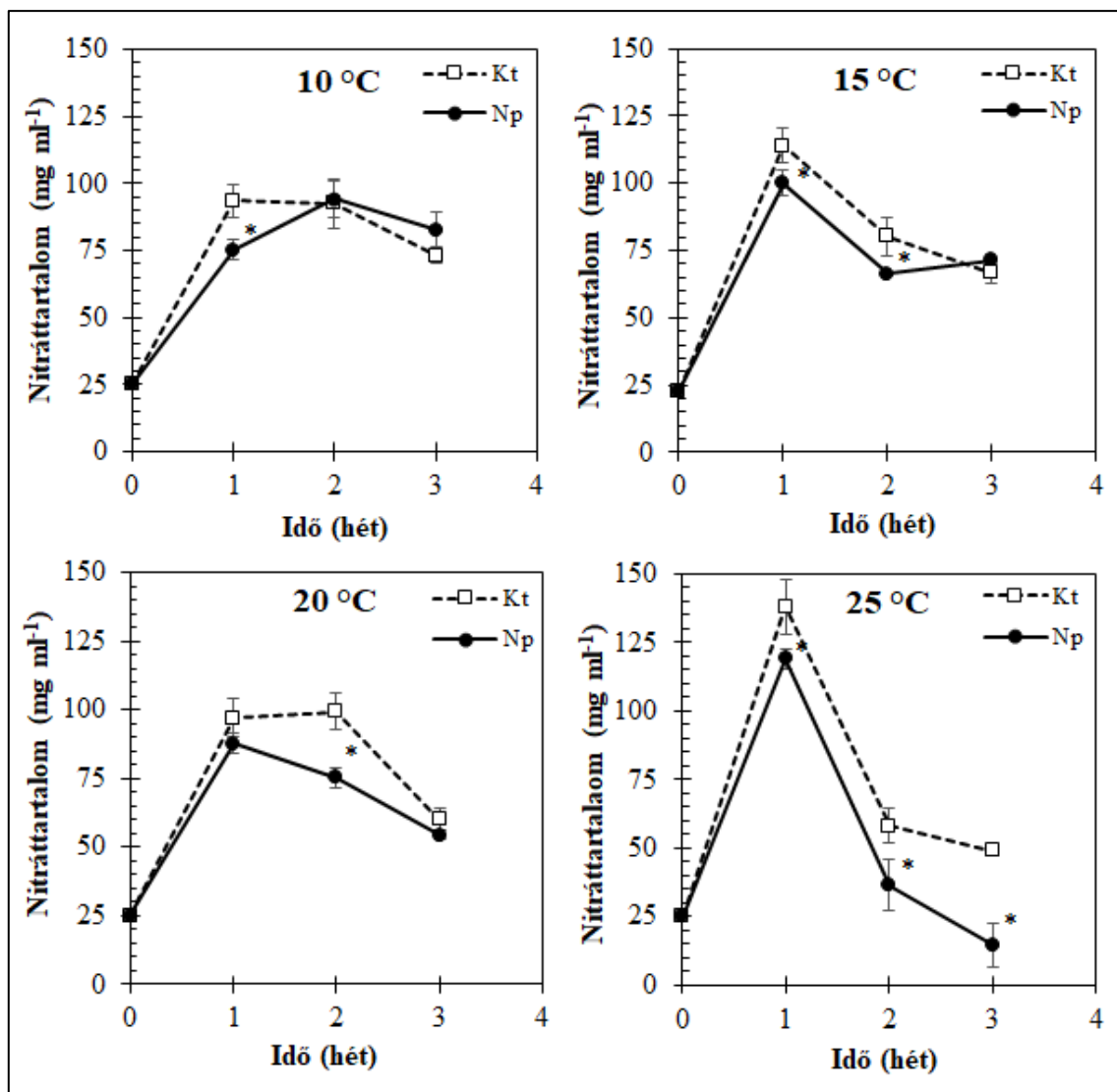
A SOD aktivitás változását figyelve eredményeink alapján a kezeletlen (Kt) állományhoz képest mindhárom kezelés (Np, Lt, Np + Lt) hatására szignifikáns mértékben alacsonyabb értékeket állapítottunk meg a levélszövetekben, amely alapján arra következtethetünk, hogy nitrapyrin és lombtrágya kezelések növelték a kezelt növények N és más tápelemek tartalmát, ezzel pedig nagyobb ellenállóságot eredményezve az oxidatív stresszel szemben. Eredményeink alapján a legalacsonyabb SOD aktivitást a kombinált kezelésű (Np + Lt) állományban állapítottuk meg, azaz az oxidatív stressz legalacsonyabb jelenlétét ezen kezelések mellett tapasztaltuk. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a csak nitrapyrinnel kezelt (Np) növényekben is már csökkent a SOD-aktivitás, amely korábbi, a N-ellátás és a SOD aktivitás közti kapcsolatról szóló kutatások eredményeivel is egyezést mutat. Míg Yue és mtsai. (2021) a túlzott N-trágyázás (200 és 300 kg ha⁻¹) következtében a SOD-aktivitás jelentős növekedését tapasztalták, addig Yang és mtsai. (2019) a N-hiányára hívták fel a figyelmet, amely szintén emelkedett SOD aktivitást eredményezett, amely a N pótlásával mérséklődött. Az önmagában lombtrágyával kezelt (Lt) kukorica stressztűrő képessége is javult, mivel jelentősen csökkent SOD aktivitást állapítottunk meg a kezeletlen (Kt) állományhoz képest. Ennek háttérében nagy valószínűséggel más tápanyagok, például vas (Fe), cink (Zn), réz (Cu), és a mangán (Mn), az antioxidáns enzimek aktivitásához szükséges kofaktorok is kulcsszerepet játszanak (Sajedi et al., 2009; Harris et al., 2005), ugyanis ezen kofaktorok segítik a SOD hatékony működését a ROS méregtelenítése során

(Miller et al., 2009; Perry et al., 2010). Ezeknek az elemeknek a hiánya az antioxidáns enzimek csökkent aktivitásához vezethetnek, amely a környezeti stressz hatásokkal szembeni fokozott érzékenységet eredményezhet (Sajedi et al., 2009). Ezek alapján egyértelmű, hogy a lombtrágyával kezelt (Lt) kukoricában megállapított alacsony SOD aktivitás nem a kofaktorok hiányának eredménye, hanem a mérsékelt abiotikus stressz jelzéséül értelmezhető.

A prolin akkumulációját a növényben elsősorban vízstressz (Tarighaleslami et al., 2012), sófelhalmozódás (Rhodes et al., 2018) és nehézfémmergezés (Giannakoula et al., 2008) hatására figyelték meg, azonban Göring és Thien (1979) arról is beszámoltak, hogy a prolin tartalom a hiánybetegségek során, kielégítetlen N-ellátás mellett is megnövekszik. Ezt Tarighaleslami és mtsai. (2012) is megerősítették, mivel a prolin, mint a N források egyfajta raktáraként stressz hatására csökkenti a citoplazma ozmotikus potenciálját. Eredményeink ezen kutatásokat támasztják alá, ugyanis a kezeletlen (Kt) állományban jelentősen magasabb prolin tartalmat állapítottunk meg a nitrapiyinnel kezelt (Np) állományhoz képest, amelyet feltételezhetően a szegényesebb N-ellátottsággal magyarázható. Eredményeinkből az is kiderül, hogy a legalacsonyabb prolin tartalmat, így pedig a stressz hatásokkal szemben legkevésbé érzékeny növényeket a kombinált kezelésű (Np + Lt) állományban tapasztaltuk. Mivel az egyéb mikroelemeket is tartalmazó lombtrágya prolin akkumulációjára gyakorolt hatásairól kevés számú szakirodalom áll rendelkezésre, jelen ismereteink alapján arra következtethetünk, hogy a N ellátottságot javító nitrapiyin, mind a N-t is tartalmazó lombtrágya együttes kezelésének hatására a növények N-ellátottsága javult, ezzel kedvezőbb körülményeket biztosítva a stressz hatások kivédéséhez.

4.10. A nitrapiyin és a talajhőmérséklet-változás összefüggésének vizsgálata

A nitrapiyin hatékonyságát laboratóriumi, illetve szabadföldi körülmények között is vizsgáltuk. A talajinkubációs kísérlet eredményeit az 10. ábra szemlélteti, mely során a nitrapiyin hatékonyságát a talajminták nitráttartalmának változásán keresztül vizsgáltuk különböző hőmérsékleten. Mivel a kísérletet növénytakaró nélkül állítottuk be, a talajminták a nitrapiyin kezelése következtében a nitráttartalom alakulását a növényi tápanyagforgalom sem befolyásolta, így a nitráttartalom változása információt nyújt a talajban zajló nitrifikáció tevékenységének dinamikájáról.



11. ábra: A különböző hőmérsékletű talajok nitráttartalmának változása a nitrapyrin kezelés hatására

Az ábra kezelésenként 3 független mérés átlagát és szórását tartalmazza: * - Szignifikáns különbség a kezeletlen talajok nitráttartalmához képest (Student-féle t-teszt; $p < 0,05$).

Az eredmények alapján minél magasabb volt a talaj hőmérséklete, annál inkább érvényesült a nitrifikáció folyamatát akadályozó nitrapyrin hatása, ugyanis a hőmérséklet emelkedésével a kezeletlen (Kt) és a nitrapyrinnel kezelt (Np) talaj nitráttartalma közötti differencia is egyre nagyobb volt. Eszerint a nitrapyrin nitrifikációra gyakorolt gátló hatását leginkább a legmagasabb beállított hőmérsékleten, 25°C-on tapasztaltuk, míg legkevésbé a legalacsonyabb, 10°C-on figyeltük meg. Gu és mtsai. (2018) szintén hangsúlyozták, hogy a nitrifikációs inhibitorok elérhetősége jelentősen változhat a talajhőmérséklet hatására. Eredményeinket korábbi kutatás is igazolja (Dawar et al., 2021), amely során a nitrapyrin nagyfokú hatékonyságát igazolták trópusi területen, ahol a növények magasabb terméshozamát tapasztalták a nagyobb mennyiségű N-felvételnek

köszönhetően a talajból. A kapott eredmények ellenére azonban számos korábbi tanulmány állítja, hogy a nitrapyrin felezési ideje jelentősen csökken a hőmérséklet emelkedésével (Woodward et al., 2016; Vetsch et al., 2017; Giacometti et al., 2020). Így, a talajhőmérséklet emelkedésével a nitrapyrin csökkent hatékonysága várható (Giacometti et al., 2020), amely a nitrapyrin olyan bomlástermékeivel magyarázható, mint a 6-kloropicolinsav (6-CPA). Woodward és mtsai. (2016) éppen ezért a nitrapyrin kijuttatását leginkább az őszi, kora tavaszi időszakban javasolják, 10°C körüli talajhőmérséklet esetén.

A kísérlet során kapott eredményekre az egyik lehetséges magyarázat, hogy a talajhőmérséklet emelkedése a nitrifikáló baktériumok elszaporodásának, azaz a nitrifikáció gyorsaságának kedvezett. A nitrifikáció sebessége és a talajhőmérséklet emelkedése közti összefüggést már számos előző tanulmány megerősítette (Yates et al., 2016; González-Camejo et al., 2019; Dai et al., 2020; Zhongmin et al., 2020). Habár kísérletünkben specifikusan a *Nitrosomonas* sp. populáció monitorozása nem szerepelt célkitűzéseink között, mégis gyanítjuk, hogy a magasabb talajhőmérséklet a *Nitrosomonas* fajok elszaporodását is indukálhatta.

Ezt a feltételezésünket Chen és mtsai. (2018) tanulmánya is alátámasztja, amelyben a *Nitrosomonas* baktériumok döntő többségét magasabb talajhőmérsékleten (20°C) határozták meg, szemben a *Nitrospira* baktériumokkal, melyek nagyobb csíraszámát elsősorban az alacsonyabb, 10°C talajhőmérsékletnél tapasztalták. Ezek a megállapítások, illetve a kapott eredmények alapján arra következtethetünk, hogy habár a nitrapyrin hatékonysága a hőmérséklet emelkedésével valószínűleg csökken, mégis, egy emelkedett talajhőmérsékletben a fokozott nitrifikáció, illetve *Nitrosomonasok* bőségesebb jelenléte következtében a nitrapyrin sokkal rövidebb ideig tartó, de hatékonyabb hatása is tapasztalható. Azaz, a nitrapyrin *Nitrosomonasok* aktivitására gyakorolt gátló hatása egy nagyobb populáció esetében jobban érvényesülhet, mintsem egy alacsonyabb talajhőmérséklet és a baktériumok csökkent aktivitása esetén. Habár eredményeinket kontrollált, laboratóriumi környezetben beállított kísérlet során kaptuk, a gyakorlat számára is felhívhatja a figyelmet, mely szerint a nitrapyrin nagyobb fokú hatékonyságára lehet számítani a készítmény késleltetett kijuttatásakor, magasabb talajhőmérséklet esetén.

4.11. A nitrapyrin kijuttatásának időzítésére irányuló szabadföldi vizsgálat

A nitrapyrin kezelés optimális időzítésének meghatározása céljából 2020-ban a BK-20, 2021-ben pedig a BK-21 kísérletek területein belül elkülönített parcellákban a nitrapyrin késleltetve is kijuttatása került (Np^+), így lehetőségünk volt a vetés előtti, illetve a vetés utáni, késleltetett kezelés hatékonyságának összevetésére.

2020-ban, a BK-20 kísérletben a talaj nitráttartalmának változását figyelve elmondható, hogy a nitrapyrin késleltetett kijuttatása kedvezőbbnek bizonyult, ugyanis hatására a kukorica intenzív tápanyagfelvételi időszakában több N forrás állt rendelkezésre a talajban (4.2. fejezet, 7. táblázat). Mindazonáltal fontos hangsúlyozni, hogy a kezelést (2020. június 13.) követő időszak igen csapadékos volt, amely hozzájárult a talajon keresztüli hatékonyabb N-hasznosításához ebben a kritikus időszakban. Singh és Nelson (2019) szintén hangsúlyozták, hogy csapadékos időszakban az inhibitorok nagyobb hatékonysággal alkalmazhatóak a N veszteség mérséklése céljából. Eredményeinkkel Pittelkow és mtsai. (2017) kutatása is egyezést mutat, amelyben a nitrapyrin őszi (korai) kezelés a N veszteséget jelentősen nem csökkentette, így a terméshozamot sem növelte. Összességében 2020-ban a nitrapyrin kései kijuttatása a kukorica tápanyagfelvételi dinamikáját figyelembe véve hatékonyabbnak bizonyult, mindazonáltal a kései kijuttatás nagyobb hatékonysága feltehetően elsősorban a kezelést követő csapadékos időszaknak köszönhető. Ezzel szemben 2021-ben, a BK-21 kísérletben a kései kezelés hatására szignifikáns mértékben alacsonyabb nitráttartalmat mértünk a korai kezeléshez képest (8. táblázat). Mivel 2021-ben a nitrapyrin kései kijuttatását (2021. június 10.) követően a 2020-as évhez képest rendkívül csapadékszegény időszak követte, így alapvetően a nitrátkimosódási veszteség is alacsonyabb lehetett. A kései kezelés hatására a jelentősen alacsonyabb nitráttartalom feltételezhetően a nitrifikációs tevékenység hatékony lassításával magyarázható, így az ammóniumionok nitrácionokká történő átalakulása is lassabb lehetett.

A relatív klorofill tartalom változását figyelve elmondható, hogy 2020-ban a BK-20 kísérletben a korai nitrapyrines kezeléshez képest a késleltetett kezelés hatására jelentősen magasabb SPAD értékeket mértünk, amely a növények hatékonyabb N-hasznosításával magyarázható. Ezzel szemben 2021-ben, a BK-21 kísérletben a kései nitrapyrin kezelés hatékonysága már nem múlta felül a korai kezelését. A két év eltérő eredményének hátterében nagy valószínűséggel az adott évek klimatikus adottságai állhatnak. Míg a kukorica intenzív fejlődése időszakában 2020 csapadékosabb, bőségesebb,

addig 2021 jelentősen szegényesebb volt, mely tényezők nagy mértékben meghatározták a növények N-felvételi hatékonyságát a talajból, ezen keresztül pedig a relatív klorofill tartalmat is (9. táblázat).

A gyökértömeg és a szárvastagság változásait figyelve 2020-ban, a BK-20 kísérletben a kései nitrapyrin kezelés hatására mind a gyökértömeg, mind a szárvastagság paraméterek jelentős mértékben növekedtek a korai kezeléshez képest. Ezzel szemben 2021-ben, a BK-21 kísérletben a két időpontban kijuttatott nitrapyrin hatékonysága között nem volt szignifikáns különbség, amelynek hátterében szintén az évjárat adottságai lehetnek. 2020-ban a nitrapyrin kései kijuttatását követő bőséges csapadék feltehetőleg kedvezőbb N-felvételi körülményeket teremtett a növények számára, míg 2021-ben a szárazság a talajon keresztül felvett N mennyiségét is jelentős mértékben hátráltathatta, csökkentve ezzel a biomassza gyarapodást (10. táblázat).

Habár a 2020-ban, a BK-20 kísérletben a kései nitrapyrin kezelés hatására közel azonos ezerszemtömeget állapítottunk meg, a csőhossz és csővastagság azonban szignifikánsan mértékben növekedett, így a későbbi nitrapyrines kezelés kedvezőbbnek bizonyult. Ezzel szemben 2021-ben, a BK-21 kísérletben a kései kezelés hatására egyik paraméter esetében sem tapasztaltunk kedvező változást, sőt, az ezerszemtömeg és csőhossz paraméterek esetében statisztikailag igazolhatóan alacsonyabb értékeket állapítottunk meg. Mindennek oka feltehetően az adott év eltérő csapadékelátottsága, amely 2020-ban sokkal kedvezőbbnek bizonyult a kukorica fejlődése szempontjából (11. táblázat).

A nitrapyrin két időpontban történő kijuttatásának hatásait a termés beltartalmi jellemzőinek változásán keresztül is vizsgáltuk. Összességében elmondható, hogy mind a két évben kismértékű különbségeket tapasztaltunk a fehérje, olaj és keményítőtartalom esetében is. 2020-ban, a BK-20 kísérletben leginkább a fehérjetartalom növekedését tapasztaltuk a kései nitrapyrin kezelés hatására, míg az olaj és keményítőtartalom változásában nem állapítottunk meg jelentős eltérést. Ehhez képest adataink alapján 2021-ben, a BK-21 kísérletben a nitrapyrin kései kijuttatásának hatására a fehérjetartalom valamelyest még csökkent is (12. táblázat).

A nitrapyrin kezelések a levélszövetek tápelemtartalmára gyakorolt hatásait vizsgálva elmondható, hogy 2020-ban, a BK-20 kísérletben a kései nitrapyrin kezelés hatására jelentősen növekedett a levélszövetek N-tartalma, amelynek köszönhetően sikerült megelőzni a nitrapyrinnel vetés előtt kezelt állományokban kialakuló súlyos N-hiánybetegséget. A kései nitrapyrin kezelés hatására jelentősen javuló N-ellátottságot a

talaj késleltetett kezelésének hatására a talajban kialakuló kedvezőbb N-felvételi körülményei eredményezhették, amelyhez a kijuttatást követő bőséges csapadékhozam is nagy mértékben hozzájárulhatott. A nitrapyrin kései kezelésével a N-en túl, habár nem jelentős mértékben, de a növények Mg és S-ellátottsága is javult. Azaz, a nitrapyrin késleltetett kijuttatása 2020-ban eredményesebbnek bizonyult a korai kijuttatásnál. Ezzel szemben 2021-ben a BK-21 kísérletben a nitrapyrin kései kijuttatásának ezen kedvező hatásait már nem tapasztaltuk, ugyanis egyik tápelem esetében sem állapítottunk meg növekedést a kezelés hatására. Ez minden bizonnyal az évjárat a csapadékviszonyok kedvezőtlen alakulásával magyarázható. 2020-ban ugyanis a kukorica intenzív tápanyagfelvételi időszakában a csapékhozam jelentősen magasabb volt, mint 2021-ben, így a kései nitrapyrin kezelés hatékonysága a korai kezeléshez képest 2020-ban jelentősen nagyobb volt, mint 2020-ban (2. és 3. mellékletek).

5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

Kutatásunk során a nitrogén eredetű veszteségek csökkentését célzó nitrapiyin hatóanyagtartalmú nitrifikációs inhibitor, illetve lombtrágya kezelések hatékonyságát vizsgáltuk kukoricában a 2019-2021. évjáratokban. A nitrapiyin kutatásáról szóló szakirodalmak jelentős része számolt be arról, hogy a kezelés hatékonyságát számos meteorológiai és talajtani tényező befolyásolja, ezért célkitűzésünk volt, hogy lehetőségeinkhez képest több mezőgazdasági területen is vizsgáljuk a nitrogén stabilizátor működését. Kísérleteinket ezért több helyszínen állítottuk be egyidejűleg, azonban a területek mindegyike Debrecen térségében és ahhoz közel helyezkedett el. A nitrapiyin kezelés mellett a kukorica lombtrágya kezelésének hatékonyságát is vizsgáltuk különböző évjáratokban és területeken, eltérő talajadottságok mellett.

A talaj nitráttartalmának változásán keresztül a nitrapiyin kezelés hatékonyságát figyeltük. Megfigyeléseink alapján a nitrapiyinnel kezelt talajok nitráttartalma hol nagyobb, hol alacsonyabb volt a kezeletlen talajban mért nitráttartalomhoz képest. Fontos hangsúlyozni, hogy a nitrapiyin kezelés hatására mérhető kisebb vagy nagyobb nitráttartalom is igazolhatja a nitrapiyin hatékonyságát, ugyanis a nitráttartalom mennyiségi alakulását a kezelés hatására több tényező befolyásolhatja, mint pl. a nitrifikáló baktériumok aktivitása, a csapadékhozam, a talaj szervesanyag tartalma, a talaj fizikai félesége és a talaj hőmérséklete. Mindazonáltal a talaj nitráttartalma a mintavétel időpontjában csak a talaj aktuális állapotát mutatja, amely adat kevés ahhoz, hogy a nitrapiyin növényekre gyakorolt kedvezőbb N-ellátottságát egyértelműen igazoljuk, ezért a nitrapiyin kedvező hatásainak megbizonyosodása érdekében mindenképpen a növények fiziológiai állapotát felmérő egyéb paraméterek alakulását is szükséges figyelembe venni, különösen azokat, amelyek összefüggésben állnak a növény N-ellátottságával.

Mivel a relatív klorofill tartalom a növények általános fiziológiai állapotát jól mutatja, a nitrapiyin és lombtrágya kezelések hatékonyságát ezen paraméter alakulásán keresztül is, így ezt a vizsgálatot választottuk a nyomonkövetésére. Az eredményeket összegezve elmondható, hogy a nitrapiyin kezelés következtében a kísérletek mindegyikében növekedett a növények relatív klorofilltartalma, amely arra enged következtetni, hogy a kezelt területek növényei több N-hez jutottak, amely ellátottság a klorofilltartalom mennyiségével szoros korrelációt mutat. A nitrapiyin kezeléssel ellentétben az önmagában lombtrágyával történő kezelés nem növelte jelentősebb mértékben a relatív klorofilltartalmat, azonban a nitrapiyin hatékonysága a lombtrágyával

történő kiegészítéssel már több esetben is további jelentős növekedést eredményezett. Mindez feltehetően a nitrapyrin következtében kialakuló kedvezőbb N-ellátottság és a N-t is tartalmazó lombtrágya együttes kezeléséből adódó, a növények jelentősen jobb nitrogénellátottságával magyarázható.

Tekintve, hogy a lombtrágya kezelés célja elsősorban nem a növények biomassza növelése, az ezt mutató paramétereket csak a nitrapyrin hatékonyságának igazolásául vizsgáltuk. Eredményeink alapján a nitrapyrin kezelés következtében növekedett a növények gyökértömege és szárvastagsága a kezeletlen növényekéhez képest, azaz, a nitrapyrin jelentős mértékben hozzájárult a növények számára felvehető nitrogén formák hosszú távú biztosításához.

A termés mennyiségi és beltartalmi paraméterek változása szintén fontos információval szolgálhat a nitrapyrin és lombtrágya kezelések hatékonyságáról. Eredményeinket összegezve elmondható, hogy ezen paraméterek kedvező változását elsősorban a nitrapyrin kezelés eredményezte, azonban a kezelés lombtrágyával történő kiegészítés adott esetben további jelentős növekedést eredményezett. Ez szintén a nitrapyrin kezelés hatására a talajban kialakuló kedvezőbb N-ellátottsági körülményekkel, ezen keresztül pedig a növények javuló nitrogén felvételével magyarázható. A termés fehérje-, olaj- és keményítőtartalma esetében csak kismértékű változásokat tapasztaltunk a kezelések hatására, azonban észrevehető, hogy a fehérjetartalom növekedését leginkább a nitrapyrinnel kezelt állományok eredményezték, mely hasonlóan a kedvezőbb N-ellátottsággal magyarázható, amely a fehérjeépítés nélkülözhetetlen ásványi anyaga.

A kukorica specifikus kórokozóival szembeni toleranciáját is vizsgáltuk a nitrapyrin és lombtrágya kezelések függvényében. Megállapítottuk, hogy a két kórokozóval történő mesterséges csőfertőzést követően a látható tünetek megjelenését leginkább a kezeletlen állományokban, míg legkevésbé a kombinált kezelésű kukoricában tapasztaltuk. Így, a kukorica gombafertőzéssel szembeni legnagyobb toleranciáját a nitrapyrin és lombtrágya kezeléseknek köszönhetően a tápanyagokkal leginkább ellátott állományban érték el. Az *Aspergillus flavus* és a *Fusarium verticillioides* patogének növényvédelmi szempontból egyre gyakoribb és súlyosabb problémákat okoznak, ezért eredményeink felhívják a figyelmet a helyes és kielégítő tápanyagutánpótlásra, mellyel mérsékelhető a kórokozók által okozott fertőzések intenzitása.

A nitrapyrin és lombtrágya kezelés hatékonysága a kukorica levélszöveti tápelemtartalmának meghatározásával is igazolható. A levélanalízis eredménye

mindenképp figyelemreméltó, ugyanis számos esetben a makroelemek mellett a magnézium és S hiányállapotával is szembesültünk. A legtöbb kísérletben a kezelések hatására sem sikerült jelentős mértékben növelni a kritikus szint alatti tápelemek mennyiségét, azonban a HD-19 kísérletben az állomány N-ellátottságában jelentős javulását sikerült elérni a nitrapiyin kezeléssel. Mindez azért is fontos, mert a területen homoktalaj volt, amely arra enged következtetni, hogy a laza szerkezetű, szervesanyagban szegényes talajokban a tápanyagellátást kiegészítő, segítő kezelések nagyobb hatékonysággal alkalmazhatók. Eredményeinkből szintén szembetűnik, hogy a hiánybetegségek leggyakrabban 2021-ben léptek fel, ugyanis minden kísérleti helyszínen a N, P, K és S hiányállapotát állapítottuk meg. Ezen eredmények az évjárat kedvezőtlen hidrometeorológiai adataival magyarázhatóak, hiszen a kukorica fejlődésének, tápanyagfelvételének intenzív időszakában nem érkezett megfelelő mennyiségű csapadék, így oldószer hiányában a növények nem tudták a tápanyagokat megfelelő mennyiségben hasznosítani. A levélanalízis eredménye ezen felül a rejtett hiánybetegségek fontosságára is felhívja a figyelmet, ugyanis a legtöbb tápanyag alacsony mennyiségére utaló tünetek hiányában a hiánybetegségek időben történő felismerése is nehézkes. A kukorica fiziológiai szempontból a N mellett a Mg és Zn ellátottságára mutat nagyobb fokú érzékenységet. Eredményeink alapján a Mg és Zn hiányállapota is gyakorta fordult elő, amelyek mennyisége a lombtrágyás kezelés következtében sem növekedett jelentős mértékben. Erre egy lehetséges magyarázatunk, hogy a kijuttatott lombtrágya tápelem összetétele általános volt, amely Zn-et csak alacsony mennyiségben, Mg-ot pedig egyáltalán nem tartalmazott. Következésképpen azt nem tudni, hogy a Zn és Mg-ellátottság milyen mértékben növekedett volna, ha a kukorica tápanyag szükségleteihez igazodó tápelemösszetételű lombtrágyát juttattunk volna ki. Eredményeink azonban szintén alátámasztják azon korábbi kutatásokat, melyek a kukorica magnézium és cink ellátottságára történő nagyobb odafigyelésre hívják fel a figyelmet.

A kukorica egészségét szintén jól mutató klorofill-*a* és klorofill-*b* pigmentek legmagasabb értékeit a nitrapiyinnel és lombtrágyával együttesen kezelt állományokban tapasztaltuk, míg az oxidatív stressz hatására aktiválódó SOD, prolin- és MDA tartalom legalacsonyabb értékeit szintén a kombinált kezelésű növényekben állapítottuk meg. Ezek az eredmények jól mutatják a tápanyagellátás rendkívüli jelentőségét a növények egészségében és stressz toleranciájának növelésében.

Kutatásunk során a nitrapyrin hatékonyságát változó talajhőmérsékletekben is vizsgáltuk laboratóriumi környezetben. Elmondható, hogy a nitrapyrin nitrifikációra gyakorolt inhibíciója a hőmérséklet emelkedésével növekedett. Szabadföldi kísérletünk eredményei alapján azonban a nitrapyrin magasabb hőmérsékletű talajba történő kijuttatása, azaz a kezelés késleltetése elsősorban csapadékos évjáratban (2020) eredményezett nagyobb hatékonyságot a korai, még vetés előtti kijuttatáshoz képest. Összefoglalva az eredményeket kijelenthető, hogy a nitrapyrin késleltetett kijuttatása csak abban az esetben indokolt, ha a kezelést követő időszakban nagyobb mennyiségű csapadék várható, amely segíti a kezelés hatására elérhető nagyobb mennyiségű nitrogén hatékonyabb hasznosítását. Tekintve, hogy a nitrapyrin önmagában történő kijuttatása plusz munkaműveletet jelent, a gyakorlatban a kukorica posztemergens gyomirtásával egy menetben történő kijuttatását javasolható.

Kutatási tevékenységünket összegezve a nitrapyrin és lombtrágya kezelések növényfiziológiai állapotra gyakorolt kedvező hatásait különböző területeken és évjáratokban is sikerült igazolni. Eredményeink felhívják a figyelmet a tápanyagutánpótlás jelentős szerepére a növényi stressztűrésben, illetve a N eredetű veszteségek mérséklését célzó technológiák fontosságára. Vizsgálataink alapján a nitrifikációs inhibitor kijuttatása homoktalajban eredményezte növényfiziológiai szempontból a legjelentősebb és leglátványosabb javulást, következésképpen a nitrapyrin kezelés elsősorban a kolloidban szegényes, laza szerkezetű talajokban, továbbá csapadékos időszakokban indokolt, amikor a N eredetű veszteségek mértéke jelentősebb. A növényi hiánybetegségek gyakori előfordulása szintén nagy figyelmet igényel, amelyek kiküszöbölésére, kezelésére szolgáló lombtrágyák kijuttatása hatékony megoldást nyújthat, azonban eredményeink rávilágítanak a növények tápanyagigényéhez igazodó összetételű lombtrágyák használatára. Mind a nitrifikációs inhibitor, mind a lombtrágya kezelések a kijuttatott tápanyagok hasznosulását segítő, a tápanyagutánpótlást kiegészítő technológiáknak tekinthetők, azonban fontos hangsúlyozni, hogy kedvezőtlen, csapadékszegény évjárat esetében ezek egyike sem nyújt kellő hatékonyságot és eredményességet. Dolgozatomban eredményeinek összefoglaló következtetéseként elmondható, hogy a nitrapyrin, valamint a lombtrágya kezeléseknak is helye van a gyakorlatban, melyeket a nagyfokú hatékonyság érdekében a termőhelyi adottságokhoz igazodóan, a termesztett növény bizonyos tápanyagokkal szembeni fokozott érzékenységét, illetve a meteorológiai előrejelzéseket is figyelembe véve szükséges alkalmazni.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- 1. Kutatási eredményeink alapján a nitrapyrin kezeléssel növelhető a kukorica nitrogénhasznosítása,** javulnak a növény nitrogén ellátottságával összefüggő paraméterek. Kísérleteinkben a nitrapyrin kezelés hatására a levelek relatív klorofilltartalma átlagosan 13%-kal, a gyökértömeg 28%-kal, a szárvastagság 16%-kal, az ezerszemtömeg 12%-kal, a csőhosszúság 17%-kal, a csővastagság 9%-kal, a fehérjetartalom 4%-kal, a klorofill-*a* tartalom 7%-kal, a klorofill-*b* tartalom pedig 11%-kal növekedett a kezeletlen állományokhoz képest.
- 2. Talajinkubációs vizsgálat alapján bizonyítottuk, hogy a nitrapyrin hatékonysága a talajhőmérséklet emelkedésével nő.** Igazoltuk, hogy a melegebb talajhőmérsékletben felgyorsuló nitrifikáció következtében a nitrapyrin inhibíciója erősödik. Laboratóriumi kísérletünk során 25°C mellett, azaz a legmagasabb talajhőmérséklet esetében tapasztaltuk a legnagyobb különbséget a kezeletlen és a nitrapyrinnel kezelt talajminták nitráttartalma között, ugyanis a 3. heti mérés során a nitrapyrinnel kezelt talajminta nitráttartalma 50%-kal volt kevesebb a kezeletlen talajmintában mért eredménnyel.
- 3. Igazoltuk, hogy a nitrapyrin vetés utáni, késleltetett kijuttatásának kedvező hatása csapadékos évjáratban várható.** Szabadföldi kísérleteink (2020, 2021) alapján 2020-ban optimális mennyiségű csapadék érkezett a vegetáció alatt, így, a kései nitrapyrines kezelés hatására a kukorica levelek relatív klorofill tartalma 22%-kal a gyökértömeg 38%-kal, a szárvastagság 11%-kal, a termés fehérje tartalma pedig 11%-kal haladta meg a korai, még a vetés előtt kijuttatott nitrapyrin hatékonyságát. Ezzel szemben az aszályos évben (2021) a vizsgált paraméterek tekintetében pozitív változást egyáltalán nem tapasztaltunk a kései kijuttatás következtében.
- 4. A nitrapyrin kezelés kiemelkedően hatékonnak bizonyul homokos talajban történő alkalmazásakor.** A homoktalajon beállított kísérletünk során a nitrapyrin kezelés hatására a kukorica levelek nitrogén tartalma 33%-kal volt magasabb a kezeletlen állományhoz képest, amely vizuálisan is szembetűnő különbséget eredményezett, ugyanis a kezeletlen állomány a nitrogén hiányos állapot súlyos tüneteit mutatta, szemben a kezelt területtel.

5. Bizonyítottuk, hogy a nitrapyrin lombtrágya kezeléssel történő kiegészítése további kedvező növényfiziológiai változásokat eredményez kukoricában. A kukorica levelek klorofill-*a* tartalma 13%-kal, a klorofill-*b* tartalma 28%-kal, a karotinoid tartalma pedig 11%-kal növekedett a kombinált kezelés hatására a kezeletlen állományokhoz képest, ezzel pedig meghaladva a nitrapyrin, lombtrágya önmagában történő kezeléseinek hatékonyságát is. Az oxidatív stressz hatására felhalmozódó indikátorok, így a maldondialdehid tartalom 33%-kal, a szuperoxid-dizmutáz aktivitás 25%-kal, a prolin tartalom pedig 33%-kal csökkent a kombinált kezelés hatására a kezeletlen állományhoz képest, jelentősen mérsékelve ezzel az oxidatív stressz okozta negatív hatásokat. Továbbá a kukorica biotikus stresszválaszát vizsgálva kimutattuk, hogy **az *Aspergillus flavus* és *Fusarium verticillioides* kórokozó gombák csőfertőzésének tünetei jelentősen csökkentek a kukorica nitrapyrin és lombtrágya együttes kezelésével.** Eredményeink alapján az *Aspergillus flavus* kórokozóval történő mesterséges csőfertőzés hatására a fertőzöttség tünetei a kombinált kezelésű állomány esetében 93%-kal, a *Fusarium verticillioides* kórokozó esetében pedig 85%-kal csökkentek a kezeletlen állományhoz képest.

7. GYAKORLATBAN ALKALMAZHATÓ EREDMÉNYEK

1. A nitrogén eredetű veszteségek csökkentését célzó nitrapyrin hatóanyagtartalmú nitrifikációs inhibitor sikeresen alkalmazható a magas nitrogénigényű növények hatékonyabb nitrogénellátására. Eredményeim alapján megállapítható, hogy a nitrapyrin alkalmazásával növelhetők a növények nitrogénellátottságával szoros korrelációban álló paraméterek, pl. a klorofilltartalom, a biomassza gyarapodás, az ezerszemtömeg és a termés fehérjetartalma. Az elért eredményeknek nagy gyakorlati jelentősége van, a nitrapyrin okszerű kijuttatásával a kukorica mellett a repce és kalászos növények terméshozama is növelhető.
2. A nitrapyrin kijuttatásának optimális idejére irányuló vizsgálatok alapján megállapítottuk, hogy amennyiben a nitrapyrin a növény vetése után, késleltetett kijuttatásának tervezett időpontját követően az előrejelzések alapján csapadékosabb napokra lehet számítani, illetve, ha öntözési rendszerrel ellátott területen tervezzük a kezelést, a nitrapyrin nagyobb fokú hatékonyságára lehet számítani.
3. A nitrapyrin laza szerkezetű, homoktalajokon történő kijuttatása jelentős mértékben segíti a növények hatékonyabb nitrogénhasznosítását, ezért a kezelést leginkább olyan területeken indokolt elvégezni, ahol a talaj fizikai féleségéből adódóan nitrogén veszteségek alapvetően jelentősebbek.
4. A kukorica tápanyagutánpótlását kiegészítő lombtrágyás kezelés önmagában nem elégséges a növény egészségi állapotának javításához. Vizsgálataink alapján megállapítottuk, hogy a kukorica tápelem igényeihez igazodó, magas Zn és Mg tartalmú készítmények alkalmazása célszerű, ugyanis a laboratóriumi levélanalízis eredményei rávilágítottak a kukorica Zn és Mg hiányával szembeni fokozott érzékenységére.
5. Kísérletünk legtöbb helyszínén a levélszövetek tápelemtartalmának laboratóriumi vizsgálatai felhívják a figyelmet a növények gyakori rejtett hiánybetegségeire, amelyek időben történő feltárása és kezelése minden gazdálkodónak alapvető feladata.

6. Napjainkban számos kutatás középpontjában a növények stressztűrését javító kutatások állnak. A nitrapyrin- és lombtrágyakezelés kombinációjával növelhető a növények biotikus (kórokozók fertőzése) és abiotikus stresszel szembeni toleranciája, így a tápanyaghasznosulást segítő nitrifikációs inhibitorok, illetve a tápanyagutánpótlást kiegészítő lombtrágyás kezelések gyakorlatban történő alkalmazása egyaránt indokolt a növények kedvezőbb egészségi állapotának elérése érdekében.

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A globális klímaváltozás következtében az időjárásunk szélsőségesseé válása a legtöbb gazdálkodót egyre nagyobb kihívás elé állítja. A kedvezőtlen időjárási körülmények a növények fokozott stressztűrését követeli meg, éppen ezért nem meglepő, hogy a növényi stressztűrő képesség javítását célzó technológiák kutatásai is egyre nagyobb jelentőséggel bírnak. A különböző abiotikus és biotikus stresszhatásoknak a szántóföldi növények helyhez kötöttségük révén különösen kitettek. A növények általános kondícióját javító technológiák közül hangsúlyos szerepet kapnak a tápanyagutánpótlással, valamint a kijuttatott tápanyagok hatékonyabb hasznosítását célzó vizsgálatok, hiszen a növények megfelelő egészségi állapotának kialakításában jelentős szerepe van az optimális és kielégítő tápanyagellátásnak. Kutatásunk során ezért a növényi egészségi állapot javítását tűztük ki célul, mely során a nitrogén hasznosítást segítő nitrifikációs inhibitor, illetve a tápanyagutánpótlást kiegészítő lombtrágyás kezelések hatásait vizsgáltuk kukoricában. A kutatásom alapjául szolgáló kukoricánövény választását indokolja a sokoldalú felhasználhatósága, melynek köszönhetően termesztése nem csak hazánkban, de világviszonylatban is egyre nagyobb jelentőséggel bír.

A kukorica minden tápelem közül a nitrogént igényli a legnagyobb mennyiségben, ezért a megfelelő hatékonyságú hasznosulása kiemelten fontos, azonban különösen a nitrát kimosódásból adódó nitrogén eredetű veszteségek következtében a növények számára hozzáférhető nitrogén formák mennyisége nagy mértékben csökkenhet. A nitrátionok kimosódása nem csak a növény számára jelent jelentős tápanyagvesztést, de az ívóvízben történő felhalmozódása veszélyes állat-és humánegészségügyi kockázattal bír. Habár a nitrogén eredetű veszteségek csökkentése érdekében hazánkban szigorúan szabályozzák a nitrogén műtrágyák-és szerves-trágyák mennyiségét és kijuttatásuk idejét, a gyakorlatban mégis számos esetben találkozhatunk a növények súlyos nitrogén hiánybetegségét jelző tüneteivel.

A nitrátionok kimosódását csökkentő nitrogén stabilizátorok alkalmazása a fenti probléma megoldását jelentheti. A nitrifikációs inhibitorok ugyanis növények számára hosszabb távon elérhető nitrogén formák biztosítására szolgálnak, amelyek az ammónium ionok oxidálását végző nitrifikáló baktériumok aktivitásának megzavarásával késleltetik a nitrátképződést és csökkentik a mozgékony ionok talajvíz irányába történő kimosódását. Ennek köszönhetően a kimosódásra hajlamos, mozgékony nitrátionokkal

szemben a talajkolloidok felületéhez erősebb kötődő ammóniumionok mennyisége hosszabb ideig marad a növények számára elérhető a talajban. A nitrapyrin hatóanyagtartalmú nitrifikációs inhibitor hatékonyságát számos korábbi kutatás vizsgálta, azonban a témában íródott hazai szakirodalom aligha lelhető fel, éppen ezért fontosnak ítéltük meg, hogy kutatásunk során a környezetvédelmi szempontból is kedvező hatásokat ígérő nitrapyrin hatékonyságát is vizsgáljuk Magyarországon. A nitrapyrin kijuttatásának időzítéséről és a kezelés hatékonyságát befolyásoló tényezőkről megannyi, sokszor ellentmondásos adatok születtek, ezért doktori kutatásom célkitűzései között a nitrapyrin hőmérsékletfüggésének, valamint különböző területeken történő alkalmazásának vizsgálatai szerepeltek a kukorica egészségi állapotának felmérésén keresztül.

A nitrogén mellett azonban más tápelemek hatékony hasznosítását célzó technológiák alkalmazása is releváns a gyakorlatban, ugyanis a szélsőséges hidrometeorológiai tényezők, a talajok helytelen művelése és rendszeres műtrágyázás hatására kedvezőtlen talajállapotok alakulhatnak ki, amelyek jelentősen hátráltathatják a növények gyökéren keresztüli hatékony tápanyagfelvételt. A különböző lombtrágyás kezelésekkel azonban a növények kondícióját támogathatjuk egy-egy nagyobb stressz hatásoknak kitett időszakban. A levélen keresztüli tápanyagutánpótlás a kiszámíthatatlan időjárási szélsőségek következtében egyre nagyobb jelentőséggel bír, ráadásul a technológia alkalmazása ma már a szántóföldi növények körében is elterjedt. Lombtrágyázással ugyanis jelentősen javítható a növények egészségi állapota és segítségükkel a különböző hiánybetegségek is megszüntethetők.

A kukorica eredményes, magas terméshozamokat produkáló termesztése intenzív tápanyagutánpótlást igényel, éppen ezért fontos a kijuttatott tápelemek minél hatékonyabb hasznosulása. Ezen gondolatokból kiindulva kutatásunk során célkitűzésünk a nitrapyrin hatóanyagtartalmú nitrogén stabilizátor, illetve lombtrágya kezelések különálló, illetve együttes hatásainak vizsgálata volt, amely kezelések hatékonyságát a növény számos, fiziológiai állapotával összefüggő paraméter mérésén keresztül követtük nyomon a 2019., 2020. és 2021. évjáratokban. Kísérleteinket egyidejűleg több területen állítottuk be, így egy átfogó képet kapva a nitrapyrin és lombtrágya kezelések eredményességét leginkább meghatározó körülményekről. Vizsgálataink helyszínéül a Debreceni Egyetem MÉK Bemutatókertje, az Agrárgazdaság Kft., a Hajdúhadházi Bocskai Mezőgazdasági Kft. és a Kurucz Farm Kft. területei szolgáltak. A kezelések hatékonyságát, illetve a kukorica egészségi állapotára gyakorolt hatását az alábbi paramétereken keresztül vizsgáltuk: a nitrapyrin kezelés hatására a talaj

nitráttartalmának változása, a kukorica levelek relatív klorofilltartalma, levélszövetek tápelemellátottsága, a szárvastagság, a gyökértömeg, az ezermagtömeg, a csővastagság, a csőhossz, a termés fehérje-, keményítő- és olajtartalma. Ezen felül célzott kísérletekben vizsgáltuk a kukorica specifikus kórokozói, az *Aspergillus flavus* és a *Fusarium verticillioides* mikotoxinokat termelő gombafajok mesterséges csőfertőzésével szembeni toleranciát, valamint az oxidatív stressz hatására felhalmozódó SOD, prolin, malondialdehid indikátorok és a növény fotoszintetikus pigment tartalmának változását az egyes kezelések függvényében. További fontos célkitűzésünk volt a nitrapyrin kijuttatásának optimális időzítésére irányuló laboratóriumi és szabadföldi vizsgálatok összevetése, mely szintén a sok esetben ellentmondásos eredményeket közlő szakirodalmak tisztázásához járultak hozzá.

A hároméves vizsgálataink során számos meghatározó jelentőségű eredmény született. Elmondható, hogy a nitrapyrin kezelés hatására a talajitráttartalmának nyomon követése alapján nem vonhatunk le egyértelmű következtetést a kezelés hatékonyságától, ugyanis a talajmintavétel időpontjában, így a talaj aktuális állapotában meghatározott nitráttartalom jelentős differenciája a kezeletlen talajhoz képest önmagában még nem szolgáltat elegendő információt arról, hogy a kezelés valóban hozzájárul-e a növény hatékonyabb nitrogén hasznosításához. Mindazonáltal a nitrapyrin kijuttatását követően a kísérletek mindegyikében jelentős eltérést okozott a talaj nitráttartalmában a kezeletlen talajhoz képest, amely alapján arra következtethetünk, hogy a nitrifikáció inhibíciója következtében késleltetett volt a nitrátionok képződése. A talajban mérhető nitráttartalom eredményeit más, a kukorica egészségi állapotával kapcsolatos paraméterekkel kiegészítve azonban már arra is választ kaphatunk, hogy a nitrapyrin kezelés hatására a növény számára hosszabb távon elérhető nitrogénformák hasznosulása mennyire volt eredményes.

A levelek relatív klorofilltartalma informálhat a növény általános egészségi állapotáról, ráadásul szoros összefüggést mutat a nitrogénellátottsággal. Megállapítottuk, hogy a nitrapyrin kezelés hatására a relatív klorofilltartalom jelentős mértékben emelkedett a kezeletlen állományokhoz képest, azonban a kezelés lombtrágyával történő kiegészítés hatására adott esetben további növekedést eredményezett. Hasonló tendenciát figyeltünk meg a növény egészségét szintén jól indikáló fotoszintetikus pigmentek (klorofill-*a*, klorofill-*b*, karotinoidok) mennyiségéről, amelyek legmagasabb értékeit a nitrapyrin és lombtrágya kezelésben egyaránt részesülő állományokban tapasztaltuk. A növényi stresszállapotot jelző indikátorok, mint a SOD aktivitása, a prolin-és

malondialdehid tartalom legalacsonyabb értékeit a kombinált kezelésű növényekben, míg a legmagasabb értékeit a kezeletlen állományokban állapítottuk meg. A kukorica két jelenetős kórokozójának, az *A. flavus* és *F. verticillioides* okozta mesterséges csőpenészesedés tüneteit legkevésbé a kombinált kezelésű, míg leginkább a kezeletlen növényekben figyeltük meg. Ezen eredmények rámutatnak arra, hogy a két technológia együttes alkalmazásával érhető el a növények legkedvezőbb egészségi állapota.

A termés mennyiségi és beltartalmi paramétereinek vizsgálataikor megállapítottuk, hogy az ezerszemtömeg, a csőhossz és a csővastagság mind az önmagában nitrapiyrinnel, lombtrágyával és ezek együttesével történő kezelés hatására is jelentősen javult a kezeletlen állományokhoz képest, azonban a kezelések között a legtöbb esetben statisztikailag is igazolható differencia nem állapítható meg. Az ezerszemtömeg változását figyelve a kezelések függvényében azonban kijelenthető, hogy elsősorban a nitrapiyrines kezelés következtében tapasztaltunk növekedést, amely a lombtrágyával történő kiegészítő kezelés hatására adott esetben további növekedést eredményezett. A termés beltartalmi paraméterei közül a fehérjetartalom esetében tapasztaltunk növekedést a nitrapiyrin kezelés hatására. A kukorica biomassza gyarapodását jelző szárvastagság és gyökértömeg változását is figyeltük, mely paraméterek vizsgálatát a nitrapiyrin hatékonyságának nyomon követése érdekében végeztük. Megállapítottuk, hogy a kísérletek mindegyikében a két paraméter jelentős növekedését tapasztaltuk a kezelés hatására. Eredményeinket összefoglalva elmondható, hogy a relatív és abszolút klorofilltartalom, az ezerszemtömeg, a szárvastagság és a gyökértömeg, azaz a nitrogénellátottsággal szorosan összefüggő paraméterek kedvező változását eredményezte a nitrapiyrin kijuttatása. Mindez feltehetően a kezelés hatására a talajban kialakuló kedvezőbb nitrogénfelvételi körülményekkel magyarázható, amelynek köszönhetően a kukorica nagyobb mennyiségben hasznosította a nitrogént.

A kukorica levélszöveti tápelemellátottságát mutató levélanalízis eredménye azonban figyelemfelhívó jelentőségű, ugyanis a kísérleteink döntő hányadában a makrotápelemek mellett a magnézium, kén és cink hiányállapotát állapítottuk meg, melyek megszűnését még a kezelések hatására sem sikerült elérni. Kivételt képez ez alól a homoktalajon beállított kísérletünk, ahol a nitrapiyrin kezelés eredményeként a kukorica nitrogénellátottsága szignifikáns mértékben javult, ezzel megelőzve a kezeletlen állományban kialakult súlyos hiánybetegséget. A levélanalízis eredménye ezen felül a rejtett hiánybetegségek időben történő diagnosztizálására is felhívja a figyelmet, ugyanis a legtöbb tápelem hiányállapotát jelző tüneteket nem lehetett egyértelműen felismerni.

Mivel a kukorica a Mg és Zn ellátottságára fokozottan érzékeny, ezen tápelemek vizsgálatára nagyobb figyelmet fordítottunk. Tekintve, hogy kísérleteink során egy általános tápelemösszetételű lombtrágyát alkalmaztunk, nem tudni, hogy a Zn-et nagyobb, illetve Mg-ot is tartalmazó lombtrágya alkalmazásakor megelőzhetők-e volna a hiánybetegségek kialakulását.

A nitrapyrin hőmérsékletfüggésének laboratóriumi vizsgálatai alapján elmondható, hogy a talajhőmérséklet emelkedésével a nitrapyrin hatékonysága nő, ugyanis minél magasabb hőmérsékletű volt a talaj, annál nagyobb differenciát állapítottunk meg a nitrapyrinnel kezelt és kezeletlen talaj nitráttartalma között. Ez feltehetően a talajhőmérséklet emelkedése következtében a nitrifikáló baktériumok elszaporodásával magyarázható. A kontrollált körülmények között beállított kísérlet alapján vizsgáltuk továbbá a nitrapyrin késleltetett kijuttatásának hatását szabadföldi körülmények között is. A kísérlet megvalósításának indoklásul szolgál, hogy a kukorica 6-7 leveles fenológiai fázisától kezdődően fokozott nitrogén felvétel indul meg, amely felveti annak kérdését, hogy valóban észszerű-e a nitrogénhasznosítást elősegítő nitrapyrin kijuttatása a kukorica vetését megelőzően. Feltételeztük ugyanis, hogy a nitrapyrin később történő kijuttatásának köszönhetően az intenzív nitrogénfelvételének időszakában a nitrapyrin hatásmechanizmusából adódó többlet nitrogénforrás nagyobb mértékben járul hozzá a növények nitrogénhasznosításához, ezzel felülmúlva a korai kijuttatás hatékonyságát. A kétéves (2020, 2021) vizsgálatok eredményei rámutattak az évjárat meteorológiai adottságainak fontosságára, hiszen míg a kukorica számára kedvezőbb évjáratban, 2020-ban jelentősen több csapadék érkezett a kritikus fejlődési időszakban, addig 2021-ben ugyanezt az időszakot meglehetősen a sokszor extrém magas hőmérséklet és a csapadékhiány párosa jellemezte. Ennek okán a nitrapyrin kései kijuttatása is eltérő hatással bírt, ugyanis 2020-ban a késleltetett kezelés hatékonysága jelentősen felülmúlta a korai kezelését. Ezt igazolják azok az eredmények, miszerint a kései nitrapyrines kezelés a relatív klorofilltartalom, a gyökértömeg, a szárvastagság, a csőhossz, csővastagság, a fehérjetartalom és a levélszövet nitrogén tápelemellátottsága paraméterek esetében további jelentős növekedést eredményezett a korai kezeléshez képest, míg ezzel szemben, a növények számára kedvezőtlenebb évjáratban, 2021-ben már az említett paraméterek egyikénél sem állapítottunk meg javulást. Ezáltal arra következtethetünk, hogy a növények hatékonyabb nitrogénhasznosításának érdekében a nitrapyrin kései kijuttatása csak is az időjárási előrejelzésekre alapozva indokolt, ugyanis a kellő hatékonyság eléréséhez nélkülözhetetlen a kijuttatást követő időszakban a csapadék.

Doktori disszertációm alapjául a nitrapyrin hatóanyagtartalmú nitrifikációs inhibitor, valamint a lombtrágya kezelések különálló és együttes hatásainak vizsgálatai szolgáltak kukoricában. Mivel a nitrapyrin hazai alkalmazásával kapcsolatos eredményeket bemutató átfogó tanulmány még nem született, illetve a jövőben egyre indokoltabb lesz a lombtrágya kezelések általános mezőgazdasági gyakorlatba való bevonása, kutatómunkám ezen jövőbeni stratégiákban rejlő potenciál alaposabb megismerésére szolgálhat. Eredményeim alapján a nitrogén stabilizátor alkalmazása elsősorban a laza szerkezetű homoktalajokon, illetve csapadékosabb időszakokban (így öntözött területeken is) javasolt, ahol a nitrátkimosódásból adódó nitrogénvesztés jelentősebb lehet. A kukorica speciális tápelemigényeinek és érzékenységeit figyelembevéve érdemes az erre célzott tápelemösszetételű lombtrágyákat alkalmazni, különös tekintettel a Mg és Zn tartalomra. Összességében a két technológia a kukorica intenzív növénytermesztési gyakorlatába történő beépítése indokolt, azonban egy kedvezőtlen időjárási időszakban ezek hatékonysága nem kielégítő. Éppen ezért a javasolt a jövőben további, az időjárási extremitások okozta stresszhatásokkal szembeni tolerancia, illetve a kijuttatott tápanyagok még hatékonyabb hasznosítását célzó kutatások folytatása.

9. SUMMARY

Extreme weather due to global warming presents increasingly higher challenges for farmers. Adverse climate conditions require increased stress tolerance of the crops, thus, it is not surprising the fact that studies focusing on technologies to improve stress tolerance are becoming more crucial. Arable crops are particularly exposed to different abiotic and biotic stress factors due to the localisation. Among the technologies that enhance the health condition of crops, studies aimed at nutrient supply and the more efficient utilization of the nutrients applied are fundamental, since optimal and satisfactory nutrient supply plays a significant role in the development of the proper health of plants.

Hence, our research aimed to improve health conditions of the crops, in which the effects of nitrification inhibitor that improves nitrogen utilization, as well as foliar fertiliser treatments supplementing nutrient supply on maize health. Maize as the basis of my research was chosen due to its variety of use, making its cultivation increasingly important not only in our country but also worldwide. Of all nutrients, maize requires the largest amount of nitrogen, thus, its efficient utilization has significant importance, however, nitrogen losses resulting from mostly nitrate leaching, can lead to a large reduction in the amount of nitrogen forms available to the crops. Nitrate leaching will not only result in a nutrient deficiency in crops, but the accumulation of nitrate ions in the water poses an animal and human health risk.

Although the amount and time of application of nitrogen fertilizers and organic fertilizers are strictly regulated in Hungary to mitigate nitrogen losses, in practice there are still many cases of severe nitrogen deficiency symptoms in crops. The use of nitrogen stabilisers to reduce the nitrate leaching can solve this problem. Nitrification inhibitors are used to provide to plants with longer-available forms of nitrogen, which delay the conversion of nitrate by disturbing the activity of nitrifying bacteria that oxidise ammonium ions and reduce leaching of mobile ions to the groundwater. This means that ammonium ions, which are more strongly bound to the surface of soil colloids, remain available to plants in the soil for longer periods of time, unlike mobile nitrate ions, which are prone to leaching.

The efficiency of the nitrification inhibitor containing nitrapyrin has been studied by several previous experiments, but there is hardly any literature on the subject in Hungary, therefore we considered it important to examine the effect of nitrapyrin in Hungary, which promises to have positive environmental effects.

There is often conflicting data on the timing of nitrapyrin application and the factors that influence the efficiency of the treatment, thus, the objectives of my research included studying how nitrapyrin works in different temperatures and its application in different fields by examining parameters giving a good indication of maize health condition. However, in addition to nitrogen, the use of other technologies for efficient nutrient uptake is also relevant in practice, as extreme hydro-meteorological factors, inappropriate soil cultivation and regular fertilisation can lead to unfavourable soil conditions that can significantly hamper efficient nutrient uptake by plants through the roots.

However, different foliar fertiliser treatments can be used to support the condition of the crops during a period of higher stress. Foliar fertilisation is becoming increasingly important in the face of unpredictable weather extremes, and the technology is now also widely used in arable crops. Foliar fertilisation can significantly improve the health of crops and can also help to prevent various deficiency diseases.

Successful maize production with high yield parameters demands intensive nutrient fertilisation, thus, supporting technologies that facilitate nutrient utilisation is recommended. Based on these thoughts, the objective of our research was to examine the effects of nitrogen stabiliser containing nitrapyrin and foliar fertiliser treatments separately and in combination, and to monitor the effectiveness of these treatments by measuring a number of crop health-related parameters in the 2019, 2020 and 2021 years. Our experiments were set up in several fields simultaneously, giving a comprehensive picture of the conditions that most influence the effectiveness of nitrapyrin and foliar fertilizer treatments. Our experiments were carried out in the Demonstration Garden of the University of Debrecen, in the fields of Agrárgazdaság Ltd., Bocskai Mezőgazdasági Ltd. and Kurucz Farm Ltd. The efficiency of the treatments and their effect on maize health was monitored through the following parameters: changes in soil nitrate content, relative chlorophyll content of maize leaves, nutrient supply to leaf tissues, stem diameter, weight of root mass, thousand kernel weight, ear diameter, ear length, protein, starch and oil content of the yield. Furthermore, we conducted targeted, special experiments to examine the maize tolerance to artificial infection by specific pathogens, *Aspergillus flavus* and *Fusarium verticillioides*, and the changes in SOD, proline, malondialdehyde indicators and photosynthetic pigment content of the plant under oxidative stress depending on each treatment.

A further important objective was to compare laboratory and field studies on the optimal timing of nitrapyrin application, which also helped to clarify the literature, which often reported contradictory results.

Our three years of research have produced a number of landmark findings. It can be concluded that monitoring the nitrate content of the soil after nitrapyrin treatment does not allow us to draw a clear conclusion about the effectiveness of the treatment, because the significant difference in nitrate content at the time of soil sampling, and thus in the current soil condition, compared to untreated soil does not in itself provide sufficient information on whether the treatment is actually contributing to more efficient nitrogen use by the crop. However, in all the experiments, nitrapyrin caused a significant difference in soil nitrate contents after its application compared to untreated soil, suggesting that nitrate ion conversion was delayed due to inhibition of nitrification. Although, by complementing the results of soil nitrate measurements with other parameters related to maize health, we can now see how effective the nitrapyrin treatment was in utilising the forms of nitrogen available to the crops in the longer term.

The relative chlorophyll content of the maize leaves can provide information on the overall health of the plant, and is closely related to the nitrogen supply. It was found that nitrapyrin treatment resulted in a significant increase in relative chlorophyll content compared to untreated crops, but its supplementation with foliar fertilizer resulted in further increases occasionally. A similar trend was observed for photosynthetic pigments (chlorophyll-*a*, chlorophyll-*b*, carotenoids), which are also good indicators of plant health, we measured the the highest values in crops treated with both nitrapyrin and foliar fertilizer. Indicators of plant stress status such as SOD activity, proline and malondialdehyde content were found to be lowest in the combined treatment plants and highest in the untreated crops.

The symptoms of artificial maize ear mildew caused by the two maize pathogens, *A. flavus* and *F. verticillioides*, were least observed in the combination-treated crops and most in the untreated ones. These results show that the best maize health can be achieved by combining the two technologies.

When examining the quantitative and qualitative parameters of the crop, it was found that the thousand kernel weight, ear length and thickness all improved significantly after treatment with nitrapyrin alone, foliar fertilizer and a combination of these compared to untreated plots, but in most cases no difference between treatments could be found statistically. However, observing the variation in the thousand kernel weight depending

on the treatments, it can be stated that an increase was mainly coming from the nitrapyrin treatment, which resulted in a further increase occasionally by its supplementation with foliar fertilizer.

Among the crop quality parameters, an increase in protein content was observed with nitrapyrin treatment. We also monitored changes in maize stem diameter and root mass, parameters that indicate biomass growth, to monitor the effectiveness of nitrapyrin. We found that in all experiments there was a significant increase in both parameters as a result of the treatment.

Summerising the findings, the application of nitrapyrin resulted in favourable changes in relative and absolute chlorophyll content, thousand kernel weight, stem diameter and root mass, parameters closely related to nitrogen supply. This is presumably due to the improved nitrogen uptake conditions in the soil as a result of the treatment, which led to higher nitrogen uptake by maize.

However, attention must be drawn to the results of laboratory maize leaf analysis to determine the nutrient status of the leaf tissues. In the majority of our experiments we found deficiencies of magnesium, sulphur and zinc in addition to macronutrients, which could not be healed even by treatments. An exception to this is our experiment on sandy soils, where nitrapyrin treatment resulted in a significant improvement in nitrogen supply to maize, preventing severe deficiency disease in untreated crops. The results of the leaf analysis also highlight the importance of timely diagnosis of hidden deficiencies, as most symptoms of nutrient deficiencies could not be clearly identified. As maize is highly sensitive to Mg and Zn supply, more attention was paid to the analysis of these nutrients. Considering that we applied a foliar fertilizer with a general nutrient composition in our experiments, it remains unclear whether the application of a foliar fertilizer with a higher Zn and Mg content would have prevented the development of deficiency diseases.

Laboratory studies on the effect of nitrapyrin in different soil temperatures show that the efficiency of nitrapyrin increases with increasing soil temperature, as the higher the soil temperature, the greater the difference in nitrate content between nitrapyrin-treated and untreated soil. This is presumably due to an increase in nitrifying bacteria as soil temperatures rise. In addition, the effect of delayed application of nitrapyrin under field conditions was also examined based on the experiment set up under controlled conditions. The motivation for conducting the experiment is that increased nitrogen uptake starts from the 6-7 leaf phenological stage of maize, which raises the question of whether it is reasonable to apply nitrapyrin to enhance nitrogen utilisation before maize

sowing. It was speculated that the later application of nitrapyrin during the period of intensive nitrogen uptake would result in a greater contribution of the excess nitrogen source from the mechanism of action of nitrapyrin to the nitrogen utilisation of the crops, thus outperforming the efficiency of early application. The results of the two-year studies (2020, 2021) revealed the importance of the meteorological characteristics of the year, since while in 2020, the more favourable year for maize, there was significantly more precipitation during the critical period of growth, in 2021 the same period was characterised by a mixture of often extremely high temperatures and lack of precipitation. This is also why the delayed application of nitrapyrin had a different effect, with the efficiency of delayed treatment significantly exceeded the efficiency of the early treatment in 2020. This is confirmed by the results that the late nitrapyrin treatment resulted in further significant increases in relative chlorophyll content, root weight, stem diameter, ear length, ear diameter, protein content and nitrogen content of the leaf tissues compared to the early treatment, while in 2021, a less favourable year for the plants, no improvement was observed in any of these parameters. This concludes that the late application of nitrapyrin is only recommended only on the basis of weather forecasts in order to achieve more efficient nitrogen use by the crop, as precipitation in the post-application period is essential to achieve the right efficiency.

My PhD thesis was based on studies of the effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and the separate and combined effects of foliar fertilizer treatments in maize. As a comprehensive study on the results of the in-country application of nitrapyrin has not yet been published, and as there is a growing interest in the future to integrate foliar fertilizer treatments into agricultural practice, my research can serve to better understand the potential of these future strategies. Results obtained suggest that the use of nitrogen stabilisers is recommended mainly on sandy soils with light texture and in periods of higher precipitation (including irrigated areas), where nitrogen losses due to nitrate leaching may be more relevant. Taking into account the specific nutrient requirements and sensitivities of maize, it is advisable to apply foliar fertilizers with a specifically targeted nutrient composition, with particular attention to Mg and Zn content. In summary, the integration of these two technologies into maize intensive cropping practices is well warranted, but their effectiveness in an adverse weather condition is not satisfactory. For this reason, it is recommended that further research into tolerance to stress effects caused by weather extremes and more efficient use of applied nutrients should be continued in the future.

10. FELHASZNÁLT IRODALOM

- Abbas H. K. – Cartwright R. D. – Xie W. – Shier W. T.: 2006. Aflatoxin and fumonisin contamination of maize (maize, *Zea mays*) hybrids in Arkansas. *Crop Protection*. 25: 1-9. doi: 10.1016/j.cropro.2005.02.009
- Abbas H. K. – Mascagni H. J. – Bruns H. A. – Shier W. T. – Damann K. E.: 2012. Effect of planting density, irrigation regimes, and maize hybrids with varying ear size on yield, and aflatoxin and fumonisin contamination levels. *American Journal of Plant Sciences*. 3: 1341-1354. doi: 10.4236/ajps.2012.310162
- Abdelaal K.A.A. – Hafez Y.M. – El-Afry M.M. – Tantawy D.S. – Alshaal T.: 2018. Effect of some osmoregulators on photosynthesis, lipid peroxidation, antioxidative capacity, and productivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) under water deficit stress. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018, 25, 30199–30211.
- Abdul Jaleel C. – Gopi R. – Sankar B. – Manivannan P. – Kishorekumar A. – Sridharan R. – Panneerselvam R.: 2007. Studies on germination, seedling vigour, lipid peroxidation and proline metabolism in *Catharanthus roseus* seedlings under salt stress. *South African Journal of Botany*. 2007, 73, 190–195.
- Adeyemi O. – Keshavarz-Afshar R. – Jahanzad E. – Battaglia M.L. – Luo Y. – Sadeghpour A.: 2020. Effect of Wheat Cover Crop and Split Nitrogen Application on Corn Yield and Nitrogen Use Efficiency. *Agronomy*. 2020;10(8):1081. doi:10.3390/agronomy10081081 Tóth
- Ahmadi A. – Emam Y. – Pessarakli M.: 2010. Biochemical Changes in Maize Seedlings Exposed to Drought Stress Conditions at Different Nitrogen Levels. *Journal of Plant Nutrition*. 2010, 33, 541–556
- Ali S. – Riaz Ka. A. – Mairaj G. – Arif M. – Fida M. – Bibi S.: 2008a. Assessment of different crop nutrient management practices for yield improvement. *Australian Journal of Crop Science*. 2: 150–157
- Ali R. – Iqbal J. – Tahir G. R. – Mahmood T.: 2008b. Effect of 3,5-dimethylpyrazole and nitrapyrin on nitrification under high soil temperature. *Pakistan Journal of Botany*. 40(3): 1053-1062.
- Alma A. – Lessio F. – Reyneri A. – Blandino M.: 2005. Relationships between *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) feeding activity, crop technique and mycotoxin contamination of maize kernel in northwestern Italy. *International Journal of Pest Management*. 51: 165-173. doi: 10.1080/09670870500179698
- Alscher R.G.: 2002. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*. 2002, 53, 1331–1341.
- Antoniou P. – Hamilton J. – Koopman B. – Jain R. – Holloway B. – Lyberatos G. – Svoronos S. A.: 1990. Effect of temperature and pH on the effective maximum specific growth rate of nitrifying bacteria. *Water Research*. 24(1), 97–101. doi:10.1016/0043-1354(90)90070-m
- Araújo S. S. – Beebe S. – Crespi M. – Delbreil B. – González E. M. – Gruber V. – Lejeune-Henaut I. – Linkh W. – Monterosi M. J. – Pratsj E. – Raoc I. – Vadezk V. – Patto

- M. C. V.: 2015. Abiotic Stress Responses in Legumes: Strategies Used to Cope with Environmental Challenges. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 34(1-3), 237–280. doi:10.1080/07352689.2014.898450
- Arora N.K.: 2019. Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainable*. 2019, 2, 95–96
- Azhar E. S. – Cleemput O. V. – Verstraete W.: 1989. The effect of sodium chlorate and nitrapyrin on the nitrification mediated nitrosation process in soils. *Plant and Soil*. 116: 133-139.
- Barbosa R. H. – Tabaldi L. A. – Miyazaki F. R. – Pilecco M. – Kassab S. O. – Bigaton D.: 2013. Foliar copper uptake by maize plants: Effects on growth and yield. *Ciência Rural*. 2013, 43, 1561–1568.
- Barel D. – Black C. A.: 1979. Foliar application of P. II. Yield responses of corn and soybeans sprayed with various condensed phosphates and P-N compounds in greenhouse and field experiments. *Apron. J.* 71, 21-24
- Baron J. S. – Hall E. K. – Nolan B. T. – Finlay J. C. – Bernhardt E. S. – Harrison J. A. – Chan F. – Boyer W.: 2013. The interactive effects of excess reactive nitrogen and climate change on aquatic ecosystems and water resources of the United States. *Biogeochemistry* 114:71–92. doi: 10.1007/s10533-012-9788-y
- Bassi D. – Menossi M. – Mattiello L.: 2018. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Scientific Reports* .2018, 8, 2327.
- Basso B. – Dumont B. – Cammarano D. – Pezzuolo A. – Marinello F. – Sartori L.: 2016. Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. *Science of The Total Environment*. 545-546, 227–235. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.12.1
- Battilani P. – Toscano P. – Van der Fels-Klerx H. – Moretti A. – Camardo Leggieri M. – Brera C. – Rortais A. – Goumperis T. – Robinson T.: 2016. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*. 6: 24328. doi: 10.1038/srep24328
- Beever R. E. – Bollard E. G.: 1970. The nature of the stimulation of fungal growth by potato extract. *The Journal of General Microbiology*. 60: 273-279. doi: 10.1099/00221287-60-2-273
- Bergman W.: 1979. Termesztett növények táplálkozási zavarainak előfordulása és felismerése. Budapest, Mezőgazdasági Kiadó
- Berzsenyi Z.: 2009. A nitrogen műtrágyázás hatásának vizsgálata a kukorica (*Zea mays* L.) hibridek növekedésére Richards-függvényekkel. *Növénytermelés*. 58.2.5-21.
- Beyer W.F. – Fridovich I.: 1987. Assaying for superoxide dismutase activity: Some large consequences of minor changes in conditions. *Analytical Biochemistry*. 1987, 161, 559–566. doi: 10.1016/0003-2697(87)90489-1.
- Bindraban P. S. – Dimkpa C. – Nagarajan L. – Roy A.: 2015. Rabbinge, R. Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils*. 2015, 51, 897–911
- Bocz E. – Nagy J.: 2003. A kukorica nagy termésének feltételei. *Gyakorlati Agrofórum Extra*, 2:2-3.
- Bocz E.: 1976. Trágyázási útmutató. Mezőgazda Kiadó. Budapest. 2. 257.

- Bocz E.: 1985. A trágyázás (tápanyagellátás) szerepe hazánk mezőgazdaságában. DATE Kiadványa. Debrecen.
- Bocz E.: 1992. Szántóföldi növénytermesztés. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Brankov M. – Simi'c M. – Dolijanovi'c Ž. – Rajkovi'c M. – Mandi'c V. – Dragi'cevi'c V.: 2020. The Response of Maize Lines to Foliar Fertilizing. *Agriculture*. 2020, 10, 365.
- Briggs G. G.: 1975. The behavior of the nitrification inhibitor „N-Serve” in broadcast and incorporated application to soil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 26:1083-1092.
- Broadbent F. E. – Carlton A. B.: 1978. Field trials with isotopically labelled nitrogen. In: Nitrogen in the environment. Nielsen D. R. Macdonald J. G. (szerk.) Academic Press. New York, USA. 1-41.
- Bronson K. F. – Mosier A. R.: 1993. Effect of Nitrogen Fertilizer and Nitrification Inhibitors on Methane and Nitrous Oxide Fluxes in Irrigated Corn. In: Oremland R.S. (szerk.) Biogeochemistry of Global Change. *Springer*. Boston, MA. doi: 10.1007/978-1-4615-2812-8_15
- Bueno P. – Varela J. – Gimenez-Gallego G. – del Rio L.A.: 1995. Peroxisomal copper, zinc superoxide dismutase. *Plant Physiology*. 108, 1151-1160.
- Bundy L. G. – Bremmer J. M.: 1973. Inhibition of nitrification in soils. *Soil Science Society of America Journal*. 37:396-398.
- Búzás I.: 1983. A növény-táplálás zsebkönyve. Budapest, Magyarország: Mezőgazdasági Kiadó
- Cai W. W. – Ai T. C. – Li R. – Jin Z. Y. – Xu J. G. – Cao K. K.: 2018. Effects of controlled release fertilizer and urea additive on photosynthetic characteristics and yield of double cropping rice. *Soil and Fertilizer Sciences in China* 3, 54–60. (in Chinese).
- Cairns J.E. – Hellin J. – Sonder K. – Araus J.L. – MacRobert J.F. – Thierfelder C. – Prasanna B.M.: 2013. Adapting maize production to climate change in sub-Saharan Africa. *Food Security*. 2013, 5, 345–360.
- Cambui C. A. – Svennerstam H. – Gruffman L. – Nordin A. – Ganeteg U. – Näsholm T.: 2011. Patterns of Plant Biomass Partitioning Depend on Nitrogen Source. *PLoS ONE* 2011, 6, e19211.
- Cameron K. C. – Haynes R. J.: 1986. Retention and movement of nitrogen in soils. In: R. J. Haynes (szerk.): *Mineral Nitrogen in the Plant-Soil System*, pp. 166-241. Academic Press, Orlando, Fla. (1986).
- Cameron K.C. – Di H.J. – Moir J.L.: 2013. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. *Annals of Applied Biology*. 2013, 162, 145–173.
- Cantarella H. – Trivelin P. C. O. – Contin T. M. – Dias F. L. F. – Rossetto R. – Marcelino R. – Coimbra R. B. – Quaggio J. A.: 2008. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. *Scientific Agriculture*. 65: 397-401.
- Cantarella H.: 2007. Nitrogênio. In: Novais, R.F. de, Venegas, V.H.A., Barros, N.F. De, Fontes, R.L., Cantarutti, R.B. and Neves, J.C.L., Eds., *Fertilidade do Solo*. 1st ed., Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Vicosa, MG, Brazil, 375-470.

- Carillo P. – Gibon Y.: 2011. Extraction and Determination of Proline. Prometheus Wiki 2011.
- Available online: <https://prometheuswiki.rsb.anu.edu.au/tiki-pagehistory.php?page=Extraction%20and%20determination%20of%20proline&preview=14> (accessed on 17 March 2022)
- Carter G.A. – Knapp A.K.: 2001. Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany*. 2001, 88, 677–684.
- Chancy H. F. – Kamprath E. J.: 1987. Effect of nitrapyrin rate on nitrification in soils having different organic matter contents. *Soil Science*. 144:29-35.
- Chen D. – Suter H. C. – Islam A. – Edis R.: 2010. Influence of nitrification inhibitors on nitrification and nitrous oxide (N₂O) emission from a clay loam soil fertilized with urea. *Soil Biology & Biochemistry*. 42: 660-664.
- Chen M. – Chen Y. – Dong S. – Lan S. – Zhou H. – Tan Z. – Li X.: 2018. Mixed nitrifying bacteria culture under different temperature dropping strategies: Nitrification performance, activity, and community. *Chemosphere* 195, 800–809. doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.12.129
- Claussen W. – Brückner B. – Krumbein A. – Lenz F.: 2006. Long-term response of tomato plants to changing nutrient concentration in the root environment. The role of proline as an indicator of sensory fruit quality. *Plant Science*. 2006, 171, 323–331.
- Congreves K. A. – Dutta B. – Grant B. B. – Smith W. N. – Desjardins R. L. – Wagner-Riddle C.: 2016. How does climate variability influence nitrogen loss in temperate agroecosystems under contrasting management systems? *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 227, 31–41. doi: 10.1016/j.agee.2016.04.025.
- Cramer M.D. – Hawkins H.-J. – Verboom G.A.: 2009. The importance of nutritional regulation of plant water flux. *Oecologia* 2009, 161,15–24
- Cui M. – Sun X. – Hu C. – Di H. J. – Tan Q. – Zhao C.: 2011. Effective mitigation of nitrate leaching and nitrous oxide emissions in intensive vegetable production systems using a nitrification inhibitor, dicyandiamide. *Journal of Soils Sediments*. 11: 722-730.
- Csajbók J. – Kutasy E. – Pepó P.: 2014. The water use efficiency of maize depending on abiotic stress factors in field experiments. *Columella: Journal of Agricultural and Environmental Sciences*. 1. doi: 10.18380/szie.colum.2014.1.1.23
- Cserhádi S. – Kosutány T.: 1887. A Trágyázás Alapelvei. Országos Gazdasági Egyesület Könyvkiadó. Budapest.
- Dai Z. – Yu M. – Chen H. – Zhao H. – Huang Y. – Su W. – Xia F. – Chang S.C. – Brookes P.C. – Dahlgren R.A. – Xu J.: 2020. Elevated temperature shifts soil N cycling from microbial
- Davies B. – Coulter J. A. – Paliari P. H.: 2020. Timing and rate of nitrogen fertilization influence maize yield and nitrogen use efficiency. *Plos One*. 15, e0233674. doi: 10.1371/journal.pone.0233674
- Dawar K. – Sardar K. – Zaman M. – Müller C. – Sanz-Cobena A. – Khan A. – Borzouei A. – Pérez-Castillo A. G.: 2021. Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and

- the plant growth regulator gibberellic acid on yield-scale nitrous oxide emission in maize fields under hot climatic conditions. *Pedosphere*, 31(2), 323–331. doi:10.1016/s1002-0160(20)60076-5
- De Mendiburu F. Agricolae*: Statistical Procedures for Agricultural Research; R Package Version 1.3-5. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae> (accessed on 10 August 2021).
- Debreczeni B.*: 1973. A Tápanyag- És Vízellátás Főbb Összefüggéseinek Agrokémiai Vonatkozásai. Doktori Értekezés. MTA Tmb. Budapest.
- Debreczeniné – Szlovák S.*: 1985. A Kukorica Nitrogénfelvételének Tanulmányozása 15-N Jelzett Műtrágyával. II: Magyar Növényvédelmi Kongresszus. MTA Szegedi Biológiai Központ, 7. 2-4:11.
- DeForest J. L. – Otuya R. K.*: 2020. Soil nitrification increases with elevated phosphorus or soil pH in an acidic mixed mesophytic deciduous forest. *Soil Biology and Biochemistry*. 107716. doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107716
- Degenhardt R. F. – Juras L. T. – Smith L. R.*: 2016. Application of nitrapyrin with banded urea, urea ammonium nitrate, and ammonia delays nitrification and reduces nitrogen loss in Canadian soils. *Crop Forage Turfgrass Manage.* 8, 1-11. doi: 10.2134/cftm2016.03.0027)
- Di H. J. – Cameron K. C.*: 2007. Nitrate leaching losses and pasture yields as affected by different rates of animal urine nitrogen returns and application of a nitrification inhibitor - a lysimeter study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 79: 281-290.
- Dimpka C. O. – Fugice J. – Singh U. – Lewis T. D.*: 2020. Development of fertilizers for enhances nitrogen use efficiency – Trends and perspectives. *Science of the Total Environment* 731, 139113. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139113.
- Ding W. X. – Yu H. Y. – Cai Z. C.*: 2011. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain. *Biology and Fertility of Soils*. 47: 91-99. doi: 10.1007/s00374-010-0504-6
- Dittmar H. – Drach M. – Vosskamp R. – Trenkel M. E. – Gutser R. – Steffens G.*: 2009. Fertilizers, 2. Types. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. doi:10.1002/14356007.n10_n01
- Dordas C.*: 2008. Role of Nutrients in Controlling Plant Diseases in Sustainable Agriculture. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*. 28: 33-46. doi:10.1051/agro:2007051
- du Jardin P.*: 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*. 196, 3–14. doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.021
- Dungan G.H.*: 1934. Losses to the corn crop caused by leaf injury. *Plant Physiology*. 9:749–766. doi: 10.1104/pp.9.4.749.
- Elek É. – Kádár I.*: 1980. Állókultúrák és szántóföldi növények mintavételi módszere. Budapest, MÉM Növényvédelmi és Agrokémiai Központ
- Elias E. H. – Flynn R. – Idowu O. J. – Reyes J. – Sanogo S. – Schutte B. J. – Smith R. – Steele C. – Sutherland C.*: 2019. Crop Vulnerability to Weather and Climate Risk: Analysis of Interacting Systems and Adaptation Efficacy for Sustainable Crop Production. *Sustainability*. 11(23), 6619. doi:10.3390/su11236619

- Elstner E. F.: 1982. Oxygen activation and oxygen toxicity. *Annual review of plant physiology*. 33(1), 73-96.
- English E. – Ketterings Q. – Czymmek K. – Gabriel A. – Flis F. – Lawrence J.: 2017. Nitrogen uptake by corn. Agronomy Fact Sheet Series, Fact Sheet: 98. Cornell University, New York, USA
- Fageira N. K. – Barbosa Filho M. P. – Moreira A. – Guimarães C. M.: 2009. Foliar fertilization of crop plants. *Journal of Plant Nutrition*. 32: 1044-1064. doi:10.1080/01904160902872826
- Fageria N.K. – Barbosa Filho M.P. – Moreira A. – Guimaraes C.M.: 2008. Foliar Fertilization of Crop Plants. *Journal of Plant Nutrition*. 2008, 32, 1044–1064. doi: 10.1080/01904160902872826
- Fageria V. D.: 2001. Nutrient interactions in crop plants. *Journal of Plant Nutrition*. 24:1269–1290. doi: 10.1081/PLN-100106981
- Farmer E.E. – Mueller M.J.: 2013. ROS-Mediated Lipid Peroxidation and RES-Activated Signaling. *Annu. Rev. Plant Biology*. 2013, 64, 429–450.
- Ferencz V.: 1976. A levéltrágyázás elméleti alapjai. In: Levéltrágyázás. Szerk. Pecznik J., Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, p. 11-45.
- Fernandez V. – Brown P.H.: 2013. From plant surface to plant metabolism: The uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Frontiers in Plant Science*. 2013, 4, 289
- Fernández V. – Eichert T.: 2009. Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: Current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization. *Critical Reviews In Plant Sciences*. 28:36-68
- Fischl G.: 1995. Kukorica. In: Horváth J. (szerk). A szántóföldi növények betegségei. Mezőgazda Kiadó. Budapest. p. 97.
- Fisk L. M. – Maccarone L. D. – Barton L. – Murphy D. V.: 2015. Nitrapyrin decreased nitrification of nitrogen released from soil organic matter but not amoA gene abundance at high soil temperature. *Soil Biology and Biochemistry*. 88, 214-223. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.05.029
- Folina A. – Tataridas A. – Mavroeidis A. – Kousta A. – Katsenios N. – Efthimiadou A. – Travlos I. S. – Roussis I. – Darawsheh M. K. – Papastylianou P. – Kakabouki I.: 2021. Evaluation of Various Nitrogen Indices in N-Fertilizers with Inhibitors in Field Crops: A Review. *Agronomy*. 11(3), 418. doi: 10.3390/agronomy11030418
- Fonseca A. W. – Westgate M. E.: 2005. Relationship between dessication and viability of maize pollen. *Field Crops Research*. 94: 114-125.
- Forde B. G. – Clarkson D. T.: 1999. Nitrate and ammonium nutrition of plants: Physiological and molecular perspectives. *Advances in Botanical Research*. 30: 1-90.
- Futó Z. – Bence G. – Holes A. – Surányi Sz. – Papp Z.: 2016. Modern plant nutrition in crop production. In: *The Hungarian economy and society in the globalizing world of the 21st century II*. Békéscsaba, Hungary, pp. 148–157. (in Hungarian)
- Fülek Gy. – Sárdi K.: 2014. Tápanyag-gazdálkodás mezőgazdasági mérnököknek. Budapest, Mezőgazda Kiadó

- Garcia D. – Ramos A. J. – Sanchis V. – Marín S.: 2012. Effect of *Equisetum arvense* and *Stevia rebaudiana* extracts on growth and mycotoxin production by *Aspergillus flavus* and *Fusarium verticillioides* in maize seeds as affected by water activity. *International Journal of Food Microbiology*. 153: 21-27. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2011.10.010
- Gautam P. – Lal B. – Tripathi R. – Shahid M. – Baig M.J. – Maharana S. – Puree C. – Nayak A.K.: 2016. Beneficial effects of potassium application in improving submergence tolerance of rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental and Experimental Botany*. 2016, 128, 18–30
- Ge T.-D. – Sun N.-B. – Bai L.-P. – Tong C.-L. – Sui F.-G.: 2012. Effects of drought stress on phosphorus and potassium uptake dynamics in summer maize (*Zea mays*) throughout the growth cycle. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2012, 34, 2179–2186.
- Gelderblom W. C. – Jaskiewicz K. – Marasas W. F. – Thiel P. G. – Horak R. M. – Vleggaar R. – Kriek N. P.: 1988. Fumonisin--Novel Mycotoxins with Cancer-Promoting Activity Produced by *Fusarium Moniliforme*. *Applied and Environmental Microbiology*. 54 (7): 1806–11. doi:10.1128/aem.54.7.1806-1811.1988.
- Getmanec A. J. – Kljavzo Sz. P.: 1981. Vlijnie mineral'nih udobrenij na kacsentvo Zerna Kukuruzü, *Agrohimija*, Moskva, 2. sz. 146-153.
- Giacometti C. – Mazzon M. – Cavani L. – Ciavatta C. – Marzadori C.: 2020. A Nitrification Inhibitor, Nitrapyrin, Reduces Potential Nitrate Leaching through Soil Columns Treated with Animal Slurries and Anaerobic Digestate. *Agronomy*. doi:10.3390/agronomy10060865
- Giannakoula A. – Moustakas M. – Mylona P. – Papadakis I. – Yupsanis T.: 2008. Aluminum tolerance in maize is correlated with increased levels of mineral nutrients, carbohydrates and proline, and decreased levels of lipid peroxidation and Al accumulation. *Journal of Plant Physiology*. 2008;165:385–396. doi: 10.1016/j.jplph.2007.01.014.
- Giannopolitis C.N. – Ries S.K.: 1977. Superoxide Dismutases. *Plant Physiology*. 1977, 59, 309–doi: 10.1104/pp.59.2.309.
- Gilsanz C. – Baez D. – Misselbrook T. H. – Dhanoa M. S. – Cardenas L. M.: 2016. Development of emission factors and efficiency of two nitrification inhibitors, DCD and DMPP. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 216, 1–8. doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.030
- Giskin M. – Santos A. T. – Etchevers J. D.: 1984. Decreasing fertilizer inputs by use of foliar application of essential nutrients. *Proceedings, Int. Symposium of Plant Nutrition*. Montpellier, France, Vol. I, pp. 239-242
- González-Camejo J. – Viruela A. – Ruano M.V. – Barat R. – Seco A. – Ferrer J.: 2019. Dataset to assess the shadow effect of an outdoor microalgae culture. *Data in Brief* 25, 104143.
- Goos R. J. – Johnson B. E.: 1999. Performance of Two Nitrification Inhibitors Over a Winter with Exceptionally Heavy Snowfall. *Agronomy Journal*, 91(6), 1046. doi:10.2134/agronj1999.9161046x

- Goud P.B. – Kachole M.S.: 2012. Antioxidant enzyme changes in neem, pigeonpea and mulberry leaves in two stages of maturity. *Plant Signaling & Behavior*. 2012, 7, 1258–1262.
- Göring H. – Thien B.H.: 1979. Influence of Nutrient Deficiency on Proline Accumulation in the Cytoplasm of Zea mays L. Seedlings. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*. 1979;174:9–16. doi: 10.1016/S0015-3796(17)30541-3.
- Gu Y. – Wu L. – Hu Z.: 2018. Inhibitory effect of soil pH value and moisture on soil nitrification by nitrapyrin application. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 8, 132–138. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.08.017
- Gu Y. – Yun X. – Zhang X. – Tu S., – Sun X. – Lindström K.: 2008. Effect of Different Fertilizer Treatments on Quantity of Soil Microbes and Structure of Ammonium Oxidizing Bacterial Community in a Calcareous Purple Paddy Soil. *Agricultural Sciences in China*. 7(12), 1481–1489. doi:10.1016/s1671-2927(08)60406-x
- Gu Y. – Wu L. H. – Liu Y. L. – Zhang X. – Wang Z. J.: 2013. A preliminary study on the inhibitory effect of nitrapyrin formulations on soil nitrification. *Journal of Agro-Environment Science*. 32(2), 251-258.
- Guo B. Z. – Ji X. Y. – Ni X. Z. – Fountain J. C. – Li H. – Abbas H. K. – Lee R. D. – Scully B. T.: 2016. Evaluation of maize inbred lines for resistance to pre-harvest aflatoxin and fumonisin contamination in the field. *The Crop Journal*. 5: 259-264. doi: 10.1016/j.cj.2016.10.005
- Gupta M. – Gupta V. – Kumar R. – Sharma B. C.: 2020. Techniques for enhancing nitrogen use efficiency in cereal crops. In: *Three major dimensions of life: Environment, Agriculture and Health*. Prayagraj, India, pp. 44–53.
- Gupta N. – Debnath S. – Sharma S. – Sharma P. – Purohit J.: 2017. Role of Nutrients in Controlling the Plant Diseases in Sustainable Agriculture. In: *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture* (Meena V., Mishra P., Bisht J., Pattanayak A., eds) Springer, Singapore, pp. 217-262
- Gupta U. C. – Kening W. U. – Siyuan L.: 2008. Micronutrients in soils, crops, and livestock. *Earth Science Frontiers*. 15(5):110-125
- Hanway J. J.: 1969. Defoliation Effects on Different Corn (Zea mays, L.) Hybrids as Influenced by Plant Population and Stage of Development1. *Agronomy Journal*. 61(4), 534. doi:10.2134/agronj1969.0002196200
- Harris J.I. – Auffret A.D. – Northrop F.D. – Walker J.E.: 2005. Structural Comparisons of Superoxide Dismutases. *European Journal of Biochemistry*. 2005;106:297–303. doi: 10.1111/j.1432-1033.1980.tb06023.x
- Heath R.L. – Packer L.: 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. *Archives of Biochemistry and Biophysics*. 1968, 125, 189–198.
- Henry S. H. – Bosch F. X. – Troxell T. C. – Bolger P. M.: 1999. Reducing liver cancer – global control of aflatoxin. *Science*. 286: 2453-2454. doi: 10.1126/science.286.5449.2453
- Hess L. J. T. – Hinckley E. S. – Robertson G. P. – Matson P. A.: 2020. Rainfall intensification increases nitrate leaching from tilled but no-till cropping systems

- in the U.S. *Midwest. Agriculture, Ecosystems & Environment*. 290, 106747. doi: 10.1016/j.agee.2019.106747
- Huang T. – Ju X. – Yang H.: 2017. Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management. *Scientific Reports* 7, 42247. doi.org/10.1038/srep42247.
- Huber D. M. – Warren H. L. – Nelson D. W. – Tsai C. Y. – Ross M. A. – Mengel D.: 1982. Evaluation of nitrification inhibitors for no-till corn. *Soil Science*. 134: 388-394.
- Hummel I. –Pantin F. –Sulpice R. –Piques M. –Rolland G. –Dauzat M. – Christophe A. Pervent M. –Bouteillé M. –Stitt M. – Gibon Y. – Muller B.: 2010. Arabidopsis Plants Acclimate to Water Deficit at Low Cost through Changes of Carbon Usage: An Integrated Perspective Using Growth, Metabolite, Enzyme, and Gene Expression Analysis. *Plant Physiology*. 2010, 154, 357–372.
- Hutchinson H. B. – Miller N. H. J.: 1911. The direct assimilation of inorganic and organic forms of nitrogen by higher plants. *Centbl. Bakt.* II 30, 513-547.
- Ivanov K. – Tonev T. – Nguyen N. – Peltekov A. – Mitkov A.: 2019. Impact of foliar fertilization with nanosized zinc hydroxy nitrate on maize yield and quality. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2019, 597–604.
- Jain M. – Mathur G. – Koul S. – Sarin N.: 2001. Ameliorative effects of proline on salt stress-induced lipid peroxidation in cell lines of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Plant Cell Reports*. 2001, 20, 463–468.
- Jakab P. – Zoltan G. – Komarek L.: 2016. The effects of foliar fertilization on the yield and generative factors of maize. Review. *Agriculture and Rural Development*. 2016, 5, 158–161.
- Jenkins M.T.: 1941. Influence of Climate and Weather on Growth of Corn. In Yearbook of Agriculture: Climate and Man; USDA and USDA Forest Serv.: Washington, DC, USA, 1941.
- Jia Z. – von Wirén N.: 2020. Signaling pathways underlying nitrogen-dependent changes in root system architecture: from model to crop species. *Journal of Experimental Botany*. 71(15), 4393–4404. doi: 10.1093/jxb/eraa033
- Jiang Z.W. – Lin W.X. – Li Y.Z. – Zhuo C.Y. – Yang H.J. – Xie H.A.: 2005. Effects of nitrogen fertilizer rates on some physiological characteristics of ratoon rice. Fujian. *Jorunal of Agricultural Sciences*. 2005, 20, 168–171.
- Jones R.J. – Quattar R.S. – Crookstone R.R.: 1984. Thermal environment during endosperm cell division and grain filling in maize: effects on kernel growth and development in vitro. *Crop Science*. 1984., 24, 1: 133-137
- Ju X. T. – Kou C. L. – Zhang F. S. – Christie P.: 2006. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environtal Pollution*. 2006, 143, 117–125.
- Kádár I.: 1982. Talajművelésünk műtrágyaigényét befolyásoló néhány tényező. *Növénytermelés*. 31:269-280.
- Kádár I.: 2016. *A növény táplálás alapelvei és módszerei*. Budapest, Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete

- Keeney D. R.: 1986. Inhibition of nitrification in soils. In: Prosser JI (szerk.) *Nitrification*, Oxford, Egyesült Királyság: IRL Press, 99-115.
- Keerthisinghe D. G. – Freney J. R. – Mosier A. R.: 1993. Effect of wax-coated calcium carbide and nitrapyrin on nitrogen loss and methane emission from dry-seeded flooded rice. *Biology and Fertility of Soils*. 16: 71-75.
- Keszthelyi S. – Nowinszky L. – Puskás J.: 2013. The growing abundance of *Helicoverpa armigera* in Hungary and its areal shift estimation. *Open Life Sciences*. 8(8). doi:10.2478/s11535-013-0195-0
- Keszthelyi S.: 2018. A változó klíma és termesztéstechnológia hatása a szántóföldi kultúrák kártevőire. Agrofórum Kiadó. ISBN: 978-615-00-3040-1 p. 8-13.
- Klein R.N. – Shapiro C. A.: 2011. Evaluating hail damage to corn. EC126. Univ. Nebraska- Lincoln Ext., Lincoln.
- Kothari A. – Lachowicz J.: 2021. Roles of Brassinosteroids in Mitigating Heat Stress Damage in Cereal Crops. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021, 22, 2706.
- KSH (Központi Statisztikai Hivatal): 2019. Főbb Növénykultúrák Terméseredményei.
- Kumar V. – Naresh R. K. – Kumar S. – Kumar S. – Kumar A. – Gupta R. K. – Rathore R. S. – Singh S. P. – Dwivedi A. – Tyagi S. – Mahajan N. C.: 2018. Efficient nutrient management practices for sustaining soil health and improving rice-wheat productivity: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 7: 585-597
- Kundu P. – Goel K. – Zinta G.: 2022. Nutritional imbalance in plants under rising atmospheric CO₂. *Plant Nutrition and Food Security in the Era of Climate Change*. 513–536. doi: 10.1016/b978-0-12-822916-3.00006-8
- Kusvuran S. – Kiran S. – Ellialtıoglu S.S.: 2016. Antioxidant Enzyme Activities and Abiotic Stress Tolerance Relationship in Vegetable Crops. In *Abiotic and Biotic Stress in Plants Recent Advances and Future Perspectives*; InTech Open: Rijeka, Croatia, 2016.
- Kutasy E. – Csajbók J.: 2014. Photosynthesis Of Maize (*Zea Mays* L.) Regarding To Nutrient Supply. *Analele Universităţii Din Oradea, Fascicula Protecţia Mediului* Vol. Xxi, 2014
- Larcher W.: 1987. Streß bei Pflanzen. *Naturwissenschaften* 74, 158–167 (1987). doi:10.1007/BF00372919
- Lawlor D.W. – Mengel K. – Kirkby E.A.: 2004. Principles of plant nutrition. *Annals of Botany*. 2004, 93, 479–480
- Lehtovirta-Morley L. E. – Verhamme D. T. – Nicol G. W. – Prosser J. I.: 2013. Effect of nitrification inhibitors on the growth and activity of *nitrosotalea devanattera* in culture and soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 62, 129-133. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.01.020)
- Li J. – Shi Y. – Luo J. – Zaman M. – Houlbrooke D. – Ding W. – Ledgard S. – Ghani A.: 2014. Use of nitrogen process inhibitors for reducing gaseous nitrogen losses from land-applied farm effluents. *Biology and Fertility of Soils*. 50: 133-145.

- Li X. – Takahashi T. – Suzuki N. – Kaiser H.M.: 2011. The impact of climate change on maize yields in the United States and China. *Agricultural Systems*. 2011, 104, 348–353.
- Li Y. T. – Li X. Y. – Xiao Y. – Zhao B. Q. – Wang L. X.: 2009a. Advances in study on mechanism of foliar nutrition and development of foliar fertilizer application. *Scientia Agricultura Science* 42:162–172 (in Chinese). doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2009.01.020
- Li X. – Zhang X. – Hua X. – Cai Z. – Yagi K.: 2009b). Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy soil as influenced by timing of application of hydroquinone and dicyandiamide. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 85:31–40
- Li Z. – Jiang H. – Qin Y. – Yan H. – Jiang X. – Qin Y.: 2021. Nitrogen deficiency maintains the yield and improves the antioxidant activity of *Coreopsis tinctoria* Nutt. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 2021, 85, 1492–1505
- Ling F. – Silberbush M.: 2002. Response of maize to foliar vs. soil application of nitrogen-phosphorus-potassium fertilizers. *Journal of Plant Nutrition*. 2002, 25, 2333–2342.
- Liu T. – Liang Y. – Chu G.: 2017. Nitrapyrin addition mitigates nitrous oxide emissions and raises nitrogen use efficiency in plastic-film-mulched drip-fertigated cotton field. *Plos One*. 12, e0176305. doi: 10.1371/journal.pone.0176305
- Loch J. – Nosticzius Á.: 1983. Alkalmazott kémia. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest. Gupta
- Loch J.: 1999. A nitrogéntrágyázás. In: Fülek Gy. (szerk). Tápanyag-gazdálkodás. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 235–241.
- Louarn G. – Bedoussac L. – Gaudio N. – Journet E.P. – Moreau D. – Steen Jensen E. – Justes E.: 2021. Plant nitrogen nutrition status in intercrops– a review of concepts and methods. *European Journal of Agronomy*. 124, 126229. doi: 10.1016/j.eja.2021.126229
- Lynch J.P. – St.Clair S.B.: 2004. Mineral stress: The missing link in understanding how global climate change will affect plants in real world soils. *Field Crops Research*. 2004, 90, 101–115
- Maisello M. – Stomma S. – Ghionna V. – Logrieco A. F. – Moretti A.: 2019. In vitro and in-field response of different fungicides against *Aspergillus flavus* and *Fusarium* species causing ear rot disease of maize. *Toxins*. 11: 11. doi: 10.3390/toxins11010011
- Malhi S. S. – McGill W. B.: 1982. Nitrification in three Alberta soils: Effect of temperature, moisture and substrate concentration. *Soil Biology and Biochemistry*. 14(4): 393–399.
- Mandic V. – Krnjaja V. – Tomic Z. – Bijelic Z. – Simic A. – Ruzic Muslic D. – Gogic M.: 2015. Nitrogen fertilizer influence on wheat yield and use efficiency under different environmental conditions. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2015, 75, 92–97.
- Marasas W. F. O. – Miller J. D. – Riley R. T. – Visconti. A.: 2001. Fumonisin occurrence, toxicology, metabolism and risk assessment. *Fusarium: Paul E Nelson Memorial Symposium*. 2001:332–359.

- Marchese S. – Polo A. – Ariano A. – Velotto S. – Costantini S. – Severino L.: 2018. Aflatoxin B1 and M1: Biological properties and their involvement in cancer development. *Toxins*. 10: 214. doi: 10.3390/toxins10060214
- Martinka M. – Vaculík M. – Lux A.: 2014. Plant Cell Responses to Cadmium and Zinc. In *Applied Plant Cell Biology: Cellular Tools and Approaches for Plant Biotechnology*, Plant Cell Monographs; Nick, P., Opatrny, Z., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; pp. 209–246.
- Martins M. R. – Sant'Anna S. A. C. – Zaman M. – Santos R. C. – Monteiro R. C. – Alves B. J. R. – Jantalia C. P. – Boddey R. M. – Urquiaga S.: 2017. Strategies for the use of urease and nitrification inhibitors with urea: Impact on N₂O and NH₃ emissions, fertilizer- 15 N recovery and maize yield in a tropical soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 247, 54–62. DOI. 10.1016/j.agee.2017.06.021
- McLellan E. L. – Cassman K. G. – Eagle A. J. – Woodbury P. B. – Sela S. – Tonitto C. – Marjerson D. R. – Es H. M.: 2018. The nitrogen balancing act: Tracking the environmental performance of food production. *Bioscience*. 68, 1h94–203.
- Meisinger J. J. – Delgado J.A.: 2002. Principles for managing nitrogen leaching. *Journal of Soil and Water Conservation*. 57 (6) 485–498;
- Meisinger J. J. – Randall G. W. – Vitosh M. I. (szerk.): 1980. Nitrification Inhibitors – Potential and Limitations. Madison, USA: American Society of Agronomy, ASA Special Publication 38.
- Mengel K. – Kirkby E. A.: 2004. Principles of plant nutrition. *Annals of Botany*, Volume 93, Issue 4. doi: 10.1093/aob/mch063
- Mengutay M. – Ceylan Y. – Kutman U.B. – Cakmak I.: 2013. Adequate Magnesium Nutrition Mitigates Adverse Effects of Heat Stress on Maize and Wheat. *Plant and Soil* 368: 57–72. doi: 10.1007/s11104-013-1761-6
- Menyhért Z.: 1985. A kukoricatermesztés kézikönyve. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
- Miller A.-F. – Yikilmaz E. – Vathyam S.: 2009. 15N-NMR characterization of His residues in and around the active site of FeSOD. *Biochim. Biophys. Biochimica et Biophysica Acta - Proteins and Proteomics*. 2010;1804:275–284. doi: 10.1016/j.bbapap.2009.11.009.
- Mittler R.: 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in plant science*. 7(9), 405–410.
- Monge-Muñoz M. – Urquiaga S. – Müller C. – Cambronero-Heinrichs J. C. – Zaman M. – Chinchilla-Soto C. – Borzouei A. – Dawar K. – Rodríguez-Rodríguez C. E. – Pérez-Castillo A. G.: 2021. Nitrapyrin effectiveness in reducing nitrous oxide emissions decreases at low doses of urea in an Andosol. *Pedosphere*. 31, 303–313, doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60072-8.
- Moran R. – Porath D.: 1980. Chlorophyll Determination in Intact Tissues Using N, N-Dimethylformamide. *Plant Physiology*. 1980, 65, 478–479. doi: 10.1104/pp.65.3.478.
- Mousavi S. R.: 2011. Zinc in crop production and interaction with phosphorus. *Australian Journal Of Basic And Applied Sciences*. 5: 1503–1509

- Munkvold G. P. – Desjardins A. E.: 1997. Fumonisin in maize: Can we reduce their occurrence? *Plant Disease Journal*. 1997;81:556–565. doi: 10.1094/PDIS.1997.81.6.556.
- Myhre G. – Shindell D. – Bréon F.-M. – Collins W. – Fuglestad J. – Huang J. – Koch D. – Lamarque J.-F. – Lee D. – Mendoza B. – Nakajima T. – Robock A. – Stephens G. – Takemura T. – Zhang H.: 2013. Anthropogenic and natural radiative forcing. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. In: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Eds), Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp 659–740.
- Nagy J. – Kovács J.: 2005. A Gyümölcsfák nem fertőző betegségei és talajművelésük. Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum. Center-Print Kft. 2005
- Nagy J. – Sárvári M.: 2005. Gabonafélék. In: Antal J (szerk.) *Növénytermesztés* 1. Budapest, Magyarország. Mezőgazda Kiadó, 301-328.
- Nagy J.: 2021. Kukorica. A nemzet aranya – Élelmiszer, takarmány, bioenergia. Szaktudás Kiadó. Budapest, 2021. 18 p. ISBN: 978-963-575-002-3
- Nagy P. – Szabó T. – Soltész M. – Nyéki J. – Szabó Z.: 2011. A csapadékos időjárás hatása az almaültetvény tápanyagfelvételére és -ellátottságára. *“KÍLMA-21” Füzetek* 64, 22-26.
- Näsholm T. – Kielland K. – Ganeteg U.: 2009. Uptake of organic nitrogen by plants. *New Phytologist*. 182(1), 31-48.
- Németh T.: 1996. Talajaink szervesanyag-tartalma és nitrogénforgalma. MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete, Budapest, 382 p.
- Noein B. – Soleymani A.: 2021. Corn (*Zea mays* L.) Physiology and Yield Affected by Plant Growth Regulators under Drought Stress. *J. Plant Growth Regulation*. 2021, 1–10.
- Noreen S. – Fatima Z. – Ahmad S. – Athar H.R. – Ashraf M.: 2018. Foliar Application of Micronutrients in Mitigating Abiotic Stress in Crop Plants. *Plant Nutrition. Abiotic Stress Toler.* 2018, 95–117.
- Norton J. – Ouyang Y.: 2019. Controls and Adaptive Management of Nitrification In Agricultural Soils. *Frontiers in Microbiology*. doi:10.3389/fmicb.2019.01931
- Nozari R. – Hadidi Masouleh E. – Borzouei A. – Sayfzadeh S. – Eskandari A.: 2020. Investigating the effect of different tillage methods and nitrapyrin on increasing nitrogen utilization efficiency on physiological and biochemical traits in different wheat cultivars. *Archives of Pharmacy Practice*. 2020, 11, 134–150.
- Ogbomo L. K. E. – Eghrevba R. K. A.: 2009. Effect of planting density and NPK fertilizer application on yield and yield compounds of tomato in forest location. *World Journal of Agricultural Sciences*. 5: 152–158
- Omara P. – Aula L. – Oyebiyi F. – Raun W. R.: 2019. World Cereal Nitrogen Use Efficiency Trends: Review and Current Knowledge. *Agrosystems, Geosciences & Environment*. 2(1), 1–doi: 10.2134/age2018.10.0045
- Osman K. T.: 2013. Plant nutrients and soil fertility management. In: Osman KT (2013) *Soils*. Dordrecht, Hollandia: Springer. 129-159.

- Pakurár M. – Nagy J. – Jagendorf S.: 2004. Fertilisation and irrigation effects on maize (*Zea mays* L.) grain production. *Cereal Research Communication*. 32(1): 151-158.
- Panison F. – Sangoi L. – Durli M. M. – Leolato L. S. – Coelho A. E. – Kuneski H. F. – de Liz V. O.: 2019. Timing and splitting of nitrogen side-dress fertilization of early corn hybrids for high grain yield. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 43, e0170338. doi: 10.1590/18069657rbcs20170338
- Papp Z.: 2014. The role and impact of N-Lock (N-stabilizer) to the utilization of N in the main arable crops. *Acta Agraria Debreceniensis*. 62: 51-55.
- Pecznik J.: 1976. A fotoszintézis és környezeti tényezők. *Levéltrágyázás*. Budapest, Mezőgazdasági Kiadó. 5-7. 163.
- Peng J. – Feng Y. – Wang X. – Li J. – Xu G. – Phonenasay S. – Luo Q. – Han Z. – Lu W.: 2021. Effects of nitrogen application rate on the photosynthetic pigment, leaf fluorescence characteristics, and yield of indica hybrid rice and their interrelations. *Scientific Reports*. 2021, 11, 7485.
- Pepó P. – Ruzsányi L. – Kiss I.: 2000. A kukorica hibridspecifikus trágyázása. *Gyakorlati Agroforum*. 11(3): 51-52.
- Pepó P. – Vad A. – Berényi S.: 2006. Néhány agrotechnikai tényező hatása a kukorica termésmennyiségére. *Agroforum*. Extra 13 33-35, 2006.
- Pepó P.: 2001. A genotípus és a vetésváltás szerepe a kukorica tápanyagellátásában csernozjom talajon. *Növénytermelés*. 50(2-3): 189-202.
- Perry J.J.P. – Shin D.S. – Getzoff E.D. – Tainer J.A.: 2010. The structural biochemistry of the superoxide dismutases. *Biochim. Biophys. Biochimica et Biophysica Acta - Proteins and Proteomics*. Hess 2010;1804:245–262. doi: 10.1016/j.bbapap.2009.11.004
- Phillips L. A. – Schef C. R. – Fridman M. – O'Halloran N. – Armstrong R. D. – Mele P. M.: 2015. Organic nitrogen cycling microbial communities are abundant in a dry Australian agricultural soil. *Soil Biology & Biochemistry*. 86: 201-211.
- Piccini C. – Di Bene C. – Farina R. – Pennelli B. – Napoli R.: 2016. Assessing nitrogen use efficiency and nitrogen loss in a forage-based system using a modeling approach. *Agronomy*. 6, 23. doi:10.3390/agronomy6020023
- Pittelkow C.M. – Clover M.W. – Hoeft R.G. – Nafziger E.D. – Warren J.J. – Gonzini L.C. – Greer K.D.: 2017. Tile drainage nitrate losses and corn yield response to fall and spring nitrogen management. *Journal of Environmental Quality* 46, 1057–1064. doi: 10.2134/jeq2017.03.0109
- Plett D. C. – Ranathunge K. – Melino V. J. – Kuya N. – Uga Y. – Kronzucker H. J.: 2020. The intersection of nitrogen nutrition and water use in plants: new paths toward improved crop productivity. *Journal of Experimental Botany*. 71(15), 4452–4468. doi: 10.1093/jxb/eraa049
- Powell S. J. – Prosser J. I.: 1986. Inhibition of ammonium oxidation by nitrapyrin in soil and liquid culture. *Applied and Environmental Microbiology*. 52(4): 782-787.

- Provez K. – Memon M. Y. – Imtiaz M. – Aslam M.: 2009. Response of wheat to foliar and soil application of urea at different growth stages. *Pakistan Journal of Botany*. 41: 197–204
- Pusztai A.: 1980. Adatok a kiegyensúlyozatlan tápanyagellátás hatására kukoricán. *Mezőgazdaság kemizálása*. 179. I:162-168
- Rácz D. – Radócz L.: 2020a. Beneficial changes in corn's health condition and biomass production due to nitrapyrin treatment. In. XXIII. Tavasz Szél Tanulmánykötet. Association of Hungarian PHD and DLA Students, Budapest. ISBN 9786155586729. doi: 10.23715/TSZ.2020
- Rácz D. – Radócz L.: 2020b. The impact of applying foliar fertilizers on the health condition of maize. *Acta Agraria Debreciensis*. 2020-1. doi: 10.34101/actaagrar/1/3769
- Randall G. W. – Mulla D. J.: 2001. Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agricultural practices. *Journal of Environmental Quality*. 30:337–344. doi: 10.2134/jeq2001.302337x
- Ranum P. – Peña-Rosas J.P. – Garcia-Casal M.N.: 2014. Global Maize Production, Utilization, And Consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2014 Apr; 1312:105-12. doi: 10.1111/Nyas.12396. Epub 2014 Mar 20. Pmid: 24650320.
- Rátonyi T. – Ragán P. – Sulyok D. – Vántus A. – Csatári N. – Nagy J. – Harsányi E.: 2018. Evaluation of strip tillage systems in maize production in Hungary. *Conference: International Society of Precision Agriculture (ISPA)*
- Redemann C. T. – Meikle R. W. – Widofsky J. G.: 1964. The loss of 2-chloro-6-(trichloromethyl)pyridine from soil. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 12:207-209.
- Reid L. M. – Zhu X. – Ma B. L.: 2001. Crop Rotation and Nitrogen Effects on Maize Susceptibility to Gibberella (*Fusarium graminearum*) Ear Rot. *Plant and Soil* 237: 1-14. doi: 10.1023/A:1013311703454
- Ren B. – Hu J. – Zhang J. – Dong S. – Liu P. – Zhao B.: 2020. Effects of urea mixed with nitrapyrin on leaf photosynthetic and senescence characteristics of summer maize (*Zea mays* L.) waterlogged in the field. *Journal of Integrative Agriculture*. 2020, 19, 1586–1595
- Ren B. Z. – Zhang J. W. – Dong S. T. – Liu P. – Zhao B. – Li H.: 2017. Nitrapyrin improves grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize waterlogged in the field. *Agronomy Journal*. 109, 185-192. doi:10.2134/agronj2016.06.0353)
- Rengel Z.: 2015. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2015, 15, 397–409.R
- Rerkasem B. – Sangruan P. – Prom-u-thai C. T.: 2015. Effect of polishing time on distribution of monomeric anthocyanin, iron and zinc content in different grain layers of four Thai purple rice varieties. *International Journal of Agriculture and Biology*. 17: 828–832
- Reuveni R. – Reuveni M.: 1998. Foliar-fertilizer therapy - a concept in integrated pest management. *Crop Protection*. 17 (2):111-118

- Rhaki A. S. – Prakash C. S.: 2019. Dissipation of nitrapyrin (nitrification inhibitor) in subtropical soils. *Polish Journal Of Soil Science* Vol. Lii/2 2019 Pl Issn 0079-2985 doi: <http://org.10.17951/Pjss/2019.52.2.173>
- Rhodes D. – Nadolska-Orczyk A. – Rich P.J.: 2018. Salinity, Osmolytes and Compatible Solutes. *Salinity: Environment - Plants - Molecules*. 2021:181–204. doi: 10.1007/0-306-48155-3_9.
- Robertson A.E. – G.P. – Munkvold C.R. – Hurburgh – Ensley S.: 2011. Effects of natural hail damage on ear rots, mycotoxins, and grain quality characteristics of corn. *Agronomy Journal*. 103:193– 199. doi:10.2134/agronj2010.0276
- Rochette P. – Worth D. E. – Lemke R. L. – Mcconkey B. G. – Pennock D. J. – Wagnerriddle C. – Desjardins R. L.: 2008. Estimation of N₂O emissions from agricultural soils in Canada. I. Development of a country-specific methodology. *Canadian Journal of Soil Science*. 88: 655-669.
- Rodgers G.A.: 2008. Nitrification inhibitors in agriculture. *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering*, 21(7): 701-722.
- Rosa Junior O. F. – Dalcin M. S. – Nascimento V. L. – Haesbaert F. M. – Ferreira T. – Fidelis R. R. – Sarmento R. A. – Aguiar R. – Oliveira E. E. – Santos G.: 2019. Fumonisin production by *Fusarium verticillioides* in maize genotypes cultivated in different environments. *Toxins* 11: 215. doi: 10.3390/toxins11040215
- Ruzsányi L.: 1975. A növények evapotranszpirációjának vizsgálata különböző tápanyagellátási szinten. Kandidátusi disszertáció. MTA TMB. Budapest.
- Sajedi N.A. – Ardakani M.R. – Naderi A. – Madani H. – Mashhadi Akbar Boobar M.: 2009. Response of Maize to Nutrients Foliar Application under Water Deficit Stress. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 2009; 4:242–248. doi: 10.3844/ajabssp.2009.242.248.
- Sawyer J. E. – Barker D. W. – Lundvall J. P.: 2016. Impact of nitrogen application timing on corn production. In: *Proc. 46th North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference*. Des Moines, USA, pp. 55–60.
- Schlüter U. – Mascher M. – Colmsee C. – Scholz U. – Bräutigam A. – Fahnenstich H. – Sonnewald U.: 2012. Maize Source Leaf Adaptation to Nitrogen Deficiency Affects Not Only Nitrogen and Carbon Metabolism But Also Control of Phosphate Homeostasis. *Plant Physiology*. 2012, 160, 1384–1406.
- Schulthess F. – Cardwell K. F. – Gounou S.: 2002. The effect of endophytic *Fusarium verticillioides* on infestation of two maize varieties by lepidopterous stemborers and coleopteran grain feeders. *Phytopathology*. 92: 120-128. doi: 10.1094/phyto.2002.92.2.120
- Selye H.: 1936. A syndrome produced by diverse nocuous agents. *Nature*. 138: 32. doi: 10.1038/138032a0
- Singh A. K. – Gohain I.: 2017. Integrated crop management to enhance vegetable productivity and farm income through INM and IPM practices. *The Asian Journal of Horticulture*. 12: 165-168. doi: 10.15740/HAS/TAJH/12.1/165-168
- Singh G. – Nelson K. A.: 2019. Pronitridine and nitrapyrin with anhydrous ammonia for corn. *Journal of Agriculture Sciences* 11, 13–24. doi.: 10.5539/jas.v11n4p13

- Slangen J. H. G. – Kerkhoff P.: 1984. Nitrification inhibitors in agriculture and horticulture: a literature review. *Fertilizer Research*. 5: 1-76.
- Solomon S. – Qin D. – Manning M. – Chen Z. – Marquis M. – Averyt K. B. – Tignor M. – Miller H. L. (szerk.): 2007. *Climate Change 2007: the Physical Science Basis*. Cambridge, Egyesült Királyság: Cambridge University Press
- Southworth J. – Randolph J.C. – Habeck M. – Doering O.C. – Pfeifer R.A. – Rao D.G. – Johnston J.J.: 2000. Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the midwestern United States. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2000, 82, 139–158.
- Sowinski J. – Głab L.: 2018. The effect of nitrogen fertilization management on yield and nitrate contents in sorghum biomass and bagasse. *Field Crops Research*. 2018, 227, 132–143.
- Syswerda S. P. – Basso B. – Hamilton S. K. – Tausig J. B. – Robertson G. P.: 2012. Long-term nitrate loss along an agricultural gradient in the Upper Midwest USA, *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 149, 10–19. doi:10.1016/j.agee.2011.12.007
- Szabó I. M.: 1986. Az általános talajtan biológiai alapjai. Budapest, Magyarország: Mezőgazdasági Kiadó
- Szabó I. M.: 2008. Az általános talajtan biológiai alapjai. Budapest, Magyarország: Mezőgazda Kiadó
- Szalóki S.: 1988. Az öntözéses növénytermesztés alapjai. 33-71. In: Az öntözéses gazdálkodás újabb kutatási eredményei. ÖKI. Szarvas.
- Széles A. – Rátonyi T. – Harsányi E.: 2019. Effect of differential fertilisation treatments on maize hybrid quality and performance under environmental stress condition in Hungary. *Maydica*, 64.2:1-14. (2019)
- Széles A.: 2021. Kukorica. A nemzet aranya – Élelmiszer, takarmány, bioenergia. Nagy J. (szerk.) Szaktudás Kiadó Ház Zrt. Budapest. ISBN: 978-963-575-002-3
- Szigeti Z.: 1998. Növények és a stressz. In: Növényélettan. A növényi anyagcsere II. kötet. Szerk: Láng Ferenc ELTE Eötvös Kiadó 1998; 915-983
- Tao R. – Li J. – Guan Y. – Lian Y. – Hu B. – Lv J. – Chu G.: 2018. Effects of urease and nitrification inhibitors on the soil mineral nitrogen dynamics and nitrous oxide (N₂O) emissions on calcareous soil. *Environmental Science and Pollution Research*. 25(9): 9155–9164.
- Tarighaleslami M. – Zarghami R. – Mashhadi M. – Boojar A. – Oveysi M.: 2012. Effects of Drought Stress and Different Nitrogen Levels on Morphological Traits of Proline in Leaf and Protein of Corn Seed (*Zea mays* L.) *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. 2012;12:49–56.
- Taylor A. E. – Myrold D. D. – Bottomley P. J.: 2019. Temperature affects the kinetics of nitrite oxidation and nitrification coupling in four agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*. 136, 107523. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107523
- Tejada M. – Rodríguez-Morgado B. – Paneque P. – Parrado J.: 2018. Effects of foliar fertilization of a biostimulant obtained from chicken feathers on maize yield. *European Journal of Agronomy*. 2018, 96, 54–59.

- Thapa R. – Chatterjee A. – Awale R. – McGranahan D.A. – Daigh A.: 2016. Effect of enhances efficiency fertilizers on nitrous oxide emissions and crop yields: A meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*. 80, 1121–1134. doi: 10.2136/sssaj2016.06.0179
- Thathana M. G. – Murage H. – Abia A. L. K. – Pillay M.: 2017. Morphological characterization and determination of aflatoxin-production potentials of *Aspergillus flavus* isolated from maize and soil in Kenya. *Agriculture*. 7: 80. doi: 10.3390/agriculture7100080
- Thomas B. W. – Gao X. – Stoeckli J. L. – Beck R. – Liu K. – Koenig K. M. – Beres B. L. – Hao X.: 2017. Nitrapyrin reduced nitrous oxide emissions from beef cattle urine patches on a semiarid tame pasture. *Soil Science Society of America Journal*. 81, 1537–1547. doi: 10.2136/sssaj2017.04.0123.
- Timmons D. R. – Cruse R.M.: 1990. Effect of fertilization method and tillage on nitrogen – 15 recovery by corn. *Agronomy*. J.82.4:777-784
- Tisdale S. L. – Nelson W. L.: 1966. A talaj termékenység és a trágyázás. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, pp.493.
- Tóth Z.: 2002. A fejtrágyázás jelentősége. *Agro Napló*. 6.3: 55-56.
- Touchton J. T. – Hoeft R.G. – Welch L. F. – Argyilan W. L.: 1979. Loss of nitrapyrin from soils as affected by pH and temperature. *Agronomy Journal*. 71(5): 865–869.
- Touchton J. T. – Boswell F. C.: 1980. Performance of nitrification inhibitors in the Southeast. In: Nitrification inhibitors–potentials and limitations, (szerk.): J.J. Meisinger, G.W. Randall and M.L. Vitosh, ASA Special Publication No. 38. American Society of Agronomy. Madison, pp. 63-74.
- Vanelli T. – Hooper A. B.: 1992. Oxidation of nitrapyrin to 6-chloropicolinic acid by the ammonia-oxidizing bacterium *Nitrosomonas europaea*. *Applied and Environmental Microbiology*. 58: 2321-2325.
- Ványiné Széles A.: 2010. Evaluation of the level of N supply in maize hybrids at different nutritional levels. *Acta Agronomica Hungarica*, 58(Supplement 1), 89–94. doi: 10.1556/AAgr.58.2010.Suppl.1.13
- Vetsch J. A. – Scherder E. F. – Ruen D. C.: 2017. Does liquid swine manure application timing and nitrapyrin effect corn yield and inorganic soil nitrogen? *Soil Fertility & Crop Nutrition*. 109, 2358–2370. doi: 10.2134/agronj2017.03.0163
- Vitousek P. M. – Naylor R. – Crews T. – David M. B. – Drinkwater L. E. – Holland E. – Johnes P. B. – Katzenberger J. – Martinelli L. A. – Matson P.A. – Nziguheba G. – Ojima D. – Palm C. A. – Robertson G. P. – Sanchez P. A. – Townsend A. R. – Zhang F. S.: 2009. Nutrient Imbalances in Agricultural Development. *Science*. 324(5934), 1519–1520. doi:10.1126/science.1170261
- Wang H. – Shu D. – Liu D. – Liu S. – Deng N. – An S.: 2020. Passive and active ecological restoration strategies for abandoned farmland leads to shifts in potential soil nitrogen loss by denitrification and soil denitrifying microbes. *Land Degradation & Development*. 31(9), 1086–1098. doi: 10.1002/ldr.3523
- Wang J. H. – Li H. P. – Zhang J. B. – Wang B. T. – Liao Y. C.: 2014. First report of *Fusarium* maize ear rot caused by *Fusarium kyushuense* in China. *Plant Disease*. 98: 279-279. doi: 10.1094/pdis-05-13-0558-pdn

- Waraich E. – Ahmad R. – Ashraf M.Y.: 2011. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian Journal of Crop Sciences*. 2011, 5, 764–777
- Watson C. J. – Akhonzada N. A. – Hamilton J. T. G. – Matthews D. I.: 2008. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Use Manage.* 24: 246–253.
- Watson S. W. – Valos F. W. – Waterbury J. B.: 1981. The Family *Nitrobacteraceae*. In: Starr MP, Stolp H, Trüper HG, Balows A, Schlegel HG (szerk.) *The Prokaryotes*. Berlin, Nyugat-Németország: Springer-Verlag
- Wellburn A.R.: 1990. The Spectral Determination of Chlorophylls *a* and *b*, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *J. Plant Physiology*. 1994, 144, 307–313. doi: 10.1016/s0176-1617(11)81192-2.
- Wheeler T. R. – Vraufurd P. Q. – Ellis R. H. – Porter J. R. – Vara Prasad P.: 2000. Temperature variability and the yield of annual crops. *Agricultural Ecosystems and Environment*. 82: 159–167.
- White P. J. – Broadley M. R.: 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist*. 2009, 182, 49–84
- Wolt J. D.: 2000. Nitrapyrin behavior in soils and environmental considerations. *Journal of Environmental Quality*. 29: 367–379.
- Wolt J. D.: 2004. A meta-evaluation of nitrapyrin agronomic and environmental effectiveness with emphasis on corn production in the midwestern USA. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 69, 23–41. doi: 10.1023/B:FRES.0000025287.52565.99)
- Woodward E.E. – Hladik M.L. – Kolpin D.W.: 2016. Nitrapyrin in streams: The first study documenting off-field transport of a nitrogen stabilizer compound. *Environmental Science & Technology Letters*. doi: 10.1021/acs.estlett.6b00348
- Woodward E. E. – Edwards T. M. – Givens C. E. – Kolpin D. W. – Hladik M. L.: 2021. Widespread Use of the Nitrification Inhibitor Nitrapyrin: Assessing Benefits and Costs to Agriculture, Ecosystems, and Environmental Health. *Environmental Science & Technology*. 2021, 55, 3, 1345–1353. doi.org/10.1021/acs.est.0c05732
- Xiong D. – Chen J. – Yu T. – Gao W. – Ling X. – Li Y. – Peng S. – Huang J.: 2015. SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Scientific Reports* 5: 13389. doi: 10.1038/srep13389
- Xu H. – Twine T.E. – Girvetz E.: 2016. Climate Change and Maize Yield in Iowa. *PLoS ONE*. 2016, 11, e0156083.
- Xu R. – Cai Y. – Wang X. – Li C. – Liu Q. – Yang Z.: 2020. Agricultural nitrogen flow in a reservoir watershed and its implications for water pollution mitigation. *Journal of Cleaner Production*. 267, 122034. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122034
- Yang M. – Fang Y. – Sun D. – Shi Y.: 2016. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3,4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis. *Scientific Reports*. 6: 22075.

- Yang Z. – Wang Z. – Yang C. – Yang Z. – Li H. – Wu Y.: 2019. Physiological responses and small RNAs changes in maize under nitrogen deficiency and resupply. *Genes & Genomics*. 2019, 41, 1183–1194.
- Yasar F. – Kusvuran S. – Ellialtioglu S.: 2006. Determination of antioxidant activities in some melon (*Cucumis melo* L.) varieties and cultivars under salt stress. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. Volume. Biotechnol. 2006, 81, 627–630.
- Yates C. N. – Varickanickal J. – Cousins S. – Wootton B.: 2016. Testing the ability to enhance nitrogen removal at cold temperatures with *C. aquatilis* in a horizontal subsurface flow wetland system. *Ecological Engineering*. Volume 94., p.344-351. doi.: 10.1016/J.ECOLENG.2016.05.064
- Yosefi K. – Galavi M. – Ramrodi M. – Mousavi S. R.: 2011. Effect of biophosphate and chemical phosphorus fertilizer accompanied with micronutrient foliar application on growth, yield and yield components of maize (Single Cross 704). *Australian Journal of Crop Science*. 5: 175– 180
- Yue K. – Li L. – Xie J. – Fudjoe S.K. – Zhang R. – Luo Z. – Anwar S.: 2021. Nitrogen Supply Affects Grain Yield by Regulating Antioxidant Enzyme Activity and Photosynthetic Capacity of Maize Plant in the Loess Plateau. *Agronomy* 2021, 11, 1094.
- Zaman M. – Saggar S. – Blennerhassett J. D. – Singh J.: 2009. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil Biology and Biochemistry*. 41: 1270-1280.
- Zhang B. – Li Q. – Cao J. – Zhang C. – Song Z. – Zhang F. – Chen X.: 2017. Reducing nitrogen leaching in a subtropical vegetable system. *Agriculture, Ecosystem & Environment*. 2017, 241, 133–141.
- Zhang Z. – Gao Q. –Xie Z. – Yang J. –Liu J.: 2020. Adsorption of nitrification inhibitor nitrapyrin by humic acid and fulvic acid in black soil: characteristics and mechanism. *Royal Society Open Science*. Volume 7, Issue 9. doi.: 10.1098/rsos.200259
- Zhang X. – Shangguan Z.: 2011. Effects of nitrogen fertilization on leaf photosynthesis and respiration of different drought-resistance winter wheat varieties. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*. *Journal of Applied Ecology*. 2011, 17, 2064–2069.
- Zhongmin D. – Yu M. – Chen H. – Zhao H. – Huang Y. – Su W. – Xia F. – Chang S.X. – Brookes F.C. – Dahlgren R.A. – Xu, J.: 2020. Elevated temperature shifts soil N cycling from microbial immobilization to enhanced mineralization, nitrification and denitrification across global terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 26, 5267–5276. doi: 10.1111/gcb.15211
- Zhong-Qing Z. – Qiang G. – Jing-Min Y. – Yan W. – Jing-Yi Y. – Xue Z. – Guo-Zhong F. – Zhi-Qiang C. – Shao-Jie W. – Hong-Ge S.: 2020. Fabrication and release behaviour of nitrapyrin microcapsules: Using modified melamine-formaldehyde resin as shell material. *The Science of the Total Environment*. 704, 135394. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135394

- Zhou J. – Gu B. – Schlesinger W. H. – Ju X.: 2016. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands. *Scientific Reports*. 2016, 6, 25088.
- Zhou Z. H. – Wang B. – Li J. L. – Wan Y. F. – Hasbagan G. – Cai W. W. – Rong R. – Zhou S. H. – Muhammad A. W.: 2017. Interrelations of CO₂ exchange in daytime, leaf area, and biomass with different nitrogen fertilizers applied in a double-rice cropping system. *Journal of Agro-Environment Science* 36, 2143–2152. (in Chinese).
- Zuber M. S. – Calvert O. H. – Kwolek W. F. – Lillehoj E. B. – Kang M. S.: 1978. Aflatoxin B1 production in an eight-line diallel of *Zea mays* infected with *Aspergillus flavus*. *Phytopathology*. 68: 1346. doi: 10.1094/Phyto-68-1346
- Zsigrai Gy.: 2006. Műtrágyázás. In: Birkás M (ed.) Földművelés és Földhasználat. Budapest, Magyarország: Mezőgazda Kiadó, 203-228.

Internetes források:

- EPA.: 2014. Overview of Greenhouse Gases. United States Environmental Protection Agency, URL: <https://www.epa.gov/report-environment/greenhouse-gases> [Utolsó letöltés ideje: 2022.02. 08.]
- KSH.: 2019a. A debreceni meteorológiai állomás adatai. 2019. Központi Statisztikai Hivatal. Elérhető: https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_evkozi/e_met002.html
- KSH.: 2019b. Megfigyelés. 2019. Központi Statisztikai Hivatal. Elérhető: https://www.met.hu/idojaras/aktualis_idojaras/megfigyeles/
- OMSZ.: 2019. Országos meteorológia szolgálat. Agrometeorológia. Elérhető: <https://www.met.hu/idojaras/agrometeorologia/>
- OMSZ.: 2020. Országos meteorológia szolgálat. Agrometeorológia. Elérhető: <https://www.met.hu/idojaras/agrometeorologia/>
- OMSZ.: 2021. Országos meteorológia szolgálat. Agrometeorológia. Elérhető: <https://www.met.hu/idojaras/agrometeorologia/>
- OMSZ.: 1981-2010. Országos meteorológiai szolgálat. Elérhető: https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/varosok_jellemzoi/Debrecen/

12. MELLÉKLETEK

1. melléklet – Talajminták nitrátion-tartalmának meghatározása Nitrat 2000 (Stelzner, Németország) nitrátion-szelektív elektróda segítségével

- a talajminták tömegállandóságig történő szárítását követően a nitrátion szelektív elektróda kétpontos kalibrálása standard oldatokkal;
- 100 g vízmentes talajminta 100 ml timsó oldatban (10 m/v % kálium-alumínium-szulfát) történő kevertetése (30 perc), majd ülepítése;

- a folyadék fázis nitrátion tartalmát a szűrőpapíron való elválasztást követően az ionszelektív nitrát elektróda segítségével mértük;
- a kapott értékeket mg/L dimenzióban adtuk meg.

2. *melléklet:* A kukorica levelek tápelemtartalmának eredményei a kísérleti években (I.)

	Kezelések	N	P	K	Ca	Mg	S		
2019. év	HD-19	Kt	20200 ± 1010	2090 ± 92 ^b	21740 ± 870	8930 ± 670	1680 ± 126 d	1980 ± 198 e	
		Np	29300 ± 1465	2990 ± 118	20890 ± 839	7260 ± 545	1750 ± 131 d	2220 ± 222	
2020. év	KF-20	Kt	35200 ± 1760	3420 ± 137	18970 ± 758	5520 ± 414	1270 ± 95 ^d	2810 ± 281	
		Np	33800 ± 1690	3210 ± 128	18930 ± 757	4910 ± 491	1280 ± 96 d	2410 ± 241	
		Lt	35200 ± 1760	3250 ± 130	19710 ± 788	5810 ± 435	1350 ± 101 ^d	2560 ± 256	
		Np + Lt	35600 ± 1780	3250 ± 130	17670 ± 706	4650 ± 465	1030 ± 77 ^d	2440 ± 244	
	BK-20	Kt	23900 ± 1195 ^a	2170 ± 87 ^b	17700 ± 708	4230 ± 317	1560 ± 117 ^d	1480 ± 148 ^e	
		Np	26700 ± 1335 ^a	2420 ± 97 ^b	17880 ± 715	3690 ± 277	1330 ± 100 ^d	1700 ± 170 ^e	
		Lt	26300 ± 1315 ^a	2210 ± 88 ^b	16630 ± 665 ^c	3990 ± 299	1500 ± 113 ^d	1590 ± 159 ^e	
		Np + Lt	26300 ± 1315 ^a	2410 ± 96 ^b	16370 ± 655 ^c	4360 ± 327	1550 ± 116 ^d	1900 ± 190 ^e	
		Np ⁺	28100 ± 1405 ^b	2510 ± 100	17100 ± 684	4220 ± 317	1650 ± 124 ^d	1840 ± 184 ^e	
	2021. év	AG-21	Kt	20000 ± 1000	1750 ± 70 ^b	19790 ± 792	7880 ± 591	4430 ± 332	1390 ± 139 ^e
			Np	17900 ± 895 ^a	1410 ± 56 ^b	12560 ± 502 ^c	8890 ± 667	6280 ± 471	1200 ± 120 ^e
			Lt	18900 ± 945 ^a	1770 ± 71 ^b	14170 ± 567 ^c	8720 ± 654	5040 ± 378	1350 ± 135 ^e
			Np + Lt	16900 ± 845 ^a	1280 ± 51 ^b	14070 ± 563 ^c	9030 ± 677	7030 ± 527	1360 ± 136 ^e
BK-21		Kt	24100 ± 1205 ^a	2120 ± 85 ^b	10080 ± 403 ^c	6200 ± 465	8400 ± 630	1700 ± 170 ^e	
		Np	24100 ± 1205 ^a	2240 ± 90 ^b	10160 ± 406 ^c	7350 ± 551	7940 ± 596	1870 ± 187 ^e	
		Lt	22900 ± 1145 ^a	2120 ± 85 ^b	11640 ± 466 ^c	5900 ± 443	7190 ± 539	1750 ± 175 ^e	
		Np + Lt	24900 ± 1245 ^a	2450 ± 98	13150 ± 526 ^c	5580 ± 419	6570 ± 493	1710 ± 171 ^e	
		Np ⁺	23300 ± 1165 ^a	2140 ± 86 ^b	10960 ± 438 ^c	6160 ± 462	6790 ± 509	1600 ± 160 ^e	
KF-21	Kt	25400 ± 1270 ^a	2390 ± 96 ^b	20120 ± 805	5340 ± 401	2590 ± 194	2220 ± 222		
	Np	21600 ± 1080 ^a	1610 ± 64 ^b	12390 ± 496 ^c	9260 ± 695	5750 ± 431	1710 ± 171 ^e		
	Lt	24400 ± 1220 ^a	1970 ± 79 ^b	18300 ± 732	5940 ± 446	3850 ± 289	1790 ± 179 ^e		
	Np + Lt	22200 ± 1110 ^a	1620 ± 65 ^b	10820 ± 433 ^c	8930 ± 670	4730 ± 355	1700 ± 170 ^e		

A táblázat kezelésenként 20 független levélszövet elemtartalmának (mg kg⁻¹ száraztömeg) átlagát és szórását tartalmazza. A különböző kisbetűkkel jelölt mennyiségek nem érik el az adott tápelemre vonatkozó kritikus ellátottsági szintet (Elek és Kádár, 1980): ^a—28000 mg kg⁻¹, ^b—2500 mg kg⁻¹, ^c—17000 mg kg⁻¹, ^d—2100 mg kg⁻¹; ^e—2100 mg kg⁻¹; Kt: kezeletlen; Np: nitrápyrin (vetés előtt); Lt: lombtrágya; Np+Lt: nitrápyrin (vetés előtt) + lombtrágya; Np⁺: nitrápyrin (vetés után).

3. *melléklet:* A kukorica levelek tápelemtartalmának eredményei a kísérleti években (II.)

		Kezelések	B	Cu	Fe	Mn	Zn
2019. év	HD-19	Kt	24,0 ± 3,2	61,0 ± 5,2	261,2 ± 13,1	277,2 ± 14,0	21,0 ± 1,0 ^g
		Np	22,1 ± 3,1	48,4 ± 4,4	138,0 ± 7,0	154,0 ± 8,0	20,0 ± 1,0 ^g
2020. év	KF-20	Kt	8,0 ± 1,3	13,6 ± 1,02	153 ± 7,65	63,1 ± 7,65	30,7 ± 1,63
		Np	7,3 ± 0,9	13,1 ± 0,98	138 ± 6,9	53,5 ± 6,9	24 ± 1,2
		Lt	8,4 ± 1,2	13,8 ± 1,03	186 ± 9,3	80,2 ± 9,3	29,9 ± 1,49
		Np + Lt	7,0 ± 0,9	12,0 ± 0,9	143 ± 7,15	49,5 ± 7,15	30,8 ± 1,54
	BK-20	Kt	10,1 ± 1,3	5,6 ± 0,4 ^f	92,8 ± 7,0	47,7 ± 3,6	10,4 ± 0,8 ^g
		Np	9,0 ± 1,1	6,1 ± 0,5	90,8 ± 6,8	49,7 ± 3,7	14,5 ± 1,1 ^g
		Lt	18,3 ± 2,3	6,1 ± 0,5	135 ± 6,8	48,1 ± 3,6	18,3 ± 1,4 ^g
		Np + Lt	16,1 ± 2,0	7,0 ± 0,5	104 ± 5,2	52,6 ± 3,9	17,6 ± 1,3 ^g
		Np ⁺	11,0 ± 1,4	7,4 ± 0,6	115 ± 5,8	53,5 ± 4,0	14,5 ± 1,1 ^g
	AG-21	Kt	25,0 ± 3,1	24,3 ± 1,8	169,3 ± 12,7	109,7 ± 8,2	17,3 ± 1,3 ^g
		Np	21,2 ± 2,7	32,4 ± 2,4	230,2 ± 17,3	88,9 ± 6,7	14,1 ± 1,1 ^g
		Lt	29,1 ± 3,6	46,7 ± 3,5	233,7 ± 11,7	106,2 ± 8,0	16,1 ± 1,2 ^g
		Np + Lt	25,4 ± 3,1	15,3 ± 1,1	162,3 ± 8,1	101,1 ± 7,6	17,1 ± 1,3 ^g
2021. év	BK-21	Kt	40,5 ± 5,1	8,1 ± 0,6	189,5 ± 14,2	63,5 ± 4,8	30,1 ± 2,3
		Np	33,3 ± 4,2	12,1 ± 0,9	123,8 ± 9,3	99,3 ± 7,4	26,1 ± 2,0
		Lt	43,4 ± 5,4	12,7 ± 1,0	168,1 ± 8,4	75,7 ± 5,7	33,6 ± 2,5
		Np + Lt	30,3 ± 3,8	9,1 ± 0,7	108 ± 5,4	75,5 ± 5,7	23,5 ± 1,8
		Np ⁺	45,1 ± 5,6	7,7 ± 0,6	122,8 ± 6,1	87,7 ± 6,6	24,1 ± 1,8
	KF-21	Kt	71,3 ± 8,9	10,6 ± 0,8	196 ± 14,7	96,5 ± 7,1	51,5 ± 3,9
		Np	53,0 ± 6,6	13,4 ± 1,0	190 ± 14,3	83,6 ± 6,3	36,5 ± 2,7
		Lt	86,1 ± 10,8	15,4 ± 1,2	152 ± 7,6	90,7 ± 6,8	61,0 ± 4,6
		Np + Lt	43,4 ± 5,3	12,6 ± 0,9	224 ± 11,2	84,5 ± 6,3	26,5 ± 2,0

4. A táblázat kezelésenként 20 független levélszövet elemtartalmának (mg kg⁻¹ száraztömeg) átlagát és szórását tartalmazza. A különböző kisbetűkkel jelölt mennyiségek nem érik el az adott tápelemre vonatkozó kritikus ellátottsági szintet (Elek és Kádár, 1980): ^f—6 mg kg⁻¹; ^g—25 mg kg⁻¹; Kt: kezeletlen; Np: nitrapyrin (vetés előtt); Lt: lombtrágya; Np+Lt: nitrapyrin (vetés előtt) + lombtrágya; Np⁺: nitrapyrin (vetés után).

12. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN



**DEBRECENI
EGYETEM**

**DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR**

H-4002 Debrecen, Egyetem tér 1, Pf.: 400
Tel.: 52/410-443, e-mail: publikaciok@lib.unideb.hu

Nyilvántartási szám: DEENK/394/2022.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Gila-Rácz Dalma Emese
Doktori Iskola: Kerpely Kálmán Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10068468

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (1)

1. Rácz, D., Radócz, L.: The impact of applying foliar fertilizers on the health condition of maize.
Agrártud. közl. 2 (1), 105-109, 2020. ISSN: 1587-1282.
DOI: <http://dx.doi.org/10.34101/actaagrar/1/3769>

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (3)

2. Rácz, D., Gila, B., Szőke, L., Széles, A.: N-Stabilizer and Foliar Fertilizer Treatments Enhance Tolerance to Specific Pathogens in Maize (*Zea mays* L.).
Agric. conspec. sci. 87 (1), 25-33, 2022. ISSN: 1331-7768.
3. Rácz, D., Szőke, L., Tóth, B., Kovács, B., Horváth, É., Zagyai, P., Duzs, L., Széles, A.: Examination of the Productivity and Physiological Responses of Maize (*Zea mays* L.) to Nitrapyrin and Foliar Fertilizer Treatments.
Plants-Basel. 10 (11), 1-19, 2021. ISSN: 2223-7747.
DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10112426>
IF: 4.658
4. Rácz, D., Gila, B., Horváth, É., Illés, Á., Széles, A.: The efficiency of nitrogen stabilizer at different soil temperatures on the physiological development and productivity of maize (*Zea mays* L.).
Agron. Res. 19 (4), 1888-1900, 2021. ISSN: 1406-894X.
DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.21.146>





További közlemények

Idegen nyelvű, hazai könyvrészletek (1)

5. Rácz, D., Szőke, L., Széles, A.: A nitrapyrin hatása a kukorica (*Zea mays* L.) biomassza gyarapodására és egészségügyi állapotára. Utánközlés másodközlés,
In: Kutatás-fejlesztés-innováció az agrárium szolgálatában II. kötet. Szerk.: Szabó Péter, Simon Brigitta, Soós Adrienn, Faludi Gergely, Fitos Gábor, Doktoranduszok Országos Szövetsége, Budapest, 155-166, 2021. ISBN: 9786155586736

Idegen nyelvű, külföldi könyvrészletek (1)

6. Csüllög, K., Rácz, D., Tarcali, G.: Effectiveness of different fungicides against *Macrophomina phaseolina* in poisoned media technique in vitro.
In: Precision Agriculture and Sustainable Crop Production. Ed.: H. K. Chourasia, K. Acharia, V. K. Singh, Today & Tomorrow's Printers and Publishers, New Delhi, 53-62, 2020. ISBN: 9788170196679

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (3)

7. Szőke, L., Kovács, G. E., Biró, G., Rácz, D., Radócz, L., Takácsné Hájos, M., Kovács, B., Tóth, B.:
Hormonkezelések hatása a golyvásüszög fertőzés tüneteinek mérséklésére.
Növénytermelés. 70 (2), 21-42, 2021. ISSN: 0546-8191.
8. Rácz, D., Radócz, L.: A nitrogén stabilizátor és lombtrágya együttes alkalmazásának hatékonysága a kukorica egészségi állapotára.
Georgicon Agric. 24 (1), 37-42, 2020. ISSN: 0239-1260.
9. Kövics, G., Tarcali, G., Csüllög, K., Rácz, D., Biró, G., Csótó, A., Szarukán, I., Nagy, A., Szanyi, S., Szilágyi, A., Kovács, G. E., Radócz, L.: A szója integrált védelme.
Növényvédelem. 81 (6), 251-275, 2020. ISSN: 0133-0829.

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

10. Rácz, D., Dužs, L., Horváth, É., Zagy, P., Széles, A.: The impact of different soil temperatures on the nitrogen stabilizer efficiency in maize (*Zea mays* L.).
Növénytermelés. 70 (3), 113-115, 2021. ISSN: 0546-8191.
11. Rácz, D., Radócz, L.: Nutrient deficiency and effects of various nutrition technologies on crop health.
Agrártud. Közl. 2, 109-113, 2019. ISSN: 1587-1282.
DOI: <http://dx.doi.org/10.34101/actaagrar/2/3687>





Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

12. Széles, A., Horváth, É., Rácz, D., Duzs, L., Bojtor, C., Huzsvai, L.: Development of stomatal conductance of maize under moderately hot, dry production conditions.
Agron. Res. 19 (4), 2013-2025, 2021. ISSN: 1406-894X.
DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.21.151>
13. Szőke, L., Moloi, M. J., Kovács, G. E., Biró, G., Radócz, L., Takácsné Hájos, M., Kovács, B., Rácz, D., Danter, M., Tóth, B.: The Application of Phytohormones as Biostimulants in Corn Smut Infected Hungarian Sweet and Fodder Corn Hybrids.
Plants-Basel. 10 (9), 1-23, 2021. ISSN: 2223-7747.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/plants10091822>
IF: 4.658

Idegen nyelvű absztrakt kiadványok (5)

14. Rácz, D., Gila, B., Szőke, L., Széles, A.: Examination of natural resistance to specific pathogens in N-stabilizer and foliar fertilizer treated corn (*Zea mays* L.).
In: Plant Protection Conference - 61. Scientific Session of the Institute of Plant Protection : NRI Book of abstract, Instytutu Ochrony Roslin Panstwowego Instytutu Badawczego, Poznan, 113-113, 2021.
15. Szőke, L., Kovács, G. E., Radócz, L., Biró, G., Rácz, D., Kovács, B., Tóth, B.: Impact of corn smut [*Ustilago maydis* (DC.) Corda] sporidium numbers on some physiological parameters of fodder corn in field experiment.
In: Plant Protection Conference - 61. Scientific Session of the Institute of Plant Protection : NRI book of abstracts, Instytutu Ochrony Roslin Panstwowego Instytutu Badawczego, Poznan, 116-116, 2021.
16. Szőke, L., Kovács, G. E., Rácz, D., Biró, G., Radócz, L., Kovács, B., Tóth, B.: Examination of the impact of *Ustilago maydis* infection on some parameters of sweet corn = Az *Ustilago maydis* fertőzés hatásának vizsgálata a csemegekukorica néhány paraméterére.
In: A klímaváltozás kihívásai a következő évtizedekben : 62. Georgikon Napok : Előadások kivonatai, Szent István Egyetem Georgikon Kar, Keszthely, 1, 2020.
17. Csüllög, K., Rácz, D., Tarcali, G.: The Charcoal rot disease (*Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid.) in Hungary.
In: National Seminar on Recent Advances in Fungal Diversity, Plant-Microbes Interaction and Disease Management RFPIDM-2020, Banaras Hindu University, Varanasi, 76-77, 2020.





**DEBRECENI
EGYETEM**

**DEBRECENI EGYETEM
EGYETEMI ÉS NEMZETI KÖNYVTÁR**

H-4002 Debrecen, Egyetem tér 1, Pf.: 400

Tel.: 52/410-443, e-mail: publikaciok@lib.unideb.hu

18. Csüllög, K., Rácz, D., Tarcali, G.: The Charcoal rot disease (*Macrophomina phaseolina*) on sunflower in Hungary.

In: 60. Österreichischen Pflanzenschutztag : Tagungsband, [s.n.], Leibnitz, 67, 2019.

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 9,316

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
4,658**

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudományometriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2022.08.22.



13. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném kifejezni hálámat mindazoknak, akik segítettek kutatómunkám során. Mindenekelőtt köszönettel tartozom témavezetőmnek, **Prof. Dr. Kakuszi-Széles Adrienn** egyetemi tanárnak kitartó támogatásáért, odaadó segítségéért és a doktori értekezés elkészítésében nyújtott tanácsokért. Köszönettel tartozom **Prof. Dr. Nagy János**nak, aki rutinos szakmai rálátásával segítette mindvégig kutatásomat.

Hálával tartozom továbbá a **DE MÉK Földhasznosítási, Műszaki és Precíziós Technológiai Intézet** és a **DE MÉK Növényvédelmi Intézet** valamennyi munkatársának a kísérletek beállításában és végrehajtásában történő alázatos segítségükért.

Külön köszönetet érdemel **Dr. Tóth Brigitta**, a DE MÉK Élelmiszertudományi Intézet munkatársa, valamint **Szőke Lóránt** PhD hallgató és szaktársam a kutatási eredmények publikálásában történő közreműködéséért.

A kísérletek terepi előkészítésében nyújtott segítségéért köszönetet mondok testvéremnek, **Rácz Franciskának**.

Köszönettel tartozom a kutatás során felhasznált anyagok biztosításáért a **Corteva Agriscience** és a **Hed-Land Hungária Kft.** vállalatoknak, különösen **Magyar Péter**nek és **Diriczi László**nak.

A szabadföldi kísérletek helyszíneit az **Agrárgazdaság Kft.**, a **Kurucz Farm Kft.**, a **Hajdúhadházi Bocskai Mezőgazdasági Kft.**, valamint a **DE MÉKE Bemutatókertje** bizottsították, amelyért külön köszönettel tartozom.

Hálásan köszönöm **szüleimnek** és **testvéreimnek** kitartó támogatásukat, folyamatos érdeklődésüket, biztatásukat.

A doktori értekezés elkészítésében végül, de nem utolsó sorban legnagyobb hálámat szeretném kifejezni férjemnek, **Gila Csaba Barnabás**nak, aki a kutatómunkám kezdetétől segítségemre állt, és aki szakmai rálátásával jelentős mértékben hozzájárult a kísérletek sikeres végrehajtásához és a kutatási eredmények publikálásához.

14. NYILATKOZATOK

NYILATKOZAT

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Kerpely Kálmán Doktori Iskola keretében készítettem, a Debreceni Egyetem doktori (Ph.D.) fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 2023.

.....

a jelölt aláírása

NYILATKOZAT

Tanúsítom, hogy doktorjelölt 2018-2022 között a fent megnevezett Doktori Iskola keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben fogalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult, az értekezés a jelölt önálló munkája. Az értekezés elfogadását javaslom.

Debrecen, 2023.

.....

a témavezető aláírása